コンクリート技術シリーズ

土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（361委員会）成果報告書

CONCRETE ENGINEERING SERIES
132

土木学会

コンクリート技術シリーズ

土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（361委員会）成果報告書

CONCRETE ENGINEERING SERIES
132

土木学会

「コンクリート技術シリーズ」は，主に，コンクリート委員会の第 3 種委員会の成果報告書であり，コンクリート委員会が承認した指針，規準ではありません．掲載内容を参照，引用される際には，ご留意下さい．

序

現在，建設分野で研究対象となっているジオポリマー（以下，GP）は，フライアッシュを基本とし，強度増進のためにその一部を高炉スラグ微粉末で置換した系が主流であり，一般のコンクリートに比べて製造時の CO_2 排出量が非常に少ないことや各種副産物を有効利用できることに加えて，強酸，高温に対する抵抗性に優れ，重金属やセシウムなどの有害物質固定能力を有する．これらの特長から，低炭素社会の実現，強酸性や高温などの特殊環境での構造体および補修材としての活用，さらに新たな環境改善技術への発展等が期待されている．

建設分野へのGP技術の適用については，日本コンクリート工学会（JCI）の「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会（2015，2016 年度)」において，(1)検討対象とするGPの範囲や反応メカニズム，(2) GPの力学特性や耐久性などの基本的な材料特性，(3)GPの実施工例などの観点から国内外の最新情報が収集されている．併せて，我が国でGPを普及させるためには，(1)我が国で入手可能な材料を使用した場合の基礎物性の再検討，(2)従来の材料設計法や構造設計法の適用範囲や適用できない場合の対処方法，(3)関連する規準類の制定などの課題があることが示された．

本研究小委員会（以下，361委員会）は，これらの先行の検討成果を踏まえ，(1) 我が国で入手できる材料を使用したGPの基礎物性に関する調査・研究，(2) GPの硬化体特性評価方法に関する研究・調査，(3) GPに対する性能規定型設計法の適用に関する調査・検討，(4)我が国の実情にあったGPに関する規準類制定のための諸外国の情報の整理，などを行うことを目的に2019年8月に発足した．

そして，下記の３つのWGを設けて各課題に取り組んだ．

・WG1：基礎物性・物性評価に関する調査（主査：佐川孝広，副査：新大軌，共通実験主査：佐川康貴）
・WG2：構造設計に関する検討（主査：藤山知加子，副査：千々和伸浩）
・WG3：規準類および放射性廃棄物処理に関する調査（主査：佐川康貴，副査：国枝稔）

WG1では，JCIのGP研究委員会の活動以降の最新研究を重点的に調査した．また，使用材料と配合を統一したモルタルおよびコンクリートに関する共通実験を実施した．共通実験の目的は，フライアッシュ-高炉スラグ微粉末（以下，FA-GGBS）併用系GPの基本特性に関する既往の情報の確認に加えて，レシピの一例を示すことでGPの普及に寄与することにある．なお，共通実験で採用した配合は，製造の経験がない方でも，比較的容易にGPを作ることができることを念頭においたもので，フレッシュ性状は良好で取り扱いやすいが，耐久性に関してはGPが本来有する性能を十分に発揮できない場合もあることを予め了解していただきたい．WG1 の成果は，主として「第Ⅰ編　固化反応メカニズムおよび結合材」，「第Ⅱ編　土木分野へ適用する場合の基礎知識（複合材料の特性)」，「第Ⅲ編　共通実験」で示した．

WG2では，土木学会コンクリートライブラリー152（混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案)）を道しるべとし，従来設計法の GP への適用性を調査・検討すると共に，GP を用いた構造物や部材について性能規定型設計を適用する際の課題を抽出した．セメント系と GP を対比しながら記述することで，GPへの従来法の適用範囲や未整備の項目が，明確になるようにした．WG2の成果は，「第Ⅳ編　使用目的ごとの現状と課題」で示した．

WG3 では，GP の規準類に関する諸外国の状況を調査した．各国とも急ピッチで整備を進めていること，BS 規格（英国国家規格）の PAS（公開仕様書）は我が国での規準類制定の参考になることが分かった．「第Ⅳ編 ６．規格・規準類の例（BS PAS 8820 の場合)」で目次等を紹介した．放射性廃棄物処理に関しては，GP の有用性は期待できるものの，高度な放射性物質固定能力を長期間維持できる性能を保証する必要があり，まずは構造物レベルでの安全性や耐久性を担保できる技術の確立を優先させるべきとの判断のもと，放射性廃棄物処理に特化した議論を深めるには至らなかった．「第Ⅱ編　９．重金属類・放射性物質固定」および「第Ⅳ編　５．有害物質の固定」で関連する知見を示した．

「第Ⅴ編　実施例」で国内および海外での施工例を紹介した．いずれの事例も，前例が極めて少ない中で，関係者による入念な検討と新技術開発に向けた強い意志の結集であり，GP 技術のマイルストーン的存在である．

2021 年度には「(土木学会　重点研究課題）新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究」(以下，233 委員会）が並行して活動した．検討対象を FA-GGBS 併用系 GP を含むアルカリ活性材料全般（AAMs）とし，構造工学，地盤工学，環境工学などの土木工学の他分野の研究者・技術者と協働で，AAMs の社会実装の道筋をつけるための調査研究を行った．361 委員会と 233 委員会が同時期に活動できたことは,我が国の GP を含む AAMs 研究が全方位展開へと舵をきるきっかけとなった点で意義は大きい．なお，成果報告書は土木学会ホームページにて公開されている．
(https://committees.jsce.or.jp/s_research/taxonomy/term/6)

本委員会が活動した 2019 年から 2022 年はコロナウイルスの流行，ロシアによるウクライナ侵攻などにより，世界中が混乱の渦に巻き込まれた．依然として，地球温暖化と激甚化する自然災害，福島原子力発電所事故などへの対応も科学技術に課せられた重要課題である．

一方で，限りある資源問題への対応として，20 世紀のアメリカの建築家バックミンスター・フラーが提唱した「宇宙船地球号」の世界観を改めて新鮮に感じる．英知を結集して困難を乗り越え，力強く未来に向かう人類の姿をイメージできるからであろう．

環境問題を含む「倫理的価値」と「経済的価値」が同等な社会が既に到来している（マルクス・ガブリエル)．つまり，環境問題解決に向けた取り組みは経済発展にもつながる．「環境材料」である GP も新しい世界づくりに貢献できる技術のひとつである．施工実績も着実に増えている．

我が国の GP 研究は，本研究委員会活動により先行国と横並びになった．「改善」,「改良」が得意な日本の出番はこれからである．「宇宙船地球号」の強力な推進エネルギーになりうる GP 技術を，これからは我が国が先導し発展させることを強く望む．その水先案内として，本報告書を活用していただきたい．

最後に，本研究委員会の活動に多大なご尽力をいただいた山本武志幹事長をはじめとする幹事および委員各位に心から感謝の意を表します．

2022 年 12 月

土木学会コンクリート委員会
土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会
委員長　　一宮　一夫

土木学会コンクリート委員会

「土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（361 委員会)」

委員構成

委員長	一宮　一夫	大分工業高等専門学校
幹事長	山本　武志	電力中央研究所
幹事	新　大軌	島根大学
	菊地　道生	電力中央研究所
	国枝　稔	岐阜大学
	佐川　孝広	前橋工科大学
	佐川　康貴	九州大学
	千々和　伸浩	東京工業大学
	畑中　重光	岐阜市立女子短期大学
	藤山　知加子	横浜国立大学
	山口　明伸	鹿児島大学
委員	安　琳	京都大学
	石田　剛朗	ＵＢＥ三菱セメント株式会社
	犬飼　利嗣	岐阜工業高等専門学校
	上原　元樹	鉄道総合技術研究所
	大杉　武史	日本原子力研究開発機構
	小川　由布子	広島大学
	小澤　満津雄	群馬大学
	尾上　幸造	熊本大学
	菊地　俊幸	東京パワーテクノロジー株式会社
	工藤　勇	アドバンエンジ株式会社
	熊谷　慎祐	コニシ株式会社
	合田　寛基	九州工業大学
	小林　聖	鹿島建設株式会社
	Sanjay PAREEK	日本大学工学部
	杉山　知巳	ポゾリスソリューションズ株式会社
	柴山　淳	電力中央研究所
	鈴木　俊一	東京大学
	鈴木　泰博	日揮株式会社
	周藤　将司	松江工業高等専門学校
	高橋　佑介	東京大学
	富井　孝喜	株式会社大林組

委員	花岡　大伸	金沢工業大学
	原田　耕司	西松建設株式会社
	人見　隆	中川ヒューム管工業株式会社
	堀田　太洋	株式会社神戸製鋼所
	前川　明弘	三重県工業研究所
	見上　寿	富士電機株式会社
	緑川　猛彦	福島工業高等専門学校
	皆川　浩	東北大学
	南　浩輔	前田建設工業株式会社
	宮原　茂禎	大成建設株式会社
	宮本　真哉	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	栁下　太志	光洋機械産業株式会社
	依田　侑也	清水建設株式会社
	李　柱国	山口大学

（五十音順，敬称略）

目　次

第Ⅰ編　固化反応メカニズムおよび結合材

１．はじめに……1

２．固化反応メカニズム……3
2.1　概要……3
2.1.1　メタカオリン，フライアッシュ等のケイ素・アルミニウム系材料を活性フィラーとした場合……4
2.1.2　フライアッシュに加え高炉スラグ微粉末を活性フィラーとした場合……6
2.2　反応機構，生成物と諸性質……8
2.2.1　活性フィラーの影響……9
2.2.2　養生温度の影響……9
2.2.3　溶液配合の影響……10
2.3　配合記述の方法の詳細……11
2.4　NMR スペクトルの簡単な見方……14
2.4.1　^{29}Si-NMR スペクトル……14
2.4.2　^{27}AI-NMR スペクトルの見方……18
2.4.3　固体 NMR の見方のまとめ……18
2.5　配合と生成物，諸性質の検討例……19
2.5.1　活性フィラーと溶液配合の影響……19
2.5.2　養生温度による生成物の相違……22
2.6　反応機構のまとめ……24

３．結合材……28
3.1　活性フィラー……28
3.1.1　フライアッシュ……28
3.1.2　高炉スラグ微粉末……29
3.1.3　その他のフィラー……30
3.2　アルカリ溶液……36
3.2.1　ケイ酸ナトリウム（水ガラス），ケイ酸カリウム……36
3.2.2　水酸化ナトリウム（苛性ソーダ），水酸化カリウム（苛性カリ）……36
3.2.3　その他のアルカリ溶液……37
3.3　化学混和剤……40
3.3.1　分散剤……40
3.3.2　凝結遅延剤……40

3.3.3　収縮低減剤……41
3.3.4　まとめ……41

第Ⅱ編　土木分野へ適用する場合の基礎知識（複合材料の特性）

１．はじめに……42

２．製造……43
2.1　配合……43
2.2　練混ぜ……44
2.3　品質変動の抑制に着目した配合・製造方法の最適化……44

３．フレッシュ性状……49
3.1　流動性と分離抵抗性（ワーカビリティー）……49
3.1.1　ジオポリマーの流動性に及ぼすアルカリ活性フィラーの影響……49
3.1.2　ジオポリマーの流動性に及ぼすアルカリ溶液の影響……49
3.1.3　ジオポリマーの流動性に及ぼす添加剤の影響……50
3.1.4　まとめ……50
3.2　凝結時間（可使時間）……52
3.3　ブリーディング・レイタンス……55

４．養生……57
4.1　給熱養生……57
4.1.1　蒸気養生……57
4.1.2　加熱養生……57
4.2　常温養生……58
4.2.1　高炉スラグ微粉末の混和……58
4.2.2　封かん養生……58

５．力学特性……60
5.1　圧縮・曲げ・引張の各強度……60
5.1.1　圧縮強度……60
5.1.2　曲げ強度……61
5.1.3　引張強度……61
5.2　ヤング係数……64
5.3　クリープ……66
5.4　疲労……68
5.5　鋼材との付着……69

5.6　鉄筋コンクリートの挙動 ……71

６．耐久性 ……74
6.1　アルカリシリカ反応 ……74
6.2　中性化（炭酸化） ……77
6.3　鉄筋の腐食 ……81
6.4　エフロレッセンス，白華 ……87
6.5　凍結融解作用 ……91
6.6　硫酸塩 ……93
6.7　塩化物 ……94
6.8　化学物質の影響 ……99
6.9　ひび割れ ……102
6.10　摩耗 ……104
6.11　高温の影響 ……105
6.11.1　一般的特性 ……105
6.11.2　高温環境下における爆裂性状 ……107
6.12　収縮 ……110
6.13　反応熱 ……113
6.14　物質浸透性（透水，透気，塩化物イオン） ……114

７．環境負荷低減 ……120
7.1　はじめに ……120
7.2　ジオポリマー・コンクリートの環境負荷に関する海外の評価結果 ……120
7.3　FA と BFS を活性フィラーとした GP コンクリートの環境負荷（日本の場合） ……121
7.3.1　環境影響の評価方法 ……122
7.3.2　環境負荷と環境影響原単位の整備 ……123
7.3.3　ジオポリマーコンクリートの環境負荷と環境影響の評価例 ……127
7.4　結論 ……128

８．耐酸材料 ……131
8.1　はじめに ……131
8.2　耐酸メカニズムと耐酸性能 ……131

９．重金属類・放射性の物質固定 ……136
9.1　概要 ……136
9.2　ジオポリマー材料における物質の収着 ……136
9.3　ジオポリマー材料が含有する物質の溶出 ……138
9.4　ジオポリマーを利用した重金属固定，汚染水処理例 ……139

第Ⅲ編　共通試験

１．共通試験の目的 …… 143

２．モルタル試験 …… 144
2.1　はじめに …… 144
2.2　予備実験 …… 144
2.2.1　配合条件 …… 144
2.2.2　使用材料・配合 …… 144
2.2.3　作製方法・養生方法 …… 145
2.2.4　結果および考察 …… 146
2.3　共通実験 …… 147
2.3.1　使用材料および配合 …… 147
2.3.2　作製方法 …… 148
2.3.3　フレッシュ性状 …… 154
2.3.4　強度および変形性状 …… 156

３．コンクリート試験 …… 162
3.1　はじめに …… 162
3.2　予備実験 …… 162
3.2.1　配合条件 …… 162
3.2.2　使用材料・配合 …… 163
3.2.3　作製方法・養生方法 …… 164
3.2.4　結果および考察 …… 164
3.3　共通実験 …… 165
3.3.1　使用材料および配合 …… 165
3.3.2　作製方法 …… 165
3.3.3　フレッシュ性状 …… 171
3.3.4　強度および変形性状 …… 172

４．総括および今後の課題 …… 175

第Ⅳ編　使用目的ごとの現状と課題

１．はじめに …… 177

２．補修材 …… 178

2.1　セメント系の場合…… 178
2.1.1　ひび割れの補修 …… 178
2.1.2　断面（欠損）の補修 …… 179
2.1.3　表面の補修…… 179
2.2　ジオポリマーの場合 …… 182
2.2.1　ジオポリマーコンクリートの断面修復への適用…… 182
2.2.2　左官用ジオポリマーおよび吹き付け用ジオポリマー …… 185

３．工場製品…… 190
3.1　セメント系工場製品の性能…… 190
3.1.1　一般…… 190
3.1.2　照査指標…… 190
3.1.3　製品の性能照査試験方法の種類 …… 190
3.1.4　プレキャスト製品の性能試験方法の種類…… 192
3.1.5　用途・構造別コンクリート製品一覧表 …… 191
3.2　ジオポリマー工場製品の性能…… 193
3.2.1　一般…… 193
3.2.2　用途・構造別ジオポリマー製品一覧表 …… 194

４．鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造物（現場製作） …… 196
4.1　設計に用いる示方書，参考となる指針類 …… 196
4.1.1　土木学会コンクリート標準示方書 …… 196
4.1.2　混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針の適用検討…… 197
4.2　性能照査型設計法による曲げに対する設計例…… 199
4.2.1　前提条件…… 199
4.2.2　セメント系コンクリートと GP コンクリートの構造計算比較例 …… 199
4.3　許容応力度法による設計例…… 204
4.3.1　前提条件…… 204
4.3.2　許容応力度法による設計例…… 204
4.3.3　許容応力度法による設計例の注意 …… 207
4.4　せん断に対する設計 …… 208
4.5　プレストレストコンクリート構造…… 209
4.5.1　前提条件…… 209
4.5.2　セメント系コンクリートと GP コンクリートの構造計算比較例 …… 209
4.5.3　ジオポリマーコンクリートを用いた PC 構造物の設計の留意点 …… 212

５．有害物質の固定 …… 214
5.1　セメントによる固定効果 …… 214
5.1.1　C-S-H…… 214

5.1.2　エトリンガイト …… 214
5.2　AAMs による固定効果 …… 214
5.2.1　難溶性物の形状 …… 215
5.2.2　網目構造への科学的固定 …… 215
5.2.3　イオン交換・電化補償 …… 215
5.2.4　物理的閉じ込め …… 215
5.2.5　吸着 …… 216
5.3　放射性廃棄物を対象とした固型化処理の現状 …… 216

６．規格・規準類の例（BS PAS 8820 の場合） …… 218

第Ⅴ編　実施例

１．農業農村整備事業におけるクリークの擁壁への適用 …… 220
1.1　はじめに …… 220
1.2　材料特性の検討 …… 220
1.2.1　材料および配合 …… 220
1.2.2　材料特性検討用の供試体形状および養生 …… 220
1.2.3　圧縮強度特性 …… 221
1.3　擁壁の設計 …… 222
1.3.1　工法検討および結果 …… 222
1.3.2　擁壁の設計諸元 …… 222
1.3.3　ジオポリマー擁壁の形状および大きさ …… 222
1.3.4　擁壁の安定性 …… 223
1.3.5　試験施工および結果 …… 223
1.4　結論 …… 224

２．温泉地域の国道の境界ブロックへの適用 …… 226
2.1　はじめに …… 226
2.2　材料および配合 …… 226
2.3　製造方法 …… 227
2.4　品質試験 …… 227
2.5　施工後の状況 …… 228

３．ジオポリマーPC まくらぎの営業線への試験敷設 …… 230
3.1　はじめに …… 230
3.2　配合例 …… 230
3.3　製造方法 …… 231

3.4　品質試験 …… 231
3.5　施工および施工後の状況 …… 232

４．機械架台への適用 …… 234
4.1　はじめに …… 234
4.2　材料および配合 …… 234
4.3　現場概要 …… 235
4.4　現場施工 …… 235

５．Ｌ字型ブロックおよび下水道施設用片斜マンホールへの適用 …… 238
5.1　はじめに …… 238
5.2　材料および配合 …… 238
5.3　混練，打設および養生 …… 238

６．高温状態に晒される鉄筋コンクリート擁壁の断面補修への適用 …… 240
6.1　はじめに …… 240
6.2　材料および配合 …… 240
6.3　現場概要 …… 241
6.4　現場施工 …… 242

７．オーストラリアでの空港新設建設の舗装コンクリートへの適用 …… 245
7.1　はじめに …… 245
7.2　ジオポリマー適用の概要 …… 245
7.3　ジオポリマーコンクリートの製造および施工 …… 246
7.4　まとめ …… 247

８．タイでのトラックヤード舗装への適用 …… 248
8.1　はじめに …… 248
8.2　材料および配合 …… 248
8.3　製造方法および打設 …… 248
8.4　まとめ …… 250

第VI編　まとめ

まとめ …… 252

資料編

１．委員による研究 …… 254

２．レビュー論文の紹介 …… 316

３．アンケート …… 319

Ⅰ．固化反応メカニズムおよび結合材

１．はじめに

ジオポリマーの強度，耐久性などの物性を理解する上で，その反応機構および反応生成物を理解することは極めて重要である．

ジオポリマーはダビドビッツが提唱した用語であり，無機ケイ酸が縮重合した状態のものを示している．それはジオポリマーが開発された 1970 年代当初の出発材料として使用されていた粉体がメタカオリン（カオリン鉱物を非晶質状態となるよう加熱処理したもの）であり，これがアルカリ刺激作用を受けることで天然ゼオライトの構造に近いアルミノケイ酸塩の縮重合体（これをジオポリマーと呼称する）を生成するためである．

その後，石炭火力発電所から排出されるフライアッシュが廃棄物使用量増大，二酸化炭素排出量削減の観点から広範に使用されるようになってきたが，フライアッシュを 60℃以上の高温のアルカリ刺激条件下で養生を行うとやはりアルミノケイ酸塩の重合体が生成する．しかし現在のジオポリマーに使用されている材料は多様であり，使用材料によってマトリックスを構成する反応生成物も大きく異なり，また，その反応メカニズムもすべてが明確になっているわけではない．たとえば近年ではフライアッシュを使用したジオポリマーの弱点である初期強度を改善するために，高炉水砕スラグが併用されるようになってきているが，高炉水砕スラグを使用した場合その酸化カルシウム成分の影響により，メタカオリンやフライアッシュなどのケイ酸アルミニウム系活性フィラーだけで作製したものと比較して反応生成物の構造は複雑となる．一般的にカルシウムイオンの存在下では，ケイ酸イオンはゼオライトのような３次元構造を形成しづらく，ジオポリマーと総称されるものとは異なる構造をとる．このため，フライアッシュを単独で使用したものはジオポリマーと呼称しても反応生成物の観点からも差し支えないと考えられるが，高炉水砕スラグを使用した場合にはその反応生成物をジオポリマーと呼ぶことは少なくとも物質の構造の観点からは正しくない．

このような背景の中で，日本コンクリート工学会「建設分野でのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」の報告書[1)]では，ジオポリマーを【セメントクリンカーを使用せず，非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩，炭酸塩，水酸化物水溶液を用いて硬化させたもの】と定義している．ここで，非晶質のケイ酸アルミニウム（活性フィラー）の代表的なものは，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末等のみでなく，メタカオリン，下水汚泥やある種の火山灰等も含まれる．アルカリ金属のケイ酸塩溶液とは，水ガラスあるいはそれに NaOH 溶液や KOH 溶液を混合したもの，アルカリ金属の炭酸塩溶液は，Na_2CO_3 溶液や K_2CO_3 溶液，水酸化物水溶液は NaOH 溶液や KOH 溶液が代表的なものである．したがって，セメントを少量用い混和材としてフライアッシュや高炉スラグを多量に使用した系，あるいは主として Ca 系溶液をアルカリ刺激剤として用いて硬化させた系等はジオポリマーに含めないこととする．なお，高炉スラグをアルカリ溶液で硬化させたようなアルカリ活性材料(AAM, Alkali Activated Materials)とジオポリマーを含めた広義のアルカリ活性材料を AAMs と総称し，AAMs によるインフラ構築に関する検討が土木学会コンクリート委員会「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究小委員会(233 委員会)」により報告されている[2)]．

本委員会では，活性フィラーとして，フライアッシュに代表される非晶質のケイ酸アルミニウムを単独で

使用した場合と一部を高炉スラグで置換した場合（AAMs）を含めて，低カルシウムの観点からいずれもジオポリマーと定義し，本章ではジオポリマーの反応メカニズム，および使用材料の特性について各項で詳細に説明する．

参考文献

1）日本コンクリート工学会：建設分野でのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
2）土木学会コンクリート委員会:新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究報告書，2022

（執筆者：新　大軌，佐川　孝広）

２．固化反応メカニズム

2.1　概要

ポリマーとは，複数のモノマー（単量体）が結合して鎖状や網状になること（重合）によってできた化合物のことである．一般的には高分子の有機化合物を対象にして用いることが多い．一方，例えば地球上の多くのケイ酸塩鉱物もケイ素(Si)と酸素(O)で出来た SiO_4 四面体の単量体が縮重合した鎖状や網状の結晶構造を有することから，無機物質ではあるがポリマー構造とみなすことが可能である．したがって無機ポリマーそのものは，特に目新しいものではなく，地球上の岩石を形成する多くのケイ酸塩鉱物は無機ポリマーであるといえる．ここで，ダビドビィツ[1-3]は，カオリン鉱物(**図 2.1.1** 参照)を焼成したメタカオリン(**図 2.1.2** 参照)をアルカリ溶液処理することでケイ酸塩無機ポリマー硬化体を作製し，それを「ジオポリマー」と名付け，ジオポリマーが新しい硬化体の作製技術として着目されるようになった．この「ジオポリマー」の命名は，ジオポリマーが地球上の岩石の成因に類似していることに由来している．このメタカオリンを主原料としたジオポリマーは，現在に至っても盛んに研究されており，外壁建材あるいはそのイオン交換能を活かした放射性物質吸着剤などとして実用化もされている[4-9]．

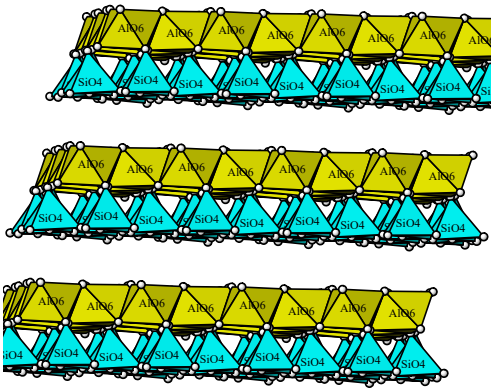


図 2.1.1　カオリンの結晶構造模式図

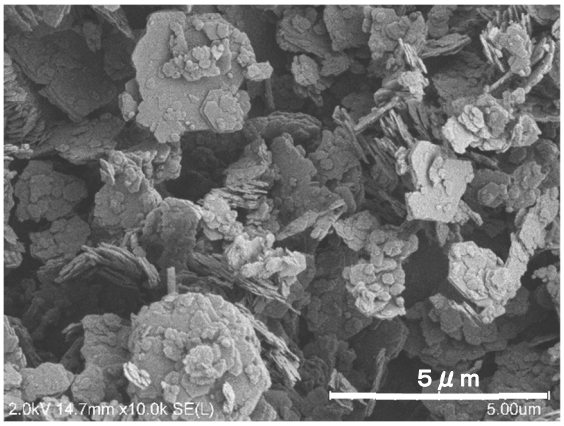


図 2.1.2　メタカオリンの走査型電子顕微鏡写真

2.1.1 メタカオリン，フライアッシュ等のケイ素・アルミニウム系材料を活性フィラーとした場合

ここで，メタカオリン（**図 2.1.1** に示された 2 次元構造のカオリン鉱物を焼成し非晶質化したもの（**図 2.1.2**））を出発材料とするジオポリマーは，3 次元構造のゼオライト（**図 2.1.3** は天然ゼオライトの結晶構造模式図例）に局所構造が類似するものの非晶質であることがわかっている．ゼオライトは SiO_4 四面体だけで成り立つ石英のように，それが組み合わさり「フレームワーク」を形成する 3 次元構造が特徴であるが，一部の SiO_4 四面体中の Si^{4+} がアルミニウムイオン(Al^{3+})と置換することでフレームワークは負電荷となり，ナトリウムイオン(Na^+)やカリウムイオン(K^+)等の陽イオンがそれを補う形となる．このように SiO_4 四面体の Si を Al が置換したフレームワークと，その負電荷を補償する陽イオンから構成される構造を「アルミノケイ酸塩構造」と呼ぶ．メタカオリンから生じるジオポリマーもこのようなアルミノケイ酸塩物質と考えられているが，その原子配列の規則性は小さく，一定の長周期の構造を持たない，いわゆる非晶質物質である（**図 2.1.5** あるいは**図 2.1.6** 参照）．

ここで，例えば**図 2.1.1** のカオリン鉱物のように，SiO_4 四面体と AlO_6 八面体で構成された物質は，上記のアルミノケイ酸塩物質の定義から外れるため，厳密にはアルミノケイ酸塩には分類されないはずであるが，現在では曖昧な概念で，このような物質も広くアルミノケイ酸塩と表現されている．したがって，この語句がどのような概念で使われているかには注意が必要である．

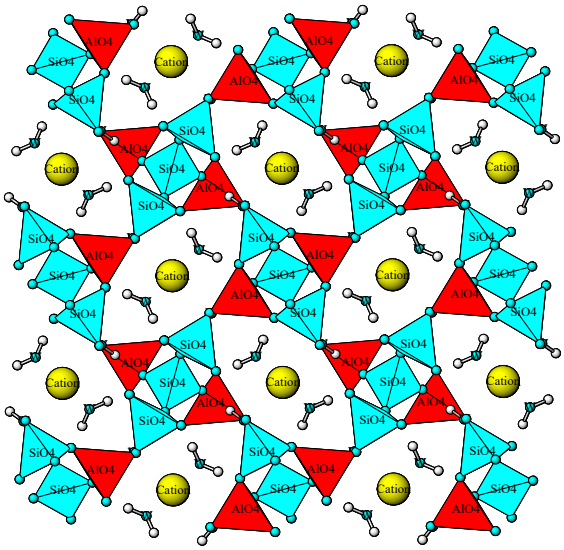


図 2.1.3　SiO_4 四面体及び AlO_4 四面体の 3 次元構造から成り立つ天然ゼオライト（エディングトナイト）の結晶構造模式図

図 2.1.4 は，フライアッシュやメタカオリンから作製されるジオポリマーの反応概念を表した図である．**図 2.1.4** で表されるように，ケイ酸ナトリウム溶液中には元々ケイ酸イオンが存在する．また，強いアルカリ成分によりケイ素・アルミニウム系の活性フィラーからもケイ酸イオンが溶出する．ここで，活性フィラーからは同様にアルミン酸イオンが溶出し，これとケイ酸塩イオンとで縮重合反応が生じることで，**図 2.1.4** や**図 2.1.5** で示されるようなアルミノケイ酸塩のフレームワークが形成される．フレームワークは Si^{4+} イオン対する Al^{3+} イオンの置換により全体としては負に帯電するため Na^+ や K^+ の水和イオンがフレームワーク中に取り込まれたものが，メタカオリン等のケイ素･アルミニウム系活性フィラー起源のジオポリマー硬化体の構造である（**図 2.1.5** 参照）．

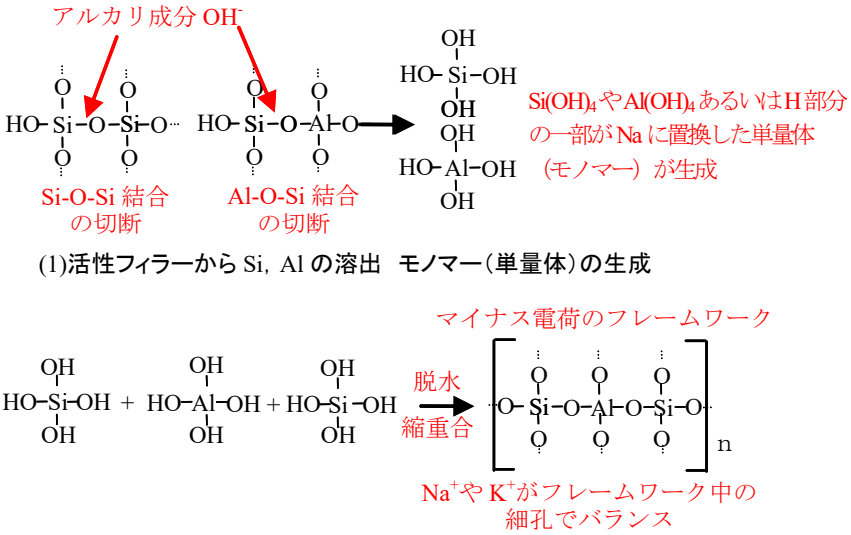
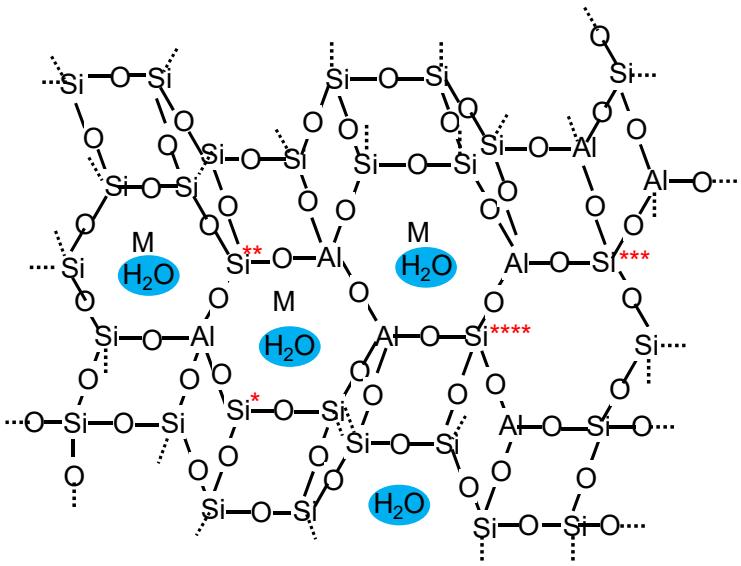


図 2.1.4　メタカオリン，フライアッシュからの簡単な反応概念図



**** NMR で $Q^4(4Al)$ の Si，*** $Q^4(3Al)$，** $Q^4(2Al)$，* $Q^4(1Al)$，無印 $Q^4(0Al)$ あるいは図から判断無し

図 2.1.5　メタカオリン，フライアッシュから生成するジオポリマーの模式図

図 2.1.6 はメタカオリンから作製したジオポリマー硬化体の透過型電子顕微鏡写真であり，図 2.1.5 に示されたようなフレームワーク構造が観察される．しかし，ジオポリマー硬化体は，その局所的な構造がゼオライトのような構造として表すことは可能であるが，厳密には結晶質物質のように全体構造を書き表すことはできない．例えば図 2.1.1 や図 2.1.3 の結晶物質の構造模式図はそこに示された構造が図外も含めて連続して成り立っているとして描かれている．一方，ジオポリマーの構造図例（図 2.1.5）は局所的にそのような構造が存在することを表すものであることに注意が必要である．

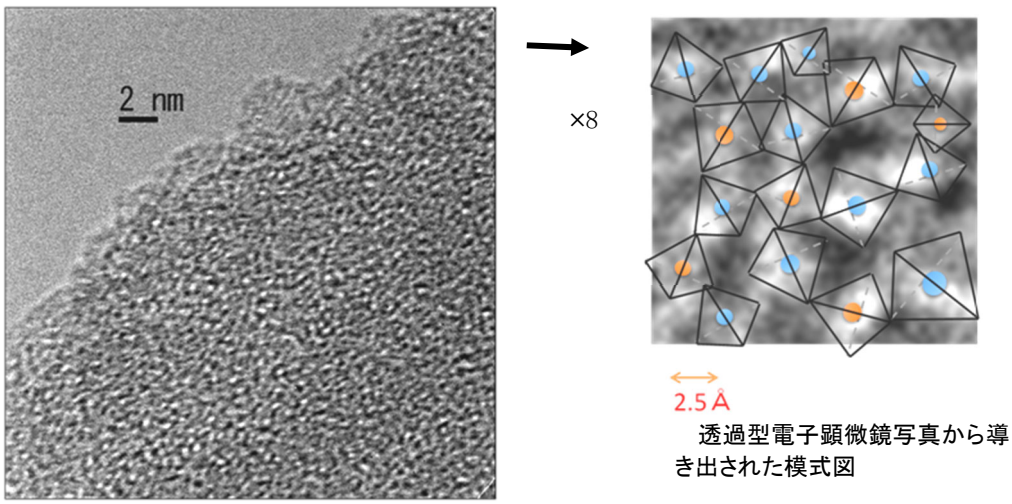


図 2.1.6　ジオポリマーの透過型電子顕微鏡写真 メタカオリンから作製（早稲田大学山崎教授提供）

ここでメタカオリンのジオポリマー研究も盛んに行われているが，より安価にジオポリマーを作製する為にメタカオリンと同様に非晶質のケイ酸アルミニウム粉体であるフライアッシュ（**図 2.1.7**）を使用することで，ポルトランドセメント代替としてジオポリマー技術をコンクリートに使う研究が行われている [10-16]．フライアッシュを原料とした場合も，その主要な生成物や反応機構はメタカオリンを原料とした場合と同様に，**図 2.1.5** で示されるような非晶質の 3 次元フレームワーク構造と考えられている [17, 18]．したがって，ジオポリマーの定義を，これらケイ素･アルミニウム系の活性フィラーだけを使用することに限定した場合は，「非晶質のケイ酸アルミニウム粉体をアルカリ溶液処理して得られたゼオライト類似の 3 次元フレームワーク構造を有する非晶質アルミノケイ酸塩硬化体」として整理できるはずである．

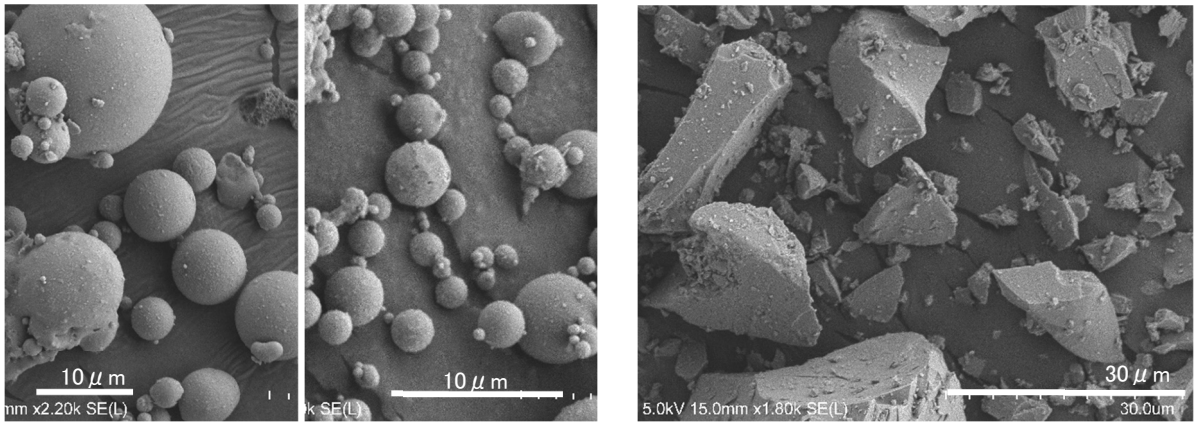


図 2.1.7　フライアッシュおよび高炉スラグの走査型電子顕微鏡写真

2.1.2　フライアッシュに加え高炉スラグ微粉末を活性フィラーとした場合

上記のように，活性フィラーがメタカオリンやフライアッシュなどのケイ素・アルミニウム系材料でカルシウム(Ca)を含まない場合は，その生成物を比較的簡単に整理できた．しかし，近年，強度増進や物質移動抵抗性等のコントロールといった観点から高炉スラグ微粉末（**図 2.1.7**）などの Ca を含む材料が添加されるようになってきた [19-23]．それにより，使用する溶液配合も水ガラスのみで水酸化ナトリウム(NaOH)を使わな

い等，比較的低アルカリ領域でジオポリマーが作製される場合もあり，かつ常温養生も行われるようになってきた [24, 25]．このように複雑化した活性フィラー，配合および養生温度で作製したジオポリマーの生成物は，それらの条件により，その構造や性質が大きく異なるため，必ずしも生成物が 2.1.1 で記述したようなゼオライト類似の 3 次元ネットワーク構造を持つアルミノケイ酸塩の非晶質物質を主体とするものとは言えない状況となってきている [26]．

高炉スラグ微粉末を活性フィラーとして含む場合，その Ca 成分の影響のため，ケイ素・アルミニウム系活性フィラーだけで作製したものと比較して複雑である．一般的に Ca イオンの存在下では，ケイ酸イオンはゼオライトのような 3 次元構造を形成しづらく，**図 2.1.8** で示されるような Ca ケイ酸塩の構造，すなわち C-S(A)-H と記されるような構造をとりやすい [27 33]．**図 2.1.8** はトバモライト結晶の模式図であるが，ここで生じる Ca ケイ酸塩の構造の近距離秩序は，これに準じた非晶質あるいは低結晶質な構造と考えられている．また，一般的なセメントの水和物として生じる C-S-H と比較して，Na を含有し，Ca/Si 比が低く，Al 含有量が多いなどの報告がなされている．したがって，フライアッシュに高炉スラグ微粉末を添加した系での生成物は，前述のフライアッシュから生じるゼオライト類似の構造を示すアルミノケイ酸塩構造の非晶質物質（文献によっては NASH と記述）および高炉スラグ微粉末から生じる C-S(A)-H（文献によっては CASH と記述）及び，それが相互に影響しあった生成物と考えられる．しかし，これらの生成割合や生成物の組成等は，その養生温度，処理溶液のアルカリ濃度等の影響を強く受けるため複雑であり，フライアッシュと高炉スラグの比率で単純に分類できるようなものではない．

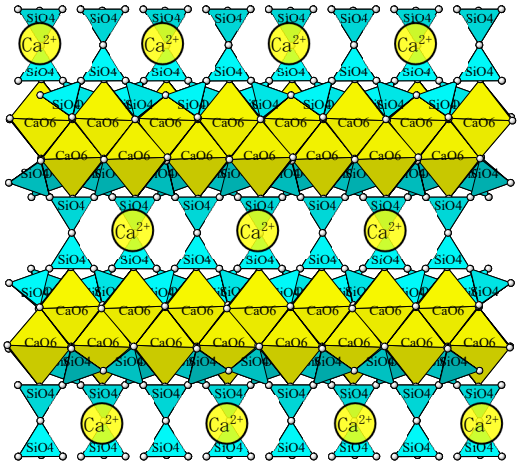


図 2.1.8　Ca ケイ酸塩構造の例　トバモライトの構造模式図

したがって，日本コンクリート工学会における「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会 JCI-TC155A」では，ジオポリマーの定義に関して，現在のジオポリマー研究の実体をよく表すよう，硬化体を形成する反応生成物の構造，すなわちその近距離秩序構造を特に考慮せず，活性フィラー（出発材料）の相違で分類することとし，ジオポリマーとは「セメントクリンカーを使用せず，非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩，炭酸塩，水酸化物の水溶液（アルカリ溶液）の少なくとも 1 種類を用いて硬化させたもの」と定義している．ここで，非晶質のケイ酸アルミニウムの代表的なものは，メタカオリン，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末等であり，下水汚泥焼却灰や特定の地域に産する火山灰等も利用可能である．ここで，アルカリ金属のケイ酸塩溶液とは，水ガラスあるいはそれに水酸化ナトリウム(NaOH)溶液や水酸化カリウム(KOH)溶液を混合したものである．アルカリ金属の

炭酸塩溶液は炭酸ナトリウム(Na_2CO_3)溶液や炭酸カリウム(K_2CO_3)溶液であり，水酸化物溶液は NaOH 溶液や KOH 溶液が代表的なものである．したがって，セメントを少量用い混和材としてフライアッシュや高炉スラグを多量に使用した系，あるいは主として Ca 系材料のアルカリ刺激で硬化させたような系はジオポリマーには含まないこととしている．

2.2　反応機構，生成物と諸性質

現時点でジオポリマーは上記のように活性フィラーも種々異なり，使用する溶液やその配合範囲も大きく異なっている．したがって，ジオポリマーの反応生成物および，その性状は，活性フィラーの相違や使用する水溶液の化学組成で大きく異なり，各配合における生成物や反応機構の詳細は，よく分かっていないのが実状である．そこで，ここでは，より実用的に，かつこれからジオポリマーを扱おうとする人に向けて，それぞれが扱いたいターゲットと関連できるように，活性フィラーを建設材料として，現在よく使用されているフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の混合系とし，それに対する各溶液配合，養生温度における，その生成物と性質の概要を簡単に述べることとする．

図 2.2.1 は今までにわかっている各配合における大まかな生成物およびその性質の傾向を簡単に図示したものである．**図 2.2.1** で表されるようにジオポリマー作製条件は，(1)活性フィラーにおけるフライアッシュと高炉スラグの混合割合，(2)養生温度，(3)溶液配合に分けられる．一般的に(3)の溶液は，NaOH 溶液，KOH 溶液，ケイ酸 Na 溶液（水ガラス）が使われる．これらをモル比で表すと定量的にその溶液の性質を表すことが可能であり，$(Na,K)/H_2O$ あるいは $(NaOH,KOH)/H_2O$ モル比（A/W），$Si/(Na,K)$ あるいは $(SiO_2/(NaOH,KOH)$ モル比（Si/A），粉体に対するアルカリ溶液中の純水との体積比（W/P）で生成物の整理が可能である [26]．

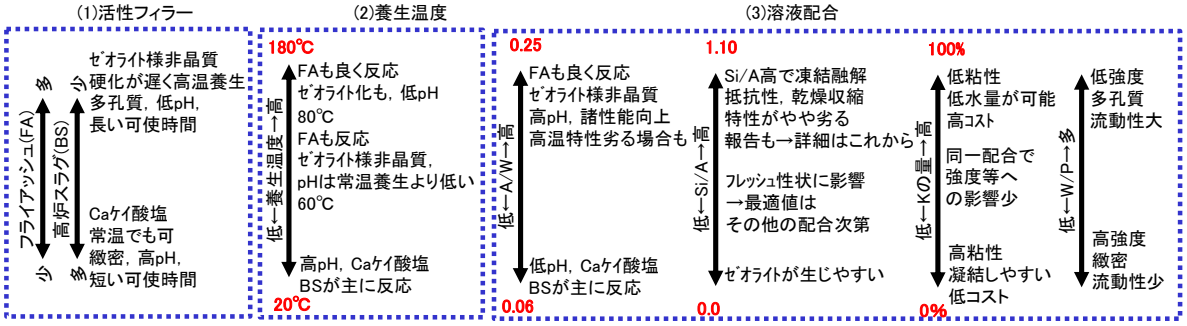


図 2.2.1　ジオポリマーコンクリートの作製配合・養生条件と生成物および大まかな性質

なお，長期的耐久性に関して，一般的に Al 量の多いゼオライトは酸に弱く，Ca が存在するアルカリ環境下では，Ca^{2+}と容易に反応して C-S(A)-H や C-A-H が生成するため安定ではないことがわかっている [34]．一方，それと類似した構造のゼオライト状非晶質物質であるフライアッシュ起源のジオポリマーは，酸に強いことなど，いわゆるゼオライト結晶と異なる性質を有しているが，ゼオライト状非晶質領域への Ca の移動，反応等の研究報告例 [30]もあり，これら長期的な反応に関してはよく分かっていないことが多い．また，現在の所，生成した 3 次元ゼオライト状非晶質物質や C-S(A)-H の組成や性質が，その作製配合や温度に対して体系的に整理されておらず，また，含水率などの環境要因の影響等も強く受けるため，将来的には配合記述を整理した上で，生成物と耐久性の関係は今後の研究課題となるであろう．

2.2.1　活性フィラーの影響

フライアッシュと高炉スラグの混合比率により，生成物が大きく異なることがわかっている．その他の配合・養生温度が同一の場合，フライアッシュが多いとゼオライト状非晶質の硬化体が多く生じ，高炉スラグ微粉末が多いと，現在の所，配合に対する Na や Al の固溶量等は明確ではないが Ca ケイ酸塩水和物(C-S(A)-H)系の物質が多く生じることとなる．なお，フライアッシュ単独では常温での硬化に長時間を要するため加温養生が行われる．一方，高炉スラグ微粉末が使われた場合，常温養生でも，比較的早期に必要な強度が得られることから常温養生の研究例も多い[24, 25]．ただし，常温養生と加温養生では後で示すように反応生成物が異なるため，同様の強度でも諸性質は異なるものと考えられる．

活性フィラー種による諸性質の相違は，同一配合・養生温度では，フライアッシュが多い場合，ゼオライト状非晶質構造の特徴が支配的となり，その性質が主なものになる．具体的には，硬化体は低 pH となり，酸劣化等に対する高耐久性等が特徴となる．一方，高炉スラグ添加量の増加により C-S(A)-H 系生成物が増加し，A/W 比によっては硬化体が高 pH となる．また，緻密性が向上するが，硬化体そのものの酸に対する耐性等は低下すること等が報告されている[35]．ただし，緻密化により，吸水性が減少することによる酸に対する抵抗性が向上する効果もあるため，例えば実際の酸に対する耐性はこれらの重相関となる[36]．

2.2.2　養生温度の影響

現在，常温養生からオートクレーブ温度まで様々な温度で養生が行われており，より高温でフライアッシュの溶解反応が進行する．なお，オートクレーブ領域の温度ではゼオライトの結晶化も報告されている[37]．また，80℃程度の養生でジオポリマー中に生成したゼオライトにおいて，それがゼオライトとジオポリマーの単なる混合物として生成するのではなく，連続した構造としてゼオライト結晶の周りをジオポリマーの非晶質構造が取り囲んで生成すること（**図 2.2.2** 参照）から，ゼオライト単体とは異なる特性を有することも期待されている．

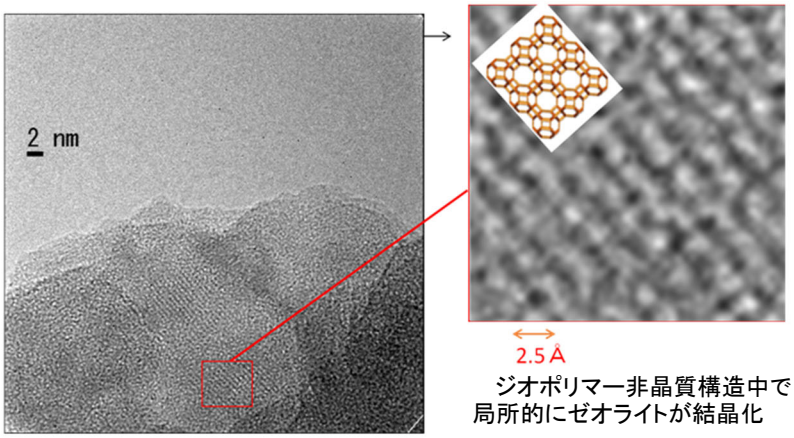


図 2.2.2 ジオポリマー（非晶質物質）に囲まれた形で析出するゼオライト（早稲田大学山崎教授提供）

ここで，養生温度以外が同一の製造方法の場合には，より高い温度でフライアッシュの反応が進行しゼオライト状の非晶質物質が多く生じることから硬化体の pH は，低い温度で作製したものと比較して低くなる．一方，常温養生では高炉スラグの反応が支配的となることから C-S(A)-H が主な生成物となり，フレームワーク外に残存するアルカリ成分が多くなるため硬化体の pH は高くなる傾向である．このように，養生温度によ

り，より高温で生じる 3 次元ゼオライト状非晶質構造と常温領域でも生じやすい C-S(A)-H の生成割合が異なるため，圧縮強度等が同一でも得られる性質が大きく異なる場合があるため注意が必要である．

2.2.3 溶液配合の影響

現時点で，ジオポリマーの溶液配合に関して統一された記述法は存在しない．日本コンクリート工学会における「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会 JCI-TC155A」で提唱された案に則って，ここでは溶液配合の考え方とそれに伴う生成物および諸性質例を記述する．

水ガラスおよび水酸化アルカリ溶液を使用する一般的なジオポリマー作製法において，生成物および諸性質に影響を与える成分の要素を記述するとアルカリ成分／水のモル比(A/W)，ケイ素成分／アルカリ成分のモル比(Si/A)となる．ここで，その溶液の性質を表すためには，質量比では K や Na 等，その成分が変わったときに意味をなさないが，各モル比で表すとその溶液の性質をよく表すことができる．また，実際の溶液使用量のうち純水に相当する部分（NaOH 溶液，水ガラスなどに含まれる純水量に加水分を加えたもの）の体積を活性フィラーの体積に対して表す，すなわち純水量/活性フィラーの体積比（W/P）を考えると，一般的なセメントの水セメント比に似た概念で扱うことができる．

(1) アルカリ／水(A/W) モル比の影響

A/W 比は，溶液配合の内，最も生成物や諸性質に与える影響が大きい．**図 2.2.1** に表されるように A/W 比が低い（アルカリ量が少ない）と高炉スラグの反応が主要な要素になりやすく C-S(A)-H に準じる生成物が生じやすい．一方，A/W 比を高く（アルカリ量を多く）するとフライアッシュも良く反応するため，非晶質の 3 次元アルミノケイ酸塩物質も生じやすくなり，圧縮強度の他，多くの諸特性が向上する．ただし，硬化体の pH に対する相関では，活性フィラー，養生温度の影響の項の説明とは異なる結果となる．すなわち，前項ではフライアッシュがより多く反応し，非晶質 3 次元アルミノケイ酸塩構造の生成量が多くなることは，そこに取り込まれるアルカリイオンが多くなるため低い pH となると説明した．しかし，A/W 比が高い場合は，非晶質 3 次元アルミノケイ酸塩構造量が増加するにも関わらず，むしろ pH が高い結果となる．これは，高い A/W 比によりフライアッシュが良く反応し，多くの非晶質 3 次元アルミノケイ酸塩物質が生じるが，仕込み組成におけるアルカリ成分全量が反応に使われず，余剰成分として細孔中に存在することを意味している．実際に，仕込み溶液配合と余剰アルカリ量を測定した事例では，80℃の養生条件では，仕込み組成に対して半量程度のアルカリ成分が余剰となると報告されている[38]．なお，A/W 比が高く余剰アルカリ成分が多い場合，1000℃以上の高温ではアルカリ融解反応を生じ，極高温での耐久性が劣る場合もあるなど高 A/W 比で全ての耐久性が向上するわけではない．

(2) ケイ素／アルカリ（Si/A）モル比の影響

A/W 比と比較すると諸性質に与える影響は小さいが，高 Si/A 比で凍結融解性が劣る傾向である[39]こと，乾燥収縮も大きくなる傾向であり[14]，低 Si/A 比ではハイドロキシソーダライトなどゼオライトに関連した物質が生じやすいこと等が報告されている[40]．ただし，報告例では A/W 比や Si/A 比，養生温度の検討範囲が広くないため，各配合における最適な Si/A 比は検討の余地が大きい．また，日本コンクリート工学会における「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会 JCI-TC155A」で実施した共通試験の結果では，活性フィラーであるフライアッシュの種類により，Si/A 比が，そのフレッシュ性状に非常に大きく影響することもわかってきている．

(3) カリウム(K)系ーナトリウム(Na)系の相違

アルカリ成分として Na 系溶液の代わりに K 系溶液を使用することがある．この場合，厳密には K と Na で

はイオン半径・水和イオン半径が大きく異なり，その生成物も異なる．したがって，詳細な性質・耐久性等には違いがあるものと考えられる．しかし，2.3 の配合記述法にしたがって，同一配合で作製した場合，圧縮強度等の諸性質はおよそ同じとなることがわかっている[41]．一方，K を使用した場合，溶液そのものの粘性が小さく，凝結もしにくいため，単位水量を減らしやすく，結果として高強度の配合を作りやすい．また，高温生成物も異なるため，900℃以上での高温耐久性では K を使用したジオポリマーの方が耐久性の高いことも報告されている．ただし，流通経路にもよるが K 系溶液は一般的に Na 系溶液と比較して高コストであるため，コンクリート用途の研究では Na 系溶液の使用例が多い．

(4)　W/P の影響

溶液における純水部分と活性フィラーとの体積比で，セメント硬化体における水セメント比と同様に整理可能である．なお，体積比としたのは，フライアッシュや高炉スラグ等の密度の異なる活性フィラーを使用したとき同様の記述ができるようにしたためである．W/P が高いと強度が低く，多孔質になりやすい．反対に，W/P が低いとき，強度が大きく緻密となるが，流動性などのフレッシュ性状は低下することなど，セメントコンクリートにおける水セメント比の考え方と同様の整理が可能である．

2.3　配合記述の方法の詳細

現在，ジオポリマーの配合記述法が統一されておらず，各機関や研究者により作製法も異なっている．したがって，各論文で反応生成物やその機構が記述されていても，横並びで比較することが困難である．その反応機構を論じるためには，それを整理し，同じ記述法で論じられるようにすることが望ましい．そこで，これが最良の方法ではないかもしれないが，当面の配合記述法の一案として下記のような方法を提案した．活性フィラーに関しては，フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の混合系を取り扱うこととし，また，ジオポリマー作製時の溶液成分組成で，その配合を表しジオポリマーの各配合における生成物とその諸性質に関して整理することとする．

表 2.3.1 は活性フィラーの主要成分を示したものである．日本で多く取り扱われているフライアッシュは Si および Al を主成分とすることが特徴である．一方で，強度増進や常温養生での使用などの観点から，高炉スラグの添加が一般的に行われているが，高炉スラグは Si，Al 成分に加えて Ca 成分を多く含むことが特徴となる．

表 2.3.1　出発粉体成分の内訳

使用粉体	主要成分
フライアッシュ(FA)	Si, Al
高炉スラグ(BFS)	Ca, Si, Al

粉体量は kg/m^3 で表す．

BFS 使用量を内割の vol.%で示す．

フライアッシュの反応性に関しては，非晶質成分の量やその組成等の諸性質と強度の関係など，種々の研究が行われている[17, 42]が，完全に整合性が得られる評価は得られていないため，セメントとの反応で使用される API 法の適用等，今後の研究が期待される．また，現在，フライアッシュと高炉スラグの混合系での研究例が多いが，フライアッシュ単独と比較して，さらに活性フィラーと諸性質の関係は複雑である．将来的

には，混合粉体の反応性因子を確定し，それを配合記述に組み込むことが望ましいが，現在は，粉体に関しては，フライアッシュと高炉スラグ微粉末の混合量の記述に留めている．

表 2.3.2 は，ジオポリマー作製に使用する溶液部の成分内訳を示したものである[26]．一般的には NaOH 溶液あるいは KOH 溶液と水ガラスを混合して使用する．この中で各溶液を成分毎に分けると，例えば NaOH 溶液は，NaOH と H_2O 成分に分けられる．同様に KOH 溶液は KOH と H_2O，水ガラスは NaOH，SiO_2 及び H_2O 成分に分けられる．こられの成分比を質量比ではなく，モル比で表すと，その反応に与える影響に関して元素の違いを意識することなく定量的に記述が可能である．すなわち，アルカリ成分／水のモル比，(NaOH＋KOH)/H_2O 比（A/W），ケイ素／アルカリ成分のモル比，SiO_2/(NaOH+KOH)比（Si/A）で表すことで全成分比を表すことが可能である．また，いわゆる単位水量は，溶液そのものの質量ではなく溶液中の純水（H_2O）量を 1 立方メートルあたりで表すと種々の性質との整合性が高く，硬化体に対する水分量の評価が可能となる．一方，H_2O 量/活性フィラーの体積比(W/P)は，ジオポリマー硬化体への影響に関して，セメント硬化体における水セメント比と同様の評価を可能とするため，配合記述において W/P（体積比）の記述も推奨される．

表 2.3.2　ジオポリマー溶液部の成分内訳

作製法 使用材料	一般法 成分		
NaOH 溶液	NaOH	---	H_2O
KOH 溶液	KOH	---	H_2O
水ガラス	NaOH	SiO_2	H_2O
作製法 使用材料	ケイ素成分粉体添加その場溶解法** 成分		
NaOH 溶液	NaOH	---	H_2O
シリカフューム*	---	SiO_2	---

(NaOH+KOH)/H_2O → （A/W）（モル比）
SiO_2/(NaOH+KOH) → （Si/A）（モル比）
H_2O → 単位水量（kg/m^3）

*：シリカフュームは粉体として添加するが，練り混ぜ時の溶解で Si 成分として働くと考えた場合
**:参考文献 26）参照

表 2.3.3 および**表 2.3.4** は，実際の配合例とその際の計算事例を表したものである．ここで，水ガラスを使用する一般的な方法（「一般法」と記述する）に加えて，シリカフュームのような粉体試料（**図 2.3.1** 参照）添加する場合を「ケイ素成分粉体添加その場溶解法，略して溶解法」と記述[26]し，溶液成分として記述する研究事例もあるが，ケイ素成分の溶解量は，溶液温度，A/W 比や高炉スラグ置換量の影響を受ける．したがって，粉体に含めるか溶液に含めるかは，必ずしも統一されておらず，現在の所，一部の研究者が溶液部に含めている．しかし，溶解すると考える場合には，配合そのものは一般法と同様と考えることが可能なため，前出の**表 2.3.2** には参考のため併記した．

表 2.3.3　ジオポリマーモルタルの配合例（一般法，溶解法）

	FA	BFS	WG	SF	NaOH	加水	砂	A/W	Si/A	単位水量	W/P
	kg/m^3							モル比		kg/m^3	体積比
一般法	434	140	154.7	---	52.0	141.3	1297	0.102	0.706	238	1.03
溶解法	434	140	---	56.9	152.6	138.5	1297				

FA:フライアッシュ(2.41 g/cm^3), BFS:高炉スラグ微粉末(2.91 g/cm^3), SF:シリカフューム
WG:JIS1 号水ガラス Na_2O=17.66%（NaOH 換算 22.79%），SiO_2=36.68%，NaOH:35%NaOH 溶液

表 2.3.4　各配合の算出方法(表 2.3.3 の配合から記述)

一般法	WG	NaOH	154.7×22.79%=35.26	kg/m^3
		SiO_2	154.7×36.68%=56.74	kg/m^3
		H_2O	154.7-35.26-56.74=62.70	kg/m^3
		Na	35.26/NaOH 分子量=0.8816	k モル/m^3
		Si	56.74/SiO_2 分子量=0.9443	k モル/m^3
		H_2O	62.70/H_2O 分子量=3.480	k モル/m^3
	35%NaOH	NaOH	52.0×35.0%=18.2	kg/m^3
		H_2O	52.0×65.0%=33.8	kg/m^3
		Na	18.2/NaOH 分子量=0.455	k モル/m^3
		H_2O	33.8/H_2O 分子量=1.88	k モル/m^3
	加水	H_2O	141.3	kg/m^3
		H_2O	141.3/H_2O 分子量=7.843	k モル/m^3
	A/W	Na/H_2O	(0.8816+0.455)/(3.480+1.88+7.843)=**0.101**	モル比
	Si/A	Si/Na	0.9443/(0.8816+0.455)=**0.706**	モル比
	単位水量		62.70+33.8+141.3=**238**	kg/m^3
	W/P		238/(434/2.41+140/2.91)=**1.03**	体積比
溶解法	SF	SiO_2	56.9	kg/m^3
		Si	56.9/SiO_2 分子量=0.947	k モル/m^3
	35%NaOH	NaOH	152.6×35.0%=53.4	kg/m^3
		H_2O	152.6×65.0%=99.2	kg/m^3
		Na	53.4/NaOH 分子量=1.34	k モル/m^3
		H_2O	99.2/H_2O 分子量=5.51	kg/m^3
	加水	H_2O	138.5	kg/m^3
		H_2O	138.5/ H_2O 分子量=7.688	k モル/m^3
	A/W	Na/H_2O	1.34/(5.51+7.688)=**0.102**	モル比
	Si/A	Si/Na	0.947/1.34=**0.707**	モル比
	単位水量		99.2+138.5=**238**	kg/m^3
	W/P		234/(434/2.41+140/2.91)=**1.03**	体積比

*溶解法では，シリカフュームを固体で加えるが，Si 成分として溶液換算する
実際には各種出発試料における不純物の換算が必要

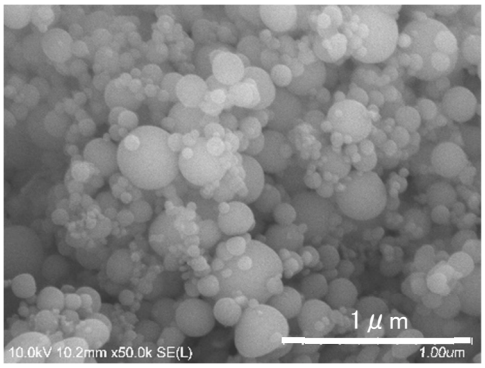


図 2.3.1　シリカフュームの走査型電子顕微鏡写真

なお，水酸化アルカリ溶液として NaOH 溶液を使用した場合と KOH 溶液を使用した場合では，非晶質生成物の詳細構造は異なり，その性質は詳細には異なるが，この記述法の記載に従った場合，同一配合で作製したジオポリマーの圧縮強度，塩化物イオン浸透特性，高炉スラグ添加の効果等に関して，**図 2.3.2** に示すように，ほとんど同様であることから[26]，配合において Na と K を同じように扱うことが可能となる．ただし，フレッシュ性状は大きく異なり，K 使用量の増加により粘性が小さく，流動性が向上して単位水量を減らせるため，高強度のジオポリマーを作製しやすい[12]．

次に，各配合における生成物とその特徴に関して論じるが，非晶質構造のジオポリマーについては固体各磁気共鳴(NMR)スペクトルによる生成物の解釈事例が多いことから，その簡単な見方を解説する．

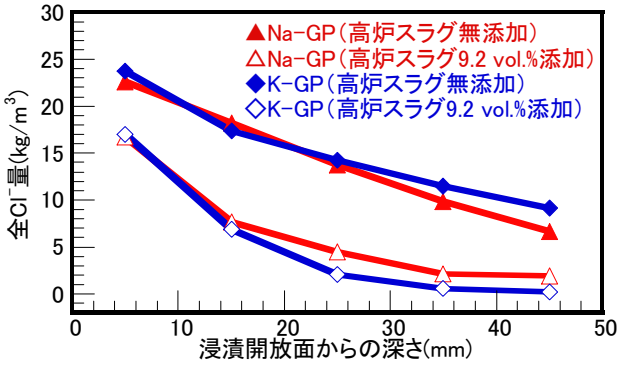


図 2.3.2　同一配合で作製したジオポリマーモルタルの塩分浸透特性 [26)]

Na-GP　：NaOH 及び Na 系水ガラス使用　　K-GP：KOH および K 系水ガラス使用

2.4　NMR スペクトルの簡単な見方

ジオポリマーは，非晶質であるため一般的な結晶構造解析の手法である X 線回折で多くの情報が得られない．そこで，ジオポリマーでは，^{29}Si あるいは ^{27}Al の固体核磁気共鳴（NMR）測定による Si あるいは Al 原子周りの局所構造で生成物が記述されている事例が多い．そこで，^{29}Si-NMR 及び ^{27}Al-NMR スペクトルの簡単な見方を各配合における各論の前に説明をする．

2.4.1　^{29}Si-NMR スペクトル

図 2.4.1 は ^{29}Si-NMR スペクトルにおける SiO_4 四面体の縮重構造を表した模式図である．^{29}Si-NMR スペクトルのピークは Q^n で表される．Q は SiO_4 四面体を，n は縮重度を表し，n 個の O 原子が隣接する T（=Si または Al）によって共有されていることを表す．4 つの酸素が全て共有されているゼオライトや石英のような 3 次元構造は Q^4 で表される．フライアッシュからの主なジオポリマー生成物は，この Q^4 構造と考えられている（前出の**図 2.1.5** 参照），一方，高炉スラグからの生成物は，その配合や養生温度で異なるが，おもに Q^1～Q^3 構造程度の縮重合度と考えられている（**図 2.4.2** 参照）[28)]．

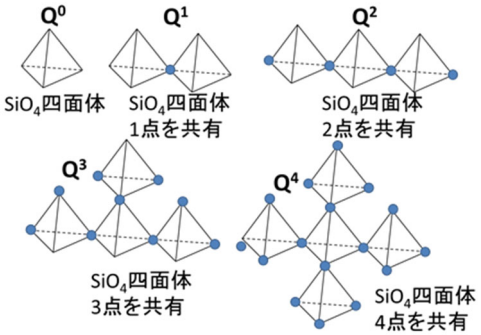


図 2.4.1　SiO_4 四面体の縮重構造

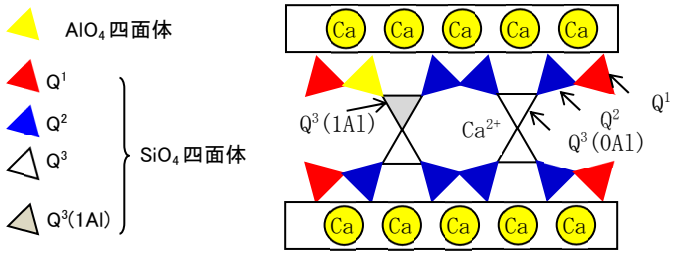


図 2.4.2　C-S(A)-H の構造模式図（図 2.1.8 を簡略化）

図 2.4.3 は ^{29}Si-NMR におけるスペクトル位置の模式図である．Q^0～Q^4 にかけて高磁場側にピーク位置はシフトする．また，SiO_4 四面体に O 原子を共有して 1 個の AlO_4 四面体が結合すると(1Al)と記述し，例えば Q^4 で 2，3，4 個結合した場合，Q^4(2Al)，Q^4(3Al)，Q^4(4Al)と表し，NMR スペクトルのピーク位置は Al 結合量に応じて低磁場にシフトする．なお，Q^4(4Al)では Si の隣の陽イオンは必ず Al イオンとなることから [43] Al/Si=1 となり天然ゼオライトなどのアルミノケイ酸塩鉱物では Loewenstein 則(最近接 Al-Al 対忌避則)[43]から Al-O-Al の結合は存在せず Al/Si≦1 となることが知られている．ただし，非晶質構造のジオポリマーでこの法則が成り立つかは不明である．

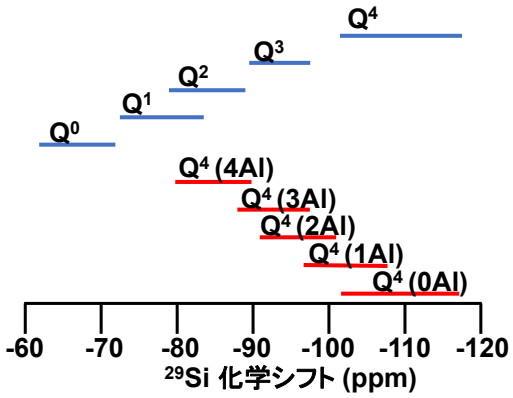


図 2.4.3　Al を含まない Q^0～Q^4 構造および Q^4 構造の Si を Al が置換したときの ^{29}Si-NMR 化学シフト分布

ここで，ケイ酸塩物質の ^{29}Si-NMR 測定では，一般的な Magic Angle Spinning(MAS)法の他に Cross Polarization-MAS(CP-MAS)法の二種類の測定法が使われているために注意が必要である．MAS 法（近年，DD(Dipolar Decoupling) - MAS 法とも記される）は一般的な手法であり，特にことわりが無い場合，この手法で測定されている場合が多い．この測定法は各スペクトルの面積比がその成分比を表すような定量的な評価が可能であるが，質量数 29 の同位体存在率が小さい Si に対する分析では感度が低く，測定に時間が掛かる．そこで，しばしば，迅速に測定が可能な CP-MAS 法が用いられるが，この方法ではプロトン(^{1}H)が近傍にない Si や運動性の高い部分の Si のスペクトルが検出されにくく，各スペクトルの強度が成分比に比例しないため，CP 法では定性的な評価にとどまる（図 2.4.4）．

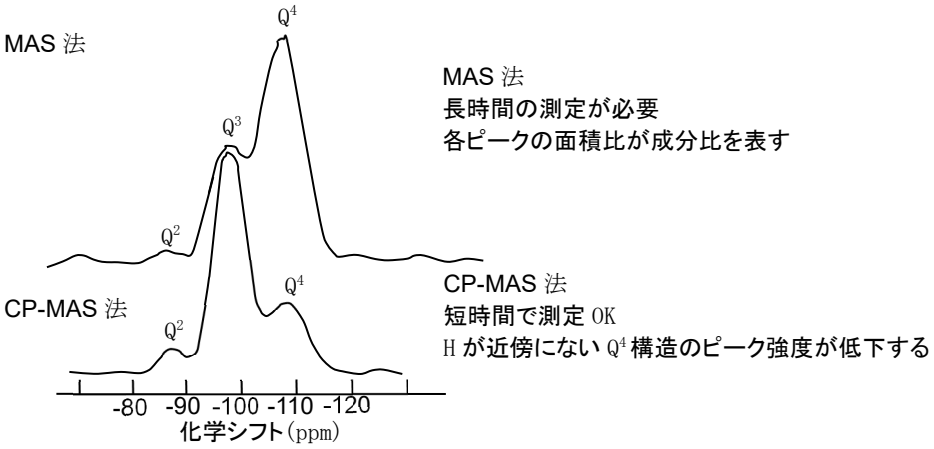


図 2.4.4　^{29}Si-NMR スペクトルにおける MAS 法と CP 法の違い

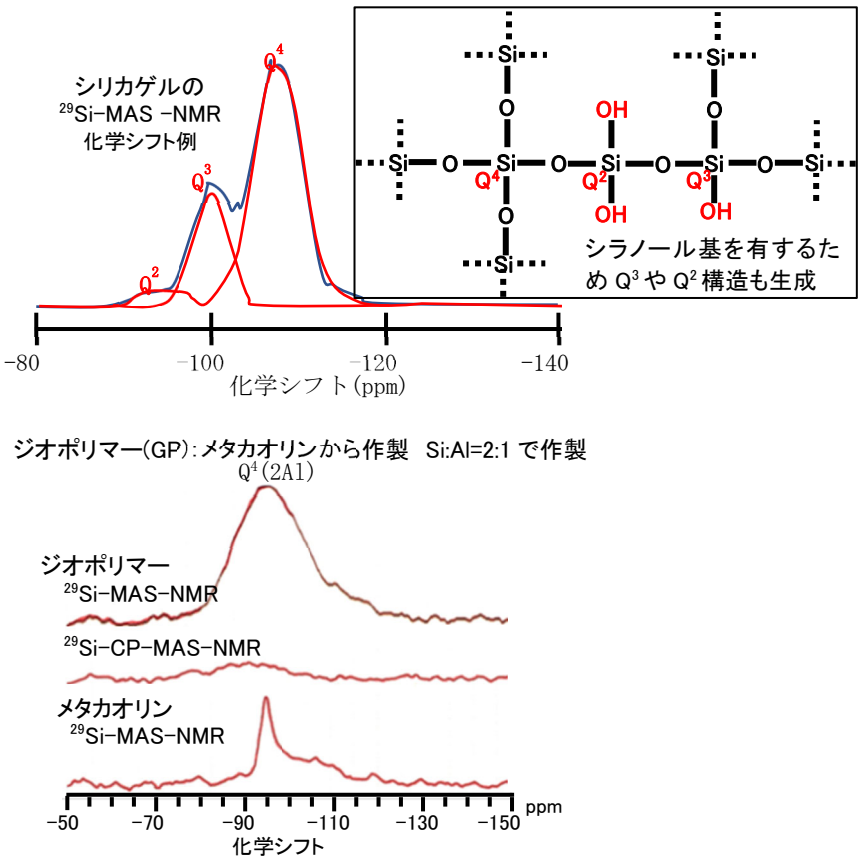


図 2.4.5 メタカオリンから作製したジオポリマーとシリカゲルの ^{29}Si-NMR スペクトルの相異
（シリカゲル：スペクトル模式図　ジオポリマーは Si:Al=2:1 で作製したもの）

図 2.4.5 はシリカゲルとジオポリマーの ^{29}Si-MAS-NMR スペクトルによる相違を示したものである．多孔質シリカゲルではその結合中に多くのシラノール基（Si-OH 結合）が含まれるため 3 次元構造を示す Q^4 構造に加え Q^2 や Q^3 構造を示す化学シフト位置にスペクトルが出現しており，この面積比から各成分の比率の算出が可能である．一方，ここで示したメタカオリンから作製したジオポリマーは，CP 法でピークを示さないことから，シラノール基の含有量が少なく，ほぼ Q^4 構造から構成されているのが，シリカゲルやガラスとの違

いである．

図 2.4.6 はフライアッシュ及びそれに高炉スラグを添加した活性フィラーから作製したジオポリマーの ^{29}Si-NMR スペクトルの一例である．活性フィラーとしてフライアッシュのみを使用したジオポリマーでは**図 2.4.6** のように CP 法の測定でピークを示さないことから，多孔質シリカゲルのようなシラノール基は多く含まれないものと推察される．一方，MAS 法は Q^4(0Al～4Al)構造を示す化学シフト位置にスペクトルを示すが，非晶質構造のため比較的ブロードなスペクトルとなり各スペクトルの分離は良くないことが多い．したがって，Q^4(0Al～4Al)のスペクトルを仮定し，このピーク面積比から計算される化学組成と実際の化学組成を比較することで，Q^4(0Al～4Al)のおよその各成分比を算出することは可能であるが，スペクトルの分離が良くないため，その結果には多くの仮定が含まれることとなる．

一方，高炉スラグ微粉末を添加した系で生成する C-S(A)-H を考えた場合，Q^1～Q^3 構造に Al が一部置換した構造が生じる（**図 2.4.6**）．**図 2.4.6** は多くの仮定の元，スペクトル分離を試みた例ではあるが，**図 2.4.3**

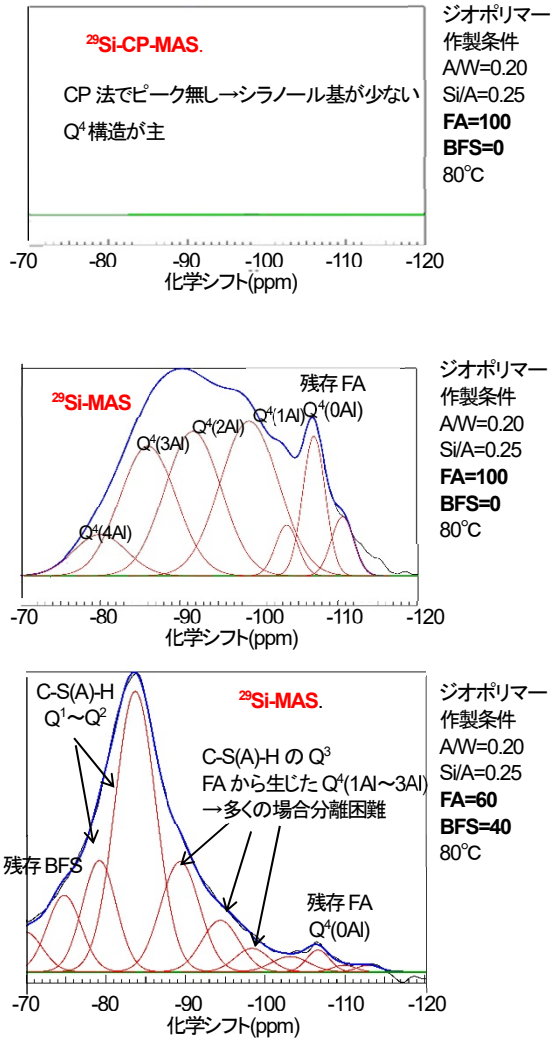


図 2.4.6　フライアッシュと高炉スラグ混合活性フィラーから作製したジオポリマーの ^{29}Si-NMR 例

に示されるように Q^4 の各 Al 置換物質の化学シフト位置と Q^1～Q^3 の化学シフト位置は重なり合っており，さらにそれらの Al の置換物質を考えると相当に複雑である．また，高炉スラグが多いことで Q^3 以下の構造が生じている可能性が高い系に関しても CP 法でスペクトル得られないことが多いことなど，現状，^{29}Si-NMR の

解析に関して疑問点も多く，特に活性フィラーとして，フライアッシュと高炉スラグの混合系粉体が使われた場合，^{29}Si-NMR における精密な各成分比の解析は現状では難しく，その傾向を論じる程度と考えられる．

2.4.2 ^{27}Al-NMR スペクトルの見方

表 2.4.1 は ^{27}Al-NMR スペクトルの化学シフト位置を示したものである．AlO_6 八面体（六配位の Al，すなわち Al を中心に六つの酸素がそれを囲む構造）に対して，AlO_4 四面体（四配位の Al）は+50ppm～+80ppm シフトする．

表 2.4.1 ^{27}Al 化学シフト（$[Al(H_2O)_6]^{3+}$基準）

Al(4) 4 配位	
化合物	化学シフトの範囲
Q^4 ケイ酸塩	+51～+65
Q^3 ケイ酸塩	+66～+75
酸化物	+70～+77

文献 44)から抜粋

図 2.4.7 はフライアッシュから作製したジオポリマーペーストの ^{27}Al-NMR スペクトル例である．およそ+60ppm の化学シフト位置にピークがあることから，**表 2.4.1** に当てはめると Q^4 構造中の 4 配位の Al となり，フライアッシュから生じる主な生成物がゼオライト類似の非晶質 Q^4 構造を示すという結果と矛盾しない．

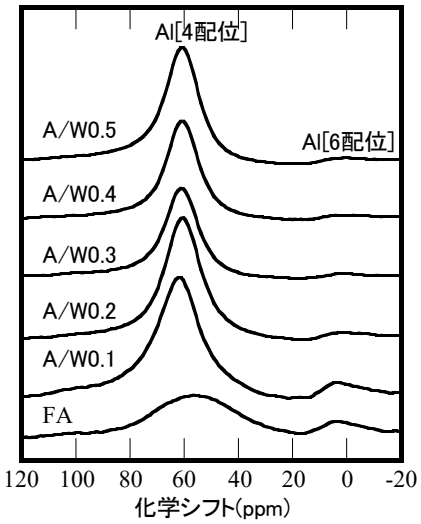


図 2.4.7 フライアッシュから作製したジオポリマーの ^{27}Al-NMR スペクトル

2.4.3 固体 NMR の見方のまとめ

上述のように，^{29}Si および ^{27}Al-NMR を組み合わせて活用することで，非晶質構造のジオポリマーに関しても，その構造を理解することが可能である．ただし，上記のように高炉スラグとフライアッシュの混合系活性フィラーから作製したジオポリマーの詳細解析はそのスペクトル分離に多くの仮定を伴い容易ではない．今後，配合と生成物の構造の関係，その経時変化などに関して本手法に加え，他の手法と合わせて詳細に検討されていくものと考えられる．

2.5　配合と生成物，諸性質の検討例

2.5.1　活性フィラーと溶液配合の影響

フライアッシュはメタカオリン等と比較して，アルカリ溶液に対する溶解性が小さく，短時間で強度を得る（反応を進行させる）ためには比較的高いアルカリ濃度（8M 程度）と高温養生を必要とする[45]．**図 2.5.1** は，配合条件における種々のアルカリ/水(A/W)モル比のジオポリマー硬化体について，高炉スラグ置換率に対する圧縮強度を表したものである．研究機関により，結果が異なる場合もあるが，圧縮強度は A/W 比に相関し，かつ高炉スラグ添加量が増えると同一配合でも強度が大きくなることがわかる．

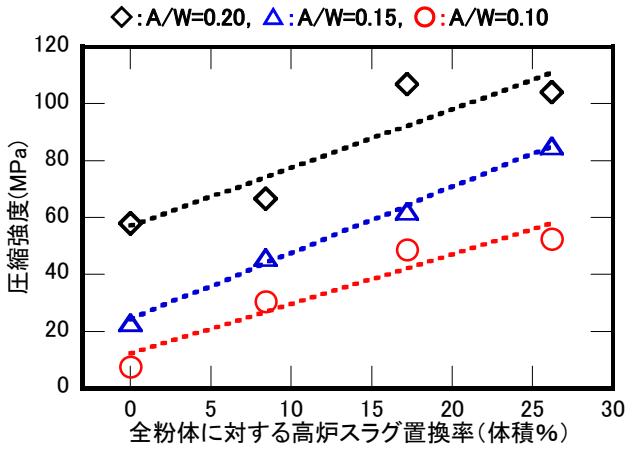


図 2.5.1　配合と強度の関係例[26]

図 2.5.2 は，フライアッシュを出発粉体として作製したジオポリマーペーストの ^{29}Si-NMR スペクトルである[12]．**図 2.5.2** に示されるように処理溶液のアルカリ濃度が高い（A/W 比が高い）とき，出発物質である石炭灰と比較すると Q^4(1Al)～Q^4(4Al)のスペクトルが増加し，いわゆるゼオライトに類似した 3 次元非晶質アルミノシリケート構造がより多く生成する．

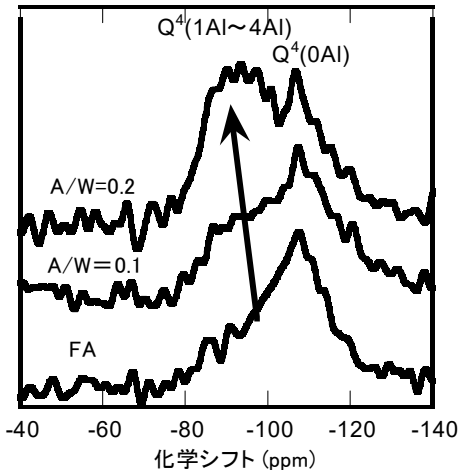


図 2.5.2　FA を出発粉体とするジオポリマーの ^{29}Si-NMR スペクトル[14]

図 2.5.3 は A/W=0.10，Si/A=0.35 の条件で作製したジオポリマーペーストの ^{29}Si-NMR スペクトルである．高炉スラグ 100%フライアッシュ 0%の試料では，-80ppm 付近のスペクトル Q^2(0Al)あるいは Q^2(1Al)等の強度が大きく，いわゆる高炉スラグのアルカリ刺激により生じた硬化体として報告されているもの [27] と同様の位置にスペクトル得られる．したがって，高炉スラグ 100%の活性フィラーからは，ケイ酸カルシウムの Si の一部を Al が置換した C-S(A)-H が生じているものと推察される [40]．ただし，CP 法でスペクトルが得られないなどの報告 [26] もあり，その水和の程度などに関しては異なる部分があるものと考えられる．フライアッシュ 100%で試料では Q^4 構造のアルミノシリケート構造が生じており，高炉スラグ置換率が増えるにつれ，高炉スラグから生じた生成物のスペクトル強度が大きくなる．したがって，フライアッシュと高炉スラグの混合系活性フィラーから作製したジオポリマーは，高炉スラグ由来の C-S(A)-H とフライアッシュ由来のゼオライト状非晶質物質の混合物と推察される．

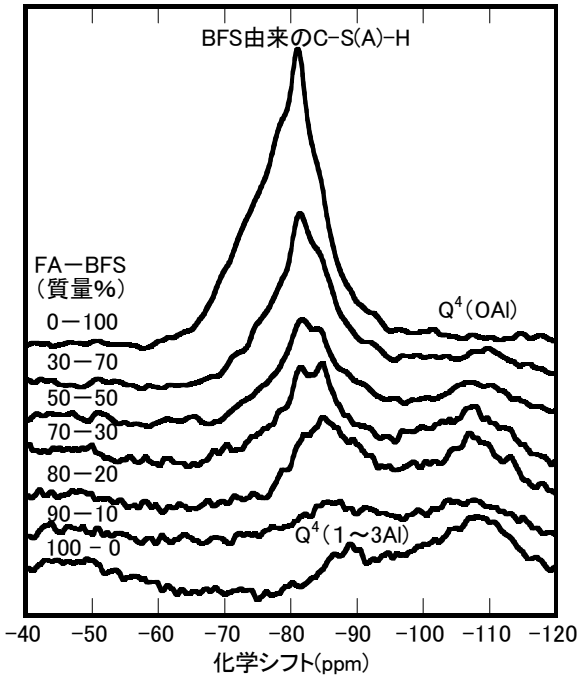


図 2.5.3 FA 及び BFS を出発粉体とするジオポリマーの ^{29}Si-NMR スペクトル

ただし，**図 2.5.3** ではフライアッシュと高炉スラグ混合物の中間配合においてシフト位置の移動が認められていることから，各活性フィラーのアルカリ溶解物質が相互に影響し合い，いわゆるフライアッシュ，高炉スラグ由来の端成分物質の単なる混合物ではないものと考えられる．また，例えば C-S(A)-H 構造内に取り込まれた Na 量や，それがどのような形で取り込まれているか等，いくつかの報告例はあるが [46]，これらの反応は溶液配合や養生温度等，その作製条件の影響を強く受けるにも関わらず，現在の所，配合に関する系統だった検討がなされていないため，その詳細は今後の研究課題であろう．

図 2.5.4 は，A/W 比，Si/A 比，活性フィラー種の影響を調べるために測定した，各種配合で作製したジオポリマーペーストの ^{29}Si-NMR スペクトルである．A/W 比=0.15 の試料で比較すると高炉スラグ添加量が多くなると高炉スラグから生じる C-S(A)-H に起因するスペクトル強度が増大することから，それらの生成量が多くなることがわかる．一方，同一高炉スラグ添加量でアルカリ量が多くなる（A/W 比高くなる．例：高炉スラグ 20%で A/W 比 0.10，0.15，0.20 の配合）と，高炉スラグから生じる C-S(A)-H 起源のピーク強度の増

大と共にフライアッシュから生じると考えられる Q^4 構造のゼオライト類似の非晶質構造を示す物質も増加している.

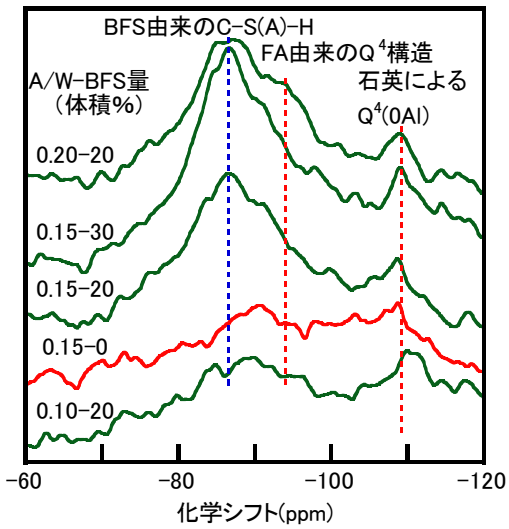


図 2.5.4　FA 及び BFS を出発粉体とするジオポリマーペーストの ^{29}Si-NMR スペクトル [36)]

このように，ジオポリマーは活性フィラーにおけるフライアッシュと高炉スラグの割合，溶液配合における A/W 比の影響を強く受けて異なる生成物が生じるため，仮に同様な強度を有する硬化体でも大きく諸性質が異なることがわかっている.

図 2.5.5 は配合の異なるジオポリマーコンクリートの細孔径分布を水銀圧入法で測定した結果である．ジオポリマーの細孔分布は活性フィラーにおける高炉スラグ量添加により，高炉スラグ無添加の試料（図中の試番(2)）で認められる 40nm 及び 130nm 近傍の細孔半径を示す細孔が減り，より微細な細孔が増加した．また，A/W 比が高くなると高炉スラグ添加量ほど顕著な影響ではないが，微細細孔が増加し細孔容積が減少する．なお，Si/A 比が細孔組織に与える影響は，A/W 比，BFS 置換率と比較して小さいが，BFS 置換率等に応じて，その効果は異なり，BFS 置換率が多い場合，Si/A 比が小さいジオポリマーの方の物質移動抵抗性が向上する傾向であることが報告されている [14)].

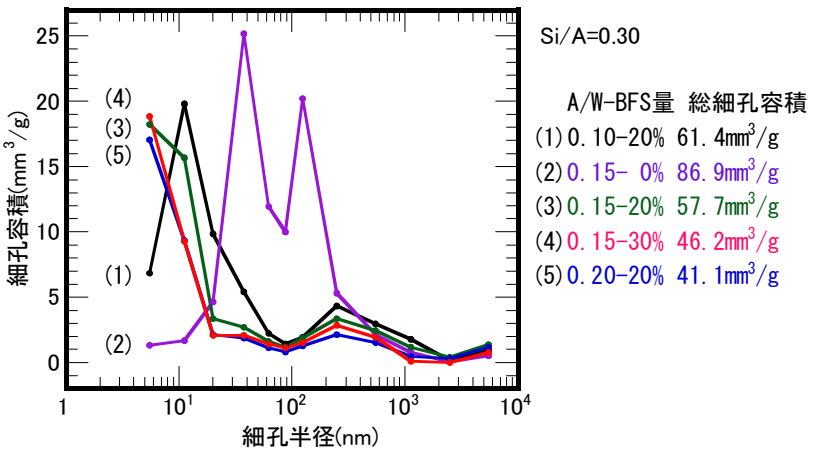


図 2.5.5 フライアッシュ及び高炉スラグを出発粉体とするジオポリマーコンクリートの細孔径分布 [36)]

図 2.5.6 は Si/A 比 0.25 におけるジオポリマーコンクリートの pH 測定結果である．ジオポリマーペースト部を粉砕した 75μm 未満の試料と水とを固液比 1:1 で撹拌し，濾過した溶液の pH を測定した．なお，一般的なセメントコンクリートは $Ca(OH)_2$ が飽和状態となるため固液比の大小の影響を受けづらいが，ジオポリマーの場合は固液比の影響を受けやすいため，直接の比較は注意が必要である．ここで，同一の高炉スラグ添加量では，A/W 比が高くなるほど pH は高くなり，同一の A/W 比では高炉スラグ添加量に応じて pH が高くなった．このことから，高炉スラグから生じる C-S(A)-H はフライアッシュから生じるゼオライト状非晶質物質と比較して，その構造内に取り込まれるアルカリ量が少なく，その構造外にアルカリ成分が存在することがわかる．なお，Si/A 比による pH の相違は小さいことが報告されているが[40]，日本コンクリート工学会における「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会 JCI-TC155A」における共通試験の配合確認時にフレッシュ性状に大きく影響することも報告されており，Si/A 比，生成物と諸性質との詳細な関係はこれから明らかにされていく課題である．

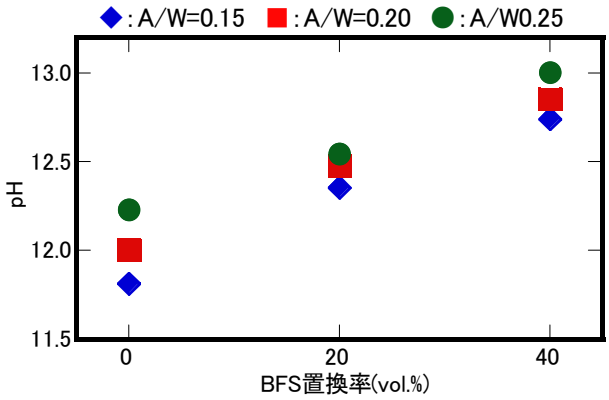


図 2.5.6　Si/A=0.25 で作製したジオポリマーコンクリートの pH[40]

2.5.2　養生温度による生成物の相違

活性フィラーとしてフライアッシュを単独使用した場合，硬化に時間を要するため一般的に蒸気養生等の加温養生が行われている．しかし，活性フィラーとしてフライアッシュに高炉スラグを添加すると硬化が促進され，常温でも十分な強度が得られるため，近年では常温養生による研究例も多い[46]．ここでは，常温養生の対象となる活性フィラーに高炉スラグを添加した系における養生温度による，生成物の相違例を紹介する．

図 2.5.7 はフライアッシュに対する高炉スラグの置換率が 40　vol.%，A/W 比 0.114，Si/A 比 1.076 で作製したジオポリマーの ^{29}Si-NMR スペクトルである[47]．比較のために，高耐久性を意識した A/W 比 0.20 の配合例も合わせて記述した．佐藤[47]は，X 線回折のデータとこの NMR データから，A/W 比 0.1，Si/A 比 1.0 程度のアルカリ量が少ない配合の常温養生試料は，主に高炉スラグ部が反応し，未反応フライアッシュの残存量が多く，従来報告されている高炉スラグのアルカリ刺激生成物[27]と同様な物質であるとしている．一方，80℃養生試料ではフライアッシュの反応が進行し，むしろ未反応高炉スラグ残存量が多く，また生じた C-S(A)-H もフライアッシュの影響を受け，常温養生の生成物とは異なることを報告している．

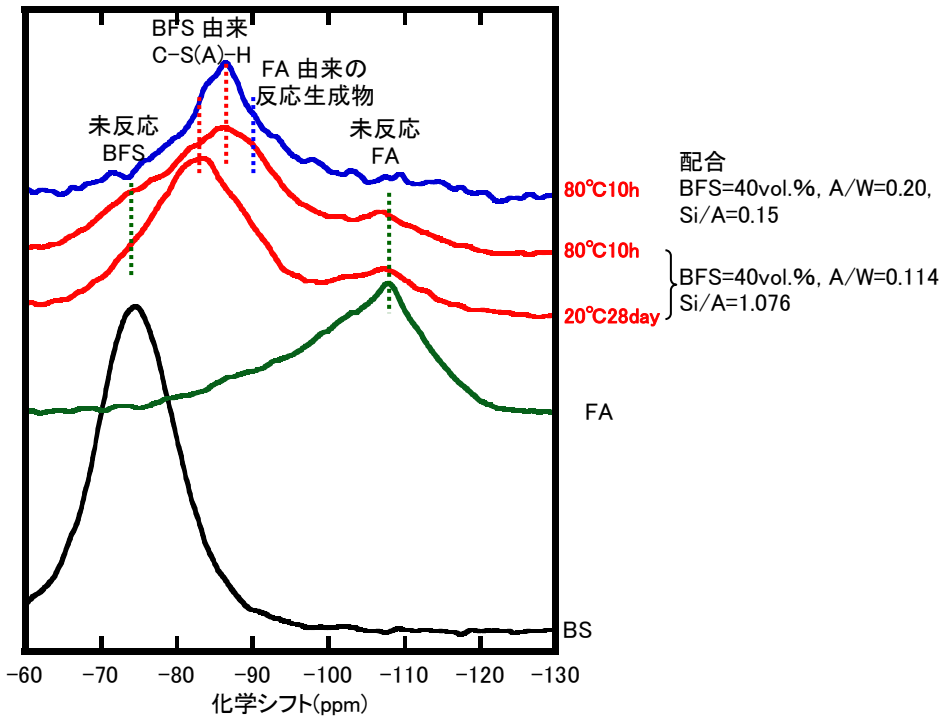


図 2.5.7 ジオポリマーペーストの ^{29}Si-NMR スペクトル [47)]

図 2.5.8 は，上記ジオポリマーの塩分浸透特性を測定したものである．ここで，常温養生試料の方の圧縮強度が低いにもかかわらず，塩分浸透が抑制されている．これは，高炉スラグに関連した生成物は緻密になりやすく，フライアッシュから生じた生成物は圧縮強度が高い場合でも比較的多孔質になりやすいとした**図 2.2.1** の結果に対応しており，その生成物の構造が異なるためと考えられる．このように，ジオポリマーは配合や養生温度によって，生成物が異なるため，この物質群の性質を「ジオポリマー」という一つの名前で総括することは，現状では無理であり，常に配合とセットで考える必要がある．

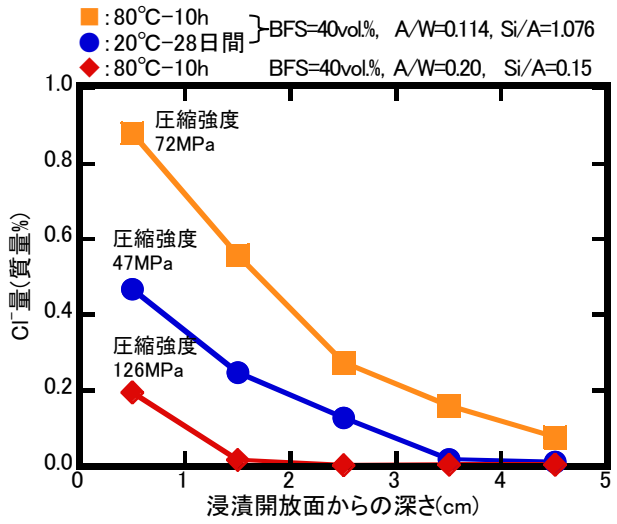


図 2.5.8　養生温度が異なるジオポリマーモルタルの塩水浸漬試験結果例 [47)]

2.6 反応機構のまとめ

日本コンクリート工学会における「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会 JCI-TC155A」では，ジオポリマーの研究において，種々の活性フィラーや溶液配合など，その反応生成物や反応機構が，複雑化していることを受け，その反応生成物の構造や反応機構からジオポリマーを定義することはせず，使用材料，すなわちその溶液や活性フィラーの種類から，定義することとした．そこで決定されたジオポリマーの定義は以下の通りである．

「ジオポリマーとはセメントクリンカーを使用せず，非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料とアルカリ金属のケイ酸塩，炭酸塩，水酸化物水溶液を用いて硬化させたもの」

この定義の元，作製されるジオポリマーは，配合や養生条件により様々な生成物が含まれるが，フライアッシュー高炉スラグ系活性フィラーに限定すると，提案した配合記述法から，およそ以下のように整理できる．

(1)ジオポリマーの主な生成物はフライアッシュから生じるゼオライト類似の 3 次元アルミノケイ酸塩構造と高炉スラグから生じるカルシウムケイ酸塩構造 (C-S(A)-H) である．なお，この C-S(A)-H はセメント水和物のそれと比較すると Ca/Si 比が小さく，Al 含有量が多いものと考えられている．ただし，単なる端成分同士の混合ではなく，各配合・養生温度により，反応割合も異なり，相互の影響割合も異なることから複雑な系である．

各配合に関して，

(2) 活性フィラーでフライアッシュが多いときゼオライト状の非晶質構造が多く生成する．

(3) 溶液配合のアルカリ成分/水 (A/W) モル比が高いとき，フライアッシュ及び高炉スラグ成分の反応が進行し，溶液中のケイ素成分/アルカリ成分 (Si/A) モル比は，フレッシュ性状に大きく影響する．

(4) 溶液配合によって異なるが，同一配合とすると養生温度が低いときの反応は高炉スラグが支配的で，温度が高くなるとフライアッシュの反応の影響が大きくなる．

なお，一般的にジオポリマーの特徴として流布されている性質はフライアッシュ起源のジオポリマーに関するものが多いが，フライアッシュ起源のものは高強度でも比較的多孔質になりやすく物質移動抵抗性は必ずしも高くない．反対に高炉スラグ起源のものは緻密になりやすいが，酸に対する抵抗性等は低下する傾向である．

このように，ジオポリマーは，例えば生じた硬化体の強度が同じでも，活性フィラーの種類，使用溶液の配合，養生温度により，生成物が一般的なセメント硬化体以上に異なっており，その性質も大きく異なる．したがって，この物質群の性質を「ジオポリマー」と総括して単純に示すことは不可能であり，一つの配合における反応・性質は，その配合における特徴に過ぎない．したがって，ジオポリマーの特徴・性質の理解は，必ずその配合と結びつけて考える必要があり，将来的には，より明確に配合と諸性質が体系化されることが期待される．

参考文献

1) Davidovits, J.: Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation progress. US Patent No.4472199, 1984

2) Davidovits, J. and Sawyer, J. L.: Early high-strength mineral polymer, US Patent No.4509985, 1985

3) Davidovits, J.: Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, J. Thermal Analysis, 37, 1633-1656, 1991
4) 正田武則, 松方正彦, 山﨑淳司：アルミノケイ酸塩ポリマー系新規材料に対する各種陽イオンのイオン交換特性, 化学工学会第 82 回年会, L115, 2017
5) 正田武則,松方正彦,山﨑淳司:多孔質アルミノケイ酸塩吸着剤の開発,工業材料,Vol.65,No.3,pp45-48, 共同技研株式会社, 2017
6) 正田武則,山﨑淳司:新規アルミノケイ酸塩ポリマー吸着剤の開発,先進無機高分子材料の開発,pp.107-115, シーエムシー出版, 2016
7) Uehara M., Isogaya S., Yamazaki A.: Ion-Exchange Properties of Geopolymer Hardened Body Prepared from Fly Ash, Clay Science, Vol.14, No.3, pp.127-133, 2009
8) 瀧華裕之： 無機硬化性組成物, 特願 2009-106573, 特許第 5374221 号
9) 瀧華裕之, 中野龍俊：無機成形体の製造方法, 特願 2004-274260, 特許第 4608273 号
10) 一宮一夫, 津郷俊二, 原田耕司, 池田　攻：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011
11) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田　攻：ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1937-1942, 2011
12) 上原元樹:ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発,鉄道総研報告,Vol.22,No.4,pp.41-46, 2008
13) 南　浩輔, 上原元樹, 梶田秀幸, 舟橋誠司：ジオポリマーコンクリートの圧縮クリープに関する基礎的研究：コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1969-1974, 2015
14) 束原　実, 大木信洋, 上原元樹：短繊維補強ジオポリマー単まくらぎの実用化に向けた基礎的検討：コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1963-1968, 2015
15) 永井伴英, 李　柱国, 高垣内仁志, 岡田朋久：ジオポリマーコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2301-2306, 2016
16) 合田寛基, 原田耕司, 西崎丈能, 大西俊輔, 佐川康貴, 日比野誠：ジオポリマーコンクリートを用いた RC はり曲げ挙動, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演要旨集, pp.413-414, 2016
17) Fernamdez-Jimenez A., and Palomo A.: Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.1984-1992, 2005
18) Davidovits, J.: Properties of Geopolymer Cements, First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, pp.131-149, 1994
19) 合田寛基,原田耕司,日比野誠:フライアッシュ系ジオポリマーの強度特性に対する高炉スラグの影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演要旨集, pp.605-606, 2014
20) 原田耕司, 合田寛基, 一宮一夫, 日比野誠：ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2236-2241, 2014
21) 上原元樹, 束原　実, 横川勝則：ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの作製, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演要旨集, pp.735-736, 2009
22) Deb, P.S., Nath, P., Sarker, P.K.: The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature, Materials and Design, Vol.62, pp.32-39,

2014

23) Marcin, M., Sisol, M., Brezani, I.: Effect of slag addition on mechanical properties of Fly ash Based Geopolymers, Procedia Engineering, Vol.151, pp.191-197, 2016

24) 岡田朋久，李　柱国，橋爪　進，永井伴英：凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2295-2300，2016

25) 国枝　稔，李　虎，上田尚史，中村　光：ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1999-2004，2013

26) 上原元樹，南　浩輔，平田紘子，山﨑淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015

27) Wang S. D. and Scrivener K. L.: ^{29}Si and ^{27}Al NMR study of alkali-activated slag, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.769-774, 2003

28) Palomo. A., Krivenko P., Garcia-Lodeiro I., Kavalerova E., Maltseva O., and Fernandez-Jimenez A.: A review on alkaline activation: new analytical perspectives, Materiales de Construcción, Vol.64 Issue 315, 2014

29) Wang S.D., Scivener K.L., and Pratt P.L.: Factors Affecting the Strength of Alkali-Activated Slag, Cement and Concrete Research, Vol.24, Issue6, pp.1033-1043, 1994

30) Fernandez-Jimenez A. and Puertas F.: Structure of Calcium Silicate Hydrates Formed in Alkaline-Activated Slag: Influence of the Type of Alkaline Activator, Journal of American Ceramic Society, Vol.86, pp.1389-94, 2003

31) Li C., Sun H., and Li L.: A review: The Comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolon (Si+Al) cements, Cement and Concrete research, Vol.40, pp.1341-1349, 2010

32) Escalante-Garcia J.I., Gorokhovsky A.V., Mendoza G., Fuentes A.F.: Effect of geothermal waste on strength and microstructure of alkali-activated slag cement mortars, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.1567-1574, 2003

33) Criado M., Aperador, W., Sobrados, I.: Microstructural and mechanical properties of alkali activated Colombian raw materials, Materials, Vol.9, No.3, pp.1-16, 2016

34) Uehara M., and Sasaki T.: Hydration of Ca A-Type Zeolite and $Ca(OH)_2$, Chemistry Letters, Vol.30, No.4, pp.1040-1041, 2001

35) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田　攻：活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2005-2010，2013

36) 佐藤隆恒，上原元樹，南　浩輔，大木信洋：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸特性，「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集，pp.59-66，2016

37) 山本武志：フライアッシュを用いた高強度ゼオライト硬化体製造技術の開発，電力中央研究所報告，N08068，pp.1-12，2009

38) 上原元樹，佐藤隆恒，大内悠人，山﨑淳司：フライアッシュを原料としたH^+型ジオポリマーの作製とイオン交換特性，粘土科学，Vol.53，No.1，pp.8-15，2014

39) 南　浩輔，白根勇二，佐藤隆恒，上原元樹：ケイ酸アルカリ溶液中のケイ素／アルカリ比がジオポリマーコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2231-2336，2016

40) 佐藤隆恒，上原元樹，南　浩輔，山﨑淳司：ジオポリマー硬化体の種々の配合，作製法における生成物と pH 等諸性質との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016
41) 上原元樹，佐藤隆恒，平田紘子，山﨑淳司：フライアッシュジオポリマー硬化体の塩化物イオン浸透性，土木学会第 68 回年次学術講演会講演要旨集，pp.615-616，2013
42) 上原元樹，佐藤隆恒，杉本行弘：ジオポリマー硬化体の強度に影響するフライアッシュの反応性評価，無機マテリアル学会第 121 回学術講演会講演要旨集，pp.64-65，2010
43) Loewenstein，W.：The distribution of aluminum in the tetrahedra of silicates and aluminates，American Mineralogist，Vol.39，pp.92-96，1954
44) 渡部徳子：無機および粘土鉱物，高分解能 NMR－基礎と新しい展開－　斉藤 肇・森島績　編，東京化学同人社，pp.141-158，1987
45) 池田　攻：常温・蒸気養生硬化型ジオポリマーの生成，無機高分子の開発の最前線，pp.74-91，シーエムシー出版，2009
46) Davidovits，J.，Izquierdo，M.，Querol，X.，Antennuci，D.，Nugteren，H.，Bustselaar-Orthlieb，V.，Fernandez-Pereia，C.，Luna，Y.：Geopolymer Cement based on European Coal Fly Ashes，The European Research Project GEOASH，Vo.4，pp1-12，2014
47) 佐藤隆恒，上原元樹，山﨑淳司：低アルカリ/水比，高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質，コンクリート工学論文集，Vol.39，No.1，pp.2035-2040，2017

（執筆者：上原　元樹）

３．結合材

3.1　活性フィラー

ここでは，ジオポリマーの作製に用いる材料の主なものとして，出発粉体（活性フィラー）であるフライアッシュ，高炉スラグ微粉末，及びその他のフィラーを，アルカリ溶液として水ガラス，苛性ソーダ及びその他のアルカリ溶液についてそれぞれ概説する．

3.1.1　フライアッシュ

フライアッシュは火力発電所における微粉炭燃焼によって発生する石炭灰のうち，燃焼ガスとともに煙道へ排出されて浮遊している粒子を電気集塵機により捕集したものである．

フライアッシュは人工ポゾランの一種である．ポゾランとは，それ自体はほとんど水硬性を持たないが，水の存在のもと常温で水酸化カルシウムと徐々に反応し（ポゾラン反応），不溶性の化合物を生成して硬化するシリカ質粉末の総称である．天然ポゾランの歴史は古く，強度，耐久性に優れる材料としてイタリア Pozzoli 地方の火山灰（Pozzolana）などを石灰ポゾランセメントの材料として使用した 2000 年以上前に古代ローマ時代まで遡ることになる [1]．わが国でも，明治時代に小樽港北防波堤，佐世保軍港工事に火山灰を混合したコンクリートが用いられている．現在では，火山灰等の天然ポゾランに対して，フライアッシュやシリカフュームなどの人工ポゾランがその特徴を活かし，コンクリート混和材などとして有効利用されている [2]．

フライアッシュの品質として JIS A 6201 では，粉末度，未燃カーボン量の指標となる強熱減量，フロー値比，活性度指数などから，I～IV 種が規定されている．未燃カーボンは比表面積が非常に大きく，化学混和剤を表面に吸着するために混和剤が期待通りに作用しないなど，コンクリートのフレッシュ性状に影響のあることが知られている．フライアッシュの化学組成は，使用炭種，ボイラーの構造，電気集塵機の形式などにより異なるが，同規格では，I～IV 種のいずれも二酸化ケイ素が 45.0 %以上と規定されているのみである．

フライアッシュは，未燃カーボンを除けば結晶相とガラス相で構成され，結晶相として含まれるのは石英（Quartz, SiO_2），ムライト（一般式 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$），石こう（$CaSO_4$），マグネタイト（Fe_3O_4），ヘマタイト（Fe_2O_3）などである．高温に曝されたフライアッシュの結晶相はわずかで，石英，ムライトからなり，受温度が低いとマグネタイト，ヘマタイト，石こうなどが存在するようになる [3]．これらの結晶相はセメントとほとんど反応せず，ポゾラン反応に関与するのは主にガラス相である．したがって，フライアッシュセメントの水和反応や耐久性を詳細に検討する場合には，ガラス相の量（ガラス化率）やガラス相の化学組成を明らかにしておくことが重要となる [2]．

日本国内 5 か所の石炭火力発電所から採取したフライアッシュの基本物性およびフライアッシュのガラス相の分析結果の一例を**表 3.1.1** および**表 3.1.2** にそれぞれ示す [4]．

表 3.1.1　フライアッシュの基本物性の測定例

フライアッシュ	二酸化けい素(%)	強熱減量(%)	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	活性度指数(%)	
					28日	91日
1	62.4	2.0	2.33	3,880	85	100
2	56.9	1.5	2.26	4,030	84	100
3	60.8	2.6	2.27	4,210	81	100
4	55.6	2.3	2.43	2,790	88	96
5	54.0	1.0	2.27	3,460	85	100

表 3.1.2　FA ガラス相の化学組成と塩基度

フライアッシュ	ガラス化率(%)	ガラス相の化学組成(%)					塩基度
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	
1	70.3	69.2	21.4	4.4	3.6	1.4	0.38
2	77.1	64.5	23.9	4.8	5.3	1.5	0.48
3	62.7	74.8	9.2	6.4	8.6	1.0	0.25
4	77.8	61.9	27.6	5.9	3.4	1.1	0.52
5	74.7	63.1	26.3	5.9	3.6	1.0	0.49

上記フライアッシュはいずれも JIS II 種灰に相当し，基本物性は概ね同程度で，ガラス化率の範囲は 60～80 %程度，ガラス相の化学組成は Al_2O_3 量にやや幅があった．日本国内のフライアッシュの CaO 含有量は一般に少ないが，欧州や東南アジア等では，CaO 含有量が 10 %以上の高カルシウムフライアッシュ（ASTM Class C）も一般的に用いられており[5]，海外文献の調査等では注意が必要である．

以上のフライアッシュの特性は，”フライアッシュセメント”とした際の議論であり，ジオポリマーの出発粉体（活性フィラー）としてのフライアッシュは，Si および Al を主成分（アルミノシリケート）とするガラス相であることが特徴である．このアルミノシリケートを主成分とするガラス相が，アルカリ環境下で溶解することでジオポリマーの反応が進行する．

フライアッシュのポゾラン反応性を迅速に判定する手法としては，山本らにより促進化学試験法（API 法）が提案されている[6, 7]．これは，フライアッシュ，普通ポルトランドセメント，水を所定量混合した試料を 80 ℃で 18 時間反応させた後，ろ液中の Ca^{2+}，Na^{+}，K^{+}イオン濃度を測定し，フライアッシュを混合しない基準試料からの Ca^{2+}消費率として表すことにより，フライアッシュのポゾラン反応性を評価する手法である．この手法は 91 日における活性度指数とよい相関のあることが示されている．API 法は，セメント懸濁液を用い，セメント硬化体中でのポゾラン反応性を迅速に評価する手法として提案されているものであり，水ガラス，苛性ソーダ等を用いるジオポリマーでの反応とは異なるため，適用に当たってはこれらの相違に留意すべきである．

3.1.2　高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は，高炉(溶鉱炉)にて銑鉄を製造する際に副産する溶融状態の高炉スラグを水で急冷し微粉砕したものであり，JIS A 6206 によりその品質が規定されている．高炉水砕スラグは，アルカリや硫酸塩等の刺激により反応･硬化する性質を持っており，古くは 1739 年に現在のドイツにてセメント質材料として利用されたといわれる．その後，混合セメントして世界的に使用されており，日本においても 1900 年代初頭に混合セメントとして利用されてから 1 世紀以上の歴史がある[8]．

溶鉱炉において投入された材料のうち，鉄鉱石から鉄分を除いた残りの部分，石灰石，コークスの灰分などが溶融された状態で銑鉄の上に浮かんだものが高炉スラグであり，CaO，SiO_2，Al_2O_3，MgO を主成分とする．高炉スラグを大量の水で急冷した水砕スラグは結晶化されずにほぼ 100 %がガラス質となっており，ガラス構造は不規則な配列の-O-Si-O-Al-O-の三次元網目構造体であると考えられている．全化学組成はほぼゲーレナイト(C_2AS)とオケルマナイト(C_2MS_2)の連続固溶体であるメリライトの化学組成に近いとされる．

高炉スラグ微粉末の反応は潜在水硬性といわれ，ポルトランドセメントのクリンカ鉱物のように水に接しただけでは自己触発的に水和反応を開始できない．スラグと純水との接触反応においては，非常に緻密なケイ酸塩に富んだゲルの薄膜が形成されて深部までの水の侵入を妨げるとされ，アルカリや硫酸塩等によりこのゲルを粗いゲルにすることが，潜在水硬性を覚醒させる刺激作用であると説明されている．この中で反応

性が大きいものから硫酸塩＞消石灰＞クリンカと考えられている．前述したガラス構造である-O-Si-O-Al-O-の三次元網目構造体の鎖状結合を切断し，この構造体の空孔に網目の修飾元素である Ca，Mg，Al などが流出することで硬化が開始するという考えが一般的である．

高炉スラグ微粉末を pH12 以上の水酸化カルシウム飽和溶液に置くと，水和が開始し徐々にカルシウムイオンがわずかに消費される．しかし $Ca(OH)_2$ の補給を断ち，ある濃度以下のアルカリ量になると反応は進行しなくなるといわれる．アルカリの刺激作用によってスラグ表面からの溶解反応が起こると，その溶液から不溶性物質が生成され沈殿して硬化し始める．この場合，スラグは長期的にスラグ質量の約 10%に相当する $Ca(OH)_2$ を結合することができるとされ，ポルトランドセメントクリンカから供給される $Ca(OH)_2$ はその反応に十分であるため，置換率 75 %程度までのスラグ量であればスラグの反応に十分な $Ca(OH)_2$ が供給されることになる．

以上が，高炉セメントまたはスラグ硫酸塩セメントにおける，高炉スラグ微粉末の反応メカニズムと考えられている．ジオポリマーの出発粉体(活性フィラー)としての高炉スラグ微粉末の特徴は，フライアッシュとは異なり，Si，Al に加えて Ca 成分を多く含むことが特徴である．高炉スラグ微粉末のみを用いた場合は，圧縮強度が高く凝結時間が短いこと，反応生成物は C-A-S-H ゲルが主体と考えられている．一方でフライアッシュのみを用いたジオポリマーは，凝結時間が遅く初期強度発現性に劣り，実用的な強度発現性とするには加温養生が必要とされている．したがって，常温硬化型のジオポリマーとするために，出発粉体をフライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用した検討例が比較的多い．近年では，高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの凝結時間を延長するために，予め熱処理された高炉スラグ微粉末を用いる研究事例も報告されている[9, 10]．

3.1.3 その他のフィラー

(1) 海外の動向

ジオポリマーの出発粉末(活性フィラー)は，一般にはフライアッシュ(FA)が用いられるが，ジオポリマーを生成するためのフィラー材料としては，Si，Al を主成分としたガラス質であればよく，FA 以外に多くの材料が研究対象となっている．これらの多くはアルミノケイ酸塩あるいはケイ酸塩，水酸化アルミニウム成分のいずれかを主成分とする材料である．海外の文献を調査すると，メタカオリン，もみ殻灰，パームオイルフライアッシュ，コールボトムアッシュ，都市ごみ焼却灰，下水汚泥灰，木質バイオマス灰などの様々な業種からの灰や，鉱山等より発生する鉱さい，アルミニウムを多く含む材料（水酸化アルミニウム，α-アルミナ，ボーキサイト鉱山の廃材など)，廃ガラス，火山性堆積物(火山灰)，廃ガス脱硫セッコウ，コンクリート廃材など多岐にわたる．

このうち，メタカオリンについては，ダビドビッツが提唱したジオポリマーに使用されていた出発粉体であり，ジオポリマーの合成で使用されるメタカオリンは，カオリナイト（$Al_2Si_2O_5(OH)_4$）やハロイサイト（$Al_2Si_2O_5(OH)_4$)，パイロフェライト（$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$）などアルミノケイ酸塩を加熱し，完全に脱水させたものである．国内での検討事例は少ないが，海外では数多くの研究事例が報告されており，先の日本コンクリート工学会の委員会報告書に詳細な文献調査結果が報告されている[11]．

また，Google Scholar にて海外文献の調査を行うと，2022 年 10 月時点で，例えば「geopolymer, rice husk ash」で 9500 件，「geopolymer, biomass」で 9000 件，「geopolymer, volcanic ash」で 4000 件程度の文献がヒットする．これらのうち，もみ殻灰[12]，バイオマス灰[13]，火山灰[14]，FA 以外の材料を総括したもの[15,16]についてはそれぞれレビュー論文が存在し，研究の注目度の高さや研究数の多さを裏付ける結果と考

えられる．

(2) 国内の動向

一方で，日本国内でこれらをジオポリマーの出発粉末として適用した研究事例は，海外と比較すると多くない．もみ殻灰をジオポリマーの出発粉体として適用した国内の研究事例は見出すことができなかった．しかし，もみ殻灰から高純度の非晶質シリカを抽出し，シリカフューム代替となるようなセメント混和材として適用できることが報告されており[17, 18]，ジオポリマーへも適用可能と考えられる．また，ジオポリマー硬化体は，重金属の固定に優れることが一般に知られており，この特性を利用した都市ごみ焼却灰などの廃棄物焼却灰の処理技術に関する研究事例や[19-22]，固化体を建設材料として利用するための調合，性能検討および重金属の固定率，溶出量に関する検討事例[23, 24]が報告されている．

また，家畜排せつ物，下水汚泥，食品廃棄物，林地残材等の各種バイオマスのうち，利用率が低く最もバイオマス発電に向くのは木質バイオマスであり，近年のバイオマス発電所の急増によって木質燃焼灰発生量の増加が継続している．燃焼後の焼却灰は産業廃棄物であり，木質バイオマス灰の有効利用法の確立が急務となっている．このような観点から各種の利活用に関する研究が進められており，肥料[25]や融雪促進剤[26]への適用も検討されている．建設産業では，路盤材[27]や地盤改良材[28]としての適用やセメント混和材[29-32]への適用が報告されているが，ジオポリマーへの適用報告は少ない[33, 34]．

さらに，火山灰は，ガラス質を多量に含む天然ポゾランの一種であり，古くよりコンクリートの性能を向上させることが知られている．しかし，火山灰の物性は地域ごとに異なることや，天然ポゾランの一般的な課題である「反応性の遅さ」や「流動性の低下」などから幅広い普及には至っていない．一方，火山灰の非晶質量や粒度等を選別することで，火山ガラス微粉末をコンクリート用混和材として高度利用できることが報告され[35]，2020 年には JIS A 6209 コンクリート用火山ガラス微粉末が制定された．日本コンクリート工学会において火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関する研究委員会が設置されるなど，火山灰は「古くて新しい材料」として近年関心が高まっている．火山灰のセメント混和材としての適用検討数多くの事例があるものの[36-40]，国内でのジオポリマーへの適用を検討した研究は少ない[41-44]．

バイオマス灰および火山灰を用いたジオポリマーに関する研究の一例として，**図 3.1.1** には，バイオマス灰および火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度を示す[33]．アルカリ溶液は 1 号水ガラスを用い，20 ℃封かんの養生条件である．常温養生であることや NaOH 溶液を用いていないことから，BFS 置換率が低い場合での強度発現は小さく，バイオマス灰と火山灰を比較すると，火山灰の反応性が高いと判断された．

図 3.1.2 には，フライアッシュおよび火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度を示す[44]．アルカリ溶液は 2 号水ガラスおよび NaOH 水溶液を用いてアルカリ水モル比(A/W)を 0.134 に調製し，20 ℃封かんの養生条件である．常温養生であることから BFS 置換率が低い場合での強度発現は小さいが，フライアッシュと比較して火山灰の反応性は低いと判断された．

これらの結果から，木質バイオマス灰，火山灰のいずれも非晶質のアルミノシリケートを含有し，ジオポリマーの活性フィラーとして適用できる性質を有しているが，フライアッシュに比較して火山灰のジオポリマー反応性は低く，木質バイオマス灰は火山灰よりもさらに反応性は低いと考えられる．

ジオポリマーの反応に求められる活性フィラーの性質として，化学的特性である「ガラスの量」(ガラス化率)および「ガラスの質」(ガラス相の塩基度等)が重要である．加えて，セメントコンクリートと同様にジオポリマーは粉体と溶液の反応であることから，物理的特性として粉体の「比表面積(粉末度)」の影響も大きいことは論を俟たない．さらに，混錬後のフレッシュ性状は，「粒子形状」が大きく影響し，特にフライアッ

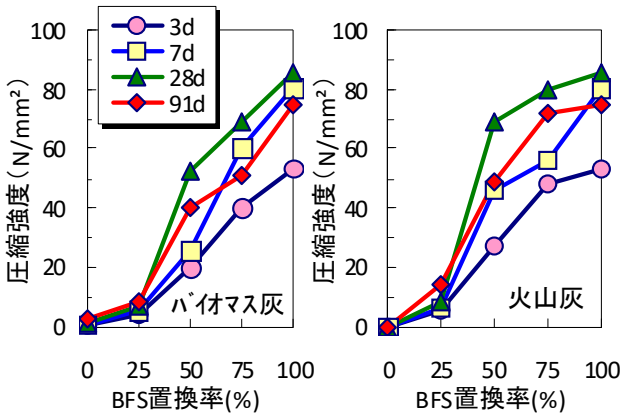


図 3.1.1　バイオマス灰および火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度

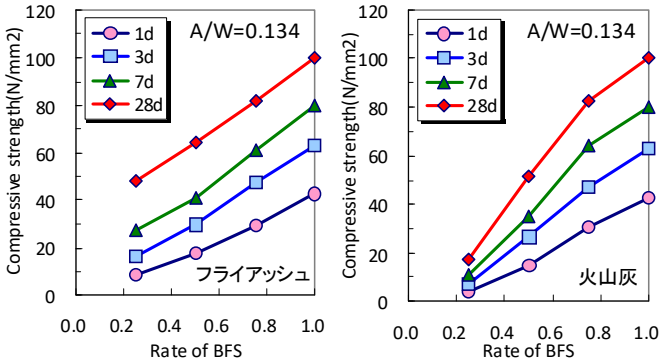


図 3.1.2　フライアッシュおよび火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度

シュは球形粒子であり，ボールベアリング効果によってフレッシュコンクリートの流動性は向上してワーカビリティーは改善され，所要のコンシステンシーを得るために必要な単位水量を少なくすることができることが良く知られている．ジオポリマーについても同様の効果を有していると考えられ，フライアッシュの粒子形状は，他の活性フィラーには具備しない優れた特徴といえ，各種フィラーのジオポリマーの適用に際しては，フレッシュ性状を改善する化学混和剤の開発も併せて必要と考えられる．

参考文献

1)　土木学会：古代ローマコンクリート　ソンマ・ヴェスヴィアーナ遺跡から発掘されたコンクリートの調査と分析，コンクリートライブラリー131 号，2009

2)　土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会)報告書ならびにシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 74，2007

3)　内川浩：混合セメントの水和及び構造形成に及ぼす混合材の効果《その 2》，セメント・コンクリート，No.484，pp.81-93，1987

4)　日本コンクリート工学会：セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会，セメント系材料の自己治癒に関するシンポジウム委員会報告書，2011

5)　田野崎隆雄：海外石炭灰規格の動向とその日本への影響について，石炭灰有効利用シンポジウム，2005

6)　山本武志，金津努：フライアッシュのポゾラン反応性を評価するための促進化学試験法(API 法)の提案，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.320-329，2006

7) 山本武志，金津努：API 法によるフライアッシュのアルカリシリカ反応抑制効果の評価，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.657-671，2006
8) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会)報告書ならびにシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 74，2007
9) 李柱国，池田攻：ジオポリマーの凝結を遅延するための高炉スラグ微粉末の熱処理技術，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1349-1354，2021
10) 深谷竣平，李柱国：高炉水砕徐冷スラグを用いたジオポリマーセメントに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1097-1101，2022
11) 日本コンクリート工学会：建設分野でのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
12) Sk S. Hossain, P.K. Roy, Chang-JunBae: Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review, Construction and Building Materials, Vol.310, No.6, 125218, 2021
13) B.S. Thomas et al.: Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review, Journal of Building Engineering, Vol.40, 102332, 2021
14) S. Luhar, N.P. Rajamane, O. Corbu and I. Luhar: Impact of incorporation of volcanic ash on geopolymerization, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.572, 012001, 2019
15) B.C. Mendes et al.: Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review, Journal of Building Engineering, Vol.35, 102010, 2021
16) R.S. Krishna et al.: A review on developments of environmentally friendly geopolymer technology, Materialia, Vol.20, 101212, 2021
17) 梅田純子，高田龍一，道浦吉貞，近藤勝義：農作物非食部バイオマスから高純度非晶質シリカの抽出プロセスとコンクリート用混和材としての利活用，スマートプロセス学会誌，Vol.3，No.5，pp.323-327，2014
18) 羅承賢，金沢智彦，近藤勝義，梅田純子：籾殻由来のナノ構造体シリカ微粒子を用いたセメントの低アルカリセメントへの適用検討，第 71 回セメント技術大会講演要旨，pp.8-9，2017
19) 塩田憲司，中村祐太，高岡昌輝：ジオポリマー法による易溶性飛灰中セシウムの固定化機構の解明，KEK Progress Report，2020
20) 辻井張希ほか：ジオポリマーによる溶融飛灰中セシウム不溶化に対する NaOH 濃度の影響，第 31 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.427-428，2020
21) 辻井張希ほか：アルミノケイ酸塩のアルカリ溶液への溶解特性がジオポリマーによる熱処理飛灰中セシウム不溶化に与える影響，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.32，pp.136-146，2021
22) 齋藤凜太郎，小川熟人，小池裕也：都市ごみ焼却飛灰・土壌混合ジオポリマー固化に用いる土壌種と放射性セシウム溶出抑制効果の関係，第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.419-420，2021
23) Z. Li, R. Kondo and K. Ikeda: Recycling of Waste Incineration Bottom Ash and Heavy Metal Immobilization by Geopolymer Production, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.259-279, 2021
24) Z. Li, R. Kondo and K. Ikeda: Development of Foamed Geopolymer with Addition of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.830-

846, 2021
25) 高橋徹ほか：木質系バイオマス燃焼灰の安全性評価および有効利用，第 19 回廃棄物学会研究発表会，2008
26) 折橋健ほか：木質燃焼灰の雪上散布における融雪水の安全性の検討，第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.221-222，2018
27) 山田道昭，杉山悠太，松本健時：リサイクルビーズを利用した資源の有効活用に向けた取り組みについて，令和 2 年度 森林・林業交流研究発表会，2020
28) 前川明弘ほか：木質バイオマス焼却灰の地盤改良材としての適用性に関する基礎的実験，第 30 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.211-212，2019
29) 佐川孝広，北島和樹，丹波広樹：木質バイオマス焼却灰のセメント混和材への適用，第 70 回セメント技術大会講演要旨，pp.100-101，2016
30) 佐川孝広：木質バイオマス焼却灰の反応性評価とセメント混和材への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp.191-192，2018
31) 堀江亮介ほか：木質系バイオマスボイラー燃焼灰の混和材利用に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1941-1946，2018
32) 前川明弘ほか：木質バイオマス焼却灰を混入したモルタル硬化体の各種特性に関する基礎的研究，第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.209-210，2018
33) 佐川孝広：木質バイオマス焼却灰のジオポリマー活性フィラーへの適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.725-726，2017
34) 周藤将司：木質バイオマス焼却灰のジオポリマーへの利用，アグリバイオ，Vol.5，No.10，pp.879-881，2021
35) 友寄篤，野口貴文，神山研一，東和朗：コンクリート用火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの基本特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.255-260，2018
36) 日本コンクリート工学会：火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関するシンポジウム報告書･論文集，2022
37) 谷口円，高橋徹，垣原康之，佐川孝広：北海道に分布する火山灰の特性とポゾラン反応性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.97-102，2013
38) 谷口円，高橋徹，吉田行，佐川孝広：北海道に分布する火山灰のポゾラン反応性とコンクリートの耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.724-729，2014
39) 勝野太市，上原稔生，佐川孝広：火山ガラス微粉末のセメント混和材への適用，第 74 回セメント技術大会講演要旨，pp.174-175，2020
40) 佐川孝広，谷口円：北海道にて産出した火山灰のセメント混和材への適用，日本コンクリート工学会，火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関するシンポジウム報告書･論文集，pp.19-22，2022
41) 橋本忍ほか：火山灰からのジオポリマーの作製，日本セラミックス協会 2012 年年会講演予稿集，2012
42) 武田はやみ：非晶質シリケートのアルカリ活性化による新規建築構造材料の創製に関する研究，名古屋工業大学博士論文，2014
43) 永縄勇人：未利用原料を用いた新規不焼成建築材料の開発と機能性の発現，あいち産業科学技術総合センター 研究報告，pp.70-73，2016

44）勝野太市，吉野千紘，佐川孝広：火山ガラス微粉末のジオポリマーへの適用，第 74 回セメント技術大会講演要旨，pp. 172-173，2020

（執筆者：佐川　孝広）

3.2 アルカリ溶液

3.2.1 ケイ酸ナトリウム（水ガラス），ケイ酸カリウム

ジオポリマーのアルカリ刺激材料としては，ケイ酸ナトリウム溶液やケイ酸カリウム溶液がともに用いられ，多くの研究は，ケイ酸ナトリウム溶液（水ガラス）を用いた場合について行われている．

ケイ酸アルカリ溶液のケイ酸/アルカリイオン比を調整する目的で，多くの研究において，ケイ酸/アルカリイオン比が既知の溶液と水酸化アルカリやシリカフュームやナノシリカなどの SiO_2 高含有材料を添加している．また，これらの溶液調整の際に溶解熱が発生することから，溶液中のケイ酸/アルカリイオン比調整後に 24 時間程度の冷却期間を設けているものも多い．

このケイ酸ナトリウム溶液は，ケイ砂（SiO_2）と炭酸ソーダ（Na_2CO_3）あるいは苛性ソーダ(NaOH)を反応させ，水に溶解させることで生産される．日本工業規格（JIS K 1408）で，珪酸ソーダ 1 号，珪酸ソーダ 2 号，珪酸ソーダ 3 号があり，珪酸ソーダ 1 号では Na_2O：SiO_2 モル比が 1：2 に，珪酸ソーダ 2 号では同モル比が 1：2.5，珪酸ソーダ 3 号では同モル比が 1：3.0 と分類される（**表 3.2.1**）．

表 3.2.1 珪酸ソーダ溶液の種類と組成(JIS 規格（JIS K 1408)）(mass%)

	1 号	2 号	3 号
SiO_2(二酸化ケイ素)	35～38	34～36	28～30
Na_2O(酸化ナトリウム)	17～19	14～15	9～10
鉄(Fe)	0.03 以下	0.03 以下	0.02 以下
水不溶分	0.2 以下	0.2 以下	0.2 以下

3.2.2 水酸化ナトリウム（苛性ソーダ），水酸化カリウム（苛性カリ）

水酸化ナトリウム（sodium hydroxide）は，化学式で NaOH と表記される無機化合物であり，常温常圧ではナトリウムイオンと水酸化物イオンからなるイオン結晶である．苛性ソーダ(かせいソーダ,caustic soda)と呼ばれることも多い．

水に易溶であり，20℃において水 1 リットル（1000g）に対して約 1110g が溶解する．溶解する際に大量の熱（溶解熱）を放出する性質をもち，その水溶液は強アルカリ性を示し，空気中の二酸化炭素を吸収し炭酸ナトリウムを生じる性質を有する．このため密栓して保存する必要があるが，ガラスを徐々に侵しケイ酸ナトリウムを生じて固着するため，ガラス瓶，特にすり合わせの栓は使用してはならない．固体は毒物及び劇物取締法で劇物に指定されているため，その取り扱いには十分に注意する必要がある．

市販している試薬は粒状であり，潮解性と呼ばれる空気中の水分を取り込み溶解する性質を有している．このため湿度の多い環境などで保管すると粒の表面が溶解し“べたつき”を持った状態となり著しく劣化するため，保存条件，環境にも十分に注意を要する．ジオポリマーを製造する場合は一般的に流通している 48%水溶液（質量%）を使用することが多いと考えられる．

水酸化カリウム（potassium hydroxide）は，化学式で KOH と表記される白色の結晶であり，カリウムイオンと水酸化物イオンよりなるイオン結晶である．苛性カリ（かせいカリ，caustic potash ）とも呼ばれる．水酸化ナトリウムと同様に劇物に指定されており，水に易溶で溶解する際に大量の溶解熱を放出する．水溶液は強アルカリ性を示し，二酸化炭素を吸収し，ガラスを侵食する性質を有するため，取り扱いには十分に注意する必要がある．

3.2.3　その他アルカリ溶液

その他のアルカリ刺激剤を用いた例を**表 3.2.2** に示す.

ナトリウムおよびカリウム以外のアルカリの水酸化物塩やナトリウムやカリウムの炭酸塩，硫酸塩，硝酸塩およびアルミン酸ナトリウムなどがこれに該当する.

表 3.2.2　その他のアルカリ刺激剤

種類	著者・文献番号
水酸化物塩(Na,K 以外)	(Li, Cs) Jingkun Yuan ら 2016[1], (Sr, Cs) C. Kuenzel ら 2015[2]
炭酸塩	Luo Xin ら 2014[3], Yuan Fang & Obada Kayali 2013[4]
硫酸塩	(Na 塩, Mg 塩) Moruf Olalekan Yusuf 2015[5] (Na 塩)Hanna Runtti ら 2016[6], K. Arbin ら 2013[7] (Mg 塩)H. A. El-Sayed ら 2011[8]
硝酸塩	(Na 塩) E. Ofer-Rozovsky ら 2016[9] (NH_4塩) Zvezdana Bašc˘arevic ら 2013[10] (Cs 塩) M.C.M. Nasvi ら 2014[11], Qin Li ら 2013[12]
無水ホウ砂	Ali Nazari ら 2014[13]
アルミン酸ナトリウム	Giulia Masia ら 2014[14], G. J. G. Gluth ら 2013[15], Giulia Masi ら 2015[16], William D.A. Rickard ら 2013[17], I. Garcı´a-Lodeiro ら 2015[18] (ρアルミナを NaOH に添加) Siti Noor Md. Hairi ら 2015[19]
無水モリブデン酸アルミニウム	L. Vidal ら 2015[20]
アルミニウムエッチング液	M.B. Ogundiran ら 2013[21]
リン酸	Magdalena Lassinantti Gualtieri ら 2015[22],Xue-min Cui ら 2011[23], Yan He ら 2016[24], H. Douiri ら 2016[25], Liu Le-ping ら 2012[26]
リン酸二水素カリウム	Bing Cai ら 2014[27]

参考文献

1) Jingkun Yuan et al.: Effects of Li Substitution on the Microstructure and Thermal Expansion Behavior of Pollucite Derived from Geopolymer, J. Am. Ceram. Soc., pp.1-8, 2016
2) C. Kuenzel et al.: Encapsulation of Cs/Sr contaminated clinoptilolite in geopolymers produced from metakaolin, Journal of Nuclear Materials, Vol.466, pp.94-99, 2015
3) Luo Xin et al.: Effect of alkali-activator types on the dynamic compressive deformation behavior of geopolymer concrete, Materials Letters, Vol.124, pp.310-312, 2014
4) Yuan Fang and Obada Kayali: The fate of water in fly ash-based geopolymers, Construction and Building Materials, Vol.39, pp.89-94, 2013
5) Moruf Olalekan Yusuf: Performance of slag blended alkaline activated palm oil fuel ash mortar in sulfate environments, Construction and Building Materials, Vol.98, pp.417-424, 2015
6) Hanna Runtti et al.: Sulphate removal over barium-modified blast-furnace-slag geopolymer, Journal of Hazardous Materials, Vol.317, pp.373-384, 2016

7) K. Arbin et al.: Alkali-activated blends of calcium aluminate cement and slag/diatomite, Ceramics International, Vol.39, pp.9237-9245, 2013
8) H. A. El-Sayed et al.: Resistance of Alkali Activated Water-Coo led Slag Geopolymer to Sulphate Attack, Ceramics - Silikáty, Vol.55, pp.153-160, 2011
9) E. Ofer-Rozovsky et al.: The formation of crystalline phases in metakaolin-based geopolymers in the presence of sodium nitrate, J. Mater. Sci., Vol.51, pp.4795-4814, 2016
10) Zvezdana Bašc˘arevic et al.: Effects of the concentrated NH_4NO_3 solution on mechanical properties and structure of the fly ash based geopolymers, Construction and Building Materials, Vol.41, pp.570-579, 2013
11) M.C.M. Nasvi et al.: Effect of temperature on permeability of geopolymer: A primary well sealant for carbon capture and storage wells, Fuel, Vol.117, pp.354-363, 2014
12) Qin Li et al.: Immobilization of simulated radionuclide $133Cs^+$ by fly ash-based geopolymer, Journal of Hazardous Materials, Vol.262, pp.325-313, 2013
13) Ali Nazari et al.: Characteristics of boroaluminosilicate geopolymers, Construction and Building Materials, Vol.70, pp.262-268, 2014
14) Giulia Masia et al.: A comparison between different foaming methods for the synthesis of light weight geopolymers, Ceramics International, Vol.40, pp.13891-13902, 2014
15) G. J. G. Gluth et al.: Geopolymerization of a silica residue from waste treatment of chlorosilane production, Materials and Structures, Vol.46, pp.1291-1298, 2013
16) Giulia Masi et al.: The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers, Composites Part B, Vol.76, pp.218-228, 2015
17) William D.A. Rickard et al.: The effect of pre-treatment on the thermal performance of fly ash geopolymers, Thermochimica Acta, Vol.573, pp.130-137, 2013
18) I. Garcıa-Lodeiro et al.: The role of aluminum in alkali-activated bentonites, Materials and Structures, Vol.48, pp.585-597, 2015
19) Siti Noor Md. Hairi et al.: Synthesis and properties of inorganic polymers (geopolymers) derived from Bayer process residue (red mud) and bauxite, J. Mater. Sci., Vol.50, pp.7713-7724, 2015
20) L. Vidal et al.: Effect of the addition of ammonium molybdate on metakaolin-based geopolymer formation: Shrinkage and crystallization, Powder Technology, Vol.275, pp.211-219, 2015
21) M.B. Ogundiran et al.: Immobilization of lead smelting slag within spent aluminate-fly ash based geopolymers, Journal of Hazardous Materials, Vol.248-249, pp.29-36, 2013
22) Magdalena Lassinantti Gualtieri et al.: Inorganic polymers from laterite using activation with phosphoric acid and alkaline sodium silicate solution: Mechanical and microstructural properties, Cement and Concrete Research, Vol.67, pp.259-270, 2015
23) Xue-min Cui et al.: A novel aluminosilicate geopolymer material with low dielectric loss, Materials Chemistry and Physics, Vol.130, pp.1-4, 2011
24) Yan He et al.: Characterization of chemosynthetic H_3PO_4-Al_2O_3-$2SiO_2$ geopolymers, Ceramics International, Vol.42, pp.10908-10912, 2016

25) H. Douiri et al.: Enhanced dielectric performance of metakaolin-H_3PO_4 geopolymers, Materials Letters, Vol.164, pp.299-302, 2016
26) Liu Le-ping et al.: The phase evolution of phosphoric acid-based geopolymers at elevated temperatures, Materials Letters, Vol.66, pp.10-12, 2012
27) Bing Cai et al.: Evaluation of the resistance of a geopolymer-based drug delivery system to tampering, International Journal of Pharmaceutics, Vol.465, pp.169-174, 2014

（執筆者：新　大軌）

3.3 化学混和剤

ジオポリマーに対する化学混和剤の研究開発は，まだあまり盛んには行われていないのが実情である．その中で，ジオポリマーの流動性，凝結時間やその他の特性を制御する目的で一般的なセメントコンクリート用に開発されている化学混和剤をはじめとした種々の添加剤の適用を検討した研究が報告されているので，本節ではそれらについて取りまとめる．

3.3.1 分散剤

一般的なセメントコンクリート用の化学混和剤では減水剤と呼ばれる種類のものではあるが，ジオポリマーに関してはまだ配合設計手法が確立しておらず，単位水量，あるいは減水率という概念が定着していないため，ここでは分散剤と呼称する事とする．

川尻らは，ポリカルボン酸(PCE)系の高性能 AE 減水剤をジオポリマー用分散剤として添加した時の流動性への影響を調べ [1]，高性能 AE 減水剤をフィラーに対して重量比で 1%添加した場合，無添加のスランプが 1.9cm であったのに対し，21.6cm まで増加し，セメントコンクリート用の PCE 系高性能 AE 減水剤がジオポリマーコンクリートにも同様に分散剤としての効果を発揮したことを報告している．

それに対して久保らは，分散剤としてリグニン系 AE 減水剤，ナフタレンスルホン酸系高性能減水剤および PCE 系高性能 AE 減水剤をジオポリマーモルタルに添加した時の流動性への影響を確認している [2]．その中で，いずれの分散剤を添加した場合においても 15 打モルタルフローには大きな変化は認められず，汎用的にセメントコンクリートに使用されている減水剤は，ジオポリマーモルタルにおいて分散剤として有効に作用できず，流動性の改善効果が得られなかったことを報告している．ただし，リグニン系 AE 減水剤を使用した場合にはモルタルの平均流下速度が増加し，モルタルの粘性を低減する傾向は認められている．

また，岡田らは，ジオポリマー用の凝結遅延剤を検討する中で，セメントコンクリートにおいて広く使用されているグルコン酸ナトリウム（GNA）と合わせて L-酒石酸ナトリウム(LST)を添加して場合の凝結遅延効果と合わせて，モルタルフローおよびモルタルフローが 200mm に達するまでの時間をフロータイムとして測定している [3]．その中で GNA，LST を添加してもモルタルフローに影響はないが，LST を添加した場合には，モルタルの粘性の指標となるフロータイムが，無添加の場合 20 秒程度だったものが 15 秒程度まで短縮していることから，LST にはモルタルの粘性低減効果としての流動性改善効果が期待されることが示されている．

青木らは，ジオポリマーコンクリートを実構造物の断面修復へ適用する検討の中で特殊分散剤を使用しており [4]，特殊分散剤を使用したジオポリマーコンクリートのスランプフローが練り混ぜ直後から 60 分の間に増加して，その後 120 分までは安定している結果を報告している．そして，練り混ぜ直後から 60 分後までの間にスランプフローが後伸びした原因として，特殊分散剤が効果を発揮するのに時間を要したためと推察している．

3.3.2 凝結遅延剤

岡田らは，上述した様に GNA と LST を添加したジオポリマーの凝結遅延効果について検討を行っている [3]．

その中で，それぞれの化合物をアルカリ活性フィラー(AF)に対して 3%添加した場合，GNA では 1.8 倍，LST では 2.1 倍終結時間が遅延することが確認され，いずれの化合物もジオポリマーの凝結遅延剤として有効であり，特に LST の方がその効果が高いことを報告している．そしてその効果は，AF の種類やアルカリ溶液の濃度に関わらず発揮することも報告している．

さらに岡田らは，LST を使用したジオポリマーコンクリートの性能を検証しており[5]，LST を添加した場合凝結遅延効果は得られるが，養生条件によっては強度発現性に影響を及ぼすとしている．具体的には常温で養生した場合，28 日強度は無添加に比べ 30%程度低下するが，高温養生履歴があると強度の低下は確認されていない．また，LST は AF からのカルシウムイオン等の溶出を抑え，その結果としてジオポリマーの硬化反応を遅延していると結論付けている．

3.3.3 収縮低減剤

岡田らは，上述の凝結遅延剤と合わせて，ジオポリマー用の収縮低減剤の開発も行っている[6]．特定のエーテル誘導体あるいはエステル誘導体を添加することで，化学混和剤無添加では-1100×10^{-6}程度の乾燥収縮ひずみが発生する条件において，開発したエーテル型，エステル型の収縮低減剤をそれぞれアルカリ活性フィラーに対して 3%添加すると，エーテル型の場合には-400×10^{-6}まで，エステル型の場合は-200×10^{-6}まで，乾燥収縮ひずみを低減することが確認されている．また，これらの収縮低減剤を使用することで，ジオポリマーコンクリートの凍結融解抵抗性も，無添加では 120 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回ってしまう条件において，300 サイクルでも 60%以上の相対動弾性係数を確保できていることを報告している．

3.3.4 まとめ

日本国内で検討されているジオポリマーに化学混和剤を適用した研究について取りまとめた．まだ，研究自体の数は少ないが，いくつかの効果的な混和剤も開発され始めている．今後，適切な化学混和剤が新たに開発され，ジオポリマーの配合設計手法の確立や，適用範囲の拡大に対して貢献できることを期待する．

参考文献

1) 川尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011
2) 久保雄暉，石田剛朗，加藤英徳：ジオポリマーモルタルの粘性低減および初期強度発現性の改善に関する検討，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，V-554，2022
3) 岡田朋久ほか:ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.37,No.1，pp.1975-1980，2015
4) 青木峻二ほか：ジオポリマーコンクリートを用いた断面修復に関する適用検討，土木学会第 76 回年次学術講演会講演概要集，V-112，2021
5) 岡田朋久ほか：凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2295-2300，2016
6) 岡田朋久ほか：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーコンクリートの性能に及ぼす収縮低減剤の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2029-2034，2017

（執筆者：杉山　知巳）

Ⅱ．土木分野へ適用する場合の基礎知識（複合材料の特性）

１．はじめに

第Ⅰ編の対象が結合材（ペースト）であるのに対し，本編はモルタル，コンクリート，さらに鉄筋コンクリートを対象にしていることから，副題を「複合材料の特性」とした．

まず，2 章で「製造」，3 章で「フレッシュ性状」，4 章で「養生」，5 章で「力学特性」，6 章で「耐久性」と，GP の製造からの時系列で各段階における代表的な特性を説明した．続いて，従来のコンクリートに対する GP の特徴的性能である，「環境負荷低減」，「耐酸材料」，「重金属類・放射性物質の固定」に関する説明を 7，8，9 章でした．

2 章では，配合や練混ぜにおける留意点に加えて，品質変動の抑制に着目した配合・製造方法の最適化として，品質管理手法として知られているタグチメソッドの適用性に関する研究を紹介した．我が国がリードする技術であり，今後の GP の普及における有力な手法として期待される．

3 章では，流動性と分離抵抗性，凝結時間，ブリーディング・レイタンスについて説明した．

4 章では，給熱養生として蒸気養生および加熱養生の効果，常温養生では高炉スラグ微粉末の混和効果，封かん養生の硬化促進効果について解説した．

5 章では，圧縮．曲げ・引張の各強度，ヤング係数，クリープ，疲労，鋼材との付着，鉄筋コンクリートの挙動について記述した．

6 章では，アルカリシリカ反応，中性化，鉄筋の腐食，エフロレッセンス，凍結融解作用，硫酸塩，塩化物，化学物質の影響，ひび割れ，摩耗，高温の影響，収縮，反応熱，物質透過性を説明した．

7 章では，まず海外で行った GP，GP コンクリートの CO_2 排出量などの環境負荷の評価結果を紹介した．次に，国内のエネルギーと使用材料の環境負荷原単位を基に，GP コンクリートの環境負荷(CO_2 排出量，エネルギー消費量)および廃棄物再利用の環境便益も考慮した統合評価としての環境影響を試算し，同程度の強度と流動性を有する PC コンクリートと比較した．

8 章では，GP の耐酸性に対する抵抗メカニズムおよび性能について説明した．

9 章では，GP 材料における物質の吸着，GP 材料が含有する物質の溶出，GP を利用した重金属固定，汚染水処理例を紹介した．

なお，本編で紹介した情報の大部分は，我が国で入手可能な材料を用い，土木用のモルタルやコンクリートに求められる施工性を有した配合のもとで実施された研究成果である．つまり，化学混和剤を使用しない，いわゆるプレーンの GP に対する研究成果が主であり，GP の潜在的性能はさらに高い可能性があることに留意する必要がある．また，結合材と骨材および鉄筋などの補強材とのインタラクションについても一部紹介しているが，今後さらに詳細の検討が求められる課題である．

（執筆者：一宮　一夫）

２．製造

2.1 配合

ジオポリマーの配合設計手法は，いろいろな提案がなされている．圧縮強度を考慮した配合の設計手法例を**表 2.1.1** に示す．

表 2.1.1　圧縮強度を考慮した配合設計手法例

設　計　手　法	単位	概　　要
活性フィラーに対する高炉スラグ微粉末の置換率	質量	活性フィラーに対する高炉スラグ微粉末の置換率が増加すると，圧縮強度が増加する．
水／ジオポリマー固形物	質量	水／ジオポリマー固形物が増加すると，圧縮強度は低下する．
アルカリ／水	モル	アルカリ／水が増加すると，圧縮強度が増加する．

一宮らの研究では [1)]，活性フィラーに対する高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従い，圧縮強度も増加することが報告されている．**表 2.1.2** には，原田らが検討した我が国で初めて実用化されたジオポリマーコンクリートの配合を示す．活性フィラーにフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用い，アルカリ溶液にはナトリウム系の市販のアルカリ溶液を用いている．

表 2.1.2　ジオポリマーコンクリートの配合例

単位質量（kg/m^3）				
アルカリ溶液 （市販品）	フライアッシュ (Ⅰ種品)	高炉スラグ微粉末 （石膏無し）	細骨材	粗骨材
235	457	65	618	927

Hardjito & Rangan は，セメントコンクリートの W／C に相当するものとして，水／ジオポリマー固形物質量を提案している [2)]．水はケイ酸ナトリウム水溶液や水酸化ナトリウム水溶液に含まれるものと添加されたものの総和となり，ジオポリマー固形物質量は，フライアッシュ，水酸化ナトリウムおよびケイ酸ナトリウム水溶液の固形分の総和となる．Hardjito & Rangan の報告では，水／ジオポリマー固形物質量比が大きくなるに従い，圧縮強度は低下する傾向を示している．なお，水／ジオポリマー固形物質量が大きくなると単位水量が増加するため，ジオポリマーコンクリートの流動性は増加する．

佐藤らの研究では，アルカリ／水（モル比）と圧縮強度には高い相関性があることを報告している [3)]．アルカリ／水が大きくなるに従い，圧縮強度が増加すると報告されている．

ジオポリマーコンクリートの圧縮強度等は，アルカリ溶液の品質や，フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末等の仕様の影響を大きく受けることから，配合を決定するに当たっては試験練りを行い，その性能を確認する必要がある．

2.2　練混ぜ

ジオポリマーコンクリートの製造設備には，セメントコンクリートと同じモルタルミキサ，パン型ミキサおよび強制二軸ミキサ等が使用されている．**写真 2.2.1** には、実際の製造設備の一例を示す．

練混ぜ方法は，基本的にはセメントコンクリートと同じ手順であるが、材料や配合により異なるケースもある．

練混ぜ時間が長くなると，圧縮強度は増加するとの報告があるが，一方で練混ぜ時間は，圧縮強度に影響を及ぼさないとの報告もあることから，練混ぜ時間に関しては，配合毎に試験練りを実施して最適な練混ぜ時間を検討することが望まれる．

写真 2.2.1　製造設備例

2.3　品質変動の抑制に着目した配合・製造方法の最適化

ジオポリマーは短期での強度発現耐熱性，耐酸性などの優れた特性を有するが，粘性の高さに起因する施工性やエフロレッセンスの発生など解決すべき課題を有する．さらに，設計パラメータが多岐にわたり配合設計法が現時点で未確立であることや，再現性の低さが実用化への障壁となっている．

タグチメソッド（以下 TM）は，実験計画法から発展した技術で，田口玄一博士が 1950 年代から構築してきた手法と考え方の体系であり，製品のばらつきや劣化をなくし，問題が発生しないようにするための予防設計技術である[4]．TM は，設計パラメータの数が多い場合に威力を発揮すること，製品強度などの物性値を最大化することではなく品質のばらつきを抑制することに主眼を置いていることなどから，ジオポリマーの配合・製造方法の最適化に有用と考えられる．

TM におけるパラメータ設計においては，静特性と動特性の 2 種類がある[4]．前者では最適化された設計パラメータで構成されるシステムにより一つの出力値が得られるのに対し，後者では最適化されたシステムに入力値を与えることでそれに応じた出力値を得ることができる．実用に際しては，要求性能に応じた材料設計を行える方が有利であるので，動特性の方が優位であると言えるが，実験回数が大幅に増大するというデメリットもある．実際，海外においても TM を用いたジオポリマーの配合の最適化に関する研究[例えば5)]はいくつか報告されているが，いずれも静特性によるものであり，動特性を用いた研究は尾上らの研究[6)~8)]を除いては見当たらない．ここでは，主に文献[8)]の内容に基づき，動特性のパラメータ設計によるジオポリマーの

表 2.3.1　設計パラメータと水準

設計パラメータ	水準 1	水準 2	水準 3
A：練混ぜ方法*	タイプ 1	タイプ 2	-
B：SS/SH**	1.0	2.0	3.0
C：NaOH 水溶液濃度（M）	6	9	12
D：練混ぜ時間（分）	4	8	12
E：養生保持温度（℃）	60	75	90
F：養生積算温度（℃・h）	640	1000	1360

*タイプ 1 では高炉スラグ微粉末をフライアッシュと同時に添加し，タイプ 2 ではフライアッシュとアルカリ溶液を混合した後に高炉スラグ微粉末を添加

**水ガラス（SS）と NaOH 水溶液（SH）の質量比

配合・製造方法の最適化事例について紹介する．

使用材料として，四国の異なる 2 ヶ所の発電所からの JIS II 種フライアッシュ（FA）を各 2 ロット，4000 ブレーンの高炉スラグ微粉末（GGBS），旧 JIS K 1408 における 3 号水ガラス，NaOH 水溶液（濃度は 6 M，9 M，12 M の 3 種類），およびセメント強さ試験用標準砂を用いた．全ての実験において，粉体（FA + GGBS）の 15%を GGBS で置換した．

設計パラメータと水準は**表 2.3.1** に示す通りである．入力値として，曲げ強度および圧縮強度については粉体とアルカリ溶液の容積比である *P/L*，15 打フロー値についてはその逆数 *L/P* を設定した．TM では，システムのロバストネスを高めるため，あえてノイズ条件を与えて実験を行う．本研究では，FA の種類（2），FA のロット（2），実験機関（2 ヶ所）を掛け合わせた計 8 パターンのノイズ条件（N1～N8）を設定した．TM では，システムのロバストネスを高めるため，あえてノイズ条件を与えて実験を行う．本研究では，FA の種類（2），FA のロット（2），実験機関（2 ヶ所）を掛け合わせた計 8 パターンのノイズ条件（N1～N8）を設定した．

表 2.3.2　L_{18} 直交配列表

No.	A	B	C		D	E	F		
1	1	1	1		1	1	1	1	1
2	1	1	2		2	2	2	2	2
3	1	1	3		3	3	3	3	3
4	1	2	1		1	2	2	3	3
5	1	2	2		2	3	3	1	1
6	1	2	3		3	1	1	2	2
7	1	3	1		2	1	3	2	3
8	1	3	2		3	2	1	3	1
9	1	3	3		1	3	2	1	2
10	2	1	1		3	3	2	2	1
11	2	1	2		1	1	3	3	2
12	2	1	3		2	2	1	1	3
13	2	2	1		2	3	1	3	2
14	2	2	2		3	1	2	1	3
15	2	2	3		1	2	3	2	1
16	2	3	1		3	2	3	1	2
17	2	3	2		1	3	1	2	3
18	2	3	3		2	1	2	3	1

表 2.3.2 に示す L_{18} 直交配列表に設計パラメータ水準を割り付けて実験の組合せを作成した．総実験回数は 432 回（＝行数 18×入力値 3×ノイズ 8）であった．なお，総当たりで実験を行うと 11,664 回となり，直交表による実験効率は 27 倍であった．

実験結果に基づき，SN 比を算定し，最適化を行った．ここで，SN 比とは，入出力の理想機能に対するデータのばらつきの度合いの逆数であり，SN 比が高いほど再現性が高くなる．

SN 比の算定結果を**表 2.3.3** に示す．FA の産地毎データ（N1～N4 および N5～N8）を用いて算定した際の最適水準と全データ（N1～N8）を用いて算定した際の最適水準がほぼ一致する結果となった．また，出力値（15 打フロー値，曲げ強度，および圧縮強度）の違いによらず，最適水準がほぼ一致した．

表 2.3.3　SN 比の算定結果(dB)

15打フロー値

全データ（N1-N8）

	A	B	C	D
1	14.6	11.4	**16.8**	**16.6**
2	**15.9**	17.1	16.1	14.6
3		**17.3**	12.8	14.5

FA1（N1-N4）

	A	B	C	D
1	22.0	17.6	**25.3**	**23.7**
2	**24.4**	25.8	22.9	22.4
3		**26.2**	21.4	23.6

FA2（N5-N8）

	A	B	C	D
1	14.9	13.4	16.6	**16.7**
2	**15.2**	**16.0**	**16.9**	14.7
3		15.8	11.6	13.8

曲げ強度

全データ（N1-N8）

	A	B	C	D	E	F
1	19.7	17.7	**21.5**	**21.2**	**21.4**	19.8
2	**20.2**	20.7	21.4	18.9	18.8	**21.2**
3		**21.6**	17.0	19.8	19.7	18.9

FA1（N1-N4）

	A	B	C	D	E	F
1	21.2	18.7	**22.9**	**22.3**	**23.2**	**21.8**
2	**21.4**	22.2	22.8	20.4	19.6	21.7
3		**23.0**	18.3	21.3	21.2	20.4

FA2（N5-N8）

	A	B	C	D	E	F
1	**20.9**	17.6	**23.0**	**21.9**	**22.7**	20.1
2	20.1	21.4	21.9	19.8	19.1	**21.8**
3		**22.4**	16.5	19.7	19.6	19.5

圧縮強度

全データ（N1-N8）

	A	B	C	D	E	F
1	20.6	17.6	**22.7**	**21.8**	**21.9**	19.9
2	**20.6**	21.4	21.5	20.3	19.7	**21.7**
3		**22.8**	17.6	19.6	20.1	20.1

FA1（N1-N4）

	A	B	C	D	E	F
1	20.3	17.3	**22.9**	**21.3**	**21.7**	19.6
2	**20.9**	21.9	21.7	20.6	19.7	**21.5**
3		**22.7**	17.2	19.9	20.4	20.7

FA2（N5-N8）

	A	B	C	D	E	F
1	21.9	18.4	**24.3**	**23.6**	**23.8**	21.2
2	**22.1**	23.2	22.9	21.0	20.8	**24.1**
3		**24.3**	18.7	21.4	21.3	20.6

（表中の太字は各設計パラメータにおける最適水準を示す）

表 2.3.4　最適条件

設計パラメータ	最適水準
A：練混ぜ方法	タイプ 2
B：SS/SH	3.0
C：NaOH 水溶液濃度（M）	6
D：練混ぜ時間（分）	4
E：養生保持温度（℃）	60
F：養生積算温度（℃・h）	1000

以上より，最適条件として**表 2.3.4** の組合せを得た．パラメータ B（SS/SH）およびパラメータ C（NaOH 水溶液濃度）の影響が大きい．このことから，ジオポリマーの品質安定性にはアルカリ溶液のパラメータの影響が大きいことが示唆される．本研究で最適と判定された条件におけるアルカリ水比（A/W モル比）は 0.100 であった．なお，SS/SH と NaOH 水溶液濃度の最適水準について，ドイツにおける天然ポゾランの Trass と GGBS を用いたアルカリ活性材料の場合[6]は SS/SH が 0.75，NaOH 水溶液濃度が 6 M，A/W モル比が 0.105 であり，九州産 FA と GGBS を用いたジオポリマーの場合[7]は SS/SH が 2.0，NaOH 水溶液濃度が 6 M，A/W モル比が 0.101 であった．使用する粉体の種類によって SS/SH は異なるが，NaOH 水溶液濃度についてはすべて 6 M が最適と判定された．また，A/W モル比は 0.100～0.105 であった．一般に，A/W モル比を高めると強度の絶対値は大きくなる．しかしながら，品質のばらつきを抑え，再現性を高める観点からは，A/W モル比を上記の程度に設定することが有効である可能性が示唆された．

最適条件下での入出力関係について，入出力システムが基準点比例式となること，ノイズによって線形近似式が変化することがわかった（文献 8 の Fig. 7 を参照）．したがって，ノイズ（FA 産地や製造機関）毎に最適条件下での実験式を予め取得しておく，すなわち入力値を 3 水準ほど変化させて出力値との関係を調べておくことで，要求性能に応じた材料設計が可能となる．なお，P/L を高めることでジオポリマーの強度を高めることができるが，15 打フロー値は小さくなるため施工性に問題が生じる．このような場合，化学混和

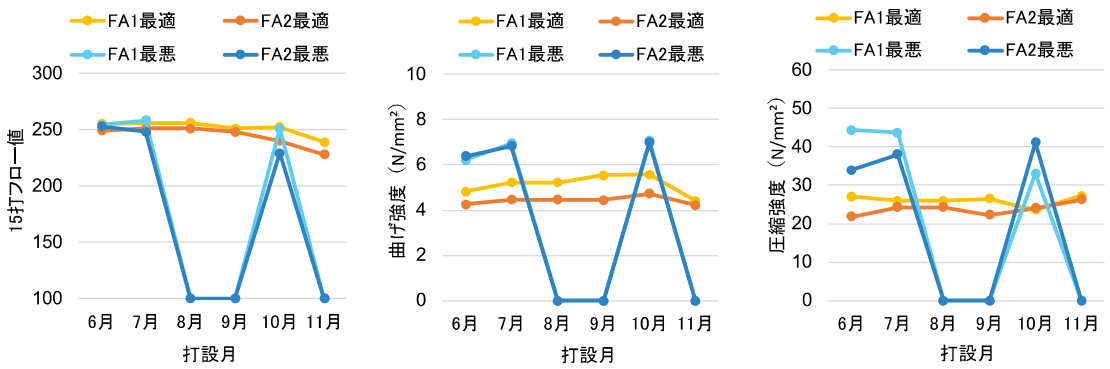


図 2.3.1　再現性の検討（打設月はいずれも 2021 年）

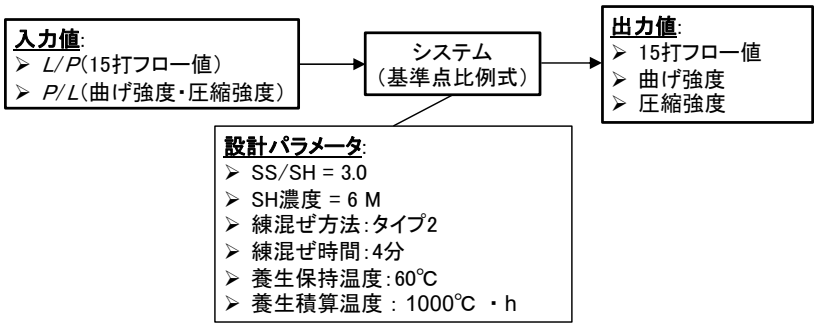


図 2.3.2　提案されたシステム

剤を適切に用いることで施工性を改善できる可能性があるが，詳細については今後の検討が必要である．また，強度を上げるためには GGBS の置換率を高めることも有効である．GGBS 置換率は SN 比にはそれほど影響せず，入出力関係の勾配である感度に大きく影響し，GGBS 置換率が高いほど感度が増大することがわかっている[6]．ただし，GGBS 置換率によっては硫酸浸漬時に二水石膏を形成しひび割れの原因となるため注意が必要である[6]．

最適条件（SN 比が高くなる設計パラメータ水準の組合せ）および最悪条件（SN 比が低くなる設計パラメータ水準の組合せ）で反応生成物を比較したところ，最適条件では FA の反応率が高く C-A-S-H の生成量が少なくなること，最悪条件ではその逆になることが明らかとなった．

図 2.3.1 に再現性に関する検討として，打設時期を変えて出力値を測定した結果を示す．最適条件では時期によらず安定した性状が得られ，高い再現性が示された．一方，最悪条件では時期によっては打設が困難となり，再現性が低くなる可能性のあることがわかった．また，別途硫酸抵抗性について調べたところ，最適条件の方が最悪条件よりも硫酸抵抗性が高くなることが判明した．

最後にまとめとして，**図 2.3.2** に本研究[8]で提案されたシステムを示す．使用する材料によって設計パラメータの最適水準は異なるものと予想されるが，FA と GGBS を併用したジオポリマーの配合および製造方法を検討する上での参考になり得ると考えられる．

参考文献

1)　一宮一夫，津郷俊二，原田耕司，池田攻：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.575-580，2011

2)　Hardjito D. and Rangan B. V.,(2005),Development and Propertise of Low Calcium Fly Ash-based Gopolymer Concrete, Research Report GCI, Faculty of Engineering, Curtin Unversity of

Technology, Perth, available at espase@curtin org.

3) 佐藤隆恒，大木信洋，束原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp. 2023-2028，2013

4) 立林和夫：入門タグチメソッド（第22刷），日科技連，2017.3

5) M. Olivia, H. Nikraz, Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, Mater. Design 36(2012) 191–198.

6) K. Onoue, T.A. Bier, Optimization of alkali-activated mortar utilizing ground granulated blast-furnace slag and natural pozzolan from Germany with the dynamic approach of the Taguchi method, Constr. Build. Mater. 144(2017) 357–372.

7) K. Onoue, T. Iwamoto, Y. Sagawa, Optimization of the design parameters of fly ash-based geopolymer using the dynamic approach of the Taguchi method, Constr. Build. Mater. 219(2019) 1–10.

8) K. Onoue, Y. Sagawa, D. Atarashi, Y. Takayama: Optimization of mix proportions and manufacturing conditions of fly ash-based geopolymer mortar by parameters design with dynamic characteristics, Cem. Concr. Compos. 133(2022) 104645.

（執筆者：原田　耕司，尾上　幸造）

３．フレッシュ性状

3.1　流動性と分離抵抗性（ワーカビリティー）

ジオポリマーコンクリートの流動性に関しては，まだ体系的な研究が十分には行われてはいないが，使用するアルカリ活性フィラーの品質や配合比率，あるいは適用するアルカリ溶液種類などがジオポリマーコンクリートの特性に及ぼす影響を検討している研究の中で，流動性に関する評価も行われ，報告されている．

本節においては，ジオポリマーに一般的に使用されるアルカリ活性フィラーであるフライアッシュ(FA)の品質や高炉スラグ微粉末（BFS）との置換率，あるいはアルカリ溶液の種類やその構成比が，ジオポリマーの流動性に及ぼす影響について報告された内容について取りまとめる．

3.1.1　ジオポリマーの流動性に及ぼすアルカリ活性フィラーの影響

坪内らは，6 種類の JIS　II 種に分類される FA の化学的および物理的特性が，ジオポリマーの流動性に及ぼす影響を検討している [1)]．アルカリ溶液に水ガラスと水酸化ナトリウムの混合水溶液およびメタケイ酸ナトリウム水溶液をそれぞれ用いたジオポリマーペーストのフローとジオポリマー全体の SiO_2/AlO_2 比および FA の強熱減量，比表面積，平均粒径との関係を検証し，SiO_2/AlO_2 比，強熱減量，および平均粒径に関しては，それぞれ小さくなるほど流動性が高くなることを報告しており，特に SiO_2/AlO_2 比に関して相関関係が高い結果を示している．

一宮らは，フライアッシュ I 種(FA1)および IV 種(FA4)に対して高炉スラグ微粉末の置換率を変更しジオポリマーモルタルのフローに及ぼす影響を検証している [2)]．その中で FA4 を使用した方が FA1 を使用した場合より高いフローを示し，その位置づけは FA の一部を BFS での置換した場合でも同様であったことを示している．更に BFS の置換率を 10%から 30%まで増加させると，若干モルタルフローは低下する結果を報告している．

原田らは，FA をブレーン値の異なる BFS で置換した場合と，BFS の置換率を 50%まで変化させた場合のジオポリマーモルタルのフローおよびその経時変化の検討を行っている [3)]．BFS の置換率を 20%としてブレーン値を変化させた場合，BFS のブレーン値が高いほど僅かではあるが練り混ぜ直後のモルタルフローが低下する傾向が認められている．またモルタルフローの経時変化においては，にブレーン値 2000 程度では 120 分経過後も練り混ぜ直後の 80%程度のフローを維持していたのに対して，ブレーン値 4320 および 6210 の BFS では経時とともに流動性は急激に低下し，いずれの場合も 60 分で全くフローしない状態となっている．

更に，ブレーン値 4230 の BFS の置換率を 0%から 50%まで変化させた場合では，置換率の増加とともに練り混ぜ直後のモルタルフローは低下し，経時保持性も置換率増大とともに著しく低下している．

原田らは一方で，ジオポリマーコンクリートの検討において，BFS 置換率 10，30 および 50%のいずれも，スランプフローは時間の経過で徐々に低下し，練上がり時に 600mm あったコンクリートのスランプフローが 60 分後で 300mm 以下にまで低下していることを報告している [4)]．

3.1.2　ジオポリマーの流動性に及ぼすアルカリ溶液の影響

一宮らは，FA 系のジオポリマーにおいて，水ガラス，苛性ソーダ，水を混合して，Si/Na モル比を一定として，Na/水モル比(A/W)の異なるアルカリ溶液を調整し，A/W の異なるアルカリ溶液を使用した場合のモルタルフローの変化を報告している [5)]．その中で BFS の置換率の異なるジオポリマーモルタルについて検討を

行った結果，いずれの BFS 置換率においても A/W が大きくなるほどモルタルフローは小さくなる結果を示している.アルカリ溶液中の成分である粘性の高い水ガラスの配合量を低減することで A/W が小さくなり，A/W とモルタルフローの関係がある程度線形性を有していることから，この関係性がジオポリマーの配合設計法確立に寄与できる可能性があるとしている.

坪内らは，BFS 系のジオポリマーにおいて，アルカリ溶液と活性フィラーとの重量比(W/P)は一般的なセメントコンクリートでいうところの水セメント比と同様で，ジオポリマーペーストにおいて W/P が大きくなると流動性が大きくなることを報告している[6]．

一方で篠原らは，メタケイ酸ナトリウム九水和物(SS)をアルカリ活性剤として使用した BFS 置換率 60%の FA 系ジオポリマーモルタルに関して，SS から来る結晶水も含む総水量とアルカリの比率(A/W)を変化させた場合のモルタルフローを測定している[7].総水量をほぼ同じとした時 A/W が低いほどモルタルフローが大きくなっており，著者らは，アルカリの比率が下がると SS の量も下がり、結晶水以外に加水する水量が増えることから、その加水量とモルタルフローとの相関が大きいと考察している.

3.1.3 ジオポリマーの流動性に及ぼす添加剤の影響

ジオポリマーの流動性に対して，セメントコンクリート用に一般的に使用されている化学混和剤を使用しても効果はあまり期待できないことが知られているが，一部には，添加剤により流動性の改善効果が確認された例が報告されている.

岡田らは，ジオポリマー用の凝結遅延剤を検討する中で，セメントコンクリートにおいて広く使用されているグルコン酸ナトリウム（GNA）と L-酒石酸ナトリウム(LST)を添加した場合のモルタルフローおよびモルタルフローが 200mm に達するまでの時間をフロータイムとして測定している[8].その中で GNA，LST を添加してもモルタルフローに影響はないが，LST を添加した場合には，モルタルの粘性の指標となるフロータイムが短縮していることから，LST にはモルタルの粘性低減効果が期待されることが示されている.

また久保らは，リグニン系 AE 減水剤，ナフタレンスルホン酸系高性能減水剤およびポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤をジオポリマーに添加した時の流動性への影響を確認しているが[9]，いずれの化学混和剤を添加した場合においても 15 打モルタルフローには大きな変化は認められず，リグニン系の AE 減水剤を使用した場合にはモルタルの平均流下速度が増加する傾向があることを報告している.

この他にも添加剤による流動性およびそのほかのジオポリマーの特性への影響を検討した研究はいくつか行われており，その詳細については第Ⅰ編 3.3「化学混和剤」を参照されたい.

3.1.4 まとめ

ジオポリマーの流動性に影響を及ぼす因子等に関する既往の研究を取り纏めた.今後，ジオポリマーの利用を促進するために必要となる配合設計手法の確立において，流動性の制御は重要な部分を担うため，今後これらの研究が整理され，系統だった理解が進むことを期待する.

参考文献

1) 坪内徹朗，三島直生，畑中重光，小池良洋:フライアッシュ JIS II 種の化学的および物理的性質の違いがジオポリマーの流動性および圧縮強度に及ぼす影響に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2071-2076，2017

2) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：フライアッシュ 4 種を用いたジオポリマーモルタルの基本物

性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1900-1905，2012
3) 原田耕司，合田寛基，一宮一夫，日比野誠：ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2236-2241，2014
4) 原田耕司ほか：蒸気養生を行わないジオポリマーコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度特性について，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，pp.1399-1400，2016
5) 一宮一夫，秋永史也，原田耕司，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーのアルカリ水比とフロー値ならびに高温加熱による外観や強度変化の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1851-1856，2018
6) 坪内徹朗ほか：アルカリシリカ溶液の濃度が高炉スラグ使用ジオポリマーの物性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2277-2282，2016
7) 篠原弘充，安琳，高橋良和：アルカリ水/水比がジオポリマーモルタルの性能に及ぼす影響，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，V-555，2022
8) 岡田朋久ほか:ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.37,No.1，pp.1975-1980，2015
9) 久保雄暉， 石田剛朗，加藤英徳：ジオポリマーモルタルの粘性低減および初期強度発現性の改善に関する検討，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，V-554，2022

（執筆者：杉山　知巳）

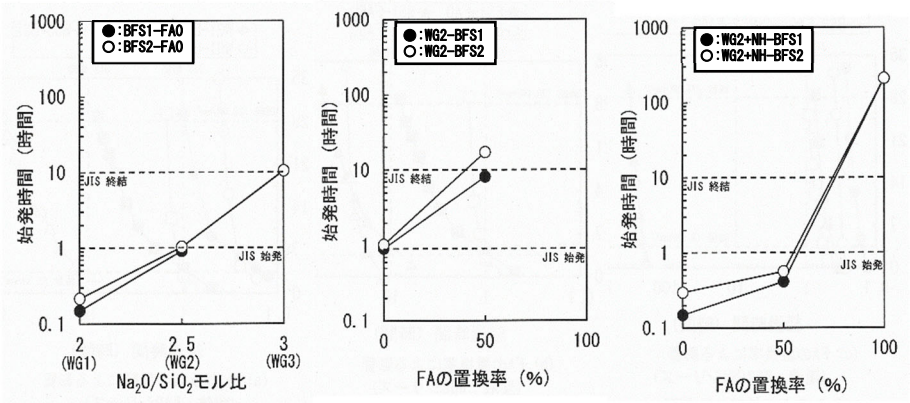
3.2 凝結時間（可使時間）

ジオポリマーの凝結時間（可使時間）に関しては，凝結の定義が定まっておらず，試験手法も確立されていないため，一律に評価することは難しい．既往の研究における試験は，主に，ビカー針装置を用いたセメントペーストの凝結試験方法や[1), 2)]，貫入抵抗試験装置を用いたコンクリートの凝結時間試験方法[3)]に準拠して行われており，ジオポリマーペーストを用いた評価が多い．また，ジオポリマーの凝結に影響をおよぼす要因には，活性フィラーであるフライアッシュ（以下，FA）や高炉スラグ微粉末（以下，BFS），ジオポリマー溶液の種類，アルカリ濃度，粉体溶液比，Si/Al モル比，Ca 含有量などが挙げられている[4~6)]．

活性フィラーに関しては，原田ら[7)]が，FA Ⅰ種の 0～30%を BFS に置換したジオポリマーペーストの始発時間について，ビカー針装置を用いて評価した．その結果，FA のみを使用したジオポリマーペーストの始発時間は 25 時間を超えたが，BFS 置換率の増加に伴い，始発時間が急激に早まることを確認している．田村ら[8)]も同様の検討を行い，BFS の置換率が 30%ではジオポリマーペーストの始発時間が 10 時間を超えたが，30%の条件では 30 分以下となる結果を得ている．この理由については，BFS に含有する Ca 成分から生成する C-S-H（C-A-S-H）ゲルが凝結時間に影響を与えていると推察している．

また，五百蔵ら[9)]は，FA Ⅰ種と比表面積 4000，6000，8000 の BFS（置換率は 0，20，40%）を併用し，ジオポリマー溶液に水ガラス 2 号と 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液を使用したジオポリマーペーストのプロクター貫入抵抗試験を行っている．その結果，FA のみを用いたジオポリマーペーストの始発時間は 194 時間，終結時間は 294 時間となる一方，比表面積 8000 の BFS を 40%置換した条件では終結時間が 58 分となり，BFS の比表面積と置換率が大きくなるほど，凝結時間は短くなることを確認した．

市川ら[10)]は，BFS（石こう添加有 BFS1，石こう添加無 BFS2）の一部を FAⅡ種と置換した活性フィラーと，水ガラス 1 ～3 号（WG1～3，WG1 のみ 2 倍希釈溶液を使用）を用い，溶液／粉体比を 0.6 としたジオポリマーペーストの始発時間を貫入抵抗試験装置により調べている．始発時間におよぼす各要因の影響を**図 3.2.1** に示す．同図(a)より，BFS を使用したジオポリマーでは，使用する水ガラスの種類により凝結時間が異なるが，水ガラスの Na_2O/SiO_2 モル比を 2.5～3.0 の範囲にすることで，始発時間を調整できるとしている．また，同図(b)，(c)より，WG2 と 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液（NH）の混合溶液（質量比で，WG2：NH=2：1）を添加した場合や，BFS の FA に対する置換率が大きくなるほど，凝結時間は短くなることを確認した．



(a) 水ガラスの種類（粉体：FA0%）　(b) FA の置換率（溶液：WG2）　(c) FA の置換率（溶液：WG2+NH）

図 3.2.1　凝結の始発時間[10)]

ジオポリマーモルタルについては，Huang ら[11]が，FAⅡ種と BFS4000 の混合物とメタケイ酸ナトリウム 9 水和物を用いた凝結試験を行っており，溶液/粉体比が高く，ケイ酸ナトリウム濃度や粉体中の BFS の割合が低くなるほど，凝結時間は長くなることを示している．BFS については Ca 含有量が，溶液/粉体比とケイ酸ナトリウム濃度については水分量などが，ジオポリマーの反応に影響していると述べている．

既述したように，ジオポリマー中の BFS 量を増やせば凝結時間は減少傾向となるが，硬化体強度を増加できるといった利点があるため，凝結を遅延させるための検討が進められている．岡田ら[12]は，FA と BFS の混合物と，ジオポリマー溶液（水ガラス 1 号，水酸化ナトリウム，水）で作製したジオポリマーペーストの凝結遅延剤として，L-酒石酸ナトリウムおよびグルコン酸ナトリウムを用いた評価を行った．実験では，BFS 混合率 30vol.％の活性フィラーに対し，凝結遅延剤を 3%添加したジオポリマーペーストの凝結時間（始発および終結時間）を測定し，無添加の条件における凝結時間と比較した．その結果，L-酒石酸ナトリウムでは，始発時間が 1.9 倍，終結時間が 2.1 倍，グルコン酸ナトリウムでは，共に 1.8 倍まで凝結時間が延長した．同配合の活性フィラーを用い，L-酒石酸ナトリウムを 1～5%添加した場合には，添加量の増加に伴い，凝結時間が直線的に増加する傾向となった．また，L-酒石酸ナトリウムを 3%添加し，BFS 混合率を 30～100vol.％に変化させた場合，無添加の条件では，BFS 混合率を増加させると凝結時間は短くなるが，L-酒石酸ナトリウムを添加すると，BFS 混合率 50%では 2 倍程度，70%では 4 倍程度まで凝結時間が延びることを確認した．

その他にも，ケイ酸アルカリ溶液の Si 源としてシリカフューム粉体を練混ぜ時に後添加し，可使時間を延伸する手法[13]や，700℃で熱処理した BFS を用いて凝結を遅延する手法[14]などの検討が行われている．実施工に関しては，可使時間を約 2 時間保持できる特殊な混和剤を開発し，ポンプ車でジオポリマーコンクリートを圧送して RC 擁壁を打設[15]した事例などがある．

参考文献

1) 日本工業規格：セメントの物理試験方法，JIS R 5201，2015
2) ASTM C 191-08. Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by vacant needle. West Conshohocken(PA)：ASTM International，2008
3) 日本工業規格：コンクリートの凝結時間試験方法，JIS A 1147，2019
4) Muhammad N.S. Hadi，H. Zhang，S. Parkinson: Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength，setting time and workability，Journal of Building Engineering，Vol.23，pp.301-313，2019
5) Hafez E. Elyamany，Abd Elmoaty M. Abd Elmoaty，Ahmed M. Elshaboury: Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders，Construction and Building Materials，Vol.187，30，pp.974-983，2018
6) Prinya Chindaprasirt，Pre De Silva，Kwesi Sagoe-Crentsil，Sakonwan Hanjitsuwan; Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems，Journal of Materials Science，vol.47，pp.4876-4883，2012
7) 原田耕司，一宮一夫，津部俊二，池田攻：ジオポリマーの諸特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp. 1894-1899，2012
8) 田村康将，佐藤隆恒，上原元樹，山崎淳司：Ca，Al 成分の添加がジオポリマーペーストの凝結特性に及ぼす影響，無機マテリアル学会第 125 回学術講演会講演要旨集，pp.66-67，2012
9) 五百藏沙耶，伊藤彰利，畑中重光：異なる比表面積の高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの強度

発現性および簡易注入試験に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1961-1966，2019
10) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp. 1957-1962，2015
11) Shaoqi HUANG，Yukun ZHANG，Shuyu XING，Lin AN: SYNTHESIS OF FA/BFS BASED GEOPOLYMER MORTAR ACTIVATED BY SODIUM METASILICATE NONAHYDRATE，Proceedings of the Japan Concrete Institute，Vol.42，No.1，pp.1822-1827，2020
12) 岡田朋久，菅彰，橋爪進，李柱国：ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1975-1980，2015
13) 佐藤隆恒，大木信洋，束原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013
14) 李柱国，池田攻：ジオポリマーの凝結を遅延するための高炉スラグ微粉末の熱処理技術，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1349-1354，2021
15) (株)大林組，ポゾリスソリューションズ(株)，日本製鉄(株):「ジオポリマーコンクリート」を大断面かつ狭あいな擁壁補修工事に適用，https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210330_1.html

（執筆者：前川　明弘）

3.3 ブリーディング・レイタンス

Memon et al.[1]は，高性能 AE 減水剤と余剰水量がフライアッシュベース自己充填ジオポリマーコンクリートの強度とワーカビリティーに及ぼす影響について実験的に検討し，余剰水量と高性能 AE 減水剤を増加させることで同ジオポリマーコンクリートのワーカビリティーは向上するが，余剰水量が 15%を越えるとブリーディング，材料分離，および圧縮強度の低下が生じたと報告している．

Hsu[2]は，循環流動床燃焼灰，水酸化ナトリウム，ケイ酸ナトリウム，リン酸ナトリウム，炭酸ナトリウムをアルカリ刺激材としたスラグセメントモルタルのワーカビリティー，ブリーディング，凝結時間，圧縮強度，収縮，吸水特性について実験的に検討し，アルカリ刺激材を用いることで，その種類によらずアルカリ刺激材を用いていない基準モルタルよりもブリーディングが抑制されたこと，水酸化ナトリウムまたはリン酸ナトリウムを添加することでブリーディングがほぼゼロとなったこと，水ガラスを添加すると添加量に応じてブリーディング率は増大する傾向にあるが，コントロール配合よりは低減されると報告している．

Lee et al.[3]は，産業副産物（フライアッシュ，スラグ，ボトムアッシュ）を活用したセメントを用いない低強度のアルカリ刺激材料について検討し，その中でブリーディングに関して，スラグの量が増えるにつれブリーディング率が減少することを示し，その原因として水和反応率が高まることを挙げている．また，水結合材比が増大するとブリーディング率も増大すること，ボトムアッシュの使用比率が高まると同一ワーカビリティーを得るための単位水量も増えるために配合中の余剰水が増大し，結果としてブリーディング率も増大すると述べている．

Aboulayt et al.[4]は，メタカオリン，フライアッシュ，およびキサンタンガムを用いたアルカリ刺激グラウトのブリーディングに関して，メタカオリンに対するフライアッシュの比率が高まるほどブリーディングが増加すること，アルカリ溶液（水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液の混合液）に対する安定剤（キサンタンガム）の質量添加率を高くするほどブリーディング量は低下し，ブリーディングを抑制するには 0.6wt%で十分であることを報告している．

Zhou et a.[5]は，火山灰とメタカオリンをベースとするジオポリマーグラウトのブリーディングに関し，練混ぜ後 3 時間および 24 時間後のブリーディングは発生せず，このことは両粉体が高い保水性と変形抵抗性を有することを示すと述べている．

Hamid Abed et al.[6]は，スラグ，フライアッシュ，水酸化ナトリウム，メタケイ酸ナトリウムをボールミルで 2 時間すりつぶした後水を添加して反応を生じさせるジオポリマーグラウト（MG）および従来製法のジオポリマーグラウト（CG）についてブリーディング特性を比較した結果，CG に比べて MG は 34%ブリーディング量が少なくなり，理由として粉体の粒径が小さくなるとともに表面積が増えたことを挙げている．また，製法によらずスラグの含有量あるいは水酸化ナトリウム水溶液のモル濃度が増加するほどブリーディング量は低下することを報告している．

Guo et al.[7]は，石炭脈石，高炉スラグ，およびフライアッシュをベースとするジオポリマーグラウトのブリーディングに関し，石炭脈石および水ガラスの量を増やすことでブリーディング率が低下したこと，その理由として石炭脈石がカオリナイト鉱物を多く含みその吸水性が高いことを挙げている．

以上より，セメントコンクリートと同様に，ジオポリマーにおいても粉体に対する余剰水量が多いほどブリーディング率が増大する．また，アルカリ刺激材の種類によってもブリーディング特性は異なる．ブリーディング率を低減するためには，メタカオリンを使用する，粉体の粒径を小さくする，高炉スラグ微粉末を併用するなどの方法が有効であると考えられる．

レイタンスについては，関連文献が見当たらなかった．

参考文献

1) Memon FA, Nuruddin MR, Demie S, Shafiq N: Effect of superplasticizer and extra water on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete, Research of Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 5, pp. 407-414, 2012
2) Hsu HM: Effects of circulating fluidized bed combustion fly ash on the properties of alkali-activated slag cement mortars, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20, Issue 2, pp. 223-232, 2012
3) Lee NK, Kim HK, Park IS, Lee HK: Alkali-activated, cementless, controlled low-strength materials (CLSM) utilizing industrial by-products, Construction and Building Materials, Vol. 49, pp. 738-746, 2013
4) Aboulayt A, Jaafri R, Samouh H, Cherki EIA, Roziere E, Moussa R, Loukili A: Stability of a new geopolymer grout: Rheological and mechanical performances of metakaolin-fly ash binary mixtures, Construction and Building Materials, Vol.181, pp.420-436, 2018
5) Zhou S, Yang Z, Zhang R, Li F: Preparation, characterization and rheological analysis of eco-friendly road geopolymer grouting materials based on volcanic ash and metakaolin, Journal of Cleaner Production, Vol. 312, 127822, 2021
6) Hamid Abed M, Sabbar Abbas I, Hamed M, Canakci H.Rheological, fresh, and mechanical properties of mechanochemically activated geopolymer grout: A comparative study with conventionally activated geopolymer grout, Construction and Building Materials, Vol. 322, 126338, 2022
7) Guo L, Zhou M, Wang X, Li C, Jia H: Preparation of coal gangue-slag-fly ash geopolymer grouting materials, Construction and Building Materials, Vol. 328, 126997, 2022

（執筆者：尾上　幸造）

４．養生

4.1　給熱養生

ジオポリマーの養生方法としては，蒸気養生，加熱養生，オートクレーブ養生などの給熱養生が多く行われている．ジオポリマーは，給熱養生により非晶質シリカおよびアルミナを含む粉体（活性フィラー）とアルカリ溶液の反応が促進して早期の強度発現が促され，脱型時間の短縮や高強度化が可能となる．給熱養生は，ヒーターやボイラーなどの装置が必要であるため，給熱養生は二次製品などへの適用に限られる．給熱養生（蒸気養生，加熱養生，オートクレーブ養生）がジオポリマーの諸性能に及ぼす影響について，以下に示すような事例が報告されている．

4.1.1　蒸気養生

ジオポリマーの給熱養生条件として，蒸気養生が多く行われている．ここでは，ボイラーを用いた高温蒸気による養生だけでなく，恒温恒湿装置を用いた高温多湿養生も蒸気養生に含めて報告する．

南ら[1)]は，ジオポリマーモルタルを 80℃，90%RH の高温多湿環境下で養生し，加温時間と圧縮強度の関係について検討している．その結果，加温初期に大きな強度増加が認められ，加温時間が 12 時間以降の強度増加は小さくなることを報告している．

一宮ら[2)]は，プログラム恒温恒湿装置を用いて 2 パターンの蒸気養生を行い，蒸気養生を施したジオポリマーモルタルの材齢と強度の関係，並びに，給熱量と強度の関係について検討している．その結果，蒸気養生を施したジオポリマーモルタルの強度は材齢 7 日まで増加するが，その後はほぼ一定となると報告している．また，蒸気養生の最高温度保持時間の増加による強度増加には限界があり，最高温度保持時間は 24 時間以後，強度はほぼ一定となると報告している．

菊地ら[3)]は，結合材種類と前養生が蒸気養生を施したジオポリマーモルタルの物理的性質に及ぼす影響について検討している．ここで，結合材はフライアッシュのみ（F と略称），フライアッシュとシリカフュームの混合粉体（FS と略称），フライアッシュと高炉スラグ微粉末の混合粉体（FG と略称），更にシリカフュームを加えた混合粉体（FGS と略称）の 4 種類とし，全ての配合について水結合材比を 28%，ペーストに対する細骨材容積比を 60%，NaOH／水質量比を 9.0%（水溶液中 Na 濃度＝12.0mol/L）とした．その結果，FG と FGS を結合材としたジオポリマーモルタルの蒸気養生（80℃，24 時間保持）後の強度は，20℃，60%RH の恒温恒湿環境下で 24 時間の前養生を施すことにより，著しく増加すると報告している．

4.1.2　加熱養生

高橋ら[4)]は，高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，水ガラスおよび水酸化ナトリウムを用いたジオポリマーペーストを調製して，加熱（60℃，１時間）を行った後，所定の材齢まで常温下で養生して強度試験を行い，加熱養生が強度に及ぼす影響について検討している． その結果，圧縮強度に及ぼす養生温度の影響は小さいと報告している．また，高炉スラグ微粉末，水ガラス，水酸化ナトリウムによるジオポリマーペーストは，高強度が得られると報告している．

太田ら[5, 6)]は，プログラム恒温装置を用いて，最高温度 60℃，80℃および 100℃，最高温度保持時間 6 時間，12 時間，24 時間を組み合わせて 9 通りの加熱養生を実施し，加熱養生条件が強度に及ぼす影響について検討している．その結果，養生温度が高く，最高温度保持時間が長いほど，養生直後の強度が増進すると報

告している．また，ジオポリマーモルタルの加熱養生において，最高温度が低い方が，保持時間を長くすることによる強度増進効果が大きいと報告している．

本間[7)]は，ジオポリマーモルタルに埋込型ひずみ計を設置して加熱養生（80℃，3～24 時間保持）を行い，加熱養生時および加熱養生後の長さ変化について検討している．その結果，ジオポリマーモルタルは，常温硬化時に膨張，加熱硬化時に収縮を示すこと，並びに，加熱養生時間およびアルカリの種類によって収縮特性が異なると報告している．

4.2 常温養生

常温環境下における非晶質シリカおよびアルミナを含む粉体（活性フィラー）とアルカリ溶液の反応は非常に緩慢で，脱型可能な強度を得るまでに長い時間を要する．従って，ジオポリマーの性能を十分に発揮させるためには，給熱養生が施されることが多い．常温環境下でジオポリマーの性能を発揮させるためには，高炉スラグ微粉末など，カルシウムを多く含む粉体の混和が有効である．高炉スラグ微粉末を混和することで，常温環境下においても，ジオポリマーの硬化を早めて実用強度を発揮させることが可能となる．常温環境下におけるジオポリマーの硬化システムに関する体系づけられた報告はなく，今後の研究が望まれる．ジオポリマーを現場施工する際には，常温養生を行ったジオポリマーの基礎性状を明らかにした上で，季節に応じた配合設計が求められる．常温養生を施したジオポリマーの性状について，以下に示すような事例が報告されている．

4.2.1 高炉スラグ微粉末の混和

市川ら[8)]は，高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したジオポリマーの基礎性状に関する実験を行っている．活性フィラーとしてフライアッシュだけを用いたジオポリマーは，硬化させるために給熱養生を要するが，高炉スラグ微粉末を混和することで，常温環境下でも硬化させることが可能となる．フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用したジオポリマーを 20℃，60%RH の常温環境で養生した場合と 50℃又は 80℃の高温環境で養生した場合の圧縮強度について検討している．その結果，高炉スラグ微粉末を用いて常温環境で養生したものの圧縮強度は，高温養生を行ったものよりも高いと報告している．

木村ら[9)]は，高炉スラグ微粉末，一般廃棄物溶融スラグ，フライアッシュを併用したジオポリマーの圧縮強度について，粉体の酸化カルシウム含有率に着目した検討を行っている．その結果，常温環境下で気中養生を行った高炉スラグ微粉末を含むジオポリマーは，材齢 7 日までの期間において，材齢の経過に伴い圧縮強度の増加が認められたと報告している．

高炉スラグ微粉末を混和したジオポリマーは，常温環境下でも高い圧縮強度を発揮するが，凝結時間が短くなる短所があった．岡田ら[10)]は，専用の凝結遅延剤を開発し，高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの凝結時間を延長させ，十分な可使時間を確保しながら，常温環境下で性能を発揮するジオポリマーの開発に関する検討を行っている．その結果，常温養生を行ったジオポリマーの圧縮強度は，材齢の経過に伴い増加し，40N/mm^{2}を超える圧縮強度を発揮することを報告している．

4.2.2 封かん養生

フライアッシュを用いたジオポリマーの常温環境下における硬化は緩慢であるために，水分の逸散によりジオポリマー硬化体の表層にひび割れが生じることがある．そのため，型枠内にしばらく存置して封かん養

生を行い，ジオポリマーの硬化を促すこともある．ジオポリマーを常温環境で硬化させる際，乾燥によるひび割れの発生や強度低下を避けるために，封かん養生は有効な手法の一つである．

三島ら[11]は，ジオポリマーの圧縮強度に及ぼす養生条件の影響について検討している．気中(20℃，60%RH)養生，型枠内封かん養生，水中(20℃)養生の3種類の養生のうち，圧縮強度が最大となったのは型枠内封かん養生であり，ジオポリマーの硬化反応の促進には外部からの水分供給は必要ではなく，乾燥を防ぐことが重要であると報告している．

参考文献

1) 南浩輔，松林卓，舟橋政司：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1957-1962，2013
2) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2005-2010，2013
3) 菊地道生，山本武志，大塚拓：結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2283-2288，2016
4) 高橋みゆき，前川明弘，三島直生，畑中重光：ジオポリマーペーストの圧縮強度に関する一実験，日本建築学会東海支部研究報告書，No.52，pp.53-56，2014
5) 太田周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：フライアッシュの品質と加熱養生条件がジオポリマーモルタルの強度に与える影響，土木学会第70回年次学術講演会，pp.1117-1118，2015
6) 太田周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：強熱減量が高いフライアッシュのジオポリマーへの適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1981-1986，2015
7) 本間雅人：加熱養生を行ったジオポリマーモルタルの収縮特性，日本建築学会学術講演梗概集，近畿，pp.355-356，2014
8) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーペーストの圧縮強度発現性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2271-2276，2016
9) 木村亨，沼尾達也，小沼遥佑：酸化カルシウム含有率が異なる活性フィラーを用いたジオポリマーモルタルの各種諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2289-2294，2016
10) 岡田朋久，李 柱国，橋爪進，永井伴英：凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2295-2300，2016
11) 三島 直生，前川明弘，畑中重光：ジオポリマーの圧縮強度に関する基礎的研究（その２：水ガラス／粉体比，粉体の混合使用，および養生条件の影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.1385-1386，2013

（執筆者：熊谷　慎祐）

５．力学特性

5.1　圧縮・曲げ・引張の各強度

ジオポリマーには，種々の材料が原材料として用いられる．アルカリシリカ溶液としては水酸化ナトリウム，水酸化カリウム，水ガラスが代表的なものである．また，活性フィラーとしては，フライアッシュ，メタカオリン，高炉スラグ微粉末，シリカフューム，各種副産物が用いられる．これらの材料の組み合わせは多岐にわたり，ジオポリマーの性質に影響を及ぼす要因は数多くあると考えられている．

以下では，まず，圧縮強度について，代表的な要因であるフライアッシュの品質，高炉スラグ微粉末の種類および置換率の影響について述べる．次に，圧縮強度と曲げ強度や引張強度との関係について述べる．なお，アルカリシリカ溶液として水酸化ナトリウムと水ガラス（または珪酸ナトリウム水溶液）を，活性フィラーとしてフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いた系を中心として取り扱う．

5.1.1　圧縮強度

(1) フライアッシュの品質の影響

Fernandez-Jimenes ら[2]は，5 種類のフライアッシュ（Type F）を用いてフライアッシュの品質とジオポリマー（文献中では Alkali activated material）の圧縮強度との関連を指摘し，それらの最適値を実験から求めている．具体的には，最適な条件は，強熱減量 5%以下，Fe_2O_3 が 10%以下，低い CaO，反応性シリカが 40～50%，45μm 通過率が 80～90%と述べている．上原ら[3]は，化学的性質として，非晶質量，Fe，Ca のほか Al，物理的性質として比表面積が圧縮強度に影響するが，相関のばらつきは大きいとしている．

坪内ら[4]は，同一の火力発電所から得られた 6 種類のフライアッシュを用い，同一の溶液／粉体比で作製したジオポリマーペーストの強度を比較している．同一の溶液／粉体比であっても圧縮強度の差は約 50%あり，フライアッシュの品質のうち，SiO_2/Al_2O_3 比や強熱減量，平均粒径が大きくなるほど圧縮強度が小さくなることが報告されている．加えて，全国の 10 か所発電所から排出された合計 15 種類を用いてジオポリマーペーストを作製し，圧縮強度は，SiO_2/Al_2O_3 比が大きくなるとともに低下し，CaO 含有率および Fe_2O_3 含有率が大きくなるとともに増加する傾向は見られたものの，いずれも相関関係は明確ではなかった[5]，と結論づけている．また，60℃加温養生供試体の圧縮強度と常温養生供試体の圧縮強度との間には明確な相関関係が認められるため，加温養生供試体の初期材齢における圧縮強度から常温養生供試体の長期材齢における圧縮強度を推定することが可能である[5]，としている．

野村ら[6]は，フライアッシュの微粉砕の有無の影響が強度に及ぼす影響について，調べている．微粉砕することで強度は増加するが，メタけい酸ナトリウム水溶液濃度が 3mol/L を超えると強度が低下した，と述べている．

一宮ら[7]は，フライアッシュⅣ種を使用したジオポリマーの強度を，フライアッシュⅠ種またはⅡ種を用いたものと比較している．その結果，フライアッシュⅣ種を用いた場合，圧縮強度が 20%程度低下することが報告されている．また，太田ら[8]は，JIS 規格外の強熱減量の高い（9.1%）フライアッシュを用いたジオポリマーを作製し，フライアッシュⅡ種（強熱減量 3.7%）の場合と同じ養生条件の場合，強度は 50～70%に留まるが，養生温度を高くし，最高温度保持時間を長くすることで同等の強度が得られたことを示している．

フライアッシュ原粉の影響については，李[9]らの報告がある．比表面積と CaO 含有量が JIS 規格品のフライアッシュと同等であれば，フライアッシュ原粉を用いても力学性能は劣らなかった，と述べている．

(2) 高炉スラグ微粉末の影響

活性フィラーの一部に高炉スラグ微粉末を用いる場合，高炉スラグ微粉末の量が多くなるほど，強度は大きくなることが一般的に知られている．例えば，一宮ら[10]は，高炉スラグ微粉末でフライアッシュⅠ種の 30%を置換した場合，置換率 0%の約 7.5 倍，置換率 10%の約 2 倍の強度となることを明らかにしている．また，高炉スラグ微粉末のブレーン値が大きいほど強度は高くなり，特に，置換率が小さい範囲でその傾向が顕著に現れることも報告されている[11]．また，五百蔵[12]らは，ジオポリマーペーストのひび割れ注入材への適用性について検討するため，比表面積が異なる 3 種類（4000，6000，8000）の高炉スラグ微粉末（BS）を使用した実験を行っている．その結果，BS の比表面積が大きく，BS 置換率が大きいほど，凝結時間は短くなり，圧縮強度は大きくなる傾向があるとともに，BS 置換率に関係なく，比表面積が大きいほど始発時間は早くなる傾向が見られたこと，等を示している．

上原ら[13]は，フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末（BFS）を用いたジオポリマーの配合設計において，アルカリシリカ溶液のアルカリ/H_2O 比，Si/アルカリ比，単位 H_2O 量という 3 つのパラメータを用いて整理している．同一アルカリ/H_2O 比である場合，BFS 置換率が大きくなるに従い強度も大きくなることが報告されている．また，同一の BFS 置換率である場合，アルカリ/H_2O 比が大きいほど強度が高くなることも報告されている．

5.1.2 曲げ強度

束原ら[14]は，圧縮強度 77.1～103.4N/mm^2 のジオポリマーコンクリートに対して，曲げ強度を求めている．その結果，曲げ強度は圧縮強度の 1/7.0～1/5.5 の範囲にあるという結果を示している．また，太田ら[8]は，養生方法（最高温度および最高温度保持時間）を変化させてジオポリマーモルタルの圧縮強度と曲げ強度を求めている．その結果，例えば，60℃，12 時間の条件の場合，圧縮強度 34.8N/mm^2 に対し，曲げ強度は 6.25N/mm^2 で，その比は約 1/6 となっている．一方，一宮ら[10]は，ジオポリマーモルタルの曲げ強度は圧縮強度の 10%程度であり，セメントモルタルよりも小さいことを報告している．

国枝ら[15]は，ジオポリマーコンクリートおよびジオポリマーモルタルの曲げ破壊性状を明らかにするため，曲げ強度の大きさおよび破壊力学的観点からの考察を行っている．その結果，圧縮強度の増加とともに曲げ強度も大きくなるものの，破壊エネルギーは材齢 7 日までは増加するがそれ以降は低下する傾向にあること，また，マトリクスの収縮に伴うと推察されるひび割れが破壊エネルギーを減少させていることを実験により明らかにしている．

5.1.3 引張強度

ジオポリマーコンクリートの引張強度は，その圧縮強度と比べて，南ら[16]によると 1/17～1/9 程度，一宮ら[17]によるとおよそ 1/17，佐川ら[18]によると 1/13～1/16 であることが報告されており，同一強度で比較した場合，セメントコンクリートよりも小さい傾向にあると考えられる．しかし，普通コンクリートよりも割裂引張強度が高いと報告する文献[19),20)]もあるため，今後のデータの蓄積が必要である．

参考文献

1) 南浩輔，白根勇二，佐藤隆恒，上原元樹：ケイ酸アルカリ溶液中のケイ素/アルカリ比がジオポリマーコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2331-2336，2016

2) Fernandez-Jimenez，A. and Palomo，A.： Characterization of fly ashes. Potential reactivity as

alkaline cements, Fuel, Vol,82, No.18, pp.2259-2265, 2003
3) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015
4) 坪内徹朗，三島直生，畑中重光，小池良洋：フライアッシュ JIS II 種の化学的および物理的性質の違いがジオポリマーの流動性および圧縮強度に及ぼす影響に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2071-2076，2017
5) 坪内徹朗，三島直生，畑中重光，小池良洋：異なる石炭火力発電所から排出されたフライアッシュの品質がジオポリマーの流動性および圧縮強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1845-1850，2017
6) 野村太地，犬飼利嗣，上原義己，廣瀬貴：フライアッシュの品質と凝結遅延剤の添加がジオポリマーモルタルの圧縮強さ特性とフロー値の経時変化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1815-1820，2017
7) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：フライアッシュ 4 種を用いたジオポリマーモルタルの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1900-1905，2012
8) 太田周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：強熱減量が高いフライアッシュのジオポリマーへの適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，No.37，No.1，pp.1981-1986，2015
9) 李柱国，高垣内仁志，岡田朋久，橋爪進：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートの力学性能の影響要因に関する研究，コンクリート工学年次論文集，No.41，No.1，pp.1955-1960，2015
10) 一宮一夫，津郷俊二，原田耕司，池田攻：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.575-580，2011
11) 原田耕司，合田寛基，一宮一夫，日比野誠：ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2236-2241，2014
12) 五百蔵沙耶，伊藤彰利，畑中重光：異なる比表面積の高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの強度発現性および簡易注入試験に関する研究，コンクリート工学年次論文集，No.41，No.1，pp.1961-1966，2019
13) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015
14) 束原実，大木信洋，上原元樹：短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1963-1968，2015
15) 国枝捻，李虎，上田尚史，中村光：ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1999-2004，2013
16) 南浩輔，松林卓，舟橋政司：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1987-1992，2013
17) 一宮一夫，上野貴行，原田耕司，池田攻：高炉スラグ微粉末を添加したフライアッシュベースのジオポリマーの高温下における物性変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp. 1269-1274，2016
18) 佐川康貴，太田周，合田寛基，大西俊輔：ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐荷性状に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2095-2100，2017
19) Prabir Kumar Sarker: Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer

concrete, Materials and Structures, Vol.44, pp.1021-1030, 2011
20) 周藤将司, 伊藤大悟, 石原孔：ジオポリマーコンクリートにおける機械的性質の相互関係, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, V-558, 2022

（執筆者：佐川　康貴）

5.2 ヤング係数

ジオポリマーコンクリートのヤング係数は，同一強度のセメントコンクリートに比べて低くなることが多く報告されている．代表的な研究事例を，以下に示す．

河尻ら[1)]は，活性フィラーとしてフライアッシュⅡ種，高炉スラグ微粉末 4000 およびシリカフュームを，アルカリシリカ溶液として水ガラスを用いて作製したジオポリマーコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を示している．圧縮強度は材齢 7 日で 35.6MPa，材齢 28 日で 51.2MPa に対し，静弾性係数は約 20GPa 程度であり，一般的な普通コンクリートと比べてやや小さいことを述べている．

南ら[2)]は，ジオポリマーコンクリートの圧縮強度と静弾性係数との間には相関性が認められ，一般的なセメント系材料を用いた硬化体と同様に，圧縮強度を指標とする指数関数で表すことができるとしている．

永井ら[3)]は，フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用したジオポリマーコンクリートの力学性能に及ぼす養生条件および配（調）合などの影響を実験により考察している．その結果，ジオポリマーコンクリートの静弾性係数は，養生温度によらず普通コンクリートより小さいこと，圧縮強度との相関が高いことが認められた．静弾性係数 E（kN/mm^2）と圧縮強度 F（N/mm^2）の関係は，以下の式で表される．また，供試体の単位容積質量が大きいほど静弾性係数が大きくなる傾向が見られた．

高温養生の場合　$E^h = 0.36(F^h) + 5.3$　(5.2.1)

常温養生の場合　$E^n = 0.41(F^n) + 2.4$　(5.2.2)

また，周藤ら[4)]は，圧縮強度 50N/mm^2 程度までのジオポリマーコンクリートの静弾性係数試験の結果から，以下の式を導いている．

$E_c = 0.53f'_c + 17.38$　(5.2.3)

佐藤ら[5)]は，有機短繊維を用いたジオポリマーコンクリート短まくらぎを試作するにあたり，ジオポリマーコンクリートの静弾性係数を求めている．その結果，圧縮強度 70～75MPa に対して静弾性係数は約 22GPa となること，繊維添加による静弾性係数の大きな変化はないことを報告している．

Dongming Yan ら[6)]は，メタカオリンを用いたジオポリマーペーストの強度・変形特性を調べている．アルカリシリカ溶液の Na_2O 量とメタカオリン量の比を 10～50%に変化させた結果，30%の時に静弾性係数が最大値を取ることが報告されている．

Jian He ら[7, 8)]は，赤泥を用いたジオポリマーペースト作製し，メタカオリンを用いた場合と比較し，メタカオリンを用いた場合の方が強度および静弾性係数が高かったことを実験的に明らかにしている．また，赤泥と籾殻灰を併用したジオポリマーペーストを作製し，応力－ひずみ関係を求めている．その結果，材齢が経過するとともに強度および静弾性係数は増加するが，強度が増加すると最大応力を迎えた後の挙動が脆性的になることが報告されている．

佐川ら[9)]は，ジオポリマーコンクリートはりと同時に作製した円柱供試体の圧縮強度および静弾性係数を求めている．表に示すように，普通コンクリート（OPC）に対してジオポリマーコンクリート（2-7018；FA II 種使用，L-7024；低品質 FA 使用）の静弾性係数が小さいことを示すとともに，ジオポリマーコンクリートは

りの曲げひび割れ発生までの荷重ーたわみ関係は，ジオポリマーコンクリート自身の静弾性係数を用いて求めた計算値と一致することを報告している．

パラミら[10]は，高炉スラグ微粉末置換率と骨材率を変化させたジオポリマーの圧縮特性を実験的に調べた結果，高炉スラグ微粉末置換率が大きいほどヤング係数が増加すること，骨材率が増加するほど圧縮強度が低下し，ヤング係数が増加することを実験的に示している．また，複合則理論によりジオポリマーのヤング係数を推定している．その結果，並列モデルを用いた複合則理論によるヤング係数の推定値は全体的に過大となるものの，ジオポリマーモルタルで高炉スラグ微粉末の置換がある場合，かつ細骨材率（モルタル全容積に対する細骨材の割合）が 40%以下の場合においては概ね精度よく推定できた，と述べている．

参考文献

1) 河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011
2) 南浩輔，松林卓，舟橋政司：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1987-1992，2013
3) 永井伴英，李柱国，高垣内仁志，菅彰：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートの力学性能に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2077-2082，2017
4) 周藤将司，伊藤大悟，石原孔：ジオポリマーコンクリートにおける機械的性質の相互関係，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，V-558，2022
5) 佐藤隆恒，大木信洋，束原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013
6) Dongming Yan, Shikun Chen, Qiang Zeng and Shilang Xu: Correlating the elastic properties of metakaolin-based geopolymer with its composition, Materials and Design, Vol. 95, pp. 306-318, 2016
7) Jian He, Jianhong Zhang, Yuzhen Yu, Guoping Zhang: The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study, Construction and Building Materials, Vol.30, pp.80-91, 2012
8) Jian He, Yuxin Jie, Jianhong Zhang and Yuzhen Yu: Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites, Cement & Concrete Composites, Vol.37, pp.108-118, 2013
9) 佐川康貴，太田周，合田寛基，大西俊輔：ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐荷性状に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2095-2100，2017
10) ポンマハーサイ・パラミ，伊藤彰利，畑中重光：圧縮強度と骨材量を変化させたジオポリマー硬化体のヤング係数に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，No.41，No.1，pp.1949-1954，2019

（執筆者：佐川　康貴）

5.3 クリープ

普通コンクリートのクリープは，ゲル空隙やキャピラリー空隙の構造と関係が深いとされているが，ジオポリマーのクリープに関するメカニズムは十分明らかにされていない.ジオポリマーのクリープについては，現状では研究事例は少ないが，ジオポリマーを構造部材（柱，梁など）で用いる場合には必要となる可能性の高い物性値である．以下に，代表的な研究事例を示す.

Wallah，Rangan らの研究[1,2,3]では，活性フィラーに Class F のフライアッシュを用い，アルカリシリカ溶液として NaOH とケイ酸ナトリウム溶液を用いたジオポリマーコンクリートに関する実験が行われている．NaOH 水溶液を 8M とした配合 1 と，14M とした配合 2 を用いてジオポリマーコンクリートが作製された．φ150×300mm 円柱供試体は，60℃の乾燥養生または蒸気養生を 24 時間行った後，材齢 7 日からクリープ試験が行われた．圧縮強度の 40%の圧縮応力を導入し，約 1 年間，測定を行った結果，ジオポリマーコンクリートのクリープは非常に小さく，67～40MPa の圧縮強度の供試体に対して単位クリープは $15～29\times10^{-6}$/MPa であることが報告されている．また，ジオポリマーコンクリートのクリープ係数は 0.6～0.7（圧縮強度 40～57MPa 場合），0.4～0.5（圧縮強度 67MPa の場合）であったと示されている．これらの値は，オーストラリア規格 AS 3600 による予測値の約 50%であり，非常に小さい値である.

Sagoe-Crentsil ら[4]は，Class F フライアッシュを用いた 40MPa クラスのジオポリマーコンクリートに対して，材齢 28 日からクリープの測定（150×150×300 mm のプリズム供試体）を行っている．圧縮強度の 40%の圧縮応力を導入し，52 週間の測定を行った結果，クリープ係数は，同等の強度の OPC コンクリートに比べて 40～60%低くなったと述べている．この原因については，未だ不明としながらも，未反応のフライアッシュ残渣が微小骨材として作用して拘束効果を発揮することがクリープの低減に寄与している可能性を挙げている.

また，Castel らの研究[5]では，活性フィラーとして，フライアッシュ，Kaolite high-performance ash（いずれも Class F に分類されるもの），および高炉スラグ微粉末が用いられた．アルカリシリカ溶液には，NaOH ペレット（12M となるよう調整）およびケイ酸ナトリウムペレットを用いて，ジオポリマーモルタルが作製された（φ100×200mm 円柱．AS 1012.16 に準拠）．打設後，3 日間 40℃で養生（その後，23℃，相対湿度 60%で保管）したものと，7 日間 80℃で養生したものの 2 種類（以下，3D40，7D80 と記す）が作製された．材齢 8 日で圧縮強度の 40%の圧縮応力が導入された．試験の結果，3D40 のクリープ係数については，初期材齢では Eurocode 2 の計算値とほぼ同じであったが，50 日を超えると計算値よりも小さくなった．また，高炉スラグ微粉末の影響は認められなかった．7D80 では，クリープは非常に小さく，クリープ係数はわずか約 0.2 であり，無視できる程度と述べている．ただし，小さすぎるクリープは，逆に，応力集中などの問題を引き起こす可能性があることから，ジオポリマーのクリープに関するさらなる研究が必要であることも指摘している.

Gunasekera ら[6]は，3 種類のフライアッシュ 100%ジオポリマーコンクリートの長期クリープと乾燥収縮について，材齢 1 年まで調査している．いずれも Class F のフライアッシュであるが，Gladstone 産と Pt. Augusta 産のものは，OPC コンクリートと同等の 700～800μのクリープひずみを示したが，Tarong 産のものは，1,900μと非常に大きくなった．クリープが大きくなった原因として，50nm～1μm の範囲のマクロポアが影響したことを指摘している.

Un ら[7]は，ジオポリマー梁（幅 600×高さ 240mm，スパン 6,000mm）の長期挙動について検討している．材齢 14 日で梁に自重および 1kPa の持続荷重を載荷している．また，材齢 14 日と 28 日に円柱に持続荷

重を載荷してクリープ試験を行っている．その結果，ジオポリマーコンクリートは構造設計上，十分な強度を得ることができるが，圧縮強度，曲げ引張強度ともに乾燥の影響を受け，乾燥収縮の差や乾燥面におけるマイクロクラックが発生することが報告されている．rate of creep method (RCM)，effective modulus method (EMM)，age-adjusted effective modulus method (AEMM)の 3 つの方法による変位予測との比較を行った結果，EMM と AEMM が適用可能であることが示されている．

国内では，南ら [8]は，圧縮強度 70N/mm^2 を有するジオポリマーコンクリートの圧縮クリープ試験を行っている．活性フィラーに JIS の I 種のフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用い，アルカリシリカ溶液には珪酸ソーダと水酸化カリウムの混合液が用いられた．圧縮強度の 1/3 の応力（23.9N/mm^2）を材齢 28 日で導入した結果，載荷 410 日におけるクリープ係数は 0.44，基礎クリープ係数は 0.39 であり，いずれも高強度コンクリートと比べて同程度から小さい結果であることが報告されている．

参考文献

1) Djwantoro Hardjito, Steenie E. Wallah, Dody M. J. Sumajouw, and B.Vijaya Rangan: On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, ACI Materials Journal, 101, 6, pp.467-472, 2004
2) Wallah, S.E., Rangan, B.V.: Low calcium fly ash based geopolymer concrete: long term properties, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2006
3) Wallah, S.E.: Creep behaviour of fly ash based geopolymer concrete, Civil Engineering Dimension, Vol.12, No.2, pp.73-78, 2010
4) Kwesi Sagoe-Crentsil, Trevor Brown & Alan Taylor (2013) Drying shrinkage and creep performance of geopolymer concrete, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2:1, 35-42, DOI: 10.1080/21650373.2013.764963
5) Castel, A., Foster, S.J., Ng, T., Sanjayan, J.G., Gilbert, R.I.: Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer Concrete, Materials and Structures/Materiaux et Constructions 49(5), pp.1619-1628, 2016
6) Chamila Gunasekera, Sujeeva Setunge, and David W. Law: Creep and Drying Shrinkage of Different Fly-Ash-Based Geopolymers, ACI Materials Journal, 116, 1, pp.39-49, 2019
7) C.H. Un, J.G. Sanjayan, R. San Nicolas, J.S.J. van Deventer: Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams, Construction and Building Materials, Volume 94, 2015, Pages 10-19,
8) 南浩輔，上原元樹，梶田秀幸，舟橋政司：ジオポリマーコンクリートの圧縮クリープに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1969-1974，2015

（執筆者：佐川　康貴）

5.4 疲労

ジオポリマーコンクリートは，疲労に対する検討が必要な適用事例少ないこともあり，疲労抵抗性に関する知見が未だ少ないのが現状である．一般的に，曲げ疲労試験により疲労抵抗性を確認した研究事例が多いのが特徴である．

Balamuralikrishnan[1)]は，ジオポリマー鉄筋コンクリートはりの曲げ疲労試験を実施している．実験データ数は少ないが，通常のコンクリートと同程度の疲労挙動を呈することを明らかにしている．また，Palankar ら[2)]は，高炉スラグ微粉末、フライアッシュ併用系のジオポリマーに関して，花崗岩の粗骨材をスラグ骨材に置換した場合の曲げ疲労抵抗性について実験的に検討している．置換率に関わらず，ジオポリマーの疲労抵抗性は，セメントコンクリートのそれと類似した結果であることを示している．

Refahi ら[3)]は，ジオポリマーモルタルおよびポリプロピレン短繊維を混和したジオポリマーモルタルの曲げ疲労抵抗性を実験的に検討し，特に短繊維の疲労抵抗性向上効果についての知見を得ている．Silva ら[4)]も，鋼繊維補強ジオポリマーの曲げ疲労抵抗性について実験的に検討しており，セメントコンクリートの場合と同様，繊維の添加量が増えるほど疲労抵抗性が高くなることを示している．

Jallu ら[5)]は，ジオグリッドを用いたフライアッシュジオポリマーを対象に曲げ疲労試験を実施し，曲げ疲労係数を用いて，繰返し荷重による損傷を評価している．

参考文献

1) R. Balamuralikrishnan: Fatigue behavior of geopolymer concrete beams, International Journal of Multidisciplinary Research and Development, 2(7), pp.354-359, 2015

2) N. Palankar, A.U.R. Shankar, B.M. Mithun, Studies on eco-friendly concrete incorporating industrial waste as aggregate, Int. journal of Sustainable Built Environment, 4, pp-378-390, 2015

3) A. Refahi, J. Mohandesi, E. Abadi: Fatigue behavior of geopolymer mortar reinforced by polypropylene fibers under constant loading amplitude and variable block loading, Journal of Applied Environmental and Biological Science, 5(10S), pp.477-489, 2015

4) A.C.R. da Silva et al.: Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete, Case Studies in Construction Materials, 16, 2022

5) M. Jallu, A. Arulrajah, S. Saride, R. Evans: Flexural fatigue behavior of fly ash geopolymer stabilized-geogrid reinforced RAP bases, Construction and Building Materials, 254, pp.1-9, 2020

（執筆者：國枝　稔）

5.5 鋼材との付着

Castel ら[1]は，フライアッシュを活性フィラーとし，NaOH および Na 系水ガラスをアルカリ溶液としたジオポリマーを用いた鉄筋との付着試験を実施している．丸鋼を用いた実験における化学付着は，通常のコンクリートと同程度であること，異形鉄筋を用いた場合においても，付着強度は通常のコンクリートと同程度であり，従来の付着モデルが適用できる可能性が高いと報告している．Sarker ら[2]は，フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーを用いて付着試験を実施しており，圧縮強度および割裂引張強度の大小と関連付けながら付着強度について整理している．これによれば，各種強度と付着強度の関係は，通常のコンクリートと同様の傾向を示すと結論づけている．Abdulrahman ら[3]は，引抜け破壊の場合および付着割裂破壊の場合に分類した上で付着応力ーすべり関係を提案しており，その概形は一般的なコンクリートのそれと非常に類似していることを示している．

Al-Azzawi ら[4]は引抜試験によりフライアッシュ量が付着強度に及ぼす影響について検討している．フライアッシュ量が増えるほど，Na_2SiO_2/NaOH が大きいほど付着強度が大きくなることを示している．Dahou ら[5]は，ジオポリマーの付着強度試験により求められた付着強度は圧縮強度と相関があること，および FIB モデルより付着強度が高くなることを示している．

太田ら[6]はジオポリマーと鉄筋との付着特性を明らかにするため，フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとして使用したジオポリマーモルタルを対象に,引抜き試験により鉄筋との付着強度を求めた．異形鉄筋の場合，ジオポリマーモルタルがセメントモルタルに比べて優れた付着特性を有していることを明らかにしている．また，丸鋼の場合は，セメントモルタルの供試体において付着が極端に小さく付着強度が求められなかったが，ジオポリマーモルタルでは $3N/mm^2$ 程度の最大付着応力度を示したことからも化学的付着が大きいことを報告している．

Romanazzi ら[7]は,高炉スラグ系ジオポリマーを対象に,鉄筋および GFRP を埋め込んだ引抜き試験を行い，付着強度と圧縮強度の関係を求めている．本実験の範囲内では，GFRP の方がやや付着強度が低い傾向にあったが，圧縮強度の増加に対する付着強度の増加の傾向が類似していることを示している．

Zhang ら[8]は，高温下でのジオポリマーコンクリートとセメントコンクリートの付着挙動について評価を行い，ジオポリマーコンクリートの方が各温度における付着強度が高いことを示している．

参考文献

1) A. Castel and S. Foster: Bond strength between blended slag and class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement, Cement and Concrete Research, 72, pp.48-53, 2015
2) P. Sarker: Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete, Material and Structures, 44, pp.1021-1030, 2011
3) H. Abdulrahman, R. Muhamad, P. Visintin, A. A. Shukri: Mechanical properties and bond stress-slip behavior of fly ash geopolymer concrete, Construction and Building Materials, 327, 2022
4) M. Al-Azzawi, T. Yu, M. N.S. Hadi: Factors affecting the bond strength between the fly ash-based geopolymer concrete and steel reinforcement, Structures, 14, pp.262-272, 2018
5) Z. Dahou, A. Castel, A. Noushini: Prediction of the steel-concrete bond strength from compressive strength of Portland cement and geopolymer concretes, Construction and Building Materials, 119, pp.329-342, 2016

6) 太田　周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：ジオポリマーモルタルの鉄筋との付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，38(1)，pp.2313-2318，2016
7) V. Romanazzi, M. Leone, M.A. Aiello, M. R. Pecce: Bond behavior of geopolymer concrete with steel and GFRP bars, Composite Structures, 300, 2022
8) H. Y. Zhang et al.: Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete, Construction and Building Materials, 163, pp.277-285, 2018

（執筆者：國枝　稔）

5.6 鉄筋コンクリートの挙動

ジオポリマーの研究において,ペーストやモルタルを対象とした材料特性に関する研究事例が多い一方で,コンクリートの強度特性および構造部材への適用に関して検討した事例は比較的少数である．その中で，海外では柱やはり，国内では短まくらぎやはりを対象とした研究事例がみられる．

国内の研究では，佐藤ら[1)]が石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作を実施している．同研究では，短繊維としてポリビニルアルコール（PVA）を 2.0Vol.%，ポリプロピレン（PP）を 1.5Vol.%，あるいはアラミド（AR）を 1.0Vol.%添加することにより引張鉄筋比を低減した，ジオポリマー（GP）製の短まくらぎを試作し，曲げ試験および埋込栓引抜き試験を行っている．

使用材料は，活性粉体として JIS Ⅰ種フライアッシュ（FA）および高炉スラグ微粉末（BS）（約 4000cm^2/g）を用いた．加える（ケイ酸）アルカリ溶液は，NaOH，KOH および JIS 1 号水ガラス等である．その他，シリカフューム(SF)や補強目的としてポリビニルアルコール（PVA），ポリプロピレン（PP），アラミド（AR）短繊維が用いられた．

結果として，GP の配合において，アルカリ水比 A/W が圧縮強度に大きく影響すること，シリカアルカリ比 Si/A は曲げ強度に影響することが確認された．また，短繊維を添加した GP の圧縮強度は，無添加の GP と比較して同等かやや低下した一方,曲げ強度,割裂引張強度は繊維添加により大きく向上した.PVA を 2.0Vol.%，1.5Vol.%，あるいは AR を 1.0Vol.%添加した鉄筋ありの GP 短まくらぎは，曲げ試験および埋込栓の引抜き試験において，短まくらぎとして強度特性面での要求性能を満たすことが示された．

佐川ら[2)]は，ジオポリマーコンクリートと異形棒鋼を用いた引抜き試験に基づいた付着強度特性を実施したうえで，ジオポリマー製 RC はりの曲げ特性について検討している．合田ら[3)]は，同一形状のはりを用いて曲げせん断特性について実験検討を行っている．同検討では，水ガラスに苛性ソーダを混和した珪酸アルカリ溶液，活性フィラーとしてフライアッシュ JISⅡ種および強熱減量の大きいフライアッシュ，高炉スラグ微粉末(約 4000cm^2/g)，骨材として珪砂，粗骨材を使用した．養生方法は 60℃の蒸気養生とした．

その結果，ジオポリマーコンクリートは同程度の圧縮強度を有する OPC コンクリートと比較して，付着強度が大きい傾向がみられた．RC はりの曲げ特性に関しては，OPC コンクリートはりと比較して，静弾性係数が小さいことでたわみが大きいものの，OPC コンクリートはりと同様の曲げ挙動を示すことが示された．また，付着強度の大きいジオポリマーはりほど曲げひび割れの分散性が高いことが確認された．一方，曲げせん断特性としては，斜め引張ひび割れの進展において OPC コンクリートはりよりも軸線に対する発生角度が小さい傾向がみられた．

また，耐荷力評価では，コンクリート標準示方書(設計編)[4)]に準拠した設計を概ね適用できることが示唆された．

一方，海外の代表的な研究事例としては，Sumajouw ら[5),6)]が，加熱養生された低カルシウムフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの適用性を検証するため，鉄筋コンクリート柱と鉄筋コンクリートはりを対象とした載荷実験を実施している．柱部材では，軸方向の鉄筋比，荷重の偏心度，およびジオポリマーコンクリートの圧縮強度を主たるパラメータとした．柱形状は 175mm の正方断面とした．軸方向の鉄筋比は 1.47%および 2.95%とし，軸方向鉄筋の平均降伏強度は 519MPa であった．せん断補強として 6mm 径の鋼線でつくられた帯筋が 100mm 間隔で配置された．なお，コンクリートのかぶりは 15mm であった．柱の支持条件はピン固定とし，有効長さは 1684mm であった．実験は偏心圧縮力による単調載荷とした．

柱供試体作製に用いられたジオポリマーコンクリートのスランプ試験では，210mm から 240mm の結果が得

られた．ジオポリマーコンクリートの目標強度はGC-ⅠおよびGC-Ⅱでは40MPaとし，GC-ⅢおよびGC-IVでは60MPaとした．なお，GC-ⅠおよびGC-Ⅱにおける供試体の養生条件は，打設後60℃，24時間の蒸気養生，GC-ⅢおよびGC-Ⅳにおける供試体の養生条件は，3日間の気中静置後，60℃，24時間の蒸気養生とした．

鉄筋ジオポリマーコンクリート柱の挙動および破壊モードはポルトランドセメントを用いた鉄筋コンクリート柱と類似傾向を示したことが報告されている．また，耐力については，ジオポリマーコンクリートの圧縮強度および軸方向の鉄筋比と正の相関を示しており，ポルトランドセメントを用いた鉄筋コンクリート柱の計算に用いられる方法が鉄筋ジオポリマーコンクリート柱にも適用可能であることが示唆された．

はり供試体作製に用いられたジオポリマーコンクリートは，コンクリートの圧縮強度と軸方向の引張鉄筋比をパラメータとした．はり用コンクリートの配合を示す．平均的なスランプはGB-Ⅲシリーズの175 mmからGB-Ⅰシリーズの255mmとなった．ジオポリマーコンクリートの目標圧縮強度は，GB-Ⅰシリーズにおいて40MPa，GB-Ⅱシリーズにおいて50MPa，GB-Ⅲシリーズにおいて70MPaであった．供試体の養生条件は，打設後3日間の気中静置後，60℃，24時間の蒸気養生とした．はりの形状は，幅200mm，高さ300mm，長さは3300mmとした．全てのはりに2本のD12を圧縮補強筋として配置し，せん断補強筋としてD12で作製された2本足の鉛直スターラップを150mmで配置した．軸方向の引張補強鉄筋比は0.64，1.18，1.84，および2.69%とした．引張鉄筋の平均降伏強度は550MPaから560MPaの間であった．コンクリートのかぶりは25mmとした．支持条件は，3000mmスパンの単純支持とし，載荷条件は載荷スパン1000mmとするスパン中央での2点線載荷とした．

鉄筋ジオポリマーコンクリートはりのひび割れパターンと破壊モードについてみると，鉄筋ジオポリマーコンクリートはりの挙動および破壊モードも，柱試験と同様にポルトランドセメントを用いた鉄筋コンクリートはりと類似していた．はりの曲げ耐力はコンクリートの圧縮強度と引張鉄筋比の影響を受けた．鉄筋ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐力をAS3600（2005）[7)]やACI318-02（2002）[8)]に記載されているような鉄筋コンクリートはりについての汎用的な曲げ強度理論を用いて計算した．引張鉄筋比が1.18%，1.84%および2.69%のはりについては，実験値と計算値がよく一致した．引張鉄筋比0.64%のはりの場合，予想された通り，計算値は終局曲げモーメント時の引張鉄筋のひずみ硬化を無視しているために小さめの値となった．

弾性曲げ理論とAS3600（2005）[7)]で与えられている使用性設計規定を用いて使用状態荷重における鉄筋ジオポリマーコンクリートはりのスパン中央たわみを計算した．結果として，たわみの実験値と計算値は精度よく一致している．

以上より，ASTMのクラスFで規定される低カルシウムフライアッシュをベースとするジオポリマーコンクリートの構造部材に対して，現行のポルトランドセメントを用いたコンクリート部材の設計規定によって概ね設計可能であることを示している．

参考文献

1) 佐藤隆恒ら：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，pp.2023-2028，2013
2) 佐川康貴ら：ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐荷性状に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，pp.2095-2100，2017
3) 合田寛基ら：ジオポリマーコンクリートはりの曲げせん断特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，pp.2089-2094，2017
4) 土木学会：コンクリート標準示方書［設計編］，土木学会，2012

5) Sumajouw D. M. J., Hardjito D., Wallah S. E. and Rangan B. V. : Fly ash-based geopolymer concrete: an application for structural members, Geopolymer 2005 Proceedings, pp.149-152, 2005
6) Sumajouw D. M. J. and Rangan B. V. : Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Reinforced Beams and Columns, Research Report GC3, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at espace@curtin or www.geopolymer.org., 2006
7) Committee BD-002 Standards Australia : Concrete Structures: Draft Australian Standard AS3600-200x, Standards Australia, 2009
8) ACI Committee 318 : Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2009

（執筆者　合田　寛基）

６．耐久性

6.1 アルカリシリカ反応

耐久性評価に大きく影響を及ぼす劣化現象のうち，発生時の抑制リスクの大きいものとしてアルカリシリカ反応(ASR)が挙げられる．ASR は，セメント中に含有されるアルカリによって骨材中の反応性鉱物から膨張性のアルカリシリカゲルが生成される反応である．ここで，アルカリシリカゲルの生成については，クリストバライト，トリジマイト，オパールといった反応性鉱物，および内在もしくは外来アルカリ，Ca が豊富にある環境，高湿度をはじめとする水分供給環境等が影響することが考えられている．これらの要因のいずれかが欠如もしくは減少することにより，ASR による劣化は低減される．

Garcia-Lodeiro ら[1]および Fernandez-Jimenez ら[2]の研究によると，ASTM C1260(ASR の促進膨張試験の一種)によって，水酸化ナトリウムまたはナトリウムシリカ溶液を用いたアルカリアクティベートフライアッシュモルタルは，所定の期間で基準である 0.1%を下回る膨張であったことが確認されている．供試体の外観観察では，モルタル表面にひび割れは見られず，SEM-EDX で明確な ASR 生成物も確認されなかった．ただ，N-A-S-H ゲルと結晶質のゼオライトが確認されている．

ここで，フライアッシュを主たる活性フィラーとしたシステムにおいて，アルカリは 2 つの競合する化学反応から干渉を受ける．このうち，主たる反応では，フライアッシュの非晶質構造が活性を示し，結合（セメント)材料もしくはゼオライト結晶へと変化する，いわゆるジオポリマーの生成に関連する反応である．

一方で同反応と並行して，骨材を侵食するもうひとつの反応である ASR も進行すると考えられている．ゼオライトが支配的である研究事例としては，Fernandez-Jimenez らの研究[2]が挙げられる．同研究では，ASR も呈していると考えられるものの，ジオポリマー組織の中では Ca が欠如していることから，膨張が小さかったと考えられる．

しかしながら，促進試験期間が 180 日以上を経過した場合では，OPC と比較すると膨張量が少ないものの，アルカリアクティベート材料の中でも膨張を呈するものが確認された．長期にわたる促進膨張試験でのアクティベート材料の膨張については，2 つ要因が影響しているものと考えられる．

1) ASR による生成物（アルカリシリカゲル）の吸水膨張

85℃の 1mol-NaOH 溶液に浸漬した場合，OPC の膨張が顕著に促進されることが知られている．フライアッシュ材料においても，少量ながら化学分析等で同様の現象が確認された．

2) ゼオライトにおける化学組成の変化

促進膨張試験の終了後，化学分析により，促進試験前と異なる化学組成のゼオライトが確認されている．促進膨張試験中にゼオライトが変化したとみられ，膨張に起因する発生応力の原因とも考えられている．

アルカリ溶液と活性フィラーとしてフライアッシュを用いたモルタルやコンクリート(セメント無含有)は，ASR に対して鈍感である．膨張が確認された促進養生期間は，一般的な促進試験期間よりもはるかに長期にわたるものであり，この膨張には ASR とゼオライトの双方が関係しているものと考えられる(Sindhunata ら[3])．

Ca に着目すると，ジオポリマーをはじめとするアルカリアクティベートフライアッシュ材料は，高濃度のアルカリ(Na, K)を有する一方，OPC と比較して相対的に Ca は極めて少量である．このような環境下では，OPC に用いられる潜在的に無害な骨材と同様に，高い膨張性を示すナトリウムカルシウム系のシリケートゲルを生成しない傾向がみられる．国内の研究では，新貝ら[4]および合田ら[5]が，活性フィラーであるフライア

ッシュと高炉スラグ微粉末の混合割合をパラメータとしながら，Ca の含有量がジオポリマー（もしくはアルカリ刺激材料）の ASR に及ぼす影響について検討している．フライアッシュが多いケースでは，ジオポリマー中の Ca が OPC の 30%程度しか存在しないことから，膨張がほとんど見られない一方，高炉スラグ微粉末が活性フィラーの 100%を占めるアルカリ刺激材料となった場合には，Ca が OPC と同程度になり，OPC ほどではないものの「無害ではない」との判定となる 0.1%の膨張を呈する結果を示した．これは使用材料，配合および環境条件によってはアルカリ刺激材料も膨張する可能性があることを示しており，OPC に準じた ASR 対応を要する場合があることを示唆するものである．ここで，フライアッシュを主たる活性フィラーとしたケースと高炉スラグ微粉末を主たる活性フィラーとしている場合には生成物の組成はもとより ASR に対する抵抗機構の異なるものと考えられる．

原田らの研究 [6]では，ナトリウム系のアルカリシリカ溶液にフライアッシュⅠ種，Ⅱ種をそれぞれ使用したジオポリマーモルタルを対象の促進膨張試験を実施した．なお，フライアッシュの他に全粉体に対して容積比で 10%に相当する高炉スラグ微粉末が混和されている．

普通ポルトランドセメントモルタル(OP)では，材齢 7 日から急激にひずみが増加した．一方，ジオポリマーについては，GP1 と示したフライアッシュⅠ種，GP2 と記したフライアッシュⅡ種の双方で，OP のようにひずみ顕著に増加しなかった．また，OP では，材齢約 14 日でアルカリシリカ反応による亀甲状のひび割れが発生したものの，GP1，GP2 ではひび割れが確認されなかった．フライアッシュを主材料とするジオポリマーでは，アルカリ環境下で骨材から溶出するシリカが，ジオポリマーの材料である水ガラスの成分と同じであるため，材料として固化反応に関与し，セメントコンクリートのように膨張性の生成物が生じないものと評価している．

佐藤ら [7]は，pH を低下させる材料として大きなイオン交換能を持ち，かつ酸性領域でも構造破壊が少なく，H^+型のイオン交換体も作製可能なジオポリマー硬化体を対象に ASR 抵抗性を評価した．H^+型交換処理粉体の作製にあたり，一般的なジオポリマーの作製後，0.5～4.0mol/L の硫酸で表面処理している．

その結果，酸処理 GP を添加したセメントペーストを注入したモルタルの膨張率は無添加のものと比較して小さくなった．また，高濃度で処理した試料ほど，その抑制効果は大きい．高濃度で処理した場合には，セメントペースト中において pH を下げる効果が高く，また多孔質化してより反応しやすかったことから，結果としてセメントペースト中では ASR 抑制効果が高かったものと考えられる．

以上より，Ca の含有量を低減させ，pH も低くなるような処理等を施すことにより，ASR に対する抵抗性が高くなっているものと考えられている．一方，長期的にみると経時的にゼオライトが変化し，膨張性を示す可能性も報告されている．

最後に Gourley らの研究 [8]によれば，ジオポリマーモルタルで起きているようなアルカリシリカ反応とは，pH にも影響を受けながら，ゲル中に種々の鉱物が存在する環境下で，縮重合反応の間に発生するものであると考えられている．ジオポリマーコンクリートにおける結合力は，この化学結合によるものである．ジオポリマーの材齢が経過すると，骨材の周辺に環状の結合領域が形成されることから，アルカリシリカ反応の反応性は低下する．加えて，細孔溶液を見ると，pH が 10～11 と低いアルカリ性を示し，マトリクスは非反応フライアッシュを大量に含んだ状態となると考えられている．

参考文献

1) Garcia-Lodeiro, et al.: The alkali-aggregate reactions in alkali activates fly ash mortars, Cem. Concr. Res., Vol.37, No.2, pp.175-183, 2009

2) Fernandez-Jimenez A., et al.: Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials, J. Material Science, Vol.42, pp.3055-3065, 2007
3) Sindhunata, et al.: Structural Evolution of fly ash Based Geopolymers in Alkaline Environments, Ins. Eng. Chem. Res., Vol.47, pp2991-2999, 2008
4) K. Shinkai, et al.: The basic research on ASR of geopolymer, Proceedings of ConMat2020, 2020
5) H. Goda, et al.: Evaluation of alkali silica reaction resistance of geopolymers using industrial by-products for application to bridges, Proceedings of IABMAS, No.11, pp.2077-2084, 2022
6) 原田耕司ら:ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.33, No.1, pp. 1937-1942, 2011
7) 佐藤隆恒ら：ジオポリマー硬化体の H+交換処理粉体によるアルカリシリカ反応の抑制，土木学会年次学術講演概要集，Vol.70，No.5，pp.545-546，2016
8) Gourley, G., et al.: 'Developments in geopolymer precast concrete' World Congress Geopolymer 2005: Green chemistry and sustainable development solution, pp.139-143, 2005

（執筆者　合田　寛基）

6.2 中性化（炭酸化）

セメントコンクリートの炭酸化は，主に，$Ca(OH)_2$ が CO_2 と反応することで $CaCO_3$ を生成する中性化によって説明される．しかし，ジオポリマーコンクリートでは，反応生成物がセメントコンクリートとは異なるため，中性化のメカニズムも異なる．Md.Sufian ら[1]は，細孔溶液の炭酸化がジオポリマーの pH 低下に影響していることを指摘している．また，Raphaëlle ら[2]は，メタカオリンベースのジオポリマーを用いた研究によって，細孔溶液中の炭酸化は，まずナトリウムの炭酸化，続いて炭酸塩相の平衡化によって進行することを明らかにしている．

その他には，直接的なアルカリ分の低下が中性化を招くと説明しているものもある．Sha Li ら[3]は，気中においては水分蒸発に伴ってアルカリ成分が内部から外部に移動することで表層部分の中性化が進行し，水中においては直接アルカリ分が溶出することで中性化が進行すると説明している．また，Zhuguo Li ら[4]は，水中浸漬や乾湿繰り返しによって，細孔に残留されるアルカリ物質（ケイ酸ソーダ，苛性ソーダ）が硬化体から溶出すれば，ジオポリマーは中性化すると説明している．

ジオポリマーコンクリートの中性化に対する抵抗性については，セメントコンクリートと比較して低いことを報告している文献が多い．Byfors ら[5]は，アルカリ活性スラグコンクリート（AASC）と一般のポルトランドセメントコンクリート（PC）の炭酸化速度を比較し，AASC の炭酸化速度は PC よりも速く，水スラグ比 35%の AASC で水セメント比 60%の PC と同程度となることを報告している．その理由は AASC の低アルカリ性と何らかの原因による微細ひび割れの存在にあると説明している．Shi[6]は CO_2 濃度 15%，相対湿度 53%の環境下での 75 日間の暴露後，目視観察を行った結果，炭酸化試験開始から数日後，AASC 供試体のひび割れを確認している．このひび割れは乾燥収縮および炭酸化収縮に起因するものだと考えられる．Hakkinen[7]も AASC の炭酸化試験の際に明確な収縮ひび割れが生じたことを報告している．これらのことから，ジオポリマーにおける炭酸化には乾燥収縮が影響していると考えられ，炭酸化の進行は相対湿度に大きく依存すると考えられる．

セメントコンクリートにおける中性化深さは，一般にルート t 則によって評価される．Zhuguo Li ら[8]は，高炉スラグ微粉末とフライアッシュを活性フィラーとして用いたジオポリマーコンクリートとジオポリマーモルタルの炭酸化抵抗性が共に PC より低いことを明らかにした上で，炭酸化深さがそれぞれ式(6.2.1)と式(6.2.2)によって表されることを明らかにしている．あわせて，液粉体比，または単位アルカリ溶液量，または Si/Na モル比が大きいほど炭酸化抵抗性が低いこと，ブレーン値が低い高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーや常温養生されたジオポリマーの炭酸化抵抗性が低いことを報告している．

ジオポリマーコンクリートの中性化深さ　　：$x = at^{0.31}$　　(6.2.1)

ジオポリマーモルタルの中性化深さ　　：$x = at^{0.28}$　　(6.2.2)

ジオポリマーコンクリートの中性化抵抗性を確保する手段として，北里ら[9]，Li ら[10]は，それぞれ有機，無機塗布剤の表面塗布や含浸による炭酸化・中性化抵抗性の向上方法を提案している．また，海外ではナノ TiO_2 を混合することで抵抗性が向上することを示している文献もある[11]．

Bakharev ら[12]は，0.352mol の $NaHCO_3$ 溶液中と相対湿度 70%，CO_2 濃度 20%の気中の二つの異なる環境下における AASC の炭酸化進行を比較している．AASC の場合は $NaHCO_3$ 溶液中の方が炭酸化の進行が速く，加えて，

炭酸化領域で強度低下が生じたことが報告されている．宮川ら[13]は，ジオポリマーの炭酸化前後の内部構造，性能および化学組成の変化を比較している．その結果，炭酸化後の試験体の方が，細孔径が減少して緻密になり，圧縮強度が高くなることを明らかにしている．山崎ら[14]は，**表 6.2.1** に示す配合で材齢 8 週から CO_2 濃度 5%，20℃，60%R.H.の条件で促進炭酸化試験を行っており，促進試験 4 週目と 8 週目に圧縮強度の測定を行っている．その結果は，**図 6.2.1** のとおりであり，高炉スラグ微粉末と水ガラスを用いた水準（BFS_WG）では促進試験によって強度が低下し，フライアッシュと水酸化ナトリウム水溶液を用いた水準（FA_NA）では促進試験によって強度が増加することを明らかにしている．このことについて，C-A-S-H 構造の変化による強度低下と炭酸塩の生成による細孔構造の緻密化が影響していると説明している．これらの知見から，炭酸化の進行したジオポリマーの圧縮強度は，配合によって異なるが，増加する場合も低下する場合もあり得ることが分かる．

表 6.2.1　モルタル配合表[14]

Index	Water/ Binder	Binder: Sand	Binder		Alkali Activator		Water	Sand	Na_2O/ Binder
			BFS	FA	WG	NaOH			
BFS_WG	0.4	1:2	669	0	167	0	192	1338	0.045
BFS_NA			665	0	0	106	242	1330	0.123
BFS+FA_WG			322	322	163	0	186	1300	0.045
BFS+FA_NA			324	324	0	103	235	1292	0.123
FA_WG			0	625	158	0	180	1260	0.045
FA_NA			0	630	0	99	228	1251	0.123

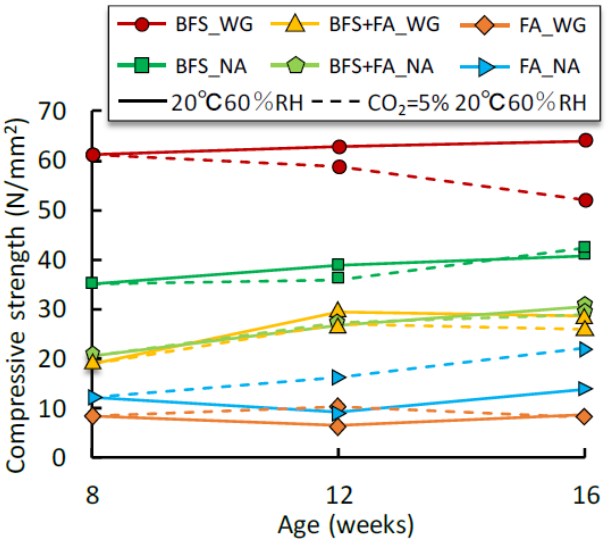


図 6.2.1　圧縮強度試験結果[14]

セメントコンクリートの中性化深さの評価は，フェノールフタレイン法によって行うことが一般的である．原田ら[15]は，中性化促進後のジオポリマーモルタルの X 線分析結果とフェノールフタレイン法による中性化域を比較し，ジオポリマーの場合にフェノールフタレイン噴霧直後の無色域が実際の中性化域を示すものではない可能性を示している．同様に，榮徳ら[16]は，鉄筋を埋設したジオポリマー供試体において，十分な塩分の浸入が確認された上で，フェノールフタレイン法から判断した中性化深さがかぶり厚さに達しても鉄筋腐食が生じなかった事例を発表している．なお，榮徳らは，実環境下における研究からジオポリマーコンク

リートにおいて$\sqrt{t}$則が適用可能であることも示している．以上のことから，ジオポリマーの中性化については，従来のセメントコンクリートとは異なる評価方法を適用する必要性が示唆される．

参考文献

1) Md.Sufian Badar, et al.: Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes, Construction and Building Materials, Vol.61, pp.79-89, June 2014
2) Raphaëlle Pouhet, Martin Cyr: Carbonation in the pore solution of metakaolin-based geopolymer, Cement and Concrete Research, Vol.88, pp.227-235, October 2016
3) Sha Li, et al.: Experimental Study on the Properties of Geopolymer Concrete Using Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag (Part 5: Neutralization Resistance), 日本建築学会大会学術講演梗概集（九州), pp.1491-1492, 2016
4) Zhuguo Li, Sha Li: Effects of wetting and drying on alkalinity and strength of fly ash/slag-activated materials, Construction and Building Materials, No.254, paper No.119069, 2020.9
5) Byfors K. Klingstedt, et al.: Durability of concrete made with alkali-activate slag. Third International Conference ono the Use of Natural Pozzolans, Fly Ash, Blast Furnace Slag and Silica fume in Concrete, ACI SP-114, No.2, pp.1429-1466,1989
6) Shi, C.: Corrosion resistance of alkali-activated slag cement, Advances in Cement Research, Vol.15(2), pp.77-81, 2003
7) Hallinen, T., et al.: The influence of slag content on the microstructure: permeability and mechanical properties of concrete, Part 2 technical properties and theoretical examinations, Cement and Concrete Research, Vol.23(3), pp.518-530, 1993
8) Zhuguo Li, Sha Li: Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete, Construction and Building Materials, Vol.163, pp.668-680, February 2018
9) 北里慎悟ほか：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察(その 14　塗布剤使用の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.751-752, 2017.8
10) X. Li, Z. Li: Study on improvement of carbonation resistance of geopolymer by surface modification, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1227-1128, 2022.9
11) Ping Duan, et al.: Effects of adding nano-TiO2 on compressive strength, drying shrinkage, carbonation and microstructure of fluidized bed fly ash based geopolymer paste, Construction and Building Materials, Vol.106, pp.115-125, March 2016
12) Bakharev, T., et al.: Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation, Cement and Concrete Research, Vol.31(9), pp.1277-1283, 2001
13) 宮川萌ほか： ジオポリマー硬化体の性能に及ぼす炭酸化の影響, 2018 年度日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.42, pp.17-20, 2019.3
14) 山崎雄斗ほか：結合材およびアルカリ刺激剤の種類によるジオポリマーの炭酸化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1804-1809，2020
15) 原田耕司ほか：ジオポリマーの諸特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1894-1899，2012

16) 榮徳雄斗ほか：塩害環境下に 2 年間曝露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1367-1372，2021

（執筆者：周藤　将司）

6.3　鉄筋の腐食

ジオポリマーに埋設された鉄筋の長期的な腐食性状については，未だ知見が少なく，明らかになっていない部分が多い．

佐藤ら[1)]は，予め塩化物イオン濃度を 2.4kg/m^3 混入させたジオポリマーで鉄筋の腐食性状を調べている（**表 6.3.1**，**表 6.3.2**，**図 6.3.1**）．これによると，大気暴露 330 日時点において，鉄筋のリブにごく僅かに腐食が認められる程度で，腐食量も配合によって大きな差がみられなかったと報告されている．また，BS 置換率や pH によって自然電位の値に顕著な違いがみられなかったことも報告されており，その理由は大きな細孔径により硬化体の水分逸散量が多くなったことで，試験体が乾燥状態であったことに起因する可能性があると考察している．

一宮ら[2)]は，材齢 7 日後に供試体を塩水（0.5mol/L の NaCl 水溶液）に浸漬させ，浸漬 3 日と乾燥 1 日の乾湿繰返し試験（20℃，60%RH）を行いジオポリマー中鉄筋の腐食を調べている（**図 6.3.2**，**図 6.3.3**）．これによると，BS 置換率が 10～30%の範囲で高いほど鉄筋の腐食が抑制されるが，BS 置換率を調整するだけでは完全に発錆を防ぐことはできず，前養生の日数など他の要因も考慮した総合的な対策が必要であると示されている．

表 6.3.1　一般法で作製した GP コンクリートの配合 [1)]

試番	配合条件				単位量 kg/m^3							強度 MPa	
	A/W	S/A	水量 kg/m^3	BS vol.%	FA	BS	S	G	ASS	A2	A3	圧縮	引張
C1	0.10	0.30	139	20	335	101	757	892	193	8.71	0.52	41	1.8
C2	0.15	0.30	133	0	418	0	757	892	209	8.37	0.75	29	1.9
C3	0.15	0.30	133	20	335	101	757	892	209	8.71	0.50	62	3.0
C4	0.15	0.30	133	30	293	151	757	892	209	8.88	0.43	79	4.0
C5	0.20	0.30	127	20	335	101	757	892	224	8.71	0.35	78	4.4
C6	0.15	0.15	133	20	333	101	762	890	202	8.70	0.45	66	4.6
C7	0.15	0.25	132	20	333	101	762	890	206	8.70	0.45	63	3.7
C8	0.15	0.35	131	20	333	101	762	890	210	8.70	0.54	69	3.8
C9	0.20	0.15	128	20	333	101	762	890	216	8.70	0.64	78	5.1

FA:フライアッシュ,BS:高炉スラグ，S:細骨材
G:粗骨材，GNa:グルコン酸 Na
AS:48%KOH 溶液+JIS3 号水ガラス+純水，
A2:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系)，
A3:助剤
鉄筋腐食試験用試験体は上記配合に 2.4kg/m^3 の Cl 量となるよう NaClを添加した。

表 6.3.2　GP コンクリート（一般法）における自然電位測定結果及び腐食減量（大気暴露 330 日経過時） [1)]

試番	C1		C2		C3		C5	
NaCl	有	無	有	無	有	無	有	無
自然電位	-329	-41	-260	-26	-249	-51	-139	-65
腐食減量	0.38	--	--	--	--	--	--	--

試番	C6		C8		C9	
NaCl	有	無	有	無	有	無
自然電位	-177	-119	-211	-115	-159	-115
腐食減量	--	--	--	--	--	--

自然電位:mV vs Ag/AgCl　腐食減量:wt%.　--:0.1%以下

図 6.3.1　鉄筋の腐食状況（試番 C1，NaCl 添加）[1)]

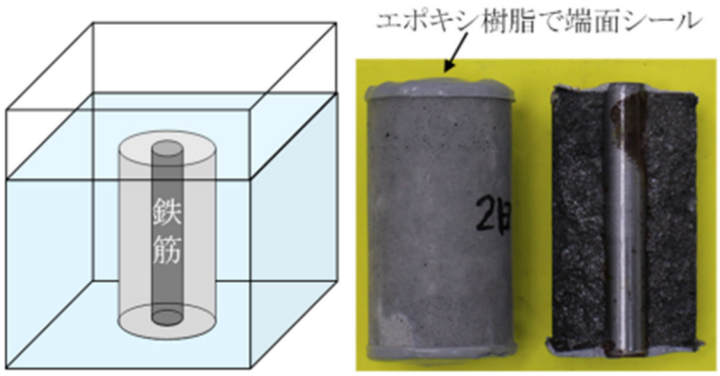


図 6.3.2　鉄筋腐食試験 [2)]

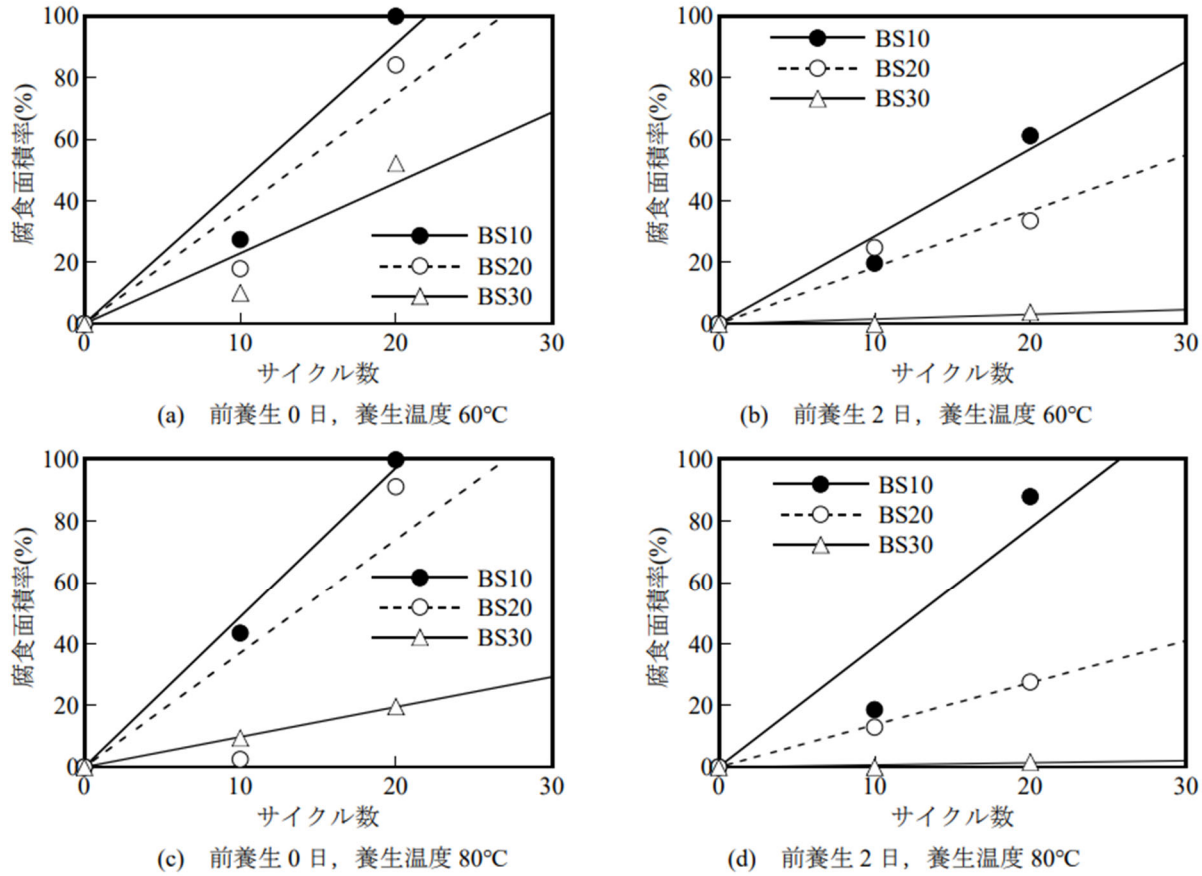


図 6.3.3　蒸気養生温度，前養生日数，BS 置換率ごとの腐食面積率 [2)]

花岡ら[3]はBFSを15%置換したジオポリマーを対象に，塩水浸漬（3%NaCl溶液）3.5日と乾燥（20℃，60%）3.5日乾湿繰返し試験（20℃，60%RH）を行い，電気化学的測定（自然電位，分極曲線）と解体調査で鉄筋の腐食性状を調べている．自然電位の測定結果から，BFSを15%置換したひび割れ無し供試体では，鉄筋が腐食している可能性が高いと判断されたが，解体調査の結果では，塩分は鉄筋位置まで浸透しておらず，鉄筋の腐食も認められなかった（**図 6.3.6**）．また鉄筋の分極曲線（**図 6.3.5**）をみると，BFS15のアノード分極曲線は OPCに比べて，大きく右側にシフトしている．同様に，カソード分極曲線を比較すると，BFS15のカソード分極曲線は OPCに比べて，右側に位置している．そのため，BFS15中の鉄筋は，OPCに比べて水分と酸素の供給が多く，鉄筋のカソード反応が生じやすい環境であると考えられる．また，ひび割れ有り供試体から取り出した鉄筋の腐食状況を比較すると（**図 6.3.6**），ひび割れ付近ではBFS15の方がOPCに比べて腐食面積がわずかに広い．腐食の程度が小さいため，両者に明確な差はないものと考えられるが，分極曲線の測定結果などを踏まえると，OPCに比べてジオポリマーに埋設した鉄筋の腐食速度は速くなる可能性が示唆された．

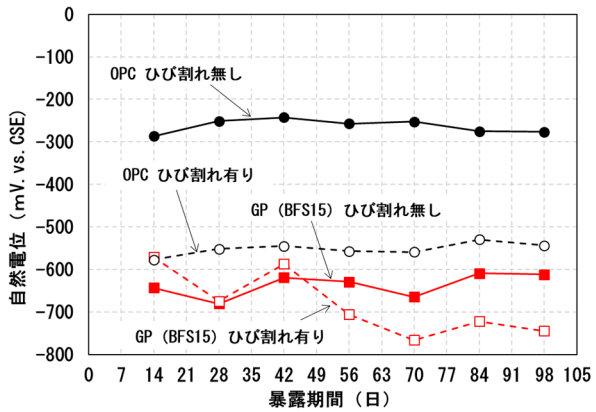


図 6.3.4　自然電位の測定結果[3]

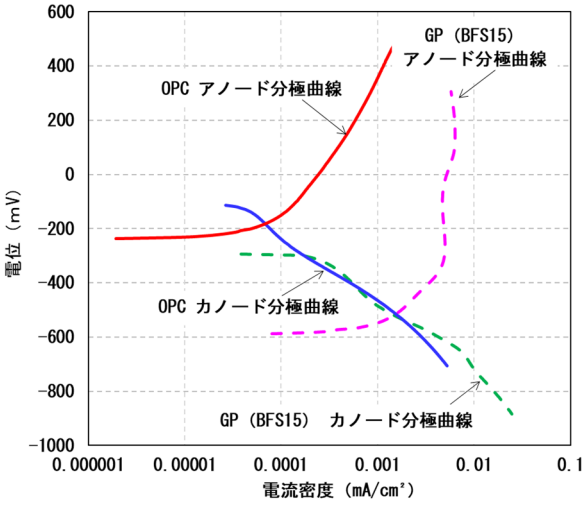


図 6.3.5　分極曲線の測定結果[3]

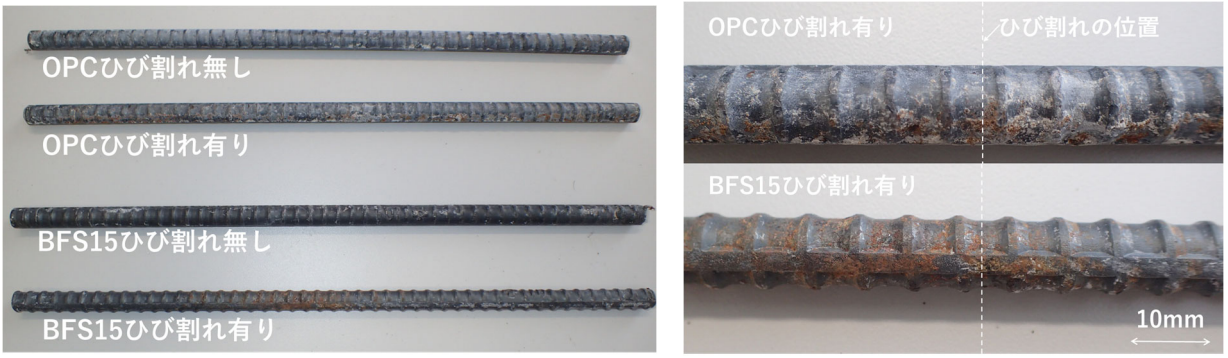


図 6.3.6　鉄筋の腐食状況[3]

榮徳ら[4]は，塩害環境下に2年間暴露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリート中の鉄筋の腐食性状を調べている．自然電位および分極抵抗の測定結果（**図 6.3.7**，**図 6.3.8**）から，ジオポリマー中鉄筋の腐食速度は極めて遅く，2年経過時点では腐食している確率は低いと評価されている．分極曲線の測定結果（**図 6.3.9**）からは，OPCに比べてジオポリマーコンクリートではカソード反応が活発で，鉄筋表面におけ

る酸素供給量が多いと考えられた．また，供試体の解体調査では，OPC およびジオポリマーコンクリートの鉄筋表面に腐食は確認されず，ジオポリマーコンクリートの鉄筋位置の塩化物イオン濃度は約 2.2kg/m^3 であったと報告されている．

セメントコンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は，これまでに数多くの知見があり，例えは，1.6～3.6kg/m^3 という報告[5]があるが，ジオポリマー中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度については，現状，研究事例が少なく分かっていないため，今後の検討が望まれる．

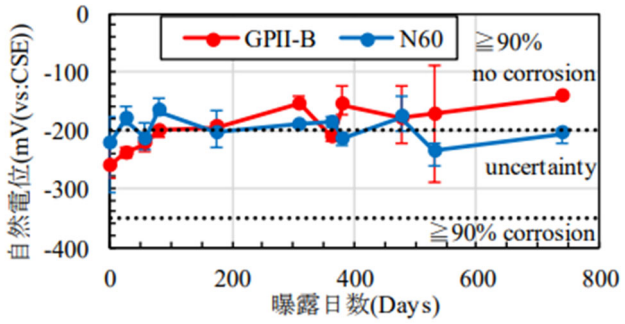


図 6.3.7　自然電位の経時変化[4]

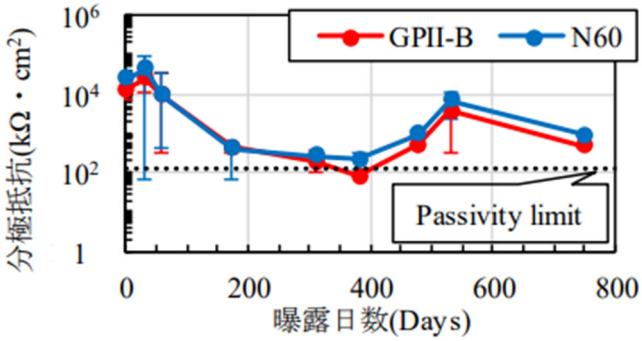


図 6.3.8　分極抵抗の経時変化[4]

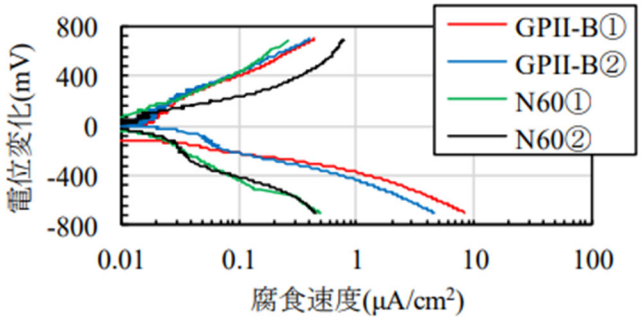


図 6.3.9　分極曲線測定結果[4]

また，塩化物イオンに起因する鉄筋腐食を議論するうえで，硬化体による塩分の固定化を考える必要がある．上原ら[6]は塩化物イオンの固定化機構に関して，フライアッシュや高炉スラグなどを起源とする非晶質物質がごく少量の塩化物イオンを固定化するものの，セメントコンクリートにおけるフリーデル氏塩のように塩化物イオンを固定する結晶質物質は認められないとしている（**表 6.3.3** の配合のコンクリートおよびモルタル試料に対する X 線回折結果である**図 6.3.10** を参照）．

ジオポリマーは，セメントコンクリートに比べて中性化の進行が速く，内部に微細な空隙が形成されやすく水分などの物質透過性が高くなる[3),7)]ことなどから，中性化による鉄筋腐食も懸念される．

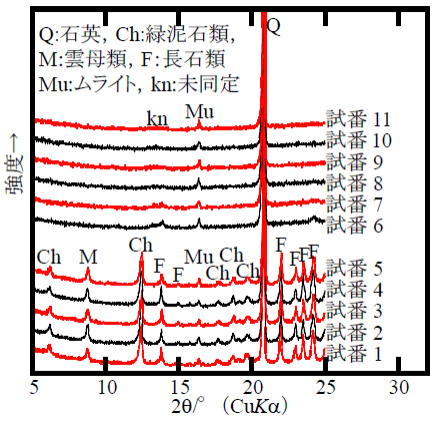


図 6.3.10　ジオポリマーの粉末 X 線回折図[6)]

表 6.3.3　X 線回折試験（図 3.6.10）に用いたジオポリマー配合[6)]

（1）GP コンクリート

試番	配合条件				単位量(kg/m^3)						
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m^3	BS 置換率	FA	BS	S	G	ASS	A1	A2
1	0.10	0.30	139	20%	335	101	757	892	193	8.71	0.52
2	0.15	0.30	133	0%	418	0	757	892	209	8.37	0.75
3	0.15	0.30	133	20%	335	101	757	892	209	8.71	0.50
4	0.15	0.30	133	30%	293	151	757	892	209	8.88	0.43
5	0.20	0.30	127	20%	335	101	757	892	224	8.71	0.35

AL/W:アルカリ/H_2O のモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ(JIS Ⅰ 号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 ブレーン), S:細骨材, G:粗骨材, ASS:「48%KOH 溶液+JIS Ⅲ 号水ガラス+純水」を配合条件で混合。A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系), A2:助剤

（2）GP モルタル

試番	配合条件				単位量(kg/m^3)					
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m^3	BS 置換率	FA	BS	S	AS	SF	A1
6	0.174	0.257	189	13%	570	103	1311	263	29.6	13.1
7	0.174	0.302	189	13%	569	103	1307	262	34.6	13.0
8	0.174	0.355	188	13%	567	102	1303	261	40.5	13.0
9	0.174	0.257	189	22%	512	175	1311	263	29.6	13.1
10	0.174	0.302	188	22%	510	174	1307	262	34.6	130
11	0.174	0.355	188	22%	508	174	1303	261	40.5	13.0

AL/W:アルカリ/H_2O のモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ(JIS Ⅰ 号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 ブレーン), S:細骨材, AS:「市販 NaOH 粉末+純水」を配合条件で混合。A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系)

参考文献

1)　佐藤隆恒ほか：ジオポリマー硬化体の種々の配合，作製法における生成物と pH 等諸性質との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016

2) 一宮一夫ほか：ジオポリマー中の鉄筋腐食性評価に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1084-1089，2022
3) 花岡大伸ほか:ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価,コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1361-1366，2021
4) 榮徳雄斗ほか：塩害環境下に 2 年間曝露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1367-1368，2021
5) 堀口賢一ほか：腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定方法とその定量評価に関する研究，土木学会論文集 E2，Vol.71，No.2，pp.107-123，2015
6) 上原元樹ほか：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015
7) 一宮一夫ほか：フライアッシュ系ジオポリマーの部分給水と表層の変状の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1810-1815，2020

（執筆者：花岡　大伸，佐川　康貴，一宮　一夫）

6.4 エフロレッセンス，白華

Temuujin & van Rissen[1]は，フライアッシュを500℃および800℃で燃焼することがジオポリマー反応に及ぼす影響について検討した．その結果，フライアッシュの燃焼によりムライトとヘマタイトの結晶化によってフライアッシュの反応性が低下し，ジオポリマー反応度の低下につながったと述べている．また，800℃で燃焼したフライアッシュを用いたジオポリマーでは目視によりエフロレッセンスが観察されたが，500℃で燃焼したフライアッシュを用いた場合ではSEMによりそれが観察されたこと，燃焼していないフライアッシュではエフロレッセンスは観察されなかったこと，そしてエフロレッセンスの存在は，燃焼したフライアッシュを用いたジオポリマーの反応に過剰なアルカリが使われた明確な証拠であると結論している．

Skvara et al.[2]は，低カルシウムの茶色をした石炭フライアッシュベースジオポリマーにおいて，典型的なエフロレッセンスの構造が$Na_2CO_3 \cdot nH_2O$，$Na_6(SO_4)(CO_3,\ SO_4) \cdot nH_2O$であること，ジオポリマーが湿度勾配のある環境においてエフロレッセンスを生じやすいのは，ナトリウムが$Na(H_2O)_n$の形態で弱く結合されているためであることを明らかとした．なお，Skvara et al.[3]は，ジオポリマーモルタルを600℃以上で加熱すると，ナトリウムの結合状態がガラス材料と同様となり，ナトリウムの溶出が顕著に減少し，エフロレッセンスが消失すると報告している．彼らは，「アルミノシリケートポリマー材料は優れた材料特性を示すが，適用に際してはいくつかの欠点が存在する．まず，アルカリ成分が容易に溶出することとエフロレッセンスの形成である」と述べている．

Allahverdi et al.[4]は，天然ポゾランベースジオポリマーの物性に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響についての論文の中で，高炉スラグ微粉末を質量比で5%添加することにより，エフロレッセンスが最小となったことを報告している．

Kani et al.[5]は，イランで産出する軽石形の天然ポゾランを用いたジオポリマーのエフロレッセンスについて検討し，アルミン酸カルシウムセメントがエフロレッセンスの減少に高い効果を発揮したことを示し，ジオポリマーゲル中にアルミナが多量に放出されたことが原因であると考察している．また，昇温での熱水養生もエフロレッセンスの減少に効果的であったことを報告している．

Huang et al.[6]は，5Aゼオライトをフィラーとして用いたフライアッシュジオポリマーの物性について検討し，エフロレッセンスの生じた範囲が5Aゼオライトの添加によって減少したことを示し，これはCa^{2+}とNa^{+}のイオン交換を通じてナトリウムがゼオライト構造中に固定されたこと，およびマクロ空隙の容積が減じたことが理由であると述べている．

Zhang et al.[7]は，フライアッシュベースジオポリマーにおけるエフロレッセンスを観察し，エフロレッセンスの発生度がアルカリ刺激の条件に強く依存することを報告している．彼らは，(1)室温養生条件で同一のアルカリ量ならば，水酸化ナトリウムを用いた方がケイ酸ナトリウムを用いた場合よりもエフロレッセンスの発生は少なくその速度も遅いこと，(2)ケイ酸ナトリウムを用いた場合を除き，高温養生は室温養生よりもエフロレッセンスを低減させること，(3)フライアッシュの20%をスラグで置換することによってエフロレッセンスの発生度が減少することを明らかとした．さらに，小片サンプルからのアルカリ溶出量とエフロレッセンスの発生可能性との関係を提案した．彼らは，「溶解シリカとスラグの添加はエフロレッセンスの減少に影響するが，抑制するというよりは遅延させる傾向がみられ，全体としては限定的な効果とみなされる．高温養生によってジオポリマーを部分的に結晶化させることがエフロレッセンスの抑制には最も効果的である」と結論している．

Djobo et al.[8]は，火山灰ベースジオポリマーにおいて，火山灰質量の10%をボーキサイト（アルミニウム

の原鉱）で置換するとエフロレッセンスの減少に十分効果的であったことを報告している．

一宮ら[9]は，ジオポリマー製歩車道境界ブロックが設置 1 年以内に白華およびスケーリングが生じたことを報告し，これを究明するため，部分吸水したフライアッシュ系ジオポリマーにおける表層劣化について実験的に検討した．その結果，(1)フライアッシュ系ジオポリマーの表層劣化は温度や湿度が低いほど進行しやすく，温度変化の繰返しも表層劣化を促進すること，(2)フライアッシュの一部を高炉スラグ微粉末で置換することにより白華の発生が抑制される場合のあること，(3)セメントコンクリート用のシラン系表面含浸材を塗布することは，フライアッシュ系ジオポリマーにおける表層劣化速度を低下させる効果があることを報告している．

Xue et al.[10]は，フライアッシュベースジオポリマーの表面をシランで改質することでエフロレッセンスの発生を抑制できることを報告している。75 mm × 25 mm × 12.5 mm のジオポリマー供試体を 28 日間養生した後，シランのモノマー溶液中に 60 秒または 120 秒浸漬することで表面を改質したところ，ジオポリマーの表面が親水性から疎水性に変化し，毛細管吸水と湿分の拡散が顕著に抑制され，その結果，可溶性アルカリの溶出が減少したと述べている．また，シラン改質によって強度への影響はなかったこと，シランがジオポリマーの表面に化学的結合によって定着されることをあわせて報告している．

Wang et al.[11]は，原料であるフライアッシュとボーキサイトの比率を変えることで Si/Al 比（シリカアルミナ比）を変化させたジオポリマーのエフロレッセンスの程度について，滲出物中の OH^- 量を指標とした定量的な検討を行い，Si/Al 比が 1.5 の場合にジオポリマーの特性が向上しかつエフロレッセンスの度合いも顕著に減少したことを報告している．その理由として，Si/Al 比が異なると N(C)-A-S-H ゲルの構造が変わり，Si/Al = 1.5 のときに細孔容積と細孔径が小さくなること，また，$[AlO_4]^-$ 構造の割合が最大となりアルカリ溶液の移動経路が減少することを挙げている．

Wu et al.[12]は，湿度の高低サイクル条件におけるフライアッシュベースジオポリマーモルタルのエフロレッセンスについて，Caltite（疎水性の空隙閉塞成分）の添加量に着目した検討を行い，Caltite を 1 wt%加えることでエフロレッセンスが 89.34%減少した一方，圧縮強度が 25.25%低下したと報告している．

Pasupathy et al.[13]は，ジオポリマーコンクリートのエフロレッセンスを抑制するため，骨材表面を疎水性にすることの影響について検討している．疎水性の微粒子シリカおよびシランクリームで細骨材を被覆し，それらを用いたジオポリマーコンクリートのエフロレッセンスを測定した．その結果，微粒子シリカの方がシランクリームよりもはるかに少ない使用量でエフロレッセンスを防止する効果のあること，シランクリームを用いた場合はジオポリマーコンクリートの圧縮強度が低下した一方で微粒子シリカを用いた場合は圧縮強度が増大したと報告している．

Chindaprasirt et al.[14]は，フライアッシュの一部をステアリン酸カルシウムで置き換えた多孔質な軽量フライアッシュベースジオポリマーのエフロレッセンス特性について検討している．その結果，フライアッシュの質量の 5%をステアリン酸カルシウムで置換することによって，ジオポリマーコンクリートに疎水性が付与され，エフロレッセンスを抑制できると報告している．

Tan et al.[15]は，建設廃材（コンクリート，レンガ，タイル，石，ガラスなど）をすり潰して粉体としたものを原料とするジオポリマーのエフロレッセンスを抑制するため，メタカオリンまたは高炉スラグ微粉末を混和することの効果について検討している．その結果，建設廃材由来の粉体のみでは明らかにエフロレッセンスが生じたが，メタカオリンまたは高炉スラグ微粉末を粉体全体に対する置換率 20%で用いたところエフロレッセンスが観察されなかったと報告している．さらに，メタカオリンと高炉スラグ微粉末ではエフロレッセンス抑制のメカニズムが異なり，メタカオリンを添加すると自由アルカリ量が減少し，高炉スラグ微粉

末を添加すると C-A-S-H ゲルを形成することで細孔量と毛細管吸水が減少すると述べている．その上で，高炉スラグ微粉末を添加する場合には内部エフロレッセンスの結晶圧によってひび割れが生じるリスクがあるため，Al を多く含むメタカオリンなどを添加する方が望ましいと結論している．

以上，参照した既往の研究より，ジオポリマーのエフロレッセンスの原因と対策について下記のようにまとめることができる．

① ジオポリマーにおけるエフロレッセンスは，高湿度環境においてナトリウムが表面に溶出することで生じる．これは，ナトリウムが $Na(H_2O)_n$ の形態で弱く結合されているためである．

② 高温加熱によりジオポリマーを部分的に結晶化することはエフロレッセンスの抑制に効果的である．

③ 高炉スラグ微粉末の添加はエフロレッセンスを遅延させる効果がある．

④ アルミナの添加がエフロレッセンスの減少に効果的である可能性がある．

⑤シラン系含浸材の塗布は，ジオポリマーの白華やスケーリングによる劣化に対し有効である可能性がある．これは，ジオポリマーの表面に疎水性が付与されるためと考えられる．

⑥ 原料の Si/Al 比によってジオポリマーのエフロレッセンス特性は変化する．これは，N(C)-A-S-H ゲルの構造（細孔容積と細孔径）やアルカリ溶液の移動経路が変化するためと考えられる．

⑦ ジオポリマーに疎水性を付与する混和材の使用やメタカオリンの添加もエフロレッセンスの抑制に有効である．

参考文献

1) Temuujin J, van Riessen A: Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer. Journal of Hazardous Materials, Vol. 164, Issue 2-3, pp. 634-639, 2009
2) Skvara F, Kopecky L, Smilauer V, Bittnar Z: Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash, Vol. 168, Issue 2-3, pp. 711-720, 2009
3) Skvara F, Kopecky L, Myskova L, Smilauer VIT, Alberovska L, Vinsova L: Aluminosilicate polymers - Influence of elevated temperatures, efflorescence, Ceramics - Silikaty, Vol. 53, Issue 4, pp. 276-282, 2009
4) Allahverdi A, Kani EN, Yazdanipour M: Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement, Ceramics - Silikaty, Vol. 55, Issue 1, pp. 68-78, 2011
5) Kani EN, Allahverdi A, Provis JL: Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan, Cement and Concrete Composites, Vol. 34, Issue 1, pp. 25-33, 2012
6) Huang Y, Han M, Yi R: Microstructure and properties of fly ash-based geopolymeric material with 5A zeolite as a filler, Construction and Building Materials, Vol. 33, pp. 84-89, 2012
7) Zhang Z, Provis JL, Reid A, Wang H: Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence, Cement and Concrete Research, Vol. 64, pp. 30-41, 2014
8) Djobo YJN, Elimbi A, Dika Manga J, Djon Li Ndjock IB: Partial replacement of volcanic ash by bauxite and calcined oyster shell in the synthesis of volcanic ash-based geopolymers, Construction and Building Materials, Vol. 113, pp. 673-681, 2016
9) 一宮一夫，原田耕司，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーの部分吸水による表層劣化に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，pp. 2047-2052, 2017

10) Xue X, Liu Y, Dai J, Poon C, Zhang W, Zhang P: Inhibiting efflorescence formation on fly ash-based geopolymer via silane surface modification, Cement and Concrete Composites, Vol. 94, pp. 43-52, 2018
11) Wang Y, Liu X, Zhang W, Li Z, Zhang Y, Li Y, Ren Y: Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer, Journal of Cleaner Production, Vol. 244, 118852, 2020
12) Wu B, Ma X, Deng H, Li Y, Xiang Y, Zhu Y: An efficient approach for mitigation of efflorescence in fly ash-based geopolymer mortars under high-low humidity cycles, Construction and Building Materials, Vol. 317, 126159, 2022
13) Pasupathy K, Ramakrishnan S, Sanjayan J: Effect of hydrophobic surface-modified fine aggregates on efflorescence control in geopolymer, Cement and Concrete Composites, Vol. 126, 104337, 2022
14) Chindaprasirt P, Jitsangiam P, Rattanasak U: Hydrophobicity and efflorescence of lightweight fly ash geopolymer incorporated with calcium stearate, Journal of Cleaner Production, Vol. 364, 132449, 2022
15) Tan J, Cizer Ö, Vandevyvere B, De Vlieger J, Dan H, Li J: Efflorescence mitigation in construction and demolition waste (CDW) based geopolymer, Journal of Building Engineering, Vol. 58, 105001, 2022

（執筆者：尾上　幸造）

6.5 凍結融解作用

ジオポリマーの凍結融解作用に対する抵抗性に関する研究はポルトランドセメントコンクリートと比較して十分にデータが蓄積されているとは言い難く，統一した見解が出されていないのが現状である．

Zhao ら[1]は，フライアッシュ，メタカオリン，および高炉スラグ微粉末によって製造されるジオポリマーについて，既往の研究[2-7]に基づいた見解を示している．Zhao ら[1]によれば，おおよその傾向として，フライアッシュおよびメタカオリンをベースとする低カルシウムのジオポリマーの凍結融解に対する抵抗性は，高炉スラグ微粉末を主要材料とするアルカリ活性化材料のそれと比較して劣ると言及している．この傾向は，フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーの凍結融解抵抗性を向上させるためには Ca 系材料の添加が効果的であるとする南らの指摘[8]と一致するものである．

さらに Zhao ら[1]は自らの実験結果に基づき，カルシウム含有量が低いフライアッシュベースのジオポリマーコンクリートの凍結融解抵抗性は低いが，スラグ含有量を 10%から 50%に増加させることで，凍結融解抵抗性を大幅に改善できることを示した．このような実験結果が得られた理由として，低カルシウムのジオポリマーでは縮重合反応によって余剰となった水がマトリックス中に有害な細孔を形成することを指摘している．一方，高炉スラグ微粉末を混和すると，高炉スラグ微粉末から供給される Ca^{2+}の水和反応によって C-S-H や C-A-S-H が生成し，細孔が水和物によって充填されるとともに系内の水の一部が水和反応によって消費されるため，硬化体内部の空隙量が減少する．この機構により凍結融解抵抗性が改善すると考察している．

アルカリ刺激剤が凍結融解抵抗性に及ぼす影響について検討した事例としては南らの研究[9]が挙げられる．そこではケイ酸アルカリ溶液の Si/アルカリ比の制御が重要であることが言及されおり，具体には，Si/アルカリ比が 0.3 程度以下の場合に凍結融解抵抗性の向上効果が認められるとしている．このような傾向が得られた要因として，南ら[9]は飽和・乾燥課程におけるジオポリマーの水分移動特性に着目し，Si/アルカリ比の減少に伴う水分移動の抑制を凍結融解抵抗性が向上した原因の一つとして挙げている．

ジオポリマーの凍結融解抵抗性に及ぼす影響要因としては，空隙中の未反応物質の挙動や空隙中の mol 濃度の増加に伴う凍結点降下，さらに粘性の増加なども挙げられている[10]．一方，凍結融解抵抗性を改善するために繊維補強材の適用[例えば 11), 12)]や空気量に関する検討[例えば 6), 7)]を実施した事例もある．

なお，凍結融解抵抗性を向上させるためにカルシム含有量を多くすると，耐酸性等の他の作用に対する抵抗性が低下する場合がある．材料設計においては環境作用を明確にしたうえで要求性能を設定し，それを満足する配合を検討する必要があると言える．

参考文献

1) Renda Zhao, Yuan Yuan, Zhengqing Cheng, Tian Wen, Jian Li, Fuhai Li, Zhongguo John Ma：Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete, Construction and Building Materials, Vol.222, pp.474-483, 2019

2) Krivenko P.V.：Alkali cements: Structure, properties, aspects of durability, Proceedings of the Second International Conference on Alkali Cements and Concretes, 1999

3) Y. Fu, L. Cai, Y. Wu：Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, Construction and Building Materials, Vol.25, pp.3144-3148, 2011

4) J. Temuujin, A. Minjigmaa, B. Davaabal, U. Bayarzul, A. Ankhtuya, Ts. Jadambaa, K.J.D. MacKenzie：Utilization of radioactive high-calcium Mongolian fly ash for the preparation of

alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials, Ceramics International, Vol.40, No.10, pp.16475-16483, 2014

5) R. Slavik, V. Bednarik, M. Vondruska, A. Nemec：Preparation of geopolymer from fluidized bed combustion bottom ash, Journal of Materials Processing Technology, Vol.200, pp.265-270, 2008

6) P.J. Sun, H.C. Wu：Chemical and freeze-thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars, Fuel, Vol.111, pp.740-745, 2013

7) R. Brooks, M. Bahadory, F. Tovia, H. Rostami：Properties of alkali-activated fly ash: high performance to lightweight, International Journal of Sustainable Engineering, Vol.3, No.3, pp.211-218, 2010

8) 南浩輔ほか：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1，pp.1957-1962，2013

9) 南浩輔ほか:ケイ酸アルカリ溶液中のケイ素／アルカリ比がジオポリマーコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2331-2236，2016

10) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会，2017

11) Yuan Yuan, Rend Zhao, Rui Li, Yongbao Wang, Zhengqing Cheng, Fuhai Li, Zhongguo John Ma：Frost resistance of fiber-reinforced blended slag and Class F fly ash-based geopolymer concrete under the coupling effect of freeze-thaw cycling and axial compressive loading, Construction and Building Materials, Vol.250, 118831, 2020

12) Faping Li, Defeng Chen, Yiyan Lu, Haojun Zhang, Shan Li：Influence of mixed fibers on fly ash based geopolymer resistance against freeze-thaw cycles, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol.584, 121517, 2022

（執筆者：皆川　浩）

6.6 硫酸塩

ジオポリマーの硫酸塩抵抗性に関して，国外では次のような報告がある．J.L.Provis[1)]らは，ジオポリマーの硫酸塩抵抗性に関する実験と文献調査をまとめ，以下のように報告している．

メタカオリンとフライアッシュを併用したジオポリマーは，硫酸塩や海水による侵食に対し，優れた抵抗性を有する．一般に，ポルトランドセメントを用いたモルタルやコンクリートは，硫酸塩によって石膏やエトリンガイトを生成して膨張する．ジオポリマーの原料中にカルシウムを含まない場合，ジオポリマーの反応生成物と硫酸塩は反応せず，石膏やエトリンガイトを生成しないため，ジオポリマーは硫酸塩により侵食されない．Palomo ら[2)]によれば，アルカリ刺激により硬化させたメタカオリン系ジオポリマーは，純水，人工海水，硫酸ナトリウム水溶液，硫酸に対して優れた安定性を有すると報告している．Bakharev[3)]によれば，アルカリ刺激により硬化させたフライアッシュ系ジオポリマーは，硫酸ナトリウム 5%溶液，硫酸マグネシウム 5%溶液および硫酸ナトリウムと硫酸マグネシウムの混合溶液に対する抵抗性も良好であると報告している．Fernandez-Jimenez ら[4)]によれば，ジオポリマーを大気，水，4.4%硫酸ナトリウム溶液，人工海水に浸漬しても，ジオポリマーが直ちに劣化する訳ではないと報告している．Li ら[5)]によれば，メタカオリン系ジオポリマーおよび普通セメントモルタルを硫酸ナトリウム溶液に浸漬した際，メタカオリン系ジオポリマーは，わずかに収縮するが，普通セメントモルタルは著しく膨張すると報告している．

国内研究では，深野ら[6)]がフライアッシュⅡ種をベースとしたジオポリマーモルタルを 10%硫酸ナトリウム水溶液に浸漬させた場合に，質量および外観に変化がみられないことを確認している．日本では，温泉地などが多くありセメントコンクリートの劣化が顕著な事例が多くあることから，硫酸塩に対して抵抗性のあるジオポリマーを適用することは有効な一方策であると考えられる．

参考文献

1) Provis, J.L. and Deventer, J.S.J.:Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp.168-171
2) Palomo, A., et al.: Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin’ Cem. Concr. Res., vol.29, pp.997-1004, 1999
3) Bakharev, T.: Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions’, Cem. Concr. Res., vol.35, pp.1233-1246, 2005
4) Fernandez-Jimenez, A., et al.: Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials’, J. Materials Science vol.42, pp.3055-3065, 2007
5) Li, K.L., et al.: ‘Early Mechanical Property and Durability of Geopolymer, Geopolymer 2005, Proceedings, pp.117-120, 2005
6) 深野雄三ら:ジオポリマーモルタルの化学的侵食に対する抵抗性,土木構造･材料論文集,Vol.32,pp.151-158, 2017

（執筆者：熊谷　慎祐）

6.7　塩化物

ジオポリマーの塩化物浸透抵抗性は，使用する活性フィラーの種類や割合，アルカリ溶液の種類や濃度および養生条件などに依存する．また，一般のセメントコンクリートに比べて，ジオポリマーでは内部に微細な空隙が形成されやすいため[1]，塩化物イオンなどの物質透過性が高くなることが考えられる．

塩害環境下に 2 年間暴露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの結果[2]をみると，コンクリート表面付近の塩化物イオン濃度は小さいが，深さ方向における塩化物イオンの濃度勾配が小さく，ジオポリマーコンクリートは塩化物イオンを内部に浸透しやすい特性を有していることが示されている（**図 6.7.1**）．また，この現象はジオポリマーの高い吸水性や細孔容積が大きく関係し，コンクリート表面に供給された塩化物イオンは，移流現象によって内部に急速に移動している可能性が示唆されている（**図 6.7.2**，**図 6.7.3**）．

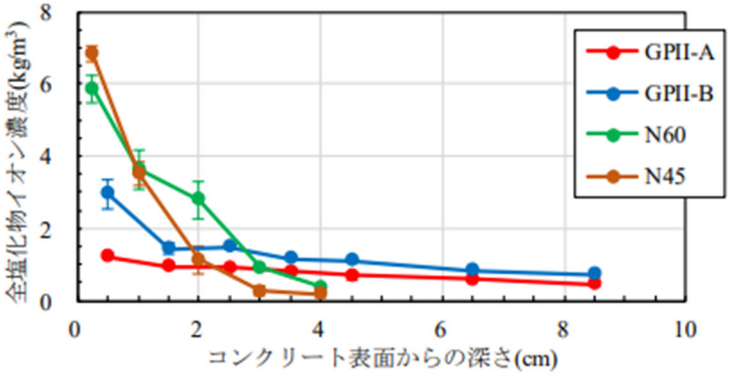


図 6.7.1　塩化物イオン濃度分布[2]

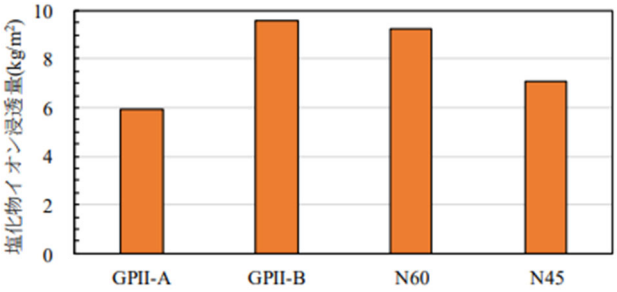


図 6.7.2　塩化物イオン浸透量算出結果[2]

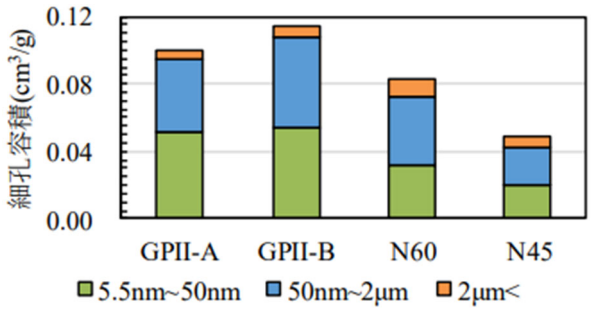


図 6.7.3　細孔容積測定結果（2 年時点）[2]

塩化物イオンの浸透性は他の文献でも報告されており，一宮ら[3]は電気泳動試験でジオポリマーモルタルの塩化物イオン拡散係数を調べている．これによると，ジオポリマーモルタルの塩化物拡散係数は OPC モルタルの 10 倍以上の値で，BS10 と BS20 は 30～35 ㎝^{2}/年，BS30 はその半分程度の値であると報告されている（**図 6.7.4**）．また，ジオポリマーの前養生や蒸気養生温度の影響は BS 置換率と比べて小さいとされている．

花岡ら[4]は，ジオポリマーモルタルの塩分浸透深さについて調べ，BFS0%置換の場合は，暴露期間 28 日から 91 日にかけて塩分が 40㎜ 近く深部にまで浸透しているが，BFS を置換した配合では，暴露 28 日以降，塩分浸透深さがほとんど変化しておらず，塩分の拡散（浸透）が停滞している結果を示している（**図 6.7.5**）．また，塩分浸透深さは BFS 置換率の増加に伴い，指数関数的に小さくことが示されている．これらの結果は，李ら[5]および原田ら[6]の研究で報告されているように，BFS の置換により細孔空隙量が少なくなり，塩化物イオンの拡散係数が小さくなったためと考えられる．

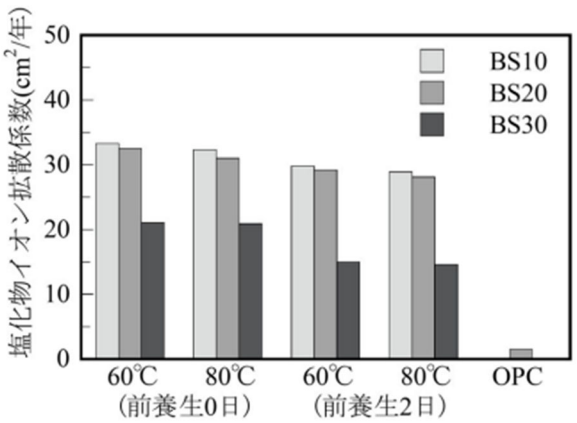


図 6.7.4　蒸気養生温度，前養生日数，BS 置換率ごとの塩化物イオン拡散係数[3]

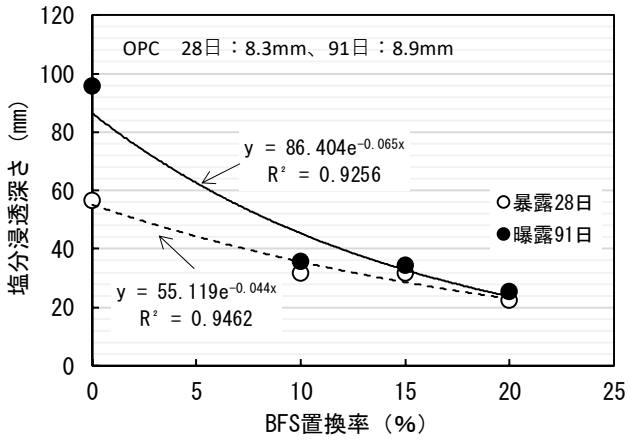


図 6.7.5　BFS 置換率と塩分浸透深さの関係[4]

高炉スラグによる塩化物イオンの浸透抑制効果は，李ら[5]の研究によると，高炉スラグ微粉末，溶銑予備処理スラグ，無水石膏を組み合わせたスラグ基盤ジオポリマーコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を検討した結果，スラグ置換率が増加するにしたがって，顕著な拡散係数の低減効果が認められることを報告している．**図 6.7.6** のように，スラグ置換率（0，40，70，100%）に応じた細孔空隙量と塩化物イオン拡散係数から，40%程度ではフリーデル氏塩による化学的固定化作用が，70%以上では微細空隙構造の静電気的固定作用がそれぞれ高まることで，塩化物イオンの高い拡散抑制効果が得られると推察している．

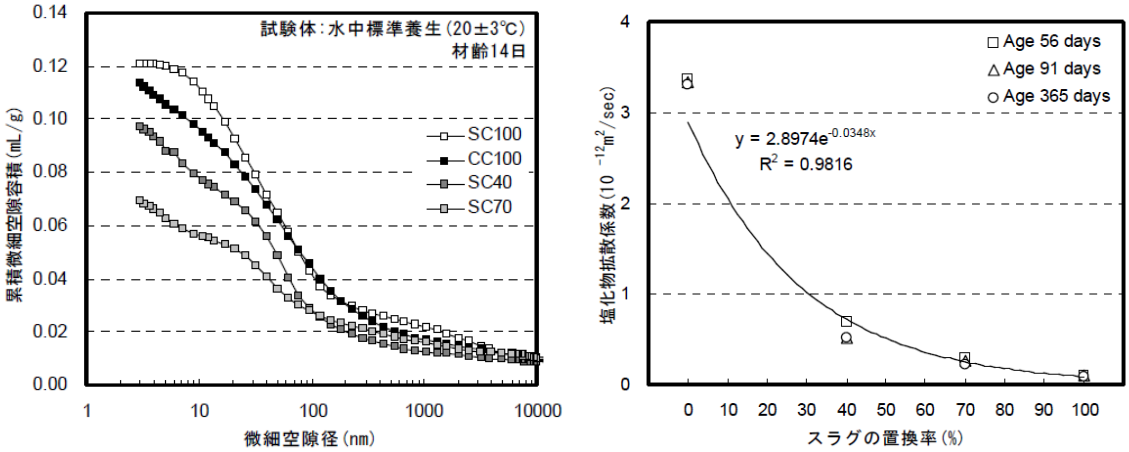


図 6.7.6　スラグ基盤ジオポリマーコンクリートの細孔空隙量と塩化物イオン拡散係数[5]

佐藤ら[7]によると，A/W 比が大きい場合に塩分浸透が抑制されることや，A/W や BS 置換率の影響程大きくはないが，Si/A が高いほど塩分浸透が大きくなり，その結果は総細孔容積と一致することが報告されている（**表 6.7.1，表 6.7.2，図 6.7.7～図 6.7.9**）．

表 6.7.1　溶解法及び一般法で作製した GP モルタルの配合[7]

試番	配合条件				単位量（kg/m³）							Al wt.%	圧縮強度 MPa
	A/W	Si/A	水量 kg/m³	BS vol%	FA	BS	S	AS	ASS	SF	GNa		
M1	0.20	0.15	199	35.5	400	267	1334	289	0	21	13	0	119
M2	0.20	0.15	199	35.5	400	267	1334	289	0	21	13	1.2	119
M3	0.20	0.15	199	35.5	400	267	1334	289	0	21	13	2.4	122
M4	0.20	0.25	199	35.5	399	266	1330	287	0	34	13	0	120
M5	0.20	0.25	199	35.5	399	266	1330	287	0	34	13	1.2	116
M6	0.20	0.25	199	35.5	399	266	1330	287	0	34	13	2.4	109
M7	0.20	0.35	199	35.5	397	265	1324	286	0	47	13	0	119
M8	0.20	0.35	199	35.5	397	265	1324	286	0	47	13	1.2	111
M9	0.20	0.35	199	35.5	397	265	1324	286	0	47	13	2.4	111
M10	0.20	0.25	199	35.5	428	285	1427	0	243	0	14	0	120
M11	0.20	0.25	199	35.5	428	285	1427	0	243	0	14	1.2	117
M12	0.20	0.25	199	35.5	428	285	1427	0	243	0	14	2.4	111

試番 M1-9：溶解法，試番 M10-12：一般法，GNa：グルコン酸 Na，AS：市販 NaOH+純水（溶解法），ASS：市販 NaOH+JIS1 号水ガラス+純水（一般法），S：細骨材（密度 2.60g/cm³），A1：亜硝酸 Na
鉄筋腐食試験用試験体は上記配合に 2.4kg/m³ の Cl 量となるよう NaCl を添加した。

表 6.7.2　一般法で作製した GP コンクリートの配合 [7)]

試番	配合条件				単位量 kg/m³							強度 MPa	
	A/W	S/A	水量 kg/m³	BS vol.%	FA	BS	S	G	ASS	A2	A3	圧縮	引張
C1	0.10	0.30	139	20	335	101	757	892	193	8.71	0.52	41	1.8
C2	0.15	0.30	133	0	418	0	757	892	209	8.37	0.75	29	1.9
C3	0.15	0.30	133	20	335	101	757	892	209	8.71	0.50	62	3.0
C4	0.15	0.30	133	30	293	151	757	892	209	8.88	0.43	79	4.0
C5	0.20	0.30	127	20	335	101	757	892	224	8.71	0.35	78	4.4
C6	0.15	0.15	133	20	333	101	762	890	202	8.70	0.45	66	4.6
C7	0.15	0.25	132	20	333	101	762	890	206	8.70	0.45	63	3.7
C8	0.15	0.35	131	20	333	101	762	890	210	8.70	0.54	69	3.8
C9	0.20	0.15	128	20	333	101	762	890	216	8.70	0.64	78	5.1

FA:フライアッシュ,BS:高炉スラグ，S:細骨材
G:粗骨材，GNa:グルコン酸 Na
AS:48%KOH 溶液+JIS3 号水ガラス+純水，
A2:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系)，
A3:助剤
鉄筋腐食試験用試験体は上記配合に 2.4kg/m³ の Cl 量となるよう NaCl を添加した。

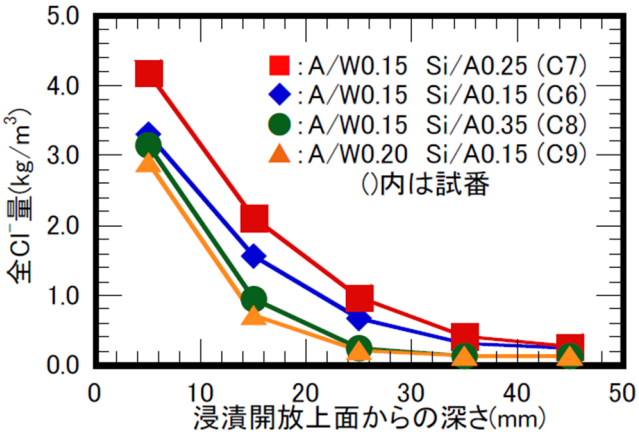


図 6.7.7　GP コンクリートの塩水浸漬試験結果 [7)]

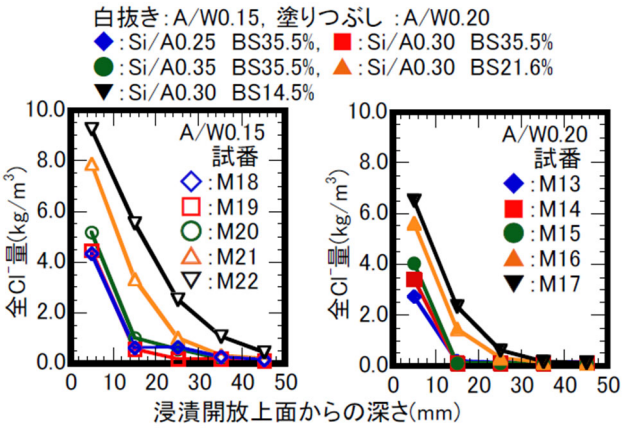


図 6.7.8　GP モルタルの塩水浸漬試験結果 [7)]

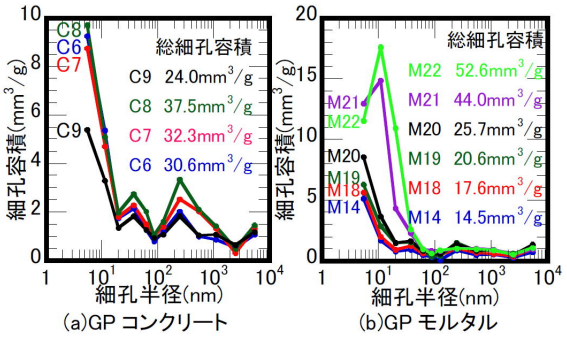


図 6.7.9　細孔径分布測定結果 [7)]

星加ら[8]は，ジオポリマーの性質に及ぼす塩素の影響と塩素固定率について考察している．これによると，塩素量が多くなるとジオポリマーの凝結が遅くなる．また，使用材料中の塩素量の増加に伴って，常温・加温養生ともに高炉スラグ微粉末を添加したジオポリマーモルタルの圧縮強度が減少するが，フライアッシュのみを使ったジオポリマーモルタルの圧縮強度が増加することを明らかした．なお，ジオポリマーコンクリートの塩素固定率が 70%以上であるが，マトリックスゲルの塩素固定量に限界があるため，塩素量が多いほど，固定率が低いと指摘している．一方，海水の使用で塩化物量を増加することによって，ジオポリマーの放射性元素 Sr， Cs の固定率は高くなり，尚且つその固定は長期的に安定になることが Li ら[9]に報告されている．

高炉スラグ微粉末を使用することやアルカリ濃度を高めることで，塩化物イオンの浸透を抑制できる点では，多くの研究結果は一致している．その一方で，高炉スラグやフライアッシュの反応により生成する C-A-S-H や N-A-S-H による物質移動抵抗性の違いや物質移動のメカニズム（拡散，移流），塩素の固定化など，まだ十分に明らかになっていない点も多く，今後の検討が望まれる．

参考文献

1) 一宮一夫ほか：フライアッシュ系ジオポリマーの部分給水と表層の変状の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1810-1815，2020
2) 榮徳雄斗ほか：塩害環境下に 2 年間曝露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1367-1368，2021
3) 一宮一夫ほか：ジオポリマー中の鉄筋腐食性評価に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1084-1089，2022
4) 花岡大伸ほか:ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価,コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1361-1366，2021
5) 李俌暻ほか：スラグ基盤ジオポリマーコンクリートの強度発現特性と耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp. 229-234，2015
6) 原田耕司ほか：ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2236-2241，2014.7
7) 佐藤隆恒ほか：ジオポリマー硬化体の種々の配合，作製法における生成物と pH 等諸性質との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016
8) 星加友哉， 李柱国， 池田攻: 海砂を用いたジオポリマー硬化体の性能と塩素固定率に関する実験的研究，2018 年度日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.42，pp.9-12，2019.3
9) Z. Li, M. Nagashima, K. Ikeda: Treatment technology of hazardous water contaminated with radioisotopes with paper sludge ash-based geopolymer ― Stabilization of immobilization of strontium and cesium by mixing seawater, Materials, Vol.11, No.1521, pp.1-21, 2018.

（執筆者：花岡　大伸，佐川　康貴，一宮　一夫）

6.8 化学物質の影響

種々の化学物質がコンクリートに及ぼす影響についてはかねてより多くの研究成果が報告されている．普通ポルトランドセメントコンクリートが化学物質によって受ける劣化についてみると，

①腐食性炭酸による劣化

②酸類による劣化

③動植物油による劣化

④腐食性ガスによる劣化

⑤強アルカリによる劣化

などが挙げられる．

①腐食性炭酸による劣化では，上水施設や下水処理場のエアレーションタンクにおいて，セメント硬化体が溶解，溶出して骨材が露出する現象が報告されている．

②酸類による劣化では，(a)強酸と弱酸による劣化度の相違，(b)コンクリートの劣化機構などの解明がなされている．

③動植物油による劣化では，脂肪酸がコンクリート中の水酸化カルシウムをはじめとするアルカリ性物質と反応し，硬化体が分解されることが報告されている．

④腐食性ガスによる劣化では，亜硫酸ガス(SO_3)，硫化水素(H_2S)，塩化水素(HCl)，フッ化水素(HF)，一酸化窒素(NO)などの気体が原因となる．

⑤強アルカリによる劣化では，炭酸ナトリウムやアルカリ性が極めて高い水酸化カルシウムがコンクリートを劣化させる[1)]．

上記とは異なる劣化として，硫酸塩侵食が挙げられる．硫酸塩侵食は，主としてセメント系材料が土壌や汚染水中の硫酸塩溶液に曝露されることで生じる．OPC では，硫酸塩によって強度低下，膨張，表層剥離，組織崩壊を生じる．一方，Inorganic Polymer Concrete (IPC)では，OPC と比較してカルシウム相が極めて少ないことから，硫酸塩や塩水に対して極めて高い抵抗性を有することが報告されている．

Bakharev らの研究[2)]では，濃度 5%の硫酸ナトリウム，濃度 5%の硫酸マグネシウム，両者の混合溶液の 3 種類の溶液に 5 ヶ月間 FA ベースの GP ペーストを浸漬し，質量変化，圧縮強度，劣化生成物，微細構造変化により劣化度を評価した．

その結果として，圧縮強度は，中性の硫酸ナトリウム溶液への浸漬の場合は，8FASS が 18%，8FAK が 65%減少した．それに対して，弱酸性の硫酸マグネシウム溶液への浸漬では，8FA と 8FAK がそれぞれ 12%と 35%増加した．最も大きな変化は，硫酸ナトリウムで生じており，溶出が原因である．硫酸マグネシウム溶液では，アルカリの溶液への移動とマグネシウムとカルシウムの供試体表層下への拡散が，ケイ酸ナトリウムおよび水酸化ナトリウムと水酸化カリウムの混合溶液で製作した供試体で観察された．5%硫酸ナトリウムと 5%硫酸マグネシウムの混合溶液に浸漬した場合が最も変化が小さく，安定したアルミノケイ酸塩ポリマー構造を形成する水酸化ナトリウムで製作した供試体で最高の結果を示した．

一方で，海水や硫酸ナトリウム水溶液，硫酸マグネシウム水溶液等に浸漬させた場合，ジオポリマーでは組織内の Si/Al によって生成される結晶・非結晶相の特徴が異なることで，各種イオンの浸透速度が変化する．また，結晶相の割合等の相違によって，強度特性にも影響すると考えられている．このように，侵入する各種イオンは，わずかではあるが GP の材料特性に影響するケースがあるとみられている．おそらく各種侵入イオンは，シリケート層の崩壊に直接的に関連してはいないと考えられる．少なくとも経時的な組織の緻

密化を妨げないことから，強度が安定もしくは増加していると考えられる．

同様の研究は，Fernandez-Jimenez ら[3]も実施している．曝露環境は，気中，水中，4.4%の硫酸ナトリウム水溶液，ASTM 海水とし，同環境下に浸漬した場合，劣化は確認されず，強度の増加が確認された．いずれの浸漬条件でも，若材齢で強度の顕著な変化がみられている．浸漬期間が経過すると供試体環境が安定するとみられ，強度の変動は顕著ではなくなる傾向がみられる．このような現象の原因について，複数の研究者が様々な考察を行っているが，明確な要因は現在のところ不明である．

Palomo ら[4]は，多種の曝露環境でアルカリ刺激メタカオリン材料が高い耐食性を示すと述べている．曝露環境は，脱イオン水，ASTM 規格塩水，4.4wt%硫酸ナトリウム溶液水，0.001M 硫酸とした．前述の浸漬環境下では，強度低下や硬化体組織(微小領域)への影響はほとんど確認されなかった．ただし，一部の供試体では，材齢 7 日と 3 ヶ月の間で，溶解が原因とみられる強度の変動が確認されている．前述の現象は，明らかに材料特性の低下に影響するものと考えられる．非晶質アルミノシリケート相の結晶相への変化は，養生中の耐久性向上に寄与している可能性が考えられる．

以上に示した複数の研究成果より，フライアッシュ系のアルカリ刺激材料は，硫酸イオンと海水に浸漬された場合に十分な耐食性を示している．なお，一部の供試体では，硫酸ナトリウムが確認されているが，マトリクスの崩壊により生じたというよりも，連続的な細孔組織を通過した硫酸イオンが内部へ移動することで生じた拡散によるものと考えられる．ここで，ジオポリマー中には大量の Na が存在することから，硫酸塩は硫酸ナトリウムとなって，マトリクスの空隙などに沈殿，充填される．海水浸漬の供試体でも，マトリクス中に Mg が浸透していく現象が確認された．Mg イオンはジオポリマー中の Na イオンとのイオン交換によって，ジオポリマー中へと浸透すると考えられる．ただし，このような浸透現象は，散発的であり，機械強度特性への深刻な影響はないと考えられる．

一連の耐久性の試験でみられる特性の相違は，Si/Al の相違に起因するジオポリマーの組織構造の相違によるものとみられる．珪酸ソーダ等をはじめとする溶液中の可溶性シリカは，アルカリ性ケイ素アルミン酸塩結晶量を減少させ，結晶化の遅延をもたらす．さらにシリカゲルを大量に有するシリケート相は，よりミクロな組織構造に影響する．これによって，水酸化ナトリウムよりも硫酸ナトリウムに浸漬させたジオポリマーモルタルのほうが高強度であることを説明づけることができる．

Li ら[5]は，0.31M の硫酸ナトリウムに浸漬させたジオポリマーの角柱モルタルで，わずかながら収縮の進展がみられたことを報告している．なお，OPC モルタルでは，同環境下で顕著な膨張を示した．

OPC のコンクリートやモルタルで硫酸塩侵食が発生すると,膨張性のエトリンガイトや石こうが生成される．硫酸イオンは，コンクリート中に侵入し，$Ca(OH)_2$と反応することで石こうを生じる．また硫酸イオンによって，モノサルファアルミネートがエトリンガイトへと変質する．このエトリンガイトは湿分を吸収してマトリクスの局所破壊を引き起こす．マクロな観点からみると，ひび割れの発生や剥離を引き起こす．一方，ジオポリマーでは，水酸化カルシウムやモノサルファアルミネートの生成量が少なく，石こうやエトリンガイトを生成しにくい．このようなメカニズムにより，ジオポリマーは硫酸イオンに対する高い抵抗性を有することが知られている．

Baščarevic’ら[6]は，6M の硝酸アンモニウムに FA 系 GP を 540 日間浸漬させて劣化状況を調べた．硝酸アンモニウムに関する劣化は，肥料工場において，農業関連の土壌経由の酸性水と接触するサイロやコンクリート構造物に深刻な被害を与える．実験の結果，試験開始から 28 日までに大きな変化を生じ，圧縮強度の低下，GP からのアルカリおよびアルカリ土類陽イオンの溶出，アルミナシリカゲル中の-Si-O-Al-相の破壊，構造欠陥の修復の順で進行すると報告している．

なお，アルカリ溶液に供試体を浸漬した実験の例は極めて少ないが，末松ら[7]は，FA ベースで BS を 10，20%置換（質量比）したモルタルを飽和水酸化カルシウム溶液($Ca(OH)_2$)に浸漬させ，アルカリ環境下での GP の劣化の有無を調べるために，浸漬日数 60 日までの質量および外観の変化を観察した．その結果，質量，外観ともに変化は見られなかった．

化学物質とは多少異なるもののセメントコンクリートの耐久性低下の要因になりうる物質として砂糖（糖質）が挙げられる．上原ら[8]は，左官用ジオポリマー（GP）モルタルの各配合における糖分の添加，養生初期からの糖分を含む溶液への浸漬及び養生温度の影響を検討した．その結果，糖分の添加により，やや硬化が遅くなり，特に低温でその傾向が大きかったが，一般的なセメント（NP）モルタルと比較すると，硬化遅延の影響や圧縮強度の低下は非常に少なく，高い耐糖性を有することを示した．また，ジオポリマーとセメントモルタルのそれぞれを糖分へ曝露したところ，セメントモルタルでは強度発現が阻害され，Ca，Si，Al 成分が溶脱した．一方，ジオポリマーモルタルでは圧縮強度の変化がほとんど見られないことに加え，各種成分の糖分による溶脱も認められなかった．

参考文献

1) 小林一輔ほか：図解コンクリート事典，pp.26-27，オーム社
2) Bakharev，T.：Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions’，Cem. Concr. Res.，vol.35，pp.1233-1246，2005
3) Fernandez-Jimenez，A.，et al：Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials’，J. Materials Science vol.42，pp.3055-3065，2007
4) Palomo，A.，et al：Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin’ Cem. Concr. Res.，vol.29，pp.997-1004，1999
5) Li，K.L.，et al：‘Early Mechanical Property and Durability of Geopolymer，Geopolymer 2005，Proceedings，pp.117-120，2005
6) Z. Bašc̆arevic’,Effects of the concentrated NH4NO3 solution on mechanical properties and structure of the fly ash based geopolymers，Construction and Building Materials 41 pp.570-579,2013
7) 末松亮平ほか：ジオポリマーモルタルの耐硫酸性・耐アルカリ性の検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-058，2013.9
8) 上原元樹ほか：左官用ジオポリマーモルタルの硬化性状：養生温度と糖分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1325-1330，2021

（執筆者　合田　寛基）

6.9 ひび割れ

一般的なコンクリートに生じるひび割れの原因については，以下のような分類がなされ，補修・補強方法なども含め，既に整備が行われている[1)]．

(A) 材料：セメントの異常凝結，コンクリートの乾燥収縮，アルカリ骨材反応など

(B) 施工：不適当な打設・締固め・打継ぎ，鉄筋のかぶり不足，型枠からの漏水など

(C) 使用環境：酸・塩類の化学作用，火災，凍結融解，部材両面の温湿度差など

(D) 構造・外力：設計荷重を超える長期的な荷重，構造物の不同沈下など

ジオポリマーコンクリートについても，一般的なコンクリートの分類に近い形で整理できると思われるが，ひび割れに着目した研究は少なく，その整理は進んでいない．また，ジオポリマーのひび割れに関する研究では，耐久性評価などにおいて確認されたひび割れや，補修材料などに関するいくつかの報告がある．

Nawaz ら[2)]は，ジオポリマーのペースト，モルタル，コンクリートは脆く，ひび割れしやすいものが多いと指摘し，アルカリ溶液の濃度や Na/Si，Si/Al などのモル比の調整などが必要であると述べている．

ジオポリマーコンクリートを用いた検討では，Lee ら[3)]が，フライアッシュと高炉スラグ微粉末（活性フィラーの 10～30%を置換）を併用した供試体を作製し，気中養生した結果，高炉スラグを 30%使用した条件のみ，収縮によるひび割れが表面に発生したと報告している．また，河尻ら[4)]は，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，シリカフュームの活性フィラーと，水ガラス 1 号の 2 倍希釈溶液を用い，20℃で気中養生したコンクリートには，材齢 1 日で表面にひび割れが生じることを示した．その原因については，ジオポリマー溶液の増量に伴う収縮の増大と粗骨材の拘束によって生じたと推察している．

ジオポリマーモルタルを用いた検討では，合田ら[5)]が，フライアッシュ（Ⅱ種）に高炉スラグ微粉末を添加した活性フィラーと，水ガラス 1 号に水酸化ナトリウム水溶液を混合したジオポリマー溶液から供試体を作製し，化学的浸食について評価している．実験では，pH=0.3 の硫酸および塩酸と，この硫酸と同一モル数の硫酸イオンを有する硫酸ナトリウム水溶液の 3 種類を用い，供試体を 8 週間浸漬した．その結果，硫酸ナトリウム水溶液に浸漬した供試体には顕著な変化が認められなかった．塩酸と硫酸の条件では，0.5㎜ 以下のひび割れが生じ，特に，硫酸を用いた場合には，二水石こうの生成によると思われる小径のポップアウトの発生が確認された．

一宮ら[6)]は，フライアッシュ（Ⅰ種）と高炉スラグ微粉末からなる活性フィラーと，水ガラスに水酸化ナトリウム水溶液を混合したジオポリマー溶液から作製したジオポリマーの高温抵抗性に関する評価を行い，1150℃で加熱すると供試体に膨張ひび割れが発生することを確認している．ひび割れが発生した原因については，フライアッシュに含有する未燃カーボンや，高炉スラグに含有する硫黄の影響によると推察している．

上原ら[7)]は，ジオポリマーモルタルを左官材料として常温で利用する検討を行っている．実験では，フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーに用い，アルカリ溶液として水酸化ナトリウムと水酸化カリウムを選定し，それらの性状などについて比較した．その結果，水酸化カリウムを用いた場合には，ジオポリマーモルタルの粘性が低くなり，作業性は良好となるが，硬化速度が遅く，下地処理の影響を受けやすいなど，ひび割れが生じやすくなると指摘している．

また近年，ジオポリマーのひび割れに関する取り組みとして，ジオポリマーをひび割れ補修材として活用する研究[8),9)]，バイオ技術を活用した自己治癒コンクリート[10)]，画像処理や機械学習を活用したひび割れの検出[11)]など，様々な研究が進められている．

参考文献

1) 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013-, 2013

2) Mohsin Nawaz, Ana Heitor, Muttucumaru Sivakumar: Geopolymers in construction - recent developments, Construction and Building Materials, Vol.260, pp.1-21, 2020

3) N.K.Lee, H. K. Lee : Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature, Construction and Building Materials , 47, pp.1201-1209, 2013

4) 河尻留奈, 国枝稔, 上田尚史, 中村光 : ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011

5) 合田寛基, 原田耕司, 津郷俊二, 日比野誠 : フライアッシュⅡ種を用いたジオポリマーの材料特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No,1, pp.1993-1998, 2015

6) 一宮一夫, 原田耕司, 池田攻, 津郷俊二 : フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2230-2235, 2014

7) 上原元樹, 佐藤隆恒, 小坂征雄,山口正廣 : 常温養生カリウム(K)型ジオポリマー左官用モルタルの調製と諸特性, コンクリート工学年次論文集, No.42, No.1, pp.1780-1785, 2020

8) 五百蔵沙耶, ポンマハーサイ パラミ, 水野敏行, 畑中重光 : ジオポリマーをひび割れ注入性能に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1337-1342, 2021

9) 岩間祐樹, 李 柱国:パーライト粉末を用いたジオポリマー系補修材に関する研究 その2 補修材の性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.109-110, 2019

10) B. Y. Polat, M. Uysal: Bacterial crack healing in metakaolin based geopolymer mortars, Journal of Building Engineering, pp.1-16, 39, 2021

11) Aravind N., Nagajothi S., Elavenil S.: Machine learning model for predicting the crack detection and pattern recognition of geopolymer concrete beams, Construction and Building Materials, 297, pp.1-13, 2021

（執筆者：前川　明弘）

6.10 摩耗

ジオポリマーコンクリートは，普通ポルトランドセメント(OPC)を使用した一般的なコンクリートと比べて硬化するための反応機構が異なるため，反応により生成する物質も事なる．そのために，耐火性，耐酸性や放射性物質の固定化など一般的な OPC 使用コンクリートにはない性能を期待した研究は数多く行われている．

一方で，ジオポリマーの耐摩耗性に着目した検討は，日本国内においてはほとんど行われていないが，海外においてはいくつかの耐摩耗性に関する検討が行われており，摩耗に対する抵抗性が高い結果が報告されている．

Ramujee ら[1)]は，活性フィラーにフライアッシュ，アルカリ溶液に水ガラスと苛性ソーダを併用した圧縮強度の異なるジオポリマー作成し，それぞれ同等の強度域にある OPC を使用したコンクリートと耐摩耗特性を比較している．ASTM C-1138-1997 に準じて行った試験において，ジオポリマーのすりへり深さが OPC コンクリートのそれと比較して約半分程度であったことを報告している．

Sharma[2)]は，フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートについて養生温度を変化させた硬化体のすり減り深さの違いを検討している．25℃で 120 時間養生した試験体のすり減り深さが 3.0mm であったのに対して，40℃，60℃，80℃で 72 時間養生した試験体では，それぞれ 3.0mm，2.6mm，2.6mm となり，養生温度が高くなるほど耐摩耗性が向上する結果を示している．

また Vaz ら[3)]は，フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーの舗装ブロックへの適用を検討している．その中で IS15658:2006 に準拠した材齢 28 日における摩耗深さが，OPC コンクリートで 2.1mm であったのに対し，ジオポリマーコンクリートでは 1.75～1.85mm となり，耐摩耗性が高くなる結果を示している．また，その傾向は，苛性ソーダの濃度が高いほどその効果は高くなっている．

オーストラリアの新空港建設にジオポリマーが適用された理由の一つに耐摩耗性の高さが挙げられていること[4)]からも，今後，日本国内においてジオポリマーの適用検討が進んでいく中で，耐摩耗性に対しても着目され，その効果が明確になっていくことが期待される．

参考文献

1) Kolli Ramujee, M. Potharaju: Permeability and abrasion resistance of geopolymer concrete, Indian Concrete Journal, Volume 88, No.12, pp.34-43, 2012
2) Shalika Sharma : Abrasion Resistance of Geopolymer Concrete with the Change in Curing Time and Curing Temperature, International Journal of Computational Engineering Research, Volume 05, Issue 12, pp.20-23, 2015
3) A. Darius Vaz et al.; Geopolymer Paver Blocks, Proceeding of International Conference on Advances in Civil Engineering 2012, pp.173-178, 2012
4) T. Glasby et al.: EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport, Concrete 2015 Conference, Melbourne Australia 2015

（執筆者：杉山　知巳）

6.11 高温の影響

6.11.1 一般的特性

一般にポルトランドセメントを使用したコンクリートは 500℃に達すると水酸化カルシウムや C-S-H の脱水分解が生じ，強度やヤング係数が急激に低下することが知られている [1)]．一方，ジオポリマーは高温における脱水量が少ないなどの理由から，ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較して高い耐熱性を持つことが期待されている．

ジオポリマーの耐熱性に関しては Provis ら [2)]に 2009 年時点までの情報が整理されている．多くの研究を引用しながら，ジオポリマーはセメントコンクリートよりも耐熱性に優れるが単位水量や Na シリケートの増加とともに耐熱性が低下すること,Na シリケートよりも K シリケートを使用するほうが耐熱性に優れること，メタカオリンのほうがフライアッシュよりも耐熱性が高いことなどが解説されている．ジオポリマーの加熱により生じる現象としては，600℃以下の水和物の脱水だけでなく，高温におけるアルミノシリケートゲルの溶解と長石類の生成反応がある．文献 [2)]では，600℃程度を超える高温ではこの影響が大きく，ゲルの組成，アルカリ量や不純物の混入によりアルミノシリケートゲルの融点や生成する長石の性質が変化すること，さらに，脱水や溶融，結晶化の両過程で体積膨張もしくは収縮が生じることが解説されている．このように，高温におけるジオポリマーの物理的・化学的挙動は非常に複雑なものとなることがわかる．

これ以降の研究として，一宮ら [3)]は，フライアッシュに様々な割合で高炉スラグ微粉末を置換し，アルカリ溶液として Na 系水ガラスと苛性ソーダ(NaOH)を使用したジオポリマーモルタルについて 500,800,1150℃で 2 時間の加熱試験を行い，OPC のモルタルと比較した．その結果，加熱後の質量減少率は，OPC モルタルでは加熱温度が高くなるほど大きくなるがジオポリマーでは 500℃以上ではほとんど変化しないことや，高炉スラグ微粉末の混和量が増加するほど大きくなることを示した．また，加熱後のヤング率はジオポリマーも OPC も加熱温度に伴い直線的に低下するが，圧縮強度や引張強度の残存率（加熱前に対する加熱後の割合）は 500℃までであればジオポリマーのほうが OPC よりも大きいことを示した．ただし，800℃以上ではジオポリマーも強度の残存率は小さくなった．これは，TG-DTA の挙動から，組織の一部が溶融して空隙の多い組織になったためと考察されている．

フライアッシュに高炉スラグを添加すると耐熱性が低下することが指摘されている．八代ら [4)]はフライアッシュ 100%のジオポリマーおよび，フライアッシュの 20%を高炉スラグで置換したジオポリマーを 1000℃まで加熱して強度を測定した．アルカリ溶液には 12mol/L の NaOH 水溶液を用いた．その結果，セメントモルタルおよび高炉スラグ 20%のジオポリマーモルタルでは加熱温度の増加に伴い圧縮強度が低下するが，フライアッシュ 100%では 600℃までは低下するがこれ以上の温度では若干増加する傾向にあることを確認した．セメントや高炉スラグを添加したジオポリマーの圧縮強度低下の理由として，含まれる CH や C-S-H，C-A-S-H が強熱により熱分解して組織の微細構造が粗になるためと考察している．

緑川ら [5)]はフライアッシュに高炉スラグを 0，10，20%添加したジオポリマー（ケイ酸ナトリウムと NaOH を使用）について，100℃から 1000℃まで 150℃間隔で加熱温度を変化させて 24 時間保持したのち，圧縮強度と SEM による組織観察を行った．フライアッシュ単体（高炉スラグ 0%）の場合には加熱温度 700℃以上でフライアッシュの溶融焼結が進行して圧縮強度は一定値に収束すること，高炉スラグ微粉末を混入した場合には，フライアッシュと高炉スラグ微粉末との焼結温度の差により組織が粗くなり，圧縮強度は低下することを報告している．

Pan ら [6)]は，フライアッシュおよびアルカリ溶液として Na シリケート溶液と KOH を使用したジオポリマー

コンクリートについて，粗骨材の寸法を変化させて最大 800℃の耐熱性能を調査し，高強度および普通強度の OPC コンクリートと比較した．その結果，コンクリートの種類に関わらず粗骨材最大寸法が大きいほうがひび割れや爆裂は抑制された．水結合材比は OPC が 0.42，ジオポリマーが 0.33 であったが，TG でのジオポリマーの質量残存率は 90%以上であり，OPC の約 67%と比較して顕著に大きい．この原因は明らかにされていないが，水結合材比の違いだけでなく，マトリックスの構造にも起因していると推察されている．ポルトランドセメントと比較して高温での脱水量が少ない特徴は多くのジオポリマーコンクリートに共通している．

上原らは[7),8)]粉体にフライアッシュ，高炉スラグとシリカフュームを使用し，NaOH[7)]または KOH[8)]をアルカリ溶液として硬化させた常温養生型のジオポリマーについて 1150℃までの加熱試験を実施した．NaOH を用いた場合には 700℃以上で圧縮強度が 80N/mm^2 程度から 15N/mm^2 程度に圧縮強度が低下し，1150℃で溶解すること[7)]，KOH を用いた場合は 1150℃においても溶融は認められず，Na 系のジオポリマーよりも高温耐性が高いこと[8)]を報告している．Na 系よりも K 系のジオポリマーのほうが耐熱性に優れる傾向は前述の Provis ら[2)]と一致している．

Hemra ら[9)]は，メタカオリンに cordierite を添加した粉体およびアルカリ溶液として Na シリケート溶液と NaOH を使用したジオポリマーについて 800℃の温度を繰り返し 15 回まで与え，熱衝撃に対する耐久性を調査した．その結果，cordierite を 50%添加した系では加熱後の強度の残留率が 20%低下するものの，ひび割れを生じない高い耐熱性が確認された．加熱後の FTIR 分析の結果より，O-H 振動バンド（3448cm^{-1}）が加熱前よりも脱水により減少していること，Si-O-Si(Al)バンド（1000cm^{-1}）がブロードになりながら吸収波長が変化しており，Al^{4+}が Si-O-Si 構造に入り水和物の規則性が高くなっていることを示した．

Richard ら[10)]は，ガラス相の組成が異なる 5 種類のフライアッシュ（FA）と，Na シリケートまたは Na アルミネートをアルカリ溶液として混合し，系（FA のガラス相＋アルカリ溶液＋水）の Si：Al，Na：Al および H：Al を同一にしたジオポリマー供試体を作製し，1000℃の加熱試験を実施した．その結果，耐熱性は FA のガラス組成の影響を大きく受け，ガラス組成が Si:Al＜2 のフライアッシュを使用したジオポリマー（Na シリケートで硬化）は硬化後の強度は高いものの加熱後の強度残存率が小さくなったが，Si:Al≧5 のもの（Na アルミネートで硬化）は硬化後の強度は低いものの加熱後の強度が加熱前よりも大きくなり，後者は耐熱材として適していることを報告した．SEM 観察によると Si:Al の高い FA を用いたジオポリマーは加熱により空隙が明らかに減少しており，焼結が強度増加の主な要因であると考察されている．また，XRD による加熱前後の鉱物変化から高温で安定な長石などの鉱物が生成したことも要因の一つであると推察している．

上述のような材料の種類や構成の最適化により耐熱性を向上させる研究とあわせて，空気の導入[11),12)]や軽量骨材[13),14)]の利用により熱伝導率を低下させて，耐熱パネル等として利用する試みもなされている．

このように，ジオポリマーはポルトランドセメントを使用したコンクリートよりも優れた耐熱性を示し，高炉スラグやアルカリ溶液 (Na か K か)，フライアッシュの組成の影響についても知見が蓄えられつつある．一方で，耐熱性のメカニズムは明確になっているとは言い難い．ジオポリマーでは水和物の脱水だけでなく高温でのアルミノシリケートの溶解や鉱物析出が生じ，これに伴う空隙構造や力学特性の変化が材料・配合により異なってくる．この点はセメントコンクリートとの大きな違いであり，今後の体系的な理解が期待される．

橋爪ら[15)]は，フライアッシュと高炉スラグ微粉末(混合比率 15：85)を用いたジオポリマーペースト発泡硬化体の 1000℃加熱前後の XRD 分析と SEM 分析を行った．加熱によってゲルが分解して，霞石(Nepheline)，ゲーレン石(Gehlenite)および灰長石(Anorthite)を生じることを明らかにした．また，加熱前のマトリックスゲルは緻密であり，未反応の FA 粒子が見られるが，加熱により微細な孔隙が多く生じ，ゲルは熔けてセッ

ラミクス化する様子が見られた.

これは，ジオポリマーゲルの熱分解と脱水のためであると考えられる．この熱分解によって，発泡硬化体の体積，密度および熱伝導率が減少し，収縮ひび割れ，反りなどの不整変形が生じる[15)16)]．加熱温度が高いほど，体積と密度の減少が多い．また，加熱による強度の減少は200～600℃では大きいが，600℃以上では逆に少なくなり，比強度が増加する[17)18)]．非軽量骨材の使用は，ジオポリマー硬化体の不整変形とひび割れの発生を抑制する[19)]．軽量発泡体の場合に，軽量細骨材の使用と砕石粉の混合は，不整変形とひび割れの発生抑制に効果がある[17)]．これは，反応性がない砕石粉と軽量細骨材が変形しにくい骨組を形成するためであると考えられる.

6.11.2　高温環境下における爆裂性状

池谷ら[19)]は，日本コンクリート工学会の試験規準である「コンクリートの爆裂試験のリング拘束供試体試験法：A法により普通コンクリート(NSC：24MPa)のジオポリマーコンクリート(GPC：26MPa)のRABT30加熱曲線によって高温時の爆裂評価を行った．さらに，加熱後の供試体を対象としてコアサンプルを採取し，内部監察および超音波法による内部損傷状況を評価している．その結果，曲線に従い実施した加熱試験を実施した結果，普通コンクリート(NSC)とジオポリマーコンクリート(GPC)ともに爆裂は生じなかったとしている.

GPCとNSCおよび爆裂を生じた高強度コンクリート(HSC)を対象として、蒸気圧、拘束応力と温度の関係を比較している。GPCは水蒸気圧がNSCと同程度に上昇したが，加熱に伴うジオポリマーの溶融により拘束応力は小さくなり，内部組織が変化することで空隙中の水蒸気圧が局所的に上昇しないことを報告している．加えて，GPCは圧縮強度と静弾性係数もHSCと比較して小さいため，局所破壊が生じない結果となり，爆裂は生じなかったとしている.

後藤ら[21)]は，リング拘束供試体試験法を用いて圧縮強度が30～40MPaのジオポリマーモルタルの爆裂評価を行った.ジオポリマーモルタルは高アルカリ水比(HA),低アルカリ水比(LA)のそれぞれに高炉スラグ(BSF),フライアッシュⅡ種(FA)またはメタカオリン(MK)を活性フィラーとした配合，計4 体の供試体を対象とし加熱試験を実施した．圧縮強度の範囲は30～42MPaであった.その結果，図に示すようにすべてのジポポリマーモルタルにおいて爆裂は生じなかった.

Ozawaら[22)]は，オーストラリア産のフライアッシュを使用したジオポリマーモルタル(46MPa)と高炉スラグ系ジオポリマーモルタル(53MPa)を対象として，リング加熱試験を実施した．その結果，高炉スラグ系ジオポリマーモルタルにおいて，激しい爆裂が生じたとしている.

参考文献

1)　日本コンクリート工学会:コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能研究委員会報告書, 2012

2)　Provis, J. L. and van Deventer, J. S. J.：Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications, CRC Press, 2009

3)　一宮一夫，上野貴行，原田耕司，池田　攻：高炉スラグ微粉末を添加したフライアッシュベースのジオポリマーの高温下における物性変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1269-1274，2016

4)　八代大生，新大軌，周藤将司，三代龍之輔：高温環境下におけるジオポリマー硬化体の物理的および化学的変化，コンクリート工学年次論文集，No.42，pp.1792-1797，2020

5)　緑川猛彦，車田研一，江本久雄：フライアッシュベースジオポリマーモルタルの高温加熱後の強度特

性，土木学会第 73 回年次学術講演会 V-096，2018
6) Pan，Z.，Sanjayan，J. G. and Kong，D. L. Y. ：Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures，Construction and Building Materials，Vol.36，pp.365-372，2012
7) 上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣：左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp1937-1942，2020
8) 上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣：常温養生カリウム(K)型ジオポリマー左官用モルタルの調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1774-1779，2020
9) Hemra，K.，Sriravindrarajah，R. and Baweja，D. ：Effect of cordierite addition on compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer，Advanced Powder Technology，Vol.27，no.3，pp.1021-1026，2016
10) Rickard，W.D.A.，Temuujin，J. and Riessen，A.van：Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition，Journal of Non-Crystalline Solids Vol.358，pp.1830-1839，2012
11) Shiu，H. -S.，Lin，K. -L.，Chao，S. -J. and Hwang，C. -L. ：Effects of Foam Agent on Characteristics of Thin-Film Transistor Liquid Crystal Display Waste Glass-Metakaolin-based Cellular Geopolymer，Environmental Progress and Sustainable Energy，Vol.33，no.2，pp.538-550，2014
12) Zhang，Z.，Provis，J. L.，Reid，A. and Wang，H. ：Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction，Construction and Building Materials，Vol.56，pp.113-127，2014
13) Abdulkareem，O. A.，Al Bakri，A. M. M.，Kamarudin，H. and Kamarudin，H. ：Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste，mortar and lightweight concrete，Construction and Building Materials，Vol.50，pp.377-387，2014
14) Liu，M. Y. J.，Alengaram，U.J，Jumaat，M. Z. and Mo，K. H. ：Evaluation of thermal conductivity，mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete，Energy and Buildings，Vol.72，pp.238-245，2014
15) 橋爪優紀，李柱国ほか: 廃棄物を主原料としたジオポリマー耐火被覆材の開発，その 2 耐火被覆材の化学組成と性能，2019 年度日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.43，pp.45-48，2020.3
16) 岩間祐樹，李柱国，品川肇，繊維を添加した多孔質ジオポリマーの耐火性に関する考察，2021 年度日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.45，13-16，2022.3
17) 佐々木渉，李柱国，杉原大祐，流田靖博：ジオポリマー系軽量耐火被覆材料の製法および性能に関する実験的研究，2016 年度日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.40，pp.45-48，2017.3
18) 川村祥陽，李柱国ほか: 廃棄物を主原料としたジオポリマー耐火被覆材の開発，その 1 軽量多孔質ジオポリマーの作製方法，2019 年度日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.43，pp.41-44，2020.3
19) 池谷拓由紀，小澤満津雄，原田耕司，合田寛基：リング拘束供試体加熱試験法によるジオポリマーコンクリートの爆裂評価，材料学会，第 19 回 コンクリート構造物の 補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.19,pp.429-434，2019 年 10 月
20) 鎌田亮太，小澤満津雄，明石孝太，谷辺徹：リング拘束試験方法における高強度コンクリートの爆裂性

状におよぼす養生期間の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1305-1310，2016
21) 後藤　悠太，池谷　拓由紀，合田　寛基，小澤　満津雄:ジオポリマーモルタルのリング拘束供試体加熱試験法による爆裂評価,第 21 回　コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文集,pp.419－424 ,Vol.21,2021
22) M.Ozawa, F.U.A.Shaikh ： A study on spalling behaviour of geopolymer mortars using ring restraint test, Construction and Building Materials,Vol.279, 12, April. 2021, 122494

（執筆者：宮原　茂禎，小澤　満津雄）

6.12 収縮

コンクリートの収縮は，セメントの水和反応に起因する自己収縮と，コンクリート内部に存在する水分の逸散により生じる乾燥収縮が知られている．また，乾燥収縮ひずみの数値は 500～800μ 程度とされており，その変動要因には，単位セメント量，水セメント比，使用骨材，養生方法，相対湿度などが挙げられる[1, 2]．

一方，ジオポリマーは，脱水縮重合反応により固化が進行し，製造条件も多種あるため体系的な整理はなされていないが，活性フィラーやケイ酸アルカリ溶液の種類，溶液/粉体比，養生温度，含有するカルシウム濃度などが収縮に影響を及ぼすと報告されている[3)～5)]．

本間[6)]は，フライアッシュⅡ種とジオポリマー溶液を用い，80℃で加温養生して作製したジオポリマーモルタルの長さ変化と乾燥収縮について調べた．その結果，加温養生時における長さ変化は，常温から 80℃までの加温期間には膨張したが，温度保持期間から収縮に転じ，加温終了後，ほぼ元の長さに戻ることを確認した．また，乾燥収縮については，加温養生時間が短いほど長さ変化率は大きく，アルカリの種類によっても収縮特性が異なることを明らかにした．

一宮ら[7)]は，フライアッシュⅠ種，Ⅱ種，Ⅳ種（順に，FA1，FA2，FA4）と高炉スラグを併用し，60℃で養生したジオポリマーモルタルの長さ変化を測定し，セメントモルタルと比較した．**図 6.12.1** より，材齢 4 週におけるジオポリマーモルタルの収縮ひずみは，フライアッシュの種類により異なり，特にフライアッシュⅣ種では，同Ⅰ種の約 5 倍，セメントモルタルの約 1.7 倍と，他の条件より大きい結果となった．また，**図 6.12.2** に示す質量減少率の変化の傾向は，収縮ひずみの結果に類似していたが，フライアッシュⅠ種のように収縮ひずみは小さいが，質量減少率は大きいものも確認されている．

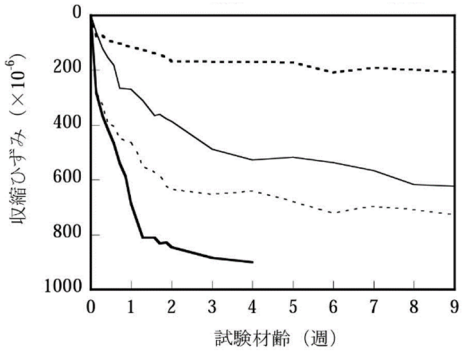


図 6.12.1　収縮ひずみと試験材齢との関係[7)]

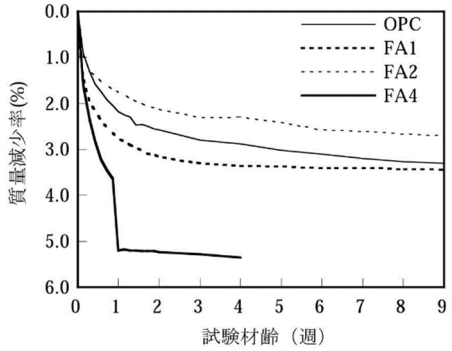
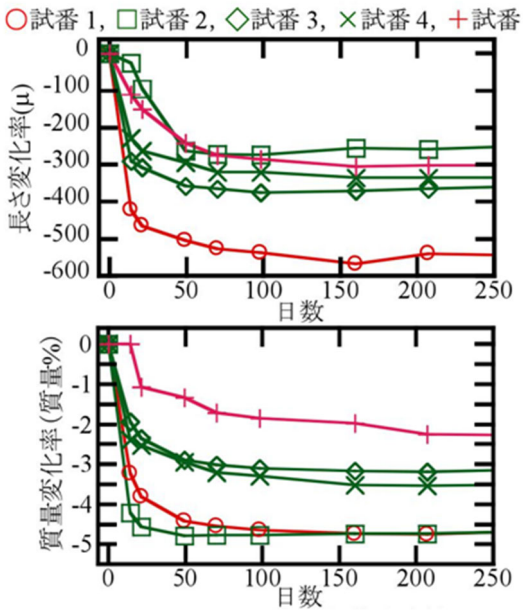


図 6.12.2　質量減少率と試験材齢との関係[7)]

上原ら[8)]は，フライアッシュの一部を高炉スラグ微粉末で置換し，80℃で養生したジオポリマーコンクリートの長さ変化率と質量変化率について確認している．**図 6.12.3** より，ジオポリマーコンクリートの長さ変化率は，250～550μ 程度で，高炉スラグ微粉末の置換率が同一であれば，アルカリ／水のモル比が大きなものほど小さくなるが，高炉スラグ微粉末の置換率と長さ変化率の関係については明確な傾向が確認できないと報告している．また，他の研究[7), 9), 10)]にも同様の結果が示されているが，フライアッシュのみを使用したジオポリマーコンクリート（試番 2）の長さ変化率は小さく，質量減少率は大きい数値となっている．この理由については，硬化体内部に存在する非常に大きな細孔により水分逸脱量は多くなるが，毛細管収縮が小さいために乾燥収縮量は少なくなったと推察している．



アルカリ水モル比：0.10(試番 1)，0.15(試番 2,3,4)，
0.20(試番 5)
BFS 置換率：0%(試番 2)，20%(試番 1,3,5)，30%(試番 4)

図 6.12.3　ジオポリマーコンクリートの乾燥収縮試験結果 [8)]

ジオポリマーを補修材料などに適用する場合には常温養生となるが，フライアッシュの単独使用では強度発現に時間を要するため，高炉スラグ微粉末の併用が必要となる．しかしながら，この条件では，乾燥収縮が大きく，初期ひび割れが生じやすいといった指摘がある [11)~14)]．岡田ら [15)]は，高炉スラグ微粉末を 30%置換し，ポリエーテル誘導体を主成分とした収縮低減剤を 3%添加したジオポリマーコンクリートを作製し，収縮低減剤が乾燥収縮に及ぼす影響について確認した．その結果，収縮低減剤を添加しないジオポリマーコンクリートの収縮ひずみは-1000×10^{-6}程度であったが，収縮低減剤を添加すると-200×10^{-6}となり，乾燥収縮を大幅に低減することができた．

常温養生ではないが，膨張材を用いることで，ジオポリマーに収縮抵抗性を付与させる研究も行われている．中村ら [16)]は，膨張材にエトリンガイト・石灰複合系膨張材とカルシウムサルフォアルミネート系膨張材を用い，高炉スラグ微粉末を 30%置換して作製したジオポリマーモルタルを 60℃で養生し，長さ変化率を測定した．その結果，ジオポリマーに膨張材を使用すると，材齢初期にセメントモルタルと同等の膨張を導入でき，添加量が増えるほど膨張量も大きくなる傾向となった．また，エトリンガイト・石灰複合系膨張材では，材齢初期の膨張量を大きくできる一方で，その後の収縮も大きくなると報告されている．

収縮に関するその他の検討としては，繊維補強や再生骨材を用いたジオポリマーの研究 [17), 18)]などが行われている．

参考文献

1)　笠井芳夫 編著：コンクリート総覧，pp.473-475，1998

2)　日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書，2010.3

3)　C. Ridtirud, P. Chindaprasirt, K. Pimraksa：Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol.18, No.1, pp. 100-104, 2011

4)　Mehrab Nodehi, Vahid Mohamad Taghvaee：Alkali-Activated Materials and Geopolymer: a Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy, Circular Economy and

Sustainability, 2, pp.165-196, 2021
5) 佐藤隆恒，上原元樹，山崎淳司：低アルカリ水比，高ケイ素アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2035-2040，2017
6) 本間雅人：加温養生を行ったジオポリマーモルタルの収縮特性，日本建築学会学術講演梗概集(近畿)，pp.355-356，2014
7) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：フライアッシュ４種を用いたジオポリマーモルタルの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No. 1，pp. 1900-1905，2012
8) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp. 1987-1992，2015
9) 前川明弘，三島直生，畑中重光，坪内徹朗：ポーラスジオポリマーコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究,「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集,pp.75-80，2016
10) Y. Ling, K. Wang, C. Fu：Shrinkage behavior of fly ash based geopolymer pastes with and without shrinkage reducing admixture, Cement and Concrete Composites, 98, pp.74-82, 2019
11) 河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp. 1943-1948，2011
12) ポンマハーサイパラミ，五百蔵沙耶，畑中重光： 断面修復材としてのジオポリマーの基礎物性に関する研究－溶液粉体比および高炉スラグ微粉末の比表面積が及ぼす影響についてー，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.1149-1150，2020
13) 上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄,山口正廣：常温養生カリウム(K)型ジオポリマー左官用モルタルの調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，No.42，No.1，pp.1780-1785，2020
14) 王 涛，谷口 修，内藤 英晴，藤原 浩巳：常温硬化させたジオポリマーモルタルの基礎物性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，No.42，No.1，pp.1762-1767，2020
15) 岡田朋久，李柱国，橋爪進，永井伴英：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーコンクリートの性能に及ぼす収縮低減剤の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2029-2034，2017
16) 中村丞吾，新大軌，宇城正貴，島崎大樹：ジオポリマーにおける膨張材の水和反応に関する研究，コンクリート工学年次論文集，No.40，No.1，pp.1833-1838，2018
17) 束原実，大木信洋，上原元樹：短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp. 1963-1968，2015
18) 李柱国，高垣内仁志，杉原大祐，李薛忠：再生粗骨材を用いたジオポリマーコンクリートに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，No.42，No.1，pp.1798-1803，2020

（執筆者：前川　明弘，一宮　一夫）

6.13　反応熱

ジオポリマーの反応熱に関する報告は少ない．フライアッシュやメタカオリンを活性フィラーとした場合は，反応が縮重合反応のみとなるため，反応熱が比較的に小さくなるものと考えられる．一方，高炉スラグ微粉末などのカルシウム源を含む材料を使用した場合（ハイブリッド型ジオポリマー）は，セメントの水和で生成する C-S-H に類似した構造となることが推測されていることから，フライアッシュやメタカオリンのみを活性フィラーとした場合に比べ，反応熱が高めになるものと考えられている．

原田ら[1)]は，**写真 6.13.1** に示すような熱電対を型枠内部に配置して，ジオポリマーモルタルとセメントモルタルの内部温度を測定した．その結果，ジオポリマーモルタルは，セメントモルタルに比べ硬化過程における反応熱（発熱）が小さい傾向があることを確認している．

写真 6.13.1　型枠

参考文献

1)　原田耕司，一宮一夫：ジオポリマーモルタルの蒸気養生時の内部温度変化に関する基礎的研究，土木学会第 67 回年次学術講演会，V-441，pp.881-882，2012

（執筆者：原田　耕司）

6.14 物質透過性(透水，透気，塩化物イオン)

透水性や塩化物イオンに代表されるイオンの浸透性は，ジオポリマーに使用する材料により大きく異なることが知られている．これまでに，様々な副産物を利用した幅広いジオポリマー材料が提案されているが，本節では粉体としてフライアッシュと高炉スラグ微粉末およびこれらを併用した場合，アルカリ溶液としてNa シリケートおよび NaOH を使用したジオポリマーの物質浸透性，特に塩化物イオン浸透性について，近年の研究成果を調査した．

Ismail ら[1)]は，アルカリ活性化スラグモルタルおよびフライアッシュを部分的に置換したコンクリートの強度および水と塩化物イオンの浸透速度について調べている．モルタルの試験結果について文献[1)]から抜粋したものを，**表 6.14.1** に示す．スラグ/FA 比が，100/0，75/25，50/50，25/75，0/100 の場合と，OPC を用いた場合の結果を示したものである．モルタルの塩水浸漬試験（ASTM C1543）による結果を見ると，フライアッシュの置換率を 50wt.%まで高めると，0wt.%に対して拡散係数が大きくなっている．75wt.%の場合には，活性溶液の濃度が 8%から 12%に高められており，拡散係数が低減されている．フライアッシュ 100wt.%のジオポリマーモルタルでは最も高い拡散係数を示しており，これは多孔質な性質と関連している，と結論づけている．また，表中には，塩分浸透領域（硝酸銀溶液噴霧で白色に変色した部分）における全塩分，可溶性塩分の濃度と，それらの差から求められる固定化塩分の濃度を示している．FA 含有量が多いほど，固定化塩分量が多くなっている．この理由として，アルカリ活性化された結合ゲルの表面積はフライアッシュの含有によって増加し，したがって C-A-S-H ゲルと比較してジオポリマーゲルに塩化物がより多く物理的に吸収されることに寄与しているものと思われる，と述べている．

表 6.14.1 アルカリ活性モルタル・ジオポリマーモルタルの塩化物イオン拡散係数の比較（文献[1)]を元に作成）

Mixture	Binder proportion (wt.%)			Activator concentration (wt.% binder)	Water/ binder	Chloride diffusion coefficient ($\times 10^{-12}$m^2/s) (ASTM C 1543)	Chloride content by weight of binder		
	Slag	Fly ash	OPC				Total (wt.%)	Free (wt.%)	Bound (wt.%)
100/0	100	0	0	8	0.40	1.3	0.062	0.007	0.055
75/25	75	25	0	8	0.40	0.81	0.047	0.006	0.041
50/50	50	50	0	8	0.40	> 45	0.125	0.012	0.113
25/75	25	75	0	12	0.40	2.0	0.056	0.006	0.050
0/100	0	100	0	12	0.40	> 80	0.239	0.022	0.217
OPC	0	0	100	0	0.40	> 60	0.167	0.012	0.155

Ismail ら[2)]は，加えて，高炉スラグ微粉末とフライアッシュの混合割合を変化させて，Na シリケートをアルカリ溶液として硬化させたジオポリマーについて，その水和物組成を FT-IR や SEM を用いて調査するとともに，透水性（ASTM C 642）や塩化物イオンの浸透抵抗性を調査している．その結果，高炉スラグ微粉末の割合が多い場合は主に C-(N)-A-S-H ゲルが速やかに生成し，フライアッシュの割合が多い場合には，N-A-S-H ゲルがゆっくりと生成すること，両者を混合した場合はこれらが共存し，長期的には均一になっていくことを示した．また，強度や物質移動特性はゲルのタイプにより異なり，高炉スラグ微粉末が多く C-(N)-A-S-H ゲルを多く生成するほうが圧縮強度は高く，透水性は低く，塩化物イオンの浸透抵抗性も高くなることを示した．これらは，高炉スラグ微粉末の反応により生成する C-(N)-A-S-H ゲルは水分を多く保持して空隙を

充てんする効果が高いのに対し，フライアッシュから生成する N-A-S-H ゲルはポーラスになることが大きな要因と考察している．ここでいうポーラスとは，N-A-S-H の構造に空隙が多いという意味ではなく，フライアッシュの反応が遅いために空隙の充てんが進みにくく空隙が多いことを意味しているようである．

Yang ら[3]は，フライアッシューNa シリケートーNaOH のジオポリマーペーストをもとに，フライアッシュの一部を高炉スラグ微粉末で置換して（最大 50%置換），短時間の塩水浸漬（3%NaCl 溶液に 72 時間浸漬）と蛍光 X 線分析により塩化物イオンの浸透抵抗性を評価した．高炉スラグを 50%置換した場合に強度，塩化物イオンの浸透抵抗性ともに優れ，ポルトランドセメントのペーストと同等以上となった．そのメカニズムは水銀圧入による空隙構造や吸水試験結果を合わせて考察されており，基本的にはポルトランドセメントで生成する C-S-H のほうがジオポリマーでフライアッシュから生成するアルミノシリケートゲルよりも塩分浸透抵抗性が高いが，ジオポリマーに高炉スラグ微粉末を添加した場合には，生成する C-A-S-H がアルミノシリケートゲルと共存することにより空隙径が減少し，屈曲性も増加したため，高炉スラグ微粉末を 50%置換した場合に塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなったとされている．

Hu ら[4]も，FA を一部置換したアルカリ活性化モルタルの塩化物イオン浸透特性について調べている．シリケート比（0～1.5%），アルカリ添加量（2～8%），フライアッシュ含有量（0～60%）および蒸気養生がアルカリ活性化スラグ・フライアッシュモルタルの圧縮強度，空隙構造および塩化物イオン移動特性に及ぼす影響について検討している.塩化物イオン拡散係数と,通過した電荷量を,rapid chloride migration test(RCMT)と rapid chloride permeability test（RCPT）で調べている．前者は NT Build 492 に規定されており，カソード液に 10%NaCl 溶液，およびアノード液に 0.3mol/L NaOH 溶液を用いて 60V，72 時間の印加を行う電気泳動試験（供試体は厚さ 30mm の円柱試験片）である．印加終了後に供試体を 2 分割し，0.1mol/L の $AgNO_3$ 溶液を噴霧して塩化物の浸透深さを測定し，拡散係数を求めるものである．後者は，ASTM C 1202 に規定されており，試験のセットアップは前者と同じであるが，試料に流した電流値を 30 分ごとに 6 時間まで記録し，試料に流れた総電荷量を求めるものである．RCMT の結果，シリケート比が高くなるほど，また，アルカリ添加量が高くなるほど，拡散係数は小さくなること，逆にフライアッシュ置換率が高くなるほど拡散係数は大きくなることが示されている．シリケート比の増加に伴い，より多くの反応生成物が形成され，その結果，細孔構造が微細化することに起因すると考えられている．RCPT の結果，モルタル中のフライアッシュ含有量の増加に伴い，通過電荷は増加し，RCMT の結果と一致したものの．シリケート比やアルカリ添加量を変化させた場合の傾向は RCPT と RCMT とで異なった．この原因として，通過電荷は細孔溶液の化学的性質に影響されることを挙げている．

FA 置換率が塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響については，Fan ら[5]の研究もある．実験結果について文献[5]から抜粋したものを，**表 6.14.2** に示す．フライアッシュ置換率を 0，30，50，70，100%に変化させた場合と，水セメント比 40%（OPCCO）と 36%（OPCCN）について比較されている．拡散係数を求める方法は，中国規格 GB/T 50082-2009 で行われている．電気泳動試験後に 0.1mol/L の $AgNO_3$ 溶液を噴霧し，塩分浸透深さから拡散係数 D_{RCM} を算出している．なお，OPCCO と OPCCN の DRCM の数値が文献中に示されていないが，図から読み取ると，$10\times10^{-12}m^2/s$ 程度である．表より，フライアッシュ置換率が 0～50%の範囲であれば，拡散係数は $6\sim8\times10^{-12}m^2/s$ でほぼ同等であるが，フライアッシュ置換率がそれを上回る（70%，100%）と，拡散係数が大きくなり塩化物イオン浸透に対する抵抗性が低下することが確認されている．スラグ含有量の観点から見ると，スラグ含有率を増加させることで，C-A-S-H ゲルの量が増加し，塩化物の浸透に対する抵抗力が向上すると考えられる．

表 6.14.2　アルカリ活性コンクリート・ジオポリマーコンクリートの
塩化物イオン拡散係数の比較（文献[5]を元に作成）

Mixture No.	Unit weight (kg/m^3)					n*	Chlorides diffusion coefficient, D_{RCM} ($\times 10^{-12}$m^2/s)
	Fly ash	Slag	Water	Na_2SiO_3 solution	NaOH solution		
GPC100	0	500	104.3	147.2	23.9	1.3	8.0
GPC70	150	350	104.3	147.2	23.9	1.3	7.0
GPC50	250	250	104.3	146.9	24	1.3	6.3
GPC30	350	150	104.3	147.2	23.9	1.3	13.2
GPC0	500	0	104.3	147.2	23.9	1.3	29.7

* n = molar SiO_2/Na_2O ratio

Gunasekara ら[6]は，フライアッシュの組成が物質移動抵抗性に与える影響を調査している．組成の異なる4種類のフライアッシュをそれぞれアルカリ溶液（Na シリケート＋NaOH，SiO_2/Na_2O＝1.125～1.625）と混合し，80℃，RH95%で24時間加温養生（加温養生後は23℃気中保管）したジオポリマーコンクリートについて，透水性，透気性および塩化物イオンの浸透性を評価している．実験結果について文献[6]から抜粋したものを，**表 6.14.3** に示す．なお，各フライアッシュに対する配合は，アルカリシリカ溶液の activator modulus (SiO_2/Na_2O)を変化させた場合に強度が最大（最適化）となる配合[7]である．塩化物イオン拡散係数は，材齢28日および365日から90日間，3%の NaCl 溶液に浸漬させて求めている．表中には，表面塩化物イオン濃度 C_s(% concrete）と拡散係数 D_a (m^2/s) を示している．塩化物イオンの拡散係数については通常のセメントや混和材を用いたコンクリートと同程度であると報告されているが，示されている拡散係数は，日本の同一強度レベルのセメントコンクリートと比較すると1桁以上大きな値となっている．

表 6.14.3　ジオポリマーコンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較（文献[6]を元に作成）

Fly ash	AM*	Unit weight (kg/m^3)				Compressive strength at 28 days (MPa)	Chloride diffusion parameters			
							28 days		365 days	
		Fly ash	Sodium silicate (Liquid)	Sodium hydroxide (15M)	Added water		C_s (% concrete)	D_a($\times 10^{-11}$ m^2/s)	C_s (% concrete)	D_a($\times 10^{-11}$ m^2/s)
Gladstone	1.375	416	292	65	8	48.7	0.925	15.8	0.345	7.9
Pt.Augusta	1.375	416	292	65	8	42.9	0.725	18.9	0.340	8.5
Collie	1.125	420	241	92	15	33.1	0.425	19.5	0.380	9.6
Tarong	1.625	412	342	39	0	24.3	0.825	21.5	0.385	9.9

* AM: Activator Modulus = SiO_2/Na_2O ratio in alkaline activator

Thomas ら[8]は，アルカリ活性化フライアッシュ，アルカリ活性化スラグおよびポルトランドセメントコンクリートの塩化物イオン浸透性について検討するため，急速塩化物浸透試験（RCPT），交流および直流電気抵抗法，90日間塩水浸漬試験を行っている．なお，著者らは，電気的手法ではアルカリ活性化コンクリートの塩化物イオン浸透性を正確に推定することができないと仮定し，電気的試験と塩水浸漬試験による拡散係数を比較することにより，この仮説を検証している．実験結果について文献[8]から抜粋したものを，**表 6.14.4** に示す．いずれも圧縮強度が40PMa程度のものである．アルカリ活性化フライアッシュコンクリート（AAFC）の拡散係数はポルトランドセメントを用いたコンクリート（PCC）の3倍以上であり，塩化物イオンの浸透に

対する抵抗性は比較的低い結果となっている．一方、アルカリ活性化スラグコンクリート（AASC1，AASC2）の拡散係数は，PCC の 1/2～2/3 の値であり，AASC コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性は，PCC と比較して優れていることが示されている．RCPT の結果からも AAFC は高い電荷量を示しており，塩化物イオンの透過性が高いことが分かる．AAFC の塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が非常に低い原因として，粗大な細孔構造または微細構造内のひび割れの存在を指摘している．また，RCPT の結果は，塩水浸漬試験で求めた拡散係数と高い相関を示すものの，比抵抗の測定値は拡散係数とあまり相関が無かった，と述べている．

表 6.14.4　アルカリ活性コンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較（文献[8]を元に作成）

Mixture	Binder type	Na_2O	SiO_2	m*	Solution	Binder	ρ （Ω・m）		RCPC Charge (C)	D_{free}	D_{total}
		(% binder mass)			(kg/m^3)		AC	DC		($\times 10^{-12} m^2/s$)	
PCC	Portland cement	-	-	-	228	570	164	129	3112	12.1	12.2
AAFC	Fly ash	5.0	7.5	1.5	228	570	99	20	8250	38.6	42.2
AASC1	Slag	5.0	7.5	1.5	228	570	960	126	2635	8.61	9.31
AASC2	Slag	5.0	3.75	0.75	228	570	120	157	2016	6.29	6.97

* m ： mass ratio of silica to sodium oxide in the activating solution

Chindaprasirt ら[9]は，アルカリ溶液の濃度が耐久性に与える影響を検討している．Class C のフライアッシュ（CaO：18.8%，SiO_2：32.1%，Al_2O_3：19.9%と CaO に富んだもの）と Na シリケートを用い，NaOH 溶液の濃度を変化させたジオポリマーコンクリートを干満帯に 3 年間暴露し，強度，塩化物イオンの浸透性および設置した鉄筋の腐食状況を調査した．材齢 28 日における圧縮強度はアルカリ溶液濃度が高いものが高くなり，暴露 3 年後の圧縮強度の伸びもアルカリ溶液濃度が高いものが大きくなった．また，高いアルカリ濃度の配合ほど初期にフライアッシュの反応が促進されて緻密な空隙構造となったため海水からのマグネシウムイオンや硫酸イオンの浸透が少なく，$Mg(OH)_2$ や $CaSO_4$ の生成が抑制されて，海水による劣化も抑えられたと報告されている．塩化物イオンの浸透についてもアルカリ溶液濃度が高い配（調）合が抑制されていた．また，ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較して，強度レベルが小さくても低い塩化物イオンの拡散係数となった．塩化物イオンの固定化率（全塩分に占める固定塩化物の割合）はアルカリ溶液濃度が高いものほど高くなった．これはアルカリ溶液濃度が高いジオポリマーほど高 Ca フライアッシュの反応が促進されて C-S-H に近い水和物を生成し，これが物理吸着による固定に寄与したものと推察している．コンクリート中に設置した鉄筋の腐食についても，かぶりの大きさによらず，アルカリ溶液濃度が高い配合ほど抑制されていた．これは，上述の通り，アルカリ溶液濃度が高くなるほど，強度の向上，拡散係数の低下，固定化能力の向上が見られたのと一致する結果であった．

国内では，本田ら[10]が，スラグ置換率を 10，20，30%に変化させたジオポリマーモルタルの電気泳動試験を行っている．置換率 10%に対して置換率 20%の拡散係数は若干の低下にとどまったが，置換率 30%では 35%から 50%の低減が可能であったものの，OPC モルタルに対しては約 10～20 倍大きかった，と述べている．また，蒸気養生の最高温度（60℃，80℃）は塩分浸透に影響しないこと，前養生（蒸気養生前の養生）を 2 日行うことで塩分浸透が抑えられること，等を示している（**図 6.14.1**）．

花岡ら[11]は，スラグ置換率 0，10，15，20%の GPC を用いて塩水浸漬試験，水分浸透試験を行っている．その結果，スラグ置換率の増加に伴って，遮塩性および水分浸透に対する抵抗性が高くなり，塩分浸透深さおよび水分浸透速度係数は，スラグ置換率の増加に伴い指数関数的に小さくなること等が報告されている（**図**

6.14.2)．

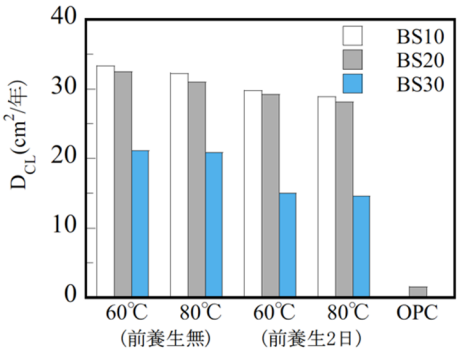


図 6.14.1　養生条件と塩化物イオン拡散係数の関係 [10)]

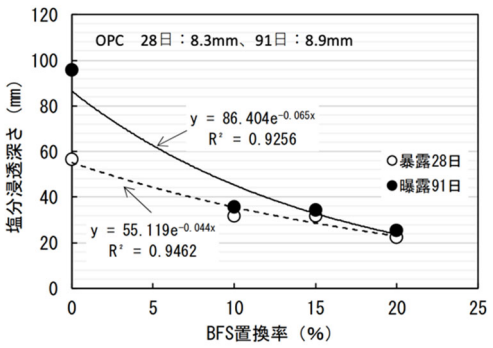


図 6.14.2　BFS 置換率と塩分浸透深さの関係 [11)]

実環境下における性状に関する検討事例として，榮徳ら [12)]が，塩害環境下（沖縄）で GPC の 2 年間の曝露試験を行った結果がある．GPC（スラグ置換率 20%，30%）は OPC に比べて表面付近での塩化物イオン濃度は小さいものの，浸透深さは GPC の方が大幅に大きかったとしている（**図 6.14.3**）．その原因として，高い吸水性や累積細孔容積が大きいことを挙げている（**図 6.14.4**）．

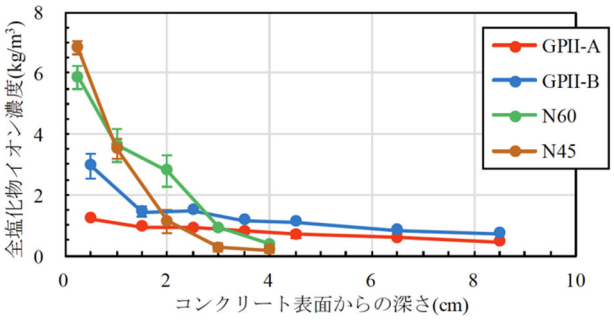


図 6.14.3　塩化物イオン濃度分布 [12)]

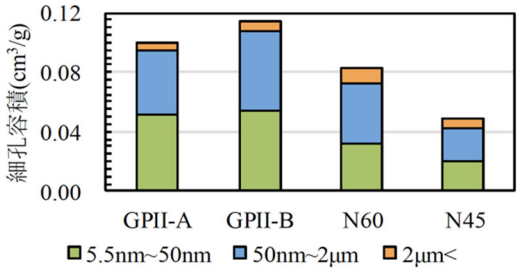


図 6.14.4　細孔容積測定結果 [12)]

以上のように，ジオポリマーコンクリートにおいて高炉スラグ微粉末を使用すること，アルカリ濃度を高めることにより力学的特性や物質移動抵抗性は向上する点では，多くの研究結果は一致している．ただし，高炉スラグやフライアッシュの反応により生成する C-A-S-H や N-A-S-H が異なる物質移動抵抗性を持つ理由，N-A-S-H による塩化物イオンの固定化能力や物質移動（塩化物イオン）に OH-イオンが与える影響などについてはまだ十分に明らかになっておらず，今後の検討が望まれる．また，ジオポリマーコンクリートの塩化物イオン拡散係数あるいは浸透抵抗性を評価するための試験方法は確立しておらず，検討の余地が残されている．

参考文献

1)　Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., et. al.: Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes, Construction and Building Materials, Vol.48, pp.1187-1201, 2013

2) Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., et.al.: Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash, Cement and Concrete Composites, vol.45, pp.125-135, 2014
3) Yang, T., Yao, X., and Zhang, Z.: Quantification of chloride diffusion in fly ash-slag-based geopolymers by X-ray fluorescence (XRF), Construction and Building Materials, Vol.69, pp. 109-115, 2014
4) Xiang Hu, Caijun Shi, Zhenguo Shi, Liuyang Zhang: Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars, Cement and Concrete Composites, Volume 104, 2019, 103392
5) Jingchong Fan, Hongguang Zhu, Jing Shi, Zonghui Li, Sen Yang: Influence of slag content on the bond strength, chloride penetration resistance, and interface phase evolution of concrete repaired with alkali activated slag/fly ash, Construction and Building Materials, Volume 263, 2020, 120639
6) Gunasekara, C., Law, D. W., and Setunge, S.: Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes, Construction and Building Materials, Vol.124, pp. 352-362, 2016
7) Chamila Gunasekara, David W. Law, Sujeeva Setunge, Jay G. Sanjayan: Zeta potential, gel formation and compressive strength of low calcium fly ash geopolymers, Construction and Building Materials, Volume 95, 2015, Pages 592-599
8) R.J. Thomas, Erandi Ariyachandra, Diego Lezama, Sulapha Peethamparan: Comparison of chloride permeability methods for Alkali-Activated concrete, Construction and Building Materials, Volume 165, 2018, Pages 104-111
9) Chindaprasirt, P., and Chalee, W.: Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site, Construction and Building Materials, Vol.63, pp. 303-310, 2014
10) 本田信也，一宮一夫，山本朝陽，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーの塩化物イオン浸透性.，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.681-682，2020
11) 花岡大伸，谷本恒志郎，伊藤翼：ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1361-1366，2021
12) 榮徳雄斗，佐川康貴，原田耕司，富山潤：塩害環境下に 2 年間曝露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1367-1372，2021

（執筆者：佐川　康貴，一宮　一夫，花岡　大伸）

７．環境負荷低減

7.1 はじめに

ポルトランドセメント(PC)の生産は，石灰石を主原料とし，石炭などの燃料を燃やすため，CO_2を大量に排出している．そのうち，石灰石の脱炭酸によるCO_2排出量が 6 割程度を占める．可燃性廃棄物が石炭を部分的に代替しても，CO_2排出が依然として生じる．セメントは，石灰石の焼成工程で製造されるクリンカーを使えば，そのCO_2排出原単位がどうしても高い宿命にあると考えられる．しかし，現在，都市ごみ焼却灰，石炭灰，高炉・製鋼スラグ，汚泥，廃油，廃プラスチック，廃タイヤなどの 20 種類以上の廃棄物・副産物がクリンカーの製造に大量に利用されているため，セメント産業は，廃棄物の最終処分場の延命，さらに循環型社会構築に大きな貢献を与えている．

高炉スラグ微粉末，フライアッシュなどの廃棄物や副産物を粉体とし，クリンカーを使用しないジオポリマー(GP)は，環境に優しい素材として建設業の環境負荷の削減に寄与するものと期待されている．PC の硬化のために水を使うことに対して，GP の硬化にはアルカリ溶液を使用する．PC の環境負荷評価に水を通常に考慮しないが，アルカリ溶液の原料の製造時の環境負荷が大きいため，GP の環境負荷を評価するには，粉体とともにアルカリ溶液も考慮すべきである．また，アルカリ溶液の使用量が GP 材料の硬化前の流動性を決定するため，GP と PC の環境負荷を比較する場合，少なくとも両者の硬化前の流動性と硬化後の強度が同程度ではないといけない．発電と燃料製造のエネルギー消費量および製品生産のエネルギー利用効率は国によって変わり，同じ製品でも産地によって環境負荷が異なる．本章では，まず海外で行った GP，GP コンクリートのCO_2排出量などの環境負荷の評価結果を紹介する．次に，国内のエネルギーと使用材料の環境負荷原単位を基に，GP コンクリートの環境負荷(CO_2排出量，エネルギー消費量)および廃棄物再利用の環境便益も考慮した統合評価としての環境影響を試算し，同程度の強度と流動性を有する PC コンクリートと比較する．

7.2 ジオポリマー・コンクリートの環境負荷に関する海外の評価結果

Davidovits[1)]は，土石(文献に明確されていないが，カオリンと推測している）を 700℃で仮焼き・粉砕して得られた粉末と高炉スラグ微粉末を 7：3 の質量割合で混合し，アルカリ溶液を添加した GP のエネルギー消費原単位とCO_2排出原単位を試算し，28 日材齢の圧縮強度が同じ（40MPa）である PC と比較した．仮焼きの時間と粉砕方法，アルカリ溶液の組成と使用量を開示していないが，GP のエネルギー消費とCO_2排出の原単位は，PC に比べてそれぞれ 59%と 80%減少すると報告している．さらに，フライアッシュ(FA)だけを活性フィラーとした GP のCO_2排出原単位は 0.09-0.25t/t で，PC より 75～90%減少すると指摘している[1)]．

McLellan ら[2)]は，4 種類の FA を活性フィラーとした GP に対してCO_2排出原単位を評価した．これらの GP の圧縮強度は 40MPa である．GP のCO_2排出原単位は，15～30%のフライアッシュや高炉スラグを含む混合セメントより 44～64%減少し，アルカリ溶液の使用量と苛性ソーダの割合に大きく依存すると指摘している．

Weil ら[3)]は，使用材料の輸送によるCO_2排出を計上しない場合，BFS と FA を活性フィラーとした GP モルタルとペーストのCO_2排出原単位は，PC モルタルと PC ペーストの 3 割前後であるが，使用材料の輸送によるCO_2排出を計上すると，6 割前後になると報告している．一方，Stengel ら[4)]は，使用材料の輸送のCO_2排出を計上しない場合に，FA を用いた GP コンクリートのCO_2排出原単位(200kg-CO_2/m^3)は，フライアッシュが PC の 1/3 を代替した PC コンクリート(237kg-CO_2/m^3)の 84%であると試算している．Turner ら[5)]は，FA を活

性フィラーとし，60℃で 24 時間養生した GP コンクリートの CO_2 排出原単位を計算し，常温養生の PC コンクリートと比較した．両者の圧縮強度がともに 40MPa であるが，流動性の差異が不明である．CO_2 排出原単位の計算に用いられた水ガラスと苛性ソーダの CO_2 原単位はそれぞれ 1.514 kg-CO_2/kg および 1.915 kg-CO_2/kg であった．1.514 kg-CO_2/kg の原単位に，材料輸送による CO_2 とメタンガス(CH_4)排出の換算 CO_2 が含まれている．計算結果として，加温養生した FA 系 GP コンクリートの CO_2 排出原単位は 320kg-CO_2/m^3 で，PC コンクリートの 354kg/m^3 より僅かに減少すると報告されている．この結果に対して，Davidovits[6]は，GP コンクリートに用いた水ガラスの濃度が約 45%であったが，濃度が 100%の水ガラスの原単位(1.514kg-CO_2/kg)を使ったこの計算結果が間違えていると指摘している．Davidovits は，さらに FA 系 GP コンクリートの CO_2 排出原単位がそれぞれ加温養生による負荷を計上する場合には 209-CO_2/m^3，加温養生を考慮しない場合には 169kg-CO2/m^3 と修正した．つまり，FA 系 GP コンクリートの CO_2 排出原単位は，同等な強度を有する PC コンクリートの 59%(加温養生の場合)と 47.7%(常温養生の場合)である．

Habert ら[7]は，フライアッシュを活性フィラーとした GP コンクリートの 10 種環境負荷物質の排出量を計算し，同等な圧縮強度(36MPa)を有する PC コンクリート（単位セメント量 354kg/m^3）と比較した．GP コンクリートの各環境負荷物質の大半は水ガラスと苛性ソーダの使用に起因し，温室ガス排出量は，PC コンクリートの半分程度であるが，他の負荷物質の排出量は PC コンクリートより多いと報告している．なお，Habert ら[7]は，高炉スラグ微粉末（BFS）およびメタカオリン（MK）のいずれを用いた GP コンクリートの環境負荷物質の排出量を計算した．BFS 系 GP コンクリートの温室ガス排出量は，PC コンクリートの約半分であるが，MK-GP コンクリートは PC コンクリートとほぼ同等である．また，2 種類の GP コンクリート温室ガス以外の環境負荷物質の排出量は PC コンクリートより多い（GBFS 系 GP コンクリートのオゾン枯渇物質と富栄養化物質を除く），水ガラスの使用が原因であると報告している．しかし，Davidovits[6]は，GP コンクリートに用いた水ガラスの濃度が 37%であるが，濃度が 100%の水ガラスの原単位（1.514kg-CO_2/kg）を使った Habert らの評価が過大であると指摘している．

アルカリ溶液の環境負荷原単位は，GP 材料の環境負荷の評価結果を左右するといえる．Fawer ら[8]は，5 種類のケイ酸ソーダの 18 種以上の環境負荷を計算した．それぞれ①SiO_2 と Na_2O の質量比(SiO_2/Na_2O)が 3.3 である粒状ケイ酸ソーダ，②SiO_2/Na_2O=3.3 で，濃度が 37%の液状ケイ酸ソーダ，③SiO_2/Na_2O=2.0 で，濃度が 48%の液状ケイ酸ソーダ，④SiO_2/Na_2O=2.0 で，固形分が 80%の粉末状のケイ酸ソーダおよび⑤SiO_2/Na_2O=1.0 で，固形分が 58%のメタケイ酸ソーダである．計算結果として，例えば，①の製造は 10953MJ/t のエネルギーを消費するが，②のエネルギー消費原単位は 4623MJ/t である．③のエネルギー消費原単位は，④の 30%である．即ち，ケイ酸ソーダの水溶液の環境負荷原単位は，その無水製品よりかなり小さい．したがって，正確なケイ酸ソーダ水溶液の環境負荷原単位を使えば，Davidovits の指摘したように，Habert ら[7]に計算された GP コンクリートの温室ガス以外の排出原単位も PC コンクリートより小さくなる可能性がある．

7.3 FA と BFS を活性フィラーとした GP コンクリートの環境負荷（日本の場合）

海外では，FA 系や BFS 系 GP コンクリートと同等な強度を有する PC コンクリートの環境負荷を比較した事例が報告されている．しかし，これらの比較事例では 2 種類のコンクリートの流動性が同等であるかどうかが明確されていない．また，GP は，廃棄物や副産物を主原料とするものであるが，PC や混合セメントの製造にも廃棄物を利用しており，PC コンクリートに BFS や FA が混和材として使われる場合もある．したがって，GP コンクリートの環境負荷を合理的に評価するために，または，GP コンクリートと従来のコンクリートの環

境負荷を比較する際に，CO_2 排出量の評価に加え，廃棄物利用の環境便益を考慮すべきである．

Li ら[9),10),11)]は，廃棄物の埋立等の環境負荷を減算することでコンクリートへの廃棄物利用の環境便益を反映する手法を提案し，LIME（日本版被害算定型影響評価手法）を用いてコンクリートの環境影響（外部コスト）の統合評価を試みた．骨材と土石の採集および廃棄物の埋立は，エネルギーを費やすだけではなく，土地利用改変を招き，森林や海洋 CO_2 固定量を低減する[12)]．FA と BFS の混合物を活性フィラーとする GP(FA/BFS 系 GP)は，常温環境においても強度発現性が優れ，FA と BFS のいずれを用いた GP の弱点を補うことが可能である．本報告書では，我が国の製造条件に基づいてアルカリ溶液の環境負荷と環境影響原単位を整備した上で，普通強度と高強度を有する FA/BFS 系 GP コンクリートの環境負荷と環境影響をそれぞれ評価し，同程度の圧縮強度と流動性を有する従来のコンクリートと比較する．

7.3.1　環境影響の評価方法

(1)　環境負荷項目

コンクリートのライフサイクルでは，資源を消費し，大気，水圏および土壌に汚染物質や固形廃棄物を排出し，土地利用改変と森林や海の CO_2 固定量の減少をもたらす．環境影響評価に考慮される環境負荷項目が多いほど，評価結果が環境影響の実際に近い．本研究では，環境影響量を無視できず，かつ評価可能である観点から，①温室ガス(CO_2，CH_4，N_2O)，②大気汚染物(SO_x，NO_x，ばいじん(PM2.5))，③水圏汚染物(COD，T-N，T-N)，④エネルギー資源消費(石油，石炭，天然ガス)，⑤生息地悪化・減少(土地利用改変)および⑥廃棄物排出を環境影響評価に考慮した．また，採石と骨材採取による森林や海洋の CO_2 固定の低減量を材料製造等による CO_2 排出量に加算した．廃棄物の埋立と土石・骨材の採取は土地利用改変をもたらす．なお，廃棄物の埋立の環境負荷については，上記の項目カテゴリ①～⑤以外に，項目カテゴリ⑥として埋立処分空間消失・逼迫の影響も考慮した．

(2)　評価範囲

コンクリートのライフサイクルの環境負荷は，原料の採取や製造からコンクリートの製造・施工・供用を経て解体・処分までの各段階に生じるすべてのものであるが，本研究では，**図 7.3.1** に示すように，コンクリートの製造段階に着目し，原材料の採取や製造から練混ぜまでの環境負荷を評価対象とした．

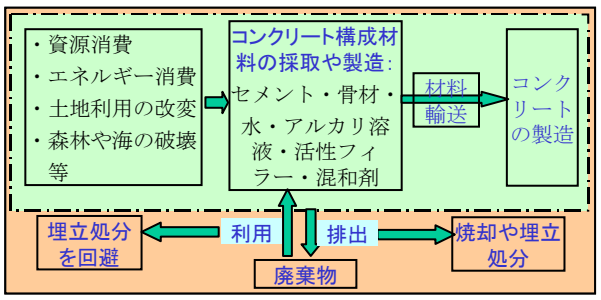


図 7.3.1　コンクリートの環境影響の評価範囲

(3)　環境影響の統合評価法

環境負荷項目ごとの評価値によって異なるコンクリートの環境影響の大小を総合的に判断することができないため，さまざまな環境負荷項目の評価値を単一指標にまとめる統合評価を行う必要がある．LIME2(LIME の改良版)は，各環境負荷項目の発生量（CO_2，SO_x 等，環境負荷と呼ぶ）が 4 つの保護対象（人間健康，社会資産，生物多様性および一次生産）を損害する量（環境影響と呼ぶ）を統合的に評価するための統合化係数を与えている．本研究で考慮した環境負荷項目ごとの統合化係数を**表 7.3.1** に示す．廃棄物埋立の統合化係数は，廃棄物の種類によって異なり，埋立の難易度を反映しているもので，石炭と PM2.5 以外の負荷物質よりとても大きい．これは我が国では埋立場の立地が乏しいためである．したがって，廃棄物の再利用有無がコンクリートの環境影響の評価結果に大きな影響を与えると予想している．LIME2 の廃棄物埋立の統合化係数は，土地利用と処分空間消失・逼迫の影響だけを考慮しているため，本研究では廃棄物埋立の環境影響を

表 7.3.1　考慮した環境負荷項目およびLIME2に与えられる環境影響統合化係数

環境負荷項目のカテゴリ		①温室ガス			②大気汚染物					③水圏汚染物			④枯渇性資源消費			⑤生息地悪化・減少	⑥廃棄物排出
考慮した環境負荷項目		CO_2 (kg)	CH_4 (g)	N_2O (g)	SO_x (g) 点排出	NO_x (g) 点排出	NO_x (g) 非点排出	PM 2.5(g) 点排出	PM 2.5(g) 非点排出	COD (g)	T- N (g)	T-P (g)	石油 (kg)	石炭 (kg)	天然ガス (kg)	土地利用改変(m^2)	産業廃棄物の埋立(kg)
統合化係数 (円/kg, g, m^2)	平均値や代表値[10]	2.77	7.33 E-02	0.87	4.07[1]	0.60[1]	1.93[1]	8.20	90.5	6.40 E-04	8.25 E-02	0.97	3.18	22.9	1.45	6.94E+4[2]	20.1[3], 16.9[4], 14.1[5], 13.6[6], 20.1[7], 30.5[8], 19.0[9]
	標準偏差	1.64	4.36 E-02	0.52	7.46[1]	2.02[1]	14.68[1]	28.20	298.0	-	-	-	1.81	118.0	1.26	6.94E+5	12.2[3], 9.7[4], 8.3[5], 9.5[6], 14.3[7], 27.0[8], 13.6[9]

注：1）酸性化と都市域大気汚染の統合化係数(全国平均)の和，2)土石採掘の場合の値，3）焼却灰，4）セメント固化物，5）溶融スラグ，6）鉱さい，7）ばいじん，8）種類不明の産業廃棄物，9）汚泥，10）水圏汚染物の負荷項目は代表値であるが，他の負荷項目は平均値である。

評価する際には環境負荷項目カテゴリ①～④による環境影響を別途に計算して加算した.

(4)　環境影響の評価式

コンクリートの製造は，一次原材料(土石，骨材等)の採取，二次原材料(セメント，砕石等)の製造，輸送および練混ぜの一連の工程を含める.そこで,製造段階の環境影響指標(EII)は,式(7.3.1)で与えられる[13,14].

$$EII = \sum_m [(M_m \times I_{pm}) + (\frac{M_m}{1000} \times D_m) \times I_t] + I_{moc} \quad (7.3.1)$$

ここに，M_m：1m³ のコンクリートの製造に消費される原材料 m の量(kg)，D_m：原材料 m の輸送距離(km)，I_{pm}：原材料 m の製造による環境影響原単位(円/kg)，I_t：輸送方法別の環境影響原単位(円/t･km)，I_{moc}：練混ぜの環境影響原単位(円/m³)

I_{pm}, I_t, I_{moc}は，式(7.3.2)によって計算される．式(7.3.2)中の負荷項目別の統合化係数 F_i は**表 7.3.1** に示すものである．再利用される廃棄物の埋立処分を行う場合の環境影響を式(7.3.3)に示すように減算して，廃棄物利用の環境便益考慮型環境影響原単位(I^*_{pm})を算出した.

$$I_{pm}, I_t, I_{moc} = \sum_i (\sum_j E_{ij}^v \times F_i) \quad (7.3.2)$$

$$I^*_{pm} = \sum_i [(\sum_j E_{ij}^v - \sum_r E_{ir}^w) \times F_i] \quad (7.3.3)$$

ここに，E_{ij}^v：原材料 j の採取や製造またはプロセス j による環境負荷項目 i (CO_2 等)の量，E_{ir}^w：原材料の製造に使用された廃棄物 r を処分する場合の環境負荷項目 i の量，F_i：環境負荷項目 i の統合化係数

式(7.3.1)を用いて EII を評価する時に，廃棄物のリサイクル環境便益を無視する場合には I_{pm} を，考慮する場合には I^*_{pm} を用いる．水砕高炉スラグ(BFS)は，殆どセメントとコンクリートの製造に有料で再利用され，埋立処分をされていない．製鉄業は BFS を副産物として扱っているが，セメント・コンクリート産業は，BFS の埋立処分を回避することに貢献している．したがって，高炉スラグの場合でも式(7.3.3)の減算は合理的である.

7.3.2　環境負荷と環境影響原単位の整備

(1)　コンクリートの構成材料と練混ぜの環境負荷原単位

3 種類のセメント，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，減水剤，水および骨材などの製造に投入する資源とエネルギー（参考文献 13)の表 3）に基づいて，エネルギー原単位（参考文献 13)の表 4）を用いてこれ

らの使用材料の環境負荷を積上げ法で計算した．また，資源採掘や廃棄物の埋立による土地利用改変量および森林や海洋 CO_2 固定の低減量の計算は参考文献 13)に述べた方法で行った．一部の使用材料と練混ぜの環境負荷の計算結果を**表 7.3.2** に示す．3 種類のセメントの環境負荷カテゴリ①と②の数値は，一般社団法人セメント協会の公表データである．評価範囲は，原料の採掘からセメントの製造までである．

(2) アルカリ溶液の環境負荷原単位

図 7.3.2 に，LCA 日本フォーラムデータベース（2015 年度 4 版）が与えているケイ酸ソーダの製造過程（乾式法）におけるエネルギー投入量と汚染物質の排出量を示す．また，ソーダ灰の製造(塩安法)のためのエネルギー消費量と原料投入量も同図に示す．

乾式法の場合，ケイ酸ソーダ（$Na_2O \cdot nSiO_2$, n=3.14）の生成反応は，式(7.3.4)に示すようにソーダ灰の脱炭酸反応を含む．

$$\underset{\substack{106\\446\ kg}}{Na_2CO_3} + \underset{\substack{180\\792\ kg}}{nSiO_2} \rightarrow \underset{\substack{242\\1053\ kg}}{Na_2O \cdot nSiO_2} + \underset{\substack{44\\185\ kg}}{CO_2} \qquad n = 3.14 \qquad (7.3.4)$$

これらのデータに基づいて，参考文献 13)に示すエネルギー消費の排出原単位を利用して，**図 7.3.2** に示す排出量に係わる過程を除いた他の過程による環境負荷を計算した．珪砂の採掘による環境負荷を陸砂に参照して計上した．石灰石と珪砂の採掘による土地利用変化量および森林 CO_2 固定の減少量も評価した．また，ケイ酸ソーダの製造に発生するソーダ灰の脱炭酸反応による CO_2 排出量(0.182kg-CO_2/kg－ケイ酸ソーダ)もケイ酸ソーダの CO_2 排出原単位に加算した．しかし，工業塩とアンモニアの製造による環境負荷が不明であるため，その評価を除外した．さらに，ケイ酸ソーダと水を 1：1 の体積比で混合した水ガラス水溶液(WG)の環境負荷を求めた．

図 7.3.3 に，LCA 日本フォーラムデータベース（2015 年度 4 版）が与えている 48.5%濃度の液状苛性ソーダを製造するためのエネルギーの投入と汚染物の排出量を示す．LCA 日本フォーラムデータベースに提供されない負荷量をエネルギー消費量によって算出した．次に，48.5%濃度の液状苛性ソーダを水で希釈して調製した 10M の苛性ソーダ水溶液(NH)の環境負荷を計算した．最後に，WG と NH の水溶液を 3：1 の体積比で調製したアルカリ溶液 AS31 の環境負荷を求めた．これらの計算結果を**表 7.3.2** に示す．

表 7.3.2 に示すように，塩安法によるケイ酸ソーダの CO_2 排出原単位は 1.25kg-CO_2/kg である．この値は Fawer ら[8]の結果（1.07kg-CO_2/kg）より大きい．また，ケイ酸ソーダのエネルギー消費の原単位は 16.7MJ/kg で，Fawer ら[8]の結果(10.9 MJ/kg)より大きい．これは，日本の発電と化石燃料輸入・製造の環境負荷原単位が大きいためであると推測している．ケイ酸ソーダのエネルギー消費の原単位が大きい位が大きいのは，

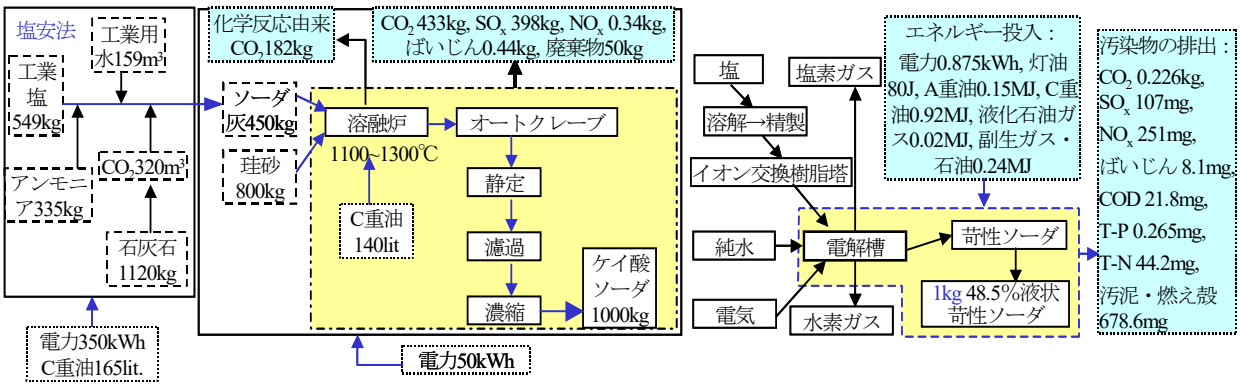


図 7.3.2　ケイ酸ソーダの製造(乾式)における投入と排出

図 7.3.3　48.5%液状苛性ソーダの製造における投入と排出

表 7.3.2　環境負荷原単位および廃棄物処分回避型環境負荷原単位(kg あたり)

環境負荷項目 / 材料(単位: kg)・プロセス	エネルギー (MJ)	CO_2 (kg)	SO_x (g)	NO_x (g)	CH_4 (g)	N_2O (g)	PM (g)	COD (g)	T-N (g)	T-P (g)	埋立廃棄物 (kg)	原油 (kg)	石炭 (kg)	天然ガス (kg)	CO_2固定減少量(kg)	土地利用改変(m^2)
水道水	1.39E-02	9.93E-04	1.08E-03	2.29E-03	1.00E-03	3.20E-05	3.77E-06	1.10E-04	9.00E-05	1.00E-05	5.44E-05	1.40E-05	2.94E-05	7.97E-06	3.295E-08	6.40E-09
砕石	6.14E-02	2.83E-03	2.52E-03	9.48E-03	8.42E-05	6.23E-05	9.18E-04	7.77E-06	2.77E-05	3.45E-06	3.40E-03	4.81E-04	2.46E-04	3.56E-05	1.662E-03	2.04E-05
砕砂	7.99E-02	3.50E-03	2.79E-03	9.83E-03	8.42E-05	6.63E-05	9.32E-04	8.51E-06	3.75E-05	4.78E-06	3.41E-03	5.31E-04	3.55E-04	4.88E-05	1.662E-03	2.04E-05
山・陸砂	3011E-02	2.06E-03	2.96E-03	1.34E-02	1.29E-04	8.18E-05	1.36E-03	8.94E-06	9.34E-06	7.65E-07	3.65E-06	5.70E-04	7.93E-06	9.79E-06	1.660E-03	2.00E-05
川・海-砂	8.06E-03	5.47E-04	2.76E-03	9.49E-04	4.94E-05	6.14E-05	8.39E-05	2.22E-08	7.54E-07	1.03E-07	3.99E-07	1.48E-04	7.79E-06	3.19E-06	5.600E-03	4.69E-11
普通セメント	3.42E+00	7.86E-01	1.02E-01	1.50E+00	1.60E-02	4.00E-03	4.00E-02	1.49E-05	1.89E-04	2.58E-05	9.93E-05	1.89E-02	9.60E-02	3.30E-04	2.207E-03	2.53E-05
普通セメント*　(処分回避型)	3.33E+00	7.52E-01	9.44E-02	1.49E+00	1.60E-02	1.97E-03	3.87E-02	-1.29E-02	-1.43E-03	-1.29E-05	-1.41E-01	1.87E-02	9.55E-02	2.71E-04	2.121E-03	8.75E-06
高炉セメント	2.05E+00	4.58E-01	6.70E-02	8.75E-01	1.00E-02	2.00E-03	2.40E-02	6.85E-06	1.62E-05	2.13E-06	6.64E-05	1.17E-02	5.64E-02	2.21E-04	1.263E-03	1.45E-05
高炉セメント*　(処分回避型)	1.77E+00	4.30E-01	5.93E-02	8.61E-01	1.00E-02	7.95E-04	2.31E-02	-4.59E-02	-5.51E-03	-1.05E-04	-4.95E-01	1.09E-02	5.48E-02	1.90E-05	1.008E-03	-3.50E-05
フライアッシュセメント	2.69E+00	6.45E-01	8.50E-02	1.23E+00	1.30E-02	3.00E-03	3.30E-02	1.08E-05	1.36E-04	1.85E-05	7.15E-05	1.49E-02	7.65E-02	2.42E-04	1.882E-03	2.16E-05
フライアッシュセメント* (処分回避型)	2.53E+00	6.12E-01	7.74E-02	1.22E+00	1.30E-02	1.32E-03	3.18E-02	-2.64E-02	-3.08E-03	-4.82-05	-2.86E-01	1.44E-02	7.56E-02	1.24E-04	1.709E-03	-1.20E-05
フライアッシュ (JIS II 種)	1.23E+00	4.44E-02	1.76E-02	2.26E-02	1.05E-09	2.64E-04	9.31E-04	5.04E-05	6.45E-04	8.81E-05	3.40E-04	3.27E-03	7.20E-03	8.73E-04	2.058E-07	4.00E-08
フライアッシュ(JIS II 種)* (処分回避型)	6.55E-01	2.37E-02	9.34E-03	1.18E-02	-3.10E-06	1.39E-04	4.65E-04	-9.28E-02	-1.05E-02	-1.18E-04	-1.00E+00	1.73E-03	3.85E-03	4.66E-04	-6.057E-04	-1.18E-04
高炉スラグ微粉末 (JIS 4000 級)	1.66E+00	5.99E-02	2.38E-02	3.06E-02	1.42E-09	3.56E-04	1.26E-03	6.80E-05	8.71E-04	1.19E-04	4.58E-04	4.42E-03	9.71E-03	1.18E-03	2.776E-07	5.39E-08
高炉スラグ微粉末 (4000)* (処分回避型)	1.08E+00	3.92E-02	1.55E-02	1.97E-02	-3.10E-06	2.31E-04	7.90E-04	-9.28E-02	-1.02E-02	-8.71E-05	-1.00E+00	2.88E-03	6.36E-03	7.71E-04	-5.148E-04	-1.00E-04
標準減水剤（リグニン系）	3.40E+00	1.23E-01	4.88E-02	6.27E-02	2.92E-09	7.32E-04	2.58E-03	1.40E-04	1.79E-03	2.44E-04	9.41E-04	9.06E-03	1.99E-02	2.42E-03	9.690E-07	1.88E-07
高性能減水剤(ポリカルボン酸系)	4.14E+00	1.50E-01	5.95E-02	7.65E-02	3.56E-09	8.92E-04	3.15E-03	1.70E-04	2.18E-03	2.98E-04	1.15E-03	1.11E-02	2.43E-02	2.95E-03	1.18E-06	2.29E-07
10 ダンプトラック輸送 (km･t)	3.18E+00	1.76E-01	2.10E-01	8.97E-01	8.46E-03	5.61E-03	8.99E-02	2.01E-01	2.45E-02	4.87E-04	2.15E-04	4.04E-02	7.23E-03	1.46E-03	2.216E-07	4.30E-08
生コン製造（m^3）	1.31E+01	4.73E-01	1.88E-01	2.41E-01	1.12E-08	2.81E-03	9.92E-03	5.37E-04	6.87E-03	9.39E-04	3.62E-03	3.49E-02	7.67E-02	9.29E-03	2.13E-06	0.00E+00
ケイ酸ソーダ(乾式,石灰石分解)[1)]	1.67E+01	1.25E+00	4.16E+00	1.28E+00	9.59E-02	1.88E-01	5.81E-01	4.81E-03	2.73E-03	3.07E-04	5.10E-02	2.76E-01	2.31E-02	6.95E-03	1.890E-03	2.84E-05
ケイ酸ソーダ [1)]の水溶液(1：1), a	1.01E+01	7.59E-01	2.52E+00	7.76E-01	5.85E-02	1.14E-01	3.52E-01	2.96E-03	1.69E-03	1.90E-04	3.09E-02	1.68E-01	1.40E-02	4.22E-03	1.146E-03	1.72E-05
苛性ソーダ水溶液(濃度 48.5%)	9.91E+00	2.27E-01	1.07E-01	2.51E-01	7.97E-03	1.55E-02	8.14E-03	2.18E-02	4.42E-02	2.65E-04	6.78E-04	9.93E-02	5.01E-02	6.85E-03	4.112E-07	7.98E-08
10M 苛性ソーダ水溶液, b	6.29E+00	1.44E-01	6.85E-02	1.60E-01	5.42E-03	9.81E-03	5.16E-03	1.39E-02	2.80E-02	1.72E-04	4.50E-04	6.29E-02	3.17E-02	4.34E-03	2.726E-07	5.29E-08
アルカリ溶液(a : b = 3 : 1, 体積比)[1)]	9.13E+00	6.01E-01	1.89E+00	6.17E-01	4.49E-02	8.74E-02	2.63E-01	5.77E-03	8.47E-03	1.85E-04	2.31E-02	1.41E-01	1.86E-02	4.25E-03	8.512E-04	1.28E-05
高温養生(50-65℃, 2~3 時間) (m^3)	2.95E+02	2.19E+01	5.76E+01	4.61E+01	2.07E+00	1.91E-07	4.19E-03	2.27E-04	2.91E-03	3.97E-04	1.53E-03	6.57E+00	2.18E-03	1.03E-01	9.271E-07	1.80E-07

[注] 1) 塩安法（石灰石の加熱分解で CO_2 を提供）によるソーダ灰を利用して製造したケイ酸ソーダ

原料のソーダ灰，ケイ酸ソーダの製造過程では電気が多くかかるためである．平成 26 年度の電解ソーダ工業の電力消費量は約 87 億 kWh で，産業用電力消費量の約 5%，化学工業全体の約 25%を占める量となっている．現在，コストが安い天然ソーダ灰の輸入はおよそ日本国内消費量(59 万トン)の半分（27 万トン）を占めている(2012 年データ)．**図 7.3.2** によって，ケイ酸ソーダの CO_2 排出量の半分程度が，石灰石の分解に起因している(320m^3×1.9768kg/m^3=632.6kg-CO_2/t)．本研究では，最悪のシナリオとして人工ソーダ灰で製造したケイ酸ソーダを使用した GP の環境負荷を評価した．

(3) 加温養生の環境負荷原単位

PC コンクリート二次製品は通常に 50～65℃の蒸気養生で行う．したがって，GP コンクリートの加温養生はこの温度で行われることにした．土木学会建設技術研究委員会建設技術体系化小委員会の 2011 年のアンケート調査結果 [15]によると，1 トンのコンクリートを 50～65℃で 2～3 時間養生する場合には，蒸気を供給するボイラーの重油代は 300 円である．コンクリートの単位容積質量を 2.35t/m^3 とし，当該年度の全国平均重油価格で重油量を換算すると，1m^3 コンクリートを 2～3 時間加温養生することは 7.56 リットルの重油を消費することがわかった．重油の消費量に文献 13)中の重油 A の環境負荷原単位をかけると，加温養生の環境負荷原単位が**表 7.3.3** に示すように得られた．

(4) 使用材料，練混ぜ，輸送および加温養生の環境影響原単位

表 7.3.2 に示す各使用材料，練混ぜ，加温養生および 10t ダンプトラック輸送の環境負荷原単位に基づいて，**表 7.3.2** に示す 14 種の環境負荷項目をすべて考慮し，各項目の環境影響統合化係数を用いて，使用材料，練混ぜ，養生および材料輸送の環境影響原単位を計算した．その結果を**表 7.3.3** に示す．酒石酸塩を主成分とする GP 用遅延剤の製造によるエネルギーと原料の投入がはまだ不明であるため，その環境負荷と環境影響の原単位が標準形減水剤と同等であると近似した．

表 7.3.3 環境影響原単位

環境影響原単位の種類 / 使用材料・プロセス	I_{pm}, I_t, I_{moc} (円)	I^*_{pm} (円)
普通セメント (kg)	7.848E+00	3.397E+00
フライアッシュセメント(kg)	6.453E+00	-2.431E+00
高炉セメント(kg)	4.606E+00	-2.462E+00
フライアッシュ (JIS II 種) (kg)	3.997E-01	-1.989E+01
高炉スラグ微粉末(JIS 4000 級) (kg)	5.392E-01	-1.375E+01
水道水 (kg)	1.043E-02	1.043E-02
砕石 (kg)	1.496E+00	1.496E+00
砕砂 (kg)	1.502E+00	1.502E+00
山・陸砂 (kg)	1.432E+00	1.432E+00
川・海砂 (kg)	3.024E-02	3.024E-02
標準形減水剤/GP 遅延剤 (kg)	1.117E+00	1.117E+00
高性能減水剤 (kg)	1.360E+00	1.360E+00
48.5%苛性ソータ水溶液 (kg)	2.785E+00	2.785E+00
ケイ酸ソーダ [1] (kg)	3.063E+01	3.063E+01
アルカリ溶液(kg)[2]	1.444E+01	1.444E+01
10t ダンプトラック (km･t)	2.932E+00	2.932E+00
生コン製造 (1m^3)	4.295E+00	4.295E+00
50~65℃2～3 時間高温養生(m^3)	3.440E+02	3.440E+02

[注] 1) 塩安法で製造したソーダ灰を用いて製造したケイ酸ソーダ
2) 塩安法で製造したソーダ灰を用いて製造したケイ酸ソーダで調製したアルカリ溶液 [ケイ酸ソーダ水溶液（水との体積比 1：1)：10M 苛性ソーダ水溶液＝3：1(体積比)]

7.3.3　ジオポリマーコンクリートの環境負荷と環境影響の評価例

(1) コンクリートの使用材料，配合および性能

表 7.3.4 に示すコンクリートの配合は，参考文献 16)～18)，北兵庫生コンクリート(株)豊岡工場のレディーミクストコンクリート標準配合および福井小野田レミコン(株)本社工場の生コンクリート標準配合から引用したものである．シリーズ GP-C1 と GP-C2 は，FA/BFS 系 GP コンクリートであり，遅延剤の添加のため，凝結始発時間が 80～90 分であった．シリーズ OPC-C1 と BB-C1 に，砕砂(70%)と山砂(30%)の混合砂を使う．しかし，シリーズ OPC-C2 と BB-C2 に使われる 7：3(質量比)の混合砂の種類は不明である．結合材料の影響に着目ため，異なるコンクリートの環境負荷と環境影響を計算する時に砂の種類を区別せず，川砂の環境負荷原単位と環境影響原単位を用いて計算を行った．なお，シリーズ OPC/BFS-C と OPC/FA-C では，普通ポルトランドセメント(OPC)は 30%の BFS や 20%の FA に代替された．骨材，BFS・FA・セメントおよびアルカリ水溶液の原料・混和剤が 10 t ダンプトラックでそれぞれ 30，100，150km 輸送されると仮定した．

OPC/BFS-C の圧縮強度は他のシリーズの常温養生圧縮強度より若干高いが，GP-C1 の流動性と圧縮強度は，GP-C2 と OPC/BFS-C を除き，他の各シリーズと同じレベルである．GP-C2 の流動性と 60℃6 時間の気中封緘養生後の圧縮強度は，シリーズ OPC-C3 の流動性と 20℃養生後の圧縮強度とほぼ同じである．

(2) 環境負荷と環境影響の評価結果

GP コンクリート(GP-C)，OPC や混合セメントを用いたコンクリートの CO_2 排出量，エネルギー消費量および環境影響(外部コスト)の評価結果を**表 7.3.4** に示す．GP-C の CO_2 排出量は，従来のセメントを用いたコンクリート OPC-C， BB-C，OPC/BFS-C および OPC/FA-C より小さく，OPC-C の 55%(常温養生)または 59%(給温養生),BB-C や混和材を添加した OPC-C の 80-90%である．

しかし，GP-C のエネルギー消費原単位は，OPC や BB を用いたコンクリートより大きく，OPC-C の 1.75 倍

表 7.3.4　コンクリートの調合(kg/m³)および性能

使用材料		GP-C1	GP-C2	OPC-C1	OPC-C2	OPC-3	BB-C1	BB-C2	OPC/BFS-C	OPC/FA-C
水		-	-	179	168	165	176	166	158	150
アルカリ溶液 d)		185	200	-	-	-	-	-	-	-
OPC		-	-	348	324	434	-	-	201	218
BB				-	-	-	349	346	-	-
FA		259	280				-	-	-	55
BFS		111	120						86	-
細骨材	川砂	818	756	-	-	-	-	-	903	913
	海砂	-	-			688			-	-
	砕砂			815 砕砂と山砂の混合砂	794 種類不明の混合砂		807 砕砂と山砂の混合砂	761 種類不明の混合砂		
	山・陸砂									
砕石		1000	1000	932	994	1048	935	1004	972	984
混和剤 a)		18.50	20.00	3.48	3.24	4.34	3.14	3.46	2.3	2.18
性能	Sl.(cm)	14	21	15	15	21	15	15	12.0±2.5	12.0±2.5
	圧縮強度 (MPa)	29.3	29.1 54.1 e)	呼び 27 配合 32.8	呼び 27 配合 30	54.3	呼び 27 配合 32.8	呼び 27 配合 30.8	40.5	32
出典		参考文献 16)		b	c	参考文献 18)	b	c	参考文献 17)	

[注] a：シリーズ GP-C1 と GP-C2 に遅延剤を添加したが，シリーズ OPC-3 に高性能 AE 減水剤を，他のシリーズに標準形 AE 減水剤を用いた。b：北兵庫生コンクリート(株)豊岡工場 レディーミクストコンクリート標準配合，c：福井小野田レミコン(株)本社工場生コンクリート標準配合,OPC：普通ポルトランドセメント，BB：高炉セメント B 種，FA：JIS I 種フライアッシュ，BFS：JIS 4000 級高炉スラグ微粉末，Sl：スランプ，d：アルカリ溶液は，JIS1 号水ガラスの水溶液（体積比 1：1）と 10M 苛性ソーダ水溶液を 3：1 の体積比混合したものである，e：60℃で 6 時間養生された試験体の 28 日材齢の圧縮強度

表 7.3.5　コンクリートの環境負荷と環境影響の評価結果

シリーズ	GP-C1	GP-C2	OPC-C1	OPC-C2	OPC-3	BB-C1	BB-C2	OPC/BFS-C	OPC/FA-C
CO_2 (kg/m^3)	158 (55%)	*213* *(59%)*	296 (100%)	277 (100%)	*363* *(100%)*	182 (64%)	181 (63%)	195 (68%)	185 (65%)
エネルギー消費 (MJ/m^3)	2744 (175)	*3530* *(178)*	1614 (100%)	1527 (100%)	*1985* *(100%)*	1141 (73%)	1141 (73%)	1215 (77%)	1236 (79%)
環境影響 (円/m^3) a)	4789	*5718*	4508	4404	*5331*	3388	3477	3568	3360
環境影響 (円/m^3) b)	-2052	*-1677*	2959	2962	*3400*	920	1031	1482	1322

[注] a：廃棄物のリサイクルによって埋立処分を回避する環境便益を考慮しない。b：廃棄物のリサイクルによって埋立処分を回避する環境便益を考慮した。

(常温養生) または 1.78 倍(給温養生)である．これは，前述したように，ケイ酸ソーダと苛性ソータの製造に電力消費が多いためである．逆に，セメントクリンカーの焼成工程に，廃油，プラスチックおよびタイヤなどの廃棄物が石炭を代替して焼却され，セメント製造のエネルギー消費量が大幅に減少している．

一方，廃棄物のリサイクルによって埋立処分を回避する環境便益を考慮しない場合，GP コンクリートの環境影響は，養生方法と強度レベルによらず，正値であり，OPC や BB を用いたコンクリートより大きい．これは，GP コンクリートに使われるアルカリ溶液の製造に多量なエネルギーがかかるためである．しかし，廃棄物の再利用による埋立処分回避の環境便益を考慮した場合，GP コンクリートの環境影響は，養生方法にかかわらず大幅に減少し，負値になる．即ち，GP-C は，廃棄物の大量利用によって環境を保全する効果がある．

7.4　結論

(1) 従来のコンクリートに比べ，高炉スラグ微粉末(BFS, 30%)とフライアッシュ(FA, 70%)を活性フィラーとし，苛性ソーダと人工ソーダ灰によるケイ酸ソーダで調製したアルカリ溶液を用いたジオポリマーコンクリート(FA/BFS 系 GP-C)の CO_2 排出量は小さいが，エネルギー消費量は大きい．FA/BFS 系 GP-C の CO_2 排出原単位は，普通ポルトランドセメント(OPC)を用いたコンクリートの 5～6 割，高炉セメントを用いるコンクリートまたは OPC の一部が BFS や FA で代替されるコンクリートの 8～9 割である．FA/BFS 系 GP-C のエネルギー消費原単位は OPC コンクリートの 1.75 倍程度である．

(2) FA/BFS 系 GP-C の環境影響は，廃棄物のリサイクルによって埋立処分を回避する環境便益を考慮しない場合には従来のコンクリートより大きいが，埋立処分回避の環境便益を考慮した場合には負値になる．GP-C は，廃棄物や副産物を大量に利用するもので，環境保全効果があるといえる．

今後，太陽光発電および風力発電などの再生エネルギー利用の増加に伴い，電力原単位は減少していくと予想している．原料の製造に電気消費が多いアルカリ溶液の CO_2 排出原単位とエネルギー消費原単位が小さくなり，GP-C の環境負荷原単位は減少すると考えられる．また，塩安法で石灰石の加熱分解によって炭酸ガスを得てソーダ灰を製造しているが，発電所等の他産業に排出される CO_2 でソーダ灰を製造すれば，ケイ酸ソーダの環境原単位が減少し，CO_2 再利用の一途になる．なお，従来のコンクリート用の減水剤に相当する減液剤が将来に開発されれば，GP-C に使用するアルカリ溶液を削減することができ，GP-C の環境負荷がさらに減少する．したがって，GP は環境に優しい低炭素材料として期待できる．

参考文献

1) J. Davidovits: A review on GP cement, Geopolymer Institute (http://www.geopolymer.org/), pp.1-10, 2003.1

2) B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Arie van Riessen, and G. D. Corder: Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, Journal of Cleaner Production, Vol.19, pp.1080-1090, 2011

3) M.Weil, D. K.ombrowski, and A. Buchwald: Life-cycle analysis of geopolymers, In: Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J. (Eds.), Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, pp. 194-210, 2009

4) T. Stengel, R J.eger, and D. Heinz: Life cycle assessment of geopolymer concrete - what is the environmental benefit?, In: Concrete Solutions 09, Concrete Institute of Australia, Sydney, Australia, p. Paper 6a-4, 2009

5) L. K.Turner, and F. G Collins: Carbon dioxide equivalent (CO_2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Construction and Building Materials, Vol. 43, pp.125-130, 2013

6) J. Davidovits: False Values on CO_2 Emission For Geopolymer Cement/Concrete published In Scientific Papers, Technical Paper #24, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org, 2015.

7) G. Habert, J.B. d'Espinose de Lacaillerie, and N. Roussel: An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, Journal of Cleaner Production, Vol.19, pp.1229-1238, 2011

8) M. Fawer, M. Concannon, and W. Rieber: Life cycle inventories for the production of sodium silicates, International Jounal of LCA, Vol.4, No.4, pp.207-212, 1999

9) Z. Li, Y. Yamamoto, and M. Sagisaka: Environmental life cycle assessment of concrete containing fly ash, Proc. of 6th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete (USA), pp. 573-588, 2004.5

10) Z. Li, Y. Yamamoto, and T. Ohkubo: Evaluation of environmental performance of concrete based on social cost, Proc. of RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development (Japan), pp.43-50, 2004.9

11) 李柱国ほか: コンクリートの環境性能評価法と環境配慮型調合設計法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.280-285, 2006

12) 李柱国ほか: 環境配慮型材料設計のためのコンクリートの環境負荷性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No.1, pp.765-770, 2007

13) 李柱国,大久保孝昭: コンクリートの環境影響の評価方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.720, pp.199-209, 2016.2

14) 李柱国: コンクリートの環境性能と評価支援するツール　その 1) 環境性能の定義と評価法, 第 76 回セメント技術大会講演要旨, pp.174-175, 2022.5

15) https://committees.jsce.or.jp/sekou05/system/files/10-5%20 養生材料.pdf

16) 岡田朋久,李柱国,橋爪進,永井伴英: 凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.1, pp.2295-2300, 2016

17) 福留和人ほか: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの強度特性と細孔構造に関する研究, ハザマ年報, pp.1-7, 2012.12.

18）李柱国，流田靖博：高温加熱を受けたコンクリートの再養生による性能変化と回復に関する研究－鉄筋との付着強度について，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.371-378，Vol.69，2016.

（執筆者：李　柱国）

８．耐酸材料

8.1 はじめに

ジオポリマー（GP）は，シリカとアルミナを主たるバインダーとしていることから，カルシウムをバインダーとしている普通ポルトランドセメントコンクリート（OPC）と比較して，耐酸性に優れているとの研究成果が複数報告されている．本章では，ジオポリマーの耐酸性に対する抵抗メカニズムおよび性能について，代表的な文献に基づいてとりまとめている．

8.2 耐酸メカニズムと耐酸性能

塩酸に対する耐酸メカニズムに関して，OPC を対象とした場合，カルシウム相が水溶性の $CaCl_2$ に変化し，組織が疎になりながら，質量減少を生じる．また，硫酸では，カルシウム相が石こうとエトリンガイトに変化することで，固相のまま膨張圧を生じ，ひび割れや剥離につながることが報告されている．

一方，GP の耐酸メカニズムに関して，弱酸の場合，GP の格子中にある Na^+ や K^+ といった陽イオンが酸中の H^+ に置換される．ここで Na などは共有結合ではなく，電気的なバランスを取るために Si-O-Al 相にひきつけられているものであることから，H^+ のような別の陽イオンが侵入してくると徐々に置換され，自由イオンとなって GP 外へと溶脱し易い．溶脱に対しては，主として組織の緻密性が影響し，緻密なものほど溶脱速度が小さい．対照的に強酸に浸漬された場合，アルミノシリケートの結合子に直接 H+が作用し，Si-O-Al 相そのものを分解することから，組織そのものが崩壊し，顕著な劣化へとつながるものと推察される．ただし，これらの進行過程は OPC と比較すると十分に遅いことから，OPC に対する相対的な耐酸性は高い傾向にある．

GP の耐酸材料に関する研究に着目すると，海外ではフライアッシュはもとよりメタカオリンを活性フィラーとした研究事例が多い．全般的な傾向として，ジオポリマーは耐酸性に優れた材料として認識されている．

国内における耐酸材料としての研究成果では，フライアッシュ（FA）を主たる活性フィラーとした研究事例が多い．一宮ら[1)]，合田ら[2)]，原田ら[3)]は，FA または FA ベースで一部を BFS で置換した配合の固化体を用いた GP を対象として硫酸浸漬試験を実施している．いずれの場合も OPC に対する GP の優位性を報告している．一宮ら[1)]は，5%硫酸浸漬試験ならびに大分県別府市の明礬温泉における温泉水への浸漬実験を実施した．同結果によると，硫酸浸漬実験では BFS 置換率が高いほど表層部の劣化は多いものの，OPC と比較して劣化は軽微であり，GP の優れた耐酸性が確認できる．また，5%硫酸浸漬と比較して酸性温泉地での劣化速度が小さいことが確認された．

深野ら[4)]は，FA の一部を高炉スラグ微粉末（BFS）で置換した GP モルタルを対象として，浸漬溶液である 10%硫酸の温度を 20℃，70℃にそれぞれ設定し，質量変化ならびに強度変化の温度依存性について検討した．その結果，20℃と比較して，70℃の質量変化ならびに強度変化ともに大きく，劣化に温度依存性があることを示した．

高河内ら[5)]は，FA の一部を BFS に置換した GP を対象として，アルカリシリカ溶液量，BFS の粉末度，遅延剤の添加，養生方法等が耐酸性に及ぼす影響について検討した．その結果，遅延剤を用いた場合でも，OPC と比較して高い耐酸性を示すことを確認した．加えて，BFS の粉末度が大きく遅延剤を無添加とした場合，水中養生よりも気中養生の方がそれぞれ高い耐酸性を示した．しかしながら，単位アルカリシリカ溶液量の相違が耐硫酸性に及ぼす影響については確認されなかった．

浸漬溶液としては，硫酸を用いた事例が多いが，塩酸や硝酸を対象とした研究事例も報告されている．深野ら[4]は，同一硫酸イオン環境下で pH の相違が GP の劣化特性に及ぼす影響について，10%硫酸(H_2SO_4)(pH=0.30）と 10%硫酸ナトリウム（Na_2SO_4）（pH=7.0）に，FA ベースで BS 置換率 0，10，20，30%のモルタル供試体（40×40×80mm）を浸漬させた．その結果，強酸の H_2SO_4 環境下では劣化が認められたのに対して，中性の Na_2SO_4 環境下では劣化は認められなかった．すなわち，OPC では顕著な劣化を示す硫酸塩に対して高い抵抗性を示すことが確認された．

五十嵐ら[6]は，FA 系および電気炉スラグ(ES)を活性粉体とした GP を 35%塩酸に 28 日間浸漬させた．同研究では，細骨材として珪砂と ES を使用していたが，珪砂を使用した GP では浸漬開始から浸漬期間 28 日時点までにおいて，ほとんど質量変化を示さなかった．一方，電気炉酸化スラグを使用した GP モルタルは，浸漬 7 日時点までに質量が約 20%減少し，その後 28 日時点 において約 25%の減少に留まっていることが確認された．また，望月ら[7]も同様の研究内容を展開している．

海外の研究成果に着目すると，Silverstrim ら[8]は，FA 系 GP 供試体を 70vol.%の硝酸に 3 か月浸漬させた．その結果，ジオポリマーでは緻密な細孔構造が形成されたことにより，試験前と同様に同材料の形状が保持されていたことを確認した．

ここで，酸に対する抵抗性に関するメカニズムについて，以下に示す理論が展開されている．Allahverdi ら[9]は，GP ペーストを硝酸に浸漬した場合の劣化状況について検討した．その結果，硝酸による GP の劣化は僅少であること，Na^+と K^+の溶出による腐食は，溶液からの H^+もしくは H_3O^+イオンの消費と交換によること，そして，Si-O-Al 相での酸性陽イオンによる求電子的な腐食は，部分的な脱アルカリ化と脱カルシウム化による Si や Al リッチな残留物を形成すること，溶出過程におけるペーストの収縮はひび割れを伴い，それによりイオンの移動による腐食層の防止効果を低下させ，GP の Na や K などの溶出物質の低下により高い耐酸性を期待できることを報告している．また，種々の硝酸溶液に浸漬させた GP 硬化体を対象とした実験の結果に基づき，2 段階での腐食メカニズムを仮定している．

Step1：アルミノシリケートを電荷的に安定させるために，アルカリ陽イオンが周辺に存在している．このアルミノシリケート中にある四面体の Al^+は，酸から供給される H^+によって置換される．Si-O-Al を結合している格子が酸の陽イオンによって電気的な侵攻を受け，アルミノシリケートから Al+が排出される．

Step2：反応形態として未完了の状態にある中で， Al^+の排出によってスペースが空いた原子サイズの領域に，シリカが再配置される．

上記の仮説について，Rostami ら[10]が，酸浸漬前後の SEM 観察を実施し，類似したミクロ構造を示した．対象はクラス F の FA(CaO20%未満)を用いた GP であり，10%の硫酸に 8 週浸漬させた．同試験では，3%の質量減少と 35%の強度低下が確認された．同試験は pH=1.0 の硫酸環境下で実施され，強酸の拡散作用により劣化が進行した．劣化は表層から徐々に進行し，劣化深さは浸漬期間に比例した．大量の Na^+と Al^+が劣化した GP から浸出していることが確認された． さらに，GP 内の pH は，11 程度から 3 へと変化していた．以上より，硫酸から供給された硫酸イオンと H^+は，コンクリート中に浸透していると考えられる．しかしながら，SEM で観察すると劣化している領域と劣化していない領域では明らかな組織の相違は確認できなかった．

Song ら[11]は，pH が 3 よりも小さいときに酸溶液内に GP が溶出するようになると報告している．ただ，骨材間を結合する機能は保持していると考えられる．

Fernndez-Jimenez ら[12]の研究では，FA 系 GP を 0.1N，pH=1.0 の HCl に浸漬させた．外観観察より，90 日時点では，GP に外観上の変化はなく健全のようであった．OPC では，56 日時点で激しく劣化しており，変色と立方体上の供試体の角の欠損を確認した．強度についてみると，水酸化ナトリウム系 GP あるいはナトリウ

ムシリカ系 GP では，23～25%の強度低下がみられたが，OPC では，前述の 2 倍に相当する 47%の強度低下があった．この強度低下については，劣化による体積の減少によるところが大きい．XRD の結果より，浸漬前後でモルタル中の成分に変化がみられた.ゼオライト相にみられるピークが浸漬経過とともに消失していった．その一方で，同時期に非晶質で確認されるハロー（ピークがなく，緩やかな丘状になること）の増加がみられた．別の観点から見ると，HCl 溶液による侵食は，アルミニウム相の分解を引き起こすもので，硝酸や硫酸による侵食に類似している．この考え方は，Na^+やK^+がH^+に置換されるという一連の反応で表現される「GP の生成物と酸溶液間での相互作用のメカニズム」を裏付けるものである．

アルカリ陽イオンは，酸抵抗性を評価する上で極めて重要な役割を果たしているといえる．Weldes ら[13]によると，K^+を含有するシリケートは，Na+を含有するシリケートよりも硫酸や中性化に対する抵抗性が高い傾向がある．しかしながら，K+のマトリクスは結晶質の割合が小さく，HCl に対する抵抗性が低い傾向にあることを Van Jaarsveld ら[14]は述べている．化学的侵食に対する GP の抵抗性について，OPC よりも良好であることが記載されている．耐硫酸塩に対して，OPC と GP との大きな相違は，カルシウム相の量であり，カルシウム相が多い OPC では C-S-H や $Ca(OH)_2$が石こうやエトリンガイトへと変化することで劣化が進行すると考察している．OPC では，強酸，弱酸といった酸性の度合いはもちろん，カルシウム相に影響する硫酸イオンの存在そのものが大きいとしている．

Bakharev[15]の研究では，FA を使用した GP を 5%の酢酸（pH=2.4）と硫酸（pH=0.8）にそれぞれ浸漬させた．パラメータは，OPC，NaOH ベースの FA 系 GP，Na 系シリケートである．最も耐食性に優れていたのは，GP であり，H+によって Na+や K+が水素イオンに置換され，アルミノシリケート高分子の分解につながったものと考えられる．この結果は，ケイ酸質ポリマーやゼオライトの溶脱へとつながるとともに，深刻な強度低下を招くケースもあった．

水酸化ナトリウムを用いたより結晶質の GP は，Na 系 GP(非晶質)と比較して，酸に対する抵抗性が高い傾向がみられる．化学的不安定性についてみると，アルミノシリケートゲルの表面にみられる活性化領域（K+が存在している反応しやすい非晶質部）に依存する．

弱酸に浸漬した GP の相互作用について，酸中のH^+によって GP の格子中にある Na+や K+といった陽イオンが置換されることが判明している．しかしながら，強酸に浸漬された場合は，アルミノシリケートの結合子に直接H^+が作用する．このH^+の侵攻により，Si-O-Al の結合が崩壊し，Si-OH や Al-OH といった分解生成物が GP 内に増加していき，ケイ酸イオンが溶液中に増加していく．この一連の過程は，GP の質量減少を招くとみられる．Si/Al が 1 の無機 GP では，よりケイ酸質の割合が多い GP よりも，酸によって劣化しやすい．その他の Al 結合子が分解する過程をみると，Si/Al の割合の増加やポリマーの結合鎖長に起因するものと考えられる．

OPC では，硫酸や酢酸に浸漬すると 1 ヶ月で完全に劣化に至る．これは，材料中に多くカルシウムを含有していることに起因する．一方，GP では，酢酸環境下に曝露されると，低品質の GP では，ゼオライトの結晶で凹凸となった脆化した組織に変化しながら劣化する．高品質の GP では，非晶質のポリマーマトリクス中に亀裂を形成しながら徐々に劣化する．

メタカオリンを活性フィラーとするアルカリ刺激材料を対象とした酸性環境下での耐久性に関してみると，例えば，Davidovits ら[16]は，メタカオリン系ジオポリマーを 5%の硫酸に 4 週浸漬させた．この結果，約 7%程度の質量減少が確認されたと報告している．

Wallah ら[17]は，GP コンクリートを 1 年間，2%の硫酸に浸漬させた結果，表面に生じた点食を確認した．さらに顕著な圧縮強度の低下も確認した．一方で，0.5%，1%の硫酸に浸漬させた場合では，圧縮強度の低下

は微小であった.

以上に示す通り，GP は酸に対する抵抗メカニズムとともに，高い耐酸性を示すことが報告されている．GP を酸環境下で使用する場合には，各種 GP 中の Si-O-Al 相と酸から供給される H^+との相互作用ついて評価しつつ，閾値を設定することで実用化への展開が可能になると期待される.

参考文献

1) 一宮一夫ら：活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp. 2005-2010，2013
2) 合田寛基ら：フライアッシュⅡ種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp. 1993-1998，2015
3) 原田耕司ら:ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.33,No.1，pp. 1937-1942，2011
4) 深野雄三ら：ジオポリマーモルタルの化学的侵食に対する抵抗性，土木構造･材料論文集，Vol.32，pp.151-158，2017
5) 高垣内仁志ら：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートの耐硫酸性に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp. 2017-2022，2017
6) 五十嵐裕太ら：フライアッシュおよび電気炉酸化スラグを使用したジオポリマーモルタルにおける高濃度塩酸溶液に対する抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp. 2319-2324，2016
7) 望月勇樹ほか：下水汚泥焼却灰を活用したジオポリマーモルタルの基礎的性状に関する研究，土木学会第 71 回年次学術講演会，No.5，pp.407-408，2016
8) Silverstrim T.,et al: 'Microstructure and Properties of Chemically Activated Fly Ash Concrete', Proc. 19th Int. Conf. Cem. Microsc, Int. Cement Microscopy Assoc. pp.355-373, 1997
A. Allahverdi ,Niteric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements, Ceramics - Silikáty 45 (3) 81-88 (2001)
9) Allahverdi, A., et al: Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements', Ceramics-Silikaty, vol.45, No.4, pp.143-149, 2001
10) Rostami, H., et al: 'Alkali Ash Material: A Novel Fly Ash-Based Cement' Environ Sci. Technol., vol.37, pp.34-54, 2003
11) Song, X.J., et al: 'Response of geopolymer concrete to sulphuric acid attack' Geopolymer 2005 Proceedings, pp.157-160, 2005
12) Fernndez-Jimenez, A., et al: 'Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials', J. Materials Science, vol.42, pp.3055-3065, 2007
13) Weldes, H.H., et al: 'Properties of soluble silicates. ' Ind. Eng. Chem., vol.65, Nol. 14, pp.61-69, 1969
14) Van Jaarsveld, J.G.S., et al: 'Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers', Ind. Eng. Chem. Res., vol.38, pp.3932-3941, 1999
15) Bakharev, T.: 'Resistance of geopolymer materials to acid attack 'Cement Conc. Res., vol.35, pp.658-670, 2005
16) Davidovits J., et al: Geopolymeric Cement based on Low Cost Geopolymer Materials, Results

from the European Research Project GEOCISTEM, Geopolymer '99 Proceeding, pp.83-96, 1999
17) Wallah,E., et al: 'Performance of fly ash-based geopolymer concrete under sulphate and acid exposure', Geopolymer, Proceedings, pp.153-156, 2005

(執筆者　合田　寛基)

９．重金属類･放射性物質の固定

9.1 概要

Cd，Pb 等の重金属類や Sr，Cs 等の放射性物質の固定に関する研究が実施されている[1)]．メカニズムの詳細については 5 章に譲るが，一般に，カチオン選択性については，価数が大きく原子番号が大きいほど，水和イオン半径が小さいため吸着しやすく[5)]，ジオポリマーにおいても，生成物の変化等が生じるような場合を除き，同様であることを示す例も見られる[6)]．陽イオン交換容量について 200(cmol/kg)程度に向上させる方法が見出されており[6)]，各種のゼオライトと比較し遜色ない性能を発現することも可能である．一方で，As，Se 等の一部の重金属類の溶出について，原料に多く含まれる場合など，材料の製造方法や使用される環境も含め，適切に配慮する必要があると考えられる[8)]．このように，重金属類や放射性物質の固定能力を向上可能な材料でありながら，型枠に流し込むことで様々な形状とすることができるセメント・コンクリートと同様の利点を併せ持つことに新規性があると考えられる．

以下では，ジオポリマーによる物質の収着を扱う項，ジオポリマー自身に含まれる物質の溶出を扱う項の 2 つに分け，より詳細に記述する．**表 9.1.1** に対象と考えられる主要な元素，**表 9.1.2** に調査した文献を主たる原料，着目点（収着あるいは溶出）および対象元素により整理したものを示す[1-4,6-17,19-29)]．着目点（収着あるいは溶出）について，文献の内容から総合的に判断したが，概して収着と判断した文献では，比較的高濃度の溶液を用いるものや，対象物質を別途添加する実験など，より濃度の高い系での検討例となっている．

表 9.1.1　重金属（重金属類を含む）と放射性物質の一例

元素	B	F	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Y	Zr	Mo	Cd	Sn	Cs	Ba	W	Hg	Pb	Bi	Th	U
原子番号	5	9	23	24	27	28	29	30	33	34	38	39	40	42	48	50	55	56	74	80	82	83	90	92
重金属			○	○	○	○	○	○				○	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○
重金属類※1	○	○		○					○	○					○					○	○			
放射性物質※2					○	○		○			○						○	○						

※1 土壌汚染対策法において定められている元素
※2 発電用原子炉施設等を対象とする放射能濃度の基準等で対象とされる元素

9.2 ジオポリマー材料における物質の収着

本項では，ジオポリマー材料に対する外部からの物質の固定（収着）を主な対象とする．一般に，カチオン選択性については，価数が大きく原子番号が大きいほど，水和イオン半径が小さいため吸着しやすい[5)]．上原ら[6)]は，ジオポリマーのイオン交換特性について検討しており、高い順に Pb^{2+}，Ba^{2+}，Sr^{2+}，K^{+}，Na^{+}であることを示した．El-Eswed ら[10)]は，既往の研究等を踏まえ，以下の固定メカニズムを提示している．ジオポリマーに含まれる四面体構造(Si-Al)における Al の電荷補償に必要な Na^{+}や K^{+}とのイオン交換（メカニズム 1），ジオポリマーのアルミノシリケート構造内での共有結合による固定（メカニズム 2），すなわち，Si と Al の共有結合性の主鎖構造中への重金属の取り込み（メカニズム 2A），あるいは，末端の非架橋酸素への重金属イオンの化学配位（メカニズム 2B），重金属の水酸化物，炭酸化物，ケイ酸塩，アルミネート塩の形成（メカニズム 3），の 3 つである．

表 9.1.2　文献の調査結果（ベース材料と着目点）

文献番号	材料	着目点	対象元素																						
			B	F	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Y	Zr	Mo	Cd	Sn	Cs	Ba	W	Hg	Pb	Bi	Th	U
1	BFS	収着	−	−	−	○	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−
2	FA	収着	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−
3	BFS, MK	収着	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−
4	FA	収着	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−
6	FA	収着	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	○	−	−	○	−	−	−
7	FA	収着	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	○	−	−	−	○	−	−	−
8	BFS, FA	溶出	○	−	○	○	−	−	○	○	○	○	○	○	○	○	○	−	−	○	○	−	−	−	−	−
9	FA	収着/溶出	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
10	MK	収着	−	−	−	○	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−
11	BFS	収着	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−
12	BFS	収着	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
13	FA	収着	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
14	FA	収着	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
15	FA	収着	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−
16	FA	溶出	−	−	−	○	−	−	−	○	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	○	○	−	−	−
17	FA	溶出	−	−	−	−	−	○	○	○	○	−	−	−	−	○	○	−	−	○	−	○	○	−	−	−
19	FA	収着	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−
20	FA	収着	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−
21	FA	収着	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
22	FA	収着	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−
23	MK	収着	−	−	−	○	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−
24	MK	収着	−	−	−	○	−	−	○	○	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−
25	BFS, MK	収着	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	○	−	−	−
26	BFS, COPR	収着	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
27	BFS, FA	溶出	−	−	○	○	○	○	○	○	○	○	−	−	−	○	○	○	−	○	○	−	○	○	○	○
28	FA	溶出	−	−	−	○	−	−	○	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
29	FA, red-mud	溶出	−	−	−	○	−	−	○	−	○	−	−	−	−	−	○	−	−	−	−	−	−	−	−	−

El-Eswed ら[10]は，メタカオリンを主とし Pb，Cd，Cu，Th および U をそれぞれ添加した配合で，60℃で 24 時間の養生を施したジオポリマーについて，溶出試験を実施した．溶出率は，高い結果となった U でも 19%であり，重金属がジオポリマー中で効果的に安定化されていることを示した．

Guangren ら[3]は，スラグを主とし 25℃で 28 日間の蒸気養生を施したジオポリマーについて，Sr および Cs の分配係数を測定した．作製したジオポリマーはいずれも OPC のペーストより Sr および Cs の分配係数が大きく（1.38 倍～4.19 倍），スラグをメタカオリンで置換することにより分配係数が増加することを示した．また，合成した C-S-H や天然ゼオライトに対して Sr および Cs の高い選択吸着性を持つことを示した．同じく Guangren ら[11]は，スラグを主とし，Hg および Zn をそれぞれ添加した配合で，室温で 28 日まで蒸気養生を施したジオポリマーについて，溶出試験を実施した．養生 3 日以降では，時間の経過に伴い溶出濃度が低下することを示しており，Zn については 28 日で 99.99%以上が固定されていることを示した．また，Hg の固定化については，物理的封じ込めと化学的固定化の両方が影響するが，Zn の固定化は化学的な作用のみによるとした．Deja[1]は，スラグを主としたジオポリマーについて，スラグに対して 0.5%～2.0%の $Zn(NO_3)_2$，$Pb(NO_3)_2$，$CdCl_2$，Na_2CrO_4 をそれぞれ加え作製した硬化体のタンクリーチング試験を実施しており，12 カ月

経過後に固定されている割合が 98%以上となる高い固定能力があることを示した．Zhang ら[12]は，スラグを主とし，Na_2CrO_4・$4H_2O$ を添加した配合で，20℃で 180 日まで湿空養生したジオポリマーについて，溶出試験を実施した．NaOH の添加が多いほど六価クロムの溶出は少なくなったことについて，圧縮強度が増加していることから物理的封じ込めの影響が表れた可能性があるとした．一方で，同じ NaOH 添加量では水量が小さいほど六価クロムの溶出量は小さくなったことを示し，水量が増えたことで六価クロムと硫化物イオンの作用空間が増えた可能性があるとした．また，XRD，SEM-EDS の結果から CrO_4-U 相が生成していることを確認し，六価クロムの化学的な固定に寄与しているとした．

杉山ら[7]は，フライアッシュを主とし 140℃，180℃で 6 時間の水熱反応を施したジオポリマーについて，Cs，Cd，Pb の吸着試験を実施し，陽イオン交換容量を測定した．Cs，Cd，Pb の濃度がそれぞれ 0.06mg/l，0.04mg/l，0.02mg/l 以下の場合に，95%を超える吸着率となり，優れた陽イオン吸着性を有していることを示した．陽イオン交換容量は，140℃で 94cmol/kg，180℃で 128cmol/kg となり，天然ゼオライトと比較し遜色ない性能を有することを示した．Al-Harahsheh ら[13]は，フライアッシュを主とし 105℃2 時間の養生を施したジオポリマーについて，Cu^{2+}溶液での収着試験を実施した．吸着等温線は Freundlich 式よりも Langmuir 式がより当てはまるとし，最大吸着量は 25℃で 96.8(mg/g)，45℃で 152.3(mg/g)と算出した．これらの数値は，一般的な吸着材であるカオリナイト，クリノプチロライト，活性炭などよりも高い吸着量であることを示した．Nikolic ら[14]は，2 種類のフライアッシュおよび物理的にボールミルを用いて活性化させたフライアッシュを用い，フライアッシュに対し 2%までの Cr をクロム酸カリウムとして添加した配合で，4 種の合成条件（20℃28 日，55℃24 時間，95℃，4 時間，95℃，24 時間）におけるジオポリマーの溶出試験を実施した．Cr の固定率は 62%～91%であり，合成条件の影響よりもフライアッシュの性質の影響が大きく，特にフライアッシュを物理的に活性化することで Cr の固定能力が上昇したことを示した．Jaarsveld ら[15]は，フライアッシュを主とし，Pb および Cu を最大 0.2%添加した配合で，溶出試験を実施した．固定は物理的封じ込めだけでなく化学的結合にも影響を受けると結論し，ジオポリマーを形成する Al，Si の 4 面体構造に影響を与えず化学的に結合することにより固定される可能性があると推察した．Jiminez ら[9]は，フライアッシュを主とし，Na_2AsO_2 を 1wt%　添加した配合で，85℃で 20 時間の養生を施したジオポリマーについて，走査型電子顕微鏡および透過型電子顕微鏡を用いて組織の形態・組成的な観点から検討し，大部分は特徴の薄い生成物（アルミノシリケートゲル）であり，その中に特徴的な形態の物質が散らばっていることを示した．フライアッシュの反応に顕著な違いが生じており，フライアッシュのそれぞれの粒子毎の特性の相違があるか，あるいは，フライアッシュの一部の粒子では水和可能な量が限られていることを示唆しているとした．水和生成物に取り込まれた As は僅かな量であり，As の固定能力を決定するのは液相中の Fe の形態であり，フライアッシュの表面における反応条件が影響すると結論した．また，組織内に As 化合物が明確には観察されなかったことから，僅かながら固定された As は化学的に結合していると推察した．

以上のように，陽イオン全般に対し優れた収着特性を持つことが多く報告されているが，陰イオンの形態をとる物質に関する報告は少ない．一方で，そのメカニズムについては，配合や養生条件が多種多様であることもあり，十分に理解されているとは言い難い状況である．本報告においても検討例を列挙するに留まっており，さらなる検討が望まれる．

9.3　ジオポリマー材料が含有する物質の溶出

Izquierdo ら[8]は，フライアッシュと高炉スラグを主とし，室温で 28 日間密封養生したジオポリマーにつ

いて，200μm 以下に粉砕した試料を用い溶出試験を実施した．フライアッシュ単体の溶出液（ジオポリマー中のフライアッシュ割合で換算）とジオポリマーの溶出液における濃度を比較し，Ba，Be，Bi，Cd，Co，Cr，Cu，Nb，Ni，Pb，REE，Sr，Sn，Th，U，Y および Zr はジオポリマーの構造中に電荷補償で取り込まれることにより溶出しにくくなるが，その一方で，オキソアニオンの形態である As，B，Mo，Se，V および W については，ジオポリマー内部の高 pH 条件下においてより移動しやすくなり，ジオポリマーの構造中にも取り込まれないことから溶出しやすくなると推察した．

Arioz ら[16]は，フライアッシュを主とし，40℃～120℃で 6 時間～24 時間の養生を施したジオポリマーについて，溶出試験を実施した．120℃で 15 時間以上の養生を施した条件以外では，As，Hg がジオポリマー内に固定されたとした．Miccio ら[17]は，フライアッシュを主とし室温で 24 時間の密封養生を施し，その後 50℃で 48 時間の気中養生を施したジオポリマーについて，溶出試験を実施した．シリケートや水酸化物を過剰とした配合では，As，Ba 等の溶出濃度が高まっており，WA 値（連結空隙率の指標）が低く強熱減量が大きい傾向と合致するとした．As と Ni については，原料であるフライアッシュの溶出液と比べ，ジオポリマーでは溶出濃度が非常に高くなっており，製造過程における厳しいアルカリ条件下での反応により抽出されやすいとした．

以上のように，ジオポリマー自身に含まれる原料由来の重金属類の溶出に関する検討は，フライアッシュを原料とするものが多くなっている．しかし，フライアッシュ以外の原料にも重金属類が含まれる[18]ため，それぞれの原料における重金属類の含有量や溶出特性などを考慮した上で，ジオポリマーの溶出試験のデータを検討することが望ましい．一方で，上記のように As，Se 等のオキソアニオンの形態をとる物質についてはジオポリマーへの固定があまり期待できない可能性があるため，原料に多く含まれる場合では，材料の製造方法や使用される環境も含め，適切に配慮する必要があると考えられる．

9.4　ジオポリマーを利用した重金属固定、汚染水処理例

ジオポリマーの優れる重金属固定能力を活かして，Li ら[30) 31]は，都市ごみ焼却飛灰と主灰(燃え殻)の安全なリサイクル方法を検討しており．前者を用いた多孔質ジオポリマー，後者を用いたジオポリマーモルタルの重金属固定率と溶出量を調べている．溶出環境(pH)にかかわらず，ヒ素(As)以外の重金属の固定率が 95%を上回るが，ヒ素の固定率が酸性環境(pH=4.01)では 95%以下であり，市ごみ焼却主灰を細骨材の全量に用いたジオポリマーモルタルの重金属溶出量は,水と直接に接触しない建材の溶出基準を満たしているが，Pb,As の溶出量は水と直接に接触する建材の溶出基準を若干上回ると報告している．なお，主灰における重金属の分布，さらにジオポリマー硬化体におけるその分布にはばらつきがあることが重金属溶出量の評価結果に大きく影響すると指摘している．

一方，東日本大震災に伴い原子炉建屋から排出している放射能汚染水の処理に対して，Li ら[32) 33]は，吸水性が高い製紙スラッジ焼却灰(PS)を活性フィラーとしたジオポリマーの利用を提案している．放射能汚染水でアルカリ溶液を調製して，1.2 以上で液粉体比でジオポリマーを作製し，6 週～6 か月で Sr^{2+}固定率は安定的に 98%以上で維持されるが，Cs^{+}の固定率は 6 か月の長期材齢では 98%を超えているが，3 か月までは不安定で 40-70%と低いことを報告している．原因は不明であるが，ジオポリマーの反応生成物が早期には少ないためである考えられる．その後，Li ら[34]は，海水(NaCl を含む)の添加で，早期材齢の Cs^{+}固定率が不安定で低い問題を解決し,Sr^{2+}と Cs^{+}の固定率は早期材齢から安定になり,93%を超え,6 か月以降にほぼ 100%であることを示している．

参考文献

1) Jan Deja: Immobilization of Cr^{6+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} and Pb^{2+} in alkali-activated slag binders, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp,1971-1979, 2002.

2) Jianguo Zhang, John L. Provis, Dingwu Feng, Jannie S.J. van Deventer: Geopolymers for immobilization of Cr^{6+}, Cd^{2+}, and Pb^{2+}, Journal of Hazardous Materials, Vol.157, pp.587-598, 2008.

3) Qian Guangren, Li Yuxiang, Yi Facheng, Shi Rongming: Improvement of metakaolin on radioactive Sr and Cs immobilization of alkali-activated slag matrix, Journal of Hazardous Materials, Vol.B92, pp.289-300, 2002.

4) A. Fernandez-Jimenez, D.E. Macphee, E.E. Lachowski, A. Palomo: Immobilization of cesium in alkaline activated fly ash matrix, Journal of Nuclear Materials, Vol.346, pp.185-193, 2005

5) 阿部光雄: 無機イオン交換体の選択性, IONICS, No.120, 1985.

6) Uehara, M., Isogaya, S., Yamazaki, A.: Ion-exchange Properties of Hardened Geopolymer Paste Prepared from Fly Ash, Clay science, Vol.14, pp.127-133, 2009.

7) 杉山友明, 井野場誠治, 大塚拓, 日恵井佳子, 山本武志: ゼオライト高含有硬化体の微細組織と陽イオン交換能, 材料, Vol.64, 2015.

8) Maria Izquierdo, Xavier Querol, Joseph Davidovits, Diano Antenucci, Henk Nugteren, Constantino Fernández-Pereira: Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching, Journal of Hazardous Materials, Vol.166, pp.561-566, 2009.

9) Ana Maria Fernandez Jiminez, Eric E. Lachowski, A. Palomo, Donald E. Macphee: Microstructural characterisation of alkali-activated PFA matrices for waste immobilisation, Cement and Concrete Composites, Vol.26, pp.1001-1006, 2004.

10) Bassam I. El-Eswed, Omar M. Aldagag, Fawwaz I. Khalili: Efficiency and mechanism of stabilization/solidification of Pb(II), Cd(II), Cu(II), Th(IV) and U(VI) in metakaolin based geopolymers, applied clay science, Vol.140, pp.148-156, 2017.

11) Guangren Qian, Darren Delai Sun, Joo Hwa Tay: Immobilization of mercury and zinc in an alkali-activated slag matrix, Journal of Hazardous Materials, Vol.B101, pp.65-77, 2003.

12) Mingtao Zhang, Changhui Yang, Min Zhao, Kai Yang, Rui Shen, Yujia Zheng: Immobilization potential of Cr(VI) in sodium hydroxide activated slag pastes, Journal of Hazardous Materials, Vol.321, pp.281-289, 2017.

13) Mohammad S. Al-Harahsheh, Kamel Al Zboon, Leema Al-Makhadmeh, Muhannad Hararah, Mehaysen Mahasneh: Fly ash based geopolymer for heavy metal removal: A case study on copper model, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol.3, pp.1669-1677, 2015.

14) Violeta Nikolic, Miroslav Komljenovic, Natasa Dzunuzovic , Tijana Ivanovic, Zoran Miladinovic: Immobilization of hexavalent chromium by fly ash-based geopolymers, Composites Part B, 2017.

15) J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer: The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers, Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.1189-1200, 1999.

16) E. Arioz, O. Arioz, O. Mete Kockar: Leaching of F-type fly ash based geopolymers, 20th

International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2012.
17) Francesco Miccio, Valentina Medri, Elettra Papa, Annalisa Natali Murri, Elena Landi: Geopolymerization as Effective Measure for Reducing Risks during Coal Ashes Handling, Storage and Disposal, Chemical Engineering Transactions, Vol.36, 2014.
18) 土木学会, コンクリートライブラリー111, コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題.
19) Bin Guo, De'an Pan, Bo Liu, Alex A. Volinsky, Mustafa Fincan, Jinfeng Du, Shengen Zhang: Immobilization mechanism of Pb in fly ash-based geopolymer, Construction and Building Materials, 2017.
20) Shane Donatello, Ana Fernandez-Jimenez, Angel Palomo: An assessment of Mercury immobilisation in alkali activated fly ash (AAFA) cements, Journal of Hazardous Materials, pp.207-215, 2012.
21) Palomo, J.I. Lopez de la Fuente: Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes Part I. Stabilisation of boron, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.281-288, 2003.
22) Palomo, M. Palacios: Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes Part II. Stabilisation of chromium and lead, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.289-295, 2003.
23) T.W. Cheng, M.L. Lee, M.S. Ko, T.H. Ueng, S.F. Yang: The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer, Applied Clay Science, Vol.56, pp.90-96, 2012.
24) S. Andrejkovičová, A. Sudagar, J. Rocha, C. Patinha, W. Hajjaji, E. Ferreira da Silva, A. Velosa, F. Rocha: The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers, applied clay science, Vol.126, pp.141-152, 2016.
25) Zhang Yunsheng, Sun Wei, Chen Qianli, Chen Lin: Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer, Journal of Hazardous Materials, Vol.143, pp.206-213, 2007.
26) Xiao Huang, Tao Huang, Shan Li, Faheem Muhammad, Guojing Xu, Ziqiang Zhao, Lin Yu, Yujie Yan, Dongwei Li, Binquan Jiao: Immobilization of chromite ore processing residue with alkali-activated blast furnace slag-based geopolymer, Ceramics International, Vol.42, pp.9538-9549, 2016.
27) Ana Maria Fernandez Jiminez, Eric E. Lachowski, A. Palomo, Donald E. Macphee: Microstructural characterisation of alkali-activated PFA matrices for waste immobilisation, Cement and Concrete Composites, Vol.26, pp.1001-1006, 2004.
28) Lei Zheng, Wei Wang, Yunchun Shi: The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer, Chemosphere, Vol.79, pp.665-671, 2010.
29) Mo Zhang, Mengxuan Zhao, Guoping Zhang, Derrick Mannd, Kevon Lumsden, Mingjiang Tao: Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water, Construction and Building Materials, Vol.124, pp.373-382, 2016.
30) Z. Li, R. Kondo, K. Ikeda: Development of foamed geopolymer with addition of municipal solid

waste incineration fly Ash, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 19, pp. 830-846, 2021.7

31) Z. Li, R. Kondo, K. Ikeda: Recycling of waste incineration bottom ash and heavy metal immobilization by geopolymer production, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 19, pp.259-279, 2021.4

32) Z. Li, T. Ohnuki, K. Ikeda: Development of paper sludge ash-based geopolymer and application to treatment of hazardous water contaminated with radioisotopes, Materials (Special Issue of Advances in Geopolymers and Alkali-Activated Materials), Vol.9, No.8, paper No.633, pp.1-17, 2016.7

33) 李柱国・池田攻：製紙スラッジ焼却灰を用いたジオポリマーおよびその放射能汚染水の処理への応用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.1, pp.2337-1342, 2016.7

34) Z.Li, M. Nagashima, K. Ikeda: Treatment technology of hazardous water contaminated with radioisotopes with paper sludge ash-based geopolymer − Stabilization of immobilization of strontium and cesium by mixing seawater, Materials, Vol.11, No.1521, pp.1-21, 2018.8.

（執筆者：新　大軌）

Ⅲ．共通試験

１．共通試験の目的

ジオポリマーを用いた建設材料は，第Ⅱ編で示したように実験室レベルでの研究を中心に，数多くの成果が報告されてきている．また，第Ⅴ編で示すように，実構造物・部材への適用事例も出始めている．その一方で，従来のセメントコンクリートと比べて使用材料や組合せ，配合設計方法，製造方法などの点で異なる項目が多く，ジオポリマーの取扱いに関しては経験の有無の差が未だに大きい状況にある．ジオポリマーを建設材料として普及させるためには，原材料の取扱い，練混ぜ，加熱養生などにおける知見，情報を共有，拡大していく必要があると考えられる．そこで，**表 1.1.1** に示す 15 機関においてジオポリマーモルタルの基本物性である圧縮強度を中心に共通試験を実施した．一部の機関ではジオポリマーコンクリートについても試験を実施した．

なお，ジオポリマーおよび AAMs（Alkali-activated materials）を用いた共通試験の代表的なものとしては，国内では日本コンクリート工学会九州支部「建設材料としてのジオポリマーに関する研究委員会」によって行われたもの[1)]，日本コンクリート工学会「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」によって行われたもの[2)]，RILEM TC 247-DTA「Durability Testing of Alkali-Activated Materials」によって行われたもの[3)]がある．

以下では，2.でモルタル試験の結果を，3.でコンクリート試験の結果を示す．なお，機関名はアルファベット（順不同）で表す．

表 1.1.1　参加機関（五十音順）

大分工業高等専門学校
鹿島建設（株）
金沢工業大学
岐阜大学
九州工業大学
九州大学
京都大学
熊本大学
公益財団法人 鉄道総合技術研究所
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
日本大学
広島大学
福島工業高等専門学校
松江工業高等専門学校
UBE 三菱セメント（株）

２．モルタル試験

2.1　はじめに

セメントモルタルでは，JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に配合，練混ぜ方法などが規定されている．しかし，ジオポリマー（GP）の場合，セメントモルタルとは材料の種類や組合せが異なり，様々な配合で研究が行われている．予備試験として，GP モルタルの汎用的配合を確立するためにフローと強度に着目し，予備実験として，配合の検討を行った[4)]．その結果を 2.2 に示す．その後，予備実験により得られた配合条件を用い，共通試験結果を行った結果を，2.3 に示す．

2.2　予備実験

2.2.1 配合条件

練混ぜ量を 1 バッチ当たり 1 リットルとし，細骨材容積（V_s）は 0.51 リットル（1350 g）に固定した．アルカリシリカ溶液の成分を定量的に表す指標として，アルカリシリカ溶液中に含まれるナトリウム（Na）と水（H_2O）のモル比を A/W，ケイ素（Si）と Na のモル比を Si/A と定義した．本研究では，A/W の目標値を 0.125 程度，Si/A の目標値を 0.70 程度に設定した．高炉スラグ微粉末の質量置換率は 0～20%とした．

図 2.2.1 に GP モルタルの単位量を決定するフローを示す．前提条件より，ペーストが占める容積（V_{paste}）を算出し，活性フィラー（P）に対するアルカリシリカ溶液（L）の容積比（L/P）を設定し，アルカリシリカ溶液の容積（V_L）と活性フィラーの容積（V_P）を求めた．次に，活性フィラーのうちの高炉スラグ微粉末（GGBS）の質量比（GGBS/P）を設定し，FA と GGBS の単位量を決定した．水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液の質量比（SS/SH），水ガラスの成分と密度，水酸化ナトリウム水溶液の濃度と密度を設定し，SS と SH の単位量を求めた．その後，A/W と Si/A を算出し，目標値±0.005 に収まっているか確認した．

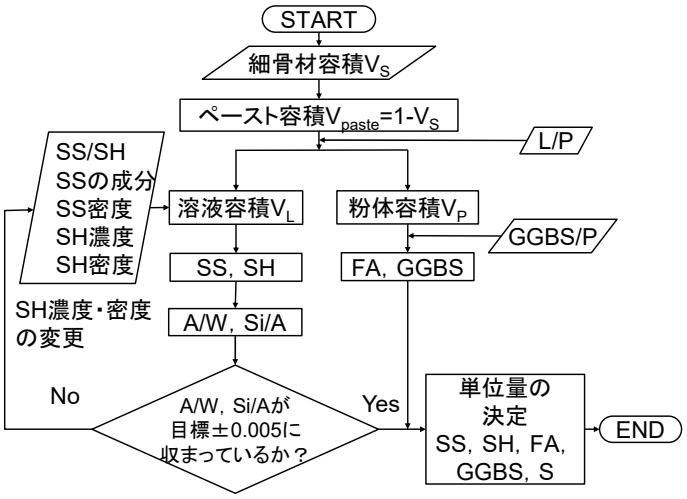


図 2.2.1　GP モルタルの単位量算定フロー

2.2.2 使用材料・配合

本研究における GP モルタルの使用材料を**表 2.2.1** に示す．本検討ではアルカリシリカ溶液として，JIS K 1408 の 1 号の珪酸ナトリウム（水ガラス）（SS-1：Na_2O=18.0%，SiO_2=36.0%と仮定，SS-2：Na_2O=17.57%，

SiO_2=37.19%）と NaOH 水溶液（SH）を混合したものを用いた．水酸化ナトリウム水溶液は粒状特級試薬の水酸化ナトリウムを蒸留水で溶かして調製したものを用いた．活性フィラーとして，フライアッシュ（FA）は，JIS A 6201 の II 種の FA-A，FA-B，FA-D，および，I 種の FA-C の計 4 種類を使用した．高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 の高炉スラグ微粉末 4000 で石こう無添加のものを用いた．フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の化学分析結果を，**表 2.2.2** に示す．細骨材（S）は JIS R 5201 の標準砂を用いた．GGBS/P=0%における 0 打フロー値を 220～240 mm を目標とした．また，材齢 2 日における圧縮強度に関して GGBS/P=10%の場合 30 N/mm^2程度を目標値とした．配合を**表 2.2.3** に示す．なお，表中の単位水量 W はアルカリシリカ溶液中の全水量を表している．

表 2.2.1　使用材料

材料名	記号	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)
水ガラス（JIS 1 号）	SS-1	1.710	-
	SS-2	1.702	-
NaOH 水溶液	SH	1.130（3.40mol/L）	
フライアッシュ	FA-A	2.30	3990
	FA-B	2.25	4200
	FA-C	2.36	5327
	FA-D	2.24	3530
高炉スラグ微粉末	GGBS	2.91	4160
標準砂	S	2.64	-

表 2.2.2　化学分析結果

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
FA-A	56.27	24.40	4.05	5.32	1.23	0.57	1.50	1.29	1.21	0.32	0.05
FA-B	72.78	16.50	4.46	3.25	0.74	0.59	-	-	-	-	-
FA-C	65.08	22.48	3.54	1.27	0.62	0.31	0.44	1.40	1.08	0.33	0.05
FA-D	64.31	22.49	4.14	1.74	0.83	0.27	0.58	1.25	1.10	0.21	0.06
GGBFS	34.67	13.50	0.32	44.19	5.29	1.07	0.23	0.31	0.55	<0.01	0.14

2.2.3 作製方法・養生方法

練混ぜには，容量２Ｌのホバート型ミキサを用いた．練り鉢にアルカリシリカ溶液，活性フィラーの順に投入し，低速で 60 秒間練り混ぜた．ミキサを一旦停止させ，細骨材を投入し，30 秒間低速で練り混ぜた．90 秒間停止させ，掻き落としを行った後，高速で 60 秒間練り混ぜた．作製したモルタルを鋼製型枠（40×40×160mm）に打ち込んだ後，3 時間の前置き時間を設け，昇降速度 13.3° C/h，最高温度 60° C，保持時間 12 時間の加熱養生を行った．加熱養生が終了した後は脱型をし，気中養生（温度 20° C，湿度 60%R.H.）を行った．なお，鋼製型枠の内面にはあらかじめ，ジオポリマーが付着しないように養生テープを貼り付けた．

表 2.2.3　配合および試験結果

No.	FA	SS Lot No.	L/P (vol.)	SS/SH (wt.)	GGBS/P (wt.%)	A/W	Si/A	W (kg/m³)	モルタルフロー(mm)		曲げ強度 (N/mm²)		圧縮強度 (N/mm²)	
									0 打	15 打	2 日	28 日	2 日	28 日
1	A	1	0.80	1.10	0	0.128	0.713	188	199	229	6.01	7.32	32.4	40.2
2	A	1			10				171	203	8.43	7.11	42.6	43.4
3	A	1			20				–*2	–*2	8.50	8.42	51.7	55.7
4	A	1	0.90	1.10	0	0.128	0.713	200	247	–*1	5.62	6.85	29.9	36.6
5	A	1			10				215	245	7.71	6.70	39.6	45.2
6	A	1			20				209	209	8.67	9.21	51.4	55.5
7	B	1	0.90	1.10	0	0.128	0.713	200	–*2	–*2	2.99	6.29	11.6	21.3
8	B	1			10				–*2	–*2	5.43	6.79	28.5	33.1
9	B	1			20				–*2	–*2	6.73	6.54	41.5	44.2
10	C	1	0.90	1.10	0	0.128	0.713	200	218	234	2.91	5.75	9.6	14.6
11	C	1			10				198	219	7.08	8.83	34.9	40.7
12	C	1			20				197	219	7.83	9.21	46.7	51.1
13	B	1	1.00	1.00	0	0.124	0.690	213	229	250	3.18		12.6	
14	B	1			10				213	239	4.64		26.4	
15	B	1			20				215	239	6.63		40.0	
16	C	1	1.00	1.00	0	0.124	0.690	213	245	263	3.60		9.3	
17	C	1			10				231	251	7.13		30.4	
18	C	1			20				234	252	8.16		43.0	
19	D	2	1.00	1.00	0	0.125	0.701	212	246	–*1	2.68	5.18	10.5	19.4
20	D	2			10				239	–*1	4.87	5.80	25.7	26.9
21	D	2			20				219	247	6.26	5.99	34.4	40.9

［注］*1:流動性が高く，測定ができなかったものを示す.　*2:流動性が低く，測定ができなかったものを示す.

2.2.4 結果および考察

本検討では，JIS R 5201 に準拠して，練上がり直後のフロー値，材齢 2 日，28 日の曲げ強度及び圧縮強度を求めた．結果は**表 2.2.3** に併せて示した．FA-A を用いた No.1～6 のフロー試験の結果から，単位水量が 200 kg/m³ 未満の場合，GP モルタルの粘性が高く，流動性が低くなった．FA-B，FA-C を用いた No.7～12 では単位水量を 200 kg/m³ に固定してフロー試験を行った．その結果，FA-B を用いた配合において流動性が著しく低くなったことから，FA の品質もフレッシュ性状に影響すると思われる．FA-B を用いた場合でも流動性が確保されることを考慮し，単位水量を 213 kg/m³ に変更して試験を行った．No.13～18 の結果から，FA-B を用いて目標 0 打フロー値を得ることができたが，FA-C を用いた場合はフロー値が 240 mm 以上になった．FA-D を用いた No.19～21 では，異なるロットの水ガラスを用いた．これらは，0 打フロー値が目標を超えたものの，No.13～18 と同様の傾向を示し，流動性を確保することができた．曲げ強度と圧縮強度は，すべての配合において GGBS/P が増加すると強度も増加することが確認できた.

本検討から得られたフロー試験と強度試験の結果を踏まえ，GP モルタルの汎用的配合として L/P=1.00，SS/SH=1.00 に設定し，A/W=0.125 程度，Si/A=0.70 程度に調整した配合が提案された.

2.3 共通試験

2.3.1 使用材料および配合

共通試験で作製したジオポリマーモルタルは，**表 2.3.1** に示す材料で構成されるものとした．フライアッシュ（密度：2.24 g/cm^3，比表面積：3530 cm^2/g）と高炉スラグ微粉末 4000（密度：2.91 g/cm^3，比表面積：3980 cm^2/g，せっこう無し）は，共通のものを使用した．**表 2.3.2** に，フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の化学分析結果を示す．アルカリシリカ溶液は，1 号水ガラスおよび NaOH 水溶液を基本とし，各機関で準備した．細骨材は JIS R 5201 の標準砂とした．

配合条件は，**2.2** の予備試験の結果を基に，**表 2.3.3** のように設定した．高炉スラグ微粉末の置換率（スラグ置換率）は 0%，10%，20%の 3 種類を設定した．水ガラス SS，水酸化ナトリウム SH，および水 W の単位量は，水ガラスの化学成分によって変化する．例として，SiO_2：37.19%，Na_2O：17.57%の水ガラスを用いる場合の単位量を，**表 2.3.4** に示す．この場合，NaOH 水溶液は，粒状の NaOH 特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整したものとなっている．

各機関（機関 A～機関 L）の使用材料および試験項目の一覧を，**表 2.3.5** に示す．なお，機関 L では，メタケイ酸ナトリウムを用いた．結果は文献[5]に示されているので，そちらを参照されたい．

表 2.3.1 GP モルタルの構成材料

材料	記号	種類，使用，留意点
(1) 水ガラス	SS	JIS K 1408 1 号 珪酸ナトリウム（もしくは，同等品）
(2) 水酸化ナトリウム水溶液	SH	粒状の特級試薬を用いて調製した水酸化ナトリウム水溶液， もしくは市販の水酸化ナトリウム水溶液（液体苛性ソーダ）
(3) 水	W	蒸留水，イオン交換水，または上水道水
(4) フライアッシュ	FA	JIS A 6201 フライアッシュ II 種
(5) 高炉スラグ微粉末	GGBS	JIS A 6206 高炉スラグ微粉末 4000，セッコウ無し
(6) 細骨材	S	JIS R 5201 標準砂

表 2.3.2 化学分析結果

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
FA	64.31	22.49	4.14	1.74	0.83	0.27	0.58	1.25	1.10	0.21	0.06
GGBFS	34.67	13.50	0.32	44.19	5.29	1.07	0.23	0.31	0.55	<0.01	0.14

表 2.3.3 配合条件

L/P （容積比）	SS/SH （質量比）	A/W * 目標値	Si/A * 目標値
1.00	1.00	0.125±0.002	0.700±0.005

* A：溶液中の Na モル量，W：溶液中の H_2O モル量，Si：溶液中の Si モル量

表 2.3.4　GP モルタル配合（水ガラスの成分 SiO_2：37.19%，Na_2O：17.57%の場合）

L/P（容積比）	SS/SH（質量比）	SH 濃度（mol/l）	GGBS/P（質量比）	単位量（kg/m³）					
				L			P		S
				SS	SH	W	FA	BFS	
1.00	1.00	3.60	0%	166.5	166.5	0	547.3	0	1350
1.00	1.00	3.60	10%	166.5	166.5	0	504.2	56.0	1350
1.00	1.00	3.60	20%	166.5	166.5	0	459.0	114.7	1350

2.3.2 作製方法

ジオポリマーモルタルの作製方法は，以下の(1)～(6)に示す手順を基本とした．なお，ジオポリマーの取扱いに関する全体的な留意点は，以下の通りである．

【留意点】

(a) 強アルカリ性の溶液を使用するため，保護具を着用する．

(b) ジオポリマー（特に，高炉スラグの置換率が高い場合）は硬化（凝結速度）が速く，また，金属表面に固着しやすい．よって，練混ぜに使用する各種器具は使うたびに，こまめに水で洗浄するか，プラスチック製のものを使用するか，養生テープを貼り付ける等の対策が必要である．

(c) 各種器具を使用した後の洗浄水は，強アルカリ性となる．各機関での排水基準を確認し，大量の水で薄めながら洗浄，排水するなど，あらかじめ処理方法を決めておく．

(1) 材料の準備

(a) 練混ぜの前日に，水ガラスと NaOH 溶液を混合した溶液（アルカリシリカ溶液）を作製しておく．長期間保存すると，GP の凝結特性が変化するので，長期間の保存は避ける．NaOH は溶解熱が発生する．練混ぜまでに試験室の室温まで下がるようにする．水ガラスは粘性が高いので，よく撹拌する．撹拌には金属製以外の棒，例えば，プラスチック製の棒を使用する．

(b) スラグ置換率 GGBS/P が小さい（例えば，10%以下）場合には，ミキサ内でスラグが均一に分散できない可能性があるため，練混ぜ直前までに，あらかじめ，1 バッチ分のフィラー（フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末）をビニール袋（破れないように厚手のものが良い）に入れて，プレミックスしておく．

(2) 練混ぜ方法

JIS R 5201 での練混ぜ方法を参考にし，下記の手順で練り混ぜる．加熱養生に要する時間を考慮して，練混ぜ開始時刻を決定する．供試体を作製する試験室は，可能な限り，温度 20±2℃，相対湿度 50%以上とする．なお，使用する材料は，室温と等しくなるように，あらかじめ試験室内に準備しておく．

① あらかじめ，水ガラスと NaOH 溶液を混合した溶液（アルカリシリカ溶液）を作製しておく．

② アルカリシリカ溶液を練り鉢に入れ，次にフィラー（フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末）を入れる．ただちにミキサを始動させ，低速で 60 秒間練り混ぜる．

③ ミキサを一旦停止させ，細骨材を投入する．

④ ミキサを始動させ，30 秒間練り混ぜる．

⑤ 90 秒間ミキサを休止する．休止の最初の 15 秒間に，かき落としを行う．

⑥ 休止が終わったら，高速で始動させ 60 秒間練り混ぜる．練混ぜ時間は，休止時間も含めて 4 分である．

⑦ フロー試験を行わない場合，ただちに供試体を成形し，GP モルタルが各種器具に固着しないようにすぐに洗浄する．

(3) フロー試験

練混ぜ終了後，ただちに JIS R 5201 の方法で実施する．フローコーンを引き上げてジオポリマーモルタルの流動が停止した時点のフロー（0 打フロー）と，15 回落下運動を与えた後のフロー（15 打フロー）を測定する．なお，高炉スラグ置換率が高い場合には，凝結速度が速いので，短時間で試験できるよう，あらかじめ準備をしておく．

(4) 成形

JIS R 5201 に規定されるテーブルバイブレータを用いて成形する．無い場合には，ヘラ（例えば，ステンレス製の混練用の丸ヘラ）などを用いて型枠の隅々まで行き渡らせるとともに，木づちなどを用いて型枠に振動を与えて成形する．仕上げ面は，できるだけ平滑に仕上げる．必要に応じて，養生剤を用いても良い．成形終了後，GP モルタルが各種器具に固着しないようにすぐに洗浄する．

(5) 加熱養生

下記の手順で加熱養生を実施する．加熱養生を行わない場合，硬化後の適切な時期に脱型を行う．

① 成形の終了後，試験室で 3 時間，前置きを行う．水分の蒸発を防ぐため，型枠の上面はプラスチックフィルムおよび湿布で覆い，ビニール袋に入れる．

② 型枠を加熱養生装置に移動させ，加熱養生を行う．移動させる際に，衝撃を与えないようにする．最高温度は 60℃，保持時間は 12 時間とする．昇温および降温の速度は，13.3℃/h とする（3 時間で 20℃から 60℃に達する）．

③ 加熱養生装置内の温度を記録する．

④ 加熱養生装置内の温度が 20℃または室温まで降下した時点を，加熱養生終了とする．

(6) 脱型および養生

加熱養生終了後，供試体を型枠から取り出し，質量および寸法を測定する．寸法はノギスで測定する．寸法および質量から，単位容積質量を算出する．その後，所定の環境（温度 20±2℃，相対湿度 60±5%を標準とする）で貯蔵する．

表 2.3.5(a)　各機関の使用材料，試験方法・項目

機関名		A	B	C
材料種類・物性値	水ガラス	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.7（15℃） 密度：1.702g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：37.19% Na_2O：17.57%	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.7（15℃） 密度：1.702g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：37.19% Na_2O：17.57%	S 社製 1 号珪酸ソーダ SiO_2：36.8% Na_2O：17.7% （水＋水ガラス＋NaOH で密度 1.36g/cm^3）
	NaOH 溶液	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整. 密度：1.136g/cm^3	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整. 密度：1.136g/cm^3	T 社製 48%水溶液
	水	蒸留水	蒸留水	水道水
	フライアッシュ	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	高炉スラグ微粉末	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	細骨材	標準砂	標準砂	標準砂
練混ぜ	ミキサ種類	JIS R 5201 規定のミキサ	JIS R 5201 規定のミキサ	
	1 バッチの練混ぜ量	1 L	1 L	
養生方法		加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）
強度試験に用いた供試体の形状寸法		40×40×160mm 角柱	40×40×160mm 角柱	40×40×160mm 角柱，φ50×100mm 円柱
試験項目	フロー値	○（0 打，15 打）	○（0 打，15 打）	○（0 打，15 打）
	曲げ強度	○	○	○
	圧縮強度	○（角柱，円柱）	○（角柱）	○（角柱，円柱）
	強度試験材齢	2 日，28 日	7 日，28 日	7 日，28 日
	単位容積質量			○
	静弾性係数			
	割裂引張強度			
	超音波伝播速度			
	動弾性係数			
	長さ変化			
	凝結時間			
備考				

表 2.3.5(b)　各機関の使用材料，試験方法・項目

機関名		D	E	F
材料種類・物性値	水ガラス	T 社製 1 号珪酸ソーダ SiO_2：35.0～38.0% Na_2O：17.0～19.0%	JIS 水ガラス 1 号	U 社製 一級 SiO_2：37.4% Na_2O：17.7%
	NaOH 溶液	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L 水溶液に調整.	10mol/L	粒状の特級試薬を用いて水溶液を作製.
	水			
	フライアッシュ	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	高炉スラグ微粉末	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	細骨材	標準砂	標準砂	標準砂
練混ぜ	ミキサ種類			ホバート
	1 バッチの練混ぜ量			
養生方法		加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）
強度試験に用いた供試体の形状寸法		40×40×160mm 角柱	40×40×160mm 角柱，φ50×100mm 円柱	φ50×100mm 円柱
試験項目	フロー値	○（15 打）	○ （0 打*，15 打**）	○ （0 打，15 打）
	曲げ強度	○	○	
	圧縮強度	○（角柱）	○（角柱）	○（円柱）
	強度試験材齢	2 日，28 日	7 日，28 日	7 日，28 日
	単位容積質量	○		
	静弾性係数		○	
	割裂引張強度		○	
	超音波伝播速度		○***	
	動弾性係数		○****	
	長さ変化			
	凝結時間			
備考			* 0 打フローは，フローコーンを持ち上げてから 2 分経過後に測定. ** 15 打フローは，15 打直後に測定. *** 高さ 10cm を端子間距離とする透過法（直接法）によって測定. **** JIS A 1127 に準拠して縦振動を測定して算出.	

表 2.3.5(c)　各機関の使用材料，試験方法・項目

機関名		G	H	I
材料種類・物性値	水ガラス	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.5（15℃） 密度：1.698g/cm^3 SiO_2：36.83% Na_2O：17.55%	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.7（15℃） 密度：1.702g/cm^3 SiO_2：36.94% Na_2O：17.74%	V 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.7（15℃） 密度：1.702g/cm^3 SiO_2：37.19% Na_2O：17.57%
	NaOH 溶液	粒状の特級試薬を用いて水溶液を作製.	粒状の特級試薬を用いて水溶液を作製.	粒状の特級試薬を用いて水溶液を作製.
	水	蒸留水	蒸留水	実験用水
	フライアッシュ	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	高炉スラグ微粉末	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	細骨材	標準砂	標準砂	標準砂
練混ぜ	ミキサ種類	約 20L のホバート型ミキサ	5L ホバート型ミキサ	ホバート
	1 バッチの練混ぜ量	各配合 8L	2L	
養生方法		20℃, 60℃・12 時間 80℃・12 時間	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）
強度試験に用いた供試体の形状寸法		φ50×100mm 円柱	φ50×100mm 円柱	40×40×160mm 角柱
試験項目	フロー値	○（0 打，15 打）	○（0 打，15 打）	○（0 打，15 打）
	曲げ強度			○
	圧縮強度	○（円柱）	○（円柱）	○（角柱，円柱）
	強度試験材齢	2 日，28 日	14 日，28 日	7 日，28 日
	単位容積質量		○	
	静弾性係数			
	割裂引張強度	○		
	超音波伝播速度			
	動弾性係数			
	長さ変化			
	凝結時間		○*	
備考			* セメント自動凝結試験機による始発針を用いた測定結果	

表 2.3.5(d)　各機関の使用材料，試験方法・項目

機関名		J	K	L
材料種類・物性値	水ガラス	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 密度：1.718g/cm^3 SiO_2：36.92% Na_2O：17.84%	Y 社製 メタケイ酸ナトリウム九水和物
	NaOH 溶液	粒状の特級試薬を用いて水溶液を作製.	X 社製 苛性ソーダ 濃度 35%	無し
	水	水道水	実験用水	純水
	フライアッシュ	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	高炉スラグ微粉末	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	細骨材	標準砂	標準砂	標準砂
練混ぜ	ミキサ種類	ホバート型ミキサ	JIS R 5201 規定のホバートミキサ（20L）	
	1 バッチの練混ぜ量	1 L	5 L	
養生方法		60℃加熱養生後，気中養生	前置き 20℃3 時間→昇温 3 時間→60℃12 時間保持→降温 3 時間、材齢 1 日で脱型	20℃
強度試験に用いた供試体の形状寸法		40×40×160mm 角柱（曲げ強度のみ），φ50×100mm 円柱	40×40×160mm 角柱，φ50×100mm 円柱	40×40×160mm 角柱
試験項目	フロー値	○（0 打，15 打）	○（0 打，15 打）	○（0 打，15 打）
	曲げ強度	○	○	○
	圧縮強度	○	○（角柱）	○（角柱）
	強度試験材齢	2 日，28 日	7 日，28 日	7 日，14 日，28 日
	単位容積質量		○	○
	静弾性係数	○		
	割裂引張強度			
	超音波伝播速度			
	動弾性係数			
	長さ変化		○	
	凝結時間			
備考			長さ変化試験の条件 ・脱型⇒気中（基長：材齢 1 日） ・脱型⇒封かん（基長：材齢 1 日） ・脱型⇒材齢 7 日まで封かん⇒気中（基長：材齢 7 日）	

2.3.3　フレッシュ性状

フロー試験結果を**表 2.3.6** および**図 2.3.1** に示す．また，代表的な例として，機関 A のフロー試験時の写真を，**写真 2.3.1** に示す．スラグ置換率が大きくなるほどフロー値は小さくなった．標準偏差は 0 打フローよりも 15 打フローの方が小さい傾向には合ったものの，全体的には比較的大きい結果となった．**図 2.3.2** は 0 打フローと 15 打フローを比較したものである．両者の関係は，概ね線形関係にあるが，フロー値が比較的小さい場合には 0 打フローと 15 打フローとの差が大きく，一方，フロー値が比較的大きい場合には，両者の差は小さくなった．水ガラスを用いたジオポリマーは，粘性が高いため，セメントで使用されるフロー試験のジオポリマーの適用性については，さらなる検討が必要である．

また，機関 H によって，セメント自動凝結試験機により始発針を用いて 20℃養生時における凝結時間が測定されている．結果を**表 2.3.7** に示す．表より，スラグ置換率が高くなると，凝結時間が短くなること，また，始発から終結時間までの時間が短くなることが分かる．特にスラグ置換率 20%では硬化の反応が急速に進むことが分かる．

メタケイ酸ナトリウムを用いた機関 L の結果（スラグ置換率 60%，総水量は一定）によると[5)]，アルカリ濃度を 4%から 16%に変化させた場合，フロー値は 4%で 0 打 233.5，15 打 260.5，16%で 0 打 103.5，15 打 119.0 となった．4%と 16%とでフロー値の差が 2 倍以上となったことや，付加水量とフロー値には相関はあるが結晶水の影響は小さいことが明らかとなっている．

表 2.3.6　フロー試験結果（上段：平均値，下段：測定値）

機関名	スラグ置換率 0%		スラグ置換率 10%		スラグ置換率 20%	
	0 打	15 打	0 打	15 打	0 打	15 打
A	250 (245×255)	－	246 (241×250)	－	216 (210×222)	247 (248×246)
B	221 (212×230)	252 (252×252)	225 (222×227)	253 (251×254)	196 (186×206)	229 (228×230)
C	273	－	265	274	244	252
D	－	219	－	219	－	211
E	241	256	239	248	222	235
F	270 (270×270)	274 (275×273)	244 (247×241)	266 (268×263)	235 (237×232)	255 (256×254)
G	213 (204×222)	239 (228×249)	190 (184×195)	223 (213×232)	195 (193×196)	222 (218×225)
H	246 (239×254)	270 (265×276)	244 (242×246)	269 (267×272)	250 (248×253)	268 (267×270)
I	242	251	245	256	238	244
J	200 (200×200)	250 (240×260)	235 (210×260)	266 (255×275)	230 (225×235)	255 (255×255)
K	255 (255×255)	265 (265×264)	245 (245×245)	260 (260×259)	248 (248×247)	260 (260×259)
平均	241.1	252.9	237.8	253.3	227.4	243.5
標準偏差	22.4	15.8	18.6	17.7	18.9	16.6

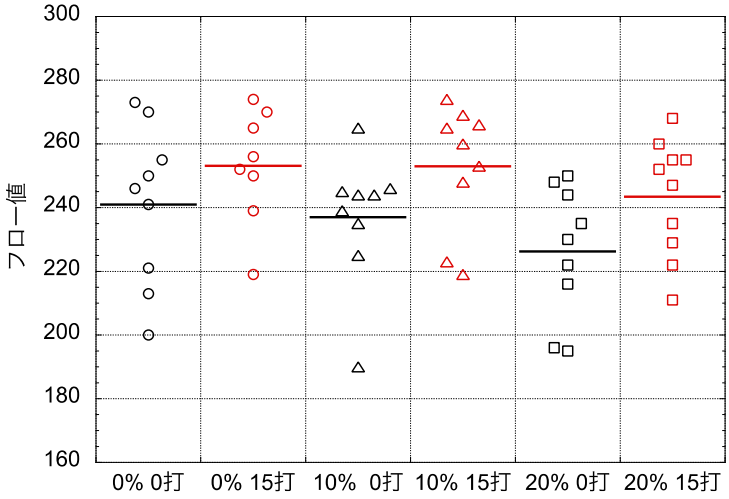


図 2.3.1　フロー試験結果

(a) スラグ置換率 0%　　(b) スラグ置換率 10%　　(c) スラグ置換率 20%

写真 2.3.1　モルタルフロー試験結果

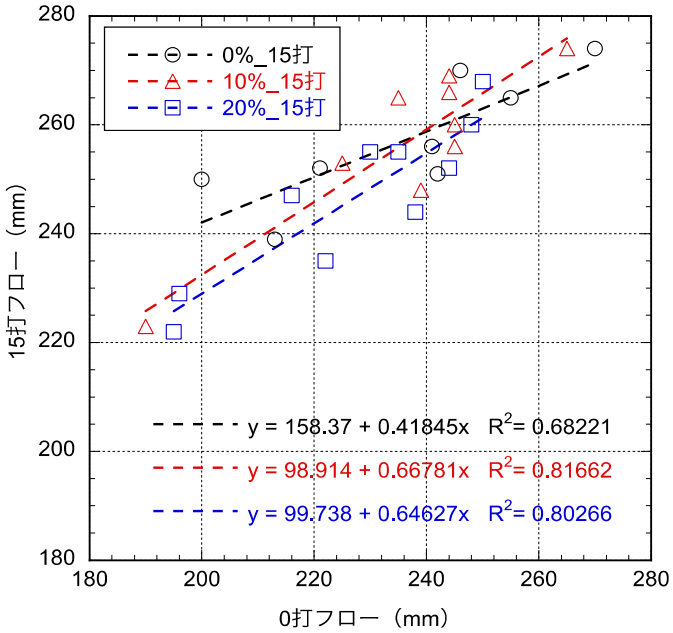


図 2.3.2　0 打フローと 15 打フローの関係

表 2.3.7　凝結試験結果

	スラグ置換率 0%	スラグ置換率 10%	スラグ置換率 20%
始　発（分）*	705	310	140
終　結（分）*	＞ 1440	435	160

* セメント自動凝結試験機による始発針を用いた測定結果

2.3.4　強度および変形性状

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を，**表 2.3.8** に示す．十分なデータ数のある材齢 7 日および 28 日について算出した結果，角柱（40×40×160㎜ 供試体の曲げ強度試験後の切片）で得られた強度と，円柱（φ50×100㎜）で得られた強度は，ほぼ同じと考えられる．また，**2.3.2** で示したフロー値のデータのばらつきに対して，強度のばらつきは，相対的に小さい結果であった．

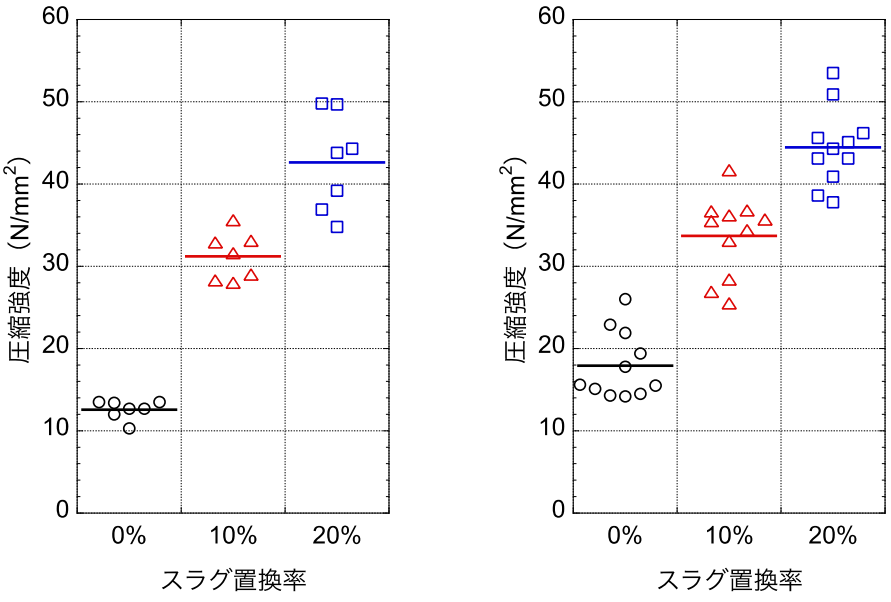
図 2.3.3 に，材齢 7 日および 28 日の圧縮強度を，スラグ置換率ごとに示す．全体的な傾向として，スラグ置換率が大きいほど強度も大きいことが分かる．また，**図 2.3.4** に示すように，7 日から 28 日の強度の増加は小さかった．スラグ置換率 0%に対する比（全機関の平均）は，材齢 7 日の時点で置換率 10%は 2.48 倍，置換率 20%は 3.39 倍となり，材齢 28 日の時点で置換率 10%は 1.88 倍，置換率 20%は 2.48 倍であった．材齢 7 日よりも材齢 28 日の方が，スラグ使用による強度の増分が小さいことを表している．本試験の条件では，加熱養生後の養生条件が気中養生となっているため，スラグ置換率が大きい場合に材齢経過に伴う収縮や微細ひび割れの進展による影響が考えられる．

機関 G では，加熱養生の有無，および加熱温度の影響について，調べている．20℃養生（加熱なし），60℃・12 時間，80℃・12 時間の 3 通りについて比較した結果を，**図 2.3.5** に示す．60℃よりも 80℃の方が反応が進み，強度が高くなっている．また，材齢 28 日の結果を見ると，加熱養生を行わなかった 20℃の条件でも 60℃と同等の強度が得られていることが分かる．

なお，機関 L では，メタケイ酸ナトリウムを用いた場合について，アルカリ濃度に比例して圧縮強度が増加すること等が報告されている [5)]．

表 2.3.8　圧縮強度試験結果（N/mm²）（60℃・12 時間加熱養生）

機関	供試体形状	スラグ置換率 0%				スラグ置換率 10%				スラグ置換率 20%			
		2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日
A	角柱	10.5			19.4	25.7			26.9	34.4			40.9
B	角柱		13.4		21.9		32.9		34.4		43.8		43.1
C	角柱		12.7		15.1		31.6		35.5		49.7		53.5
	円柱		10.7		12.5		30.3		34.7		46.1		51.5
D	角柱		13.5		26.0		29.0		33.1		34.8		37.8
E	角柱		12.0		14.5		28.3		28.4		36.9		43.1
	円柱		17.8		20.3		26.5		31.4		34.5		32.5
F	円柱		10.3		14.2		28.0		36.7		39.2		38.6
G	円柱	11.2			15.5	29.8			36.2	44.7			50.9
H	円柱			17.6	22.9			40.6	41.7			45.5	44.3
I	角柱		12.7		14.3		35.6		35.7		49.8		45.1
J	円柱	8.20			15.6	24.3			25.5	32.7			46.3
K	角柱		13.5		17.8		33.1		36.8		44.3		46.0
	円柱		12.7		18.1		32.9		36.1		46.0		46.0
平均，標準偏差	角柱		13.0		18.4		31.8		33.0		43.2		44.2
			0.55		4.04		2.50		3.55		5.74		4.55
	円柱		12.9		17.0		29.4		34.6		41.5		44.3
			2.99		3.36		2.42		4.67		4.89		6.26



(a) 7 日強度　　(b) 28 日強度

図 2.3.3　圧縮強度

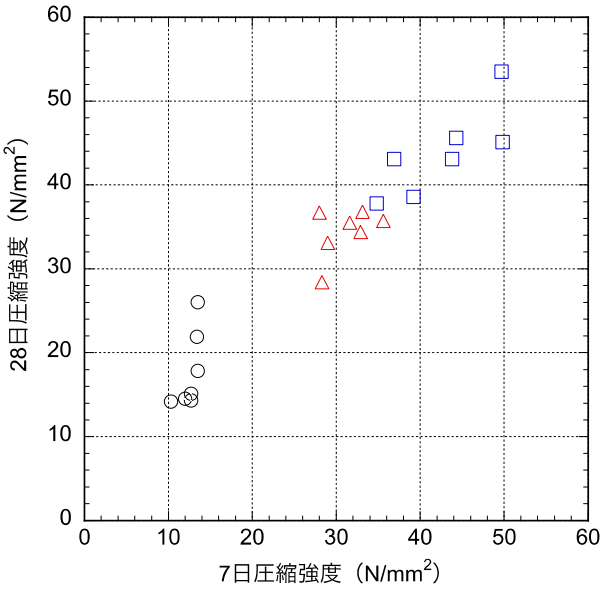


図 2.3.4　7 日強度と 28 日強度の比較

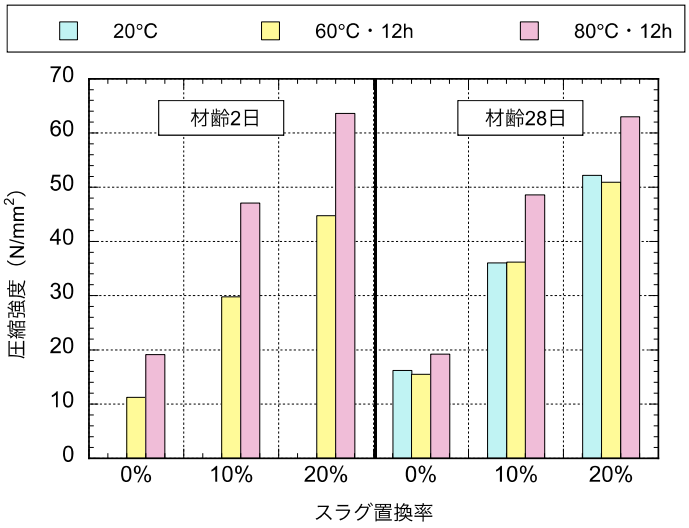


図 2.3.5　養生条件が圧縮強度に及ぼす影響（機関 G）

(2) 曲げ強度・引張強度

40×40×160mm の角柱供試体（モルタルバー）で求めた曲げ強度，および，φ50×100mm 円柱供試体で求めた割裂引張強度の一覧を，**表 2.3.9** および**表 2.3.10** に示す．

図 2.3.6 は，圧縮強度と曲げ強度を比較したものである．概ね 1:6（破線）の近傍にあるが，スラグ置換率 20%ではデータのばらつきが大きくなっている．ばらつきが大きいことは**表 2.3.9** に示した標準偏差の値からも分かる．今回行った試験項目の範囲内では，原因を明らかにすることはできないが，スラグ置換による微細構造への影響が可能性として考えられる．

図 2.3.7 は，圧縮強度と割裂引張強度の関係を示している．データ数は多くはないものの，1:15 の関係であることが明らかとなった．

表 2.3.9　曲げ強度試験結果（N/mm²）（60℃・12 時間加熱養生）

機関	スラグ置換率 0%				スラグ置換率 10%				スラグ置換率 20%			
	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日
A	2.68			5.18	4.87			5.80	6.26			5.99
B		3.04		4.12		5.80		5.66		6.60		7.66
C		2.41		3.03		5.48		6.29		6.48		5.94
D		3.0		5.5		4.8		6.5		5.8		5.5
E		2.63		3.13		6.52		5.25		9.75		9.35
I		2.68		4.48		5.30		5.65		6.84		5.36
J	1.80			2.70	3.95			3.40	4.65			3.40
K		3.28		4.93		5.38		6.07		6.88		6.40
平均		2.84		4.13		5.56		5.58		7.06		6.24
標準偏差		0.29		1.00		0.54		0.91		1.26		1.62

表 2.3.10　割裂引張強度試験結果（N/mm²）（60℃・12 時間加熱養生）

機関	スラグ置換率 0%				スラグ置換率 10%				スラグ置換率 20%			
	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日
E		1.23		1.62		1.40		1.83		1.82		1.58
G	0.91			1.22	2.25			2.30	2.77			2.69

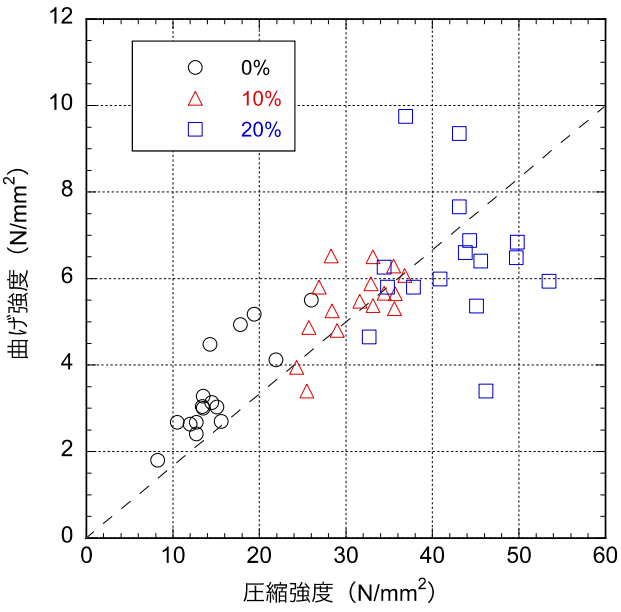


図 2.3.6　モルタル圧縮強度と曲げ強度の関係
（破線は 1:6）

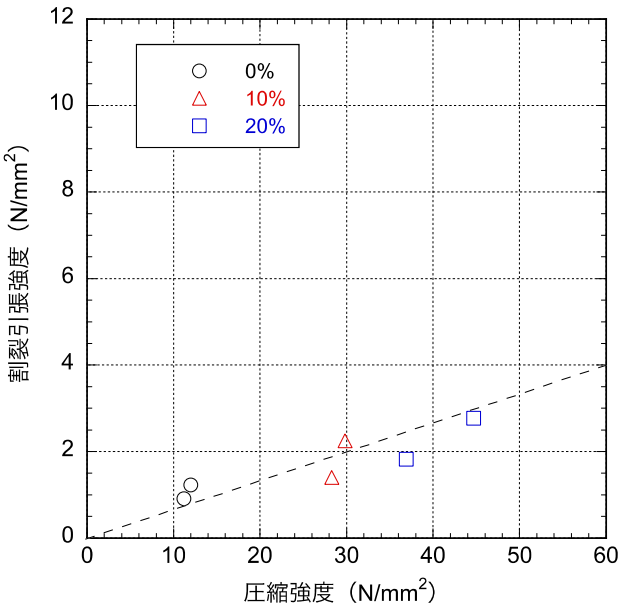


図 2.3.7　モルタル圧縮強度と割裂引張強度の関係
（破線は 1:15）

(3) 静弾性係数

φ50×100mm 円柱供試体で求めた静弾性係数の算出結果を**表 2.3.9** に，圧縮強度と静弾性係数の関係を**図 2.3.8** に示す．セメントモルタルの静弾性係数については，例えば，文献[6]に圧縮強度 19～40N/mm^2 の範囲で 16.5～21.4kN/mm^2 であったことが示されているが，今回の結果はそれらよりも小さいことが分かる．

また，機関 E では，動弾性係数を求め，静弾性係数との関係を調べている．**表 2.3.11** に結果を示す．例外も認められるが，静弾性係数に比べて動弾性係数の方が高い，というセメントコンクリートでの一般的な知見と一致している．

表 2.3.11　静弾性係数試験結果（kN/mm^2）（60℃・12 時間加熱養生）

機関	スラグ置換率 0%				スラグ置換率 10%				スラグ置換率 20%			
	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日
E				6.73		10.5		13.1		20.5		15.7
J	6.30			8.09	10.5			13.2	16.5			19.6

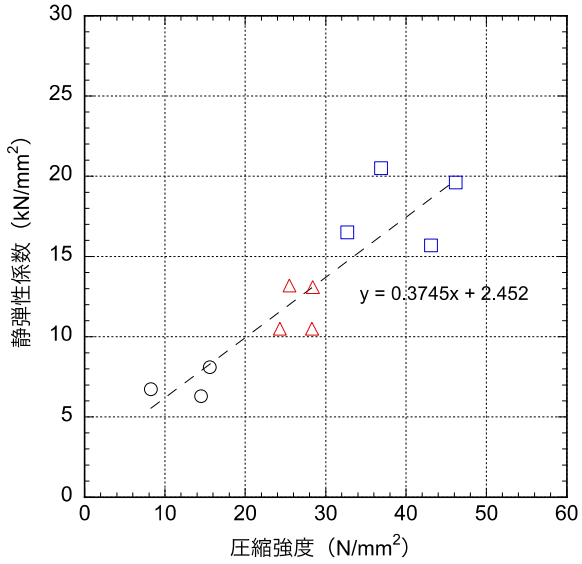


図 2.3.8　圧縮強度と静弾性係数の関係

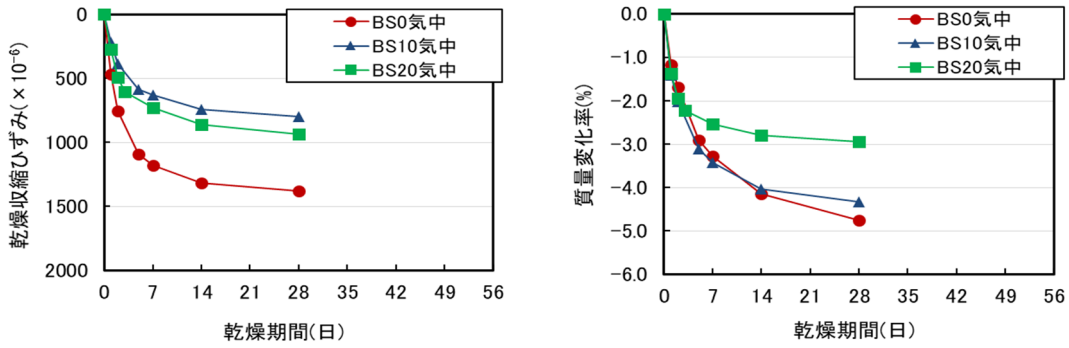
表 2.3.11　静弾性係数と動弾性係数の比較（kN/mm^2）（60℃・12 時間加熱養生）

機関		スラグ置換率 0%				スラグ置換率 10%				スラグ置換率 20%			
		2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日	2 日	7 日	14 日	28 日
E	静弾性係数				6.73		10.5		13.1		20.5		15.7
	動弾性係数		9.73		13.1		14.4		16.4		16.5		19.1

(4) 長さ変化

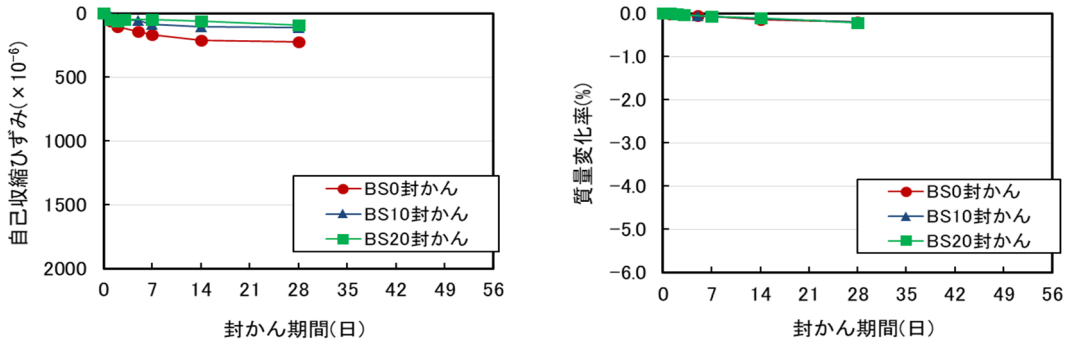
機関 K では，①脱型後から気中養生（基長：材齢 1 日），②脱型後から封緘養生（基長：材齢 1 日），および，③脱型後から材齢 7 日まで封緘養生後に気中養生（基長：材齢 7 日）の 3 通りについて，長さ変化試験が行われている．結果を**図 2.3.9～11** に示す．②から得られた結果は，セメントコンクリートでの自己収縮に相当するものである（ここでは「反応収縮」と呼ぶ）．反応収縮はスラグ置換率 0%のものが最も大きくな

った．また，反応収縮も含めた乾燥収縮ひずみ①の値も，スラグ置換率 0%が最も大きくなった．材齢 7 日まで封緘養生後に乾燥させた場合③には，スラグ置換率 0%の場合には，収縮が抑制されたが，10%と 20%の場合には，乾燥開始材齢の影響は，小さくなった．ジオポリマーの収縮については，第Ⅱ編　6.12 節に既往の研究が整理されているが，要因ごとの影響は十分に整理されていないことから，今後さらなる検討が必要である．



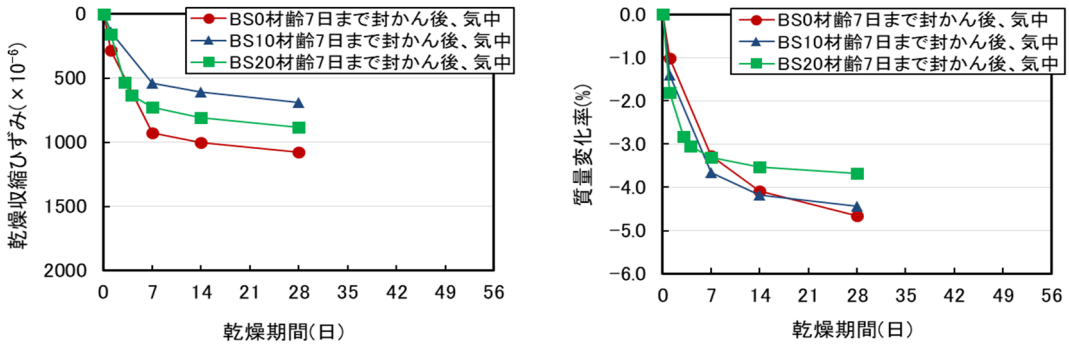
(a) 長さ変化　　(b) 質量変化

図 2.3.9　長さ変化試験結果（脱型後，気中養生）



(a) 長さ変化　　(b) 質量変化

図 2.3.10　長さ変化試験結果（脱型後，封緘養生）



(a) 長さ変化　　(b) 質量変化

図 2.3.11　長さ変化試験結果（材齢 7 日まで封緘養生後，気中養生）

３．コンクリート試験

3.1　はじめに

アルカリシリカ溶液に水ガラスを用いるジオポリマー（GP）は，セメントコンクリートに比べて粘性が高いという性質がある．また，高濃度のアルカリ溶液を用いることが一般的であるため，部材や構造物を製造・建設する際に自己充填性を有するジオポリマーコンクリートとすることで人体へのリスクを減らせることができると考えられる．そこで本試験では，高流動 GP コンクリートの配合を確立するため，スランプフローと強度に着目し，配合の検討[7]（3.2）を行った上で，複数の機関による共通試験を行った（3.3）．

3.2　予備実験

3.2.1 配合条件

粗骨材容積（V_g）は土木学会「高流動コンクリートの配合設計施工指針」の自己充填性のランク 1 である 0.28m^3/m^3～0.30 m^3/m^{3}に設定した．全骨材容積中の細骨材容積（s/a）を 45%とした．また，空気量（Air）を 2%とした．アルカリシリカ溶液の成分を定量的に表す指標として，モルタルの場合と同様に，アルカリシリカ溶液中に含まれるナトリウム（Na）と水（H_2O）のモル比を A/W，ケイ素（Si）と Na のモル比を Si/A と定義した．また，フライアッシュ（FA）ベースの GP コンクリートとし，高炉スラグ微粉末の置換率は 0～20%とした．

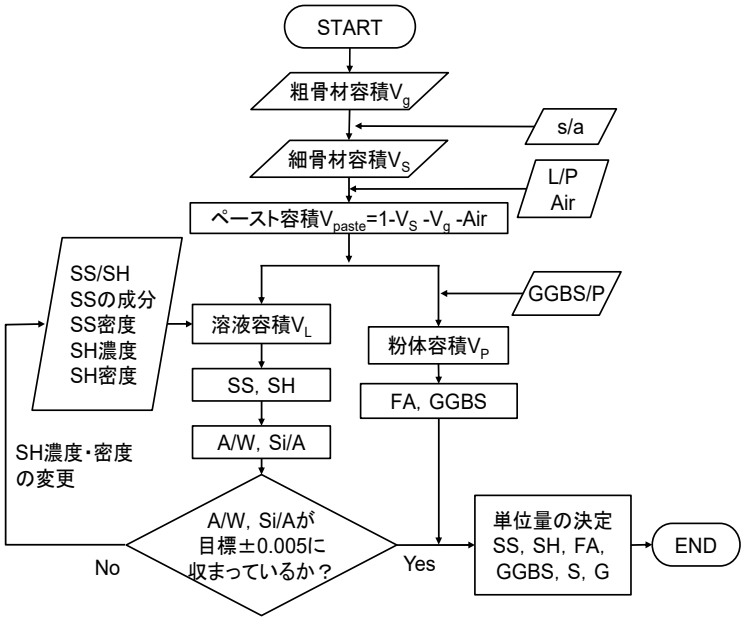


図 3.2.1　GP コンクリートの単位量算定フロー

図 3.2.1 に GP コンクリートの単位量を決定するフローを示す．まず，V_gを決定し，s/a の値から細骨材容積（V_s）を算出した．次に，ペーストが占める容積（V_{paste}）を算出し，活性フィラー（P）に対するアルカリシリカ溶液（L）の容積比（L/P）を設定し，アルカリシリカ溶液の容積（V_L）と活性フィラーの容積（V_P）を求めた．次に，活性フィラーのうちの高炉スラグ微粉末（GGBS）の質量比（GGBS/P）を設定し，FA と GGBS の単位量を決定した．水ガラス（SS）と水酸化ナトリウム溶液（SH）の質量比（SS/SH），水ガラスの成分と密度，水酸化ナトリウム水溶液の濃度と密度を設定し，SS と SH の単位量を求めた．その後，A/W と Si/A を算

出し，目標値±0.005 に収まっているか確認した．両者が目標範囲に収まっていない場合は SH の濃度・密度，SS/SH を変更し，目標範囲に収まるまで計算を繰り返した．

3.2.2 使用材料・配合

使用材料を**表 3.2.1**，配合を**表 3.2.2** に示す．本検討ではアルカリシリカ溶液として，JIS K 1408 の 1 号のケイ酸ナトリウム（水ガラス）と NaOH 水溶液をあらかじめ混合したものを用いた．NaOH 水溶液は試薬特級の NaOH（粒状）を蒸留水で溶かして調製（3.60mol/L）したものを用いた．活性フィラーとして，フライアッシュ（FA）は，JIS A 6201 の II 種を使用した．高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 の高炉スラグ微粉末 4000 で石こう無添加のものを用いた．細骨材（S）は海砂，粗骨材（G1，G2）は砕石を用いた．なお，表中の単位水量（W）は，アルカリシリカ溶液中の全水量を表す．本検討では，SS/SH=1.00，SH 濃度=3.60mol/L に固定した．スランプフローは GGBS/P=0%は 700～750mm，10%は 650～700 mm，20%は 600～650mm を目標とした．

表 3.2.1　使用材料

材料名	記号	密度(g/cm^3)	比表面積(cm^2/g)
水ガラス 1 号	SS	1.702(配合 No.1～No.10) 1.696(配合 No.11～No.13)	
NaOH 水溶液	SH	1.136(3.60mol/L)	
フライアッシュⅡ種	FA	2.24	3530
高炉スラグ微粉末	GGBS	2.91	3980
海砂（除塩）	S	2.54	-
砕石（20～10mm）	G1	2.74	-
砕石（10～5mm）	G2	2.74	-

表 3.2.2　配合および試験結果

No.	L/P (vol.)	粗骨材容積 (m^3/m^3)	GGBS/P (wt.%)	A/W	Si/A	W (kg/m^3)	スランプフロー (mm)	500mm 到達時間(s)	圧縮強度 (N/mm²)		静弾性係数 (kN/mm^2)		割裂引張強度 (N/mm²)	
									7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	28 日
1	1.00	0.28	20	0.125	0.70	213	740			28.6		10.1		
2	0.95	0.28	0	0.125	0.70	206	740		11.3	14.4	5.23	6.97	0.85	0.90
3			10				715		22.4	28.1	9.06	12.1	2.16	1.58
4			20				650		33.7	32.1	12.6	12.9	2.28	1.80
5	0.90	0.28	0	0.125	0.70	194	740	12	12.4	14.1	6.67	7.48	0.77	0.91
6	0.90	0.30	20			179	640	15	30.4	32.1	13.0	13.2	1.96	1.92
7	0.80		20			163	515	30	37.7	44.3	19.1	17.9	2.46	2.30
8	0.85	0.28	0	0.125	0.70	188	615	29	12.2	17.3	6.41	9.51	0.90	1.15
9			10				605	40	28.2	30.9	11.8	13.4	1.91	1.98
10			20				600	57	39.0	37.6	14.9	14.6	2.43	2.46
11	0.90	0.28	0	0.124	0.70	194	715	14	12.1		7.24		0.93	
12			10				665	24	27.8		12.9		1.91	
13			20				665	33	37.2		14.5		2.19	

3.2.3 作製方法・養生方法

練混ぜには，パン型一軸強制練りミキサを用いた．細骨材，活性フィラーの順に投入し，30 秒間練り混ぜた．ミキサを一旦停止させ，アルカリシリカ溶液を投入し，60 秒間練り混ぜた．掻き落としを行った後，粗骨材を投入し60秒間練り混ぜた.作製したコンクリートを型枠に打ち込んだ後,3時間の前置き時間を設け，昇降温度 13.3℃/h，最高温度 60℃，保持時間 12 時間の加熱養生を行った．その後，脱型し，気中養生（20℃，60%R.H.）を所定期間行った．なお，供試体作製用の型枠には，プラスチック製のものを使用した．

3.2.4 結果および考察

本検討では練上がり直後のスランプフローおよび材齢 7 日，28 日の圧縮強度，静弾性係数，割裂引張強度を求めた．結果は**表 3.2.2** に併記している．No.1～No.5（L/P=1.00～0.95）の場合ではスランプフローが大きく，流動性が高いことが分かった．そこで，骨材量の影響を検討するため No.6～No.7 では骨材量を増やしたところ流動性が低くなったが，スランプフローと骨材量の関係性については今後より詳細な検討が必要である.No.8～No.10(L/P=0.85)ではスランプフローが小さく,流動性が低くなった.No.11～No.13(L/P=0.90)では，目標スランプフローが得られたが GGBS/P=20%が 665mm と大きな値となった．28 日での圧縮強度は GGBS/P=0%では低くなったが，GGBS/P=10，20%では 28.1～44.3N/mm^2 と普通強度のセメントコンクリートと同等の強度が得られた．このことから，実用性を考えると GGBS を混合する配合が適していると考えられる．また，圧縮強度と静弾性係数，割裂引張強度は，L/P が小さいほど，また，GGBS/P が大きいほど増加する傾向にあることが確認できた．

以上の結果より，L/P=0.90，SS/SH=1.00，SH 濃度=3.60 mol/L に設定し，A/W=0.125 程度，Si/A=0.70 程度に調整した配合（**表 3.2.2** 中の No.11～No.13）が，比較的取り扱いのしやすい配合であった．

3.3 共通試験

3.3.1 使用材料および配合

ジオポリマーコンクリートの製造に使用した材料のうち，フライアッシュ（密度：2.24 g/cm^3，比表面積：3530 cm^2/g）と高炉スラグ微粉末 4000（密度：2.91 g/cm^3，比表面積：3980 cm^2/g，せっこう無し）は，**2.** のモルタル試験と同じものを使用した．アルカリシリカ溶液も同様に，1 号水ガラスおよび NaOH 水溶液を基本とし，各機関で準備した．細骨材および粗骨材は，各機関で準備した．

配合条件は，**3.2** の予備試験の結果を基に，**表 3.3.1** のように設定した．高炉スラグ微粉末の置換率（スラグ置換率）は 0%，10%，20%の 3 種類を設定した．空気量は 2%と仮定した．水ガラス SS，水酸化ナトリウム SH，および水 W の単位量は，水ガラスの化学成分によって変化する．例として，SiO_2：36.81%，Na_2O：17.53%の水ガラスを用いる場合の単位量を，**表 3.3.2**（上段：質量，下段：容積）に示す．この場合，NaOH 水溶液は，粒状の NaOH 特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整したものとなっている．また，全水量（アルカリシリカ溶液に含まれる H_2O の合計）は，194kg/m^3 となっている．

各機関（機関 A，B，C，H，K，M，N，P）の使用材料および試験項目の一覧を，**表 3.3.3** に示す．機関 A，B，C，H，K は，**2.** のモルタル試験にも参加した機関である．

表 3.3.1 配合条件

L/P （容積比）	SS/SH （質量比）	A/W * 目標値	Si/A * 目標値	粗骨材絶対 容積（L/m^3）	細骨材率 （容積比）
0.90	1.00	0.125±0.002	0.700±0.005	280	45%

* A：溶液中の Na モル量，W：溶液中の H_2O モル量，Si：溶液中の Si モル量

表 3.3.2 GP コンクリート配合（機関 A）（水ガラスの成分 SiO_2：37.19%，Na_2O：17.57%の場合）

SH 濃度 (mol/l)	L/P （容積比）	SS/SH （質量比）	GGBS /P	s/a	全水量 TW (kg/m^3)	単位量（上段：kg/m^3，下段：L/m^3）								
						L			P		S	G*		Air
						SS	SH	W	FA	BFS		G1	G2	
3.60	－	1.00	0%	－	194	152	152	0	555	0	582	460	307	0
	0.90	－	0%	45%	－	89	134	0	248	0	229	168	112	20
3.60	－	1.00	10%	－	194	152	152	0	511	57	582	460	307	0
	0.90	－	7.9%	45%	－	89	134	0	228	20	229	168	112	20
3.60	－	1.00	20%	－	194	152	152	0	465	116	582	460	307	0
	0.90	－	16.1%	45%	－	89	134	0	208	40	229	168	112	20

* G1：10～20mm，G2：5～10mm

3.3.2 作製方法

ジオポリマーコンクリートの作製方法は，以下の(1)～(6)に示す手順を基本とした．なお，ジオポリマーの取扱いに関する全体的に留意点は，**2.3.2** と同様であるが，以下に再掲する．

【留意点】

(a) 強アルカリ性の溶液を使用するため，保護具を着用する．

(b) ジオポリマー（特に，高炉スラグの置換率が高い場合）は硬化（凝結速度）が速く，また，金属表面に固着しやすい．よって，練混ぜに使用する各種器具は使うたびに，こまめに水で洗浄するか，プラスチック製のものを使用するか，養生テープを貼り付ける等の対策が必要である．

(c) 各種器具を使用した後の洗浄水は，強アルカリ性となる．各機関での排水基準を確認し，大量の水で薄めながら洗浄，排水するなど，あらかじめ処理方法を決めておく．

(1) 材料の準備

(a) 練混ぜの前日に，水ガラスと NaOH 溶液を混合した溶液（アルカリシリカ溶液）を作製しておく．長期間保存すると，GP の凝結特性が変化するので，長期間の保存は避ける．NaOH は溶解熱が発生する．練混ぜまでに試験室の室温まで下がるようにする．水ガラスは粘性が高いので，よく撹拌する．撹拌には金属製以外の棒，例えば，プラスチック製の棒を使用する．

(b) スラグ置換率 GGBS/P が小さい（例えば，10%以下）場合には，ミキサ内でスラグが均一に分散できない可能性があるため，練混ぜ直前までに，あらかじめ，1 バッチ分のフィラー（フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末）をビニール袋（破れないように厚手のものが良い）に入れて，プレミックスしておく．

(2) 練混ぜ方法

以下の手順を基本とするが，実際の練混ぜ状況に応じて練混ぜ時間は調整する．

① あらかじめ，水ガラスと NaOH 溶液を混合した溶液（アルカリシリカ溶液）を作製しておく．

② ミキサにあらかじめ細骨材，フィラーを順に入れ，30 秒間，空練りする．

③ ミキサを止め，アルカリシリカ溶液を入れる．60 秒間，練り混ぜる．ミキサの始動時に溶液が飛散しないように十分に注意する．

④ ミキサを止め，掻き落としを行う．粗骨材を入れる．

⑤ 60 秒間練り混ぜる．均一に混ざっていることを目視で確認した後，ミキサから排出し，練り舟に入れる．

(3) スランプフロー試験

練混ぜ終了後，JIS A 1150 に従い，スランプフロー試験を行う．なお，高炉スラグ置換率が高い場合には，凝結速度が速いので，スランプフロー試験と同時に，強度試験用供試体の作製を行うのが良い．

(4) 強度試験用供試体の作製

JIS A 1132 に従って行うのを標準とする．ただし，2 層以上に分けて詰める場合は，下の層と上の層との間にコールドジョイントが生じないように，できるだけ時間を空けずに詰める．

(5) 加熱養生

下記の手順で加熱養生を実施する．加熱養生を行わない場合，硬化後の適切な時期に脱型を行う．

① 成形の終了後，試験室で 3 時間，前置きを行う．水分の蒸発を防ぐため，型枠の上面はプラスチックフィルムおよび湿布で覆い，ビニール袋に入れる．

② 型枠を加熱養生装置に移動させ，加熱養生を行う．移動させる際に，衝撃を与えないようにする．最高温度は 60℃，保持時間は 12 時間とする．昇温および降温の速度は，13.3℃/h とする（3 時間で 20℃から 60℃に達する）．

③ 加熱養生装置内の温度を記録する．

④ 加熱養生装置内の温度が 20℃または室温まで降下した時点を，加熱養生終了とする．

(6) 脱型および養生

加熱養生終了後，供試体を型枠から取り出し，質量および寸法を測定する．寸法はノギスで測定する．寸法および質量から，単位容積質量を算出する．その後，所定の環境（温度 20±2℃，相対湿度 60±5%を標準とする）で貯蔵する．

表 3.3.3(a)　各機関の使用材料，試験方法・項目

機関名		A	B	C
材料種類・物性値	水ガラス	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.7（15℃） 密度:1.702g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：37.19% Na_2O：17.57%	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.4（15℃） 密度:1.696g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：36.81% Na_2O：17.53%	S 社製 1 号珪酸ソーダ SiO_2：36.8% Na_2O：17.7% （水＋水ガラス＋NaOH で密度 1.36g/cm^3）
	NaOH 溶液	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整．密度：1.136g/cm^3	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整．密度：1.136g/cm^3	T 社製 48%水溶液
	水	実験用水 （逆浸透膜透過水）	上水道水	水道水
	フライアッシュ	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	高炉スラグ微粉末	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	細骨材	除塩海砂 密度 2.54g/cm^3	川砂 密度 2.59g/cm^3，吸水率 2.17%	山砂 密度 2.56g/cm^3，吸水率 1.9%，粗粒率 2.88
	粗骨材	砕石 2005 密度 2.74g/cm^3 G1(10-20mm):G2(5-10mm) = 6：4	硬質砂岩砕石 密度 2.63g/cm^3，吸水率 0.59%	陸砂利 密度 2.68g/cm^3，Gmax 20mm
練混ぜ	ミキサ種類	パン型一軸ミキサ（容量 50L）	水平二軸強制練りミキサ（容量 60L）	
	1 バッチの練混ぜ量	30 L	30 L	
養生方法		加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	
試験項目	スランプフロー	○	○	○
	500mm フロー到達時間	○	○	○
	フローの流動停止時間	○		
	空気量	○	○	
	圧縮強度	○ 7 日，28 日	○ 7 日，28 日	○ 7 日，28 日
	静弾性係数	○	○	○
	ポアソン比	○	○	
	割裂引張強度	○		○
	単位容積質量		○	○
	動弾性係数			○
	長さ変化			
備考				

表 3.3.3(b)　各機関の使用材料，試験方法・項目

機関名		H	K	M
材料種類・物性値	水ガラス	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.5（15℃） 密度：1.700g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：37.00% Na_2O：17.49%	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.7（15℃） 密度：1.702g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：37.19% Na_2O：17.57%	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.3（15℃） 密度:1.694g/cm^3(ボーメ度から算出) SiO_2：36.49% Na_2O：17.66%
	NaOH 溶液	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整．密度：1.136g/cm^3	X 社製 苛性ソーダ 濃度 35%	Z 社製 8mol/L NaOH 溶液
	水	蒸留水	実験用水	蒸留水
	フライアッシュ	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	高炉スラグ微粉末	標準サンプル	標準サンプル	標準サンプル
	細骨材	静岡県産 密度 2.58g/cm^3，吸水率 1.64%，粗粒率 2.59	S1：海砂，密度 2.57g/cm^3 S2：砕砂，密度 2.66g/cm^3 S1:S2 = 1:1（体積比）	S1（山砂），S2（陸砂） 密度 2.64g/cm^3，吸水率 1.16%，粗粒率 2.73
	粗骨材	G1（13～20mm）： 密度 2.66g/cm^3，吸水率 0.40%，粗粒率 7.03 G2（5～13mm）： 密度 2.66g/cm^3，吸水率 0.46%，粗粒率 6.33 G1:G2 = 6:4	G1：密度 2.66g/cm^3 G2：密度 2.70g/cm^3 G1:G2 = 1:1（体積比）	G1(10～20mm),G2(5～10mm) 密度 2.66g/cm^3，吸水率 0.76%，粗粒率 6.60
練混ぜ	ミキサ種類	一軸パン型（容量 45L）	強制練り水平二軸ミキサ（容量 55L）	一軸パン型ミキサ（容量 50L）
	1 バッチの練混ぜ量	20L	35L	30L
養生方法		加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）
試験項目	スランプフロー	○	○	○
	500mm フロー到達時間	○	○	○
	フローの流動停止時間	○	○	○
	空気量		○	○
	圧縮強度	○ 7 日，28 日	○ 7 日，28 日	○ 7 日，28 日
	静弾性係数		○	○
	ポアソン比			○
	割裂引張強度		○	○
	単位容積質量			○
	動弾性係数			
	長さ変化		○脱型⇒材齢 7 日まで封かん⇒気中（基長：材齢 7 日）	
備考				

表 3.3.3(c)　各機関の使用材料，試験方法・項目

機関名		N	P
材料種類・物性値	水ガラス	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：59.7（15℃） 密度：1.702g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：37.19% Na_2O：17.57%	R 社製 J 珪酸ソーダ 1 号 ボーメ度：60.0（15℃） 密度：1.70g/cm^3（ボーメ度から算出） SiO_2：37.2% Na_2O：17.5%
	NaOH 溶液	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.60mol/L に調整．密度：1.136g/cm^3	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして調整． 密度：1.13g/cm^3
	水	水道水	精製水
	フライアッシュ	標準サンプル	標準サンプル
	高炉スラグ微粉末	標準サンプル	標準サンプル
	細骨材	川砂 密度 2.59g/cm^3，吸水率 2.49%，粗粒率 2.68	除塩海砂 密度 2.56g/cm^3，吸水率 1.62%，粗粒率 2.50
	粗骨材	川砂利 密度 2.60g/cm^3，吸水率 2.23%，粗粒率 6.89，Gmax 25mm	硬質砂岩砕石 密度 2.70g/cm^3，吸水率 0.44%，粗粒率 6.55
練混ぜ	ミキサ種類	一軸パン型ミキサ（容量 60L）	平型強制ミキサ
	1 バッチの練混ぜ量	35L	30L
養生方法		20℃ 封緘養生	加熱養生後，気中養生（20℃，60%R.H.）， 20℃ 気中養生 （材齢 7 日まで型枠存置，以降，気中養生）
試験項目	スランプフロー	○	○
	500mm フロー到達時間	○	
	フローの流動停止時間	○	
	空気量	○（スラグ置換率 20%のみ）	
	圧縮強度	○ 7 日，28 日	○ 60℃は 7 日，28 日 20℃は 7 日，14 日，28 日
	静弾性係数	○	
	ポアソン比		
	割裂引張強度	○	
	単位容積質量		
	動弾性係数		
	長さ変化		
備考			

3.3.3　フレッシュ性状

スランプフロー試験および空気量試験の結果を，**表 3.3.4** および**図 3.3.1** に示す．また，代表的な例として，機関 A のスランプフロー試験後の状況を，**写真 3.3.1** に示す．スランプフローの平均値および標準偏差は，スラグ置換率 0%で 676±38mm，10%で 658±38mm，20%で 644mm±32mm となり，スラグ置換率が大きいほどスランプフローは低下するものの，スラグ置換率の差による標準偏差の違いは認められなかった．また，空気量の範囲は，1.5～2.8%であった．

500mm フロー到達時間およびフローの流動停止期間の測定結果を見ると，500mm フロー到達時間は，スラグ置換率による差がない場合と，スラグ置換率が大きいほど時間が長くなるものの 2 通りの結果が見られた．フローの流動停止時間は，スラグ置換率が大きいほど短くなる傾向が認められたが，各機関で測定された時間には開きがあった．

表 3.3.4　スランプフロー試験および空気量試験結果

（上段：スランプフロー，中断：500mm フロー到達時間，フローの流動停止時間，下段：空気量）

機関名	スラグ置換率 0%	スラグ置換率 10%	スラグ置換率 20%
A	715mm（740×690）	665mm（650×680）	663mm（655×670）
	14s，112s	24s，120s	33s，120s
	1.6%	1.8%	1.5%
B	611mm（596×625）	585mm（580×590）	600mm（600×600）
	25s，-	24s，-	22s，-
	1.6%	1.8%	1.5%
C	703mm	703mm	689mm
	11s，-	16s，-	12s，-
	-	-	-
H	703mm（690×715）	664mm（663×664）	649mm（632×666）
	17s，111s	22s，91s	32s，105s
	-	-	-
K	690mm（690×685）	695mm（700×685）	670（670×665）
	28.6s，264.1s	27.6s，236.1s	39.3s，202.1s
	2.7%	2.4%	2.5%
M	632mm（643×620）	612mm（622×601）	598mm（603×593）
	8.7s，143.5s	8.6s，114.8s	20.6s，107.4s
	2.8%	2.2%	2.2%
N	713mm（725×701）	683mm（678×687）	637mm（640×633）
	12s，303s	16s，212s	12s，200s
	-	-	1.8%
P	644mm（656×631）	653mm（660×645）	652mm（667×637）
	-	-	-
	-	-	-

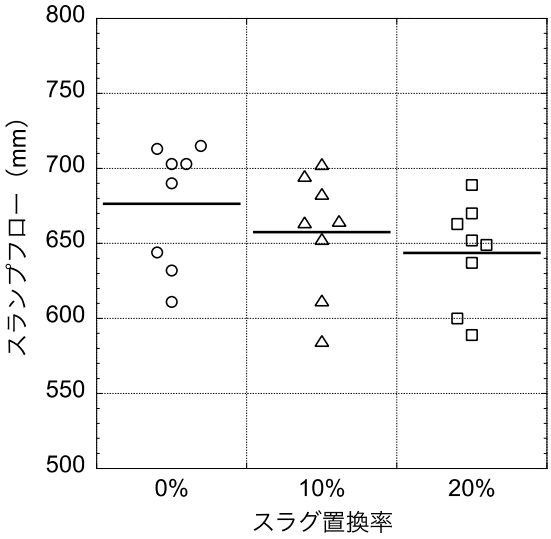
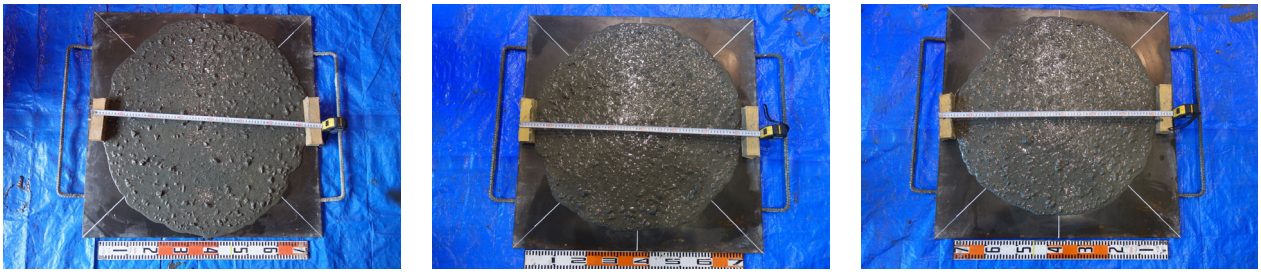


図 3.3.1　スランプフロー試験結果



(a) スラグ置換率 0%　　(b) スラグ置換率 10%　　(c) スラグ置換率 20%

写真 3.3.1　スランプフロー試験結果

3.3.4　強度および変形性状

(1) 圧縮強度

強度および変形性状に関する試験結果を，**表 3.3.5** および**表 3.3.6** に示す．**図 3.3.2** は，加熱養生を行った場合の材齢 7 日および 28 日の強度を示したものである．図より，高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど，強度が高くなっているが，材齢 7 日から 28 日の期間での増加は，ほとんど見られないことが分かる．加熱養生を行わなかった機関 N（20℃封緘養生），機関 P（材齢 7 日まで 20℃封緘養生，その後，気中養生）の結果を見ると，スラグ置換率 0%では強度が低く，材齢 28 日においても加熱養生の 6～7 割の強度であるのに対し，スラグ置換率を 20%に高めると，材齢 28 日では加熱養生の強度と同等あるいは若干上回る強度が得られていることが分かる．

(2) 割裂引張強度

図 3.3.3 は，圧縮強度と割裂引張強度の関係（全データ）を示したものである．スラグ置換率に依らず，両者の関係は，1:15 であった．なお，この比は，**2.** で示したモルタル試験の場合と同じである．

(3) 静弾性係数，ポアソン比

圧縮強度と静弾性係数の関係（全データ）を，**図 3.3.4** に示す．両者の関係は，累乗式で近似することができた．静弾性係数の値は，骨材の種類・品質の影響を受けると考えられるが，本試験の範囲内では，セメントコンクリートの一般的な値に対して，2 分の 1 程度であった．

ポアソン比については，スラグ置換率が高いほど，まだ，材齢が経過するほど，若干ではあるが小さくなる傾向にあったが，全体としては，0.17～0.20 の範囲内にあり，セメントコンクリートと大差はないものと考えられる．

(4) 長さ変化

機関 K によって，脱型後，材齢 7 日まで封緘養生し，気中養生とした場合の長さ変化が計測されている（基長：材齢 7 日）．**図 3.3.5** に結果を示す．スラグ置換率の差によって質量変化に差が認められるものの，ジオポリマーコンクリートの長さ変化（乾燥収縮ひずみ）は，ほぼ同程度であった．

表 3.3.5　ジオポリマーコンクリート強度試験結果（60℃加熱養生）

（強度の単位：N/mm^2，静弾性係数の単位：kN/mm^2）

機関	材齢	スラグ置換率 0%				スラグ置換率 10%				スラグ置換率 20%			
		圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比	割裂引張強度	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比	割裂引張強度	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比	割裂引張強度
A	7 日	12.7	7.24	0.19	0.93	27.8	12.9	0.16	1.91	37.2	14.5	0.14	2.19
	28 日	14.3	8.40	0.17	1.03	29.3	13.6	0.19	2.08	35.6	14.4	0.15	2.16
B	7 日	8.7				23.5				32.8			
	28 日	11.4	5.22	0.18		25.5	9.06	0.15		33.6	10.4	0.18	
C	7 日	6.6	3.6		0.61	24.0	9.3		1.69	37.3	15.5		2.62
	28 日	7.6	4.8		0.68	26.2	10.3		1.57	42.3	15.7		2.65
H	7 日	8.1				26.0				34.4			
	28 日	9.7				28.2				32.3			
K	7 日	12.2	5.7		1.0	31.1	11.4		2.5	47.2	18.2		3.6
	28 日	14.5	6.9		1.2	32.6	12.7		2.4	46.0	16.8		3.2
M	7 日	10.2	4.12	0.21	0.77	30.1	10.6	0.21	1.97	40.1	18.7	0.19	2.58
	28 日	12.1	5.23	0.20	1.01	32.1	12.5	0.18	2.29	38.7	14.7	0.19	2.26
P	7 日	8.8				22.2				36.2			
	28 日	12.5				26.4				40.7	12		
平均	7 日	9.61	5.17	0.20	0.83	26.4	11.1	0.19	2.02	37.9	16.7	0.17	2.75
	28 日	11.6	6.11	0.18	0.98	28.9	11.6	0.17	2.09	38.1	14.4	0.17	2.57
標準偏差*	7 日	2.05	1.43	－	0.15	3.16	1.30	－	0.30	4.36	1.77	－	0.52
	28 日	2.43	1.35	－	0.19	2.69	1.68	－	0.32	4.84	2.17	－	0.41

* ポアソン比を除く．

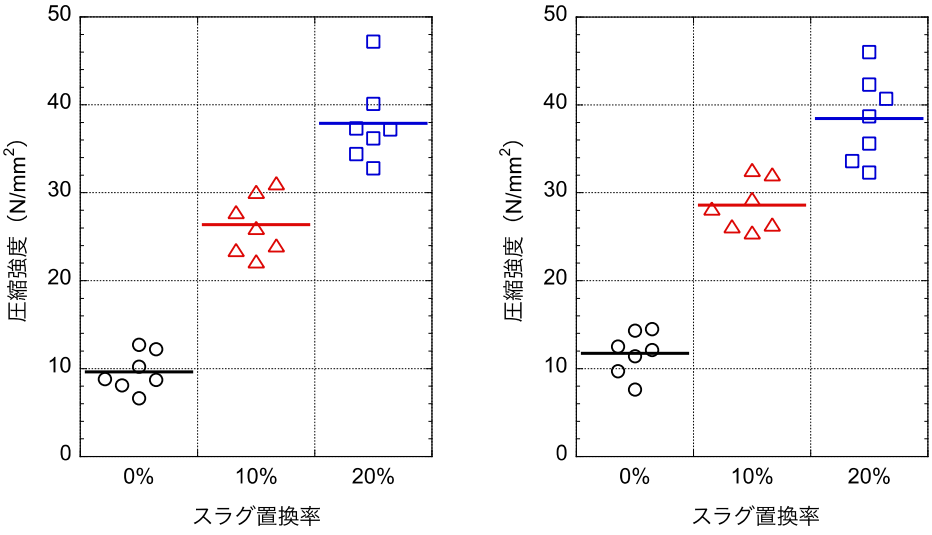
表 3.3.6　ジオポリマーコンクリート強度試験結果（20℃養生）

（強度の単位：N/mm^2，静弾性係数の単位：kN/mm^2）

機関	材齢	スラグ置換率 0%				スラグ置換率 10%				スラグ置換率 20%			
		圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比	割裂引張強度	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比	割裂引張強度	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比	割裂引張強度
N*	7 日	1.5			0.18	8.9			0.77	24.8			1.96
	28 日	7.6	10.1		0.66	22.2	14.4		1.78	40.1	16.4		2.48
P**	7 日	2.7				6.0				11.9			
	14 日	6.0				10.5				22.0			
	28 日	11.9				22.0				42.9			

* 機関 N は，温度 20℃の環境で封緘養生（加熱養生なし）．

** 機関 P は，温度 20℃の環境で材齢 7 日まで封緘養生し（加熱養生なし），脱型後，試験材齢まで気中養生．



（a）7 日強度　　（b）28 日強度

図 3.3.2　圧縮強度（機関 N を除く）

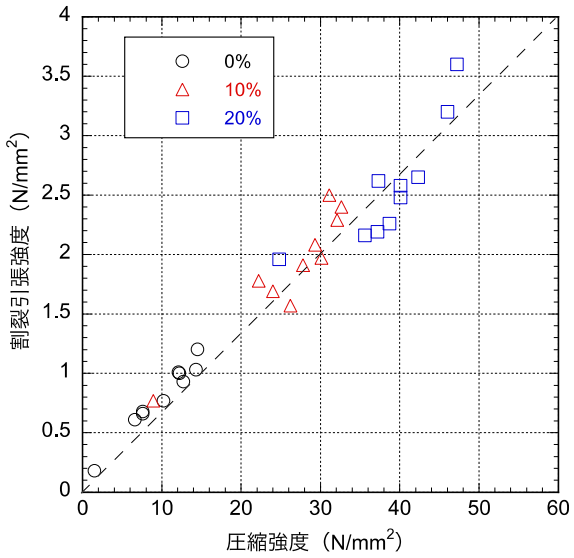


図 3.3.3　圧縮強度と割裂引張強度の関係

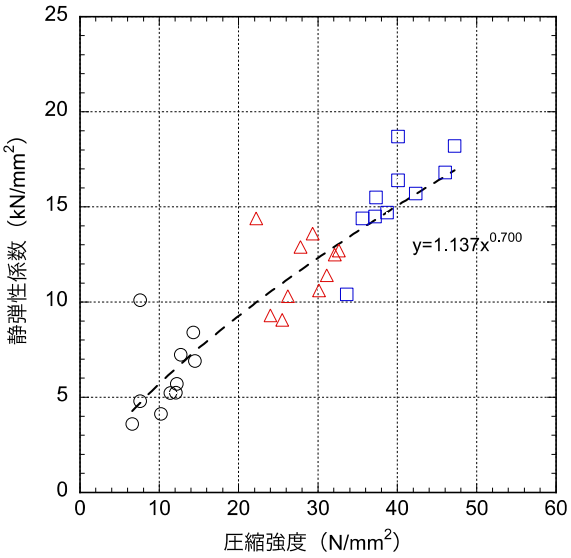
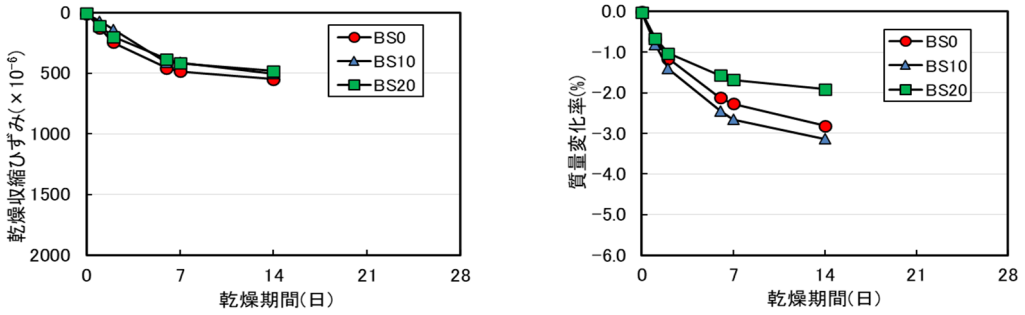


図 3.3.4　圧縮強度と静弾性係数の関係



（a）長さ変化　　（b）質量変化

図 3.3.5　長さ変化試験結果

４．総括および今後の課題

ジオポリマーの建設材料としての普及を目指し，原材料の取扱い，練混ぜ，加熱養生などに関する知見，情報を共有しながら，ジオポリマーの基本物性に関する議論を行うため，GP モルタルおよび GP コンクリートの共通試験を実施した．モルタル試験には 12 機関，コンクリート試験には 8 機関が参加した．

まず，GP モルタル試験として，作製のしやすさを考慮して，L/P=1.00，SS/SH=1.00，A/W=0.125，Si/A=0.700 の配合条件の下で，フライアッシュに対する高炉スラグ微粉末の置換率（以下，スラグ置換率）を 0%，10%，20%に変化させた場合のモルタルフロー，強度およびそれらのばらつきについて調査した．その結果，以下のような知見が得られた．

- 15 打フローは 240～250mm 程度で，スラグ置換率が 20%の場合にフロー値が 10mm 程度低くなった．今回の試験で対象とした水ガラスを用いたジオポリマーは粘性が比較的高いことから，0 打フローと 15 打フローの差は小さくなった．JIS R 5201 で規定されているセメントのフロー試験のジオポリマーへの適用性については，今後さらなる検討が必要である．
- 60℃の加熱養生を行った後，20℃，60%R.H.の条件で気中養生を行った結果，材齢 7 日から 28 日の強度の増加は小さかった．一部の供試体では，強度増加がほとんど無いものや，若干低下するものも認められた．ジオポリマー化の反応が十分でない場合には，材齢経過に伴う水分の逸散，それに伴う収縮，さらには微細ひび割れの進展の可能性が考えられる．最適な養生条件，長期材齢での安定性などについて，さらなる研究が必要である．

次に，GP コンクリート試験として，高流動 GP コンクリートの作製を行い，GP モルタルの場合と同様に，スランプフロー，強度およびそれらのばらつきについて調査した．配合条件は，L/P=0.90，SS/SH=1.00，A/W=0.125，Si/A=0.700 とし，高流動コンクリートのランク 1 に相当するものが得られるよう，粗骨材絶対容積を 280L/m^3，細骨材率を 45%に設定した．実験の結果，以下のような知見が得られた．

- スランプフローは，スラグ置換率 0%で 680mm 程度，10%で 660mm 程度，20%で 640mm 程度となった．500mm フロー到達時間は，スラグ置換率による差がないものと，スラグ置換率が大きいほど時間が長くなるものの 2 通りの結果が見られた．フローの流動停止時間は，スラグ置換率が大きいほど短くなる傾向が認められたが，各機関で測定された時間には大きなばらつきが認められた．フレッシュ性状について，セメントコンクリートと比べて敏感であるかどうかは，検討の余地が残る．
- GP モルタルの場合と同様に，スラグ置換率が高いほど，強度が高くなること，また，材齢 7 日から 28 日の期間での増加はほとんど見られないことが明らかとなった．加熱養生を行わない場合でも，スラグ置換率を 20%にすることで，材齢 28 日での強度は，加熱養生ありの場合と遜色のない強度が得られた．
- 割裂引張強度は，圧縮強度の 15 分の 1 程度となった．静弾性係数は，セメントコンクリートで一般的に用いられる値の 2 分の 1 程度であった．ポアソン比は，セメントコンクリートと同等の 0.17～0.20 の範囲であった．長さ変化については，モルタルも含め，事例が少ないことから，今後さらなる検討が必要である．

参考文献

1) 日本コンクリート工学会:建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書,pp.197-218, 2017.9

2) 日本コンクリート工学会九州支部：建設材料としてのジオポリマーに関する研究委員会報告書，pp.153-

163, 2016.11
3) Provis, J.L., Arbi, K., Bernal, S.A. et al.: RILEM TC 247-DTA round robin test: mix design and reproducibility of compressive strength of alkali-activated concretes. Mater Struct 52, 99 (2019). https://doi.org/10.1617/s11527-019-1396-z
4) 香島和輝，佐川康貴，仲町征将，大樂一史：フライアッシュを用いたジオポリマーモルタルの汎用的配合の提案，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，V-550，2022.9
5) 篠原弘充，安琳，高橋良和：アルカリ/水比がジオポリマーモルタルの性能に及ぼす影響，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，V-555，2022.9
6) 川上英男:セメントペースト及びモルタルの弾性係数と材齢の関係,コンクリート工学年次論文集,Vol.27, No.1，pp.349-354，2005.7
7) 仲町征将，佐川康貴，香島和輝，大樂一史：高流動ジオポリマーコンクリートの配合および強度に関する検討，令和3年度土木学会西部支部研究発表会，V-016，2022.3

謝辞：材料の提供ならびに試験の実施にご協力を頂いた皆様に，この場を借りて謝意を表する.

（執筆者：佐川　康貴）

Ⅳ．使用目的ごとの現状と課題

１．はじめに

第Ⅳ編は，ジオポリマーモルタルおよびコンクリートの実用化，一般化を考えるにあたり，土木構造物の材料として使用目的ごとに現状と課題をまとめることを試みたものである．

2～4 章では，補修材，工場製品，現場打ちを前提とした RC および PC 構造を想定し，設計・施工において，従来のセメント系材料を用いた場合との比較を念頭に，現状と課題をとりまとめた．

補修材について一般的に求められる要求性能は，充填性や寸法安定性（収縮・膨張が少ない）である．この本質はセメント系においてもジオポリマーにおいても変わることはないが，ジオポリマーは一般にフレッシュ性状において一般的に粘性が高く左官性が良くないこと，常温養生では収縮の影響が大きくひび割れが生じやすいこと等，補修材料として実用化するためには多くの課題を有していると言われてきた．高い耐酸性などのジオポリマーの利点を活用するため，さらなる課題の検討が求められている．

工場製品についても，要求性能や照査指標は基本的にセメント系と同じであるため，検査は JIS に準じて行われることが想定される．一方で，ジオポリマーはフレッシュ性状がセメント系材料とは異なるため，加圧成型，遠心力締固め，ロール転圧など成型に関わる技術が適用できるかは確認されていない．また，プレストレストコンクリートとして用いる場合，ジオポリマーのクリープ性状に関する研究例は限られていることも，課題として挙げられた．

現場打ちを前提とした RC および PC 構造では，施工よりも設計に着目し，従来のセメント系コンクリートとジオポリマーコンクリートとで設計計算においてどのような違いが生じ得るか，簡易な梁を題材として計算例を併記することで，具体的に示した．硬化後の諸特性については，第Ⅱ編にも示されるとおり，ジオポリマーコンクリートのヤング係数が一般的にセメント系コンクリートよりも低い傾向であることが，設計計算上での違いをもたらす要因である．また，設計で必要な様々な安全係数について，ジオポリマー部材はセメントコンクリート部材のように研究事例が蓄積されていない．よって現状では示方書等で一様に規定するのは困難であると考えられることから，設計者が設定しなければならないことが，課題として挙げられる．

5 章では，ジオポリマー材料のひとつの特長である有害物質の固定を目的として使用する場合を想定し，構造物を限定せず一般的な知見をとりまとめた．

6 章では，英国規格（British Standards、略称 BS）の PAS（公開仕様書）の一部を紹介した．各国でジオポリマーに関する規格類の整備が始まっており，RILEM の研究委員会の活動の一環としてその調査が行われているため，詳細はそちらの報告を参照されたい．

（執筆者：藤山　知加子）

２．補修材

2.1　セメント系の場合

劣化したコンクリート構造物の補修には，補修対象部位の劣化状態に応じて，セメント系補修材や樹脂系補修材が用いられる．セメント系補修材の多くは，ラテックスやエマルジョン，粉末樹脂を混和したポリマーセメント系補修材として用いられる．適切に設計したポリマーセメント系補修材は，ポリマーを用いない場合と比べて，劣化因子に対する遮蔽性，曲げ強さ，接着性，変形能力などが改善するため，コンクリート構造物の補修材として広く普及している[1)-3)]．ポリマーセメント系補修材は，セメント，骨材，混和材，セメント混和用ポリマーおよび各種添加剤を原材料とし，種々の配合で混合されたプレミックス製品として市販されている．そのフレッシュ性状は，補修対象部位の状況に応じて，適切な粘性に調整され，スラリー，ペースト，モルタルおよびコンクリートとして用いられる．フレッシュ性状や硬化物の品質は，補修材の用途や補修対象構造物の種類に応じて,構造物を管理する国や地方公共団体,鉄道や高速道路を管理する企業,並びに，学協会により定められている．補修材の要求性能は，補修の目的と目標回復レベルに応じて，適切な品質評価項目，試験方法および規格値が設定される．

2.1.1 ひび割れの補修

ひび割れの補修の目的と要求性能の一般的な考え方を**表 2.1.1** に示す．ひび割れの補修の目的は，ひび割れを塞ぐことによる外部からの「劣化因子の浸入抑制」，並びに，ひび割れの充てん接着による「一体性の回復」にある．しかし，ひび割れの状態はその劣化原因により様々であるため，劣化状況に応じた補修方法を選択する必要がある．

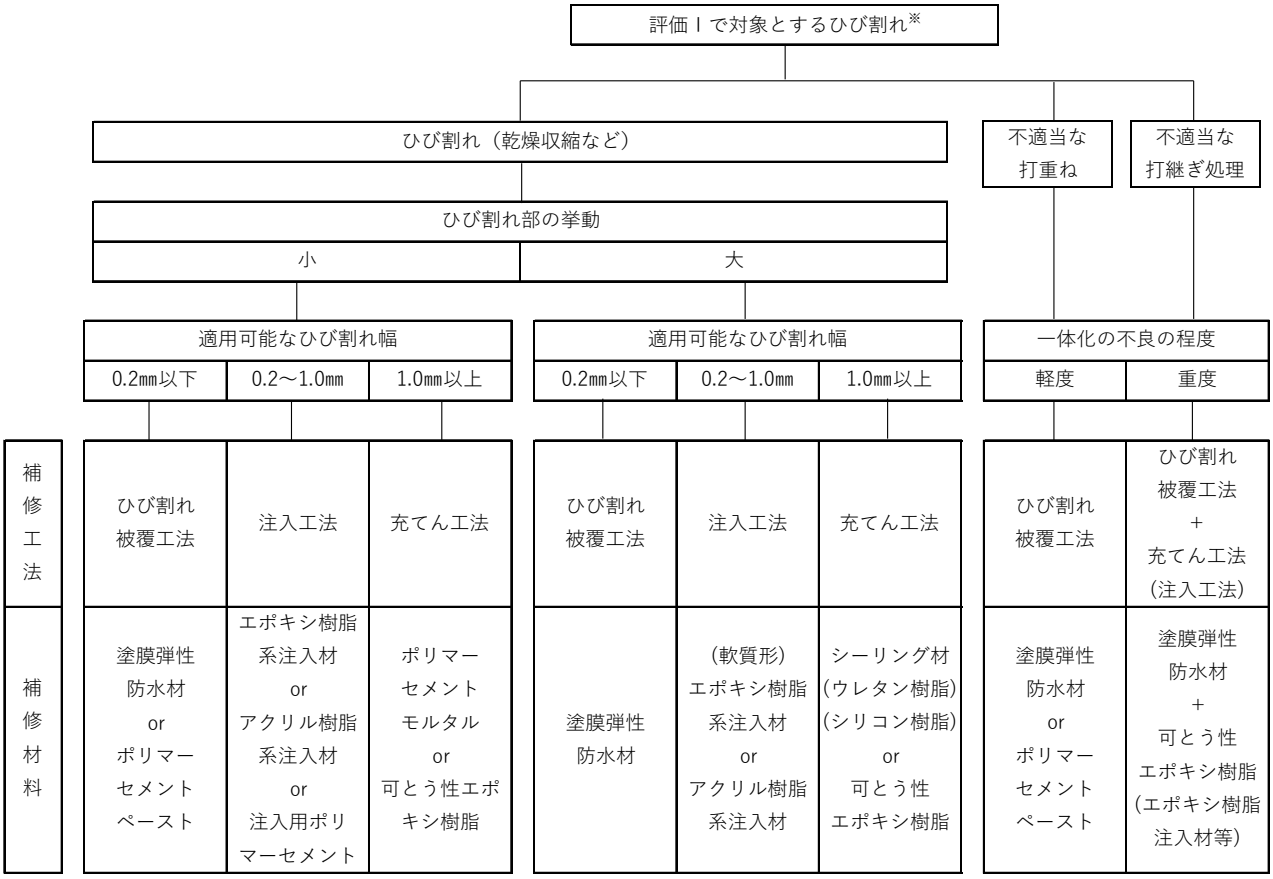
表 2.1.1　ひび割れの補修の目的と要求性能

ひび割れの補修の目的	要求性能
劣化因子の浸入抑制	充てん性，寸法安定性
一体性の回復	充てん性，寸法安定性，充てん接着性

ひび割れの補修工法の選定例を**図 2.1.1** に示す．ひび割れの補修は，ひび割れ部の挙動の有無およびひび割れ幅に応じて，適切な補修工法と補修材料が提案[4)]されている．

ひび割れ部の挙動が大きい場合は，その挙動に追従可能な変形能力を有する有機系補修材が用いられる．ポリマーセメント系補修材によるひび割れ補修は，ひび割れ部の挙動が小さい場合に適用され，そのひび割れ幅に応じて，被覆，注入，充てんを行い，外部からの劣化因子の浸入抑制が図られている．確実にひび割れを塞ぎ，劣化因子の浸入を抑制するために，ひび割れの幅や深さに応じて，適切な粘性となるように補修材が設計されている．特に，ひび割れを注入工法によって補修する場合，ひび割れの隅々まで注入材を充てんさせるために，一般的なポルトランドセメントよりも粒子の細かい超微粒子のセメントを用い，且つ，注入時の流動性が維持できるような材料設計が成されている．

ジオポリマーは，水ガラスなどの強アルカリの液体と活性フィラーを混合して製造されるが，その液状部の粘性に起因して，一般的なポリマーセメント系注入材と比べて粘性が高くなることが予想される．ジオポリマーを用いたひび割れ補修材を開発する場合には，施工性，注入時の充てん性が課題になると思われる．一体性の回復を補修の目的とする場合には,母材に対する充てん接着性も重要な評価項目として挙げられる．



※「評価Ⅰで対象とするひび割れ」とは乾燥収縮や水和熱によるひび割れなど，竣工から数年内には収束すると考えられるひび割れをさす。

図 2.1.1　ひび割れの補修工法の選定例[4]**を元に作成）**

2.1.2 断面（欠損）の補修

断面（欠損）の補修の目的と要求性能の考え方の例を**表 2.1.2** に示す．断面（欠損）の補修の目的は，補修材で断面（欠損）を充てん，成形することによる「形状の回復」,「かぶり厚さ確保による鉄筋の保護」,「力学性能の回復」,「不陸修正，素地調整」にある．コンクリート構造物に断面（欠損）の補修が必要となるケースは様々で，劣化原因や補修の目的に応じた材料と工法の選定が必要となる．

表 2.1.2　断面（欠損）の補修の目的と要求性能

断面（欠損）の補修の目的	要求性能
形状の回復	保形性(ダレ抵抗性)，下地との接着性，浮きやひび割れに対する抵抗性
かぶり厚さ確保による鉄筋の保護	劣化因子の遮蔽性，下地との接着性，浮きやひび割れに対する抵抗性，必要に応じて耐火性や耐熱性
力学性能の回復	母材と同等以上の強さ，母材と同等程度の弾性係数， 下地との接着性，浮きやひび割れに対する抵抗性
不陸修正，素地調整	下地との接着性，浮きやひび割れに対する抵抗性， 必要に応じて耐薬品性

断面（欠損）の補修に用いる材料の種類は，ポリマーセメント系補修材が主流である．ポリマーセメント系補修材には，モルタルやコンクリートがあるが，補修材メーカでその用途に合わせて設計，プレミックスされた既調合品が広く用いられている．特に，二材形や一材形のポリマーセメントモルタルが断面修復材として一般的に普及している．断面修復工法には，修復面積の規模，施工方向に応じて，左官工法，モルタル注入工法，吹き付け工法があり，補修目的に応じて適切な工法と材料が選定される．

ジオポリマーを用いた断面修復材の開発に当たっては，下地との接着性確保のための適切なプライマーの選定，浮きやひび割れ防止のための寸法安定性が課題となる．ジオポリマーは耐火性に優れるという報告[5)]もあり，火災時に鉄筋を保護するための耐火性（非損傷性，遮熱性，遮炎性）のデータ拡充が望まれる．又，温泉地の排水路や工場の排煙設備においては，常に高温環境に暴される環境での使用も想定され，長期的な耐熱性に関するデータ拡充が望まれる．更に，ジオポリマーは，耐酸性や耐薬品性に優れるという報告[6)]もあるが，ジオポリマーの配合や養生方法によっては，長期的に性能が変化する可能性もあるため，更なる知見の蓄積が望まれる．

2.1.3 表面の補修

表面の補修の目的と要求性能一般的な考え方の例を**表 2.1.3** に示す．表面の補修の目的は，劣化などにより凸凹が生じた表面の不陸修正による「形状の回復」，型枠の目違い段差や型枠のゆがみによる不陸，表層の空隙の穴埋めによる「表面の平滑化や平坦化」，複層塗装時における次工程のための「下地の表層改質」，表面保護による「劣化因子の遮蔽」，「コンクリート片剥落防止」にある．

表 2.1.3　表面の補修の目的と要求性能

表面の補修の目的	要求性能
形状の回復 （不陸修正，素地調整）	下地との接着性，浮きやひび割れに対する抵抗性，必要に応じて耐火性・耐熱性および耐酸性・耐薬品性
表面の平滑化や平坦化 （不陸修正，素地調整）	下地との接着性，浮きやひび割れに対する抵抗性，必要に応じて耐火性・耐熱性および耐酸性・耐薬品性
下地の表層改質 （塗り継ぎ性，塗り継がれ性）	下地との接着性（塗り継ぎ性），次工程材料との接着性（塗り継がれ性），複層塗装時の接着耐久性
劣化因子の遮蔽 （表面保護）	防水性，遮塩性，ひび割れ追従性，下地との接着性， 寸法安定性，浮きやひび割れに対する抵抗性
コンクリート片の剥落防止 （表面保護）	押抜き強度，下地との接着性，浮きやひび割れに対する抵抗性

表面の補修のための材料の種類は，用途によって異なり，不陸修正や素地調整には薄塗り用のポリマーセメントモルタルやペーストが広く用いられている．下地の表層改質には，エマルジョンやエポキシ樹脂系接着剤と組み合わせたペーストやモルタルが用いられている．表面保護（表面被覆，剥落防止）には，遮蔽性および面外変形能力に優れた有機系補修材が主に用いられているが，単位ポリマー量を増加させて遮蔽性や変形能力を向上させたポリマーセメントモルタルやペーストも用いられている[7)]．

表面の補修においては，下地との一体性を確保するために下地との接着性が重要となる．又，接着性に加え，寸法安定性が不十分であるとひび割れや浮きが生じるリスクが高まる．ジオポリマーを用いて表面の補

修を行う場合には，下地との良好な接着性，供用環境に近い条件での寸法安定性，浮きやひび割れに対する抵抗性の確認が必要と思われる．又，ジオポリマーの組織は，ジオポリマーを構成する結合材やアルカリ刺激剤の成分によって微細構造が変わることが報告[8)]されており，用途によっては，劣化因子の移動速度や遮蔽性も重要な評価項目となり得る．ジオポリマーは，その優れた耐酸性や耐薬品性を活用して，温泉地や化学工場の床など，酸や薬品によって劣化したコンクリート表面の補修への展開が期待される．セメント系材料にはないジオポリマーの優れた特徴を発揮させるために，耐酸性や耐薬品性に関する更なるデータ拡充が望まれる．

参考文献

1) 波木守，大濱嘉彦：プラスチックスコンクリート，高分子刊行会，pp.68-185，1965
2) 大濱嘉彦,出村克宣:ポリマーセメントコンクリート／ポリマーコンクリート,シーエムシー出版,p.275,2002 年 9 月
3) コンクリート・ポリマー複合体の施工指針(案)・同解説，日本建築学会，p.341，2011
4) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針－2022－，p.114，2022
5) 橋本忍，鎌田隼人，山崎裕司，竹田はやみ：ジオポリマーの耐火材料への適用，耐火物，Vol.64，No.9，pp.446-451，2012
6) 一宮一夫：ジオポリマーの研究開発の現状，コンクリート工学，Vol.55，No.2，pp.131-137，2017
7) 土木学会：表面保護工法　設計施工指針(案)　工種別マニュアル編，コンクリートライブラリー119，p.266，2005
8) 山本武志，菊地道生，大塚拓：NaOH 刺激による FA-GGBS-SF 混合型ジオポリマーにおける反応相の物理化学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1869-1874，2018

（執筆者：熊谷　慎祐，依田　侑也）

2.2　ジオポリマーの場合

2.2.1　ジオポリマーコンクリートの断面修復への適用

(1)　適用個所の概要

日本製鉄株式会社東日本製鉄所鹿島地区構内の鉄筋コンクリート擁壁補修にジオポリマーコンクリートを適用した．この擁壁は，鉱滓仮置きヤードに面しており，常に高温状態に晒され，コンクリートの熱劣化による鉄筋かぶりコンクリートの浮きや剥離剥落が顕著であった為，耐熱性が高い材料を断面修復材料として選定する必要があった．補修範囲は，延長 24.7m×高さ 1.3m×厚さ約 0.1m（打設数量：約 3.2m^3）であり，施工性の観点からコンクリートポンプ車による圧送による打設を計画した(**図 2.2.1**, **図 2.2.2**, **写真 2.2.1**)．

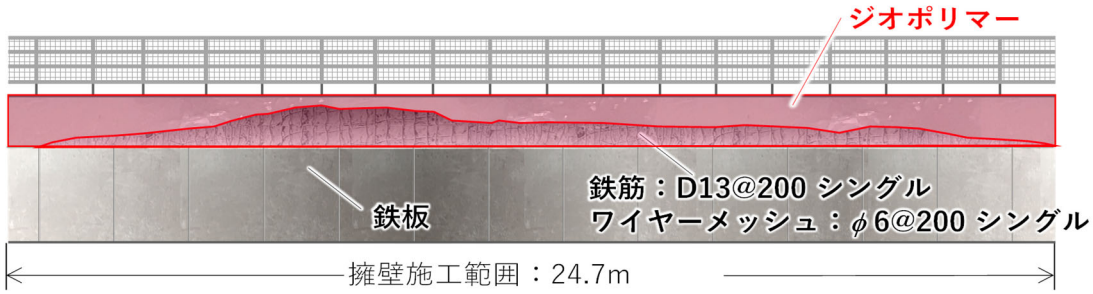


図 2.2.1　施工部正面図

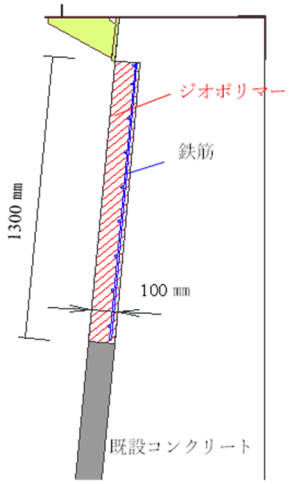


図 2.2.2　施工部断面図

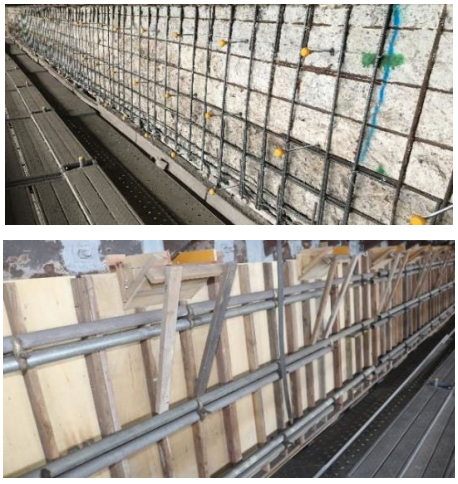


写真 2.2.1　鉄筋および型枠組立状況

(2)　断面修復用ジオポリマーコンクリートについて

1）ジオポリマーコンクリートの選定理由および目標性能

本断面修復にジオポリマーコンクリートの適用を検討した理由を以下に示す．

- ジオポリマーコンクリートは耐熱性が高いと言われている
- ジオポリマーコンクリートの弾性係数は一般的なセメントコンクリートより小さく，断面修復材として適している
- ジオポリマーコンクリート自体は指針などの整備がまだ進んでいないため，構造物の本体に利用することは難しいが，適用範囲拡大の観点からも断面修復材への利用は適当と考える

目標とするジオポリマーコンクリートの性状は，ポンプ圧送による打設を行うため，可使時間が 2 時間以

上確保できることとした．また圧縮強度は材齢 28 日おいて 30N/mm^2 とした．

2）配合検討

使用した材料を**表 2.2.1** に示す．活性フィラーにはフライアッシュ，高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを混合して使用した．またアルカリ溶液はアクティベーターと分散剤を含む水溶液を使用した．ここで使用した分散剤は，新しくジオポリマー用に開発した特殊分散剤であり，一般的に粘性が非常に高く，可使時間が短いため，コンクリートポンプ車での圧送や所要のワーカビリティを必要とする現場打ち構造物への適用は不向きであると言われているジオポリマーの，流動性とその保持性を改善することが期待された．また，温度応力ひび割れに抵抗するために鋼繊維を補強材として使用した．

検討を行ったジオポリマーコンクリートの配合を**表 2.2.2** に示す．配合 OX と OZ はそれぞれ，高炉スラグ微粉末の配合量を重量比で全粉体量の 30%，15%とした配合である．

表 2.2.1 使用材料

項目	記号	材料
粉体(P)	FA	フライアッシュⅡ種品 密度：2.27g/cm^3
	BS	高炉スラグ微粉末 密度：2.91g/cm^3　ブレーン値 4,100cm^2/g
	MS	シリカフューム 密度：2.20g/cm^3
アルカリ溶液	GPW	アクティベーター，分散剤，水 密度：1.16g/cm^3
鋼繊維	SF	密度 7.85g/cm^3　（φ0.55 mm，L=35mm）
細骨材	S	珪砂 密度：2.51g/cm^3
粗骨材	G	玄武岩 密度：2.82g/cm^3

表 2.2.2　ジオポリマーコンクリートの配合

配合	GPW/P (%)	単位量（kg/m^3）						
		GPW	P			S	G	SF
			FA	BS	MS			
OX	36.8	184	300	150	50	800	850	40
OZ	36.8	184	375	75	50	800	850	40

室内試験を行い，各配合の性能を確認した．スランプの経時変化を**図 2.2.3** に，圧縮強度発現性を**図 2.2.4** に示す.いずれの配合においても，スランプは練混ぜ直後から 60 分までの間に増加し，120 分まで保持されており，2 時間以上の可使時間が確保できていることが確認された．

圧縮強度に関しても，いずれの配合においても材齢 28 日で 30N/mm^2 を上回る結果となった．ただし 1 日強度に関して，OX では 9N/mm^2 程度発現していたのに対して，OZ では脱型が出来なかったため，実際の施工には OX を選定した．

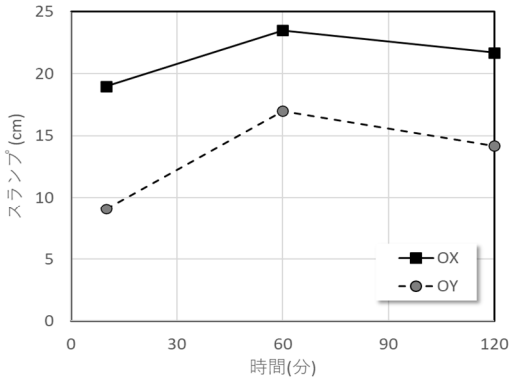


図 2.2.3　スランプの経時変化

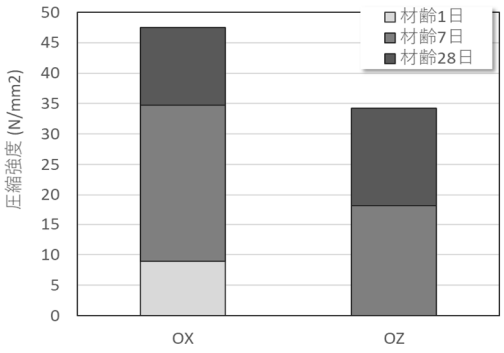


図 2.2.4　圧縮強度発現性

3）実施工時の状況

実際の施工では容量 1.0m^3 の移動ミキサを用い，1 バッチ当たりの練混ぜ容量を 0.5m^3 として製造した．実機によって練混ぜられたジオポリマーコンクリートのスランプは，室内試験の結果とほぼ同等であり，2 時間以上の可使時間を確保し，ポンプ圧送により良好な施工性が得ることが出来た（**図 2.2.5**）．また，強度発現性も室内試験の結果と同等で，材齢 7 日で 30N/mm^2 を上回り，材齢 28 日で 50N/mm^2 近い強度発現性を示した（**図 2.2.6**）．更に施工 1 年後に測定した躯体コンクリートとの付着強度も 1.0N/mm^2 以上あることから，実際に施工されたジオポリマーコンクリートが,断面修復材料として十分に機能していることが確認された(**写真 2.2.2**)．

なお，実際の施工事例の詳細は，本報告書の「Ⅴ．実施例，６．ジオポリマーコンクリートを用いた断面補修に関する適用検討」に記載されているので，参照されたい．

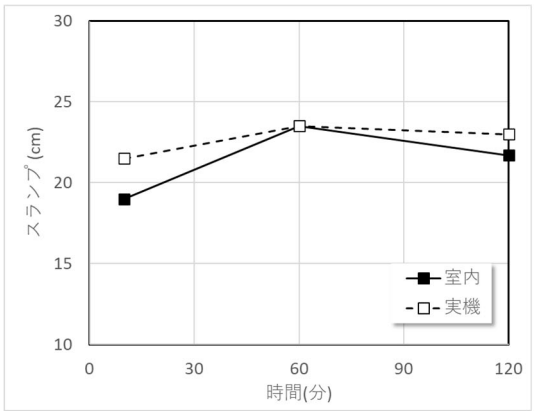


図 2.2.5　実機コンクリートのスランプ

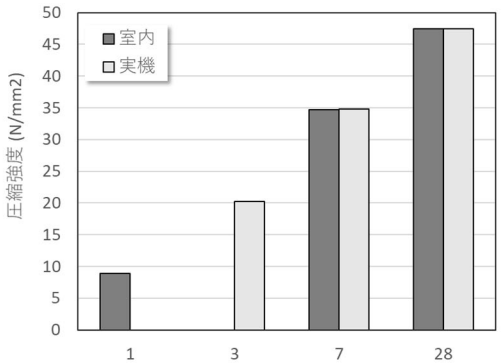


図 2.2.6　実機コンクリートの圧縮強度

写真 2.2.2　施工後外観

（執筆者：杉山　知巳）

2.2.2 左官用ジオポリマーならびに吹き付け用ジオポリマー

(1) はじめに

ジオポリマーは，フレッシュ性状において一般的に粘性が高く左官性が良くないこと，常温養生では収縮の影響が大きくひび割れが生じやすいこと等[1]から補修材料として実用化するためには多くの課題を有している．しかし，遊離したカルシウム量の少ないジオポリマーは，その高耐火性，高耐酸性から，それらの特性を活かした補修材料とする期待も大きく研究例も多い[2) 3) 4)]．また，高耐糖性[5)]，放射性廃棄物への適応[6)]等，セメント材料では使用できない箇所への適用も進められている．そこで，本章では，必ずしも土木分野に特化したものではないが，左官施工，あるいは吹付施工用の材料として，実用的に使用できるジオポリマーモルタル材料の適用への試みを簡単に紹介する．

(2) 左官用ジオポリマー

左官補修材料にジオポリマーを適用する場合，その目的に応じて要求される性能は異なるが，共通して求められる性能には，左官施工性が良いこと，ひび割れが生じにくいこと，施工時の気温の影響を受けにくいこと等が考えられる．また，可使時間が十分に取れる上に，比較的早い時間で硬化することも求められる．ここで，一般的にジオポリマーは水ガラスを使用するため，その粘性の影響を受け，自己充填的な流動性を示しやすい．その特性は目的によってはメリットとなるが，左官施工性に関しては，コテ離れが悪く，モルタルを引きずってしまう等のデメリットになりやすい．今後，種々の混和剤により，それらの解決が図られるものと考えられるが，本章では水ガラスを使用せず，配合を工夫することで，その開発を試みた事例を紹介する．

表 2.2.3 及び**表 2.2.4** は，ジオポリマーモルタルの左官施工の可能性を確かめるために，左官作業性とジオポリマーモルタル配合との関係を職人歴 40 年の左官職人が評価した例である[3)]．なお，**表 2.2.3** の事例は，左官施工の可能性を模索した段階の配合であり，実用化には更に改善を必要とする配合であることは留意されたい．**表 2.2.3** の配合において，一般的なジオポリマーに対して，比較的低粘性となるのは，水ガラスの代わりにシリカフュームを溶液換算で使用していることと，Si/A 比が低いことに起因している．

表 2.2.3 ジオポリマーモルタルの配合例 参考文献[3)]から抜粋

配合	FA	BFS	SF	S	NaOH	水	GNa	A/W	Si/A	W/P
	kg/m^3							モル比		体積比
1	314.1	254.0	17.3	1570.6	119.8	111.7	2.62	0.15	0.20	0.80
2	315.8	255.4	8.7	1579.2	120.5	112.2	2.63	0.15	0.10	0.80
3	312.4	252.6	25.8	1562.3	119.2	111.1	2.60	0.15	0.30	0.80
4	317.1	256.4	11.6	1585.4	80.6	133.3	2.64	0.10	0.20	0.80
5	404.0	326.6	19.4	1346.7	134.1	125.1	3.37	0.15	0.20	0.69
6	311.4	251.8	22.9	1557.2	158.4	90.5	2.60	0.20	0.20	0.80

FA：フライアッシュ JIS Ⅰ種（JIS A6201）密度：2.40 g/cm^3,
BFS：高炉スラグ微粉末ブレーン値 4000 cm^2/g（JIS A 6206）石膏無添加　密度：2.91 g/cm^3
S：細骨材 JIS セメント強さ試験用標準砂
SF：シリカフューム（JIS A 6207 相当）
GNa:グルコン酸ナトリウム，NaOH は 48%濃度の水溶液
A/W：NaOH/H_2O（モル比），Si/A：SiO_2/NaOH（モル比），W/P：粉体/H_2O（体積比）

表 2.2.4 の例は，初期開発段階で左官作業性，可使時間や白華の問題等，改善点の多い事例であったが，及第点を与えられるレベルであった．

表 2.2.4　ジオポリマーモルタルの左官作業性性状，仕上り状況と圧縮強度 参考文献[3]から抜粋

配合	練り混ぜ後，施工までの時間（分）						仕上り	白華			圧縮強度(MPa)		
	10	20	30	50	60	85		量	除去性		1 日目	7 日目	28 日目
									掃除機	水洗			
1	○	○	○	△$_2$	×	×	◎	△	○	○	22.7	62.5	79.3
2	△$_1$	△$_1$	△$_1$	△$_2$	×	×	○	×	○	○	22.3	57.1	78.5
3	△$_1$	△$_1$	△$_1$	△$_2$	△$_2$	×	△～×	○	×	○	23.2	60.2	78.4
4	○	○	△$_2$	△$_2$	△$_2$	×	◎～○	△	○	○	25.1	55.8	69.5
5	△$_1$	△$_1$	△$_2$	×	×	×	△	○	○	○	28.4	71.6	86.7
6	△$_1$	△$_1$	△$_1$	×	×	×	△	△	×	○	23.7	63.8	79.8

(1) コテ作業性評価：◎伸び良好，コテ付着なし，○粘性が高いが，コテ付着は少量，△$_1$粘性が高くコテに付着，△$_2$伸びが悪いがコテ作業可能，×硬化によりコテ作業不可
(2) 仕上り（平滑度の外観評価）：◎良好，○普通，△やや粗い，×粗い
(3) 白華生成量（生成量を外観から評価）：◎発生無し，○少量，△やや多い，×多い
(4) 白華除去性（掃除機）：○綿の様で掃除機で簡単に除去可，×掃除機で除去不可
(5) 白華除去性（水洗）：○：水洗により簡単に除去できる

ここで，ジオポリマーモルタルの補修において，高い耐熱性や耐酸性が求められる用途が想定されることから，それら特性を検討した結果が**図 2.2.7** 及び**図 2.2.8** である．**図 2.2.7** は**表 2.2.3** の配合で作製したジオポリマーモルタルを各温度で 1 時間加熱した試料の圧縮強度，**図 2.2.8** は**表 2.2.3** の配合で作製したジオポリマーモルタルの硫酸浸漬前後の質量変化と圧縮強度変化率を測定した事例である．ここで，**図 2.2.7** 及び，**図 2.2.8** から A/W=0.10 で作製した配合 4 の試料は 600℃で爆裂し，酸に対する耐性も低くなっていることが確認できる．

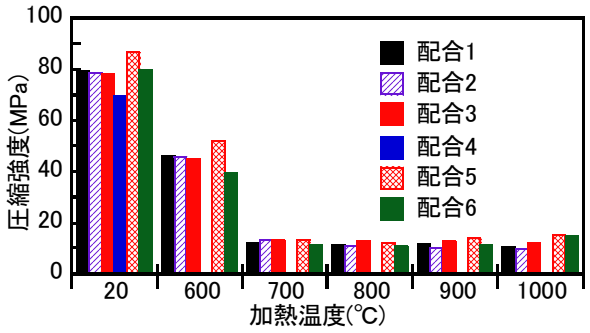


図 2.2.7　表 2.2.3 で作製したジオポリマーモルタルの加熱温度と圧縮強度

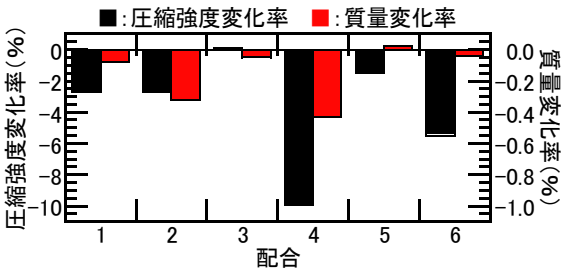


図 2.2.8　硫酸浸漬前後の圧縮強度変化と質量の変化率

このように，比較的高い圧縮強度が得られた試料でも，高温耐性や酸耐性は，配合によって大きく異なることがジオポリマーの特徴であることから，強度だけではなく目的に応じて諸性質を確認して配合を選定す

ることが重要である．また，高温耐性は，冷却後の特性だけではなく，高温時の特性も重要となるため，例えば，一宮他[7]で提案されたように加熱時の溶融による変形の程度を把握することも求められるだろう．

写真 2.2.3 は糖分による劣化でセメントモルタルの補修が困難である食品関係建物の床補修をジオポリマーモルタルで試みた例である．配合は**表 2.2.3** の配合を基礎とするが，施工性，可使時間，白華の生成等に関して対処したものとなる．一方，**図 2.2.9** 及び**表 2.2.5** に示すように，例えばセメント硬化体は 1 日脱型直後に糖分に触れると硬化不良を生じ，Ca に加えて C-S-H や C-A-H の構成成分である Si や Al の溶出が著しく増加する．完全に硬化したセメント硬化体において顕著な溶出は示さないが，実際に多くの似たような現場でセメントモルタルの劣化が報告されている[8]．しかし，ジオポリマーは，その反応機構が異なるため，糖分の影響は小さい．このように，ジオポリマーの適用は，従来のセメントモルタルの補修が難しかった箇所から適用がはかられており，より広く使えるように研究が進められている．

写真 2.2.3　床補修をジオポリマーモルタルで試みた例

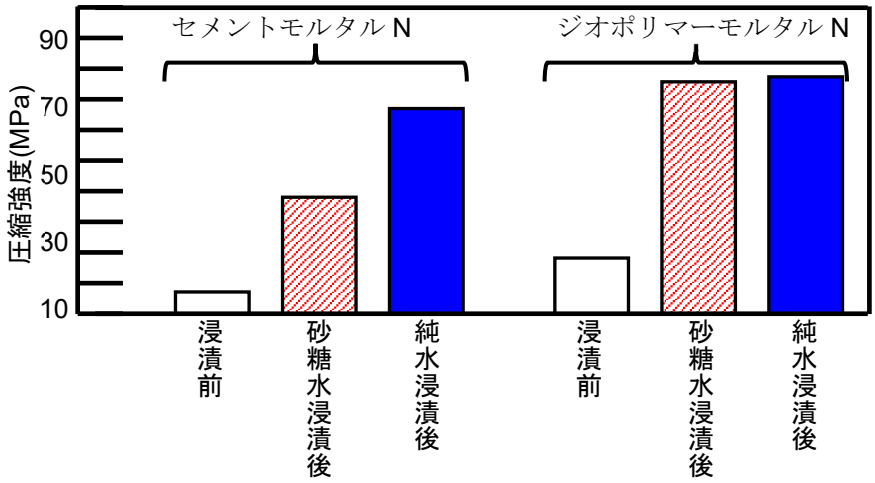


図 2.2.9　硬化反応初期における砂糖水浸漬の影響　参考文献[5]から引用

表 2.2.5　1 日脱型後に砂糖水に浸漬した試料の溶出元素(ppm) 参考文献[5]から引用

	ジオポリマーモルタル		セメントモルタル NP-N	
	水	砂糖水	水	砂糖水
pH	13.0	12.0	12.6	12.0
Na	40.3	52.4	114	146
K	3750	4200	212	293
Ca	7.64	49.8	462	8480
Mg	0.01	0.3	LOQ	94.4
Al	28.2	17.8	0.68	592
Si	27.6	16.4	0.50	981.7

LOQ:定量下限値未満

(3) 吹き付け用ジオポリマー

大面積の床面や壁面のモルタル補修を考えたとき，左官施工に加えて吹付施工への期待が大きい．そこで，左官用ジオポリマーモルタルを応用して，ジオポリマーモルタルを吹き付けに適用することも可能である．**図 2.2.10** は簡易な吹付装置で，市販のコンクリート板に湿式吹き付けを実施した例であるが，壁面への吹き付けでも，配合によりダレの発生も無く良好な結果が得られている．現在の所，ジオポリマーの吹付施工への適用例は多くないが，今後，その特性を活かした活用が期待される．

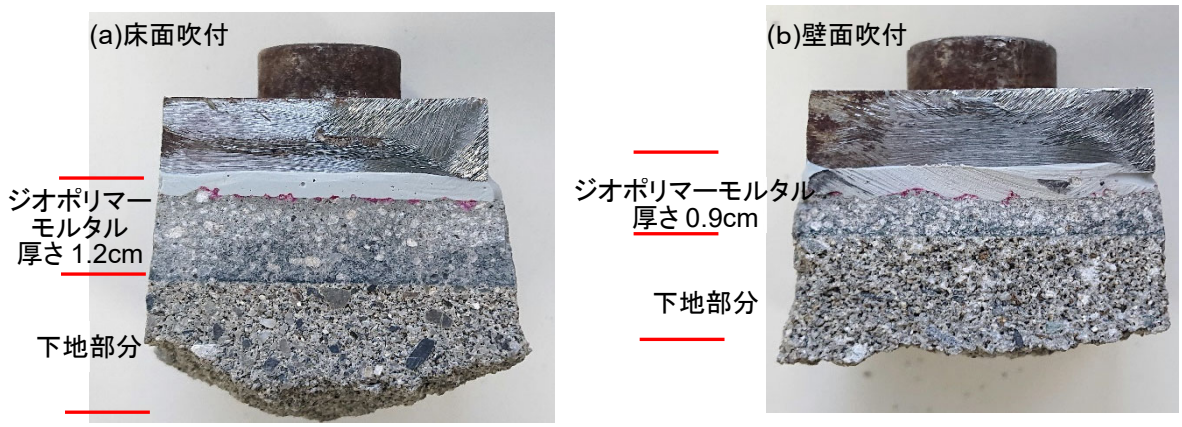


図 2.2.10　吹き付けたジオポリマーモルタルの付着試験後の様子

((a)は参考文献[9] から抜粋:付着強度 2.44 MPa*（下地破壊）　(b)付着強度 1.98 MPa*（下地破壊))

参考文献

1) 河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011

2) ポンマハーサイ パラミ，伊藤彰利，畑中重光：ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1249-1250，2018

3) 上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣:左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp1937-1942，2019

4) 上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣：常温養生カリウム(K)型ジオポリマー左官用モルタルの調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1780-1785，2020

5) 上原元樹，佐藤隆恒：左官用ジオポリマーモルタルの硬化性状：養生温度と糖分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1325-1330，2021

6) 宮田賢作，西村務，吉田誠司，西尾隆志，古館佑樹，中山準平：ジオポリマーによる放射性廃棄物の固化技術の開発，神戸製鋼技報，Vol.70，No.1，pp.93-97，2020
7) 一宮一夫，秋永史也，原田耕司，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーのアルカリ水比とフロー値ならびに高温加熱による外観や強度変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，pp.1851-1856，No.1，2018
8) 吉田清司：屋上防水コンクリートの劣化原因分析，第一工業大学研究報告，Vol.26，pp51-56，2014
9) 上原元樹，佐藤隆恒：ジオポリマー吹付モルタルの調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1114-1119，2022

（執筆者：上原　元樹）

３．工場製品

3.1　セメント系工場製品の性能

3.1.1　一般

工場製品は，購入者が提示した要求性能に応じて，適切な照査指標及び照査方法を定め，性能照査行わなければならない．一般的なセメントコンクリートにおいては，その照査指標や試験法は，概ね JIS によって規定されている．

3.1.2　照査指標

性能照査は，製品の要求性能を定量的に評価できる照査指標を設定し，その限界値を明示しなければならない．一般的な製品の照査指標の例を**表 3.1.1** に示す．

表 3.1.1　性能項目と製品の照査指標の例

性能項目	関連する特性 又は限界状態	製品の照査指標
使用性	応答値（構造）	コンクリート及び鋼材の応力度，曲げひび割れ発生耐力(2)，せん断ひび割れ発生耐力，接合部の強度など
	応答値（材料）	コンクリートの圧縮強度，有効プレストレス力など
	外観	ひび割れ幅，試験水圧による接合部の漏水の有無など
	変形	たわみなど
安全性	断面破壊	曲げ耐力(3)，せん断耐力，軸方向圧縮耐力，押抜きせん断疲労耐力など
	疲労破壊	鋼材およびコンクリートの応力振幅および繰返し回数など
	構造物の安定	転倒モーメント，滑動力，浮力，地盤反力など
耐久性(1)	鋼材腐食	ひび割れ幅，中性化深さ，塩化物イオン濃度など
	コンクリートの劣化	凍結融解試験における相対動弾性係数，スケーリング量，コンクリート強度，化学的侵食深さ，透水係数など
耐震性 （復旧性）	変位変形	各継手部の目開き量，継手部の屈曲角及び抜出し量，浮上がり又は沈下など
施工性	運搬性 施工安全性	製品の形状寸法，質量など 施工用つり（吊）具の強度，施工時の取扱いによるひび割れ幅の有無など
その他	透水性，保水性など	透水係数，保水量及び吸上げ率など

注(1)　想定される作用の下で，材料の劣化によって生じる製品の性能の経時的な低下に抵抗する性能
(2)　ひび割れ発生に至らないことを満足する曲げ耐力
(3)　断面破壊の終局状態に至らないことを満足する曲げ耐力

3.1.3　製品の性能照査試験方法の種類

工場製品は，性能試験，設計図書，および実績に基づき，製造者がその性能を保証している．JIS 製品の性能試験については，JIS A 5363「プレキャストコンクリート製品－性能試験方法通則」，および JIS A 5372「プレキャスト鉄筋コンクリート製品」，JIS A 5373「プレキャストプレストレストコンクリート製品」の製

品毎に規定された試験方法に従って試験を行う.

3.1.4 プレキャスト製品の性能試験方法の種類

JIS A 5363 に示されるプレキャスト製品の性能試験方法の種類を，**表 3.1.2** に示す.

表 3.1.2 JIS A 5363 に示されるプレキャスト製品の性能試験方法の種類

性能試験方法の種類	測定項目	製品の形状	載荷方法
曲げ試験方法	曲げひび割れ発生耐力，限界ひび割れ幅耐力，終局曲げ耐力，ひび割れ幅，変位，曲率，変状の有無等	棒状製品 板状製品	単純はり形式 2 点載荷 単純はり形式 1 点載荷 片持ちはり形式載荷
		箱型ラーメン製品	線載荷する方法(1)
		円筒状製品	線載荷する方法(2)
せん断耐力試験方法	せん断ひび割れ発生耐力，せん断破壊耐力，ひび割れ幅等	棒状製品 板状製品	単純はり形式載荷 張出はり形式載荷
圧縮耐力試験方法	製品単体の軸方向圧縮に対するひび割れ耐力，終局耐力，軸方向に部材同士を組み立てる場合は，継ぎ目での軸方向圧縮力による伝達状態の調査等	円筒状製品等	軸圧縮載荷
内圧耐力試験方法	製品の内圧に対するひび割れ耐力，終局耐力，試験水圧における漏水の有無等，継手部の試験の場合は，継手部の抜出し量の測定等	円筒状製品 箱型ラーメン製品	試験水圧を加える方法(3)

注(1) 箱型ラーメン部材の底版を両端部で支持し，頂版の延長方向に線載荷する方法
注(2) 円筒状部材を水平に線支持し，頂部の延長方向に線載荷する方法
注(3) 円筒部材または箱型ラーメンの中空部分を満水にし，試験水圧を加える方法

3.1.5 用途・構造別コンクリート製品一覧表

現在一般的なセメントコンクリートで製作されている工場製品の例を**表 3.1.3** に示す.

表 3.1.3 セメントコンクリートで製作されている工場製品の例

成形方法	用途種類	設計区分（構造別）		
		無筋コンクリート(URC)	鉄筋コンクリート(RC)	プレストレストコンクリート(PC)
振動･加圧締固め	のり（法）面被覆ブロック類	張ブロック（小型） 連接ブロック ブロックマット	張ブロック（大型）	
	舗装ブロック	平板 インターロッキングブロック	視聴障害者誘導用ブロック	
	建築	空洞ブロック		
	暗きょ類		鉄筋コンクリート管	
	マンホール類		組立マンホール	
	路面排水側溝類		上ぶた式U形側溝	

	擁壁類	ブロック式（分割式）	積ブロック		
加圧締固め	擁壁類（壁体式）			鉄筋コンクリート矢板	
振動締固め	暗きょ類		無筋コンクリート管	組合せ暗渠ブロック 鉄筋コンクリートボックスカルバート アーチカルバート 組立式アーチカルバート シールド用セグメント	プレストレストコンクリートボックスカルバート
	境界ブロック		境界ブロック		
	路面排水側溝類		Ｌ形側溝 Ｕ形側溝		
				上ふた式Ｕ形側溝 落ふた式Ｕ形側溝 皿型側溝 排水性舗装用側溝縦断管 縦断勾配可変形側溝 浸透透水性側溝	
	擁壁類	ブロック式（分割式）	積みブロック	大型積みブロック	
			大型積みブロック	組立土留め，井げた組擁壁，補強土壁	
		壁体式（一体式）		Ｌ形擁壁，逆Ｔ擁壁，控え壁式擁壁	プレストレストコンクリート矢板 ＰＣ壁体
	マンホール類			マンホール側塊 組立マンホール 電気通信用マンホール 地下埋設物用マンホール	
	用排水路類			矢板 フリューム，ベンチフリューム 組立土留め Ｌ形水路 組立さく（柵）きょ	
	貯水施設類			雨水貯留施設 防火水槽 農業用貯水槽 耐震性貯水槽	
	防災施設類			ロックシェッド スノーシェッド スノーシェルタ	
	のり（法）面被覆ブ			植栽コンクリート	

	ロック類		（緑化ブロック）	
	橋梁類			道路橋用橋げた 道路橋橋げた用セグメント 合成床版用プレキャスト版 道路橋用プレキャスト床版
	鉄道		鉄筋コンクリート軌道スラブ プラットフォーム用製品，壁高欄	ＰＣ枕木
	共同溝類		共同溝，電線共同溝，洞道 ケーブルトラフ	
	建築		鉄筋組立塀 柱・梁 床材，階段，バルコニー版，カーテンウォール	空洞プレストレストパネル
	その他		漁礁ブロック コンクリート防護柵	
遠心力締固め	暗きょ類		遠心力鉄筋コンクリート管 推進管	プレストレストコンクリート管
	くい類		鉄筋コンクリートくい 節くい 鋼管複合くい	プレストレストコンクリートくい プレストレスト鉄筋コンクリートくい
	ポール類		照明用化粧ポール	プレストレストコンクリートポール
	マンホール側塊		マンホール側塊	
ロール転圧締固め	暗きょ類		遠心力鉄筋コンクリート管 推進管	
	マンホール側塊		マンホール側塊	プレストレストコンクリート管
高温高圧蒸気養生			軽量気泡コンクリートパネル（ＡＬＣ）	

3.2 ジオポリマー工場製品の性能

3.2.1 一般

ジオポリマー製の工場製品は，セメント系工場製品と同様に購入者が提示した要求性能に応じて，適切な照査指標及び照査方法を定め，性能照査を行わなければならない．照査指標や試験法については，材料に関わらずセメントコンクリートと同じものを用いるのが妥当である．構造設計に関わる限界値はセメントと同

等でよいと考えられるが，耐久性に関わる指標の限界値については，材料特性の違いを踏まえた十分な検討が必要である．

3.2.2　用途・構造別ジオポリマー製品一覧表

現在ジオポリマーコンクリートで可能と考えられる工場製品の例を**表 3.2.1** に示す．基本的にはセメントコンクリートと同じであるが，ジオポリマーはフレッシュ性状がセメント系材料とは異なるため，加圧成型，遠心力締固め，ロール転圧など成型に関わる技術が適用可能か，検討する必要がある．また，硬化メカニズムが異なるため，オートクレーブ養生を前提とした製品についても，本表から除いている．いくつかの適用事例については第Ⅴ編に紹介しているため，参照されたい．

表 3.2.1　ジオポリマーコンクリートで製作可能と考えられる工場製品の例

成形方法	用途種類	設計区分（構造別）		
		無筋コンクリート(URC)	鉄筋コンクリート(RC)	プレストレストコンクリート(PC)
振動締固め	のり（法）面被覆ブロック類	張ブロック（小型） 連接ブロック ブロックマット	張ブロック（大型）	
	舗装ブロック	平板 インターロッキングブロック	視聴障害者誘導用ブロック	
	建築	空洞ブロック		
	暗きょ類		鉄筋コンクリート管	
	マンホール類		組立マンホール	
	路面排水側溝類		上ぶた式U形側溝	
	擁壁類　ブロック式（分割式）	積ブロック		
振動締固め	暗きょ類	無筋コンクリート管	組合せ暗渠ブロック 鉄筋コンクリートボックスカルバート アーチカルバート 組立式アーチカルバート シールド用セグメント	プレストレストコンクリートボックスカルバート
	境界ブロック	境界ブロック		
	路面排水側溝類	Ｌ形側溝 U形側溝		
			上ふた式U形側溝 落ふた式U形側溝 皿型側溝 排水性舗装用側溝縦断管 縦断勾配可変形側溝 浸透透水性側溝	
	擁壁類	ブロック式（分割式）	積みブロック	
	擁壁　ブロック式（分割式）	大型積みブロック	組立土留め，井けた組擁壁，補強土壁	

	類　壁体式（一体式）		Ｌ形擁壁，逆Ｔ擁壁，控え壁式擁壁	プレストレストコンクリート矢板 ＰＣ壁体
	マンホール類	マンホール側塊 組立マンホール 電気通信用マンホール 地下埋設物用マンホール		
	用排水路類		矢板 フリューム，ベンチフリューム 組立土留め Ｌ形水路 組立さく（柵）きょ	
	貯水施設類		雨水貯留施設 防火水槽 農業用貯水槽 耐震性貯水槽	
	防災施設類		ロックシェッド スノーシェッド スノーシェルタ	
	のり（法）面被覆ブロック類		植栽コンクリート（緑化ブロック）	
	橋梁類			道路橋用橋げた 道路橋橋げた用セグメント 合成床版用プレキャスト版 道路橋用プレキャスト床版
	鉄道		鉄筋コンクリート軌道スラブ プラットフォーム用製品，壁高欄	ＰＣ枕木
	鉄道 共同溝類		鉄筋コンクリート軌道スラブ プラットフォーム用製品，壁高欄 共同溝，電線共同溝，洞道 ケーブルトラフ	
	建築		鉄筋組立塀 柱・梁 床材，階段，バルコニー版，カーテンウォール	空洞プレストレストパネル
	その他		漁礁ブロック コンクリート防護柵	

（執筆者：人見　隆，藤山　知加子）

４．鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造物（現場製作）

4.1　設計に用いる示方書，参考となる指針類

4.1.1　土木学会コンクリート標準示方書

土木学会コンクリート標準示方書［設計編］は，一般的な鉄筋コンクリート（RC）構造およびプレストレストコンクリート（PC）構造で構成される構造物の要求性能に対する，構造計画と照査の原則を示すとともに，標準的な照査法，鉄筋コンクリートの前提と構造細目を規定したものである．適用範囲は，圧縮強度の特性値が 80N/mm^{2}以下のコンクリート，鋼材については，引張降伏強度の特性値が 685N/mm^{2}まで，ただしせん断補強鉄筋の場合は 785N/mm^{2}までの鉄筋および PC 鋼材である．設計段階において構造物の耐久性，安全性，使用性，および復旧性に関する要求性能を明確にし，これを信頼性が高く合理的な方法で照査することを原則とする．したがって，ジオポリマーコンクリートを用いた構造物を設計する場合も，基本的にはこれに準拠すればよい．

ただし，土木学会コンクリート標準示方書で十分に触れていない特殊な材料の場合，以下の指針類が示方書を補完する資料として位置づけされている．ジオポリマーコンクリートに関しては，「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案)」がもっとも参考になると考えられる．

1) 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル　昭和 60 年
2) PC 合成床版工法設計施工指針（案）　昭和 62 年
3) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針（案）　昭和 63 年
4) プレストレストコンクリート工法設計施工指針　平成 3 年
5) 水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）　平成 3 年
6) 太径ねじふし鉄筋 D57 および D64 を用いる鉄筋コンクリート構造物の設計施工指針（案）　平成 4 年
7) 膨張コンクリート設計施工指針　平成 5 年
8) 鉄筋のアモルファス接合継手設計施工指針（案）　平成 5 年
9) シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針（案）　平成 7 年
10) 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）　平成 7 年
11) コンクリート構造物の補強指針（案）　平成 11 年
12) 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）　平成 11 年
13) LNG 地下タンク躯体の構造性能照査指針　平成 11 年
14) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針　平成 12 年
15) 自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針（案）　平成 13 年
16) 高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案）　平成 13 年
17) 電気化学的防食工法 設計施工指針（案）　平成 13 年
18) 電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案）　平成 15 年
19) エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針［改訂版］　平成 15 年
20) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）　平成 16 年
21) 表面保護工法 設計施工指針（案）　平成 17 年
22) 電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針（案）　平成 17 年

23) コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）　平成 17 年
24) 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案）　平成 19 年
25) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）　平成 19 年
26) ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針（案）　平成 20 年
27) エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針（案）　平成 22 年
28) コンクリートのポンプ施工指針　平成 24 年
29) 高流動コンクリートの配合設計・施工指針　平成 24 年
30) けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）　平成 24 年
31) トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針（案）　平成 26 年
32) 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針　平成 28 年
33) フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針　平成 28 年
34) 銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針　平成 28 年
35) コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案　平成 28 年
36) セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針　平成 30 年
37) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針　平成 30 年
38) 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）　平成 30 年
39) 亜鉛めっき鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計・施工指針（案）　平成 31 年
40) 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針（案）　平成 31 年
41) 鉄筋定着・継手指針〔2020 年版〕　令和 2 年
42) 電気化学的防食工法指針　令和 2 年
43) プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針（案）　令和 3 年
44) 石炭灰混合材料を地盤・土構造物に利用するための技術指針（案）　令和 3 年
45) コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）　令和 4 年

4.1.2　混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針の適用検討

361 委員会 WG2 では，混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針がジオポリマーコンクリートの設計に適用可能かどうか，検討を行った．主な議論を以下に示す．

・1 章：対象となるジオポリマーコンクリートの定義をはっきりした方が良い．これについては JCI の委員会を参考すればよいのではないか．

・2 章：施工性，凝結性，ブリージングについて特に検討が必要と思われる．耐久性に関する設計においては，ジオポリマーのメリットである高い耐酸性を考慮した検討が必要．

・3 章：ジオポリマーコンクリートの力学特性について．共通試験は比較的ばらつきの少ないデータ群として位置付けることとし，共通試験結果だけをまとめるのではなく，他の配合も含めた調査結果も踏まえた汎用的記述をすることを目指すのがよい．文献調査に基づいた一般的な力学特性の数値や数式を紹介することとする．

・3 章：設計に必要な耐力算出式などマクロ式について．GP を GP 鉄筋コンクリート部材とした照査につい

て，国内研究例（引用に足る情報量を有する査読付き論文）が非常に少ない状況にある．海外では，GP を構造部材とした研究例は，短繊維や FRP を組み合わせたものが多く，スタンダードな GP 鉄筋コンクリート部材として比較検討し得るものは少ない．

・3 章：設計に必要な耐力算出式などマクロ式について．曲げ理論は材料によらず適用できる構造力学の基本であるため，GP は材料試験で得られた特性値を変更すれば適用できる．一方，実験データに基づいて構築されたせん断に関する式は，適用に十分な検討が必要である．しかしながら，一般に各国設計基準類のせん断耐力算定式は安全側の数値を得るように設定してあるため，結果として GP にも適用可能であったという研究例もある．

・4 章：ジオポリマーの製造には様々な手法がある．混和剤についてもセメント用のものと同等の効果があるかどうか，今後の課題として情報をとりまとめる必要がある．

・5 章：配合の記載法を統一するか，多様な表現法を分類して示す必要がある．

以上より，本節では 4.2～4.3 において，例題として鉄筋ジオポリマーコンクリートの梁の曲げに対する設計計算例を一般的なセメントコンクリートの場合と併記して示す．曲げを受ける鉄筋ジオポリマーコンクリート梁の性状は一般的な曲げ理論での計算結果と概ねよく一致することは，様々な報告事例がある．本報告書第Ⅱ編「**5.6 鉄筋コンクリートの挙動**」も参照されたい．せん断については，国内外の既存の耐力算定式は実験に基づく経験式でありかつ鉄筋ジオポリマーコンクリートでの検討事例が十分に多いとは言えないため，文献調査結果から得られた知見を 4.4 に示す．

また，プレストレストコンクリート構造物へのジオポリマーコンクリートの適用を想定し，有効プレストレスに影響を及ぼすと考えられるジオポリマーコンクリートの諸性質を踏まえた計算例を 4.5 に示すこととした．

（執筆者：藤山　知加子）

4.2　性能照査型設計法による曲げに対する設計例

4.2.1 前提条件

(1) 要求性能

セメント系コンクリート，ジオポリマーコンクリートの種別に関わらず，設計耐用期間を通じて，構造物が耐久性，安全性，使用性，および復旧性等に関して要求された性能を満足することを照査する．構造物の照査は，構造物の用途・機能に応じた限界状態を設定して，その限界状態に至らないことを確認しなければならない．

(2) 安全係数

設計に用いる安全係数は，材料係数，作用係数，構造物係数，構造解析係数，部材係数，および作用修正係数とする．

このうち，セメント系コンクリートとジオポリマーコンクリートとで異なると考えられるのは，材料係数であると考えられる．セメントコンクリートほど物性値の変動や経時変化に関する研究例がないため，材料係数はセメントコンクリートよりも大きく設定しておくのがよい．なお，ジオポリマーコンクリートでは現在材料物性の規格値が定められていないため，材料修正係数は使用する必要がない．

4.2.2　セメント系コンクリートと GP コンクリートの構造計算比較例

(1) 想定する条件

a) 想定する構造部材

ここでは**図 4.2.1** に示す断面をもったスパン10000mmの RC 単純桁を想定し，その照査を行う．

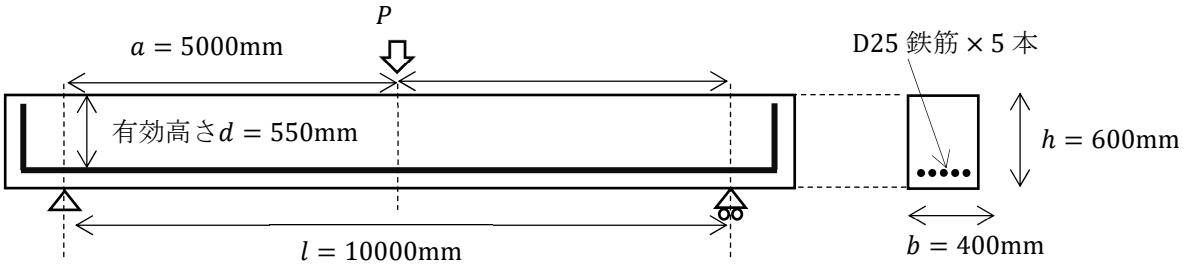


図 4.2.1　想定する RC 単純桁

図に示したように，断面の幅bは400mm，桁高hは600mm，有効高さdは550mmである．また使用するコンクリートの特性値は24.0 N/mm²であり，鉄筋は降伏強度345 N/mm²の D25 鉄筋を 5 本用いる．このときの鉄筋の断面積と引張鉄筋比は以下のようになる．

鉄筋の断面積(mm²)

$$A_s = 506.7 \times 5 = 2533.5$$

引張鉄筋比

$$p_w = \frac{A_s}{bd} = \frac{2533.5}{400 \times 550} = 0.011515$$

b) 想定する荷重

ここでは死荷重とスパン中央での集中荷重を想定する．死荷重の計算においては鉄筋を含めた鉄筋コンク

リートの密度を$\rho_c = 2.45 \times 10^{-5}$ N/mm³とする．集中荷重は72kNである．

c）照査対象とする限界状態

照査対象とする限界状態として，終局限界状態を想定し，その曲げ破壊の照査を行う．

終局限界状態では荷重の組み合わせとして，死荷重と集中荷重が同時に想定するとし，それらの和に 1.2 をかけた荷重を設計荷重とする．

死荷重(kN/m)　$\omega = \rho_c bh = 2.45 \times 10^{-5} \times 400 \times 600 \times 1 \times 10^{-3} = 5.88 \times 10^{-3}$ (kN/mm)

死荷重によるスパン中央のモーメント(kN・mm)

$$M_d = \frac{\omega l^2}{8} = \frac{5.88 \times 10000^2}{8} \times 10^{-3} = 7.35 \times 10^4 \ (\mathrm{kN \cdot mm})$$

集中荷重によるスパン中央のモーメント(kN・mm)

$$M_c = \frac{Pl}{4} = \frac{72.0 \times 1000 \times 10000}{4} \times 10^{-3} = 1.80 \times 10^5 \ (\mathrm{kN \cdot mm})$$

スパン中央での設計断面力(kN/m)

$$S_d = 1.2 \times (M_d + M_c) = 1.2 \times (7.35 \times 10^4 + 1.80 \times 10^5) = 3.04 \times 10^5 \ (\mathrm{kN \cdot mm})$$

(2) 設計断面耐力

セメントコンクリートの場合と，ジオポリマーコンクリートの場合での設計断面耐力を求める．

a）終局限界における各安全係数

終局限界状態の照査に用いる安全係数を以下に示す．材料係数以外の値は共通である．

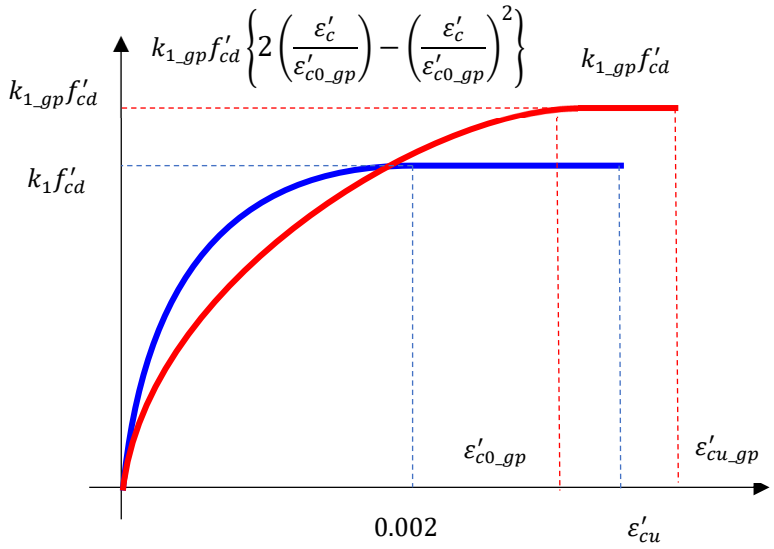
ジオポリマーコンクリートの製造では様々な材料での配合が可能であるため，示方書やガイドライン等でそれらが規定されない現時点では，材料係数を一義的に設定することは困難である．したがって，各現場で予定する材料，配合条件において事前に強度のばらつきを把握するための試し練りと強度試験を十分に行った上で，設計者が決定する必要がある．本稿では，例として 1.4 と設定した（**表 4.2.1**）．

表 4.2.1　各種係数の一覧

	コンクリート材料係数 γ_c	鋼材材料係数 γ_s	部材係数 γ_b	構造物係数 γ_i
セメントコンクリート	1.3	1.0	1.15(曲げ)	1.2
ジオポリマーコンクリート	1.4			

b）曲げ耐力の計算に用いるコンクリートの応力ひずみ関係

多くの場合，セメントコンクリートを用いた RC 部材の曲げ設計では等価応力ブロックが用いられる．この等価応力ブロックは，セメントコンクリートを用いた RC はりに対し，曲げ引張破壊する程度の鉄筋量が入りされるときに精度よくコンクリートの圧縮合力を評価することができるが，セメントコンクリート以外の材料を用いたり，鉄筋量が著しく増えたりしたような場合には必ずしもその精度が保証されているわけではない．本稿ではセメントコンクリートとジオポリマーコンクリートの特性の違いを反映した設計を試行するため，コンクリート標準示方書にて曲げ破壊の照査用に提示されているセメントコンクリートの応力ひずみ関係を元に，ジオポリマーの特性を考慮した応力ひずみ関係を以下のように仮定して検討を進める．



セメントコンクリートについて

$\varepsilon'_c \leq 0.002$のとき

$$\sigma_c = k_1 f'_{cd}\left\{2\left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right)-\left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right)^2\right\}$$

$0.002 < \varepsilon'_c \leq \varepsilon'_{cu}$のとき

$$\sigma_c = k_1 f'_{cd}$$

なお

$$k_1 = 1 - 0.003 f'_{ck}$$

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000}$$

ジオポリマーコンクリートについて

$\varepsilon'_c \leq \varepsilon'_{c0_gp}$のとき

$$\sigma_c = k_{1\_gp} f'_{cd}\left\{2\left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right)-\left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right)^2\right\}$$

$\varepsilon'_{c0_gp} < \varepsilon'_c \leq \varepsilon'_{cu_gp}$のとき

$$\sigma_c = k_{1\_gp} f'_{cd}$$

なお

$$k_{1\_gp} = 0.95$$

$$\varepsilon'_{c0\_gp} = 3.000 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon'_{cu\_gp} = 4.500 \times 10^{-3}$$

と仮定する．

図 4.2.2　曲げの計算で用いる応力ひずみ関係

以上の仮定の下で，それぞれのコンクリートを用いた場合の設計断面耐力を求める．

表 4.2.2　設計断面耐力の計算

セメントコンクリート	ジオポリマーコンクリート
設計強度は以下のようになる． $f'_{cd} = f'_{ck}/\gamma_c = 24.0/1.3 = 18.46\ \mathrm{N/mm^2}$ $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 345/1.0 = 345\ \mathrm{N/mm^2}$ また $k_1 = 1 - 0.003 f'_{ck} = 1 - 0.003 \times 24.0 = 0.928$ $\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} = \frac{155 - 24.0}{30000} = 4.366 \times 10^{-3}$	設計強度は以下のようになる． $f'_{cd} = f'_{ck}/\gamma_c = 24.0/1.4 = 17.14\ \mathrm{N/mm^2}$ $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 345/1.0 = 345\ \mathrm{N/mm^2}$ 仮定より $k_{1\_gp} = 0.95$ $\varepsilon'_{c0\_gp} = 3.000 \times 10^{-3}$ $\varepsilon'_{cu\_gp} = 4.500 \times 10^{-3}$

まず上縁から中立軸からまでの距離xを求める。

yが変数で

$$y = 0 \text{ のとき} \varepsilon'_c = 0$$

$$y = x \text{のとき} \varepsilon'_c = \varepsilon'_{cu}$$

であるので

$$\varepsilon'_c = \frac{y}{x}\varepsilon'_{cu}$$

これから

$$y = \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{cu}}x$$

$$dy = \frac{x}{\varepsilon'_{cu}}d\varepsilon'_c$$

の二つの関係が導かれる。圧縮合力は

$$C' = \int_0^x \sigma'_c b dy = \int_0^{\varepsilon'_{cu}} f(\varepsilon'_c)\, b \frac{x}{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c$$

$$= \int_0^{0.002} k_1 f'_{cd} \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \times \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right) b \frac{x}{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c + \int_{0.002}^{\varepsilon'_{cu}} k_1 f'_{cd} b \frac{x}{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c$$

$$= \frac{k_1 f'_{cd} bx}{\varepsilon'_{cu}} \left[\int_0^{0.002} \left\{ 2\left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right) - \left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right)^2 \right\} d\varepsilon'_c + \int_{0.002}^{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c \right]$$

$$= \frac{k_1 f'_{cd} bx}{\varepsilon'_{cu}} \left(\varepsilon'_{cu} - \frac{0.002}{3} \right)$$

$$= \frac{0.928 \times 18.46 \times 400 \times x}{4.366 \times 10^{-3}} \left(0.004366 - \frac{0.002}{3} \right)$$

$$= 5807x$$

軸方向力の釣合から、

$$C' = T_y = A_s f_{yd}$$

$$5807x = 2533.5 \times 345$$

これから、$x = 150.5$ (mm)

このとき,

$$\varepsilon_s = \frac{d - x}{x}\varepsilon'_{cu} = \frac{550 - 150.5}{150.5} \times 4.366 \times 10^{-3}$$

$$= 0.011588 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{345}{200000} = 0.001725$$

となって、降伏の仮定が正しいことが確認できた.

まず上縁から中立軸からまでの距離xを求める。

yが変数で

$$y = 0 \text{ のとき} \varepsilon'_c = 0$$

$$y = x \text{のとき} \varepsilon'_c = \varepsilon'_{cu\_gp}$$

であるので,

$$\varepsilon'_c = \frac{y}{x}\varepsilon'_{cu\_gp}$$

これから

$$y = \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{cu\_gp}}x$$

$$dy = \frac{x}{\varepsilon'_{cu\_gp}}d\varepsilon'_c$$

の二つの関係が導かれる。圧縮合力は

$$C' = \int_0^x \sigma'_c b dy = \int_0^{\varepsilon'_{cu\_gp}} f(\varepsilon'_c)\, b \frac{x}{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c$$

$$= \int_0^{\varepsilon'_{c0\_gp}} k_{1\_gp} f'_{cd} \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}} \times \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right) b \frac{x}{\varepsilon'_{cu\_gp}} d\varepsilon'_c + \int_{\varepsilon'_{c0\_gp}}^{\varepsilon'_{cu\_gp}} k_{1\_gp} f'_{cd} b \frac{x}{\varepsilon'_{cu\_gp}} d\varepsilon'_c$$

$$= \frac{k_{1\_gp} f'_{cd} bx}{\varepsilon'_{cu\_gp}} \left[\int_0^{\varepsilon'_{c0\_gp}} \left\{ 2\left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right) - \left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right)^2 \right\} d\varepsilon'_c + \int_{\varepsilon'_{c0\_gp}}^{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c \right]$$

$$= \frac{k_{1\_gp} f'_{cd} bx}{\varepsilon'_{cu\_gp}} \left(\varepsilon'_{cu\_gp} - \frac{\varepsilon'_{c0\_gp}}{3} \right)$$

$$= \frac{0.95 \times 17.14 \times 400 \times x}{4.5 \times 10^{-3}} \left(0.004500 - \frac{0.003}{3} \right)$$

$$= 5067x$$

軸方向力の釣合から、

$$C' = T_y = A_s f_{yd}$$

$$5067x = 2533.5 \times 345$$

これから、$x = 172.5$ (mm)

このとき,

$$\varepsilon_s = \frac{d - x}{x}\varepsilon'_{cu} = \frac{550 - 172.5}{172.5} \times 4.500 \times 10^{-3}$$

$$= 0.009847 > \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{345}{200000} = 0.001725$$

となって、降伏の仮定が正しいことが確認できた.

中立軸まわりの圧縮力によるモーメントは

$$\int_0^x \sigma'_c b y dy = \int_0^{\varepsilon'_{cu}} f(\varepsilon'_c)\, b \frac{\varepsilon'_c x}{\varepsilon'_{cu}} \frac{x}{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c$$

$$= \frac{bx^2}{{\varepsilon'_{cu}}^2} \int_0^{\varepsilon'_{cu}} f(\varepsilon'_c)\, \varepsilon'_c d\varepsilon'_c$$

$$= \frac{bx^2}{{\varepsilon'_{cu}}^2} \left[\int_0^{0.002} k_1 f'_{cd} \left\{ 2\left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right) - \left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right)^2 \right\} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c + \int_{0.002}^{\varepsilon'_{cu}} k_1 f'_{cd} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c \right]$$

$$= \frac{k_1 f'_{cd} bx^2}{{\varepsilon'_{cu}}^2} \left[\int_0^{0.002} \left\{ 2\left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right) - \left(\frac{\varepsilon'_c}{0.002}\right)^2 \right\} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c + \int_{0.002}^{\varepsilon'_{cu}} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c \right]$$

$$= \frac{k_1 f'_{cd} bx^2}{{\varepsilon'_{cu}}^2} \left[\frac{{\varepsilon'_{cu}}^2}{2} - \frac{0.002^2}{12} \right]$$

$$= \frac{0.928 \times 18.46 \times 400x^2}{0.004366^2} \left[\frac{0.004366^2}{2} - \frac{0.002^2}{12} \right]$$

$$= 3307x^2$$

これから中立軸から圧縮合力までの距離x_gは

$$x_g = \frac{\int_0^x \sigma'_c b y dy}{\int_0^x \sigma'_c b dy} = \frac{3307x^2}{5807x} = \frac{3307 \times 150.5}{5807}$$

$$= 85.71 \text{ (mm)}$$

これから

$$M_u = T_y(d - x + x_g)$$

$$= A_s f_y (d - x + x_g)$$

$$= 2533.5 \times 345 \times (550 - 150.5 + 85.71)$$

$$= 4.241 \times 10^8 \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$= 4.241 \times 10^5 \text{ (kN} \cdot \text{mm)}$$

よって

$$R_d = \frac{M_u}{\gamma_b} = \frac{4.241 \times 10^5}{1.15} = 3.69 \times 10^5$$

設計断面耐力の設計断面力の比が構造物係数γ_i以上であることを確認すると、

$$\frac{R_d}{S_d} = \frac{3.69 \times 10^5}{3.04 \times 10^5} = 1.21 \geq \gamma_i = 1.2$$

となり，要求性能を満足することが確認された.

中立軸まわりの圧縮力によるモーメントは

$$\int_0^x \sigma'_c b y dy = \int_0^{\varepsilon'_{cu\_gp}} f(\varepsilon'_c)\, b \frac{\varepsilon'_c x}{\varepsilon'_{cu}} \frac{x}{\varepsilon'_{cu}} d\varepsilon'_c$$

$$= \frac{bx^2}{{\varepsilon'_{cu}}^2} \int_0^{\varepsilon'_{cu}} f(\varepsilon'_c)\, \varepsilon'_c d\varepsilon'_c$$

$$= \frac{bx^2}{{\varepsilon'_{cu}}^2} \left[\int_0^{\varepsilon'_{c0\_gp}} k_{1\_gp} f'_{cd} \left\{ 2\left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right) - \left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right)^2 \right\} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c + \int_{\varepsilon'_{c0\_gp}}^{\varepsilon'_{cu\_gp}} k_{1\_gp} f'_{cd} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c \right]$$

$$= \frac{k_{1\_gp} f'_{cd} bx^2}{{\varepsilon'_{cu}}^2} \left[\int_0^{\varepsilon'_{c0\_gp}} \left\{ 2\left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right) - \left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{c0\_gp}}\right)^2 \right\} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c + \int_{\varepsilon'_{c0\_gp}}^{\varepsilon'_{cu\_gp}} \varepsilon'_c d\varepsilon'_c \right]$$

$$= \frac{k_{1\_gp} f'_{cd} bx^2}{{\varepsilon'_{cu\_gp}}^2} \left[\frac{{\varepsilon'_{cu\_gp}}^2}{2} - \frac{{\varepsilon'_{c0\_gp}}^2}{12} \right]$$

$$= \frac{0.95 \times 17.14 \times 400x^2}{0.004500^2} \left[\frac{0.004500^2}{2} - \frac{0.003^2}{12} \right]$$

$$= 3015x^2$$

これから中立軸から圧縮合力までの距離x_gは

$$x_g = \frac{\int_0^x \sigma'_c b y dy}{\int_0^x \sigma'_c b dy} = \frac{3015x^2}{5067x} = \frac{3015 \times 172.5}{5067}$$

$$= 102.7 \text{ (mm)}$$

これから

$$M_u = T_y(d - x + x_g)$$

$$= A_s f_y (d - x + x_g)$$

$$= 2533.5 \times 345 \times (550 - 172.5 + 102.7)$$

$$= 4.197 \times 10^8 \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$= 4.197 \times 10^5 \text{ (kN} \cdot \text{mm)}$$

よって

$$R_d = \frac{M_u}{\gamma_b} = \frac{4.197 \times 10^5}{1.15} = 3.65 \times 10^5$$

設計断面耐力の設計断面力の比が構造物係数γ_i以上であることを確認すると、

$$\frac{R_d}{S_d} = \frac{3.65 \times 10^5}{3.04 \times 10^5} = 1.20 \geq \gamma_i = 1.2$$

となり，要求性能を満足することが確認された.

（執筆者：千々和　伸浩）

4.3　許容応力度法による設計例

4.3.1　前提条件

セメント系コンクリートに比べ,ジオポリマーコンクリートに関する研究例はまだまだ少ない.このため,限界状態設計法に用いる安全係数のうち，適切な材料係数を設定するのが難しいことも考えられる．また，ジオポリマーコンクリートを用いた鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート部材の研究数も少ないことから，限界状態の設定と限界状態に基づいた照査が難しい場合も考えられる．

このような場合，ジオポリマーコンクリート部材を材料非線形が生じない荷重範囲での使用に限定し，許容応力度法を適用して部材設計を行うことも考えられる．本節では，その参考資料を示すものである．

4.3.2　許容応力度法による設計例

課題：

コンクリートの圧縮強度 24MPa， 鉄筋の降伏強度 345MPa という材料を用いて，作用曲げモーメント 180kNm に対して安全な単鉄筋矩形断面の鉄筋コンクリート梁を設計する．

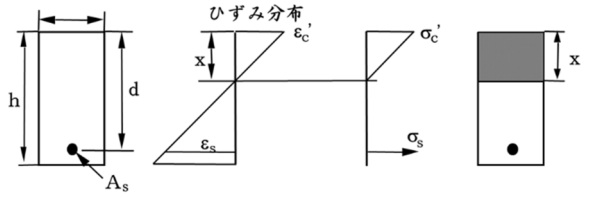
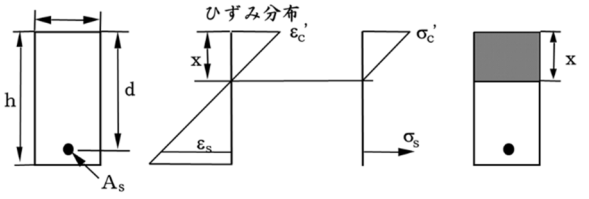
設計条件：

・コンクリートの許容応力度を算出するための安全率は，セメントコンクリート，ジオポリマーコンクリートともに 3.0 とする．

・鋼材の許容応力度を算出するための安全率は，1.8 とする．

・セメントコンクリート，ジオポリマーコンクリートともに，平面保持，鋼材とコンクリートとの完全付着，材料は弾性体，コンクリートの引張り抵抗は考慮しない，という 4 つの仮定が成り立つものとする．

表 4.3.1　ひずみ分布に基づく力の釣合から曲げに対する照査例

セメントコンクリート	ジオポリマーコンクリート
	
力のつり合いから $C - T = 0$ $\frac{bx}{2}\sigma_c - A_s\sigma_s = 0$ *ひずみの適合条件から* $\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_s/E_s}{\sigma_c/E_c} = \frac{\sigma_s}{n\sigma_c} = \frac{d-x}{x}$ $\sigma_s = \frac{d-x}{x} n\sigma_c$	*力のつり合いから* $C - T = 0$ $\frac{bx}{2}\sigma_c - A_s\sigma_s = 0$ *ひずみの適合条件から* $\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_s/E_s}{\sigma_c/E_c} = \frac{\sigma_s}{n\sigma_c} = \frac{d-x}{x}$ $\sigma_s = \frac{d-x}{x} n\sigma_c$
このとき，セメントコンクリートでは，長年にわたる様々な構造物設計の知見から，長期の乾燥収縮や	このとき，ジオポリマーコンクリートでは，長期の乾燥収縮やクリープに関する十分な知見が得られ

クリープなどを想定し，ヤング*係数比* $n=\frac{E_s}{E_c}=15$ とすることが一般的である．	ていない．一方で，ジオポリマーコンクリートのヤング係数は同程度の強度をもつセメントコンクリートに比べて小さい傾向にあることは知られている（第 II 編「5.2　ヤング係数」参照）．このため，本事例ではヤング*係数比* $n=\frac{E_s}{E_c}=18$ として以降の計算を進める．
これらを連立して $$\frac{bx}{2}\sigma_c=A_s\sigma_s=\frac{A_s(d-x)}{x}n\sigma_c$$ $$\frac{bx^2}{2}-nA_s(d-x)=0$$ $$x=\frac{nA_s}{b}\left(-1+\sqrt{1+\frac{2bd}{nA_s}}\right)$$ $x=kd(k$: *中立軸位置係数*$)$，$p=A_s/bd$とすると $$k=\sqrt{2np+(np)^2}-np$$ として，中立軸位置を得ることができる．	*これらを連立して* $$\frac{bx}{2}\sigma_c=A_s\sigma_s=\frac{A_s(d-x)}{x}n\sigma_c$$ $$\frac{bx^2}{2}-nA_s(d-x)=0$$ $$x=\frac{nA_s}{b}\left(-1+\sqrt{1+\frac{2bd}{nA_s}}\right)$$ $x=kd(k$: *中立軸位置係数*$)$，$p=A_s/bd$とすると $$k=\sqrt{2np+(np)^2}-np$$ として，中立軸位置を得ることができる．
アーム長をzとすると $$z=d-\frac{x}{3}=d-\frac{kd}{3}=\left(1-\frac{k}{3}\right)d=jd$$ として，nとpからアーム長を決定することができる． 外力によるモーメントと*つり合う必要があるので* $$M-Cz=M-Tz=0$$ $$M=Cz=\frac{bx}{2}\sigma_c\left(d-\frac{x}{3}\right)\ より$$ $$\sigma_c=\frac{2M}{bx\left(d-\frac{x}{3}\right)}=\frac{2M}{b\times kd\times jd}=\frac{2M}{kjbd^2}$$	*アーム長を*zとすると $$z=d-\frac{x}{3}=d-\frac{kd}{3}=\left(1-\frac{k}{3}\right)d=jd$$ として，nとpからアーム長を決定することができる． 外力によるモーメントと*つり合う必要があるので* $$M-Cz=M-Tz=0$$ $$M=Cz=\frac{bx}{2}\sigma_c\left(d-\frac{x}{3}\right)\ より$$ $$\sigma_c=\frac{2M}{bx\left(d-\frac{x}{3}\right)}=\frac{2M}{b\times kd\times jd}=\frac{2M}{kjbd^2}$$
同様にモーメント*のつり合い条件から* $$M-Cz=M-Tz=0$$ $$M=Tz=A_s\sigma_s\left(d-\frac{x}{3}\right)\ より$$ $$\sigma_s=\frac{M}{A_s\left(d-\frac{x}{3}\right)}=\frac{M}{pbd\times jd}=\frac{M}{pjbd^2}$$	同様にモーメント*のつり合い条件から* $$M-Cz=M-Tz=0$$ $$M=Tz=A_s\sigma_s\left(d-\frac{x}{3}\right)\ より$$ $$\sigma_s=\frac{M}{A_s\left(d-\frac{x}{3}\right)}=\frac{M}{pbd\times jd}=\frac{M}{pjbd^2}$$

nを 15 と固定すると，kとjを決定すると変数はpのみとなり，事前に計算が可能

n	p	k	j
15	0.005	0.319	0.894
15	0.006	0.344	0.885
15	0.007	0.365	0.878
15	0.008	0.384	0.872
15	0.009	0.402	0.866
15	0.01	0.418	0.861
15	0.011	0.433	0.856
15	0.012	0.446	0.851
15	0.013	0.459	0.847
15	0.014	0.471	0.843
15	0.015	0.483	0.839

抵抗曲げモーメントは，

$$\sigma_c = \frac{2M}{kjbd^2}$$

$$\sigma_s = \frac{M}{pjbd^2}$$

のどちらかが許容応力度(σ_{ca}, σ_{sa})に達した時点で決定される．よって

$$M = min\left(\frac{1}{2}\sigma_{ca}kjbd^2, \sigma_{sa}pjbd^2\right)$$

が設計上の最大抵抗曲げモーメントとなる．

通常は，鉄筋降伏が先行する曲げ引張破壊を想定した設計を行うため，$M = \sigma_{sa}pjbd^2$が最大抵抗曲げモーメントとなる．

【断面の設定 1】

B=400mm, h=600mm, d=550mm と仮定する．

鉄筋比 p=As/bd=0.01 と仮定する．

【計算 1 回目】

$$\sigma_c = \frac{2M}{kjbd^2} = \frac{2 \times 180 \times 1000 \times 1000}{0.418 \times 0.861 \times 400 \times 550^2} = 8.267$$

$$> \frac{24}{3} = 8.0N/mm^2$$

nを 18 と固定すると，kとjを決定すると変数はpのみとなり，事前に計算が可能

n	p	k	j
18	0.005	0.344	0.885
18	0.006	0.369	0.877
18	0.007	0.392	0.869
18	0.008	0.412	0.863
18	0.009	0.430	0.857
18	0.01	0.446	0.851
18	0.011	0.462	0.846
18	0.012	0.476	0.841
18	0.013	0.489	0.837
18	0.014	0.501	0.833
18	0.015	0.513	0.829

抵抗曲げモーメントは，

$$\sigma_c = \frac{2M}{kjbd^2}$$

$$\sigma_s = \frac{M}{pjbd^2}$$

のどちらかが許容応力度(σ_{ca}, σ_{sa})に達した時点で決定される．よって

$$M = min\left(\frac{1}{2}\sigma_{ca}kjbd^2, \sigma_{sa}pjbd^2\right)$$

が設計上の最大抵抗曲げモーメントとなる．

通常は，鉄筋降伏が先行する曲げ引張破壊を想定した設計を行うため，$M = \sigma_{sa}pjbd^2$が最大抵抗曲げモーメントとなる．

【断面の設定 1】

B=400mm, h=600mm, d=550mm と仮定する．

鉄筋比 p=As/bd=0.01 と仮定する．

【計算 1 回目】

$$\sigma_c = \frac{2M}{kjbd^2} = \frac{2 \times 180 \times 1000 \times 1000}{0.446 \times 0.851 \times 400 \times 550^2} = 7.839$$

$$< \frac{24}{3} = 8.0N/mm^2$$

$\sigma_s = \frac{M}{pjbd^2} = \frac{180 \times 1000 \times 1000}{0.010 \times 0.861 \times 400 \times 550^2} = 172.8$ $< \frac{345}{1.8} = 191.7N/mm^2$ コンクリートの許容応力度に対して現在の応力度がわずかにオーバーしている．一方で，鉄筋応力度には余裕がある．このため有効高を増加しつつ，鉄筋量を削減してもよいと判断.	$\sigma_s = \frac{M}{pjbd^2} = \frac{180 \times 1000 \times 1000}{0.010 \times 0.851 \times 400 \times 550^2} = 174.8$ $< \frac{345}{1.8} = 191.7N/mm^2$ 許容応力度に対してコンクリートの応力度は 97%でぎりぎりの設計．一方鉄筋応力度は 91%と比較的余裕がある．いずれも許容値は超えていないことから，ここで設計完了とする．
【断面の設定 2】 B=400㎜，h=650㎜，d=600㎜ と仮定する． 鉄筋比 p=As/bd=0.008 と仮定する．	-------
【計算 2 回目】 $\sigma_c = \frac{2M}{kjbd^2} = \frac{2 \times 180 \times 1000 \times 1000}{0.384 \times 0.872 \times 400 \times 600^2} = 7.466$ $> \frac{24}{3} = 8.0N/mm^2$ $\sigma_s = \frac{M}{pjbd^2} = \frac{180 \times 1000 \times 1000}{0.008 \times 0.872 \times 400 \times 600^2} = 179.2$ $< \frac{345}{1.8} = 191.7N/mm^2$ 許容応力度に対してコンクリートの応力度は 93%. 一方鉄筋応力度は 93%と，適度な余裕がある．	-------

4.3.3　許容応力度法による設計の注意

4.3.2 で示したとおり，許容応力度法による設計を行う場合，セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートの違いは，ヤング係数比の設定のみによって生じることとなる．このため，今回の設計例では，ジオポリマーコンクリートの方がコンパクトな断面を実現することができた．

一方で，断面をコンパクトにしたこととヤング係数が小さいことから，曲げ剛性はセメントコンクリートの設計断面に比べて当然低くなる．たわみの増加や固有振動数の増加の影響が懸念される構造部材（橋梁床版，鉄道桁，歩道橋桁等）にジオポリマーコンクリートを用いる場合は，それらの指標についても十分な検討を行い，断面を決定する必要がある．

（執筆者：藤山　知加子）

4.4　せん断に対する設計

理論的に算出できる設計値とは異なり，経験的に構築されたいわゆるマクロ式（たとえば，コンクリート標準示方書に記載されている曲げひび割れ幅算定式やせん断耐力算出式）を GP コンクリートに適用できるかどうかは，慎重に検討を行う必要がある．

Yacob ら[1]は，フライアッシュベースのジオポリマーコンクリート梁と OPC コンクリート梁について，せん断スパン比や軸方向鉄筋量をパラメータとしたせん断試験を実施した．その結果，スターラップを有する梁の破壊モードやせん断耐力は OPC コンクリートと同様であり，もともと安全側に設定されている既存の OPC コンクリート用の耐力算出式も実用上使用できる可能性を示している．ただし，この研究では GP コンクリートと OPC コンクリートとのヤング係数も同等であった．

一方，Cheng Wu ら[2]は，高炉スラグベースの AAC 系材料で梁のせん断試験を行っている．こちらも梁の破壊モードやせん断耐力は圧縮強度が同等の OPC コンクリートと比べて明らかに劣ることはないが，ひび割れの発生荷重が OPC に比べて低くひび割れ分散性も低い傾向にあるため，GP コンクリート部材では設計におけるひび割れ幅に同じ許容値を用いると，GP コンクリートのほうが不利になる可能性があることを指摘している．なお，この研究シリーズでは，GP コンクリートのヤング係数は OPC コンクリートとのヤング係数よりも概ね 2 割程度低かった．

なお，前述の Nagajothi S.ら[3]は，GFRP およびバサルト繊維を用いた補強材を用いた GP コンクリート梁の試験において，実験で得有れたせん断耐力と ACI 等海外の基準および研究者が提案している FRP を用いた梁のせん断耐力式との比較を行った．CEP-FIP Model Code 1978 (CEP-FIP 1984)以外は概ねせん断耐力を実際よりも小さく見積もっているため，安全側として使用できる可能性を示している．

Hassan ら[4]は，鋼繊維を粉体の 1.5%まで混入した GP コンクリート梁を，3 種類の a/d を設定して載荷している．主材料はフライアッシュのみで，NaOH と水ガラスを用い，養生は室温である．それにもかかわらず作製した GP コンクリートは，繊維の有無によらず比較試験体として作成した OPC コンクリートよりも強度やヤング係数が高い傾向が見られ，せん断耐力においても全体に GP コンクリートの方が高かった．一方，破壊モードやひび割れ分散性は，両者は同等だったと述べている．

以上より，経験的に構築されたいわゆるマクロ式の GP コンクリートへの適用については，個別のケースに応じて，慎重な判断が求められる．

参考文献

1) Noor S. Yacob, Mohamed A. ElGawady, Lesley H. Sneed, Aly Said: Shear strength of fly ash-based geopolymer reinforced concrete beams, Engineering Structures 196 (2019) 109298

2) Cheng Wu, Hyeon-Jong Hwang, Caijun Shi, Ning Li, Yunxing Du: Shear tests on reinforced slag-based geopolymer concrete beams with transverse reinforcement, Engineering Structures 219 (2020) 110966

3) Nagajothi S. and Elavenil S.: Shear Prediction of geopolymer concrete beams using Basalt / Glass FRP bars, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 19, 216-225, March 2021

4) Amer Hassan, Mohammed Arif and M. Shariq: Structural performance of ambient-cured reinforced geopolymer concrete beams with steel fibers, Structural Concrete, 2021, 22, pp.457-475.

（執筆者：藤山　知加子）

4.5　プレストレストコンクリート構造

4.5.1 前提条件

鉄筋コンクリート（RC）構造と同様，プレストレストコンクリート（PC）構造においても，要求性能や安全係数の考え方は同じである．これらについては **4.3** および **4.4** を参照されたい．

RC との相違点としては，PC では常時の荷重に対してコンクリートにひび割れを生じさせないようにプレストレスを導入するため，構造解析ではコンクリート全断面が有効となり，プレストレスの計算上は鉄筋とコンクリートとのヤング係数比や鉄筋応力度を直接的に考慮する必要がないことが挙げられる．終局耐力（あるいは終局曲げモーメント）の算出については，軸力を導入した RC 部材と同様の計算を行えばよい．

4.5.2　セメント系コンクリートと GP コンクリートの構造計算比較例

(1) 想定する条件

a) 想定する構造部材

ここでは**図 4.5.1** に示す断面をもったスパン10000mmの PC 単純桁を想定し，その照査を行う．

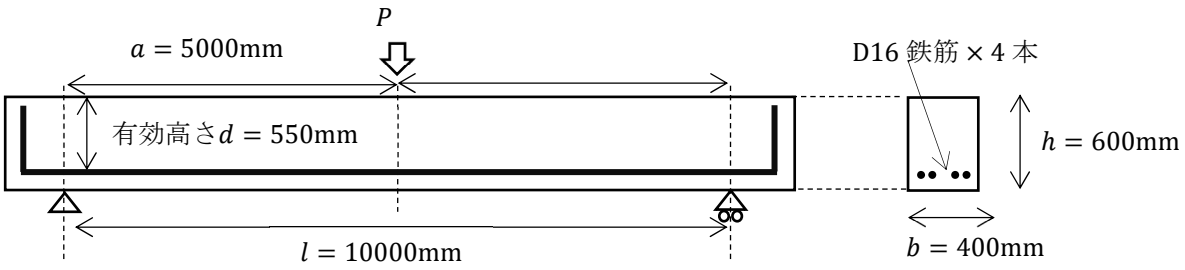


図 4.5.1　想定する PC 単純桁

図に示したように，断面の幅bは400mm，桁高hは600mm，有効高さdは550mmである．また使用するコンクリートの特性値は$40.0\ \text{N/mm}^2$であり，鉄筋は降伏強度$345\ \text{N/mm}^2$の D16 鉄筋を 4 本用いる．参考までに，このときの鉄筋の断面積と引張鉄筋比は以下のようになる．

鉄筋の断面積(mm²)

$$A_s = 198.6 \times 4 = 794.4$$

引張鉄筋比

$$p_w = \frac{A_s}{bd} = \frac{2533.5}{400 \times 550} = 0.003611$$

b) 想定する荷重

ここでは死荷重とスパン中央での集中荷重を想定する．死荷重の計算においては鉄筋を含めた鉄筋コンクリートの密度を$\rho_c = 2.45 \times 10^{-5}\ \text{N/mm}^3$とする．集中荷重は72kNである．

c) 照査対象とする限界状態

照査対象とする限界状態として，使用限界状態を想定し，限界状態のひとつとして「ひび割れを生じさせないこと」を対象とし，曲げ応力度の照査を行う．荷重の組み合わせとして，死荷重と集中荷重が同時に作

用することを想定する.

死荷重(kN/m)　$\omega = \rho_c bh = 2.45 \times 10^{-5} \times 400 \times 600 \times 1 \times 10^{-3} = 5.88 \times 10^{-3}$ (kN/mm)

死荷重によるスパン中央のモーメント(kN・mm)

$$M_d = \frac{\omega l^2}{8} = \frac{5.88 \times 10000^2}{8} \times 10^{-3} = 7.35 \times 10^4 \ (\mathrm{kN \cdot mm})$$

集中荷重によるスパン中央のモーメント(kN・mm)

$$M_c = \frac{Pl}{4} = \frac{72.0 \times 1000 \times 10000}{4} \times 10^{-3} = 1.80 \times 10^5 \ (\mathrm{kN \cdot mm})$$

$$M_d + M_c = (7.35 \times 10^4 + 1.80 \times 10^5) = 2.54 \times 10^5 \ (\mathrm{kN \cdot mm})$$

(2) 使用限界状態の照査

PC では常時の荷重に対してコンクリートにひび割れを生じさせないようにプレストレスを導入するため,構造解析ではコンクリート全断面が有効となる.

表 4.5.1　使用限界状態の照査

セメントコンクリート	ジオポリマーコンクリート
コンクリート全断面有効として,常時で発生する断面の上縁および下縁のコンクリート応力度を求める. $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{400 \times 550^3}{12} = 5{,}545{,}833{,}333\ mm^4$ $y = \frac{h}{2} = \frac{550}{2} = 275\ mm$ 上縁コンクリートの応力　σ_{cu} $\sigma_{cu} = \frac{M}{I} y = \frac{2.54 \times 10^5 \times 10^3}{5.546 \times 10^9} \times (-275) = -12.6\ MPa$ 下縁コンクリートの応力　σ_{cl} $\sigma_{cl} = \frac{M}{I} y = \frac{2.54 \times 10^5 \times 10^3}{5.546 \times 10^9} \times 275 = 12.6\ MPa$ ここで,圧縮強度 40MPa のコンクリートにひび割れを発生させないための許容応力度をセメントコンクリートの実績で 1.5MPa とすると, 12.6 -1.5= 11.1 MPa の有効プレストレスによる応力を下縁に与える必要がある.	コンクリート全断面有効として,常時で発生する断面の上縁および下縁のコンクリート応力度を求める. $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{400 \times 550^3}{12} = 5{,}545{,}833{,}333\ mm^4$ $y = \frac{h}{2} = \frac{550}{2} = 275\ mm$ 上縁コンクリートの応力　σ_{cu} $\sigma_{cu} = \frac{M}{I} y = \frac{2.54 \times 10^5 \times 10^3}{5.546 \times 10^9} \times (-275) = -12.6\ MPa$ 下縁コンクリートの応力　σ_{cl} $\sigma_{cl} = \frac{M}{I} y = \frac{2.54 \times 10^5 \times 10^3}{5.546 \times 10^9} \times 275 = 12.6\ MPa$ ジオポリマーコンクリートの圧縮強度に対する曲げ引張強度はセメントコンクリートよりも低い傾向にあると言われている(第 II 編 5.1 参照). ここで,圧縮強度 40MPa のジオポリマーコンクリートにひび割れを発生させないための許容応力度を,計画配合で十分な材料試験を行った結果 1.2MPa と設定した. 12.6 -1.2= 11.4 MPa の有効プレストレ

	スによる応力を下縁に与える必要がある.
PC 鋼より線 12S15.2 を 1 本使用することとする. 1 本あたりの断面積 $A_{pc} = 1664\ mm^2$ ここで，PC 鋼材の設計荷重時の許容応力度 1110MPa に対し，プレストレスロスを考える. プレストレスロス後の有効係数を，セメントコンクリートの実績で 0.80 と仮定すると，$1110 \times 0.8 = 888\ MPa.$ 有効引張応力度 $\sigma_{pe} = 870\ MPa$ として計算を進める.	PC 鋼より線 12S15.2 を 1 本使用することとする. 1 本あたりの断面積 $A_{pc} = 1664\ mm^2$ ここで，PC 鋼材の設計荷重時の許容応力度 1110MPa に対し，プレストレスロスを考える. プレストレスロスは，①シースや定着と PC 鋼材の摩擦，②コンクリートの弾性変形，③定着のめり込み，④PC 鋼材のリラクセーション，⑤コンクリートのクリープ・乾燥収縮に起因すると言われている. ②について，ジオポリマーコンクリートのヤング係数は一般にセメントコンクリートより小さめであること，一方で⑤についてはクリープ係数がセメントコンクリートより小さめであることも報告されている（第 II 編 5.2-5.3 参照）. これらについては今後十分な検討が行われるべきであるが，ここでは計画配合で十分な材料試験を行った結果，両者の影響が相殺されて，セメントコンクリートと同等の 0.80 を仮定するものとした. $1110 \times 0.8 = 888\ MPa.$ これをもとに，以降はセメントコンクリートと同様に有効引張応力度 $\sigma_{pe} = 870$ として計算を進める.
有効プレストレス $P_e = 1664 \times 1 \times 870 = 1.448 \times 10^6\ N$ PC 鋼材は曲げ上げを行わず直線配置する. 偏心量 $e_p = 80\ mm$ とする. プレストレス力による偏心曲げモーメント $M_{pe} = P_e e_p = 1.448 \times 10^6 \times -80$ $= -1.158 \times 10^8\ Nmm$ 上側引張りの曲げモーメントである.	有効プレストレス $P_e = 1664 \times 1 \times 870 = 1.448 \times 10^6\ N$ PC 鋼材は曲げ上げを行わず直線配置する. 偏心量 $e_p = 80\ mm$ とする. プレストレス力による偏心曲げモーメント $M_{pe} = P_e e_p = 1.448 \times 10^6 \times -80$ $= -1.158 \times 10^8\ Nmm$ 上側引張りの曲げモーメントである.
有効プレストレスにより生じる応力度 上縁コンクリートの応力 σ_{cue}	有効プレストレスにより生じる応力度 上縁コンクリートの応力 σ_{cue}

$\sigma_{cue}=\frac{P_e}{A_c}+\frac{M_{pe}}{I}yu$ $=\frac{-1.448\times10^6}{400\times550}$ $+\frac{-1.158\times10^8}{5.546\times10^9}\times(-275)$ $=-6.582+5.744=-0.8377\ MPa$ 下縁コンクリートの応力　σ_{cle} $\sigma_{cle}=\frac{P_e}{A_c}+\frac{M_{pe}}{I}yl$ $=\frac{-1.448\times10^6}{400\times550}$ $+\frac{-1.158\times10^8}{5.546\times10^9}\times275$ $=-6.582-5.744=-12.33\ MPa$	$\sigma_{cue}=\frac{P_e}{A_c}+\frac{M_{pe}}{I}yu$ $=\frac{-1.448\times10^6}{400\times550}$ $+\frac{-1.158\times10^8}{5.546\times10^9}\times(-275)$ $=-6.582+5.744=-0.8377\ MPa$ 下縁コンクリートの応力　σ_{cle} $\sigma_{cle}=\frac{P_e}{A_c}+\frac{M_{pe}}{I}yl$ $=\frac{-1.448\times10^6}{400\times550}$ $+\frac{-1.158\times10^8}{5.546\times10^9}\times275$ $=-6.582-5.744=-12.33\ MPa$
設計荷重時の合成応力度 上縁コンクリートの合成応力度 $\sigma_{cud}=\sigma_{cu}+\sigma_{cue}=-12.6+(-0.8377)$ $=-13.4\ MPa$ 圧縮強度 40MPa のコンクリートの許容圧縮応力度は実績より-14MPa. よって照査を満足する. 下縁コンクリートの合成応力度 $\sigma_{cld}=\sigma_{cl}+\sigma_{cle}=12.6+(-12.33)=0.269\ MPa$ コンクリートにひび割れを発生させないための許容応力度をセメントコンクリートの実績で 1.5MPa なので，照査を満足する.	設計荷重時の合成応力度 上縁コンクリートの合成応力度 $\sigma_{cud}=\sigma_{cu}+\sigma_{cue}=-12.6+(-0.8377)$ $=-13.4\ MPa$ 圧縮強度 40MPa のコンクリートの許容圧縮応力度は実績より-14MPa. よって照査を満足する. 下縁コンクリートの合成応力度 $\sigma_{cld}=\sigma_{cl}+\sigma_{cle}=12.6+(-12.33)=0.269\ MPa$ コンクリートにひび割れを発生させないための許容応力度を GPC 用に 1.2MPa と定めたが，照査を満足する結果となった.

(3) 終局時限界状態の照査

セメントコンクリートの場合とジオポリマーコンクリートの場合での設計断面耐力を求めればよい．軸力の考慮が必要となるが，基本的には 4.2 に示した RC 断面の耐力算出法と同じ考え方であるため，ここでは省略する.

4.5.3 ジオポリマーコンクリートを用いた PC 構造物の設計の留意点

4.5.2 で示したとおり，セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートの設計上の違いは，RC と同様引張強度やヤング係数の違いによるほか，クリープ・乾燥収縮性状の違いがキーになると考えられる．様々

な材料・配合が考えられるジオポリマーコンクリートを用いる場合は，それらの基本的な力学特性について示方書等で一概に規定するのは現時点では困難であると考えられるため，実際に使用する条件において事前に十分な検討を行い，個別に決定する必要がある．

（執筆者：藤山　知加子）

５．有害物質の固定

5.1　セメントによる固定効果

発電所の放射線管理区域内で発生する放射性廃棄物のうち，比較的表面線量率の低いぼろ布，紙，金属廃棄物，そしてタービン駆動に回った蒸気をろ過する系統で発生する廃液も蒸発濃縮された状態でドラム缶内でセメント固化される．このようなセメント固化の歴史は古く，1970 年代から定常的に進められている [1]．固化材にセメントを用いる利点は，入手が容易でかつ廉価であること [2]，そして，対象となる物質の種類，化学的な形態によって異なるが，化学的に固定化させる効果を有することである[例えば3]．

5.1.1　C-S-H

放射性物質等の物質のうち Cs 等のカチオンは主にセメント水和物の C-S-H 表層部のシラノール基に吸着する [4]．また，C-S-H の Si の一部が Al で置き換えられた C-A-S-H の表層部ではさらに Cs 等のカチオンに対する吸着性能が高まる [5]．C-S-H に収着し不溶化される元素は，Li，Na，K，Rb，Cs，Mg，Ni，Co，Hg，Zn，Cd，Al，Fe，Cr，Pb，U，Cl，I，OH^-，CO_3^{2-}，SO_4^{2-}である [6]．それらの元素のうち，アルカリイオンは Si イオンの層間の Ca^{2+}と置換され，OH^-，CO_3^{2-}，SO_4^{2-}は混練時に共存させることで C-S-H 相に取り込まれる．また，I^-は C-S-H の Ca/Si 比が 1.7 の場合に収着率が高まること，U は C-S-H 相に吸着することとシリケートイオンと共沈することで不溶化するとされている [6]．

5.1.2　エトリンガイト

セメントの水和反応で生じるエトリンガイトは固化体の強度発現に寄与しないが，オキシアニオン状になったヒ素（AsO_4^{3-}）を不溶化する [7]．エトリンガイトの構造は Column（$\{Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\}^{6+}$が柱状に形成）と Channel（4 つの Column 間の 2 つの隙間に SO_4^{2-}が $\{(SO_4)_3 \cdot 2H_2O\}^{6-}$として存在し，エトリンガイト結晶を形成）で構成される．エトリンガイトを構成する Ca^{2+}，Al^{3+}，SO_4^{2-}，OH^-はいずれも他の類似元素と置換しやすい．例えば，Al イオンが Si イオンと置換し，硫酸イオンの一部が炭酸イオンと置換することでソーマサイトに変遷する．その他，B_2O_3が Al イオンと置換すること，Ni^{3+}，Co^{3+}が Al^{3+}と置換することなども示されている [6]．

5.2　AAMs による固定効果

本節は京都大学 高岡正輝教授が土木学会 2021 年度重点課題「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究」報告書において担当した「有害物質の固定」における報告部分を引用したものである．

AAMs により重金属や放射性物質の様々な元素を固定可能と言われているが，その固定化機構をまとめた図を**図 5.2.1** に示す．ここでは，Pb を代表的な金属元素として取り上げ，すでに先行している研究者が提唱している機構等を描いている [8,9,10,11,12,13,14]．有害元素の固定化機構としては，図中に示したように 5 つの機構が主なものとして挙げられる．これらの機構は便宜的に分けて説明するが，複雑に絡み合っており，区別することが難しいことが多い [15]．

5.2.1　難溶性物の形成

AAMs は 3 次元の網目構造を形成するが，そのネットワークとは別に，一般に濃度の濃いアルカリを使用するため，重金属元素は水酸化物を生成する．いくつかの金属は難溶性の水酸化物沈殿を形成するし，水酸化物が生成した後，大気中の二酸化炭素と反応し，難溶性の炭酸塩を形成する場合もあると考えられる．**図 5.2.1** では $PbCO_3$ として示している．Pb は水酸化鉛と炭酸鉛の溶解度を比較した場合，1000 倍以上異なる．また，難溶性ケイ酸塩として固定される可能性もある [15]．

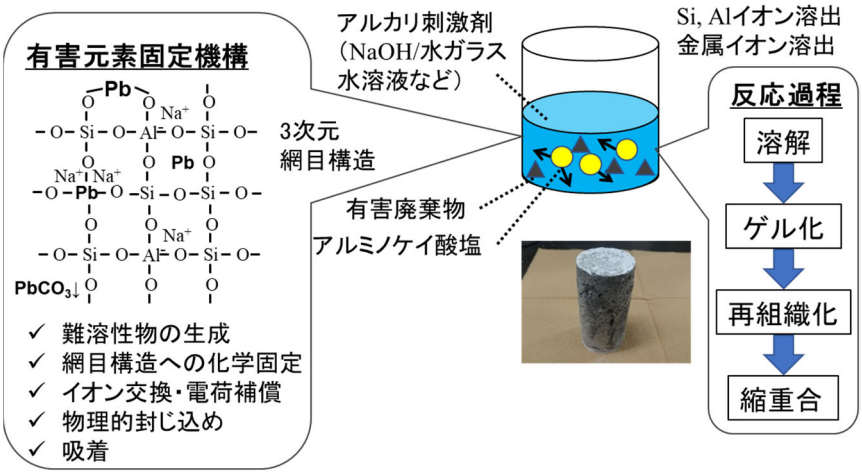


図 5.2.1　AAMs の有害元素固定機構 [15]

5.2.2　網目構造への化学的固定

図 5.2.1 の右側に反応過程を示しているが，基本的にはまずアルミノケイ酸塩が溶解して Si，Al イオンが溶出し，高アルカリ条件下でゲル化・再組織化・脱水縮重合が生じることによって，SiO_4 と AlO_4 が四配位した形で O を共有しながら繋がっていき，三次元構造を形成する．この形成過程で，鉛が Al の代わりに架橋構造をとり固定されることや，共有結合・配位結合によりマトリクスの末端に金属が固定されることなどが考えられる．また，対象とする元素を含むゼオライト（様物質）が形成することも多い．ゼオライトの構造内部に有害元素が極めて安定に固定される場合がある [15]．

5.2.3　イオン交換・電化補償

Si-O-Al の 3 次元網目構造中 Al の存在箇所では，電荷が不足していることから Na^+などの 1 価イオンが電荷を補償するため存在すると考えられている．そのため，Si/Al の比率やアルカリ成分の存在量により，AAMs 中のイオン交換サイト数が変わってくる．また，必ずしも非晶質の 3 次元網目構造だけが AAMs 中にできるわけではなく，上記で述べたようにゼオライトなどが形成される場合がある．つまり，対象元素がイオン交換により固定される．なお，ここでの機構はあくまで AAMs 形成過程での取り込みの機構を想定しており，後に説明する「吸着」とは異なる [15]．

5.2.4　物理的閉じ込め

3 次元網目構造を形成する際にモノマーが重合していくが，その過程において対象元素の水酸化物イオンや難溶性塩などが物理的に取り込まれていく機構が考えられる．また，密度が高く，緻密な AAMs が形成されている場合，外部からの水の浸入なども困難になるため，容易には溶出しにくく，対象元素は高度に固定

される．アルミノケイ酸塩の材料や配合，養生条件などによるがセメントよりも高い強度を発現できる場合もあり，物理的封じ込めも主たる一つの固定化機構である．実際，元素によってはそれほど低い溶解度ではない水酸化物であってもAAMsからの溶出率が低いケースがある[15)]．

5.2.5 吸着

上記の4つの機構は,AAMsが形成される過程での有害元素の固定を想定したものであるが,吸着はAAMsが形成された後の元素の固定機構として挙げておく．これは，作製したAAMsを排水中重金属の除去・固定に使用する場合があり，この場合，非晶質の3次元網目構造とともに生成したゼオライト（様物質）がイオン交換能を持っており，対象元素を固定可能な場合がある．また，ここでは必ずしもイオン交換だけでの機構ではないことから吸着という表現を使用する．有害元素を含む廃棄物をAAMsにして処分を行う場合，溶出試験を実施するが，その際，AAMsからいったん溶出試験の溶媒に対象元素イオンが溶出することが想定されるが，AAMsに発現した吸着能により再度表面に固定されることも十分想定される[15)]．

また，これら5つの機構以外に，対象とする廃棄物や使用するアルミノケイ酸塩材料やアルカリ活性剤に不純物が含まれ，それらが有害物質の吸着等にも影響することも可能性としては存在する[15)]．

5.3 放射性廃棄物を対象とした固型化処理の現状

普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグセメントはモルタルとしてすでに原子力発電所における低レベル放射性廃棄物（極めて低い（L3）～比較的低いレベル（L2），液体状および雑個体）を対象としてドラム缶内で固型化処理するために用いられている．そして，青森県六ケ所村に設置されたL3～L2用処分施設（浅地中トレンチ，浅地中ピット）で埋設処分されている．

一方，AAMは国内では実証レベルで固型化材料として使用されている．AAMの種類としては，高炉スラグ微粉末に研究施設内で発生するアルカリ廃液を刺激剤として使用した形式，およびメタカオリンに高炉スラグ微粉末等を加えた粉体材料に水ガラスと水酸化ナトリウムを混ぜた刺激材を加える形式が知られている．わが国における放射性廃棄物処分事業では「原子炉等規制法」および行政による監督体制が整えられており，AAMのような新規材料の採用に対して慎重にならざるを得ない.今後,放射性物質を用いた実証試験を重ね,認可を受ける必要がある．なお，スロバキアならびにチェコでは原子炉解体時に発生する洗浄スラッジ水等をドラム缶に入れ，メタカオリンベースの粉体材料，水ガラス溶液，NaOHを投入し，かくはんすることで固型化する処理が実事業として進められている．

参考文献

1) 阪田貞弘:原子力発電所からの放射性廃棄ブル処理の現状,燃料協会誌,第54巻第577号,pp.306-313,1975
2) 野下健司,西高志,松田将省:セメント系材料による放射性核種の収着,放射性廃棄物研究,Vol.3 No.2,pp.63-70, 1997
3) F.P. Glasser : Progress in the immobilization of radioactive wastes in cement, Cement and Concrete Research, Vol.22 Issues 2-3, pp.201-216, 1992
4) Hosokawa, Y., Yamada, K., Haga, K. and Ogawa, S.: Numerical modeling of the alkali penetration into cementitious materials using the coupled thermodynamic phase equilibrium mass transfer

system, Proceedings of the 15th international congress on the chemistry of cement, 2019
5) 湊大輔，渡邊禎之，原澤修一，山田一夫：C-A-S-H への Cs 収着挙動の評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.53-60，2015
6) M.L.D. Gougar, B.E. Scheetz and D.M. Roy: Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization: A review, Waste Management, Vol.16 No.4, pp.295-303, 1996
7) S.C.B. Myneni, S.J.T. Traina, T.J. Logan and G.A. Waychunas : Oxyanion behavior in alkaline environments: Sorption and desorption of Arsenate in ettringite, Environmental Science & Technology, Vol.31 No.6, pp.1761-1768, 1997
8) Van Jaarsverld J. G. S. and Van Deventer J. S. J., The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymer, *Cem. Concr. Res.*, 29, 1189-1200, 1999
9) Provis J. and Van Deventer J. S. J., Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications, *Woodhead publishing limited*, 2009
10) El-eswed B. I., Aldagag O. M., Khalili F. I., Efficiency and mechanism of stabilization/solidification of Pb(II), Cd(II), Cu(II), Th(IV) and U(VI) in metakaolin based geopolymers, *Appl. Clay Sci.*, 140, 148-156, 2017
11) Ji Z., Pei Y., Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research application in heavy metal immobilization: A review, *J. Environ. Manage.*, 231, 256-167, 2019
12) El-eswed B.I., Chemical evaluation of immobilization of wastes containing Pb, Cd, Cu and Zn in alkali-activated materials: A critical review, *J. Environ. Chem. Eng.*, 8, 104194, 2020
13) 日本コンクリート工学会：有害廃棄物・放射性廃棄物処分へのセメント・コンクリート技術の適用研究委員会報告書，2020
14) 佐藤淳也：アルミノシリケート硬化体中における重金属および放射性核種の固定化機構に関する研究，京都大学博士論文，2021
15) 土木学会コンクリート委員会：新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究，2021 年度重点研究課題報告書，2022 年 3 月

（執筆者：山本　武志）

６．規格・規準類の例（BS PAS 8820 の場合）

ジオポリマーに関する規格・規準類は，現在各国で検討中である．具体的な整備状況の調査は RILEM の研究委員会の活動の一環として行われている．本稿では，英国規格（British Standards、略称 BS）の PAS（公開仕様書）[1)]の一部を紹介する．なお，PAS に関しては，「本 PAS は英国規格とみなされるべきものではない．英国規格に本 PAS の内容が公布されるか，または英国規格として公布されると本 PAS は廃止されることになる.」と説明されている．

目次

前書き
0. 序論
1. 適用範囲
本 PAS では，アルミノケイ酸塩主成分とアルカリ活性剤から成るアルカリ活性セメント系材料の性能要件を指定する．AACM(活性剤を含む)には結合剤固体の 5wt.%未満のポルトランドセメントが含有される可能性があり，また，セメント系材料の 25wt.%を超えない副成分が含有される可能性もある．本 PAS ではまた，こうしたセメント系材料の使用を通して得られるコンクリートを性能および耐久性に関して評価する手段についても指定しており，それらのコンクリートのアルカリ活性構成材料およびアルミノケイ酸塩粉末構成材料に関する要件も定めている（本 PAS では「ジオポリマー」という用語は使用していないが，アルカリ活性セメント系材料と併せて便宜的にそれを使用することは除外していない.）.
2. 引用規格
3. 用語，定義および略語（詳細は省略）
4. アルカリ活性セメント系材料
4.1 主成分
4.2 水
4.3 アルカリ活性剤
4.4 ポルトランドセメント構成材料
4.5 補助成分（subsidiary constituents）
4.6 生産管理
4.7 塩化物含有量
4.8 性能評価
4.8.1 力学的および物理的要件
4.8.2 反応熱
5. AACM コンクリート
5.1 コンクリートの配合
5.2 コンクリートの混合，打設，および養生
5.3 コンクリートの試験
5.3.1 試験のスケジュール
5.3.2 フレッシュコンクリートの特性
5.3.3 硬化コンクリートの特性

5.4　AACM コンクリートの製造管理

5.5　AACM コンクリートが仕様に適合していない場合に取るべき対策

6. AACM コンクリートのための目的の用途別試験およびトライアル

6.1　室内試験

6.2　プラント試験(Plant suitability trials)

7. 情報および表示

7.1　概要

7.2　製造された AACM コンクリートに関する情報

7.3　プレキャスト AACM コンクリート

7.4 以下は省略

参考文献

1) PAS 8820：2016 “Construction materials, Alkali-activated cementitious material and concrete, Specification”,BSI Standards Publication 2016

（執筆者：一宮　一夫）

Ⅴ．実施例

１．農業農村整備事業におけるクリークの擁壁への適用[1)]

1.1　はじめに

甲本らは，農業農村整備事業におけるクリーク（水路）整備に関して，木柵工法に代わる耐久性のあるクリーク斜面保護工法を確立する観点から，最近研究が進みつつあるフライアッシュ・ベース・ジオポリマーを用いた擁壁工法の設計・施工例について述べている．従来，幹線水路はブロックマット工法，支線水路は組立柵渠及び木柵工による工法が実施されている．しかしながら，木柵工の場合，水路の水位変動が周期的に発生する条件下では柵が比較的短期間に腐食し，機能が損なわれることにより水路法面下部が洗堀され法面が崩落するという被害が進行している．したがって洗堀を受けた水路の改修整備に際しては，まず木柵工に代わる耐久性のある工法を検討する必要があった．そこでジオポリマーを活用した擁壁工法に着目している．

1.2　材料特性の検討

1.2.1　材料および配合

甲本らの研究では，**表 1.2.1** に示す化学組成を有する福岡県苅田発電所産のフライアッシュを使用した．同表より，フライアッシュの化学組成は，他の長崎県松浦発電所や熊本県苓北発電所産のフライアッシュに比べて，SiO_2が少なく，強度発現に効果のある CaO や SO_3が多いといった特徴を有している．特に SO_3は CaO との結合で $CaSO_4$（石膏）の形でフライアッシュに含まれているものと考えられ，ジオポリマーの強度発現に寄与していると思われる．なお，表中のその他は未燃カーボンを主とし，極微量のフッ素や批素からなっている．

表 1.2.1　XRF によるフライアッシュの化学成分

1	SiO_2	Al_2O_3	CaO	SO_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	ZnO	CL	K_2O	MnO_2	P_2O_5	その他
重量%	38.76	24.25	19.45	6.62	1.62	0.74	0.54	0.29	0.13	0.05	0.03	0	7.52

ジオポリマーの材料として，メタ珪酸ソーダ粉末と珪酸ソーダ 1 号粉末を使用することとし，これらを重量比でそれぞれ 10%を混合して２種類のフライアッシュ＋珪酸ソーダ＋水のジオポリマーを作製した．これら 2 種類のジオポリマーをそれぞれ KMG10（メタ珪酸ソーダ粉末 1%混合供試体）および KGK10（珪酸ソーダ 1 号粉末 1%混合供試体）とする．これらの一軸圧縮強さを比較し，今回使用する珪酸ソーダの種類を決定する．

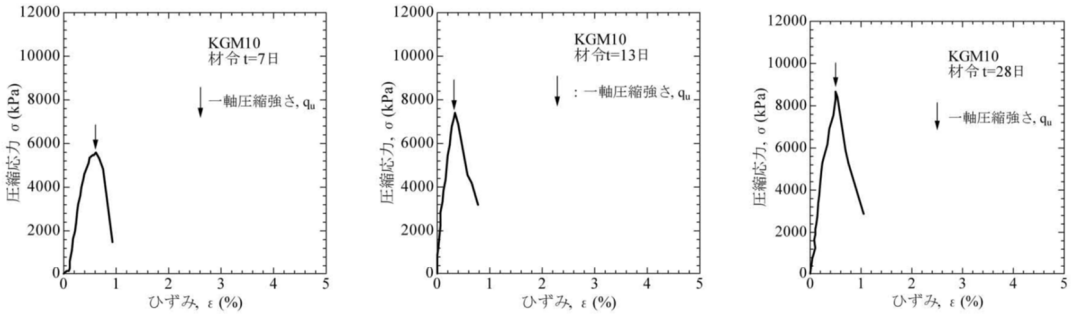
1.2.2　材料特性検討用の供試体形状および養生

ジオポリマー供試体は直径 50mm，高さ 100mm の容器に充填し室内にて気中養生とした．

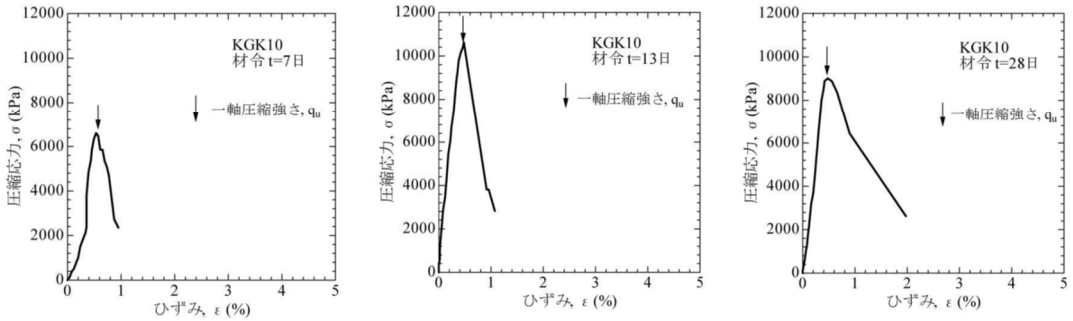
1.2.3　圧縮強度特性

試験材齢は，7 日，14 日，28 日とした．それぞれの材齢 t のジオポリマー供試体に対して一軸圧縮試験を行った．各供試体の各材齢における一軸圧縮試験結果（圧縮応力 σ～ひずみ ε 関係）を**図 1.2.1(a)～(b)**に示す．各図において σ の最大値を一軸圧縮強さ q_u とする．

ジオポリマー供試体の一軸圧縮強さ q_u と材齢 t の関係を**図 1.2.2** に示す．同図によれば，メタ珪酸ソーダ粉末混合供試体（KGM10），珪酸ソーダ 1 号粉末混合供試体（KGK10）共に，qu は t と共に増加している．ただし，供試体 KGK10 は 28 日強度が若干減少している．また，図から t＝28 日強度は 8MPa（80kgf/cm^2）が期



(a)　メタ珪酸ソーダの場合



（b）珪酸ソーダ1号粉末の場合

図 1.2.1　各種材齢における圧縮試験時の応力ひずみ関係

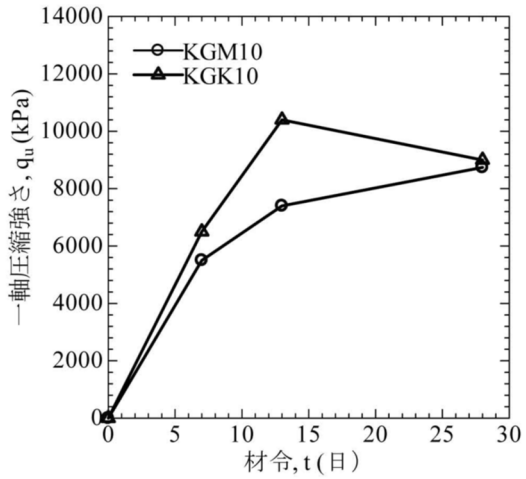


図 1.2.2　各材齢おける圧縮強度の比較例

待できる．これよりどちらの珪酸ソーダとも十分な強度が発現しており，水路擁壁の材料としての使用は可能である．このため，今回の試験施工では，材料単価が安いメタ珪酸ソーダ粉末を使用することとした．

1.3　擁壁の設計

1.3.1　工法検討および結果

試験施工を行うに当たり以下の 3 つの工法を検討した．

(a) ジオポリマー擁壁（現場打）工法

施工時にジオポリマーブロックに比べ工事費が安価で，農地等への影響が少ない

(b) ジオポリマーブロック（二次製品）工法

工場で製造するため，新たに型枠が必要となり今回の試験施工（施工延長が短い）では工事費が割高

(c) ジオポリマー改良土（粉体改良）工法

現地土とジオポリマーを混合し，法面に埋戻す工法であるが，現地でフライアッシュを大量に混ぜるため，飛散等による農地等への影響が懸念

以上より，(a)ジオポリマー擁壁を採用した．

1.3.2　擁壁の設計諸元

擁壁の設計諸元を**表 1.3.1** に示す．

表 1.3.1　擁壁の設計条件

断面形状	上部幅 0.3m，下部幅 0.66m，高さ 1.2m
擁壁断面積	$A = 1.2\times(0.3 + 0.66)/3 = 5.76m^2$
擁壁容量 V	$V = 2\times5\times0.576 = 5.76m^3$
ジオポリマー密度 ρ_t	$\rho_t = 17kN/m^3$
擁壁総重量 W	$W = 5.76\times1.7 = 98kN$

1.3.3　ジオポリマー擁壁の形状および大きさ

擁壁の断面図，側面図，横断図を**図 1.3.1** に示す．擁壁の高さは 1.2m，長さは 5m である．

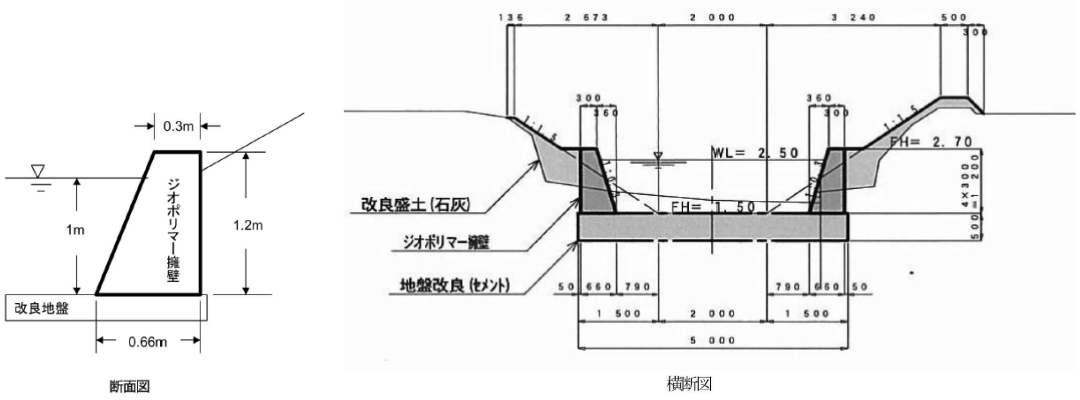


図 1.3.1　擁壁の断面図

1.3.4　擁壁の安定性

擁壁の安定性を検討するためには擁壁にかかる土圧を知る必要がある．擁壁の裏込め土は粘性土（粘着力 c＝1.2t/m^3，内部摩擦角 φ＝0°，1.39t/m^3）であるので裏込め土斜面の安定性を円弧スベリ解析により検討した結果，最小の安全率 Fs は，Fs＝1.63＞1.2 であった．これより，裏込土の土質は粘性土であることから自立性が見込める上，解析結果より斜面が安定していることから擁壁にかかる土圧は考慮しない．

したがって，ジオポリマー擁壁工の主な目的はクリーク水による洗掘防止となる．

1.3.5　試験施工および結果

試験施工は佐賀県神埼市千代田町峰村で実施した．

(1) ジオポリマーの材料内訳

ジオポリマーの構成材料および配合を**表 1.3.2** に示す．

表 1.3.2　配合　（単位：ton）

材料名	フライアッシュ	メタ珪酸ソーダ	水	アースロック液
質量	7.00	0.07	3.50	0.07

(2) 試験施工（練混ぜおよび打設）手順

容量 600L のミキサを使用し，１バッチ 500L を練る．したがって，総バッチ数は 5.76m^3/0.5m^3＝11.52 より 12 とした．１バッチ当たり各材料の混合量は，フライアッシュ：560.0kg，メタ珪酸ソーダ粉末：5.6kg，水：270.0 kg，アースロック液：5.6kg である．

以下の手順で練混ぜおよび打設を行った．

① ミキサへ水を 270kg 入れる．
② フライアッシュとメタ珪酸ソーダ粉末を投入し撹絆する（4～5 分程度）．
③ ミキサの回転を止め，アースロック液を加えて約 1 分撹絆する．さらに，ミキサの運転を一時止め，流動性をチェックする．流動性が十分でないと判断された場合は残りの水 10kg を加えて約 1 分撹絆する．
④ バックホーバケットにて型枠内へ投入する．
⑤ 型枠内に隙間なくジオポリマーが流動しているか確認し，行き渡っていない場合は敷き均す．
⑥ 適宜，所要の個数の圧縮試験用のサンプルを採取する．

脱枠および事後処理は以下のように行った．

① 脱枠はジオポリマー打設後 7 日目に行う．
② 不同収縮沈下や亀裂などの補修整形処理を行う．
③ 採取サンプルの材齢 14 日及び 28 日強度を測定する．
④ 定期的に擁壁表面，特にクリーク水面付近を観察する．

(3) 試験施工方法および施工結果の概要

今回，試験施工(**写真 1.3.1**)を行った結果，擁壁端部のクラックと天端の沈下が見られた．この原因としては，以下の要因が挙げられる．

① ジオポリマーの流動性が高かったため，バイブレータをかけなかったこと

② ジオポリマーの打設を構造物の中央部だけで行ったことから，水分を多く含んだジオポリマーが端部に流れ込み，その水分が蒸発したこと

③ 打設後のコテ仕上げ

なお，本ジオポリマーの作製に当っては重金属安定化剤としてアースロック液を利用したが，ジオポリマーの化学組成検査によれば，全ての重金属成分は環境基準以下であったことを付記する．

写真 1.3.1　施工後の状況

1.4　結論

本研究より得られた成果をまとめると以下のようである．

① 苅田発電所産フライアッシュをベースとし，珪酸ソーダと水を加えて作製したジオポリマーの一軸圧縮強さは，メタ珪酸ソーダ粉末および珪酸ソーダ１号粉末をフライアッシュ重量比で１%混合した場合，いずれも材齢 t＝28 日で 8MPa が見込める．

② 現場打ちのジオポリマー擁壁の脱枠は１週間後で可能である．

参考文献

1) 甲本達也，近藤文義，吉松修司，瀬戸和善，近藤信光，宮島博史：フライアッシュ・ベース・ジオポリマーを用いた水路斜面保護擁壁の設計・施工例，地盤環境および防災における地域資源の活用に関するシンポジウム論文集，pp. 49-54，2010. 10

（執筆者　合田　寛基）

施工事例１

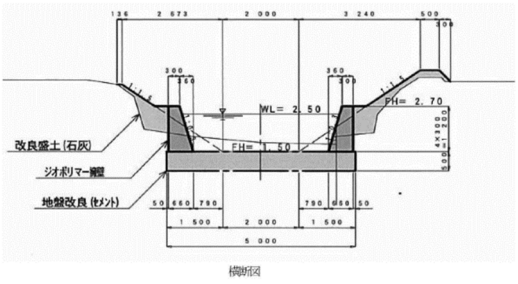
<table>
<tr><td>施工場所</td><td colspan="5">佐賀県</td></tr>
<tr><td>適用箇所</td><td colspan="5">農業農村整備事業におけるクリークの擁壁(クリーク斜面保護工法)　※現場打込み</td></tr>
<tr><td>施工年</td><td colspan="5">2009 年</td></tr>
<tr><td>施工目的</td><td colspan="5">実施工,　　~~試験施工~~,　　~~その他~~</td></tr>
<tr><td>概要</td><td colspan="5">農業クリークを対象とした木柵工に代わる高耐久性の斜面保護新工法として，ジオポリマーが適用された．材料単価の低いメタ珪酸ソーダを使用した現場打ちジオポリマーペースト製擁壁が施工された．施工性や一軸圧縮強度等に関する予備試験にもとづき，フライアッシュ（FA)，配合，施工方法が選定された．重金属溶出抑制対策として，アースロック液（ER）が使用された．
 

図 1　擁壁断面図

写真 1　完成時(2009 年)</td></tr>
<tr><td>使用材料</td><td colspan="5">フライアッシュⅡ種，メタケイ酸ソーダ（粉末)，水，アースロック液</td></tr>
<tr><td rowspan="3">配合</td><td>質量%</td><td colspan="4">単位質量（kg/m^3)</td></tr>
<tr><td>GPS/P</td><td>フライアッシュ
FA</td><td>水
W</td><td>メタ珪酸ソーダ粉末
MSS</td><td>アースロック液
ER</td></tr>
<tr><td>49</td><td>1120</td><td>540</td><td>11.2</td><td>11.2</td></tr>
<tr><td>製造方法</td><td colspan="5">500L を 1 バッチとする現場打ちペーストを製作
(1)ミキサへ水を全量投入
(2)FA と MSS を全量投入し，5 分間程度撹拌
(3)ミキサの回転を一旦止め，ER 全量を投入．1 分間撹拌し，流動性を確認
(4)ミキサから排出し，バックホーバケットにて型枠に打ち込み
(5)敷均しを行い，圧縮強度試験用サンプルを採取
(6)打込み後 7 日目に脱枠</td></tr>
<tr><td>公開資料</td><td colspan="5">甲本達也ら：フライアッシュ・ベース・ジオポリマーを用いた水路斜面保護擁壁の設計・施工例，地盤環境および防災における地域資源の活用に関するシンポジウム，pp.49-54，2010</td></tr>
<tr><td>現状</td><td colspan="5">試験施工後の定期観察より，擁壁端部のクラックと天端の沈下がみられた．
原因として，
①ジオポリマーの流動性が高くバイブレータを使用しなかった
②打込み箇所が擁壁中央に偏り，水分の多いジオポリマーが端部に流れ込んだ後，水分が蒸発した
③打込み後にコテ仕上げを実施しなかった
等が挙げられる．重金属成分を環境基準以下に抑制されている．</td></tr>
<tr><td>工夫した点</td><td colspan="5">情報なし</td></tr>
</table>

２．温泉地域の国道の境界ブロックへの適用

2.1　はじめに

大分県の明礬温泉の源泉は，**表 2.1.1** に示すような強酸性の温泉が噴出しており，**写真 2.1.1** に示すようにコンクリートの劣化が激しい．

そこで，酸に強いジオポリマーコンクリート製のブロックが，国道の境界ブロックに採用された．以下では，採用された境界ブロックの概要について述べる．

表 2.1.1　源泉の分析結果

測　定　項　目	測　定　値
pH 値	2.4
水素イオン	4.5mg/kg
ナトリウムイオン	26.2mg/kg
カルシウムイオン	19.8mg/kg
アルミニウムイオン	5.1mg/kg
硫酸イオン	364.5mg/kg

（a）境界ブロック　　（b）U 字溝蓋

写真 2.1.1　コンクリートの劣化状況

2.2　材料および配合

使用材料は**表 2.2.1** に示すように，アルカリ溶液は市販のジオポリマー用の水ガラス系溶液が使用されている（繁和産業）．市販品の水ガラス系溶液を使用した理由は，JIS の水ガラスに比べジオポリマー用の市販のアルカリ溶液の方が性能的に優れていたためである．活性フィラーには，フライアッシュⅠ種品と 4,000 ブレーンクラスの石膏なしの高炉スラグ微粉末が使用されている．

表 2.2.2 には，配合表を示す．採用されたジオポリマーコンクリートはフライアッシュベースであるが，強度確保のため，フライアッシュの質量に対して 20%の高炉スラグ微粉末が置換されている．

表 2.2.1　使用材料

項　目	使　用　材　料
アルカリ溶液	水ガラス系（密度：1.39g/cm^3），市販品
活性フィラー	(a) フライアッシュⅠ種（密度：2.36 g/cm^3，比表面積：5,327cm^2/g) (b) 高炉スラグ微粉末（密度：2.91 g/cm^3，比表面積：4,180 cm^2/g) ＊石膏なし
粗骨材	香川県仲多度郡産砕石（最大寸法：20mm，密度：2.61 g/cm^3)
細骨材	中国産硅砂（密度：2.6g/cm^3)

表 2.2.2　配合表

単位質量（kg/m^3)				
アルカリ溶液	フライアッシュ	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材
235	418	104	624	935

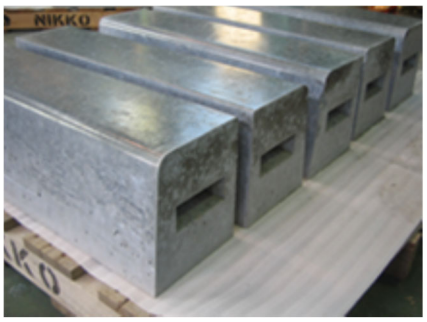
2.3　製造方法

製造では，100L の強制二軸ミキサを用いて，60L の練混ぜを行っている．練混ぜ手順は，セメントコンクリート同様に，活性フィラーおよび骨材をミキサに投入して空練りを行い，その後，**写真 2.3.1(a)**に示すようにアルカリ溶液を投入して本練りを行っている．

練混ぜ完了後，型枠にジオポリマーコンクリートを打設して，テーブルバイブレーターで締固めを行っている．その後，**写真 2.3.1(b)**に示すようにコテ仕上げを行い，蒸気養生を行っている．なお，脱型後のジオポリマーコンクリート製ブロックを**写真 2.3.1(c)**に示す．

(a) アルカリ溶液投入

(b)仕上げ



(c)ジオポリマー製ブロック

写真 2.3.1　製造状況

2.4　品質試験

製造されたジオポリマーコンクリート製ブロックの品質確認試験結果を**表 2.4.1** 示す.**表 2.4.1** のように，製造したジオポリマーコンクリート製ブロックは，JIS の規格値をすべて満足し，品質上問題がないことを確認している．

表 2.4.1　品質試験結果

品　種			ジオポリマー製歩車道境界ブロック　片面B　基本		
製造日			平成27年2月20日		
試験日			平成27年2月27日		
材　齢			7日		
番　号			1	2	規格値
外　観			良	良	良
形　状			良	良	良
寸法	長さ	lmm	600	601	600 ±3
	上面幅	amm	180	180	180 ±2
	下面幅	bmm	205	204	205 ±3
	高さ	hmm	250	251	250 ±3
曲げ強さ荷重	スパン	mm	520	520	520
	荷重	kN	49.8	61.5	40以上

2.5　施工後の状況

施工後の状況を，**写真 2.5.1** に示す．ジオポリマーコンクリート製ブロックの施工本数は 128 本，施工延長は約 80m となっている（2022 年 1 月時点）．

写真 2.5.1　施工後の状況

参考文献

1)　原田耕司，一宮一夫，合田寛基，津郷俊二，池田攻：耐酸性に優れた低炭素型新材料「ジオポリマー」の開発と施工実績について，平成 27 年度土木学会西部支部技術発表会概要集，pp. 1-6，2015. 11

2)　原田耕司，吉田卓生，合田寛基，一宮一夫，津郷俊二：低炭素型新材料「ジオポリマー」の耐久性と白華対策について，平成 28 年度土木学会西部支部技術発表会概要集，pp. 13-18，2016. 11

（執筆者：原田　耕司）

施工事例２

<table>
<tr><td>施工場所</td><td colspan="6">大分県明礬温泉</td></tr>
<tr><td>適用箇所</td><td colspan="6">国道沿いの歩車道境界ブロック　※二次製品（境界ブロック）</td></tr>
<tr><td>施工年</td><td colspan="6">2015 年，2016 年</td></tr>
<tr><td>施工目的</td><td colspan="6">~~実施工~~，　　試験施工，　　~~その他~~</td></tr>
<tr><td>概要</td><td colspan="6">温泉の酸によるコンクリートの劣化が顕著であり，その対策としてジオポリマーコンクリート製のブロックが施工された．

写真１　施工前

写真２　施工後</td></tr>
<tr><td>使用材料</td><td colspan="6">・GP 溶液（水ガラス系，市販品）
・フライアッシュⅠ種品
・高炉スラグ微粉末（ブレーン値：4,000，石膏なし）
・珪砂（中国産）
・粗骨材（香川県仲多郡産）</td></tr>
<tr><td rowspan="3">配合</td><td>wt%</td><td colspan="5">単位質量（kg/m³）</td></tr>
<tr><td>アルカリ溶液
／活性フィラー</td><td>アルカリ溶液</td><td>フライアッシュ</td><td>高炉スラグ
微粉末</td><td>細骨材</td><td>粗骨材</td></tr>
<tr><td>45</td><td>235</td><td>418</td><td>104</td><td>624</td><td>935</td></tr>
<tr><td>製造方法</td><td colspan="6">・100L 強制二軸ミキサ
・100L パン型ミキサ
・空練り（30 秒）⇒本練り（120 秒）

写真３　練混ぜ状況</td></tr>
<tr><td>公開資料</td><td colspan="6">・参考資料：2015 年度および 2016 年度土木学会西部支部技術発表会</td></tr>
<tr><td>現状</td><td colspan="6">・一部，表面劣化している．</td></tr>
<tr><td>工夫した点</td><td colspan="6">・我が国初のブロック採用であったので，納期，品質を満足するよう工夫した．</td></tr>
</table>

３．ジオポリマーPC まくらぎの営業線への試験敷設[1), 2)]

3.1 はじめに

鉄道における閑散線区では木まくらぎが使用されている事例が多いが，その交換による木材消費が問題となっている．そこで，省資源化に加えて，軌道の安全性向上や列車速度の向上の観点から，プレストレストコンクリート(PC)まくらぎへの交換が進められている．また，近年，鉄道における CO_2 削減・環境負荷低減の観点から，種々の副産物の鉄道材料への積極的な利用が進められている．そこで，強酸性の温泉水や鉱床を伝わって湧き出る地下水などの影響で，一般的な PC まくらぎの導入が難しい箇所に試験的にジオポリマーポストテンション PC まくらぎを設置した．また，他のまくらぎ敷設例としては鳥取県「リサイクル技術・製品実用化事業」の補助金を受け，米子高専，松江高専，島根大学，鉄道総研が連携して，智頭急行に木質バイオマス灰を添加したジオポリマーPC まくらぎを試験敷設した事例がある．本報告では，配合などが公開されている前記の事例に関して簡単に紹介する．

3.2 配合例

酸性水が生じている箇所に敷設したジオポリマーPC まくらぎの使用材料を**表 3.2.1** に，配合を**表 3.2.2** に示す．作製方法は，水ガラスの代わりにシリカフューム（セメント混和材用）をケイ素成分として使用することを特徴とする「ケイ素成分粉体添加その場溶解法」(溶解法と略す）である．この手法では，固体として加えるがケイ素成分を，溶液におけるケイ素／アルカリのモル比(Si/A)の配合として換算しており，種々の配合，雰囲気温度で可使時間が長くとれることが特徴である．そのため，水ガラスを使用した場合，作製が困難な配合においても，特殊な混和剤を使用せずに作製が可能である．なお，活性フィラーには，フライアッシュⅠ種品と 4,000 ブレーンクラスの石膏無添加高炉スラグ微粉末を使用した．

表 3.2.1　使用材料

項目	材料	規格，性質,成分など
フライアッシュ	FA	Ⅰ種（JIS A 6201）
高炉スラグ微粉末	BFS	ブレーン値 4000cm2/g(JIS A 6206)
NaOH 溶液	AS	フレーク状 NaOH+水
SiO_2 微粉末	SF	シリカフューム(JIS A 6207)
流動化・遅延剤	SP	グルコン酸ナトリウム
細骨材	S	表面乾燥飽水状態*
粗骨材	G	表面乾燥飽水状態*

表 3.2.2　配合表

FA	BFS	AS		SF	S	G	SP	A/W	Si/A	W/P	単位水量
		NaOH	水								
kg/m^3								モル比		体積比	kg/m^3
289.2	234.4	84.3	173.8	24.6	736.1	847.9	9.7	0.218	0.200	0.867	173.8

A/W：アルカリ/水比，Si/A：ケイ素/アルカリ比，W/P：水/粉体（FA＋BFS）比

3.3　製造方法

製造では，強制二軸ミキサーを用いて練混ぜを行っている．練混ぜ手順は，セメントコンクリート同様に，活性フィラー，シリカフュームおよび骨材をミキサーに投入して空練りを行い，その後，NaOH 溶液を投入して本練りを行っている．

練混ぜ完了後，まくらぎ型枠にフレッシュジオポリマーコンクリートを打ち込み，バイブレーターで締固めを行っている．その後，蒸気養生を行った．脱型後のジオポリマーまくらぎの写真を**写真 3.3.1** に示す．

写真 3.3.1　ポストテンション PC まくらぎ

3.4　品質試験

本ジオポリマーPC まくらぎに使用したジオポリマーコンクリートの強度試験の結果を**表 3.4.1** に示す．

表 3.4.1　各種強度，静弾性係数

	圧縮強度(N/mm^2)	割裂引張強度(N/mm^2)	静弾性係数(kN/mm^2)
ジオポリマー	81.7	6.02	35.9
試験方法	JIS A 1108	JIS A 1113	JIS A 1149

作製したまくらぎに対して営業線に敷設するまくらぎの規格を満足しているか品質確認試験を行っている．**写真 3.4.1** に例としてレール位置断面の曲げ試験，**写真 3.4.2** にショルダー部の引抜試験の様子を記す．

写真 3.4.1　レール位置断面の曲げ試験

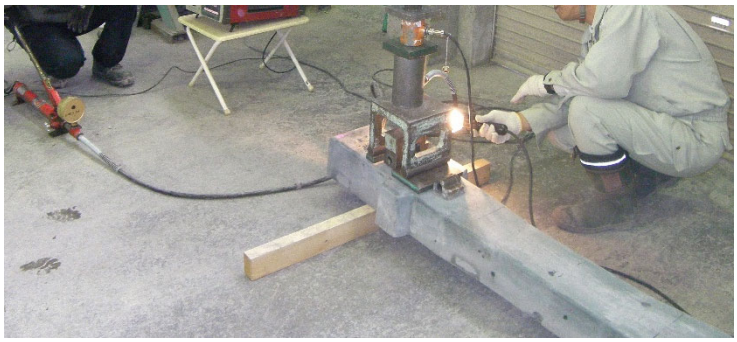


写真 3.4.2　ショルダー引抜試験

表 3.4.2 に作製したジオポリマーPC まくらぎの品質確認試験結果の一覧を示す．製作した GP-PC まくらぎは，各試験とも保証荷重でひび割れは認められず，破壊荷重も基準値を上回り，その耐荷力が要求性能を満たすことを確認した．

表 3.4.2　ジオポリマーまくらぎの性能確認試験

	曲げ試験(kN)				埋込栓引抜試験(kN)	
	レール位置断面		まくらぎ中央断面			
	保証荷重	破壊荷重	保証荷重	破壊荷重	引抜保証荷重	引抜抜破壊荷重
基準値	50.5	97.6	53.0	115.9	30	50
作製まくらぎ	ひび割れ無し (108)	166	ひび割れ無し (84)	164	ひび割れ無し	156

(　)数値はひび割れが発生したときの数値を示す

3.5　施工および施工後の状況

施工時および施工後の敷設まくらぎの様子を**写真 3.5.1** に示す．敷設したまくらぎは，6 年経過しているが特に変状は報告されていない．

(a)　　(b)

写真 3.5.1　施工時(a)および施工後 3 ヶ月経過時の (b)敷設まくらぎの様子

参考文献

3)　大木信洋，束原実，佐藤隆恒，上原元樹：ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの試作，土木学会第 71 回年次学術講演会講演要旨，pp. 411-412，2016

4)　上原元樹，佐藤隆恒，束原実，大木信洋：ジオポリマーPC まくらぎの営業線への試験敷設，土木学会第 72 回年次学術講演会講演要旨，pp. 167-168，2018

（執筆者：上原　元樹）

施工事例３

<table>
<tr><td>施工場所</td><td colspan="10">鉄道営業線</td></tr>
<tr><td>適用箇所</td><td colspan="10">酸性の漏水が生じていているトンネル内　※二次製品（ポストテンションまくらぎ）</td></tr>
<tr><td>施工年</td><td colspan="10">2017 年</td></tr>
<tr><td>施工目的</td><td colspan="10">~~実施工~~,　　試験施工,　　~~その他~~</td></tr>
<tr><td>概要</td><td colspan="10">漏水が生じていて酸により腐食環境の営業線トンネル内に試験敷設した．当該ジオポリマーコンクリートは，物質移動抵抗性の高い配合とするため A/W 比を高目に設定した．

写真１　施工前

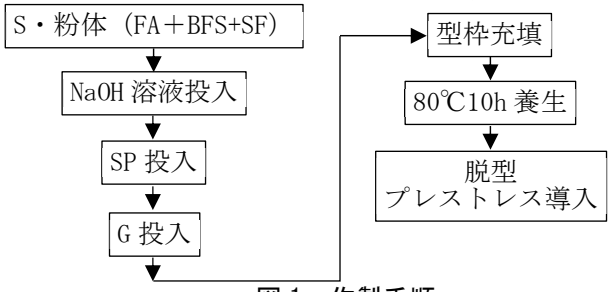
写真２　施工後</td></tr>
<tr><td>使用材料</td><td colspan="10">・NaOH（市販粒状試薬）
・フライアッシュⅠ種品（FA）
・高炉スラグ微粉末（BFS）（ブレーン値：4,000，石膏なし）
・シリカフューム（SF）
・グルコン酸 Na（SP）（工業用用途品）
・細骨材（S）（硬質砂岩砕砂　福島県東白川郡産）
・粗骨材（G）（硬質砂岩砕砂　福島県東白川郡産）</td></tr>
<tr><td rowspan="3">配合</td><td>FA</td><td>BFS</td><td>NaOH</td><td>SF</td><td>S</td><td>G</td><td>SP</td><td>A/W</td><td>Si/A</td><td>W/P</td><td>単位水量</td></tr>
<tr><td colspan="7">kg/m³</td><td colspan="2">モル比</td><td>体積比</td><td>kg/m³</td></tr>
<tr><td>289.2</td><td>234.4</td><td>258.1</td><td>24.6</td><td>736.1</td><td>847.9</td><td>9.7</td><td>0.218</td><td>0.200</td><td>0.867</td><td>173.8</td></tr>
<tr><td colspan="11">NaOH:32.7%水溶液，A/W:アルカリ/水比，Si/A:ケイ素/アルカリ比，W/P:水/粉体(FA＋BFS)比</td></tr>
<tr><td>製造方法</td><td colspan="10">ケイ素成分粉体添加その場溶解法で作製
 

図１　作製手順</td></tr>
<tr><td>公開資料</td><td colspan="10">・大木信洋，束原実，佐藤隆恒，上原元樹：ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの試作，土木学会第 71 回年次学術講演会講演要旨，pp.411-412，2016
・上原元樹，佐藤隆恒，束原実，大木信洋：ジオポリマーPC まくらぎの営業線への試験敷設，土木学会第 72 回年次学術講演会講演要旨，pp.167-168，2018</td></tr>
<tr><td>現状</td><td colspan="10">特に問題は生じておらず，そのまま敷設中である．</td></tr>
<tr><td>工夫した点</td><td colspan="10">酸性の漏水が生じており，腐食環境であったため，物質移動抵抗性の非常に高い（劣化要因が浸透しない）配合とするため，酸に対する抵抗性を確かめながら，高炉スラグ微粉末量の多い配合，アルカリ/水比の高い配合で作製した．この配合で，十分な可使時間が得られるように，作製方法は水ガラスを使用しない「ケイ素成分粉体添加その場溶解法」とした．</td></tr>
</table>

４．機械架台への適用

4.1 はじめに

環境保全と共に，資源小国である我が国においては，産業副産物の 3R 活動（発生抑制・再利用・再生利用）の推進は極めて重要な課題である．近年，新たな産業副産物の有効利用方法としてジオポリマーが注目されている．ジオポリマーは，フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの非晶質粉体とアルカリ溶液を混合することで，ゼオライト類似の非晶質ポリマーを生じて硬化する現象を利用している．

ジオポリマーは，養生条件をコントロールすることで，短時間で高い強度を得ることができ，かつ耐薬品性に優れる材料である．一方，フレッシュ性状として高い粘性を示し，可使時間も比較的短いことから，施工段階では，粘性に対する施工性の改善や運搬（打込み）の効率化が大きな課題となっている．

本稿では，ポンプ圧送およびハンドリング性能等の施工性能を考慮したジオポリマーモルタルによる施工事例について報告する．

4.2 材料および配合

事前検討として，可使時間を 60 分以上確保可能な配合を選定すると共に，フレッシュ性状の品質管理目標として，スランプフロー70cm 以上，空気量 5.0±2.0%，材料分離の有無を目視により確認した．使用材料を**表 4.2.1** に示す．粉体には，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末を用いた．粉体に対する高炉スラグ微粉末の置換率は 20wt%とした．アルカリ溶液には，水酸化ナトリウム，水酸化カリウム，水ガラス，シリカ微粉末，水，ジオポリマー用混和剤をそれぞれ混合して用いた．また，細骨材には珪砂を用いた．配合を**表 4.2.2** に示す．

表 4.2.1　使用材料

項目	記号	材料
粉体 (P)	FA	フライアッシュⅠ種品 密度：2.42g/cm^3　ブレーン値 5,740cm^2/g
	BS	高炉スラグ微粉末 密度：2.91g/cm^3　ブレーン値 4,240cm^2/g
アルカリ溶液	GPW	Na 型：水酸化ナトリウム，シリカ微粉末，水，混和剤を混合 密度：1.33g/cm^3 K 型　：水酸化カリウム，水ガラス，水，混和剤を混合 密度：1.42g/cm^3
細骨材	S	珪砂１　密度：2.63g/cm^3 珪砂２　密度：2.63g/cm^3

表 4.2.2　配合表

種類	GPW/P (%)	P/S	単位量（kg/m^3）				
			GPW	P		S	Ad
				FA	BS		
Na 型	55.0	0.64	372	541	135	1052	P×2%
K 型	45.0	0.71	341	606	152	1072	P×2%

4.3　現場概要

茨城県取手市の前田建設工業(株)ＩＣＩラボ（新技術研究所）の総合実験棟と構造実験棟の間に位置する機械架台の一部に現場打ちのジオポリマーを適用した．ジオポリマーを適用した機械架台は，実験棟から排出されるアルカリ水の pH 調整用の薬品タンクおよびタンクから薬品を送るためのポンプ架台であり，耐薬品性が要求される構造物となる.そのため,機械架台の基礎部を一般的なコンクリート(設計基準強度 24N/mm^2)で施工し，表層 100mm をジオポリマーで増し厚施工することにより，薬品から保護する設計とした．なお，ジオポリマーの管理強度は，基礎部のコンクリートと同様に 24N/mm^2 以上とし，アルカリ溶液の配合が異なる 2 種類のジオポリマー（Na 型および K 型）を製造し，打込みを行った（**写真 4.3.1** 参照）.

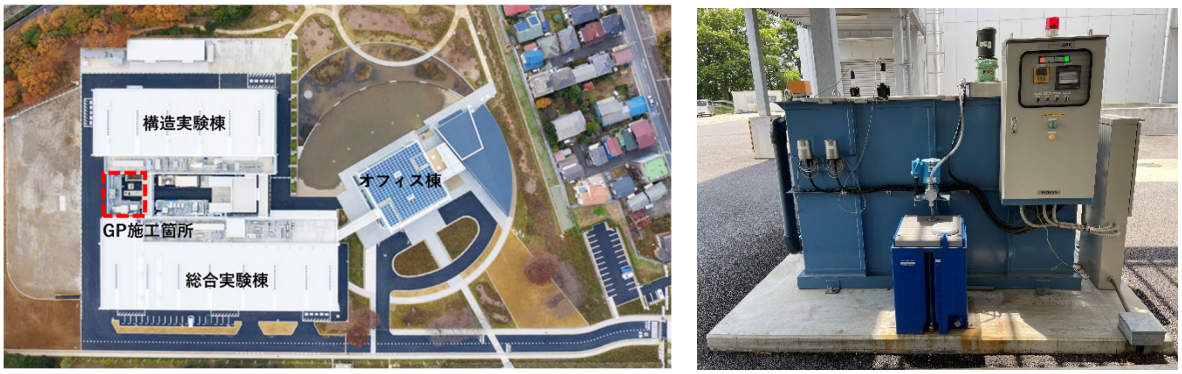


写真 4.3.1　現場概要（左：ＩＣＩラボ全景，右：pH 調整槽機械架台）

4.4　現場施工

ジオポリマーは，製造段階でのフレッシュ性状（流動性・可使時間）のコントロールに加え，施工段階では，高い粘性に対する施工性の改善や運搬（打込み）の効率化が大きな課題となっている．そこで建設現場内にジオポリマー製造用プラントを設置し,製造ヤードから施工箇所までの区間を圧送して打込みを行った.

ジオポリマーの製造は，ＩＣＩラボの建設現場内に容量 100L の強制二軸ミキサ 2 台を併設したジオポリマー専用の簡易製造プラントを設置し，練混ぜを行った．簡易製造プラントを**写真 4.4.1** に示す．製造は，2 台の強制二軸ミキサを交互に使用して練混ぜを行い，ポンプへ連続的にジオポリマーの供給を行っている.

圧送距離は水平換算距離で約 30m，ポンプは定置式のスクイーズポンプを用いた．施工当時（2018 年），ジオポリマーのポンプ施工による打込みは，著者らの知る限り国内では報告がなく，初めての適用事例と考えられる（**写真 4.4.2** 参照）．本施工では，圧送前後におけるジオポリマーのフレッシュ性状（Na 型の圧送前のスランプフロー：87.6cm×84.9cm，圧送後のスランプフロー：84.6cm×82.9cm）および圧縮強度（Na 型の圧送前：51.9N/mm^2，圧送後：51.9N/mm^2）に大きな差はなく，打込み後の仕上げ作業も順調に実施することができた（**写真 4.4.3** および**写真 4.4.4** 参照）.

写真 4.4.1　ジオポリマー簡易製造プラント

写真 4.4.2　ジオポリマー打込み状況

写真 4.4.3　フレッシュ試験状

写真 4.4.4　ジオポリマー仕上げ状況

参考文献

1)　太田健司，南浩輔，梶田秀幸，舟橋政司：現場打ちジオポリマーのポンプによる施工事例，前田技術研究所報，Vol.59，2018

2)　南浩輔，太田健司，舟橋政司，梶田秀幸：低炭素・資源循環型社会における建設材料としてのジオポリマー，日本コンクリート工学会，コンクリート工学 2019 年 1 月特集号　特集「混和材料の最前線」，2019

（執筆者：南　浩輔）

施工事例４

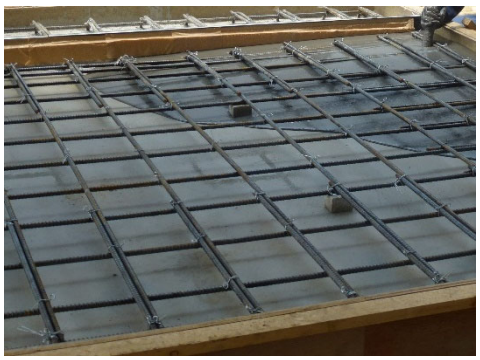
<table>
<tr><td>施工場所</td><td colspan="7">茨城県取手市</td></tr>
<tr><td>適用箇所</td><td colspan="7">機械架台（現場打設 ポンプ圧送）</td></tr>
<tr><td>施工年</td><td colspan="7">2018 年</td></tr>
<tr><td>施工目的</td><td colspan="7">実施工，　　~~試験施工~~，　　~~その他~~</td></tr>
<tr><td>概要</td><td colspan="7"> 
写真１　打込み

写真２　施工後</td></tr>
<tr><td>使用材料</td><td colspan="7">・フライアッシュⅠ種品
・高炉スラグ微粉末（4000 ブレーン，石膏なし）
・水酸化ナトリウム（市販品）
・水酸化カリウム（市販品）
・水ガラス（市販品）
・シリカ微粉末（市販品）
・珪砂（市販品）
・ジオポリマー用混和剤</td></tr>
<tr><td rowspan="3">配合</td><td>wt%</td><td>－</td><td colspan="5">単位質量（kg/m³）</td></tr>
<tr><td>GPW/P</td><td>P/S</td><td>GPW</td><td>FA</td><td>BS</td><td>S</td><td>Ad</td></tr>
<tr><td>55.0</td><td>0.64</td><td>372</td><td>541</td><td>135</td><td>1052</td><td>P×2%</td></tr>
<tr><td>製造方法</td><td colspan="7">・簡易製造プラント（強制二軸ミキサ 100L×2 台）
※交互製造による連続供給
・空練り（30 秒）→本練り（150 秒）
・ポンプ圧送（定置式スクイーズポンプ）

写真３　ジオポリマー簡易製造プラント</td></tr>
<tr><td>公開資料</td><td colspan="7">・現場打ちジオポリマーのポンプによる施工事例，前田技術研究所報，2018 年
・低炭素・資源循環型社会における建設材料としてのジオポリマー，日本コンクリート工学会，コンクリート工学 2019 年 1 月特集号　特集「混和材料の最前線」，2019 年</td></tr>
<tr><td>現状</td><td colspan="7">＜経過観察：施工後 4 年時点＞
・経年劣化に伴うひび割れは確認されていない（施工初期および後施工アンカー施工時にひび割れが発生）
・内部鉄筋の腐食に起因するような錆汁は確認されていない
・ジオポリマー機械架台に希硫酸の接触した跡が確認できるが，溶解等の劣化は確認されていない
・後施工アンカーの抜け（付着の低下）等は確認されていない</td></tr>
<tr><td>工夫した点</td><td colspan="7">・ジオポリマー配合設計手法（特許第 6284388 号）による品質確保
・ジオポリマー専用の混和剤（特許第 6694848 号）による施工性能の向上</td></tr>
</table>

５．Ｌ字型ブロックおよび下水道施設用片斜マンホールへの適用

5.1　はじめに

電力中央研究所と中川ヒューム管工業で共同開発した AAM（通称：EeTAFCON）は水ガラスを使用せず，NaOH を刺激剤として使用した材料である．可使時間を長く設定することが可能であり，製品工場で通常の二次製品を製造する傍らで同じミキサー，型枠，締固め装置，そして蒸気養生槽を使用して様々な大きさ，形状の実規模資材を試作してきた.本報告では電力中央研究所,我孫子地区の新本館周囲に配するＬ字型ブロック，および茨城県内の下水道施設に設置した片斜マンホールを紹介する．

5.2　材料および配合

使用材料は水酸化ナトリウム，フライアッシュと高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを混合した EeTAFCON 用粉体，通常の二次製品製造で用いる細骨材と粗骨材，水である．水酸化ナトリウムは溶液として専用タンクに貯蔵しており，必要量を専用計量器を介してミキサーに直接注入する形式で工場プラントに導入した．フライアッシュは JIS A 6201 に示されるⅢ種相当品であり，工場の粉体用サイロに投入する前に高炉スラグ微粉末等他の粉体材料と事前混合することで EeTAFCON 用粉体材料とした．AE 剤減水剤は市販品を用いた．

5.3　混練，打設および養生

施工実施例に示す配合で各材料をミキサーに投入する順番は一般的なセメントコンクリート混練時と同様であるが，セメントの代わりに EeTAFCON 用粉体，そして水の代わりに水酸化ナトリウム溶液と加水用の水を用いる．

混練時間は 5 分程度であり，十分な混練状態となることをモニター上で確認する．そして，ホッパーに落とした混練物を所定の作業場所まで移動させ，直ちに混練物を型枠に投入し，振動台上で締め固める．混練性状はフライアッシュを用いた高粉体系の中流動コンクリート（正式名称：締固めを要する高流動コンクリート）に似ており，充填性は良好である．

表面成型を施した後に 24 時間程度，環境温度下で前養生を施し，蒸気養生ピット内で 80～85℃の蒸気養生を 6 時間施し，自然冷却で十分に冷やされたことを確認して脱型する．脱型後の強度発現が認められない点は通常のセメントコンクリートを用いた二次製品と異なる．

参考文献

5)　山本武志，菊地道生，大塚拓：NaOH 刺激による FA-GGBS-SF 混合型ジオポリマーにおける反応相の物理化学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.40 No.1，pp.1869-1874，2018

6)　菊地道生，山本武志，大塚拓：結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38 No.1，pp.2283-2288，2016

（執筆者：山本　武志）

施工事例５

<table>
<tr><td>施工場所</td><td colspan="6">電力中央研究所／茨城県内下水道施設修繕地点</td></tr>
<tr><td>適用箇所</td><td colspan="6">車歩道分離Ｌ字型ブロック／片斜マンホール　※共に二次製品</td></tr>
<tr><td>施工年</td><td colspan="6">2020 年／2019 年</td></tr>
<tr><td>施工目的</td><td colspan="6">実施工</td></tr>
<tr><td>概要</td><td colspan="6">L 字型ブロックは経年的な表面劣化とバス等が乗り上げることによる摩耗変状を観察するため，そして片斜マンホールは微生物活動による硫酸浸食に対する抵抗性を観察するために設置した．

写真１　Ｌ字型ブロック

写真２　片斜マンホール</td></tr>
<tr><td>使用材料</td><td colspan="6">・水酸化ナトリウム溶液（市販品）
・フライアッシュ（JIS A 6201_Ⅲ種）
・高炉スラグ微粉末（ブレーン値：4,000，石膏なし）
・シリカヒューム（ノルウエー産）
・細骨材（中川ヒューム管工業郡山工場で通常使用）
・粗骨材（中川ヒューム管工業郡山工場で通常使用）</td></tr>
<tr><td rowspan="3">配合</td><td>wt%</td><td colspan="5">単位質量（kg/m³）</td></tr>
<tr><td>アルカリ溶液
／活性フィラー</td><td>アルカリ溶液</td><td>EeTAFCON 用粉体</td><td>細骨材</td><td>粗骨材</td><td>AE 減水剤+AE 剤</td></tr>
<tr><td>40</td><td>219</td><td>550</td><td>660</td><td>840</td><td>14</td></tr>
<tr><td>製造方法</td><td colspan="6">・500L 強制二軸ミキサ
・スランプフロー50cm 程度
・振動テーブルによる締固め
・打設後の前養生（環境温度）
・蒸気養生（80～85℃）</td></tr>
<tr><td>公開資料</td><td colspan="6">・参考資料：2016 年，2018 年コンクリート工学年次論文集</td></tr>
<tr><td>現状</td><td colspan="6">・L 字型ブロック：周囲に併設した通常品（セメントコンクリート製）とは異なり，初期の色調を保持，摩耗状況は通常品と同程度．
・片斜マンホール：硫酸浸食は認められず．</td></tr>
<tr><td>工夫した点</td><td colspan="6">・NaOH 溶液専用タンクと計量器のみを増設することで通常の二次製品工場においても製造を可能とする EeTAFCON 用粉体材料</td></tr>
</table>

６．高温状態に晒される鉄筋コンクリート擁壁の断面補修への適用

6.1 はじめに

ジオポリマーコンクリートは，耐熱性・耐酸性が高いこと，製造過程で発生する二酸化炭素量がセメントコンクリートに比べて少ないことを特長とする材料である．一方で，粘性が非常に高く，可使時間が短いため，コンクリートポンプ車での圧送と所要のワーカビリティを必要とする現場打ち構造物への適用は困難であった．そこで，セメントを使用しないジオポリマーの流動性と流動保持性を良好にするとともに，水と結合材の比率を低減することのできる新しいジオポリマー専用の特殊混和剤（分散剤）の利用を試みた．

本稿では，ジオポリマーを擁壁補修に適用することを目的として，常温で所要の強度発現を有し，可使時間を確保した上で，ポンプ圧送可能な配合を検討し，実構造物に適用した．

6.2 材料および配合

可使時間 2 時間以上，圧縮強度（28 日）30N/mm^2 を目標として室内試験により，配合を検討した．使用材料を**表 6.2.1** に示す．粉体には，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，シリカフュームを用いた．アルカリ溶液には，アクティベーター，特殊分散剤，水を混合して用いた．細骨材は珪砂，粗骨材は玄武岩を用いた．配合を**表 6.2.2** に示す.粉体に対する高炉スラグ微粉末の割合をパラメータとして,その割合を 30%とした．アルカリ溶液と粉体の質量比 GPW/P は 36.8%とした．耐熱仕様の場合，温度応力ひび割れに抵抗するために鋼繊維を補強材として追加した．

表 6.2.1　使用材料

項目	記号	材料
粉体 (P)	FA	フライアッシュⅡ種品 密度：2.27g/cm^3
	BS	高炉スラグ微粉末 密度：2.91g/cm^3　ブレーン値 4,100cm^2/g
	MS	シリカフューム 密度：2.20g/cm^3
アルカリ溶液	GPW	アクティベーター，分散剤，水 密度：1.16g/cm^3
鋼繊維	SF	密度 7.85g/cm^3　（φ0.55 mm，L=35mm）
細骨材	S	珪砂 密度：2.51g/cm^3
粗骨材	G	玄武岩 密度：2.82g/cm^3

表 6.2.2　配合表

GPW/P (%)	単位量 (kg/m^3)						
	GPW	P			S	G	SF
		FA	BS	MS			
36.8	184	300	150	50	800	850	40

6.3　現場概要

日本製鉄株式会社東日本製鉄所鹿島地区構内の鉄筋コンクリート擁壁補修に適用した．この擁壁は，鉱滓仮置きヤードに面しており，常に高温状態に晒され，コンクリートの熱劣化による鉄筋かぶりコンクリートの浮きや剥離剥落が顕著であった。補修範囲は，延長 24.7m×高さ 1.3m×厚さ約 0.1m（打設数量：約 3.2m^3）である．

正面図を**図 6.3.1**，断面図を**図 6.3.2** に示す．鉄筋組立状況を**写真 6.3.1** に，型枠組立状況を**写真 6.3.2** に示す．擁壁劣化部分を表面から 100mm 程度はつり除去し，鉄筋の劣化が著しい箇所については D13@200mm の配筋を復旧した後，配筋にφ6mm@150mm のワイヤーメッシュを固定した．鉄筋には防錆剤を塗布した。その後，既設擁壁面にプライマーを塗布したのち，型枠を設置した．打設口は型枠天端部に設けた．

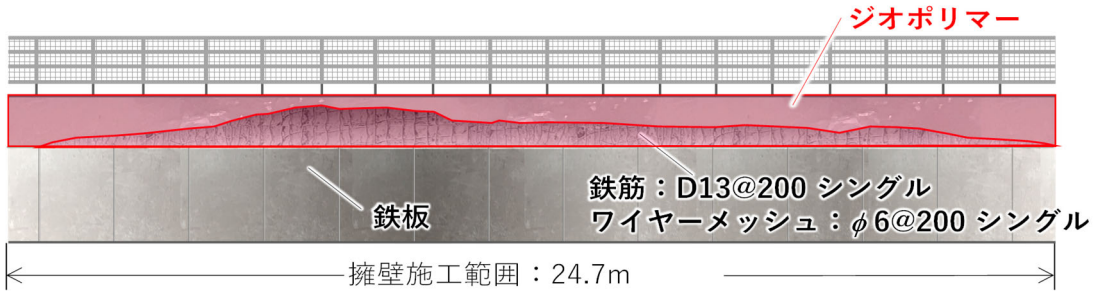


図 6.3.1　施工部正面図

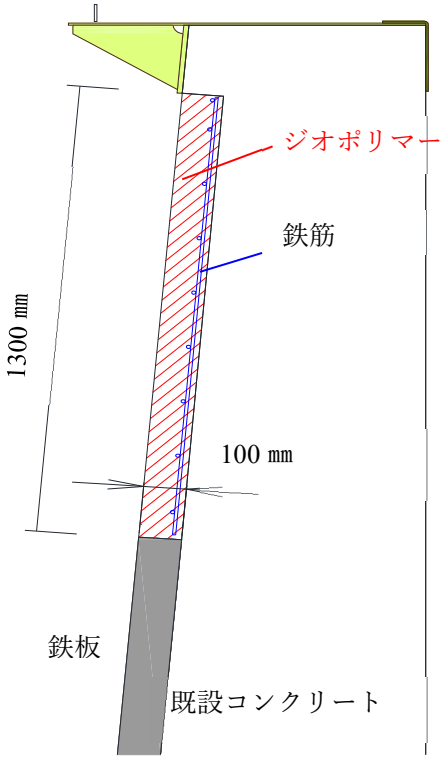


図 6.3.2　施工部断面図

写真 6.3.1　鉄筋組立

写真 6.3.2　型枠組立

6.4　現場施工

粉体と骨材は，プレミックス材（0.5m³/袋）として準備して，移動ミキサ（二構造回転式強制練，容量 1.0m³）を用い 0.5m³/回で製造した．練混ぜは，プレミックス材を入れて空練り 60 秒，アルカリ溶液を入れて 180 秒，鋼繊維を入れて 120 秒とした．ミキサーから排出後，コンクリートポンプ車で圧送した（**写真 6.4.1**）．

フローは，600mm 程度とした（**写真 6.4.2**）．各回のばらつきは±100mm 程度に収まり，施工性は良好であった．なお，打設箇所はバイブレータを入れることが困難であったため，自己充填を基本とし，型枠バイブレータを部分的に使用した．

コンクリートポンプ車の圧送による連続施工を遂行できたことに加え，使用後のポンプ車やミキサーの洗いも普通コンクリートと同様に行うことができた（**写真 6.4.3**）．

養生は現場の外気温（測定値：9.1～24.6℃）を考慮して，施工部が直接外気に触れない程度に型枠の上からシート養生をした．また，打設後 2 週間の型枠内部の温度を測定したところ 13.4～20.8℃であった．

写真 6.4.1　施工状況

写真 6.4.2　スランプフロー

写真 6.4.3　排出状況

写真 6.4.4　施工完了

（執筆者：富井　孝喜）

施工事例６

<table>
<tr><td>施工場所</td><td colspan="7">茨城県鹿島市</td></tr>
<tr><td>適用箇所</td><td colspan="7">鉄筋コンクリート擁壁（現場打設 ポンプ圧送）</td></tr>
<tr><td>施工年</td><td colspan="7">2020 年</td></tr>
<tr><td>施工目的</td><td colspan="7">実施工，　　~~試験施工~~，　　~~その他~~</td></tr>
<tr><td>概要</td><td colspan="7">
写真１　劣化部除去後

写真２　施工後</td></tr>
<tr><td>使用材料</td><td colspan="7">・アクティベーター，分散剤，水
・フライアッシュⅡ種品
・シリカフューム(市販品)
・高炉スラグ微粉末（ブレーン値：4,000，石膏なし）
・珪砂（市販品）
・粗骨材（玄武岩）
・スチールファイバー（φ0.55mm，L=35mm）</td></tr>
<tr><td rowspan="3">配合</td><td>wt%</td><td colspan="6">単位質量（kg/m³）</td></tr>
<tr><td>GPW/P</td><td>アルカリ溶液</td><td>FA</td><td>高炉スラグ</td><td>シリカフューム</td><td>細骨材</td><td>粗骨材</td></tr>
<tr><td>36.8</td><td>184</td><td>300</td><td>150</td><td>50</td><td>800</td><td>850</td></tr>
<tr><td>製造方法</td><td colspan="7">・粉体と骨材は，プレミックス袋（0.5m³/袋）
・500L 強制攪拌羽付傾動ミキサー
・空練り（60 秒）⇒本練り（120 秒）
鋼繊維投入（120 秒）
・ポンプ圧送（ピストン式ポンプ車）

写真　練混ぜ状況</td></tr>
<tr><td>公開資料</td><td colspan="7">・流動性を高めたジオポリマーコンクリートの高温環境暴露による耐熱性評価；2022 年
・流動性を高めたジオポリマーコンクリートの耐熱性評価；2021 年土木学会年講
・ジオポリマーコンクリートを用いた断面補修に関する適用検討；2021 年土木学会年講
・ジオポリマーコンクリートを用いた断面補修；2021 年土木学会土木建設技術発表会
・土木学会　2021 年度「環境賞」受賞</td></tr>
<tr><td>現状</td><td colspan="7">施工から 10 か月後観察結果
・施工時の沈降クラックが一部確認はあるが、経時によるひび割れの増加は確認できない
・コア削孔による強度の確認でも強度の低下は確認されなかった
・既設コンクリートとの付着強度は全て 1.0N/㎟²以上、平均で 1.8N/㎟²となった</td></tr>
<tr><td>工夫した点</td><td colspan="7">・自己充填性を有する高流動コンクリートとした
・温度応力を考慮して鋼繊維を混入
・GP 溶液投入者は完全防護服を着用</td></tr>
</table>

７．オーストラリアでの空港新設建設の舗装コンクリートへの適用

7.1　はじめに

2014 年に新空港として開設され，供用が開始されたオーストラリア　クイーンランド州ダーリングタウンのブリスベン ウェスト　ウェルキャンプ　エアポート(以下 BWWA)に，約 40,000m^3 のジオポリマーコンクリートが舗装コンクリートとして適用された．

Glasby らにより，この工事の詳細が報告されているので [1)]，ここではその内容を参考に，使用されたジオポリマーの特性や施工状況について取りまとめる．

7.2　ジオポリマー適用の概要

本新空港建設工事おいて，ジオポリマーコンクリートは滑走路北端の転回エリア，滑走路西側の誘導路と東側格納庫に舗装厚さ 43.5cm のジオポリマーコンクリートが施工された（**図 7.2.1**）．ジオポリマーの配合は室内試験，小規模実機施工実験を経て，2014 年 7 月より，格納庫部の舗装コンクリート実施工においてジオポリマーコンクリートの配合および施工性の確認を行った．

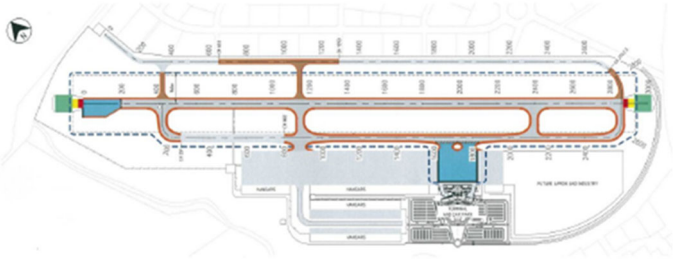


図 7.2.1　工事全体の計画および舗装工事終了後の状況 [1)]

本ジオポリマーコンクリートには，材齢 28 日における曲げ強度が平均値で 4.8MPa 以上，乾燥収縮の最大値が 450μ以下という性能が要求された．

更に，ダンプトラックでの運搬およびスリップフォームペーバでの施工に適したスランプおよびスランプ保持性が求められ，以下のように配合が決定された．

・　高炉スラグ微粉末およびフライアッシュからなる全結合材量：415kg/m^3

・　水結合材比：0.41
・　最大骨材寸法：40mm
・　化学活性剤添加量：37kg/m^3(固形)
・　ジオポリマー用減水剤により，流動性を調整する．

なお，このコンクリートの材齢 28 日での曲げ強度は 5.8MPa であり，要求性能を満足することが確認されている．

7.3　ジオポリマーコンクリートの製造および施工

ジオポリマーコンクリートは，BWWA 建設現場に設置されたコンクリート製造プラントにより製造された．このプラントは標準的なコンクリートプラントに専用の化学添加剤供給設備を取り付けたもので，タンクとポンプが一体となった全自動供給装置により計量制度を確保した．2 基の現場プラントおよびダンプトラックでの運搬により，スリップフォーム工法に求められた毎時 120m^3 のジオポリマーコンクリート供給量を達成することができた．

ジオポリマーコンクリートの施工には，通常は舗装厚さが比較的薄い場合に適用されるスリップフォームの適用した（**写真 7.3.1**）．この工法の妥当性は格納庫の実施工実験により確認されており，通常の振動締固めによる施工方法に比べ施工期間を 30%短縮することができた．

写真 7.3.1　ジオポリマーコンクリートの施工状況

このスリップフォーム工法の適用に関しては，ジオポリマーコンクリートが汎用的なセメントコンクリートと比較して，その特徴的な粘性から押出成形性に優れていたことが，施工性改善に貢献していたと考えられる．また，ジオポリマーコンクリートは，ジオポリマー用減水剤と化学活性剤の添加量を適宜調整することにより，気温 2℃から 40℃の範囲において練り混ぜから 20 分までのフレッシュ性状を確保することが可

能であった.

なお，このスリップフォームで施工された舗装ジオポリマーコンクリートの密度を，実施工部からコア抜きした試料で確認し，充填性に問題ないことも確認している.

ジオポリマーコンクリーのブリーディングが極めて少ないため,施工後急速に表面が乾燥してしまうため,施工後のコンクリート表面からの水分の蒸発を抑制するために新たに開発した水溶性炭化水素樹脂を主成分とするアルカリ性の蒸発防止剤を噴霧し，コンクリート表面の水分とアルカリ性を保持することが出来た.

7.4 まとめ

今回，ジオポリマーコンクリートに使用した結合材は，オーストラリアにおいて汎用的なフライアッシュを 25%混合したポルトランドセメントと比較して，約 80%の CO_2 排出量を低減できることになる．そのため，本空港建設だけで 8,640t 程度の二酸化炭素排出量を削減できたことになる.

参考文献

1) T. Glasby et al.: EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport, Concrete 2015 Conference, Melbourne Australia 2015

（執筆者：杉山　知巳）

８．タイでのトラックヤード舗装への適用

8.1　はじめに

2016 年 8 月，タイ北部ランパーン県メーモ郡のメーモ石炭火力発電所（Mae Moh power plant）において，ジオポリマーコンクリートが 120m^2 施工された．施工場所は，**図 8.1.1** に示すトラックヤードで，活性フィラーには，同発電所から排出されたフライアッシュが用いられた．ここでは，Smith 准教授（モンクット王工科大学北バンコク校）および Prinya 教授（コンケン大学）により得られた情報から，施工の状況について報告する．

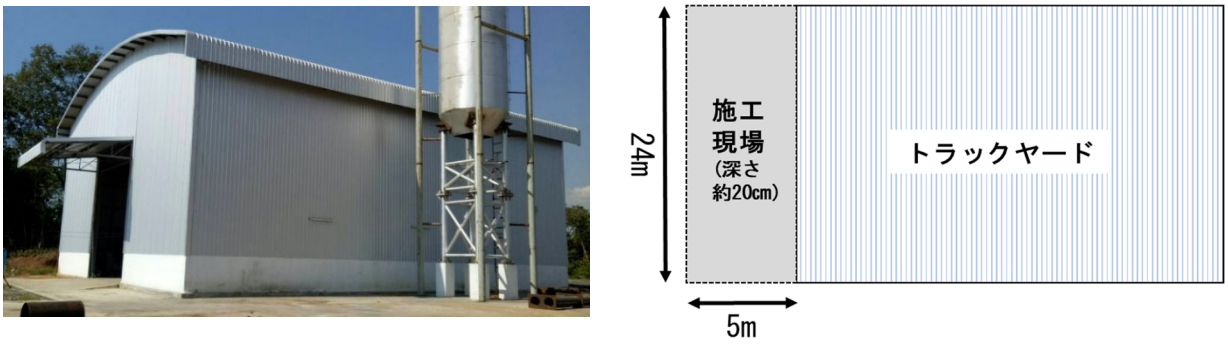


図 8.1.1　施工場所

8.2　材料および配合

ジオポリマーコンクリートの材料には，カルシウム成分を多く含有するフライアッシュ（ASTM・GB 規格の Class C），細骨材および粗骨材が用いられた．また，ジオポリマー溶液は，水ガラスに水と 14mol/L の水酸化ナトリウム水溶液を混合して作製された．フライアッシュの化学組成を**表 8.2.1** に，ジオポリマーコンクリートの配合を**表 8.2.2** に示す．

表 8.2.1　フライアッシュの化学組成（wt%）

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	Ig.loss
34.02	18.58	11.91	22.75	2.84	0.70

表 8.2.2 ジオポリマーコンクリートの配合

単位質量（kg/m^3）					
フライアッシュ	水ガラス	水	水酸化ナトリウム水溶液	細骨材	粗骨材
410	60	5.5	80	750	1100

8.3　製造方法および打設

ジオポリマーコンクリートは，50 秒間空練りした粗骨材と細骨材に，フライアッシュとジオポリマー溶液を混合し，さらに 40 秒間練り混ぜることにより製造した．ジオポリマー溶液は貯蔵容器に保管され，混合に

は水中ポンプが用いられた．１バッチの練混ぜ量は 1.25m^3 とし，4 バッチ分を 5m^3 の運搬車で搬送した．使用したジオポリマーコンクリートの物性は，圧縮強度が 36.3N/mm^2（材齢 28 日），スランプが 22cm であった．スランプについては，打設から 2 時間で 12cm に変化し，その低下が認められた．ジオポリマーコンクリートの施工の状況を**写真 8.3.1** に，施工後の状況を**写真 8.3.2** に示す．ジオポリマーコンクリートの締固めにはコンクリート用バイブレータが使用され，表面仕上げは長尺コテにより手作業で行われたが，スランプの低下でジオポリマーコンクリートの粘性が増加したため，2 時間経過後のコテ仕上げは容易ではなかった．

写真 8.3.1　ジオポリマーコンクリートの施工の状況

写真 8.3.2　施工後の状況

2020 年には，同施設の道路に，アルカリ活性材料（一部に，セメントを含む）を用いたコンクリートが 30m^3 施工された（**写真 8.3.3** 参照）．フライアッシュの化学組成を**表 8.3.1** に，コンクリートの配合を**表 8.3.2** に示す．

写真 8.3.3 コンクリートの打設および表面仕上げ後の状況

表 8.3.1 フライアッシュの化学組成（wt%）

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	Ig. loss
30.0	16.6	9.9	30.7	2.8	1.0

表 8.3.2　コンクリートの配合

単位質量（kg/m^3）						
セメント	フライアッシュ	水ガラス	水酸化ナトリウム水溶液(6mol/L)	凝結遅延剤	細骨材	粗骨材
50	380	120	20	3	750	1100

製造は，生コンクリート工場で行ったが，**写真 8.3.4** に示すように水酸化ナトリウム水溶液のみ，施工現場で後添加した．水酸化ナトリウム水溶液を後添加すると，スランプは約 8cm から約 17cm に変化した．また，施工完了までに要した時間は，練混ぜに 25 分間，運搬に 40 分間，打設・仕上げに 30 分間の合計 95 分間で，ジオポリマーコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度は 42.2N/mm^2 であった．道路開通後の様子を**写真 8.3.5** に示す．

写真 8.3.4　水酸化ナトリウム後添加の様子

写真 8.3.5　道路開通後の様子

8.4　まとめ

トラックヤードに施工されたジオポリマーコンクリートは，2 年間経過した時点においても問題となる劣化は生じていない．また近年，同施設の道路には，新たにアルカリ活性材料を用いたコンクリートが施工され，車道としての適用性について検討されている．これらの他にも，コンクリート用補修材や軽量コンクリートなど，ジオポリマーに関する様々な研究開発が進められており[1)~4)]，今後，タイにおけるジオポリマーコンクリートの更なる実用化が期待される．

参考文献

1) Phoo-ngernkham T., Sata V., Hanjitsuwan S., Ridtirud C., Hatanaka S., Chindaprasirt P. : High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, Construction and Building Materials, Vol.98, pp.482-488, 2015

2) Chindaprasirt P., Jitsangiam P., Rattanasak U. : Hydrophobicity and efflorescence of lightweight fly ash geopolymer incorporated with calcium stearate, Journal of Cleaner Production, Vol.364, pp.1-9, 2022

3) Hanjitsuwan S., Phoo-ngernkham T., Damrongwiriyanupap N. : Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer mortar, Construction and Building Materials, Vol.133, pp.128-134, 2017

4) Sukontasukkul P., Pongsopha P., Chindaprasirt P., Songpiriyakij S. : Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer, Construction and Building Materials, Vol.161, pp.37-44, 2018

（執筆者：前川　明弘）

施工事例８

<table>
<tr><td>施工場所</td><td colspan="6">メーモ火力発電所（ランパン県・タイ，Mae Moh Power plant，Lampang，Thailand）</td></tr>
<tr><td>適用箇所</td><td colspan="6">トラックヤード（Truck yard，120 m^2）</td></tr>
<tr><td>施工年</td><td colspan="6">2016 年</td></tr>
<tr><td>施工目的</td><td colspan="6">実施工，　~~試験施工~~，　~~その他~~</td></tr>
<tr><td>概要</td><td colspan="6">メーモ石炭火力発電所のトラックヤードに，ジオポリマーコンクリートが 120m^2 施工された．
ジオポリマーコンクリートの物性
スランプ：22cm（2 時間経過後，12cm まで低下）
圧縮強度：8.7 N/mm^2（材齢 3 日），18.8 N/mm^2（材齢 7 日），36.3 N/mm^2（材齢 28 日），
42.0 N/mm^2（材齢 365 日）

写真 1 施工の状況（左：施工場所，中：仕上げ後の表面，右：硬化後の表面）</td></tr>
<tr><td>使用材料</td><td colspan="6">・ジオポリマー溶液（水ガラス，水，14mol/L 水酸化ナトリウム水溶液）
・フライアッシュ（Class C，高カルシウムフライアッシュ），細骨材，粗骨材</td></tr>
<tr><td rowspan="3">配合</td><td colspan="6">単位質量（kg/m^3）　　＊：細骨材含水量 80kg/m^3</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>水ガラス</td><td>水酸化ナトリウム水溶液</td><td>水</td><td>細骨材*</td><td>粗骨材</td></tr>
<tr><td>410</td><td>60</td><td>80</td><td>5.5</td><td>750</td><td>1100</td></tr>
<tr><td>製造方法</td><td colspan="6">・使用ミキサ：Top load conveyor type
・外気温：25～34℃
・ジオポリマー溶液の温度：25℃
・練混ぜ条件：練混ぜ時間 90 秒（フライアッシュとジオポリマー溶液は後で添加．添加後 40 秒間練り混ぜ），1 バッチ 1.25m^3．ジオポリマー溶液は貯蔵容器に保管し，水中ポンプを用いて送水・混合．

写真 2 ジオポリマー溶液の貯蔵容器

写真 3 打設の様子（4 バッチ毎 5m^3 の運搬車で搬送）</td></tr>
<tr><td>公開資料</td><td colspan="6">資料提供：Assoc.Prof.Smith Songpiriyakij（King Mongkut’s University of Technology North Bangkok）& Prof. Prinya Chindaprasirt（Khon Kaen University）</td></tr>
<tr><td>現状</td><td colspan="6">施工から 2 年間経過後，問題となる劣化は生じていない．</td></tr>
<tr><td>工夫した点</td><td colspan="6">ジオポリマー溶液を外気温度に調節するため，貯蔵容器に保管し，水中ポンプで送水．</td></tr>
</table>

Ⅵ. まとめ

第Ⅰ編では，異なる種類のアルカリ溶液と活性フィラーを組合せることで反応メカニズム，すなわち形成される反応相の形態を変化させることができることを示した．一例として，水ガラスをアルカリ溶液の主成分としてメタカオリン，フライアッシュ等のケイ素およびアルミニウムを主要な構成元素とする非晶質材料を活性フィラーとした場合に，アルカリ溶液中のケイ酸イオンと活性フィラーから溶出した $Si(OH)_4$ ならびに $Al(OH)_4$ モノマーが縮合反応することでゲル状の反応相を形成する．また，アルカリ溶液のアルカリ成分と水の量比ならびにケイ素成分とアルカリ成分の量比が活性フィラーとの混練物の流動性に大きな影響を及ぼす．なお，混練物の流動性および凝結速度を調整する目的で分散剤および凝結遅延剤の開発が進められており，効果的な材料の開発が望まれる．活性フィラーとして火山性堆積物，木質バイオマス灰等，多種多様な材料が研究対象にされており，それらの構成成分ならびに反応性の相違から硬化体性状も多様になる．活性フィラーとして主要な材料として扱われるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の間においても反応速度ならびに反応生成物の種類が異なる．その一例として，それらを組み合わせた同一配合とした場合でも反応温度が低い場合は高炉スラグ微粉末の反応が主体になるが，反応温度が高い場合はフライアッシュの反応も大きく影響することが示されている．このようにジオポリマー系とされる硬化体はその使用材料と製造方法の組合せによって様々な性質を持たせることができるため，それぞれの硬化体の特性を見極めることで使用目的に応じた使い分けを行っていきたい．

第Ⅱ編では,各種のジオポリマー系硬化体を製造する際の配合等の製造条件が混練物の流動性,凝結特性,ブリーディングに及ぼす影響,そして養生条件が硬化後の強度特性に及ぼす影響等に関する知見を整理した．多くの研究事例では，水ガラスをアルカリ溶液の主成分としてフライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーの主要構成物としたコンクリートの静弾性係数が同等の圧縮強度となる OPC コンクリートに比べて小さくなることが示されている．また，水ガラスをアルカリ溶液の主成分としてフライアッシュを活性フィラーとしたコンクリートおよびフライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたコンクリートのクリープ係数は同等強度の OPC コンクリートの同等以下とする知見が多い．ジオポリマー系硬化体を製造する際に型枠への固着を防ぐための剥離剤の製品化が求められているように金属に対する付着力が高いことが広く認識されている．この現象に関連する事象として，水ガラスをアルカリ溶液の主成分としてフライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたモルタルを対象とした鉄筋の引き抜き試験の結果から異形ならびに丸鋼鉄筋ともに OPC モルタルに比べて優れた付着特性を有することが示されている．そして，静弾性係数が OPC コンクリートに比べて小さいジオポリマー系コンクリートで RC はりを製造した場合でも曲げひび割れの分散性が高いことと併せて OPC コンクリート製の RC はりと同等の曲げ挙動を確保できることが示されている．また，これらの力学的な特性と併せて ASR，中性化，凍結融解，鉄筋腐食，摩耗，高温影響等の耐久性関連の知見も整理した．それぞれの耐久性の項目における知見の数が少ないため，ジオポリマー系硬化体の種類，試験条件に留意した試験を重ね，今後多くの知見が得られることを期待する．

第Ⅲ編では，複数の機関で同一の活性フィラー，同一配合としたモルタルおよびコンクリート試験体を製造し，圧縮強度，割裂引張強度，静弾性係数を比較評価した．JIS R 5201 で示されるモルタルフロー試験を適用してモルタルの流動性を評価した場合，8 機関の試験値のばらつきは比較的大きく，同一銘柄の水ガラスを使用した 4 機関の間でもモルタルフロー値が大きく異なった．また，活性フィラーを構成する高炉スラ

グ微粉末量が多くなるほどフロー値の低下と併せて凝結速度が高まることを確認した．コンクリートは流動性を高めた配合とした．その場合のフロー値のばらつき幅はモルタル試験の場合と同等であった．モルタルならびにコンクリートの圧縮強度は活性フィラーを構成する高炉スラグ微粉末量を高めるほど高くなる傾向を確認した．

第Ⅳ編では，ジオポリマー系材料で製造したコンクリート，モルタル，ペーストの各硬化体の使用目的に応じた要求性能とそれらに対する適用性を整理，検討した．工場製品としてジオポリマー系コンクリートを製造する場合はフレッシュ性状，適切な強度レベルを得るまでの養生条件が OPC コンクリートの場合と異なるため，OPC コンクリートを使った全ての製品に置き換えることはできない．この条件下で第Ⅱ編に示す力学的な特性と併せて耐久性に関する特性も見極めることでジオポリマー系コンクリートを使用する目的を明示し，製品開発を進めていくべきと考える．ジオポリマー系コンクリートを用いた RC および PC 構造物を設計する場合，第Ⅱ編に示す静弾性係数，鉄筋との付着特性が影響を及ぼす RC はりにおける曲げ挙動の評価等に関する知見が十分でないことから必要となる各種の安全係数を適切に設定することができず，現状では OPC コンクリートのように示方書等で一様に規定することができない．関連データの蓄積を進め，構造物の設計に備えたい．ジオポリマー系硬化体が OPC 硬化体に比べて耐酸性，耐薬品性に優れる特性を活用して温泉地および化学工場の床等で劣化したコンクリート表層部の補修材への適用が期待されており，製品の開発に向けた検討が進められている．また，ジオポリマー系硬化体は OPC 硬化体とは異なる反応相を形成することで重金属，放射性物質を物理的，化学的に固定，吸着する効果を発揮するため，重金属，放射性廃棄物等の有害物質を対象とした固型化材料としての材料開発，適用性評価等の検討が進められている．

第Ⅴ編では各種ジオポリマー系コンクリートの実施工，実製品の製造に関する事例を示した．このような実施例を増やし，施工実績を重ねることで認定取得，規格の整備を行い，社会実装に努めたい．

（執筆者：山本　武志）

資料編

１．委員による研究

本委員会での議論を深めるため，参画した委員自身による代表的な研究成果を，同一のフォーマットで文献調査表を作成し，分析した．一覧表から分かるように，国内において既に多様な項目に関する研究が行われていることが明らかとなった．一方，未だ知見の少ない領域もあることが分かった．ジオポリマーに関する研究のさらなる展開や，実用化を推進するため，さらなる知見の蓄積や成果の積極的な発信が望まれる．

項目	評価性能・特性(著者が意識し検討対象としている主な性能，特性など)																								硬化体タイプ				作製条件												文献
大分類	フレッシュ性能			力学・変形性能							耐久性能									他									養生種類		粉体種類					アルカリ種類					
小分類	流動性	空気量	凝結性	圧縮	引張	曲げ	せん断	疲労	収縮・クリープ	付着	中性化	塩分浸透	耐熱性	耐乾燥性	凍結融解	化学的浸食	ASR	水分浸透	鉄筋腐食	CO_2排出量低減効果	微細構造・生成物・反応性	白華	固定化能	他	RC	コンクリート	モルタル	ペースト	常温養生	高温養生	フライアッシュ	高炉スラグ微粉末	シリカフューム	メタカオリン	他(火山灰など)	ケイ酸ナトリウム	メタケイ酸ナトリウム	NaOH	KOH	その他	
1	●		●	●																							●		●	●	●	●									Shaoqi HUANG, Yukun ZHANG, Shuyu XING, Lin AN, SYNTHESIS OF FA/BFS BASED GEOPOLYMER MORTAR ACTIVATED BY SODIUM METASILICATE NONAHYDRATE, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp1816-1821, 2020
2				●					●				●	●														●	●						●	●		●			ZHU Guozhen, WANG Chang'an, GAO Li, Thermal Stability of High Strength Alkali Activated Geopolymers, JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY, Vol. 41, No. 9, September, 2013
3																								●(断面修復)			●		●		●	●				●		●			ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光：ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動に 関する実験的研究 コンクリート工学会年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1249-1254 2018.7
4				●												●											●			●	●	●	●			●		●			合田寛基, 原田耕司, 津郷俊二, 日比野誠：フライアッシュⅡ種を用いたジオポリマーの材料特性、コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1993-1998, 2015
5						●	●																		●	●				●	●	●				●		●			合田寛基, 原田耕司, 佐川康貴, 西﨑丈能：ジオポリマーコンクリートはりの曲げせん断特性、コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2089-2094, 2017
6	●			●																	●							●	●	●	●	●	●			●		●			ポンマハーサイパラミ, 五百蔵沙耶, 畑中重光：シリカフューム添加型ジオポリマーペーストの性能に関する実験的考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol.85, No.769, pp.321-330, 2020
7	●			●																								●		●		●	●			●		●			伊藤彰利, ポンマハーサイパラミ , 畑中重光：シリカフュームを用いたジオポリマーペーストのフロー値・圧縮強度に 関する基礎的研究 コンクリート工学会年次論文集, Vol.41, No.1, pp. 1967-1972, 2019
8				●																						●	●	●	●		●	●				●		●			ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光：圧縮強度と骨材量を変化させたジオポリマー硬化体のヤング係数に 関する基礎的研究 コンクリート工学会年次論文集, Vol.41 No.1 pp.1949-1954, 2019
9	●		●																					●(断面修復)				●	●		●	●				●		●			五百蔵沙耶, 伊藤彰利, 畑中重光：異なる比表面積の高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの強度発現性および簡易注入試験に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1961-1966, 2019
10	●																							●(断面修復)				●	●		●	●				●		●			五百蔵沙耶, ポンマハーサイパラミ, 畑中重光：ひび割れ注入材用ジオポリマーペーストの可使時間に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1,pp.1786-1791,2020
11				●											●												●		●		●	●			●	●		●			勝野太市, 吉野千紘, 佐川孝広：火山ガラス微粉末のジオポリマーへの適用, 第74回セメント技術大会講演要旨, pp.172-173, 2020
12	●			●									●								●						●	●		●	●	●				●		●			一宮一夫, 秋永史也, 原田耕司, 池田 攻：フライアッシュ系ジオポリマーのアルカリ水比とフロー値ならびに高温加熱による外観や強度変化の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1851-1856, 2018
13				●																	●						●	●		●	●	●	●					●			菊地道生, 山本武志, 大塚拓：結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38 , No.1 , pp.2283-2288, 2016
14				●																						●				●	●	●	●					●			Atsushi Shibayama and Michio Kikuchi, COMPRESSIVE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE MADE WITHOUT THE USE OF WATER GLASS FOR ALCALI ACTIVATION, fib Symposium 2019 Krakow
15																					●							●		●	●							●			新大軌, 小林将也, 田中秀和, 林建佑, 内田俊一郎：アルカリ刺激剤によるフライアッシュの反応, 日本セラミックス協会2017年年会講演予稿集, 東京都, CD-ROM
16									●												●						●	●		●	●	●			●			●			中村丞吾, 新大軌, 宇城正貴, 島﨑大樹：ジオポリマーにおける膨張材の水和反応に関する研究, コンクリート工学年次論文集, No.40, pp.1833-1838, 2018
17													●								●						●	●		●	●	●				●		●			八代大生, 新大軌, 周藤将司, 三代龍之輔：高温環境下におけるジオポリマー硬化体の物理的および化学的変化, コンクリート工学年次論文集, No.42, pp.1792-1797, 2020
18				●				●																		●				●	●					●		●			yojiro KATO, Chikako FUJIYAMA and Januarti Jaya Ekaputri：FATIGUE STRENGTH AND DEFORMATION BEHAVIOR OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1997-2002, 2019
19	●																							●(配合決定法)			●			●	●					●		●			M. T. Ghafoor, C. Fujiyama and K.Maekawa, Mix design processing for self compacting geopolymer mortar, J., Adv., Concr.,Technol., Vol.19, No.11, pp.1133-1147, 2021
20				●																							●			●	●					●		●			M. T. Ghafoor, C. Fujiyama and K.Maekawa, Hardened Mechanical Properties of Self Compacting Geopolymer Mortar, J. Adv., Concr., Technol., Vol.20, No.4, pp.287-299, 2022
21	●		●	●																							●			●	●					●		●			M. T. Ghafoor, C. Fujiyama and K.Maekawa, FLOW RETENTION PROPERTY AND SETTING TIME OF SELF COMPACTING GEOPOLYMER MORTAR, Proc. for the 6th fib Int. Congr., Oslo, Norway, 493-502, 2022.6
22				●																							●			●	●				●		●				C. Fujiyama, D. Kanai, Y. Cui and J. J. Ekaputri：Dry mix geopolymer processing for utilization of indonesian volcanic mud, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1090-1095, 2022
23	●	●																									●		●		●						●				Batsuuri Ashidmaa, 大飼利嗣, 関谷有紗加：フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーモルタルの圧縮強さ特性とフロー値の経時変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2065-2070, 2017
24	●	●		●																				●(練混ぜ方法)			●		●		●				●		●				後藤 壮, 犬飼利嗣, 前川明弘, 廣瀬 貴：ジオポリマーモルタルの練混ぜ方法と模擬乾燥スラッジ粉の混入率が圧縮強さに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1943-1948, 2019
25	●					●															●						●(繊維補強材)			●	●						●				後藤 壮, 犬飼利嗣, 前川明弘, 廣瀬 貴：ガラス繊維補強ジオポリマーモルタルに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1774-1779, 2020
26	●					●															●						●(繊維補強材)			●	●						●				杉山朝音, 犬飼利嗣, 前川明弘, 廣瀬 貴：80℃の熱水浸せき期間がガラス繊維補強ジオポリマーモルタルの曲げ強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1343-1348, 2021
27	●					●															●						●(繊維補強材)			●	●	●					●				廣瀬 貴, 西村優作, 前川明弘, 犬飼利嗣：80℃の熱水浸せき期間がバサルト短繊維補強ジオポリマーモルタルの曲げ強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1072-1077, 2022
28				●								●															●		●		●	●				●		●			花岡大伸, 谷本恒志郎, 伊藤翼：ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1361−1366, 2021
29				●														●	●								●		●		●	●				●		●			花岡大伸, 谷本恒志郎, 伊藤翼：ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1361-1366, 2021
30					●					●																	●			●	●	●				●		●			太田周, 佐川康貴, 原田耕司, 西﨑丈能：ジオポリマーモルタルと鉄筋との付着特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2313-2318, 2016
31						●																			●					●	●	●				●		●			佐川康貴, 太田周, 合田寛基, 大西俊輔：ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐荷性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2095-2100, 2017
32				●							●	●							●		●			●(暴露試験)		●				●	●	●				●		●			榮徳雄斗, 佐川康貴, 原田耕司, 富山潤：塩害環境下に2年間曝露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1367-1372, 2021
33				●					●												●					●(ポーラスコン)	●	●		●	●	●				●		●			前川明弘, 三島直生,畑中重光,坪内徹朗：ポーラスジオポリマーコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究,日本コンクリート工学会「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集, pp.75-80,2016.6
34	●			●																							●		●		●	●						●			中島均, 木下哲一, 依田侑也, 清村俊介, 佐々木勇気, 鳥居和敬, 浅田素之, 新大軌：放射性廃棄物封じ込めのための常温養生ジオポリマーの開発, 原子力学会2021年春の年会, p.2J07, 2021
35							●	●																	●				●		●	●				●		●			内西廉太朗, 千々和伸浩：ジオポリマーコンクリートはりのせん断疲労に関する基礎的研究, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会講演概要集, V-253, 2022
36	●			●																				●(酸化グラフェン)			●			●	●					●		●			島崎未緒, 坂本亮, 千々和伸浩：酸化グラフェン添加によるコンクリートの性能変化に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, pp. 91-96, 2022
37	●			●																						●			●		●	●				●		●			緑川猛彦, 一宮一夫, 犬飼利嗣, 周藤将司：ジオポリマーコンクリートの配合と圧縮強度に関する検討, 土木学会第77回年次学術講演会講演概要集, 2022

項目	評価性能・特性（著者が意識し検討対象としている主な性能，特性など）																								硬化体タイプ				作製条件													文献
大分類	フレッシュ性能			力学・変形性能							耐久性能									他									養生種類		粉体種類					アルカリ種類					
小分類	流動性	空気量	凝結性	圧縮	引張	曲げ	せん断	疲労	収縮・クリープ	付着	中性化	塩分浸透	耐熱性	耐乾燥性	凍結融解	化学的浸食	ASR	水分浸透	鉄筋腐食	CO_2排出量低減効果	微細構造・生成物・反応性	白華	固定化能	他	RC	コンクリート	モルタル	ペースト	常温養生	高温養生	フライアッシュ	高炉スラグ微粉末	シリカフューム	メタカオリン	他（火山灰など）	ケイ酸ナトリウム	メタケイ酸ナトリウム	NaOH	KOH	その他	
38					●		●																			●			●		●	●				●		●			薗邉孝裕，緑川猛彦：ジオポリマーコンクリート部材の接合部における付着性状について，土木学会第77回年次学術講演会講演概要集，2022
39	●			●	●				●						●	●	●				●					●	●			●	●					●	●	●	●		上原元樹：ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発，鉄道総研報告，pp.41-46，2008
40				●	●																					● （PC）				●	●	●	●					●			大木信洋，東原実，佐藤隆恒，上原元樹：ジオポリマー法による環境負荷低減PC まくらぎの試作，土木学会第71回年次学術講演会講演要旨，pp.411-412，2016
41				●	●							●		●			●				●						●	●	●	●	●	●	●			●		●			佐藤隆恒，上原元樹，山﨑淳司：低アルカリ/水比，高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2035-2040，2017
42																	●				●		●								●				●			●			佐藤隆恒，上原元樹：水素イオン型ジオポリマーによるアルカリシリカ反応の抑制，鉄道総研報告，Vol.31，No.8，2017
43																	●						●	●				●		●	●	●			●			●			佐藤孝恒，上原元樹，小田慎太郎，山﨑淳司：種々のH＋型ジオポリマー粉体によるアルカリシリカ反応の抑制，土木学会第72回年次学術講演会講演要旨，pp.165-166，2017
44	●			●		●																				● （PC）				●	●	●	●					●			上原元樹，佐藤隆恒，東原実，大木信洋：ジオポリマーPCまくらぎの営業線への試験敷設，土木学会第72回年次学術講演会講演要旨，pp.167-168，2017
45				●									●			●					●	●		●			●	●	●		●	●	●					●			上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣：左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp1937-1942，2020
46				●									●			●					●	●		●			●	●	●		●	●	●					●	●		上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣：常温養生カリウム(K)型ジオポリマー左官用モルタルの調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1774-1779，2020
47			●	●		●			●		●					●					●						●	●	●	●		●			●	●		●			深谷峻平，李柱国，高炉水砕・徐冷スラグを用いたジオポリマーセメントに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1097-1101,2022
48				●		●															●						●	●	●	●	●				●	●		●		●（アルミン酸Na）	岩間祐樹，李柱国：パーライト原石粉末を用いたジオポリマーに関する研究，コンクリート工学年次論文集，44(1)，1102-1107，2022
49	●	●		●					●		●				●											●					●	●				●		●			李柱国，高垣内仁志，杉原大祐，李薛忠：再生粗骨材を用いたジオポリマーコンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42. No.1，pp.1798-1803，2020
50	●		●	●		●																		● （補修材）				●	●		●	●						●		●	北田達也，李柱国：コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No.1，pp.2059-2064，2017
51				●							●															●			●	●	●	●				●		●			S. Li，Z. Li，T. Nagai，and T. Okada：Neutralization resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No.1，pp.2023-2028，2017
52						●																	●					●	●						●	●		●			李柱国，池田攻：製紙スラッジ焼却灰を用いたジオポリマーおよびその放射能汚染水の処理への応用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No.1，pp.2337-1342，2016
53	●			●		●									●											●	●		●	●	●	●			●	●		●			X. Li，Z. Li，D. Sugihara，Properties of geopolymer materials with clinker ash,コンクリート工学年次論文集，Vol.44. No.1，pp.1114-1119，2022
54			●	●		●										●											●	●	●	●		●			●	●		●			李柱国：脱水ケーキ乾燥粉末を用いたジオポリマー硬化体に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1078-1083，2022

文献調査表（文献番号 1）

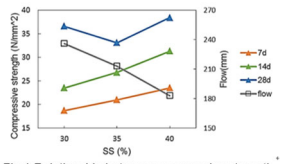
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>Compressive strength, workability</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>Mortar</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>20±1℃/60℃</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>Fly ash, blast furnace slag</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>Sodium metasilicate nonahydrate (Na_2SiO_3·$9H_2O$)</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">Shaoqi HUANG, Yukun ZHANG, Shuyu XING, Lin AN, SYNTHESIS OF FA/BFS BASED GEOPOLYMER MORTAR ACTIVATED BY SODIUM METASILICATE NONAHYDRATE, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp1816-1821, 2020</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">Synthesize FA/BFS based GP mortar activated by Na_2SiO_3·$9H_2O$ (固体)</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● SS=30%, 35%, 40%, 45%; AA/AB=0.45, 0.5, 0.55, 0.6; BFS=0%, 30%, 45%, 60%; Mixing time=270s, 330s, 390s, 450s　などパラメータが考えられた。
● Curing temperature 20±1℃,60℃</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● Compressive strength and workability(flow, setting time) were investigated
● Microstructure of hardening product was investigated by XRD and SEM.</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2"> 

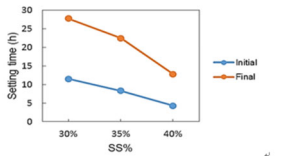
Fig.1 Relationship between compressive strength, flow and SS%


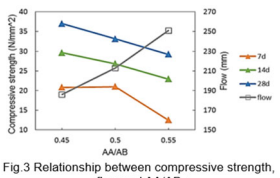
Fig.2 Relationship between SS% and setting time


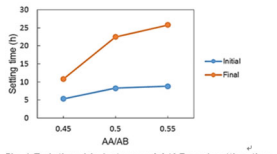
Fig.3 Relationship between compressive strength, flow and AA/AB


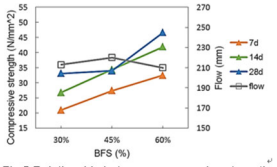
Fig.4 Relationship between AA/AB and setting time


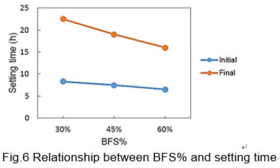
Fig.5 Relationship between compressive strength, flow and BFS%


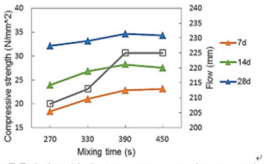
Fig.6 Relationship between BFS% and setting time


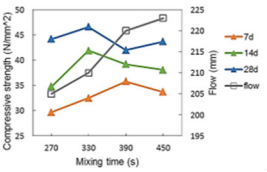
Fig.7 Relationship between compressive strength, flow and mixing time at 30% BFS%


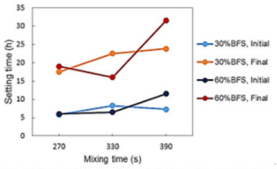
Fig.8 Relationship between compressive strength, flow and mixing time at 60% BFS%


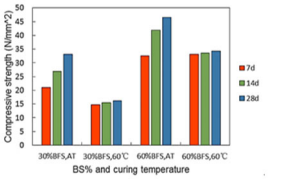
Fig.9 Relationship between mixing time and setting time


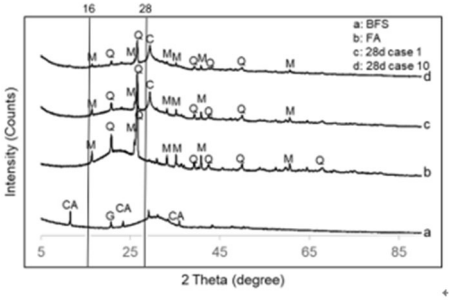
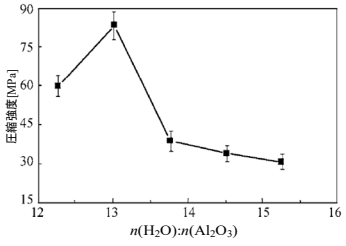
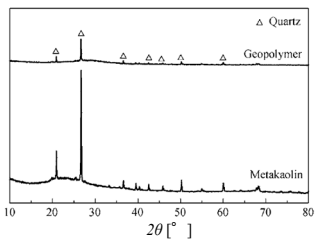
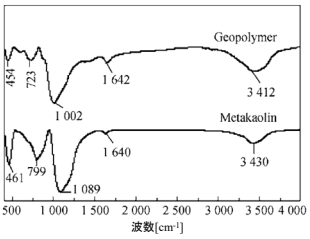
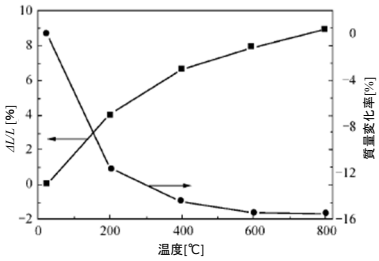
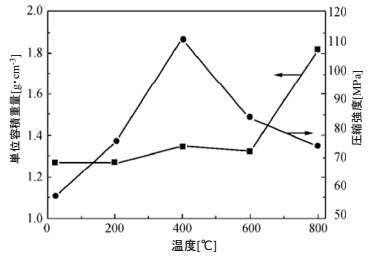
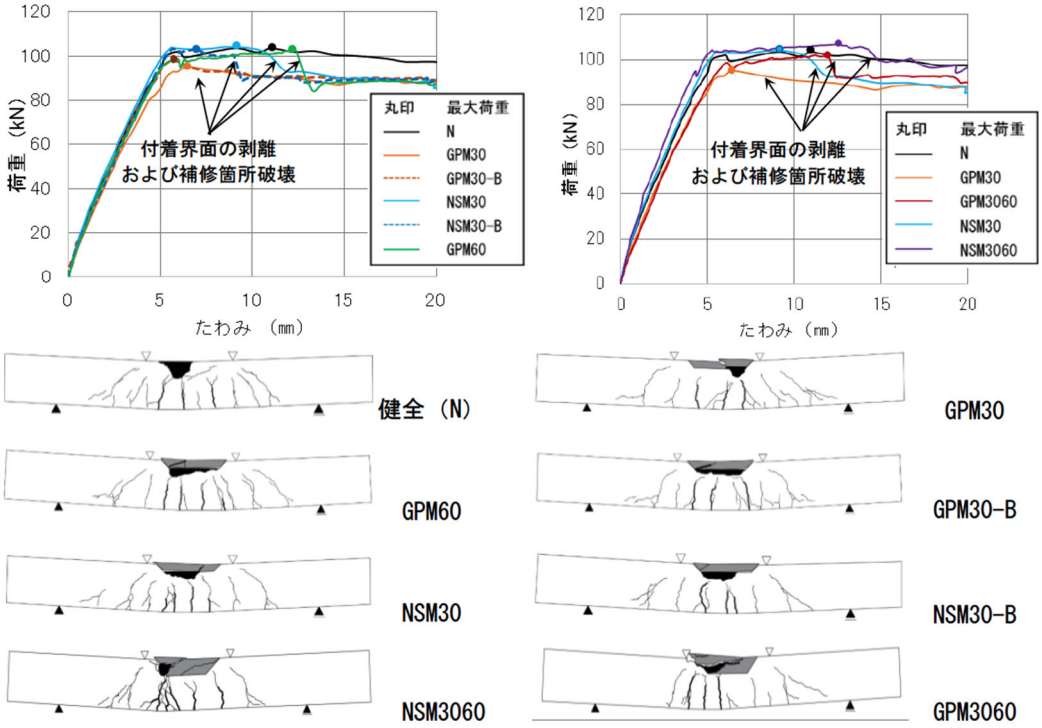
Fig.10 Relationship between curing condition and compressive strength


Fig.11 XRD of BFS, FA and hardened GP paste for 28d {G: Gehlenite; M: Mullite; Q: Quartz; C: Calcite}
● An increase of SS% brought an improvement of compressive strength and a reduction of flow ability and shortened setting time.
● A rise of AA/AB made the compressive strength decreased while the flow increased.
● Higher compressive strength and shorter setting time were obtained by an increase of BFS% because of rich CaO.
● The extension of mixing time in the range of 330-390s contributed to an improvement of compressive strength and an increase of flow with respect to slag content.
● Elevated curing temperature led to lower compressive strength.
● The product of GP paste activated by Na_2SiO_3·$9H_2O$ was similar to the conventional GP.</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 2）

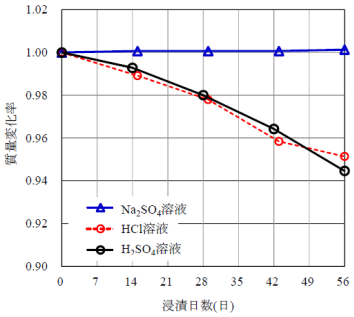
評価性能・特性		圧縮強度、耐熱性、収縮
硬化体タイプ		ペースト
作製条件	養生	常温養生
	粉体種類	メタカオリン
	アルカリ種類	水ガラス、水酸化ナトリウム水溶液
文献情報		ZHU Guozhen, WANG Chang'an, GAO Li, Thermal Stability of High Strength Alkali Activated Geopolymers, JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY, Vol. 41, No. 9, September, 2013
研究概要		モール比 M [$n(H_2O):n(Al_2O_3)$]が 7d 圧縮強度に及ぼす影響；高温加熱処理 2 時間後ジオポリマー硬化体の質量変化、線形収縮とマイクロ構造
配合・養生概要		● モール比：SiO_2/Al_2O_3=3.74, $Na_2O:Al_2O_3$=0.97, $H_2O:Al_2O_3$=12.27, 13.02, 13.77, 14.52, 15.27 ● 室温養生
試験概要		● 7d 圧縮強度、加熱前後の質量差、収縮
主な知見		＜提示されている知見・課題＞  図 1 異なる n(H2O) : n(Al2O3) を用いたジオポリマー供試体の圧縮強度  図 2 メタカオリンとジオポリマーの XRD パターン  図 3 メタカオリンとジオポリマーの FTIR スペクトル  図 4 焼成温度が質量変化率及び供試体の線形収縮率に及ぼす影響  図 5 焼成温度が圧縮強度及び物質の単位容積重量に及ぼす影響 ● M=13.02 の時、圧縮強度が最大値に達し、83.56MPa であった。圧縮強度はフロー値に直接的な関係がある。フロー値が大きくなると、硬化しにくく、強度も低い。フロー値が小さくなると、硬化反応が素早く発生し、未反応の粉体が多く存在している。適切なフロー値を満足したうえで、単位水量を減らすことで、より優れた強度を期待できる。 ● XRD から見ていくと、メタカオリンに比べて、ジオポリマーの石英ピークが大幅に減っている。石英は部分的な重合反応を発生している。 ● FTIR から見ていくと、メタカオリンにくらべて、ピークは全体的に低い波長のほうに移動している。サンプルのマイクロ構造が変わって、メタカオリンとは違う構造に生じた。[AlO_4]は[SiO_4]を部分的に取り換えている。 ● 温度が増えるにつれ、圧縮強度は増加してから減少する傾向を示し、600℃以下の場合は石英ピックが主導し、相成分があまり変わらない。800℃以上の場合は、霞石ピークが現れ、相成分が変わる。
備考		

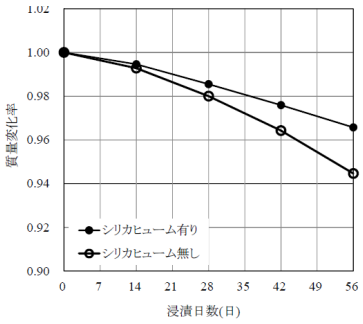
文献調査表（文献番号 3）

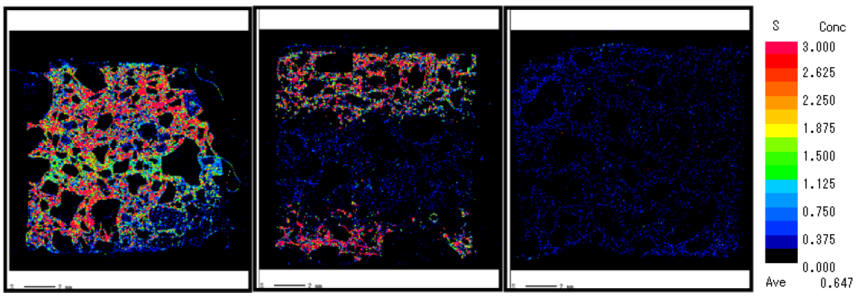
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>他：断面修復材としての補修効果（RC 梁の破壊性状と曲げ耐力）</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">ポンマハーサイパラミ，伊藤彰利，畑中重光：ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験的研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1249-1254，2018.7</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">コンクリート構造物の補修材料としてのジオポリマーの実用性について検討することを目的とし，その第一段階として，RC 梁の断面修復にジオポリマーを使用した場合の曲げ変形挙動および破壊特性を実験的に調べることとした。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BS 置換率：10，30%）
● アルカリ溶液：水ガラス 2 号（WG2），10mol/l の NaOH（NH），WG2:NH＝2：1
● 養生：常温養生（封緘）</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：曲げ耐力，ひび割れ発生状況，破壊性状，断面解析による曲げ挙動</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● 曲げ耐力
（N:健全 RC 梁；GPM：ジオポリマーモルタル；NSM:無収縮モルタル；30：Fc=30，補修厚さ 30mm；60：Fc=60，補修厚さ 30mm；B：不良な補修界面処理，3060：Fc=30 で補修厚さ 60mm）
● ひび割れ発生状況および破壊性状
 

＜提示されている知見・課題＞
● GPM は同等強度のコンクリートや無収縮モルタルに比べ，ヤング係数が低いため，断面修復後の RC 梁の曲げ剛性が低下する傾向が確認された。
● 補修深さを圧縮縁から 60cm の深さまでとした場合およびヤング係数がコンクリートに近い高強度（Fc60）の GPM とした場合は，曲げ耐力の回復が良好な傾向にあった。
● 梁断面の応力分布を用いた曲げ解析により GPM で補修した RC 梁の降伏前の曲げ挙動がほぼ推定できたことを確認された。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 4）

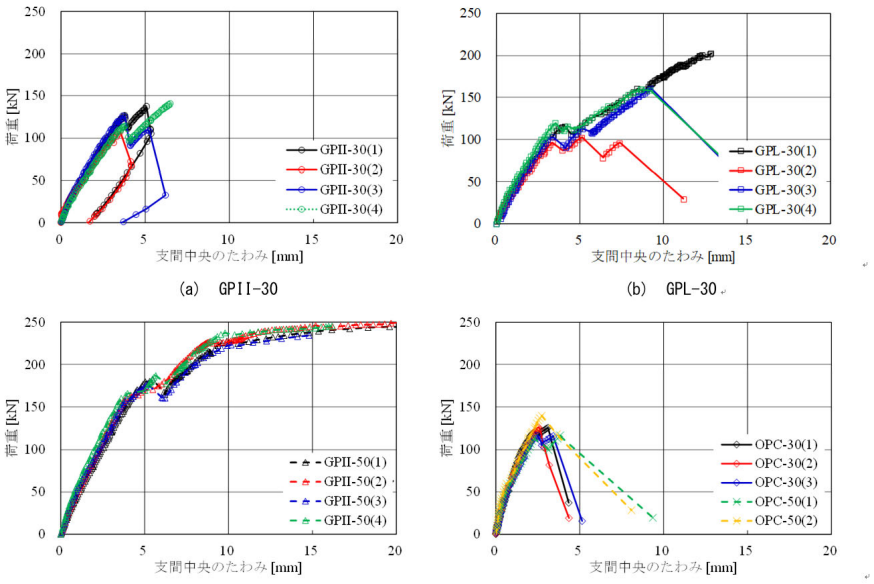
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>強度特性：圧縮強度、耐久性：耐酸性(塩酸，硫酸)</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカヒューム</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">合田寛基、原田耕司、津郷俊二、日比野誠：フライアッシュⅡ種を用いたジオポリマーの材料特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.1、pp.1993-1998、2015</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">異なる産地のフライアッシュ II 種に高炉スラグ微粉末とシリカヒュームを混和した GP を対象に、産地が圧縮強度に及ぼす影響、硫酸/塩酸に浸漬させた場合の化学的侵食に対する抵抗性について検討した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：(BS 置換率：10%)
● アルカリ溶液：(A/W 比：0.112)，(Si/A 比：0.540)
● 養生：70℃×3h、9h、24h、48h 保持</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 圧縮強度(材齢 3 日、7 日)、10%塩酸/10%硫酸浸漬試験(20℃4 週)、EPMA，細孔量分布</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">＜提示されている知見・課題＞
● フライアッシュの産地による相違は強度特性に顕著に影響しない。
● 硫酸塩による劣化はないが、塩酸と硫酸の酸による劣化が認められた。シリカヒュームによって劣化抵抗性が向上した。
 

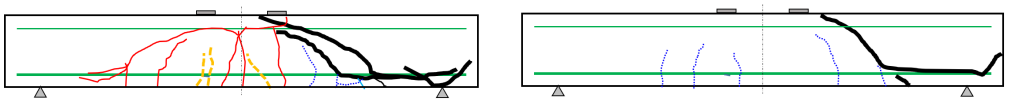
(a) 浸漬溶液の比較
 

(b) シリカヒューム有無の比較
● 浸漬試験後の EPMA (S：硫黄)
 

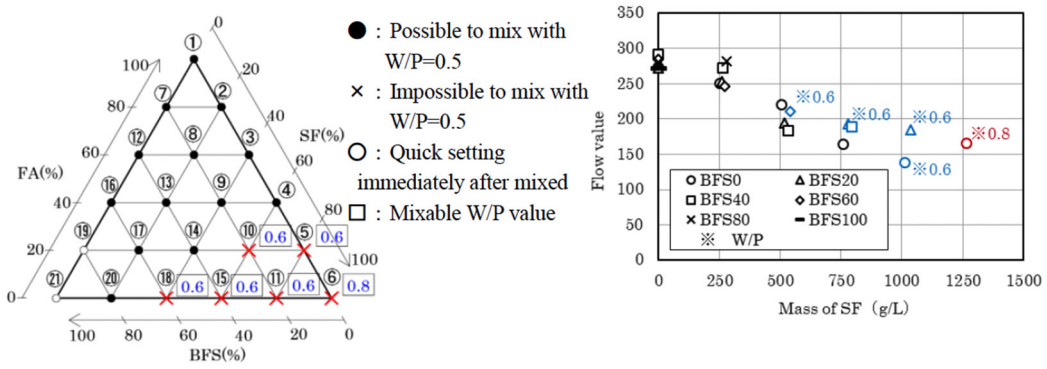
(d) Type C (10%硫酸) S　(e) Type C-SF (10%硫酸) S　(f) Type C (水道水) S</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

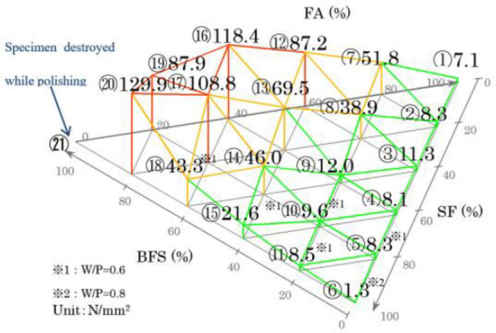
文献調査表（文献番号 5）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>耐荷特性(RC はりの曲げせん断)</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ、高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">合田寛基、原田耕司、佐川康貴、西﨑丈能：ジオポリマーコンクリートはりの曲げせん断特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、No.1、pp.2089-2094、2017</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">異なる圧縮強度のフライアッシュ系ジオポリマー(GP)コンクリートを用いたはり部材を対象として，曲げせん断が作用した場合の耐荷特性について実験検討した</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：(BS 置換率：30%)
● アルカリ溶液：(A/W 比：0.989、0.112)，(Si/A 比：1.14、0.540)
● 養生：70℃×18h 保持</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 曲げせん断試験</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">＜提示されている知見・課題＞
● ジオポリマーRC はりでは、斜め引張ひび割れ発生後に明らかな荷重増加を示すケースが存在
 

(a) GPII-30　(b) GPL-30
(c) GPII-50　(d) OPC-30, OPC-50
● 圧縮強度が約 50MPa の場合，ジオポリマーRC はりに発生する斜め引張ひび割れは OPC はりよりもひび割れ角が小さい傾向
 
FA Ⅱ種　f'c=50MPa(Pmax=252kN)　OPC　f'c=50MPa　(Pmax=116kN)
● コンクリート標準示方書[設計編]のせん断耐力式に基き部材係数を 1 とした計算値に対し，ジオポリマーコンクリートはりの実験値は概ね 1 以上</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

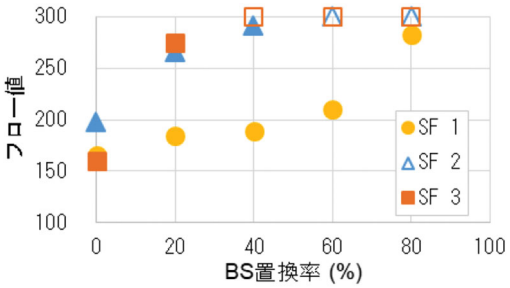
文献調査表（文献番号 6）

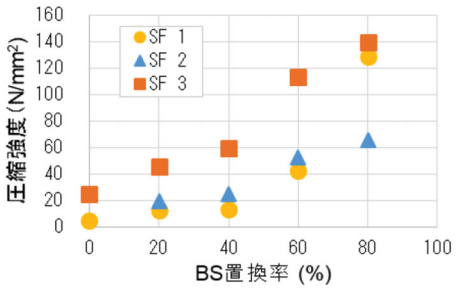
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性状：流動性，力学・変形性能：圧縮強度</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生，常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，シリカフューム</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">ポンマハーサイパラミ，五百蔵沙耶，畑中重光：シリカフューム添加型ジオポリマーペーストの性能に関する実験的考察，日本建築学会構造系論文集，Vol.85，No.769，pp.321-330，2020.3</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">超微粒子によるひび割れ追従性に期待し，SF を活性フィラーとして大幅置換した GP ペーストのひび割れ注入材を開発することを目的とし，SF を GP ペーストの主要な活性フィラーとして使用した場合の基礎特性について調べた。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：下記の図を参照
● アルカリ溶液：水ガラス 2 号（WG2），10mol/l の NaOH（NH），WG2:NH＝2：1
● 養生：60℃の高温養生，20℃60%R.H.の常温養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：練混ぜ状況，フロー値，硬化後の形状，空隙率，圧縮強度，構成物（XRD 回折）</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● 練り混ぜ状況およびフレッシュ性状
 

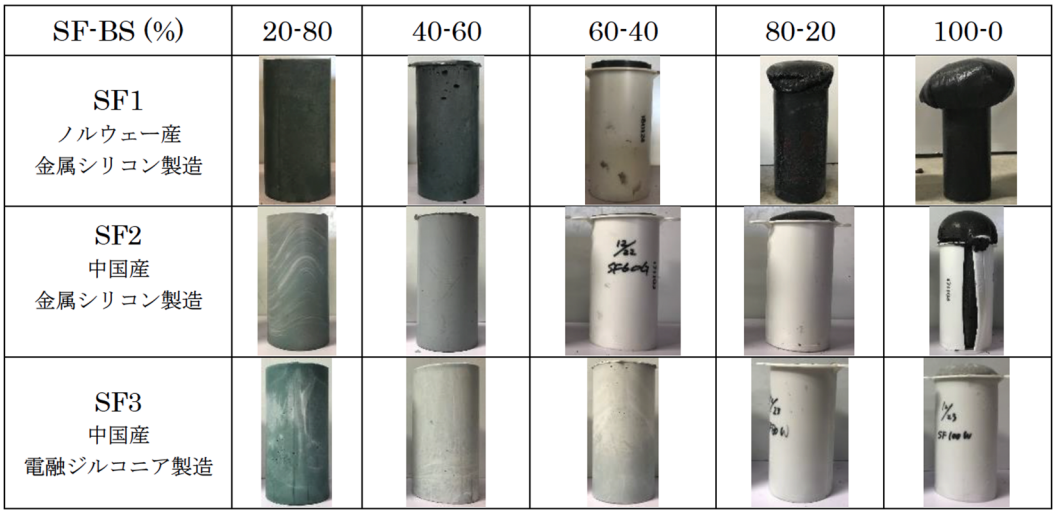
● 硬化後の形状
<table>
<tr><td rowspan="2">養生</td><td colspan="3">FA-SF-BFS(%)</td></tr>
<tr><td>60-20-20</td><td>40-40-20</td><td>20-60-20</td></tr>
<tr><td>60℃</td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>20℃,
60%R.H</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>
● 圧縮強度
（養生：20℃，60%R.H，材齢 28 日）
 

＜提示されている知見・課題＞
● SF 置換率を増加させると，SF が有する大きな比表面積の影響を受け，GP ペーストのフロー値が減少し，SF 置換率が大きいほど練混ぜが困難になる。
● SF 置換率が小さく，かつ BFS 置換率を大きくするほど GP の圧縮強度が増加するが，極端に BFS 置換率が大きいと凝結時間が短くなり，練混ぜが困難になる。
● SF 置換率が大きいほど，かつ BFS 置換率が小さくなるほど（40%以下），硬化過程における化学反応に伴って発生する水素ガスにより，硬化後の GP 供試体が膨張し，圧縮強度が低下する傾向がある。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 7）

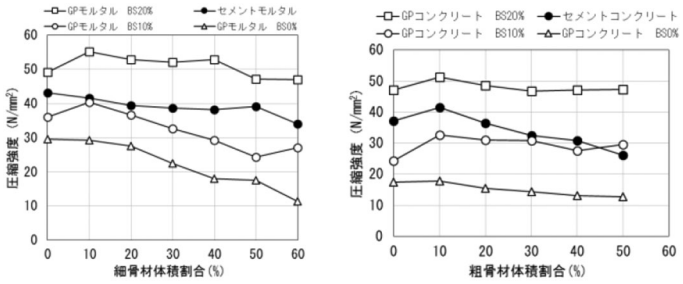
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性状：流動性，力学・変形性能：圧縮強度</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>高炉スラグ微粉末，シリカフューム 3 種類</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">伊藤彰利，ポンマハーサイパラミ，畑中重光：シリカフュームを用いたジオポリマーペーストのフロー値･圧縮強度に関する基礎的研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.41，No.1，pp. 1967-1972，2019.7</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">製造起源が異なる 3 種類のシリカフュームを粉体として用いた場合の GP の基礎特性（流動性，硬化後の膨張，圧縮強度）を調べた。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：(BS 置換率：0～100%)
● アルカリ溶液：水ガラス 2 号（WG2），10mol/l の NaOH（NH），WG2:NH＝2：1
● 養生：60℃高温養生（材齢 1 日）</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：フロー値，圧縮強度</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● フロー値
 

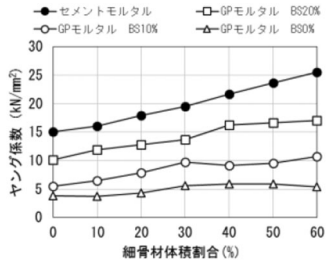
● 圧縮強度
 

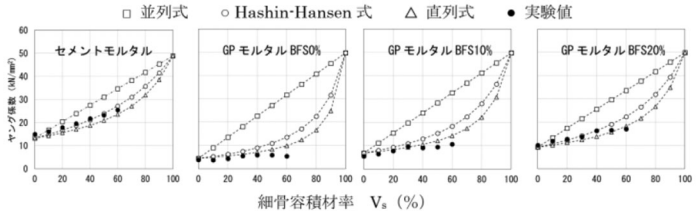
● 硬化後の形状
 

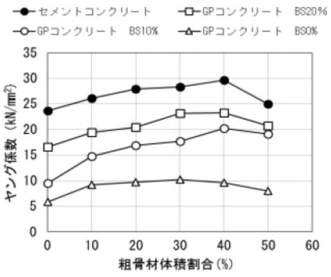
＜提示されている知見・課題＞
● シリカフューム置換率を増やすと，比表面積が大きいため，GP ペーストのフロー値が減少する傾向となる。
● シリカフューム置換率が増加すると，GP ペーストが膨張する傾向となる。また，膨張に伴う単位容積質量の減少が生じ，圧縮強度が低下する。
● シリカフュームの産地・主産物（製造由来）の種類が異なることによって，膨張量，流動性および圧縮強度が異なる。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

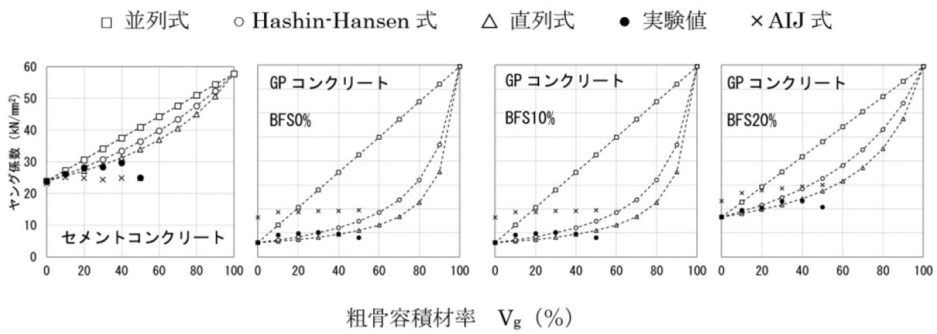
文献調査表（文献番号 8）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学・変形性能：圧縮強度，ヤング係数</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>ペースト，モルタル，コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ、高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">ポンマハーサイパラミ，伊藤彰利，畑中重光：圧縮強度と骨材量を変化させたジオポリマー硬化体のヤング係数に関する基礎的研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1949-1954，2019.7</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">高炉スラグ微粉末の置換率と骨材含有率を変化させた GP 硬化体のヤング係数を実験的に調べ，複合理論によるヤング係数の推定方法について検討を行った。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：(BS 置換率：0，10，20%)
● アルカリ溶液：水ガラス 2 号（WG2），10mol/l の NaOH（NH），WG2:NH＝2：1
● 養生：20℃60%R.H.常温養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：圧縮強度，ヤング係数，複合則理論によるヤング係数の推定</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● 圧縮強度
 

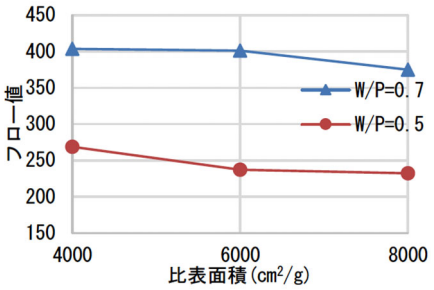
● ヤング係数
 

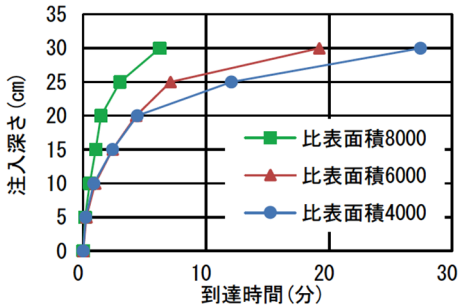
● ヤング係数の複合則理論による評価
 

 
</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">＜提示されている知見・課題＞
● 骨材容積率の増加に伴い GP 硬化体の圧縮強度が低下する。
● 骨材容積率の増加に伴い GP 硬化体のヤング係数は増加するが，骨材容積率が 40%を超えると増加しなくなる，もしくは低下する。
● GP 硬化体のヤング係数は，骨材容積率 40%以下においては複合則理論により概ね推定することが可能である。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

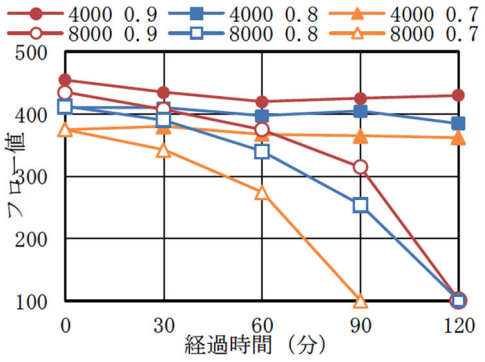
文献調査表（文献番号 9）

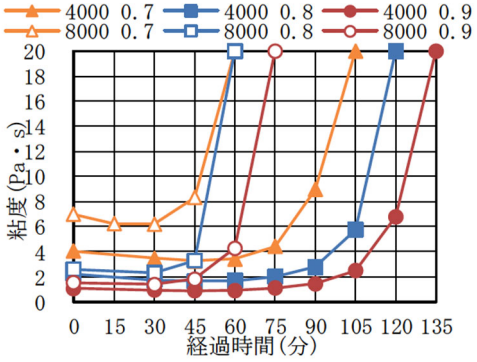
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性状：流動性、凝結性、他：注入性能</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ、高炉スラグ微粉末（4000 級、6000 級、8000 級）</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">五百蔵沙耶，伊藤彰利，畑中重光：異なる比表面積の高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの強度発現性および簡易注入試験に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1961-1966，2019.7</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">ジオポリマーのひび割れ注入材としての活用を目的とし、高炉スラグ微粉末の比表面積がフロー値、凝結時間、強度に及ぼす影響の確認、および簡易注入試験行っている。ジオポリマーのひび割れ注入材としての可能性を示している。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BS 置換率：20，40%）、（BS 比表面積：4000 級, 6000 級, 8000 級）
● アルカリ溶液：（W/P：0.5, 0.7），（Si/A 比：0.626）
● 養生：20℃，60%RH</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：フロー値、凝結時間、圧縮強度、注入性状※
※ 塩ビ板による擬似ひび割れ注入試験（ひび割れ幅：0.2mm）</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● 0 打フロー
 

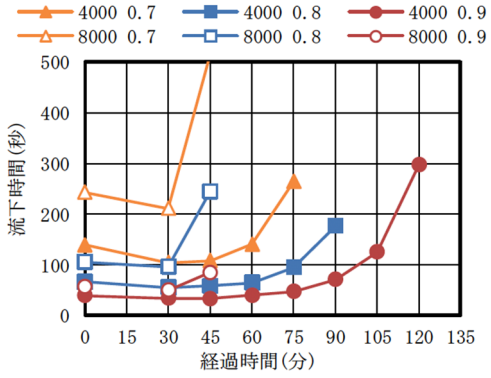
● 凝結時間
<table>
<tr><th>記号</th><th>BS比表面積</th><th>始発時間</th><th>終結時間</th></tr>
<tr><td>FA100</td><td></td><td>194h</td><td>294h</td></tr>
<tr><td>FA80BS20</td><td>4000</td><td>3h59m</td><td>10h13m</td></tr>
<tr><td></td><td>6000</td><td>2h17m</td><td>5h4m</td></tr>
<tr><td></td><td>8000</td><td>1h32m</td><td>3h12</td></tr>
<tr><td>FA60BS40</td><td>4000</td><td>2h56m</td><td>4h10m</td></tr>
<tr><td></td><td>6000</td><td>1h25m</td><td>2h14m</td></tr>
<tr><td></td><td>8000</td><td>42m</td><td>58m</td></tr>
</table>
● 圧縮強度
<table>
<tr><th>記号</th><th>W/P</th><th>BS比表面積</th><th>圧縮強度(N/mm²)</th></tr>
<tr><td>FA100</td><td>0.5</td><td></td><td>13.4</td></tr>
<tr><td>FA80BS20</td><td>0.5</td><td>4000</td><td>46.6</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>6000</td><td>55.1</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>8000</td><td>69.8</td></tr>
<tr><td>FA60BS40</td><td>0.5</td><td>4000</td><td>104.5</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>6000</td><td>87.6</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>8000</td><td>100.9</td></tr>
<tr><td></td><td>0.7</td><td>4000</td><td>65.2</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>6000</td><td>67.6</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>8000</td><td>67.2</td></tr>
</table>
● 注入深さ、注入速度
<table>
<tr><td>W/P</td><td>0.5</td><td></td><td>0.7</td></tr>
<tr><td>記号</td><td>FA80BS20</td><td>FA60BS40</td><td>FA60BS40</td></tr>
<tr><td>BS4000</td><td>5cm ×</td><td>5cm ×</td><td>30cm ○</td></tr>
<tr><td>BS6000</td><td>0cm ×</td><td>10cm ×</td><td>30cm ○</td></tr>
<tr><td>BS8000</td><td>5cm ×</td><td>5cm ×</td><td>30cm ○</td></tr>
</table>


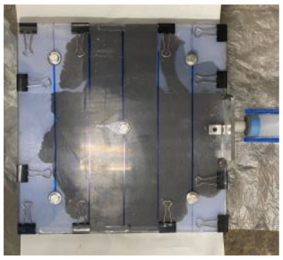
＜提示されている知見・課題＞
● BS 比表面積および BS 置換率が大きいほど、凝結時間は短くなり、圧縮強度は大きくなる。
● W/P が大きいほどフロー値は増加する。
● W/P=0.7 の場合、0.2mm 幅のひび割れに注入可能であった。
● BS 比表面積が大きいほど、注入速度は速くなる傾向が見られた。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 10）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性状：流動性、粘度、他：注入性能</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ、高炉スラグ微粉末（4000 級、8000 級）</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">五百蔵沙耶，ポンマハーサイパラミ，畑中重光：ひび割れ注入材用ジオポリマーペーストの可使時間に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1786-1791，2020.7</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">流動性、粘度および可使時間に BS 比表面積と W/P が及ぼす影響を調べることを目的とし、試験を行っている。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BS 置換率：40%），BS 比表面積（4000 級，8000 級）
● アルカリ溶液：（W/P：0.7, 0.8, 0.9），（Si/A 比：0.626）
● 養生：20℃，60%RH</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● フロー値および粘度の経時変化
● 擬似ひび割れ注入試験</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● フロー値の経時変化
 

● 粘度の経時変化
 

● 流下時間の経時変化
 

● 注入可能な最大時間（可使時間）
 
注入可能例
<table>
<tr><th>BS比表面積</th><th>W/P</th><th>可使時間（分）</th><th>注入時の粘度（Pa・s）</th></tr>
<tr><td>4000</td><td>0.7</td><td>100</td><td>16</td></tr>
<tr><td></td><td>0.8</td><td>110</td><td>10</td></tr>
<tr><td></td><td>0.9</td><td>130</td><td>14</td></tr>
<tr><td>8000</td><td>0.7</td><td>30</td><td>6</td></tr>
<tr><td></td><td>0.8</td><td>50</td><td>8</td></tr>
<tr><td></td><td>0.9</td><td>60</td><td>4</td></tr>
</table>
＜提示されている知見・課題＞
● BS4000 級では、経過時間 120 分後においても安定したフロー値を示した。
● BS 比表面積が大きいほど、粘度が増加する時間が早くなる傾向が見られた。
● W/P が大きいほど、また、BS 比表面積が小さいほど、可使時間は長くなる。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 11）

評価性能・特性		力学・変形性能：圧縮　耐久性能：耐凍害性
硬化体タイプ		モルタル
作製条件	養生	常温養生
	粉体種類	高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，火山灰
	アルカリ種類	ケイ酸ナトリウム，NaOH
文献情報		勝野太市，吉野千紘，佐川孝広：火山ガラス微粉末のジオポリマーへの適用，第 74 回セメント技術大会講演要旨，pp.172-173, 2020
研究概要		異なる粉体構成比，A/W 比での強度発現性，塩水使用の凍結融解抵抗性を評価。
配合・養生概要		● 粉体構成：高炉スラグ微粉末 4000，火山灰 or フライアッシュ(25, 50, 75%置換), ● アルカリ溶液：水ガラス 2 号，NaOH　A/W=0.101, 0.134, 0.150 の 3 点 ● 養生：20℃封緘
試験概要		● 評価特性：圧縮強度，3 %NaCl 溶液での凍結融解試験にてスケーリング量測定

主な知見

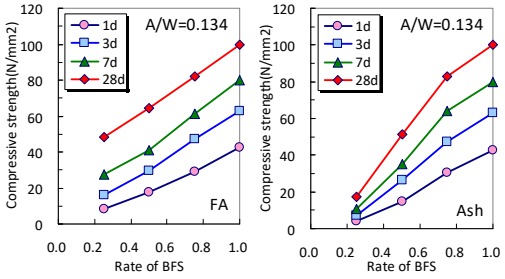
●圧縮強度

A/W (mol/mol)	Si/A (mol/mol)	P(mass) BFS	P(mass) ASH	GW/P	圧縮強度(N/mm2) 1日	3日	7日	28日
0.101	1.262	1	0	0.65	24.3	55.6	76.2	108.4
		0.75	0.25	0.65	2.8	33.7	60.2	93.5
		0.5	0.5	0.65	0.0	0.9	27.9	60.4
		0.25	0.75	0.65				1.2
0.134	0.605	1	0	0.77	42.8	63.0	79.8	99.9
		0.75	0.25	0.76	30.7	47.4	63.9	83.0
		0.5	0.5	0.81	14.9	26.5	34.9	51.4
		0.25	0.75	0.92	4.1	7.3	10.6	17.0
			FA					
		1	0	0.77	42.8	63.0	79.8	99.9
		0.75	0.25	0.77	29.1	47.3	61.2	82.2
		0.5	0.5	0.77	17.7	29.8	41.1	64.3
		0.25	0.75	0.68	8.2	16.3	27.4	48.1
0.150	0.394	1	0	0.70	43.4	54.4	66.4	88.0
		0.75	0.25	0.77	28.3	35.9	43.3	58.5
		0.5	0.5	0.83	14.7	19.4	22.8	30.5
		0.25	0.75	0.93	3.5	6.9	9.1	15.1

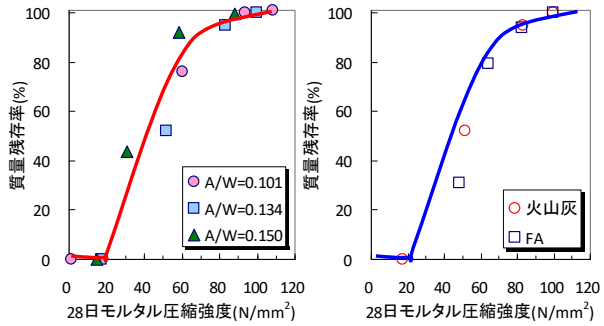
●フライアッシュおよび火山灰の特性

	粉末度 (cm²/g)	密度 (g/cm³)	ガラス化率 (%)
ASH	3710	2.34	89.7
FA	4010	2.29	82.6

●BFS の置換率と圧縮強度の関係



●圧縮強度と凍結融解試験 10 サイクル時の質量残存率との関係

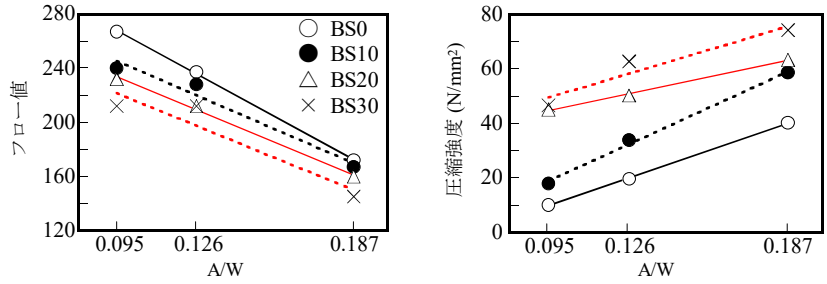


＜提示されている知見・課題＞

- ✓ FA に比較して火山灰の活性は低い
- ✓ 常温養生では，BFS 置換率が高いほど圧縮強度は大きい
- ✓ 塩水環境での凍結融解抵抗性は，粉体･溶液構成を問わず圧縮強度に依存する

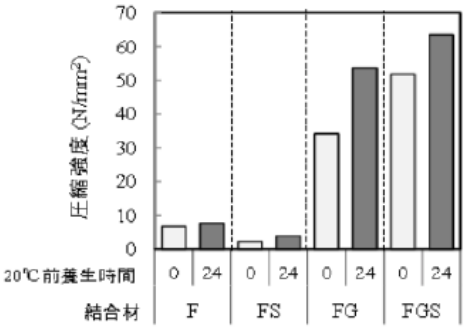
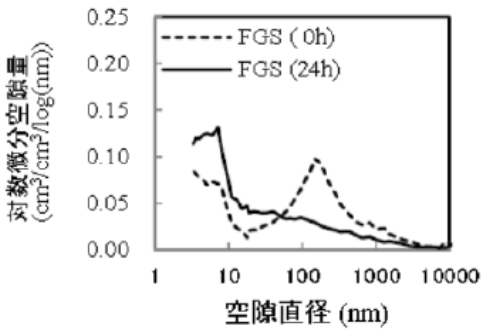
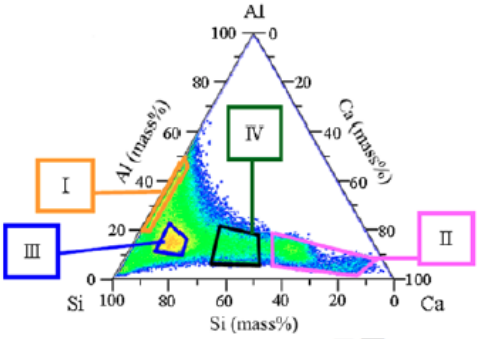
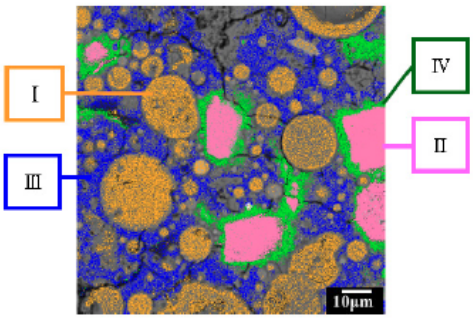
備考	

文献調査表（文献番号 12）

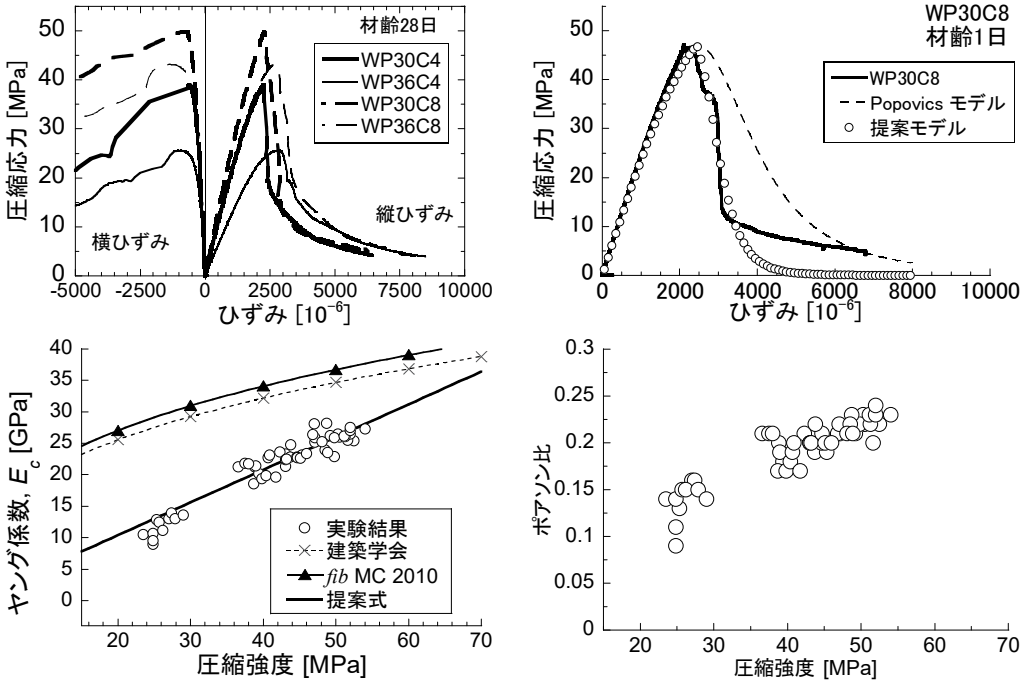
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性状：流動性、耐久性：耐熱性</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル、ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生種類</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ、高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">一宮一夫，秋永史也，原田耕司，池田　攻：フライアッシュ系ジオポリマーのアルカリ水比とフロー値ならびに高温加熱による外観や強度変化の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1851-1856，2018</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">アルカリ水比（A/W 比）がフロー値と強度に及ぼす影響、および高温加熱が供試体の諸性状に及ぼす影響の把握を目的とし、試験検討を行っている。高温下での形状安定性を推定する試験法を提案している。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BS 置換率：0，10，20，30%）
● アルカリ溶液：（A/W 比：0.095，0.126，0.187），（Si/A 比：0.613）
● 養生：60℃×3h 保持</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：フロー値、圧縮強度、高温加熱時の形状安定性、内部構造観察（SEM）、熱分析（TG-DTA）、構成物（XRD）
※加熱条件：電気マッフル炉，最高温度 500，800，1000，1150℃，保持時間 2 時間</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● フロー値，加熱前の圧縮強度
 

● 高温時の形状安定性（図中の左から BS0，10，20，30%）
<table>
<tr><td></td><td>A/W=0.095</td><td>A/W=0.126</td><td>A/W=0.187</td></tr>
<tr><td>1000℃</td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>800℃</td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
</table>
＜提示されている知見・課題＞
✓ アルカリ水比（A/W）は，フロー値や常温時の圧縮強度と強い相関関係にある。
✓ 加熱冷却後の GP の色調・強度・形態は，A/W や BS 置換率により大きく異なる。
✓ A/W が大きいほど溶融しやすい傾向にある。
✓ 棒状ペースト供試体の加熱冷却後の形態から，高温時の形状安定性を推定できる</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 13）

評価性能・特性		力学・変形性能：圧縮、他：微細構造
硬化体タイプ		モルタル、ペースト
作製条件	養生	高温養生
	粉体種類	フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフューム
	アルカリ種類	NaOH
文献情報	菊地道生，山本武志，大塚拓：結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38 ，No.1 ，pp.2283-2288，2016	
研究概要	粉体構成および前養生が、ジオポリマーの強度と空隙構造、および生成物に及ぼす影響の把握を目的とし、試験検討を行っている。	
配合・養生概要	● 粉体構成：4 種類、F(フライアッシュ 100%)，FS(シリカフューム 5%置換)，FG(高炉スラグ 25%置換)，FGS(高炉スラグ 25%置換、シリカフューム 5%置換) ● アルカリ溶液：NaOH 濃度 22%溶液 ● 養生：20℃×0h or 24h 保持→80℃×24h 保持	
試験概要	● 評価特性：圧縮強度、細孔径分布、XRD、EPMA	
主な知見	 図　各種供試体の圧縮強度  図　FGS 硬化体の空隙径分布  (a)　Al-Ca-Si 三元図  (b)　マッピング図 図　微小領域 EPMA による FGS 硬化体断面の観察結果 ＜提示されている知見・課題＞ ✓ 高炉スラグ混和（FG）、さらにシリカフューム混和（FGS）により強度増進する。 ✓ FG と FGS は、前養生により顕著に強度増進する。 ✓ 粉体構成の違いと前養生の有無による強度増進は、固化体組織の緻密化による。 ✓ FG および FGS における固化体組織の緻密化は、スラグ粒子周囲における C(-A)-S-H の生成に起因すると推察される。	
備考		

文献調査表（文献番号 14）

評価性能・特性		力学・変形性能：圧縮
硬化体タイプ		コンクリート
作製条件	養生種類	高温養生
	粉体種類	フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフューム
	アルカリ種類	NaOH
文献情報		Atsushi Shibayama and Michio Kikuchi, COMPRESSIVE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE MADE WITHOUT THE USE OF WATER GLASS FOR ALKALI ACTIVATION, fib Symposium 2019 Krakow
研究概要		各種ジオポリマーコンクリート（GPC）の圧縮応力ひずみ関係、弾性係数の把握を目的とし、試験検討を行っている。また、力学特性の定式化を図っている。
配合・養生概要		● 養生：20℃×4h 保持→80℃×4h or 8h 保持
試験概要		● 評価特性：圧縮強度（材齢変化）、ひずみ、静弾性係数、ポアソン比
主な知見		 ＜提示されている知見・課題＞ ✓ セメントコンクリート用圧縮応力ひずみ評価モデルの GPC への適用性は低い。 ✓ GPC 用の圧縮応力ひずみ評価モデル（弾性係数評価式、最大ひずみ評価式等）を構築・提案している。 ✓ ポアソン比は、セメントコンクリートと同程度である。
備考		著作権の関係により、上記の図は原著と異なる。

文献調査表（文献番号 15）

評価性能・特性		反応性
硬化体タイプ		ペースト
作製条件	養生	高温養生（60℃）
	粉体種類	フライアッシュ II 種相当
	アルカリ種類	NaOH　5mol/L
文献情報		新大軌，小林将也，田中秀和，林建佑，内田俊一郎：アルカリ刺激剤によるフライアッシュの反応，日本セラミックス協会 2017 年年会講演予稿集，東京都，CD-ROM
研究概要		混合セメントにおけるフライアッシュのポゾラン反応では、フライアッシュのガラス化率や塩基度が重要である。一方、ジオポリマーの原料としてフライアッシュを使用する場合の反応メカニズムについては不明な点が多く、フライアッシュのキャラクターが反応速度や生成物に及ぼす影響についても明確ではない。本研究では、アルカリ刺激剤によるフライアッシュの反応メカニズムを検討することを目的にガラス相の反応性および反応生成物を検討した。
配合・養生概要		● 活性フィラー：FA JIS2 種相当灰 3 種類 ● アルカリ溶液：NaOH 5mol/L 水溶液（粉体体積比 1 : 1） ● 湿空条件 60°C
試験概要		● 湿空条件 60°C で、所定の材齢（1 , 3 , 7 , 14 , 28 日）まで養生し、ジオポリマー硬化体を作製した。その試料を脱型、粉砕し、XRD（リガク、Mini-flex）で生成物を同定した。
主な知見		＜提示されている知見・課題＞ ・22 度のフライアッシュ中の非晶質相由来の XRD のブロードなピークは養生日数が経過すると減少した。一方、養生日数が経過すると 32 度付近にブロードなピークが出現した。 ・養生日数が経過するにしたがって 22 度におけるピークの強度（フライアッシュ中の非晶質由来）は減少しており、NaOH 水溶液中でフライアッシュ中の非晶質相の溶解反応が進んでいるものと考えられる。 ・32 度におけるピーク（生成した非晶質のジオポリマー（GP）由来）は養生日数が経過するにしたがい増加しており、これはジオポリマー反応が進行することで非晶質の反応生成物が生成し、増加しているものと考えることができる。
備考		

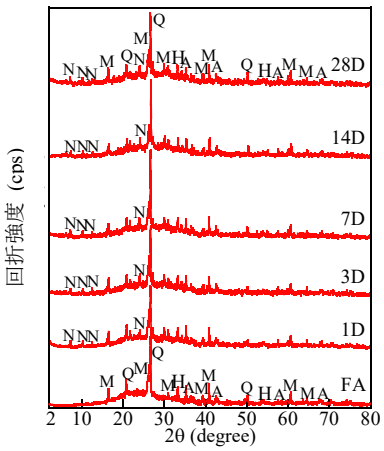


図 1　FA-A を用いたジオポリマー硬化体の XRD パターン変化

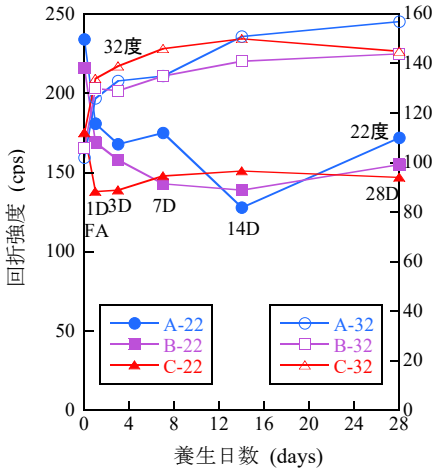


図 2　FA-A, B, C を用いたジオポリマー硬化体の 22 度（FA 由来）および 32 度（GP 由来）の X 線回折強度の変化

文献調査表（文献番号 16）

評価性能・特性		反応メカニズム、膨張性能
硬化体タイプ		ペースト、モルタル
作製条件	養生	加熱養生（60℃）
	粉体種類	フライアッシュ、高炉スラグ、膨張材
	アルカリ種類	NaOH 5mol/L
文献情報		中村丞吾，新大軌，宇城正貴，島崎大樹：ジオポリマーにおける膨張材の水和反応に関する研究，コンクリート工学年次論文集，No.40，pp.1833-1838（2018）
研究概要		セメントコンクリートと比較してジオポリマーコンクリートの方が配合によっては乾燥収縮が大きいことが指摘されており，ジオポリマーコンクリートに収縮抵抗性を付与するためには膨張材の併用が必要不可欠であると考えられる。そこで，本研究ではジオポリマーに膨張材を一部置換したジオポリマーの長さ変化率の測定，反応生成物を解析した。
配合・養生概要		● 活性フィラー：フライアッシュⅡ種、高炉スラグ 6000（8:2 で混合） ● 膨張材；エトリンガイト・石灰複合系膨張材（P-CSA 系膨張材）とカルシウムサルフォアルミネート系膨張材（CSA 系膨張材） ● アルカリ溶液：NaOH 5mol/L 水溶液（粉体体積比 1：1） ● P-CSA 系膨張材では 3.0%，6.0%，9.0%ジオポリマーに膨張材を置換、CSA 膨張材では 4.5%,9.0%,13.5%、ジオポリマーに膨張材を置換 ● 湿空条件 60°C
試験概要		● ジオポリマーに対してエトリンガイト・石灰複合(P-CSA)系膨張材とカルシウムサルフォアルミネート(CSA)系膨張材の 2 種類を添加し，長さ変化率および反応生成物を評価した。
主な知見		＜提示されている知見・課題＞ ・膨張材をジオポリマーに添加することにより材齢初期に OPC モルタルと同等かそれ以上の膨張が導入でき，ジオポリマーに膨張材を添加するほど膨張量が大きくなる。 ・P-CSA 系膨張材よりも CSA 系膨張材の方が膨張量は小さく膨張材の効果が低下する。 ・セメントの場合は膨張材を添加することで，エトリンガイトが生成した。一方ジオポリマーでは CSA 系，P-CSA 系のいずれの膨張材を用いてもエトリンガイトは生成せず，Na 型の AFm($NaCa_4Al_2O_6(SO_4)_{1.5}\cdot 15H_2O$)(AFm(Na))が生成した。pH=14 以上の高 pH 環境下ではエトリンガイトが不安定となり安定して存在することができず，Na 型の AFm(Na)を生成したのではないかと考えられる。
備考		

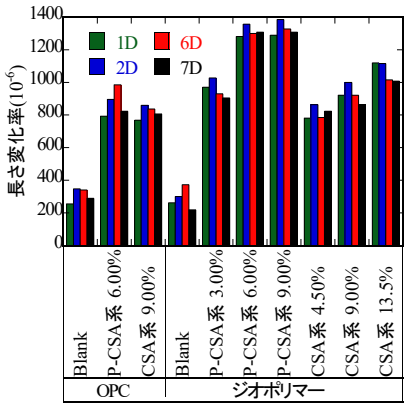


図 1　GP モルタルと OPC モルタルの長さ変化率

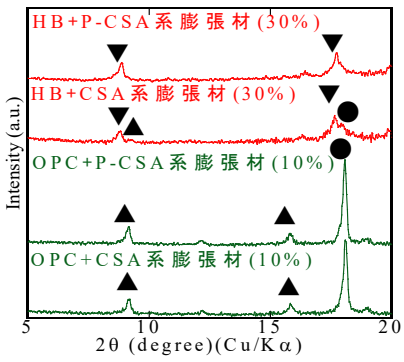
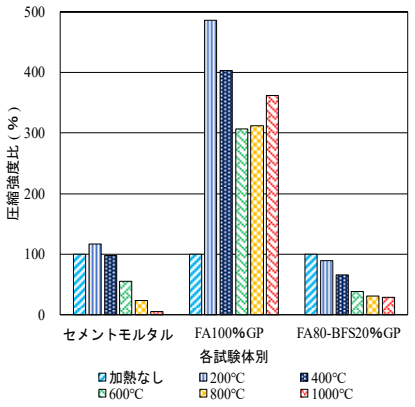


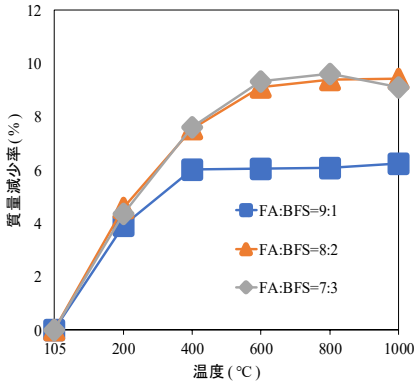
図-2　ジオポリマーと OPC に膨張材を置換した際の生成物の比較

文献調査表（文献番号 17）

評価性能・特性		耐火性
硬化体タイプ		ペースト、モルタル
作製条件	養生	加熱養生（60℃）
	粉体種類	フライアッシュ、高炉スラグ
	アルカリ種類	水ガラス、NaOH 12mol/L
文献情報		八代大生，新大軌，周藤将司，三代龍之輔：高温環境下におけるジオポリマー硬化体の物理的および化学的変化，コンクリート工学年次論文集，No.42，pp.1792-1797（2020）
研究概要		ジオポリマーの耐火材料としての適用を目的としフライアッシュ（FA）100%のジオポリマー（FAGP）およびフライアッシュに高炉スラグ（BFS）を一部置換したハイブリッド型ジオポリマー（HBGP）の高温環境下での変形性や物理的および化学的変化などをセメントと物理的および化学的観点から比較検討し，さらに高炉スラグ置換率がジオポリマーの耐火性に及ぼす影響についても検討を加えた。
配合・養生概要		● 活性フィラー：フライアッシュⅡ種、高炉スラグ（8:2 で混合） ● アルカリ溶液：NaOH 12mol/L 水溶液 ● 加熱養生 60°C1 日
試験概要		● 圧縮強度試験（材齢 28 日） ● X 線回折による構成相の分析 ● 強熱減量
主な知見		＜提示されている知見・課題＞ ・セメントモルタルおよび FA80-BFS20%HBGP モルタルは加熱に伴い，圧縮強度が低下する傾向が確認された。圧縮強度低下の理由としては，セメントペースト中に含まれる CH や C-S-H および FA80-BFS20%HBGP 中に存在する C-A-S-H が強熱により熱分解を受け組織の微細構造が粗になることで生じていると考えられる。 ・FAGP モルタルは加熱によって強度低下は生じず、むしろ増加した。 ・FA への BFS の置換率を 10，20，30%に変化させて BFS の最適置換率を考察した結果，BFS10%の HBGP が加熱による質量減少率が低く，C-A-S-H の生成が少ないと考えられ，BFS の置換率は 10%が耐火性に悪影響を与えない置換率であると考えられる。
備考		

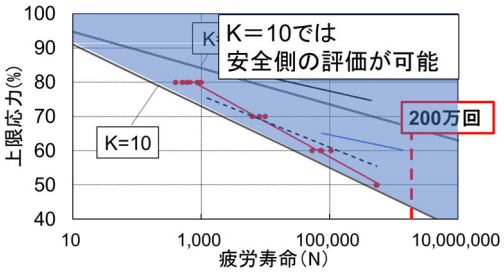


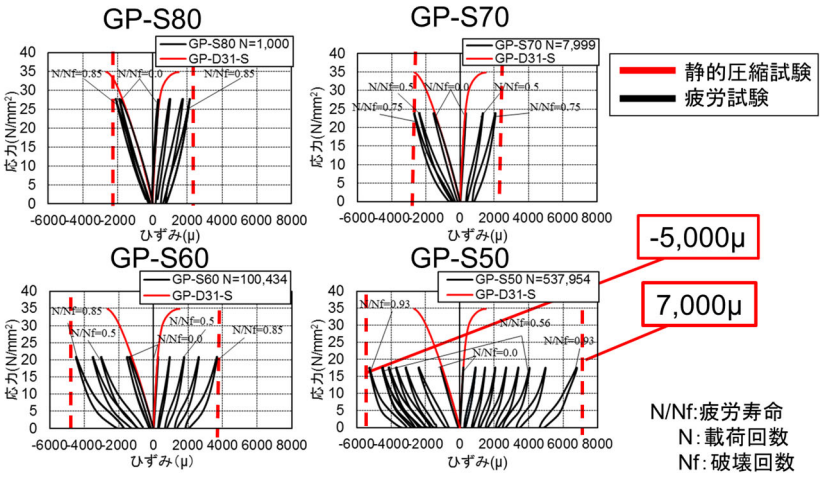
図－1．各モルタル試料の加熱に伴う圧縮強度の変化



図－9．BFS 含有率の異なる HBGP の加熱による質量減少率の変化

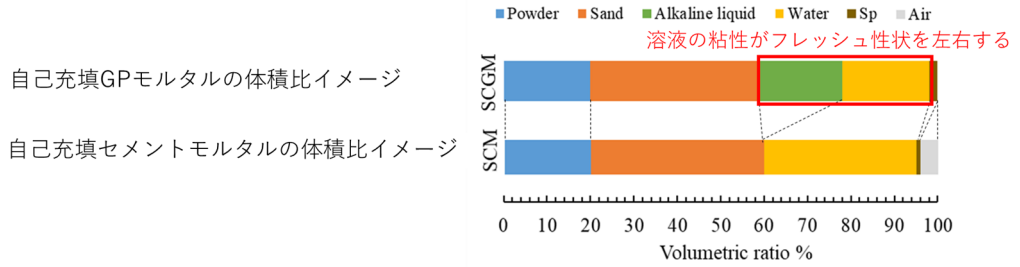
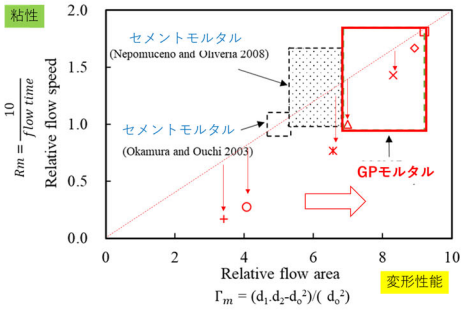
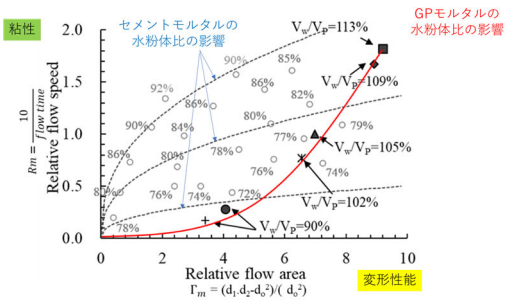
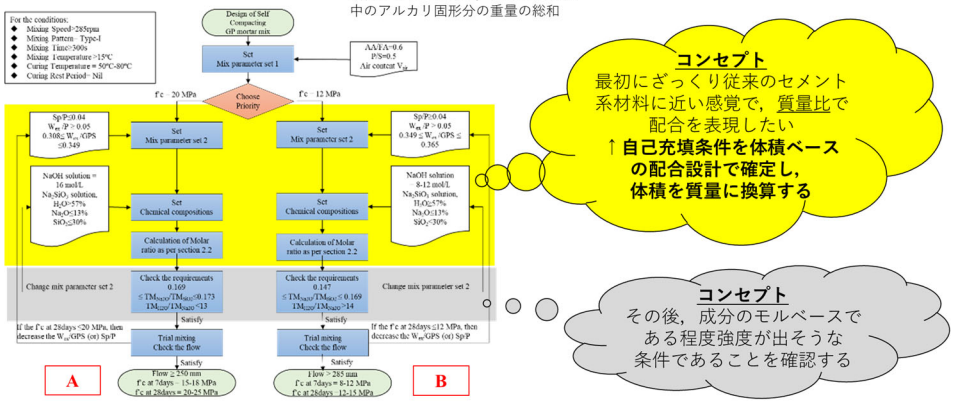
文献調査表（文献番号 18）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学特性(疲労)</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>加温　50℃72hours</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH 水溶液 8mol/L＋JIS 水ガラス 1 号</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">Ryojiro KATO, Chikako FUJIYAMA and Januarti Jaya Ekaputri : FATIGUE STRENGTH AND DEFORMATION BEHAVIOR OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE，コンクリート工学年次論文集　41 (1)　1997 - 2002　2019 年 7 月</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">フライアッシュベースジオポリマーに対して一軸圧縮疲労試験を行い，コンクリートの疲労強度，また繰返し荷重下における変形性能について比較検討した.</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">
<table>
<tr><th rowspan="2">W/B</th><th rowspan="2">Si/A</th><th rowspan="2">s/a</th><th colspan="7">単位体積重量(kg/m³)</th></tr>
<tr><th>WG</th><th>W</th><th>NaOH</th><th>FA</th><th>S</th><th>G</th><th>SP</th></tr>
<tr><td>53.8</td><td>3.76</td><td>36.4</td><td>161</td><td>38</td><td>79</td><td>517</td><td>548</td><td>959</td><td>1.61</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">
<table>
<tr><th>試験名</th><th>Smax (%)</th><th>Smin (%)</th><th>載荷速度 (Hz)</th><th>試験体数 （体）</th></tr>
<tr><td>GP-S80</td><td>80</td><td rowspan="4">10</td><td rowspan="4">5</td><td>5</td></tr>
<tr><td>GP-S70</td><td>70</td><td>3</td></tr>
<tr><td>GP-S60</td><td>60</td><td>3</td></tr>
<tr><td>GP-S50</td><td>50</td><td>3</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">＜提示されている知見・課題＞


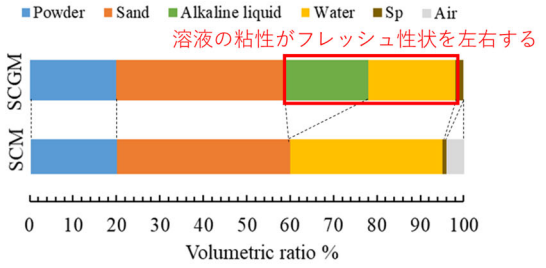
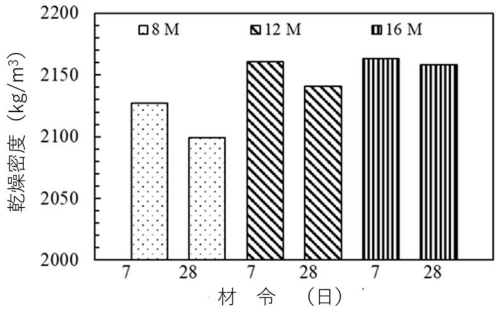
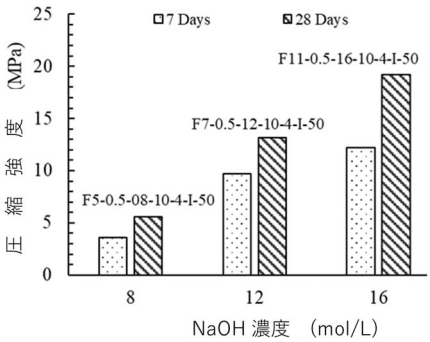


その結果，ジオポリマーコンクリートの 200 万回圧縮疲労強度はセメントコンクリート，水中のセメントコンクリート，軽量コンクリートの圧縮疲労強度より低いことがわかった。疲労破壊近傍では弾性係数はセメントコンクリートより低く，ポアソン比は大きい値であった。また疲労破壊近傍において縦ひずみは最大約-5000 μ，横ひずみは 7000 μ となり，横ひずみが卓越することがわかった。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

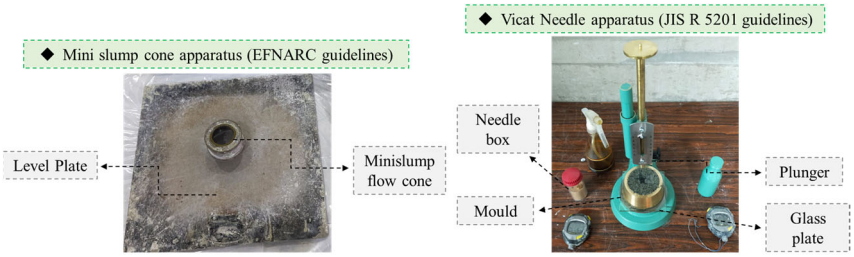
文献調査表（文献番号 19）

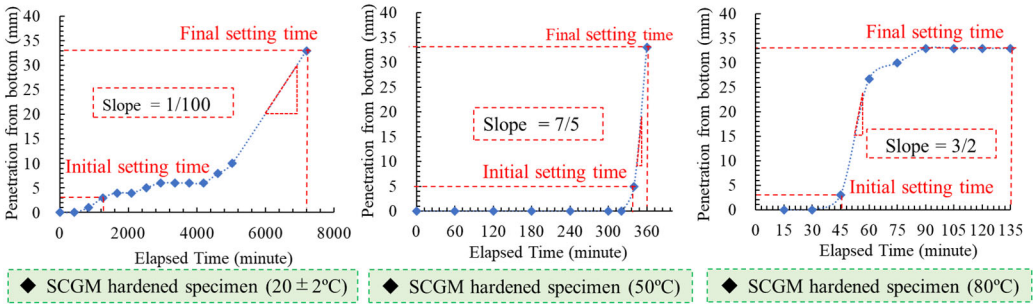
評価性能・特性		配合と流動性
硬化体タイプ		モルタル
作製条件	養生	加温　70℃24hours
	粉体種類	フライアッシュ
	アルカリ種類	NaOH 水溶液 8mol/L＋JIS 水ガラス 1 号
文献情報		M. T. Ghafoor, C. Fujiyama and K.Maekawa, Mix design processing for self compacting geopolymer mortar, Advanced concrete technology, 19 (11)　1133 - 1147　2021 年 11 月
研究概要		フライアッシュベースジオポリマーに対して各種パラメータが流動性に及ぼす影響を調べ，自己充填性を有する配合の決定法を提案した．
配合・養生概要		 基本は 70℃24 時間，詳細は続編の論文に記載
試験概要		モルタルフローおよびロート通過時間
主な知見		＜提示されている知見・課題＞   配合決定フローチャート Geo-polymer solid（GPS）： 活性フィラー粉体と，アルカリ溶液中のアルカリ固形分の重量の総和  ● GP モルタルでは，フローよりもフロー速度の感度が明らかに低い． ● GP では水粉体比 Vw/Vp が 100%程度よりも低い場合，フロー速度が遅い． ● 高性能減水剤はフローの増加をもたらすが，フロー速度への寄与は小さい． ● これらはアルカリ溶液の粘性が高いためである．
備考		

文献調査表（文献番号 20）

評価性能・特性		力学特性
硬化体タイプ		モルタル
作製条件	養生	加温　70℃24hours　など
	粉体種類	フライアッシュ
	アルカリ種類	NaOH 水溶液 8mol/L＋JIS 水ガラス 1 号
文献情報		M. T. Ghafoor, C. Fujiyama and K.Maekawa, Hardened Mechanical Properties of Self Compacting Geopolymer Mortar, Advanced concrete technology, 20 (4), pp.287-299, 2022.04
研究概要		フライアッシュベースジオポリマーに対して各種パラメータが圧縮強度等に及ぼす影響を調べた.
配合・養生概要		自己充填GPモルタルの体積比イメージ 自己充填セメントモルタルの体積比イメージ 
試験概要		密度の測定，1 軸圧縮試験
主な知見		＜提示されている知見・課題＞   1.　NaOH モル濃度を 8M から 16M まで増加させると、SCGM の密度が連続的に増加した。測定された 7 日間の乾燥密度は 2047 kg/m3 - 2183 kg/m3 の範囲にあり、測定された 28 日間の乾燥密度は 2051 kg/m3 - 2158 kg/m3 の範囲にある。 2. ジオポリマー固形分に対する水の比率を 0.308 から 0.437 に，粉末に対する SP の比率を 2%から 8%に増加させると，SCGM の圧縮強度に大きな負の影響を与えることが判明した. 3. NaOH モル比は硬化温度の次に重要なパラメータであり，SCGM の強度発現に大きな影響を与える. 4. 乾式混合後湿式混合する練り混ぜパターンでは、285rpm 以上の高い混合速度で最適な強度が得られた。SCGM ペーストの高粘性は、均質な適切な練り混ぜのために高いミキサー速度を必要とした。 5. 硬化温度の 50° C から 80° C への上昇および硬化前の休止時間の短縮は、特に高い NaOH モル濃度において、SCGM の強度発現に著しい正の影響を及ぼした。 6. 水/ジオポリマー固形比 0.308-0.349，NaOH モル比 16M，硬化温度 50℃-80℃で，SCGM の 28 日圧縮強度は 20MPa 以上を達成し，良好な流動性を有する.
備考		

文献調査表（文献番号 21）

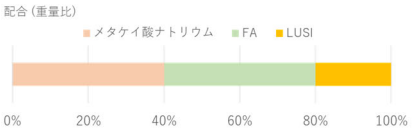
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性状</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>加温　70℃24hours　など</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH 水溶液 8mol/L＋JIS 水ガラス 1 号</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">M. T. Ghafoor, C. Fujiyama and K.Maekawa, FLOW RETENTION PROPERTY AND SETTING TIME OF SELF COMPACTING GEOPOLYMER MORTAR, Proceedings for the 6th fib International Congress 2022 Held in Oslo, Norway　493 - 502　2022 年 6 月</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">フライアッシュベースジオポリマーに対して様々な配合および温度湿度条件において，硬化速度とスランプロスを検討した．</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">
<table>
<tr><th>Mix ID</th><th>Fly ash</th><th>Sand</th><th>NaOH</th><th>NaOH</th><th>Na_2SiO_3</th><th>Extra Water</th><th>Super plasticizer</th><th>W/ GPS</th></tr>
<tr><th></th><th>kg/m³</th><th>kg/m³</th><th>M</th><th>kg/m³</th><th>kg/m³</th><th>kg/m³</th><th>kg/m³</th><th>Ratio</th></tr>
<tr><td>F1-16-2.5-15-4</td><td>545</td><td>1089</td><td>16</td><td>93</td><td>233</td><td>82</td><td>22</td><td>0.388</td></tr>
<tr><td>F2-8-2.5-10-4</td><td>545</td><td>1089</td><td>8</td><td>93</td><td>233</td><td>55</td><td>22</td><td>0.383</td></tr>
<tr><td>F3-12-2.5-10-4</td><td>545</td><td>1089</td><td>12</td><td>93</td><td>233</td><td>55</td><td>22</td><td>0.365</td></tr>
<tr><td>F4-16-2.5-10-4</td><td>545</td><td>1089</td><td>16</td><td>93</td><td>233</td><td>55</td><td>22</td><td>0.349</td></tr>
<tr><td>F5-16-2.5-5-4</td><td>545</td><td>1089</td><td>16</td><td>93</td><td>233</td><td>27</td><td>22</td><td>0.308</td></tr>
<tr><td>F6-8-1.5-15-8</td><td>545</td><td>1089</td><td>8</td><td>131</td><td>196</td><td>82</td><td>44</td><td>0.437</td></tr>
<tr><td>F7-8-1.5-10-6</td><td>545</td><td>1089</td><td>8</td><td>131</td><td>196</td><td>55</td><td>33</td><td>0.396</td></tr>
<tr><td>F8-8-1.5-5-4</td><td>545</td><td>1089</td><td>8</td><td>131</td><td>196</td><td>27</td><td>22</td><td>0.355</td></tr>
<tr><td>F9-8-1.5-15-6</td><td>545</td><td>1089</td><td>8</td><td>131</td><td>196</td><td>82</td><td>33</td><td>0.437</td></tr>
<tr><td>F10-8-1.5-15-4</td><td>545</td><td>1089</td><td>8</td><td>131</td><td>196</td><td>82</td><td>22</td><td>0.437</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">


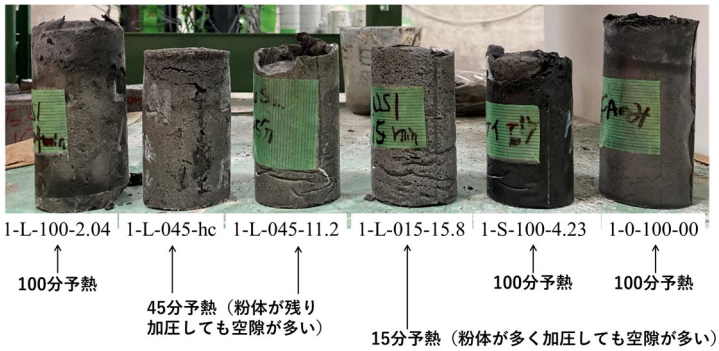
</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">＜提示されている知見・課題＞


SCGM は，常温（20±2°C），相対湿度 70%以上で 75 分間の流動性保持能力を有していた．
水／粉体比（Vw/Vp）および高性能減水剤／粉体比（Sp/P）が高いほど、フローリテンションにマイナスの影響を及ぼした。これは、蒸発の可能性が高くなるためと考えられる。
SCGM の硬化機構／硬化時間特性は、主に硬化温度に依存する。SCGM の硬化パターンは、常温（20±2°C）から 80°C までの硬化温度の上昇に伴い、急激に変化した．

</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

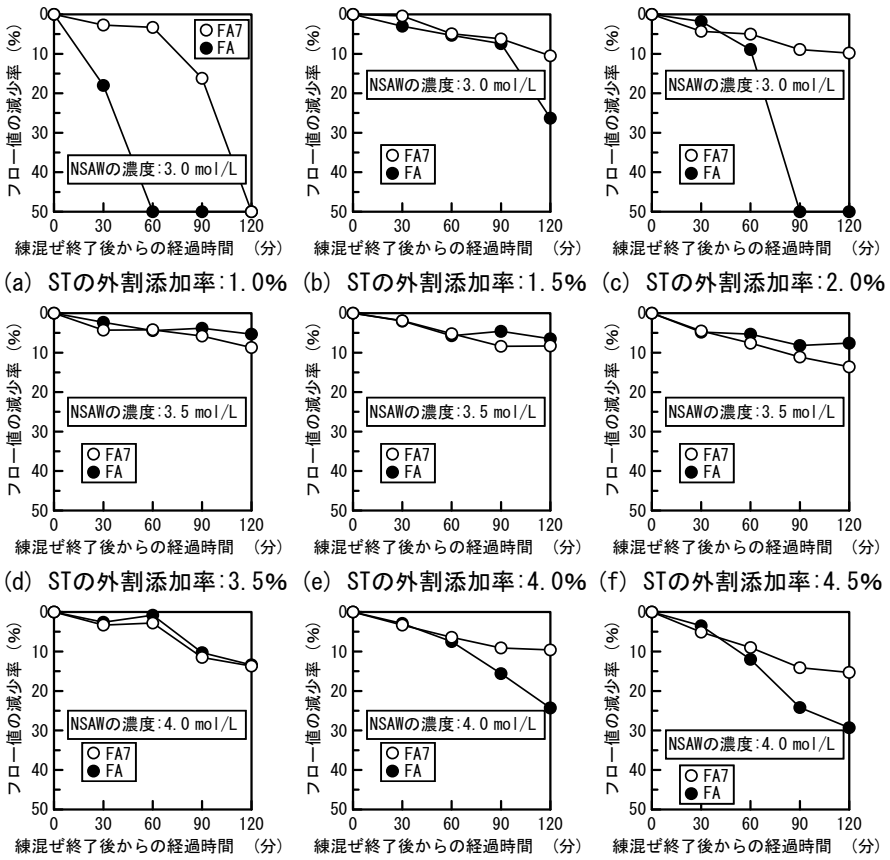
文献調査表（文献番号 22）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>配合</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>加温　70℃24hours</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，火山泥</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>メタケイ酸ナトリウム粉体</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">C. Fujiyama, D. Kanai, Y. Cui and J. J. Ekaputri : Dry mix geopolymer processing for utilization of indonesian volcanic mud，コンクリート工学年次論文集　44（1）　1090 - 1095 2022 年 7 月</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">高吸水性フィラーである火山泥 LUSI のドライミックス GP 処理について，メタケイ酸ナトリウム 9 水和物の粉末を用い，液体アルカリ活性剤を使用せずに検討した．その結果，LUSI を 400kg/m^3 配合した実用的な配合で，7 日後の圧縮強度が 31.8MPa となることを実証した．.</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2"> 

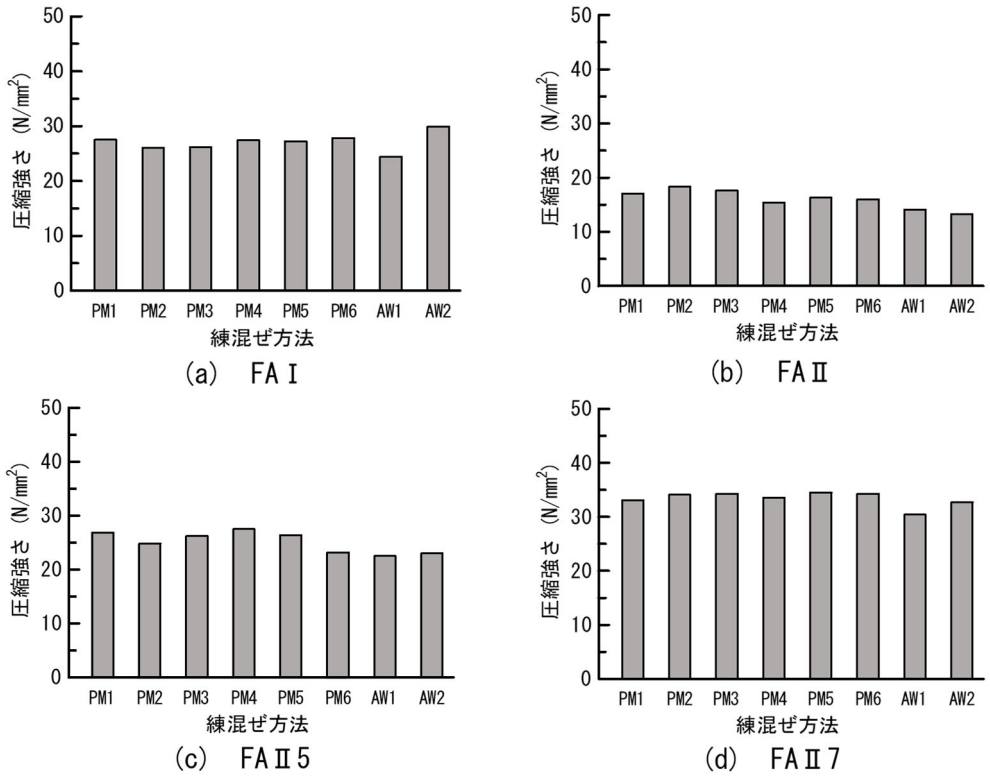
<table>
<tr><th>予熱温度</th><th>予熱時間</th><th>養生</th><th>圧縮強度</th></tr>
<tr><td>70°C</td><td>90min</td><td>70°C1d, 20°C6d</td><td>31.8MPa</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">＜提示されている知見・課題＞ 

加圧成形の品質は、材料の溶融状態に大きく影響される。溶融状態は、温度や時間だけでなく、炉内の位置、ラップの有無、容器の熱伝導率などの予熱条件に非常に敏感である。
メタケイ酸ナトリウムとフライアッシュの重量比（SM/FA）が 0.70 以上で、70～80℃でほぼ完全に溶融する場合は、加圧成形よりも鋳込み成型の方が十分な強度が得られる。
20MPa 前後の圧縮強度が必要な場合は、60℃以上、24 時間の養生が推奨される。
</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 23）

評価性能・特性		フロー値の経時変化
硬化体タイプ		モルタル
作製条件	養生	常温養生
	粉体種類	フライアッシュ
	アルカリ種類	メタケイ酸ナトリウム
文献情報	Batsuuri Ashidmaa，犬飼利嗣，関谷有紗加：フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーモルタルの圧縮強さ特性とフロー値の経時変化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2065-2070，2017	
研究概要	フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーモルタルに凝結遅延剤として添加した無水クエン酸（以下，ST）が，フロー値の経時変化に及ぼす影響について検討している。	
配合・養生概要	● 粉体：F（Ⅱ種，Ⅱ種微粉砕 7000g/cm^2） ● アルカリ添加剤：メタケイ酸ナトリウム水溶液（NS 水溶液）3～4mol/L，（AW/F：50%） ● 凝結遅延剤：無水クエン酸（ST）をF の外割で 1～7%添加	
試験概要	● 評価特性：フロー値，空気量	
主な知見	 (a) STの外割添加率:1.0% (b) STの外割添加率:1.5% (c) STの外割添加率:2.0% (d) STの外割添加率:3.5% (e) STの外割添加率:4.0% (f) STの外割添加率:4.5% (g) STの外割添加率:6.0% (h) STの外割添加率:6.5% (i) STの外割添加率:7.0% **フロー値の減少率と練混ぜ終了後からの経過時間の関係** ＜提示されている知見・課題＞ ● フロー値の経時変化は，NS 水溶液の濃度，FA の微粉砕の有無，および ST の外割添加率の条件によって一様ではない異なった傾向を示すので，最適な試験結果を得るにはより詳細な検討をする必要がある。	
備考		

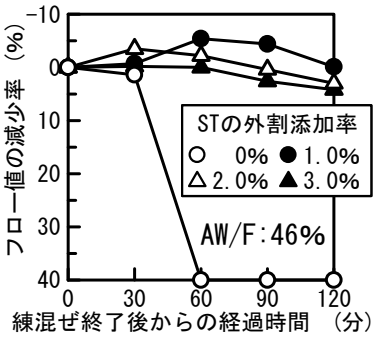
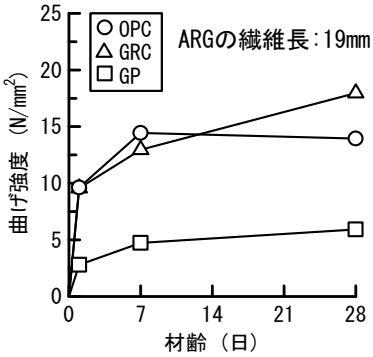
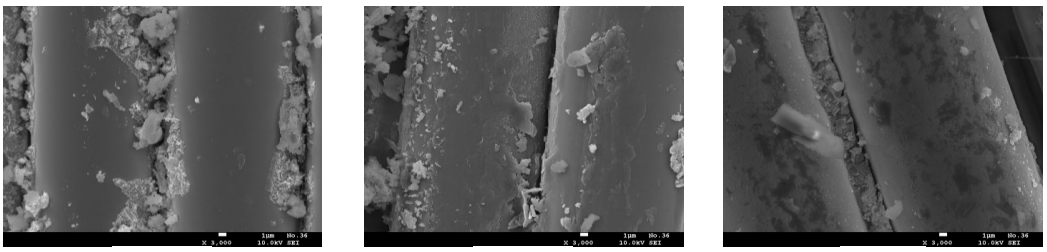
文献調査表（文献番号 24）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>練混ぜ方法</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>メタケイ酸ナトリウム</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">後藤　壮，犬飼利嗣，前川明弘，廣瀬　貴：ジオポリマーモルタルの練混ぜ方法と模擬乾燥スラッジ粉の混入率が圧縮強さに及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1943-1948，2019</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">NS を粉体で添加する PM 法と NS を水溶液で添加する AW 法が，ジオポリマーモルタルの圧縮強さに及ぼす影響について検討している。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体：FA（Ⅰ種，Ⅱ種，Ⅱ種微粉砕 5000 および 7000g/cm^2）
● アルカリ添加剤：アルカリ水溶液（AW）に換算して 3mol/L，（AW/FA：50%）
● 凝結遅延剤：無水クエン酸（ST）をＦＡの外割で 2%添加
● 養生：封緘養生（20℃，60%RH）
● 練混ぜ方法：PM 法 6 種類，AW 法 2 種類</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：フロー値，空気量，材齢 28 日圧縮強度</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2"> 

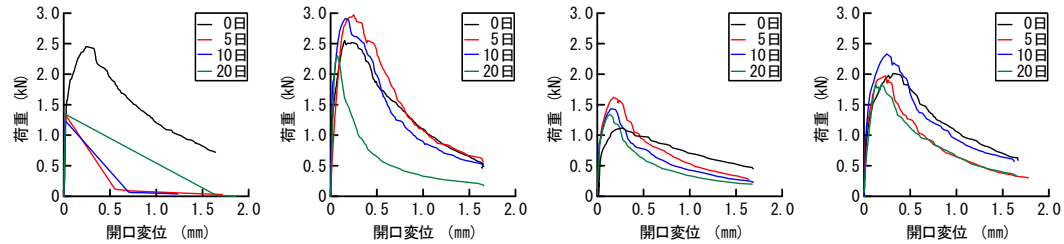
圧縮強さと練混ぜ方法の関係

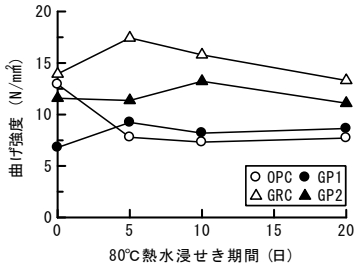
＜提示されている知見・課題＞
● フロー値，空気量，および圧縮強さには，FA の品種に関わらず，NS の添加方法や練混ぜ方法による影響はない。ただし，ST の添加率については，より詳細な検討が必要である。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 25）

評価性能・特性		曲げ，耐アルカリ性
硬化体タイプ		モルタル「繊維補強」
作製条件	養生	高温養生
	粉体種類	フライアッシュ
	アルカリ種類	メタケイ酸ナトリウム
文献情報		後藤　壮，犬飼利嗣，前川明弘，廣瀬　貴：ガラス繊維補強ジオポリマーモルタルに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1774-1779，2020
研究概要		耐アルカリ性ガラス繊維（ARG）をジオポリマーモルタルに混入し，ARG の劣化の進行を抑制するガラス繊維補強ジオポリマーモルタル（GRGP）の開発を試みている。
配合・養生概要		● 粉体：約 7000cm^2/g に微粉砕したフライアッシュ JIS Ⅱ種（F） ● アルカリ添加剤：アルカリ水溶液（AW）に換算して 3mol/L，（AW/F：42%）S/C：0.6，ARG の混入率：GP モルタルの外割で 2.0wt/% ● 凝結遅延剤：無水クエン酸（ST）を F の 1%添加 ● 養生：40℃×8h 保持
試験概要		● 評価特性：フロー値，曲げ強度，SEM
主な知見		 フロー値の経時変化  曲げ強度と材齢の関係  (a) OPC　(b) GRC　(c) GP 3000倍で撮影したARG混入ペーストのSEM画像 ＜提示されている知見・課題＞ ● GP モルタルの圧縮強度は，AW/F に関わらず，ST の外割添加率が増加するほど低下する傾向にはあるが，流動性は ST を 1.0%以上添加することで改善される。 ● GRGP の曲げ強度は，OPC や GRC を使用した GRM と比較して最も小さい値を示した。しかし，材齢 28 日の段階では，アルカリによる ARG の劣化はみられない。 ● 今後は，GP モルタルの高強度化を図り，その供試体をもって評価するとともに，ARG の長期劣化についても詳細に検討していきたいと考えている。
備考		

文献調査表（文献番号 26）

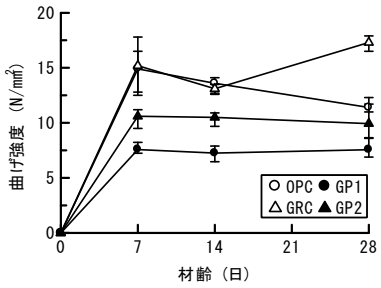
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>曲げ，耐アルカリ性</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル「繊維補強」</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>メタケイ酸ナトリウム</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">杉山朝音，犬飼利嗣，前川明弘，廣瀬　貴：80℃の熱水浸せき期間がガラス繊維補強ジオポリマーモルタルの曲げ強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1343-1348，2021</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">耐アルカリ性ガラス繊維（ARG）をジオポリマーモルタルに混入し，ARG の劣化の進行を抑制するガラス繊維補強ジオポリマーモルタル（GRGP）の開発を試みている。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体（B）：FAⅡ種（FA），FAⅡ種 7000（F7）BFS4000
● アルカリ添加剤：アルカリ水溶液（AW）に換算して 3mol/L，（AW/B：46%）S/C：0.6，ARG の混入率：GP モルタルの外割で 2.0wt/%
● 養生：65℃×5h 保持</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：フロー値，曲げ強度，SEM，光学顕微鏡</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2"> 

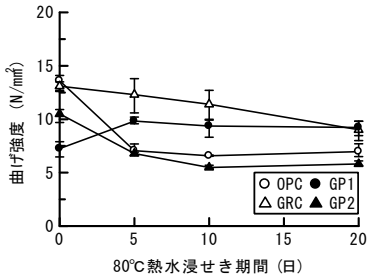
(a) OPC　(b) GRC　(c) GP1　(d) GP2
荷重－開口変位曲線
 

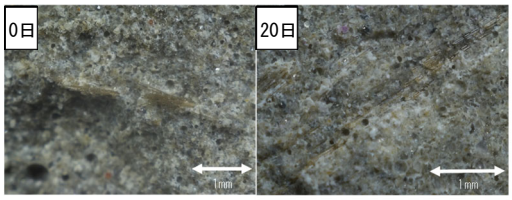
曲げ強度と80℃熱水浸せき期間の関係

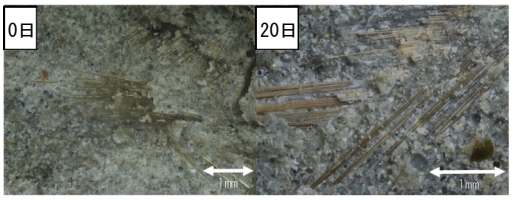
(a) OPC　(b) GRC　(c) GP1　(d) GP2
光学顕微鏡で撮影した80℃熱水浸せき後における曲げ供試体の破断面
＜提示されている知見・課題＞
● OPC を用いた GRM は，80℃熱水浸せき期間 5 日からぜい性的な曲げ破壊性状を示した。曲げ強度も熱水浸せき開始前より 40%程度減少し，いずれの熱水浸せき期間においても GRGP の GP1 や GP2 を下回る値を示した。
● GP ペーストの GP1 と GP2 に混入した ARG は，80℃熱水浸せき期間 20 日を経ても劣化の兆候はほとんどみられない。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

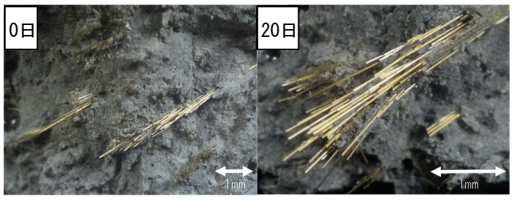
文献調査表（文献番号 27）

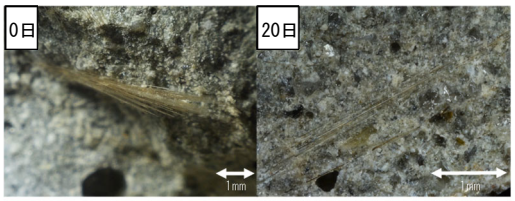
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>曲げ，耐アルカリ性</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル「繊維補強」</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>メタケイ酸ナトリウム</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">廣瀬　貴，西村優作，前川明弘，犬飼利嗣：80℃の熱水浸せき期間がバサルト短繊維補強ジオポリマーモルタルの曲げ強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1072-1077，2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">バサルト短繊維（BF）をジオポリマーモルタルに混入し，BF の劣化の進行を抑制するバサルト短繊維補強ジオポリマーモルタル（BRGP）の開発を試みている。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体（B）：FAⅡ種（FA），FAⅡ種 7000（F7）BFS4000
● アルカリ添加剤：アルカリ水溶液（AW）に換算して 3mol/L，（AW/B：46%）S/C：0.6，BF の混入率：GP モルタルの外割で 2.0wt/%
● 養生：65℃×5h 保持</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：フロー値，曲げ強度，SEM，マイクロスコープ</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2"> 

曲げ強度と材齢の関係
 

曲げ強度と80℃熱水浸せき期間の関係
 

(a)　OPC
 

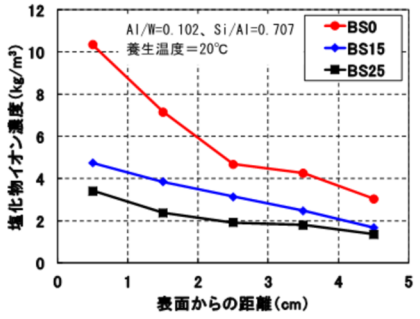
(b)　GRC
 

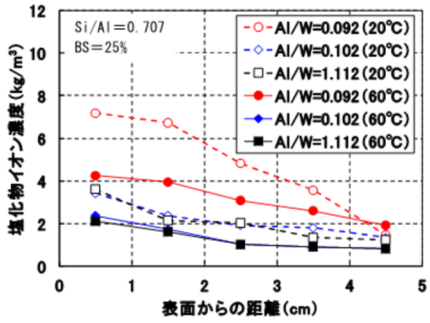
(c)　GP1
 

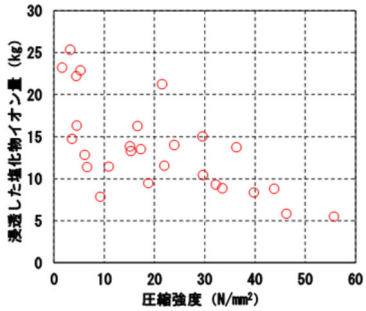
(d)　GP2
デシタルマイクロスコープで撮影した80℃熱水浸せき後における曲げ供試体の破断面
＜提示されている知見・課題＞
● OPC を用いた BRM と BRGP の GP2 は，80℃熱水浸せき期間 5 日からぜい性的な曲げ破壊性状を示した。
● GRC を用いた BRM は，熱水浸せき期間にともなって BF の劣化が進行し，曲げ強度は浸せき期間が 20 日になると 30%程度減少した。
● GP ペーストの GP1 に混入した BF は，80℃熱水浸せき期間 20 日を経ても劣化の兆候はあまりみられない。
● 熱水浸せきが GP に混入した BF に及ぼす影響について明らかにする必要がある。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 28）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>耐久性能：耐塩害性、鋼材腐食</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ（高炉スラグ微粉末を添加）</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">花岡大伸、谷本恒志郎、伊藤翼：ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.43、No.1、pp.1361-1366、2021</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">フライアッシュベースのジオポリマーを対象に、塩分および水分浸透性と鋼材腐食について調べている。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BFS 置換率：0%、15%、20%）
● アルカリ溶液（A/W 比：0.104）、（Si/A 比：0.707）
● 養生条件（温度 20℃、相対湿度 60%、封緘養生））</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 圧縮強度（材齢 28、91 日）、水分浸透試験、塩分浸透深さ、
● 鋼材の自然電位、腐食電流、分極曲線、鋼材の腐食状況</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● ジオポリマーの配合、圧縮強度および塩化物イオンの浸透性

ジオポリマーの配合
<table>
<tr><th>種類</th><th>FA</th><th>BFS</th><th>1.5 倍 WG</th><th>35% NaOH</th><th>W</th><th>S</th><th>A/W（モル比）</th><th>Si/A（モル比）</th><th>単位水量（kg/m³）</th></tr>
<tr><td>BFS0</td><td>543</td><td>0</td><td rowspan="4">232</td><td rowspan="4">52</td><td rowspan="4">64</td><td rowspan="4">1297</td><td rowspan="4">0.104</td><td rowspan="4">0.707</td><td rowspan="4">238</td></tr>
<tr><td>BFS10</td><td>489</td><td>69</td></tr>
<tr><td>BFS15</td><td>462</td><td>103</td></tr>
<tr><td>BFS20</td><td>434</td><td>137</td></tr>
</table>
※空気量は 0 と仮定，BFS は体積置換


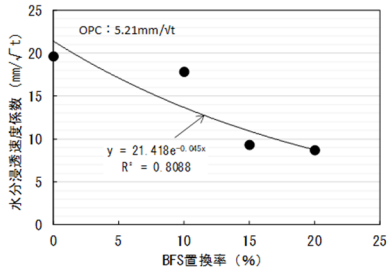


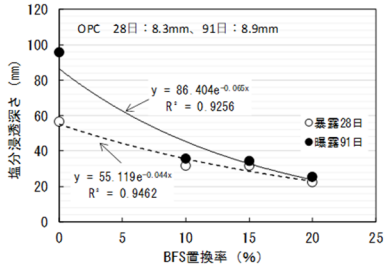
BS 置換率の影響　　Al/W の影響


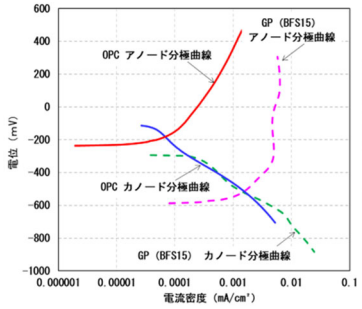
圧縮強度と浸透した塩化物イオン量の関係

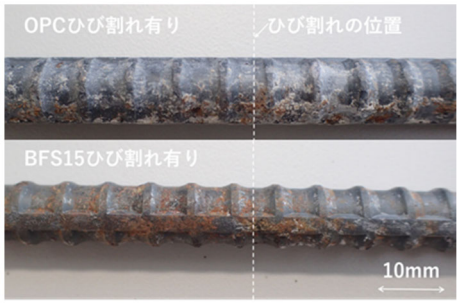
＜提示されている知見・課題＞
● BS 置換率の増加や養生温度が高いほど塩化物イオンの浸透が抑制されることが確認された。
● Al/W が大きいほど塩化物イオンの浸透が抑制されることが確認された。
● ジオポリマーの圧縮強度と塩分浸透性に相関性がみられた。</td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 29）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>耐久性能：耐塩害性、鋼材腐食</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ（高炉スラグ微粉末を添加）</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム、NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">花岡大伸、谷本恒志郎、伊藤翼：ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.43、No.1、pp.1361-1366、2021</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">フライアッシュベースのジオポリマーを対象に、塩分および水分浸透性と鋼材腐食について調べている。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BFS 置換率：0%、15%、20%）
● アルカリ溶液（A/W 比：0.104）、（Si/A 比：0.707）
● 養生条件（温度 20℃、相対湿度 60%、封緘養生））</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 圧縮強度（材齢 28、91 日）、水分浸透試験、塩分浸透深さ、
● 鋼材の自然電位、腐食電流、分極曲線、鋼材の腐食状況</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">
ジオポリマーの配合
<table>
<tr><th>種類</th><th>FA</th><th>BFS</th><th>1.5 倍 WG</th><th>35% NaOH</th><th>W</th><th>S</th><th>A/W（モル比）</th><th>Si/A（モル比）</th><th>単位水量（kg/m³）</th></tr>
<tr><td>BFS0</td><td>543</td><td>0</td><td rowspan="4">232</td><td rowspan="4">52</td><td rowspan="4">64</td><td rowspan="4">1297</td><td rowspan="4">0.104</td><td rowspan="4">0.707</td><td rowspan="4">238</td></tr>
<tr><td>BFS10</td><td>489</td><td>69</td></tr>
<tr><td>BFS15</td><td>462</td><td>103</td></tr>
<tr><td>BFS20</td><td>434</td><td>137</td></tr>
</table>
※空気量は 0 と仮定，BFS は体積置換




BFS 置換率と水分浸透速度係数　　BFS 置換率と塩分浸透深さ




鋼材の分極曲線　　鋼材の腐食状況
＜提示されている知見・課題＞
● 塩分浸透深さおよび水分浸透速度係数は，BFS 置換率の増加に伴い指数関数的に小さくなる傾向がみられた。
● 自然電位および腐食速度の測定結果から，BFS を 15%置換したひび割れ無し供試体では，鉄筋が腐食している可能性が高いと判断されたが，解体調査の結果では，塩分は鉄筋位置まで浸透しておらず，鉄筋の腐食も認められなかった。
● 分極曲線の測定結果などを踏まえると，OPC に比べて，BFS を 15%置換したジオポリマーに埋設した鉄筋の腐食量が大きくなることが示唆された。
</td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 30）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学・変形性能（付着）</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">太田周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：ジオポリマーモルタルと鉄筋との付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2313-2318，2016</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">ジオポリマーと鉄筋との付着特性を明らかにするため，引抜き試験により鉄筋との付着強度を求めるとともに，直接引張試験（建研式）を行った．</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">

フライアッシュ（II 種（記号 FA-2），および，強熱減量が JIS 規格外のもの（記号 FA-L）の 2 種類），高炉スラグ微粉末 4000
アルカリシリカ溶液：水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液を混合し，密度を 1.27 g/cm^3 に調整したもの
配合（下表の通り）

<table>
<tr><th>FA の種類</th><th>GPW</th><th>FA</th><th>BFS</th><th>S</th></tr>
<tr><td>FA-2</td><td>316</td><td>420</td><td>72</td><td>1,412</td></tr>
<tr><td>FA-L</td><td>348</td><td>361</td><td>63</td><td>1,412</td></tr>
</table>

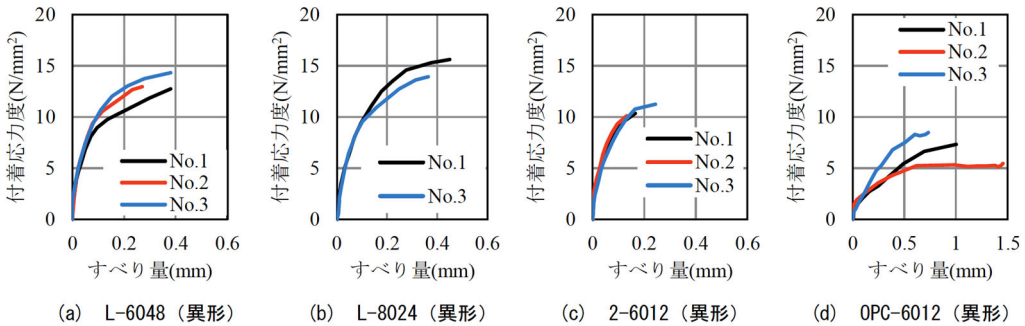
型枠に打込み後，1 時間の前置き時間を設け，加温養生（昇降温度 13.3℃/h）を実施．最高温度，強度，ヤング係数は，下表の通り．

<table>
<tr><th>シリーズ</th><th>最高温度</th><th>保持時間</th><th>圧縮強度 (N/mm^2)*</th><th>ヤング率 (kN/mm^2)*</th></tr>
<tr><td>2-6012</td><td>60℃</td><td>12 時間</td><td>31.9</td><td>12.7</td></tr>
<tr><td>L-6048</td><td>60℃</td><td>48 時間</td><td>35.4</td><td>13.8</td></tr>
<tr><td>L-8024</td><td>80℃</td><td>24 時間</td><td>36.0</td><td>15.4</td></tr>
<tr><td>OPC-6012</td><td>60℃</td><td>12 時間</td><td>33.3</td><td>20.3</td></tr>
</table>
* φ50×H100mm 円柱供試体の材齢 28 日での値
</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">

引抜き試験は JSCE-G 503「引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験」を参考にして材齢 28 日で実施．モルタル供試体サイズは一辺 100mm の立方体，鉄筋には異形鉄筋 D16（SD295A），丸鋼 φ16（SS400）を使用．
直接引張試験は，鋼製のアタッチメントを型枠底面に固定した状態で GP モルタルを打設し，供試体を作製した．脱型時に，供試体を上下反転させた．その後期中養生を行い，材齢 14 日で引張試験を行った．

</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">

GP モルタルの付着強度は，OPC モルタルと比較して高い．また，FA-2 よりも FA-L の方が付着強度が高い．
FA-L の場合に凝集破壊が生じ，GP モルタルと鋼材との付着が認められた．



付着応力度とすべり量の関係
</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 31）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>耐荷特性（RC の曲げ性状）</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">佐川康貴，太田周，合田寛基，大西俊輔：ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐荷性状に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2095-2100，2017</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">異なる圧縮強度の GP コンクリートを用いたはり部材を対象として，曲げ破壊する場合の耐荷特性について実験を行い，検討した．</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">

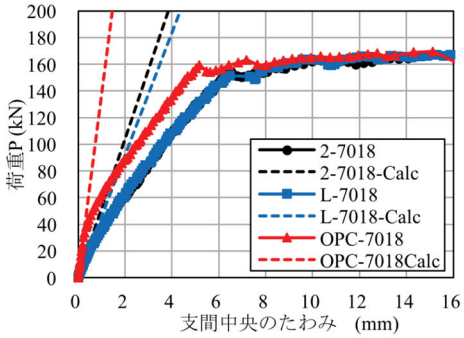
フライアッシュ（II 種（記号 FA-2），および，強熱減量が JIS 規格外のもの（記号 FA-L）の 2 種類），高炉スラグ微粉末 4000
アルカリシリカ溶液：水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液を混合し，密度を 1.40 g/cm^3 に調整したもの
高炉スラグ質量置換率（GGBFS/P）：30%
加温養生（最高温度 70℃，最高温度保持時間 18 時間）
配合，強度および静弾性係数は，下表の通り．

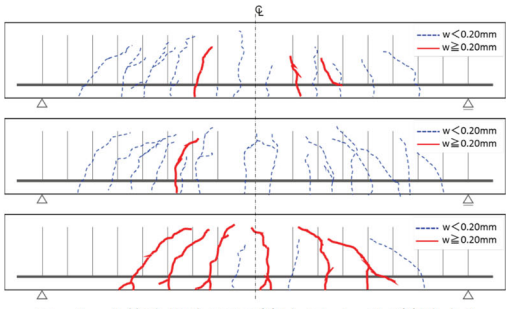
<table>
<tr><th></th><th colspan="6">単位量(kg/m^3)</th></tr>
<tr><th></th><th>GPW</th><th>FA</th><th>BFS</th><th>S</th><th>G1</th><th>G2</th></tr>
<tr><td>2-7018</td><td>330</td><td>353</td><td>152</td><td>559</td><td>329</td><td>517</td></tr>
<tr><td>L-7018</td><td>379</td><td>331</td><td>145</td><td>533</td><td>314</td><td>493</td></tr>
</table>
<table>
<tr><th></th><th>圧縮強度 (N/mm^2)</th><th>静弾性係数 (kN/mm^2)</th></tr>
<tr><td>2-7018</td><td>34.0</td><td>15.6</td></tr>
<tr><td>L-7018</td><td>22.6</td><td>10.0</td></tr>
<tr><td>OPC-7018</td><td>30.0</td><td>30.0</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">

200×300×2000mm の矩形梁とし，支間長 1700mm，載荷スパン 300mm で左右対称となるよう 2 点単調載荷した．主筋（D16-SD345）は単段配筋とし，せん断補強筋（D6-SD295A）はせん断スパン内に 100mm 間隔で配筋した．

</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">

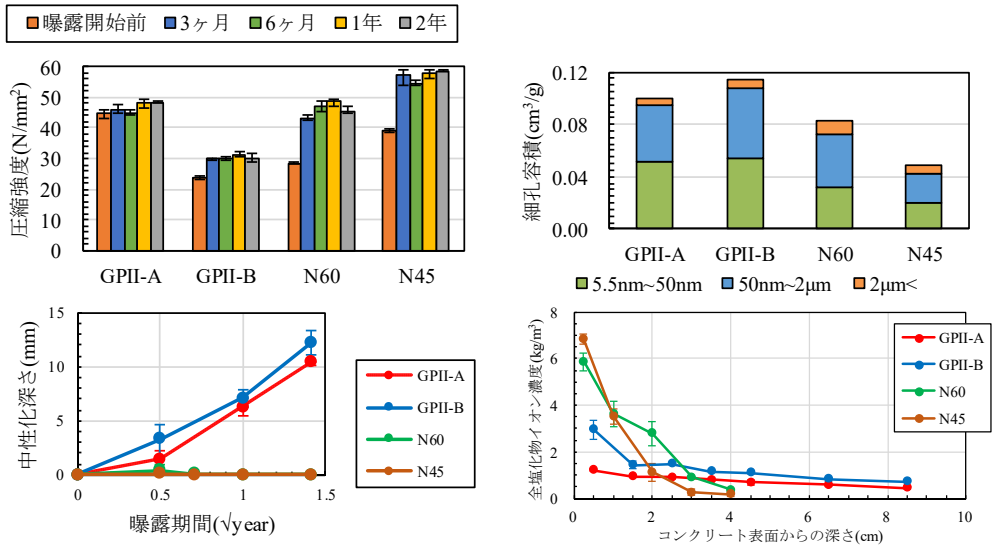
GP コンクリートは OPC コンクリートと比較して静弾性係数が 1/3～1/2 程度であるにもかかわらず，OPC コンクリートと同様に，靭性に富んだ曲げ耐荷性状を示す．
GP コンクリートは OPC コンクリートと比較して，特に鉄筋の引抜き初期の付着特性が優れるため，ひび割れ分散性が高く，1 本あたりのひび割れ幅も小さい．



図－6　荷重－たわみ関係（全体）


図－7　主筋降伏時のひび割れ図（w：ひび割れ幅）
（上段：2-7018 中段：L-7018 下段：OPC-7018）
</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 32）

評価性能・特性		耐久性能（耐塩害性）
硬化体タイプ		コンクリート
作製条件	養生	高温養生
	粉体種類	フライアッシュ，高炉スラグ微粉末
	アルカリ種類	ケイ酸ナトリウム，NaOH
文献情報		榮徳雄斗，佐川康貴，原田耕司，富山潤：塩害環境下に 2 年間曝露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1367-1372，2021
研究概要		塩害環境下で GP コンクリートの曝露試験を行った。曝露 2 年時点で強度，静弾性係数，中性化深さ，細孔径分布，塩分浸透性状，埋設鉄筋の電気化学的測定等に関する調査を行った．
配合・養生概要		● フライアッシュ II 種，高炉スラグ微粉末 4000 ● アルカリシリカ溶液：水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液を混合し，密度を 1.27 g/cm^3 に調整したもの（GPW-A）および密度を 1.40 g/cm^3 に調整したもの（GPW-B）の 2 種類 ● 配合 GPII-A：溶液 GPW-A を用い，アルカリシリカ溶液と活性フィラーの質量比（GPW/P）を 54%，高炉スラグ質量置換率（GGBFS/P）を 20%としたもの． ● 配合 GPII-B：溶液 GPW-B：溶液を用い，GPW/P を 65%，GGBFS/P を 30%としたもの． ● 型枠に打込み後，3 時間の前置き時間を設け，最高温度 70℃で 12 時間保持の加温養生（昇降温度 20℃/h）を実施．加温養生終了後，曝露開始まで気中養生．
試験概要		● 圧縮強度，吸水率，細孔径分布，中性化深さ，塩化物イオン濃度分布，自然電位，分極抵抗，分極曲線 ● 曝露試験地：沖縄県国頭村の海岸（北緯 26 度 44 分 52 秒，東経 128 度 10 分 33 秒）
主な知見		● 実環境下での長期的な強度の増進は小さい． ● GP コンクリートの吸水率は OPC コンクリートよりも高い．累積細孔容積は OPC コンクリートよりも大きく，50 nm 以下の小さな細孔が多く存在する． ● GP コンクリートの中性化の進行は OPC コンクリートよりも速い． ● GP コンクリートは塩分が内部に浸透しやすい特性を有している． 
備考		

文献調査表（文献番号 33）

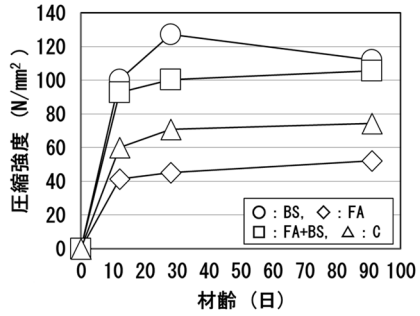
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学・変形性能：圧縮，収縮・クリープ</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>コンクリート（ポーラスコンクリート），ペースト，モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ(FA)，高炉スラグ微粉末(BS)，
普通セメント（C・比較試験用）</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">前川明弘，三島直生,畑中重光,坪内徹朗：ポーラスジオポリマーコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究,日本コンクリート工学会「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集, pp.75-80,2016.6</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">ジオポリマー（ペースト，モルタル）を用いたポーラスコンクリートを作製し，使用材料がポーラスコンクリートの乾燥収縮特性などに及ぼす影響について検討を行っている。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：3 種類（フライアッシュⅡ種 100%，高炉スラグ微粉末 100%，フライアッシュⅡ種 50%+高炉スラグ微粉末 50%）
● アルカリ溶液：水ガラス 2 号，NaOH(10mol/L)，A/W=0.114, 0.141
● 養生：封緘養生（60℃，27 時間），水中養生（20℃，材齢 12 日まで），気中養生（20℃・60%RH，材齢 13 日以降）</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：圧縮強度，乾燥収縮，質量変化，^{29}Si-NMR</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2"> 

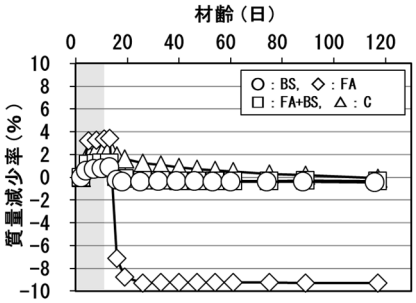
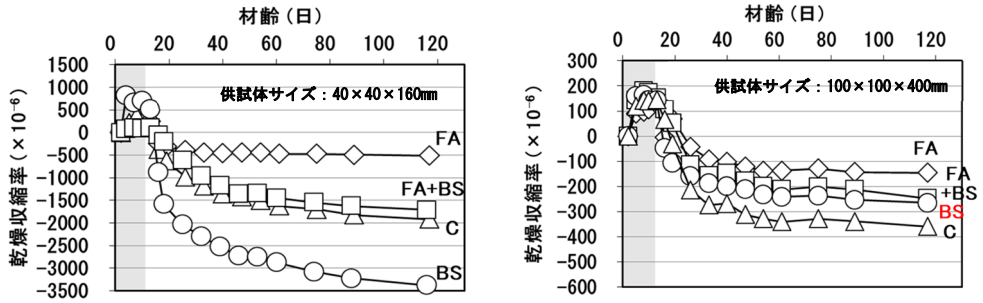
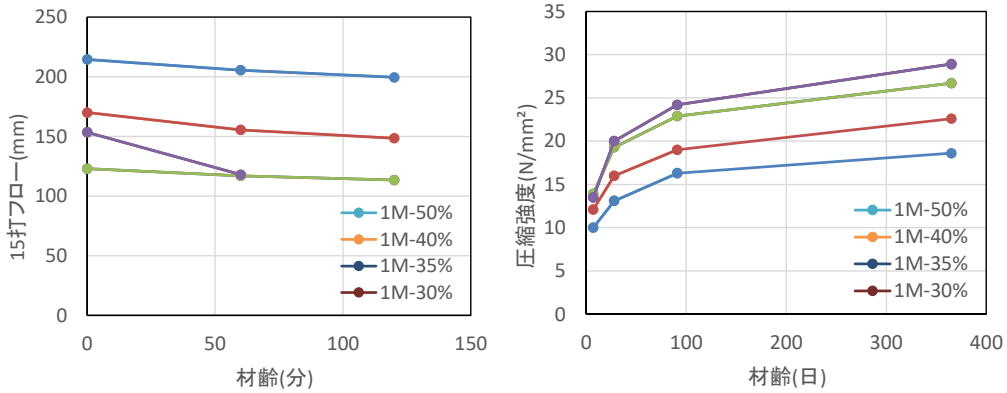
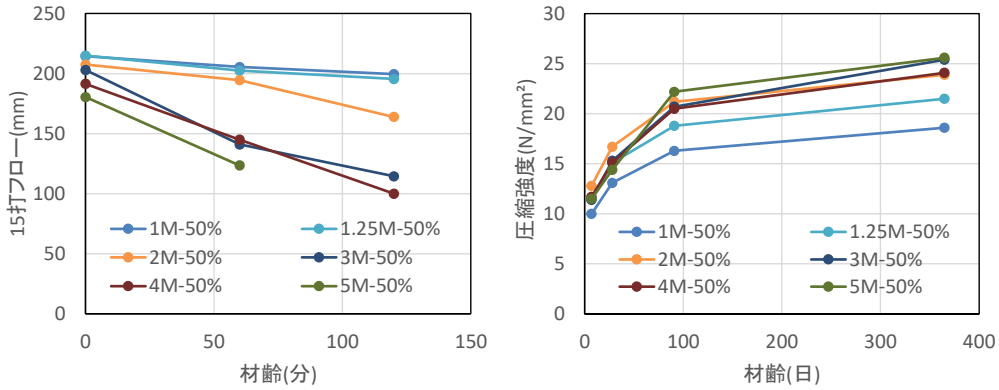
図 1 ペースト供試体の圧縮強度と材齢との関係


図 2 ペースト供試体の質量減少率と材齢との関係


(a) ペースト　(b) ポーラスコンクリート（ペースト使用）
図 3 ペーストおよびポーラスコンクリート供試体の乾燥収縮率と材齢との関係
＜提示されている知見・課題＞
● 高炉スラグ微粉末のみを使用すると早強性を有するが，材齢 28 日以降に圧縮強度が低下する。
● フライアッシュを使用した場合，高炉スラグやセメントと比較して乾燥収縮率は小さいが，質量変化率は大きくなる。
● 高炉スラグのペーストをポーラスコンクリートに用いた場合，乾燥収縮率が小さくなる（表面に発生するクラックなどに起因すると推定）。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 34）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性能：流動性、力学・変形性能：圧縮</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>20℃封かん養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ、高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">中島均，木下哲一，依田侑也，清村俊介，佐々木勇気，鳥居和敬，浅田素之，新大軌：放射性廃棄物封じ込めのための常温養生ジオポリマーの開発、原子力学会 2021 年春の年会、p.2J07、2021</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">ジオポリマーは通常は濃度の高いアルカリ溶液を使用するが、セメントに替わる材料として放射性廃棄物の封じ込めへの利用が期待されている。放射性廃棄物固化体である均質固化体と充填固化体に使用するジオポリマーについて、アルカリ濃度と圧縮強度の関係を検討した。アルカリ濃度による強度の違いをセメント系の固化体の結果と共に報告する。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成(フライアッシュ、高炉スラグ微粉末：組成未公表)
● アルカリ溶液：NaOH 1M~5M
● 溶液粉体比 0.3~0.5
● 養生：20℃封かん養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：15 打モルタルフロー値の経時変化、圧縮強度と材齢の関係</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">●溶液粉体比とフローの経時変化、圧縮強度の関係
 

●NaOH 濃度とフローの経時変化、圧縮強度の関係
 

＜提示されている知見・課題＞
✓ 1M の NaOH を使用し、溶液粉体比 50%程度であれば、経過時間 120 分まで 200mm 程度のフローが維持でき、強度も最終的には 20N/mm²に近いジオポリマーとなる。
✓ アルカリ濃度を高くするとフローが時間の経過とともに急激に低下する。これに合わせて強度も増加するが、アルカリ濃度が 3M 以上ではその増加割合は小さい。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 35）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>せん断，疲労</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>RC</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ FA，高炉スラグ微粉末 BFS</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">内西廉太朗，千々和伸浩：ジオポリマーコンクリートはりのせん断疲労に関する基礎的研究，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会講演概要集，V-253，2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をアルカリシリカ溶液と反応させてジオポリマーコンクリートはりを作製し，計 4 つのはりに対してせん断疲労試験を行った．その結果，ジオポリマーコンクリートは普通ポルトランドセメントコンクリートと同等かそれ以上のせん断疲労耐性を持つ可能性があることが示された．</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BFS 置換率：20%）
● アルカリ溶液：（A/W 比：0.102），（Si/A 比：0.707）
● 養生：48 日間および 56 日間 20℃封緘養生
● 遅延材として L-酒石酸ナトリウムを使用</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：静的せん断耐荷力，せん断疲労性能(上限荷重比 80%，70%)</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">
表 1 コンクリートの配合

モル比		単位体積重量[kg/m³]					
A/W	Si/A	AS	FA	BFS	S	G	LST
0.102	0.707	200	300	100	802	982	20

表 2 試験シリーズ

名称	シリーズ	上限荷重比[%]	封緘期間
1S100	1	100	48 日
1F80	1	80	48 日
1F70	1	70	48 日
2S100	2	100	56 日
2F80	2	80	56 日
2F70	2	70	56 日

表 3 静的試験結果

名称	Vc [kN]	δvc[mm]
1S100	100.0	3.1
2S100	108.0	2.9

Vc: せん断ひび割れ発生荷重，δvc: Vc 到達時のたわみ

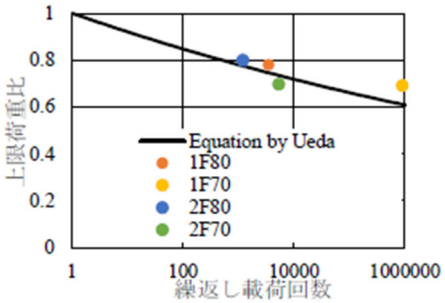


図 3 S-N 図

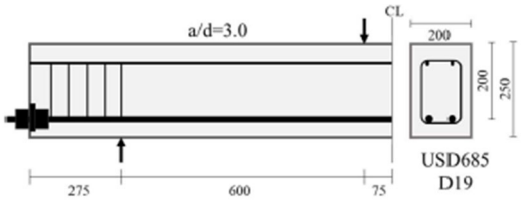


図 1 試験体形状および寸法

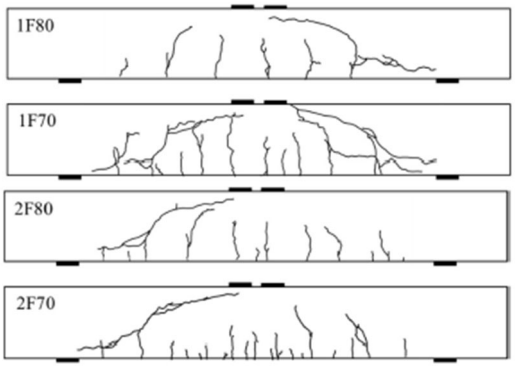


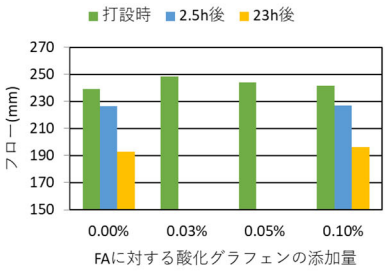
図 2 疲労試験体ひび割れ分布図

表 4 疲労試験結果

名称	上限荷重比	せん断疲労寿命	
		実験値	予測値 2)
1F80	0.80	3,462	1,072
1F70	0.78	886,045	30,709
2F80	0.70	1,193	515
2F70	0.69	5,280	23,827

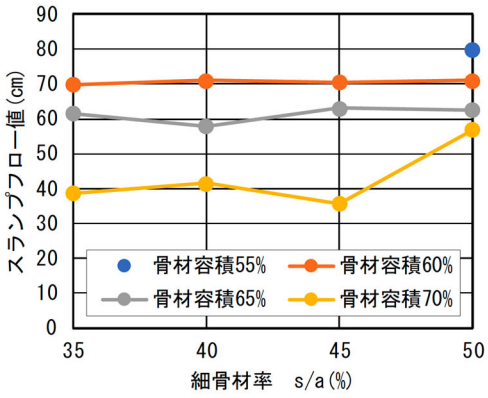
＜提示されている知見・課題＞
● せん断ひび割れ発生荷重を基準として，RGC のせん断疲労性能を実験によって確認．その結果，RC に比べて同等か若干高い傾向がみられることを報告．
● RC 同様に乾燥ひび割れによって疲労寿命が低下している可能性も示唆．
</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

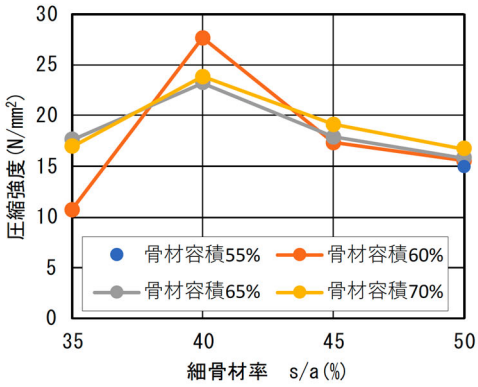
文献調査表（文献番号 36）

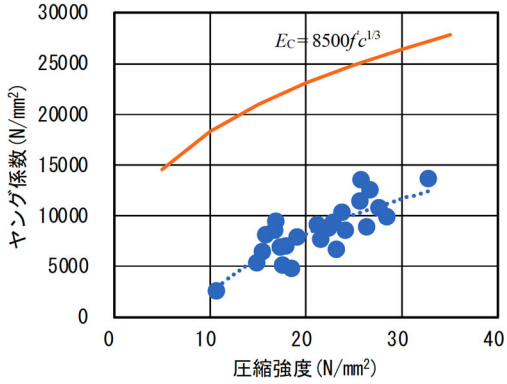
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>流動性，圧縮</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ FA</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">島崎未緒，坂本亮，千々和伸浩：酸化グラフェン添加によるコンクリートの性能変化に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，pp. 91-96．2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">酸化グラフェンを添加したコンクリートの性質の変化を確認した．添加により圧縮強度は最大で 16%上昇し，Cl^-浸透速度はわずかに減少した．これらの変化は緻密化によるもので，密度や細孔構造の変化から緻密化が確認できた．緻密化の原因として，酸化グラフェンの保水性によってセメントペースト中の水が分散された可能性が考えられる．収縮特性には大きな変化は見られなかったが，これは収縮に影響を与える範囲の細孔量に変化がなかったためと考えられる．酸化グラフェンの添加は ASR の進行には影響しなかった．またジオポリマーへの酸化グラフェンの添加は，フレッシュ性状，硬化速度，強度いずれにも変化をもたらさなかった．</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（FA100%）
● 養生：5 日間 60℃封緘養生後，20℃封緘養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：静的せん断耐荷力，せん断疲労性能(上限荷重比 80%，70%)</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">
供試体の配合
<table>
<tr><th rowspan="2">供試体名</th><th rowspan="2">酸化グラフェン置換率[%]</th><th colspan="6">単位量(kg/m³)</th></tr>
<tr><th>水ガラス(和光特級1.5倍希釈)</th><th>35% NaOH</th><th>W</th><th>うち酸化グラフェン液</th><th>FA</th><th>S</th><th>GO</th></tr>
<tr><td>GP0</td><td>0</td><td rowspan="4">232</td><td rowspan="4">52</td><td rowspan="4">64</td><td rowspan="4">51.7</td><td rowspan="4">550</td><td rowspan="4">1302</td><td>0.0000</td></tr>
<tr><td>GP3</td><td>0.03</td><td>0.1649</td></tr>
<tr><td>GP5</td><td>0.05</td><td>0.2749</td></tr>
<tr><td>GP10</td><td>0.1</td><td>0.5497</td></tr>
</table>


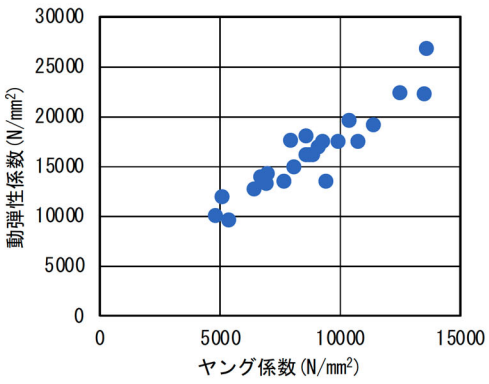
添加によるフローの変化
添加による強度の変化
<table>
<tr><th colspan="2">材齢</th><th colspan="2">7日</th><th colspan="2">14日</th><th colspan="2">28日</th></tr>
<tr><th>供試体</th><th>GO添加率[%]</th><th>強度[MPa]</th><th>密度[g/cm³]</th><th>強度[MPa]</th><th>密度[g/cm³]</th><th>強度[MPa]</th><th>密度[g/cm³]</th></tr>
<tr><td>GP0</td><td>0</td><td>17.1</td><td>2.10</td><td>18.8</td><td>2.12</td><td>19.3</td><td>2.09</td></tr>
<tr><td>GP3</td><td>0.03</td><td>16.8</td><td>2.10</td><td>17.9</td><td>2,11</td><td>18.9</td><td>2.08</td></tr>
<tr><td>GP5</td><td>0.05</td><td>16.8</td><td>2.11</td><td>17.8</td><td>2,11</td><td>19.5</td><td>2.08</td></tr>
<tr><td>GP10</td><td>0.1</td><td>16.0</td><td>2.10</td><td>17.1</td><td>2,10</td><td>18.1</td><td>2.08</td></tr>
</table>
＜提示されている知見・課題＞
● 酸化グラフェンを添加することによる影響を実験によって確認．
● セメントコンクリートでは酸化グラフェンの添加により，密度が高くなり，強度が増進したのに対し，ジオポリマーモルタルでは密度の変化が見られず，強度は同等か若干低下する結果となった．
● セメントとジオポリマーとでは硬化機構が異なることから，酸化グラフェン添加の影響も異なるものとなっていると考えられる．
</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 37）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性状：流動性，力学・変形性能：圧縮</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">緑川猛彦，一宮一夫，犬飼利嗣，周藤将司：ジオポリマーコンクリートの配合と圧縮強度に関する検討，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">ジオポリマーコンクリートの骨材容積と細骨材率を様々に変化させ，フレッシュ性状と圧縮強度および弾性係数について実験的に検討している。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：（BS 置換率：30%）
● アルカリ溶液：（A/W 比：0.101），（Si/A 比：0.720）
● 養生：気中養生，封緘養生（2 ヶ月）</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 配合：骨材容積 55%~70%，細骨材率 35%~50%
● 評価特性：スランプ値，スランプフロー値，空気量，圧縮強度，静弾性係数，動弾性係数</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● スランプフロー値，圧縮強度
 

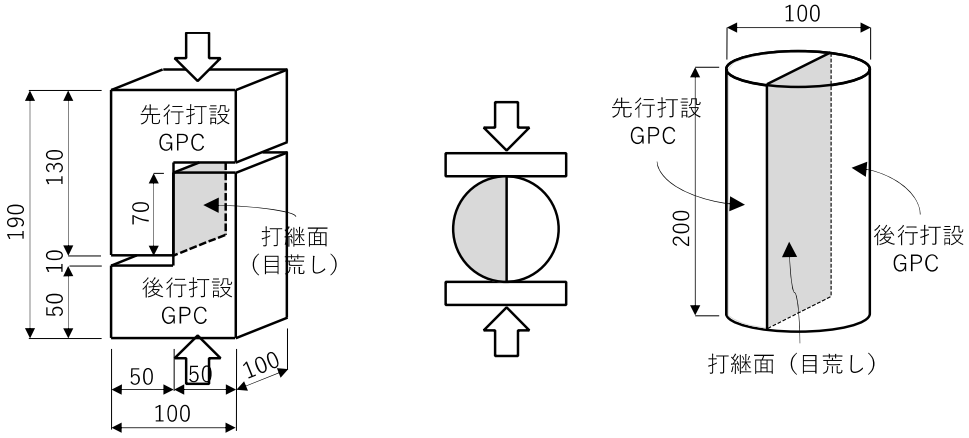
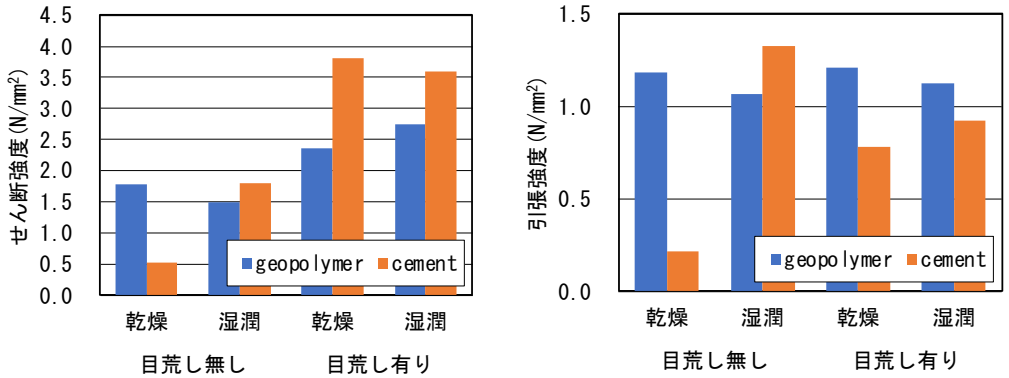


● 静弾性係数，動弾性係数
 

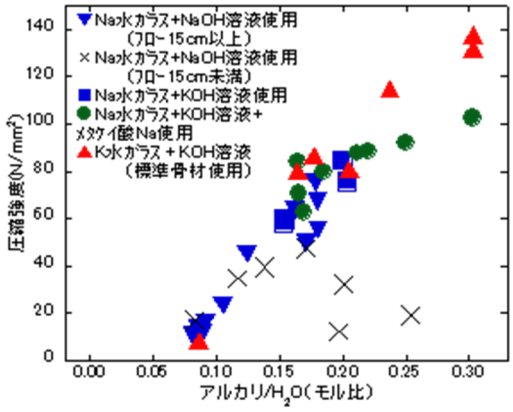


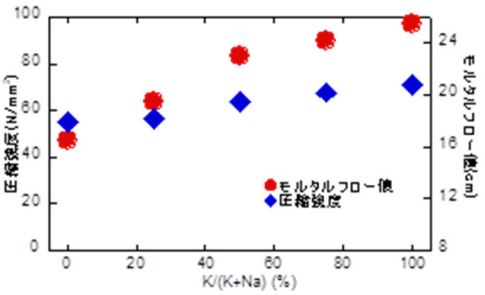
＜提示されている知見・課題＞
● ジオポリマーコンクリートのコンシステンシー評価はスランプフロー値が適切。
● 骨材容積は 60%~65%，細骨材率は 40%程度が望ましい。
● 静弾性係数は圧縮強度と比例するが，セメントコンクリートの約 50%程度と低い。静弾性係数と動弾性係数は比例する。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

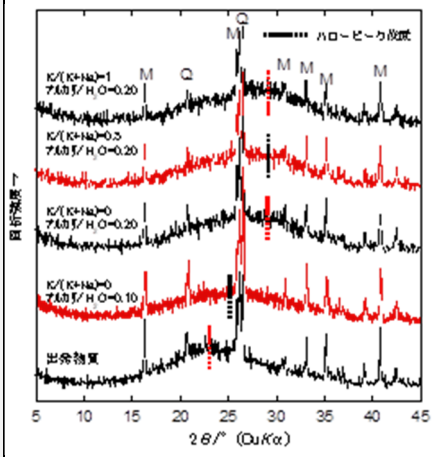
文献調査表（文献番号 38）

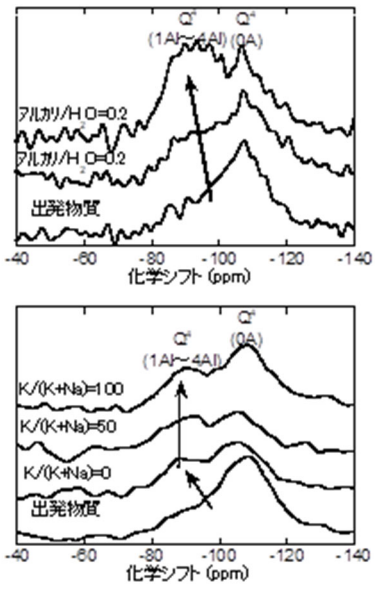
評価性能・特性		力学・変形性能：付着
硬化体タイプ		コンクリート
作製条件	養生	常温養生
	粉体種類	フライアッシュ，高炉スラグ微粉末
	アルカリ種類	ケイ酸ナトリウム，NaOH
文献情報		薗邉孝裕，緑川猛彦：ジオポリマーコンクリート部材の接合部における付着性状について，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，2022
研究概要		ジオポリマーコンクリート部材の接合部に関する付着性状のデータを蓄積するために，打継面のせん断強度や引張強度について実験的に検討している。
配合・養生概要		● 粉体構成：（BS 置換率：30%） ● アルカリ溶液：（A/W 比：0.101），（Si/A 比：0.720） ● 養生：気中養生（2 ヶ月）
試験概要		● 試験条件：目荒しの有無，水浸しの有無 ● 評価特性：凹凸係数，せん断強度，引張強度
主な知見		● 供試体形状  ● せん断強度，引張強度  ＜提示されている知見・課題＞ ● ジオポリマーコンクリート部材の打継部では，目荒しによりせん断強度が増加するが，引張強度は変化しない。 ● ジオポリマーコンクリート部材の打継部では，断面の乾湿の影響を受けず，むしろ乾燥状態での接合において強度が高くなる。
備考		

文献調査表（文献番号 39）

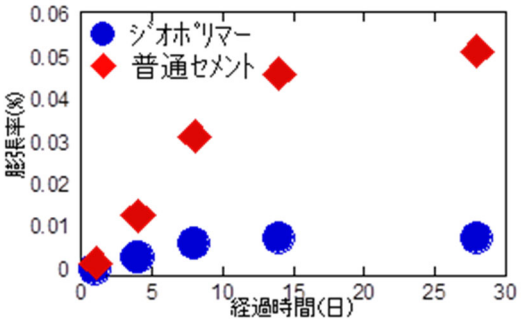
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学・変形性能：圧縮強度，引張強度，圧縮クリープ
耐久性能：耐凍害性，酸抵抗性，ASR 抵抗性
その他：フレッシュ性状，各配合における生成物の確認</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>軽量モルタル，軽量コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>加温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>メタケイ酸ナトリウム，水ガラス，NaOH，KOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">上原元樹：ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発，鉄道総研報告，pp.41-46, 2008</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">1.75t/m^3 の軽量モルタル・コンクリートを作製し，その配合と諸性質の関係を検討した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：フライアッシュ，
● アルカリ溶液：水ガラス 1 号，NaOH，KOH，メタケイ酸 Na（固体）種々の A/W，Si/A
● 養生：80℃</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：圧縮強度，引張強度，静弾性係数，クリープ試験，粉末 X 線回折（XRD）や固体磁気共鳴（NMR）による生成物の評価，ASR 抵抗性，耐酸性，耐凍害性（耐久性指数，気泡間隔係数等）</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">●圧縮強度
 

●K-Na の関係
 

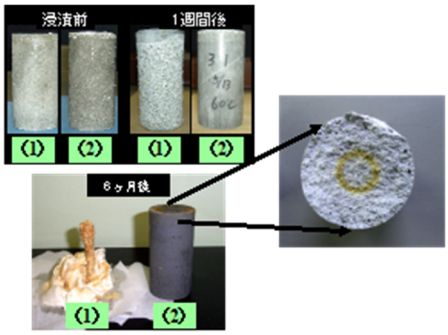
●GP 硬化体の微細構造（XRD）
 

●GP 硬化体の微細構造（NMR）
 
</td></tr>
</table>

●ASR 抵抗性



●酸抵抗性



●軽量コンクリート(1.75t/m^3)の諸特性

A/W=0.18 GP 軽量コンクリート(1.75t/m^3)の諸特性

試験名	試験結果	
強度試験	圧縮強度	61.2N/mm^2
	静弾性係数	15.3KN/mm^2
	割裂引張試験	4.00N/mm^2
クリープ試験	クリープ歪み	576 μ (載荷 130 日)
	乾燥収縮歪み	201 μ (載荷 130 日)
	クリープ係数	0.73(載荷 130 日)
凍結融解試験	耐久性指数	87.3
硬化コンクリートの空気量測定	空気量	4.16%
	気泡間隔係数	209 μ m

＜提示された知見・課題＞

(1)圧縮強度は配合における A/W 比と相関が高い。

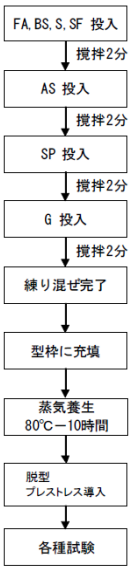
(2)K 成分, Na 成分に関わりなく, A/W(モル比), Si/A(モル比), W/P(体積比)で表したとき, 同一配合では, その構造・強度には大きな相違はない。

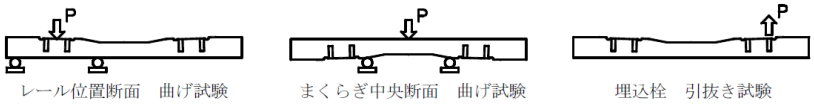
(3)K 成分使用で Na 成分を使用した GP とフレッシュ性状が大きく異なり流動性が大きくなる。

(4)GP の酸抵抗性及び軽量骨材を使用したモルタル・コンクリートで問題となる ASR 抵抗性, 凍結融解反応抵抗性も大きかった。

備考	古いデータなので, 現在主流の配合, 作製方法とは異なる。

文献調査表（文献番号 40）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学変形性能:圧縮･引張強度, まくらぎ性能確認</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>PC コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ, 高炉スラグ, シリカフューム*</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">大木信洋, 束原実, 佐藤隆恒, 上原元樹:ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの試作, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演要旨, pp.411-412, 2016</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">種々の配合で作製可能でありコストダウンが可能な水ガラスの代わりにシリカフューム（SF）粉体を使用する方法（Si 成分粉体添加その場溶解法）「溶解法」によりジオポリマーコンクリート製のポストテンション式 PC まくらぎを試作、その性能確認試験を行った.</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成:JISII種フライアッシュ(FA), 高炉スラグ(40%), シリカフューム*
● アルカリ溶液:NaOH　A/W0.20　Si/A0.236
● 養生: 80℃蒸気養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性: まくらぎの性能確認試験, 圧縮強度, 引張強度, スランプフロー</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">●GP-PC まくらぎの作製法
 

●作製配合
表 2 配合　（単位：kg/m³）
<table>
<tr><th>BS 置換率 (%)</th><th>A/W</th><th>Si/A</th><th>FA+BS</th><th>AS</th><th>SF</th><th>SP</th><th>S</th><th>G</th><th>単位水量 W</th></tr>
<tr><td>40</td><td>0.20</td><td>0.236</td><td>406.7</td><td>200.2</td><td>22.3</td><td>7.5</td><td>819.7</td><td>976.1</td><td>138.9</td></tr>
</table>
※BS 置換率（体積比）:BS／（FA+BS）
●フレッシュ性状・養生後（材齢 1 日）の特性値
<table>
<tr><th></th><th>スランプフロー (mm)</th><th>練上がり温度 (℃)</th><th>圧縮強度 (N/mm²)</th><th>割裂引張強度 (N/mm²)</th></tr>
<tr><td>ジオポリマー</td><td>430×450</td><td>33.9</td><td>73.9</td><td>4.71</td></tr>
<tr><td>試験方法</td><td>JIS R 5201</td><td></td><td>JIS A 1108</td><td>JIS A1113</td></tr>
</table>
●まくらぎ性能検証試験概要
 

レール位置断面　曲げ試験　　まくらぎ中央断面　曲げ試験　　埋込栓　引抜き試験
●性能確認試験結果(kN)
<table>
<tr><th></th><th colspan="2">レール位置断面 曲げ試験</th><th colspan="2">まくらぎ中央断面 曲げ試験</th><th colspan="2">埋込栓　引抜き試験</th></tr>
<tr><th></th><th>曲げ保証荷重</th><th>曲げ破壊荷重</th><th>曲げ保証荷重</th><th>曲げ破壊荷重</th><th>引抜保証荷重</th><th>引抜破壊荷重</th></tr>
<tr><td>基準値</td><td>77</td><td>159</td><td>45</td><td>92</td><td>30</td><td>50</td></tr>
<tr><td>ジオポリマー (AS:NaOH)</td><td>ひび割れなし (130)</td><td>200</td><td>ひび割れなし (84)</td><td>144</td><td>ひび割れなし</td><td>104</td></tr>
<tr><td>ジオポリマー[3] (AS:KOH)</td><td>ひび割れなし (127)</td><td>193</td><td>ひび割れなし (66)</td><td>142</td><td>ひび割れなし</td><td>108</td></tr>
<tr><td>通常コンクリート</td><td>ひび割れなし (145)</td><td>203</td><td>ひび割れなし (83)</td><td>130</td><td>ひび割れなし</td><td>137</td></tr>
</table>
※試験体数量 1 体で各試験を行った.（ ）内数値はひび割れが発生した時の数値を示す.
ケイ酸アルカリ溶液のアルカリ源として NaOH を使用し, Si 成分粉体添加その場溶解法（溶解法）によりジオポリマーコンクリート製のポストテンション式 PC まくらぎを試作し, 性能確認試験を行った結果, 試作した PC まくらぎの耐荷力が, JIS E1202 に規定された要求性能を満たすことを確認した.</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2">粉体シリカフュームを水ガラスの Si 成分の代替として使用。</td></tr>
</table>

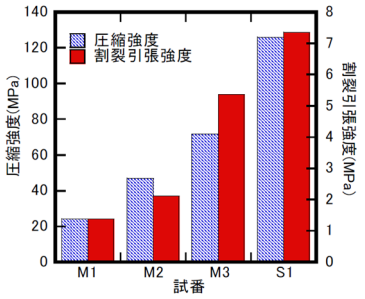
文献調査表（文献番号 41）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学・変形性能：圧縮・引張強度，乾燥収縮，耐久性能：耐塩害性，耐 ASR 性　その他：配合と生成物の構造</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル，ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生，高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，シリカフューム*</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH，ケイ酸ナトリウム</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">佐藤隆恒，上原元樹，山﨑淳司：低アルカリ/水比，高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2035-2040，2017</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">「マイルド法」，すなわち水ガラスのみを使用した低 A/W 比，高 Si/A 比で GP 硬化体を作製し，その諸性質を検討した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：JIS I 種フライアッシュ(FA)，高炉スラグ微粉末 (BFS)(40%置換),シリカフューム(SF)
● アルカリ溶液：ケイ酸ナトリウム，NaOH　(A/W=0.114（マイルド法），0.200（溶解法)
● 養生： 80℃-10h 封緘，20℃封緘（材齢変化）</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：圧縮強度，割裂引張強度，粉末 X 線回折(XRD)，固体磁気共鳴(NMR)，pH，　塩水浸漬，収縮ひずみ</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">
●ペースト作製配合と始発時間

試料番号	作製法	A/W（モル比）	Si/A（モル比）	BS (vol.%)	溶液温度 (℃)	練上り温度 (℃)	試験室温度 (℃)	始発時間 (min)
MP 1~3	マイルド法	0.114	1.076	40	24.2	25.5	22.3	26
SP1	溶解法	0.200	0.150	40	38.8	37.2	22.4	144

※MP1：20℃-2 日養生，MP2：20℃-28 日養生，MP3 及び SP1：80℃-10h 養生。

●圧縮強度と割裂引張強度



●モルタル作製配合

試料番号	作製法	A/W（モル比）	Si/A（モル比）	BS (vol.%)	W (kg/m³)	単位量(kg/m³) FA	BS	S	AS	ASS	SF	GNa	練上り温度(℃)	フロー15 打 (mm)
M1~3	マイルド法	0.114	1.076	40	216	383	309	1276	–	359	–	13	28.7	215×210
S1	溶解法	0.200	0.150	40	201	392	317	1306	297	–	21	13	36.9	225×225

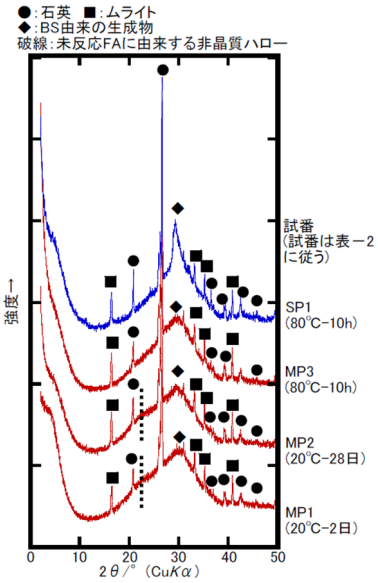
※ASS：1.5 倍希釈 JIS1 号水ガラス，AS：水酸化ナトリウム溶液（NaOH98(kg/m³)，水 199(kg/m³)の混合溶液）
GNa：グルコン酸 Na，W：単位水量，M1：20℃-2 日養生，M2：20℃-28 日養生，M3：80℃-10h養生，S1：80℃-10h 養生。

●ASR 試験用モルタル作製配合

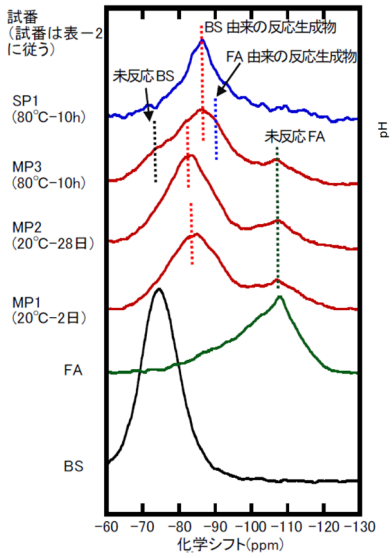
試料番号	作製法	A/W（モル比）	Si/A（モル比）	BS (vol.%)	W (kg/m³)	単位量(kg/m³) FA	BS	S	ASS	AS	SF	GNa	練上り温度(℃)	フロー15 打 (mm)
C1	マイルド法	0.073	1.076	20	229	474	144	1332	326	–	–	12	29.4	200×200
C2	マイルド法	0.073	1.076	40	229	355	287	1332	326	–	–	12	29.1	200×200
C3	マイルド法	0.114	1.076	20	212	475	144	1337	352	–	–	12	27.5	195×200
C4	マイルド法	0.114	1.076	40	212	357	288	1337	352	–	–	12	27.2	195×195
C5	溶解法	0.150	0.150	20	211	498	151	1400	–	283	20	12	39.5	205×205
C6	溶解法	0.150	0.150	40	211	373	302	1400	–	283	20	12	37.9	205×205
C7	溶解法	0.200	0.150	20	180	498	151	1400	–	267	20	12	36.4	200×200
C8	溶解法	0.200	0.150	40	180	373	302	1400	–	267	20	12	36.0	195×195
C9	W/C50,NP モルタル					–	–	–	–	–	–	–	21.1	200×200

※ASS：1.5 倍希釈 JIS1 号水ガラス（C1，C2）あるいは 2 倍希釈 JIS1 号水ガラス（C3，C4），GNa：グルコン酸 Na，W：単位水量
AS：水酸化ナトリウム溶液 C5～6(NaOH73(kg/m³)，水 210(kg/m³)の混合溶液），C7～8（NaOH88(kg/m³)，水 179(kg/m³)の混合溶液）
</td></tr>
</table>

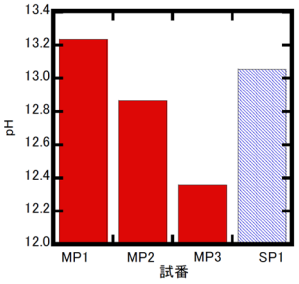
●ペーストの XRD



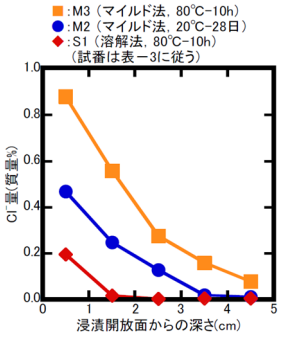
●ペーストの NMR



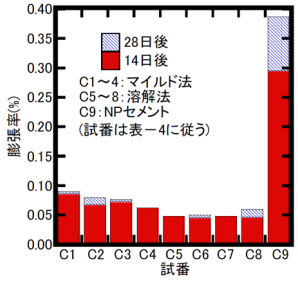
●ペーストの pH



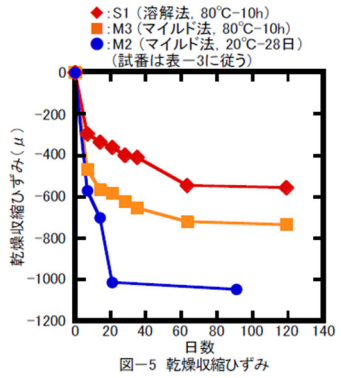
●塩分浸透試験



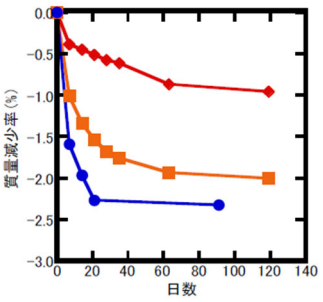
●ASR 膨張試験



●収縮ひずみと質量変化



図−5 乾燥収縮ひずみ



＜提示されている知見・課題＞

(1) マイルド法で加温養生した GP モルタルは，常温養生のものと比較して，圧縮強度が高いにも関わらず塩化物イオンの遮蔽性は低かった。

(2) マイルド法による常温養生 GP 硬化体では，FA の反応量が少なく，BFS のアルカリ刺激物質と同様な C-S(A)-H が生成したと考えられた。

(3) マイルド法による加温養生 GP は，常温養生試料とは反応生成物が異なり，BFS の反応量が少なく FA の反応量が多くなったものと推察された。

備考	本論文における「マイルド法」の配合は JCI 委員会における共通試験の配合に近く，諸性質において問題の多い配合である。シリカフュームは，Si 成分粉体添加その場溶解法（溶解法）において，水ガラス成分として使用。

文献調査表（文献番号 42）

評価性能・特性		その他:配合，非晶質構造，イオン交換特性，ASR 膨張抑制効果
硬化体タイプ		ひび割れ注入剤用粉末
作製条件	養生	加温養生
	粉体種類	フライアッシュ，シリカ微粉(NIPSIL)*
	アルカリ種類	NaOH
文献情報		佐藤隆恒，上原元樹:水素イオン型ジオポリマーによるアルカリシリカ反応の抑制，鉄道総研報告，Vol.31，No.8，2017
研究概要		フライアッシュをケイ酸 Na 溶液で硬化させた GP 硬化体について交換性陽イオンの H^+化を試み，その諸性質及び ASR 膨張抑制効果を検討した。
配合・養生概要		● 粉体構成:フライアッシュ， ● アルカリ溶液:シリカ微粉(NIPSIL)*，NaOH，A/W0.10～0.50 ● 養生:80℃
試験概要		● 評価特性:粉末 X 線回折（XRD）や固体磁気共鳴（NMR）による生成物の評価，K，Na,に対するイオン交換特性，セメント硬化体の pH 低下効果，ASR 膨張抑制効果

主な知見

●配合と養生条件

試料名		0.1GP	0.2GP	0.3GP	0.4GP	0.5GP
フライアッシュ		1000	1000	1000	1000	1000
NaOH		68.7	137.3	205.6	275.0	342.6
シリカ粉末		42.6	85.1	127.6	170.5	212.6
水		297.4	294.7	292.0	290.0	286.8
処理条件	℃	80	80	80	80	80
	時間	48	48	48	48	48

単位：g

●母材モルタル(R_2O=1.6%)及び注入ペーストの配合の配合

表２　母材モルタル（R_2O=1.6%）の配合

NP セメント	水	NaOH	骨材
600	300	8.3	1350

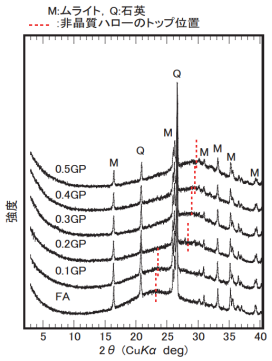
骨材は ASR 反応性骨材を使用。単位：g

表３　注入ペーストの配合

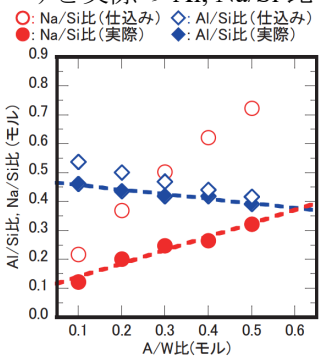
試料名	BB セメント	0.5GP-0.1M	水
無添加	300	0	127.1
H^+型 GP	180	120	153.0

単位：g

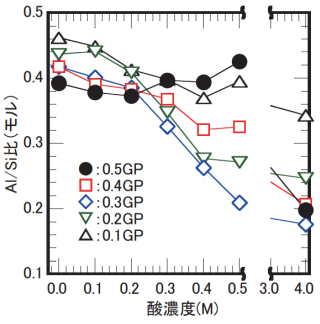
●出発材料と GP の XRD



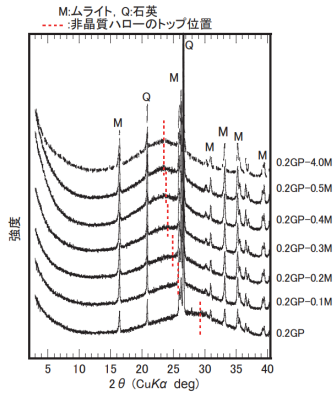
●GP の各配合における仕込みと実際の Al, Na/Si 比



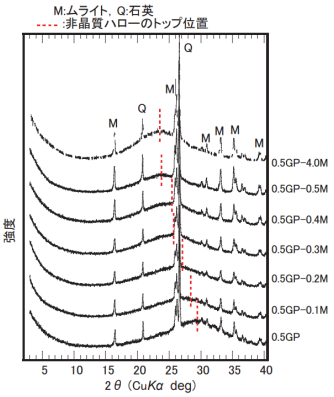
●酸処理後の Al/Si 比



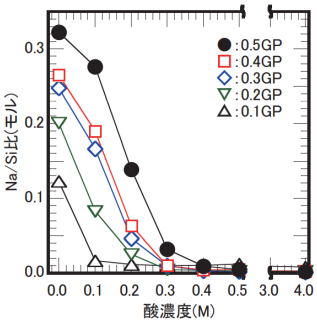
●各酸濃度で処理した 0.2GP の XRD



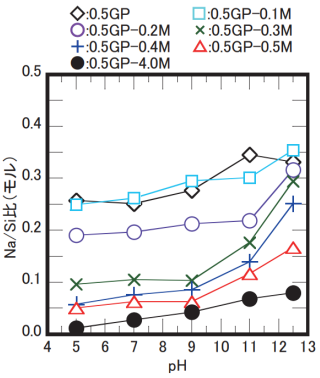
●各酸濃度で処理した 0.5GP の XRD



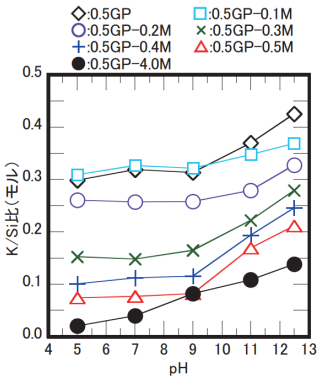
●酸処理後の Na/Si 比



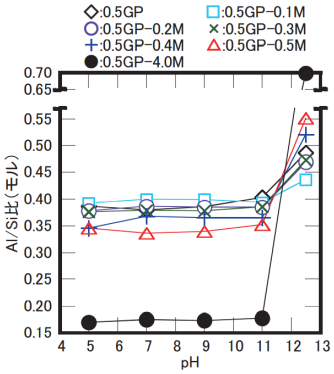
●NaCl 溶液処理した 0.5GP の Na/Si 比



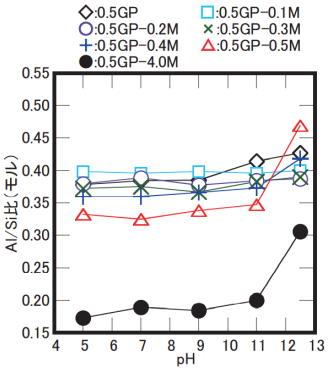
●KCl 溶液で処理した 0.5GP の K/Si 比



●NaCl 溶液処理した 0.5GP の Al/Si 比



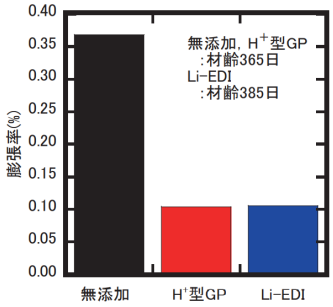
●KCl 溶液で処理した 0.5GP の Al/Si 比



●GP 添加ペーストの pH 及び可溶性 Na_2O

試料	無添加	0.5GP−0.4M 10% 添加
等価アルカリ量	1.2%	1.2%
0.5GP-0.4M	0%	10%
pH	13.03	12.74
可溶性 Na_2O 量	0.60	0.41

●ペーストを注入したモルタルの膨張試験結果



<主な知見>

(1) Na^+型 GP 硬化体を硫酸処理することにより，交換性陽イオンのほぼ全量を H^+化した H^+型 GP を得た。

(2) H^+型 GP の Na^+や K^+に対する陽イオン交換容量(CEC)は，pH7 で元の Na^+型 GP の 1/4 程度であった。

(3) H^+型 GP のイオン交換特性は pH 依存性が強く，高 pH 領域で増加する傾向であった。ただし，pH12.5 では，一部 Si の溶出が認められたことから，セメント硬化体中での反応は，陽イオンの交換反応に加えて Si の溶出によるアルカリ成分の消費機構も考慮する必要があることがわかった。

(4) ASR を生じたモルタルに H^+型 GP を添加したセメントペーストを注入した場合，無添加のものを注入した試験体と比較して，膨張を抑制できることがわかった。

(5) ASR 膨張抑制効果は，現在，ASR 用ひび割れ注入剤として市販している Li-EDI 型ゼオライトに匹敵した。

備考	現在，市販 ASR 用ひび割れ注入剤に添加している Li 含有ゼオライトが高価なため，その代替として H^+型ジオポリマーの実用化を検討している。

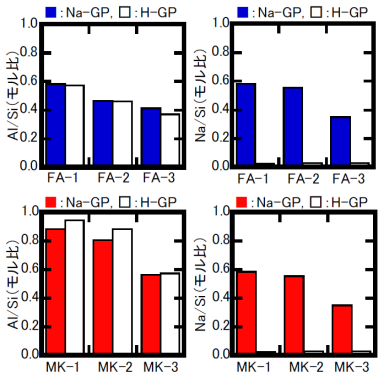
文献調査表（文献番号 43）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>その他：pH 低減効果，ASR 膨張抑制効果，アルカリ成分吸着能</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，メタカオリン，シリカ微粉(NIPSIL)*</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">佐藤孝恒，上原元樹，小田慎太郎，山﨑淳司：種々の H^+型ジオポリマー粉体によるアルカリシリカ反応の抑制，土木学会第 72 回年次学術講演会講演要旨，pp.165-166, 2017</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">H-GP を用いた ASR 抑制材料の開発を目的として，種々の配合で作製した H-GP のアルカリ吸着，H^+放出による pH 低減効果，ASR 膨張抑制効果を検討した．</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：メタカオリン，JISI種フライアッシュ(FA),シリカ微粉(NIPSIL)
● アルカリ溶液：NaOH A/W0.15，0.50 Si/A0.10, 0.25, 0.40, 1.00 酸溶液：硝酸
● 養生：80℃蒸気養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：陽イオン交換試験，セメント硬化体の pH 試験，促進膨張試験</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">
●GP ペーストの配合

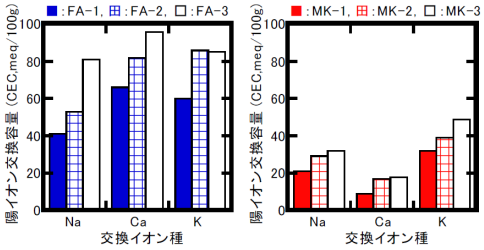
試番	A/W（モル比）	Si/A（モル比）	FA, MK (g)	NaOH (g)	SiO_2 (g)	水 (g)
FA-1	0.50	0.10	500	171.6	27.5	142.4
FA-2	0.50	0.25	500	171.6	68.6	138.7
FA-3	0.50	0.40	500	171.6	109.9	135.0
MK-1	0.15	0.25	500	144.4	56.0	412.7
MK-2	0.15	0.40	500	144.4	89.5	410.7
MK-3	0.15	1.00	500	144.4	223.9	402.6

試番名 FA-：出発材料に FA を使用
試番名 MK-：出発材料に MK を使用

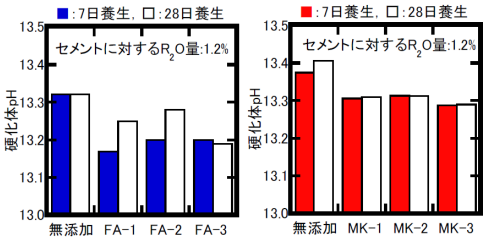
●酸処理前後の Al, Na 量の変化



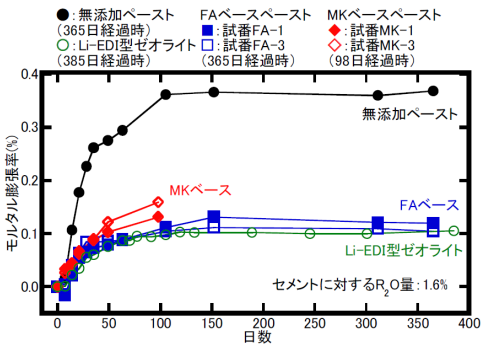
●陽イオン交換試験



●硬化体 pH 変化

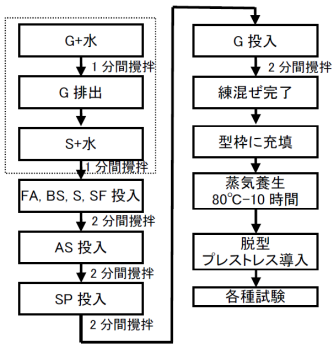


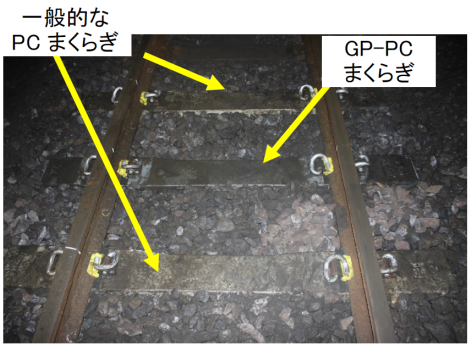
●モルタルの膨張試験結果

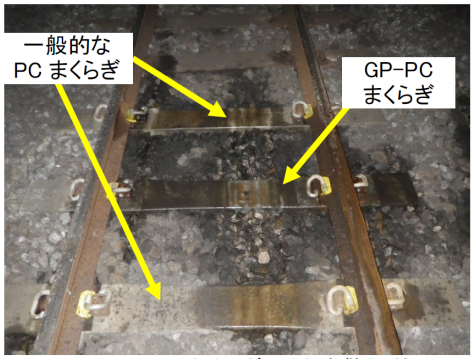


(1)FA を出発材料とした場合，作製配合の Si/A 比が高い試料でイオン交換能，pH 低減効果と ASR 膨張抑制効果が認められた．
(2)MK を出発材料とした場合については，膨張抑制効果は認められるものの，そのイオン交換能等の諸特性との関係が不明であることから，今後，種々の配合で作製した Na-GP および H-GP の生成物詳細を検討する必要がある．
</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2">種々の配合作製のため，シリカ微粉(NIPSIL)をアルカリ溶液に溶解して水ガラスを作製した。</td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 44）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学･変形:圧縮，静弾性係数，まくらぎ性能，　その他;フレッシュ性状</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>PC コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，シリカフューム*</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">上原元樹，佐藤隆恒，束原実，大木信洋:ジオポリマーPC まくらぎの営業線への試験敷設，土木学会第 72 回年次学術講演会講演要旨，pp.167-168, 2017</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">漏水の影響で腐食環境となるトンネルでの木まくらぎの代替を想定し，塩化物イオンの浸透に対する抵抗性、耐酸性等に関して高耐久な配合でローカル線区用ポストテンション式 GP-PC まくらぎを製作し，実際の営業線に敷設した.</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成:フライアッシュ(FA)，高炉スラグ微粉末 (BFS)(40vol.%置換),シリカフューム(SF)
● アルカリ溶液:NaOH(A/W=0.218，Si/A0.200)
● 養生: 80℃蒸気養生
● 営業ローカル線への敷設</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性： 圧縮強度，引張強度，静弾性係数，スランプフロー，まくらぎ性能確認試験</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">●まくらぎ作製配合
<table>
<tr><th>A/W</th><th>Si/A</th><th>単位水量</th><th>FA</th><th>BS</th><th>FA+BS</th><th>SF</th><th>S</th><th>G</th><th>AS</th><th></th><th>SP</th></tr>
<tr><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th>NaOH</th><th>水</th><th></th></tr>
<tr><td>モル比</td><td colspan="11">kg/m^3</td></tr>
<tr><td>0.218</td><td>0.200</td><td>173.8</td><td>289.2</td><td>234.4</td><td>523.6</td><td>24.6</td><td>736.1</td><td>847.9</td><td>84.3</td><td>165.4</td><td>9.65</td></tr>
</table>
●フレッシュ性状，各種強度，静弾性係数
<table>
<tr><th></th><th>スランプフロー (mm)</th><th>練上温度 (℃)</th><th>圧縮強度 (N/mm^2)</th><th>割裂引張強度 (N/mm^2)</th><th>静弾性係数 (kN/mm^2)</th></tr>
<tr><td>GP</td><td>565×580</td><td>44.0</td><td>81.7</td><td>6.02</td><td>35.9</td></tr>
<tr><td>試験方法</td><td>JIS A 1150</td><td></td><td>JIS A 1108</td><td>JIS A 1113</td><td>JIS A 1149</td></tr>
</table>
●まくらぎ性能確認試験
<table>
<tr><th></th><th colspan="2">レール位置断面</th><th colspan="2">まくらぎ中央断面</th><th colspan="2">埋込栓引抜試験</th></tr>
<tr><th></th><th>曲げ保証荷重</th><th>曲げ破壊荷重</th><th>曲げ保証荷重</th><th>曲げ破壊荷重</th><th>引抜保証荷重</th><th>引抜破壊荷重</th></tr>
<tr><td>基準値</td><td>50.5</td><td>97.6</td><td>53.0</td><td>115.9</td><td>30</td><td>50</td></tr>
<tr><td>GP-PC まくらぎ</td><td>ひび割れ無し(108)</td><td>166</td><td>ひび割れ無し(92)</td><td>164</td><td>ひび割れ無し</td><td>156</td></tr>
</table>
（ ）数値はひび割れが発生したときの数値を示す
●GP-PC まくらぎ製作手順


●GP-PC まくらぎの敷設状況


●GP-PC まくらぎ　3 か月経過時


(1) 塩化物イオンの浸透に対する抵抗性、耐酸性等に関して高耐久な配合で，ケイ素成分粉体添加その場溶解法「溶解法」により，ローカル線区用ポストテンション式 GP-PC まくらぎを作製した.
(2) 作製したまくらぎが耐荷力における要求性能を満たし，一般的なコンクリートと同様に実用的に作製できることを確かめた。
(3) 営業線で使用できるよう型式を登録し，漏水が生じていて腐食環境となっているトンネル内に敷設した。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2">Si 成分粉体添加その場溶解法（溶解法）により，シリカフュームは水ガラスの Si 成分代替，アルカリ成分として換算。</td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 45）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学･変形性能:圧縮強度，耐久性能:耐熱性，耐化学的浸食性，
その他:エフロレッセンスの評価，左官性の評価，高温生成物</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル，ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，シリカフューム*</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣:左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp1937-1942，2020</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">種々の配合の常温養生 GP モルタルを「SF 添加その場溶解法」で作製し，その左官作業製，諸性質，特に OPC モルタル下地に 1cm 厚で GP モルタルを左官施工して、左官作業の実用性，付着強度を検討した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成:JISI種フライアッシュ(FA)，高炉スラグ微粉末 (BFS)(40vol.%置換),シリカフューム(SF)
● アルカリ溶液:NaOH(A/W=0.100，0.150，0.200)，Si/A0.100～0.300
● 養生: 20℃封緘，屋外暴露，電気炉加熱</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：圧縮強度，粉末 X 線回折（XRD），左官作業性，高温加熱時の強度及び形状安定性，硫酸浸漬，屋外施工試験</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">
●供試体作製配合

配合	FA	BFS	SF	骨材	NaOH	水	GNa	A/W	Si/A	W/P
	Kg/m³							モル比		体積比
1	314.1	254.0	17.3	1570.6	119.8	111.7	2.62	0.15	0.20	0.797
2	315.8	255.4	8.7	1579.2	120.5	112.2	2.63	0.15	0.10	0.797
3	312.4	252.6	25.8	1562.3	119.2	111.1	2.60	0.15	0.30	0.798
4	317.1	256.4	11.6	1585.4	80.6	133.3	2.64	0.10	0.20	0.795
5	404.0	326.6	19.4	1346.7	134.1	125.1	3.37	0.15	0.20	0.694
6	311.4	251.8	22.9	1557.2	158.4	90.5	2.60	0.20	0.20	0.799

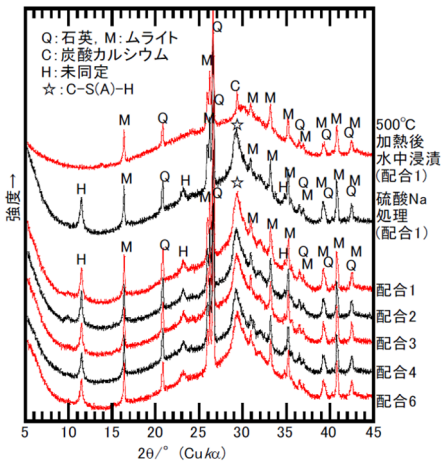
GNa:グルコン酸ナトリウム，NaOH は 48%濃度の水溶液

●GP モルタルのフレッシュ性状と強度

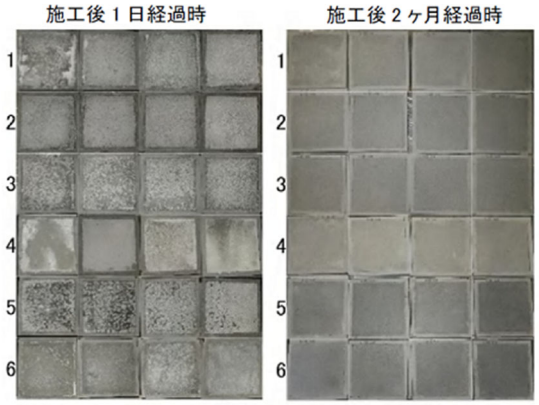
配合	モルタルフロー		圧縮強度*		
	0 打	15 打	1 日	7 日	28 日
	mm		MPa		
1	124	165	22.7	62.5	79.3
2	113	158	22.3	57.1	78.5
3	119	165	23.2	60.2	78.4
4	105	153	25.1	55.8	69.5
5	115	155	28.4	71.6	86.7
6	113	149	23.7	63.8	79.8

*:20℃封緘養生

●GP 硬化体の粉末X線回折(XRD)



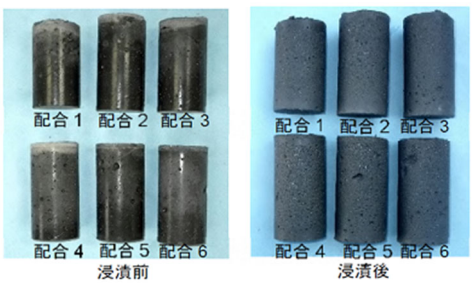
●　左官施工性



配合	練上り後コテ作業開始時間(分)						仕上り	白華		
	10	20	30	50	60	85		量	除去性	
									掃除機可	水洗可
1	○	○	○	△2	×	×	◎	△	○	○
2	△1	△1	△1	△2	×	×	○	×	○	○
3	△1	△1	△1	△2	△2	×	△～×	○	×	○
4	○	○	△2	△2	△2	×	◎～○	△	○	○
5	△1	△1	△2	×	×	×	△	○	○	○
6	△1	△1	△1	×	×	×	△	△	×	○

コテ作業性の評価；◎：伸び良好，コテ付着なし　○：粘性が高いがコテ付着量は少量　△1 粘性が高くコテに付着　△2 伸びが悪いがコテ作業可能，×硬化によりコテ作業不可
仕上りの評価（表面の平滑度を外観から評価）；◎：良好　○：普通　△：やや粗い　×：粗い
白華生成量の評価（生成量を外観から評価）；◎：発生無し　○：少量　△：やや多い　×：多い
除去性の評価（掃除機可）；○：綿状，掃除機で簡単に除去可　×：掃除機で除去不可
白華の除去性の評価（水洗可）；○：水溶性で水洗により簡単に除去できる

●硫酸浸漬前後の状態

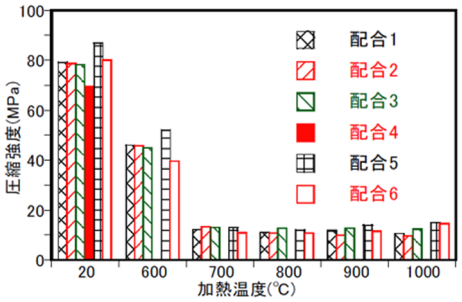


</td></tr>
</table>

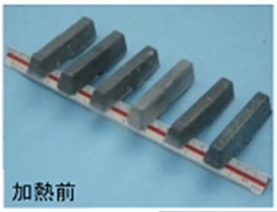
●硫酸浸漬前後の強度

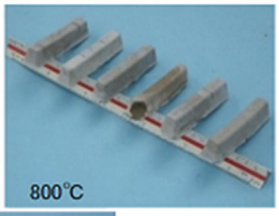
配合	質量変化率	硫酸浸漬前圧縮強度	硫酸浸漬後圧縮強度	圧縮強度変化率
	%	MPa		%
1	-0.08	79.3	77.2	-2.7
2	-0.32	78.5	76.4	-2.7
3	-0.05	78.4	78.4	0.1
4	-0.43	69.5	62.6	-9.9
5	0.02	86.7	85.4	-1.5
6	-0.04	79.8	75.5	-5.5

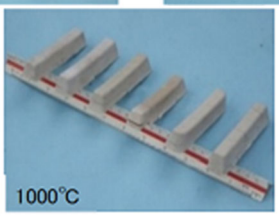
●加熱後のモルタルの強度



●ペースト加熱時の形状安定性
(左から配合 1～6)





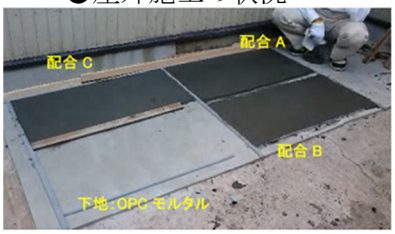


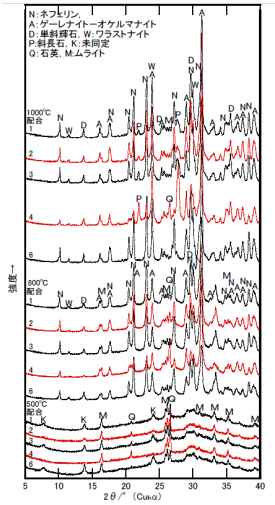
●棒状ペースト供試体の変状

配合	1	2	3	4	5	6
A/W	0.15	0.15	0.15	0.10	0.15	0.20
Si/A	0.20	0.10	0.30	0.20	0.20	0.20
1150℃-2h	×	×	×	×	×	×
1000℃-2h	○	△	△	△	△	△
800℃-2h	○	○	○	△	△	○

○：細かいひび割れ程度，△：大きなひび割れ，欠損程度，
×：原形を留めない（発泡，溶融）

●屋外施工の状況



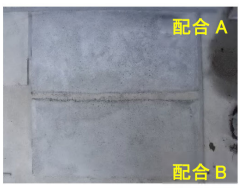


●屋外施工の GP モルタル配合

配合	FA	BFS	SF	骨材	NaOH	水	GNa	A/W	Si/A	W/P
	Kg/m³							モル比		体積比
A	309.3	250.0	18.5	1546.3	128.0	117.9	2.58	0.15	0.20	0.859
B	305.9	247.3	19.3	1529.3	133.5	123.2	2.55	0.15	0.20	0.907
C	307.8	248.8	13.2	1538.9	91.5	150.3	2.57	0.10	0.20	0.926

GNa:グルコン酸 Na，NaOH は 48%濃度の水溶液を使用

●材齢 8 日後の GP モルタルの様子



●GP モルタルの左官施工性と付着強度

配合	15 打フロー (mm)	コテ作業性	ひび割れ剥離	付着強度 (MPa)
A	154×156	○	◎	1.89
B	176×178	◎	◎	2.09
C	177×175	◎	◎	2.14

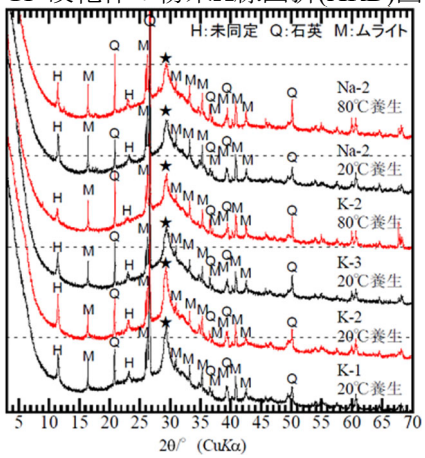
コテ作業性の評価
◎:伸び良好。コテ付着なし。
○:粘性がやや高いがコテ付着なし。
ひび割れ，剥離の評価
◎：2 ヶ月経過時にひび割れ及び剥離なし。
付着強度の評価
材齢 28 日時における建研式接着力試験結果。

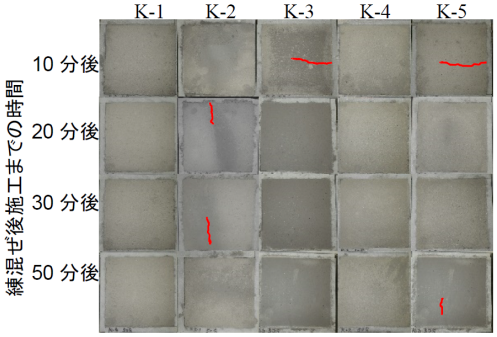
＜提示されている知見・課題＞

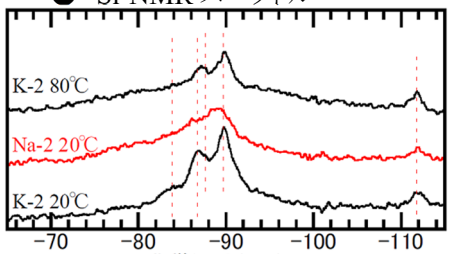
- BFS 微粉末由来の C-S(A)-H が多くなるため，配合による生成物の差が加温養生と比べて小さい
- 左官作業性は A/W0.15-Si/A0.20 あるいは A/W0.10-Si/A0.20 が良好であった。
- 耐熱特性は 700℃以上で 15MPa 程度に圧縮強度が低下し，1150℃で溶解した。
- 硫酸溶液への浸漬では圧縮強度等，加温養生した試料と大きな差はない。
- セメントモルタル下地への左官施工作業性は良好で，ひび割れも生じなかった。また，界面未処理でも下地との付着強度は 1.89~2.14MP と良好であった。

備考	Si 成分粉体添加その場溶解法により，シリカフュームは Si 成分の水ガラス代替として使用。

文献調査表（文献番号 46）

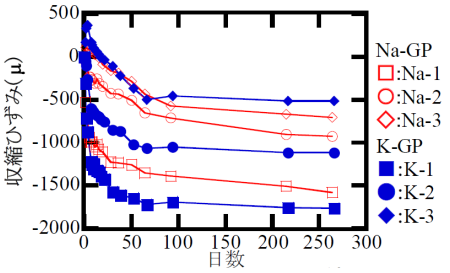
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学･変形性能:圧縮強度，耐久性能:耐熱性，耐化学的浸食性，
その他:エフロレッセンスの評価，左官性の評価，高温生成物</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル，ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，シリカフューム*</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH，KOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣:常温養生カリウム(K)型ジオポリマー左官用モルタルの調製と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1774-1779，2020</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">種々の配合の左官用 GP モルタルの左官作業性，諸性質を既報告 Na-GP と比較検討した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成:フライアッシュ(FA)，高炉スラグ微粉末 (BFS)(40,50vol.%置換),シリカフューム(SF)
● アルカリ溶液：KOH(A/W=0.10，0.15，0.20)　Si/A0.10～0.30
● 養生： 20℃封緘,
● 屋外暴露，加熱処理：電気炉(最高温度 800，1000，1150℃，保持時間 2 時間)</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性： 圧縮強度，粉末 X 線回折（XRD），固体磁気共鳴（NMR），乾燥収縮，高温加熱時の形状安定性，硫酸浸漬，左官作業性，下地モルタルとの付着強度</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">
●GP 作製配合
<table>
<tr><th rowspan="2">配合</th><th>FA</th><th>BFS</th><th>SF</th><th>砂</th><th>NaOH</th><th>KOH</th><th>GNa</th><th>水</th><th>A/W</th><th>Si/A</th><th>W/P</th></tr>
<tr><th colspan="8">Kg/m³</th><th>モル</th><th></th><th>体積</th></tr>
<tr><td>Na-1</td><td>317.1</td><td>256.4</td><td>11.6</td><td>1585</td><td>80.6</td><td>---</td><td>2.64</td><td>133.3</td><td>0.10</td><td>0.20</td><td>0.795</td></tr>
<tr><td>Na-2</td><td>314.1</td><td>254.0</td><td>17.3</td><td>1571</td><td>119.8</td><td>---</td><td>2.62</td><td>111.7</td><td>0.15</td><td>0.20</td><td>0.797</td></tr>
<tr><td>Na-3</td><td>311.4</td><td>251.8</td><td>22.9</td><td>1557</td><td>158.4</td><td>---</td><td>2.60</td><td>90.5</td><td>0.20</td><td>0.20</td><td>0.799</td></tr>
<tr><td>K-1</td><td>321.1</td><td>259.7</td><td>10.8</td><td>1606</td><td>---</td><td>105.6</td><td>2.64</td><td>107.7</td><td>0.10</td><td>0.20</td><td>0.729</td></tr>
<tr><td>K-2</td><td>318.4</td><td>257.4</td><td>16.3</td><td>1592</td><td>---</td><td>158.3</td><td>2.62</td><td>80.3</td><td>0.15</td><td>0.20</td><td>0.735</td></tr>
<tr><td>K-3</td><td>315.8</td><td>255.4</td><td>21.7</td><td>1579</td><td>---</td><td>211.0</td><td>2.60</td><td>52.9</td><td>0.20</td><td>0.20</td><td>0.741</td></tr>
<tr><td>K-4</td><td>318.4</td><td>257.4</td><td>8.1</td><td>1592</td><td>---</td><td>158.3</td><td>2.62</td><td>80.3</td><td>0.15</td><td>0.10</td><td>0.735</td></tr>
<tr><td>K-5</td><td>318.4</td><td>257.4</td><td>24.4</td><td>1592</td><td>---</td><td>158.3</td><td>2.62</td><td>80.3</td><td>0.15</td><td>0.30</td><td>0.735</td></tr>
</table>
GNa:グルコン酸ナトリウム，NaOH 及び KOH:48%水溶液
●GP 硬化体の粉末X線回折(XRD)図


●GP モルタルの左官施工供試体


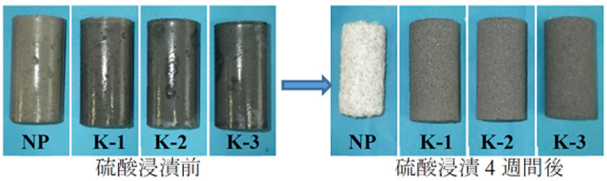
●GP モルタルのフレッシュ性状と強度
<table>
<tr><th rowspan="3">配合</th><th colspan="4">モルタルフロー</th><th rowspan="3">練上がり温度</th><th colspan="4">圧縮強度</th></tr>
<tr><th colspan="2">練上がり直後</th><th colspan="2">練上がり 50 分後</th><th colspan="2">20℃</th><th colspan="2">80℃</th></tr>
<tr><th>0 打</th><th>15 打</th><th>0 打</th><th>15 打</th><th>1 日</th><th>7 日</th><th>28 日</th><th>10 時間</th></tr>
<tr><th colspan="4">mm</th><th>℃</th><th colspan="4">MPa</th></tr>
<tr><td>Na-1</td><td>110</td><td>154</td><td>---</td><td>---</td><td>22.8</td><td>3.4</td><td>47.0</td><td>70.4</td><td>58.5</td></tr>
<tr><td>Na-2</td><td>119</td><td>155</td><td>---</td><td>---</td><td>22.4</td><td>11.3</td><td>46.5</td><td>75.3</td><td>75.5</td></tr>
<tr><td>Na-3</td><td>113</td><td>149</td><td>---</td><td>---</td><td>24.6</td><td>9.0</td><td>43.7</td><td>81.2</td><td>86.0</td></tr>
<tr><td>K-1</td><td>110</td><td>148</td><td>---</td><td>---</td><td>21.7</td><td>3.3</td><td>48.5</td><td>69.7</td><td>59.8</td></tr>
<tr><td>K-2</td><td>123</td><td>164</td><td>132</td><td>180</td><td>21.4</td><td>4.7</td><td>46.4</td><td>82.1</td><td>70.8</td></tr>
<tr><td>K-3</td><td>128</td><td>172</td><td>---</td><td>---</td><td>21.3</td><td>2.5</td><td>39.7</td><td>83.8</td><td>80.4</td></tr>
</table>
---:測定未実行
●^{29}Si-NMR スペクトル


●GP モルタルの左官作業性と仕上がり状況
<table>
<tr><th rowspan="2">配合</th><th colspan="4">コテ作業開始時間(分)</th><th rowspan="2">仕上り</th><th colspan="3">白華</th><th rowspan="2">ひび割れの有無</th></tr>
<tr><th>10</th><th>20</th><th>30</th><th>50</th><th>量</th><th>除去性
掃除機可</th><th>水洗可</th></tr>
<tr><td>Na-1</td><td>○</td><td>○</td><td>△2</td><td>△2</td><td>○~◎</td><td>△</td><td>○</td><td>○</td><td>◎</td></tr>
<tr><td>Na-2</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>△2</td><td>◎</td><td>△</td><td>○</td><td>○</td><td>◎</td></tr>
<tr><td>Na-3</td><td>△1</td><td>△1</td><td>△1</td><td>×</td><td>△</td><td>△</td><td>×</td><td>○</td><td>◎</td></tr>
<tr><td>K-1</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td colspan="2">発生なし</td><td>◎</td></tr>
<tr><td>K-2</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td colspan="2">発生なし</td><td>△</td></tr>
<tr><td>K-3</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>◎</td><td>◎</td><td colspan="2">発生なし</td><td>○</td></tr>
<tr><td>K-4</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td colspan="2">発生なし</td><td>◎</td></tr>
<tr><td>K-5</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td colspan="2">発生なし</td><td>△</td></tr>
</table>
コテ作業性の評価
◎:伸び良好。コテ付着なし，○:粘性が高いがコテ付着量は少量
△1:粘性が高くコテに付着，△2:伸びが悪いがコテ作業可能
×:硬化によりコテ作業不可
仕上りの評価：表面の平滑度を外観から評価
◎:良好，○:普通，△:やや粗い，×:粗い
白華生成量の評価：生成量を外観から評価
◎:発生無し，○:少量，△:やや多い，×:多い
白華除去性の評価：掃除機可
○:綿の様で掃除機で簡単に除去可，×:掃除機で除去不可
白華の除去性の評価：水洗可
○:水溶性で水洗により簡単に除去できる
ひび割れ発生の有無
◎:発生せず，○:ほとんど発生せず，△：微小ひび割れ有り
</td></tr>
</table>

●GP 左官用モルタルの収縮量
(脱型直後から)



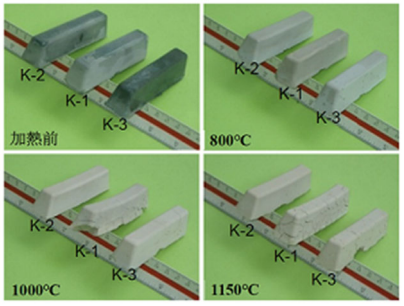
●GP 左官用モルタルの酸耐性試験結果



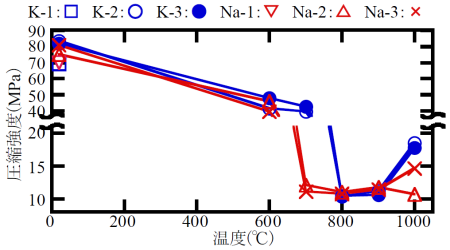
硫酸浸漬前　　硫酸浸漬 4 週間後

配合	質量変化率	硫酸浸漬前圧縮強度	硫酸浸漬後圧縮強度	圧縮強度変化率
	%	MPa		%
Na-1	-0.32	78.5	76.4	-2.7
Na-2	-0.08	79.3	77.2	-2.7
Na-3	-0.04	79.8	75.5	-5.5
K-1	-0.25	69.7	55.7	-20.1
K-2	-0.20	82.1	75.8	-7.7
K-3	-0.11	83.8	76.9	-8.2

●加熱冷却後の K-GP ペーストの写真



●GP モルタル加熱試料の圧縮強度

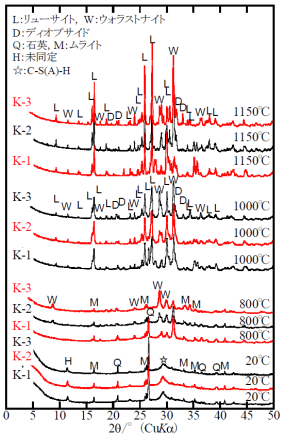


●棒状ペースト供試体の変状

配合	Na-1	Na-2	Na-3	K-1	K-2	K-3
A/W	0.10	0.15	0.20	0.10	0.15	0.20
Si/A	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
1150℃-2h	×	×	×	△	◎	○
1000℃-2h	△	○	△	△	◎	○
800℃-2h	○	◎	◎	○	◎	◎

◎:少量の細かいひび割れ，○:細かいひび割れ，
△:大きなひび割れ，×:原形を留めない（発泡，溶融）

●K-GP ペーストの加熱試料 XRD

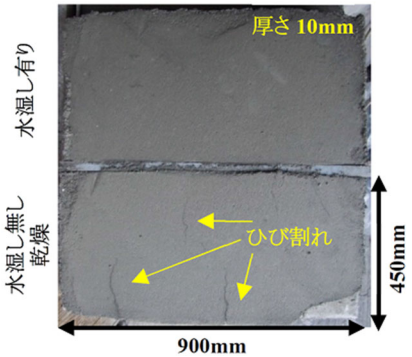


●屋外左官施工時の作製配合（Si/A=0.2）

配合	FA	BFS	SF	砂	NaOH	KOH	GNa	水	A/W	W/P
	Kg/m³								モル	体積
Na-2*	305.9	247.3	19.3	1529.3	133.5	---	2.55	123.2	0.15	0.907
K-2*	314.9	254.8	17.4	1575.4	---	165.8	2.62	84.1	0.15	0.779

GNa:グルコン酸ナトリウム，NaOH 及び KOH:48%水溶液
Na-2*は上原他 [6]で実施した Na-GP の配合

●K-GP モルタルの施工写真



●K-GP モルタルの左官作業性と付着強度

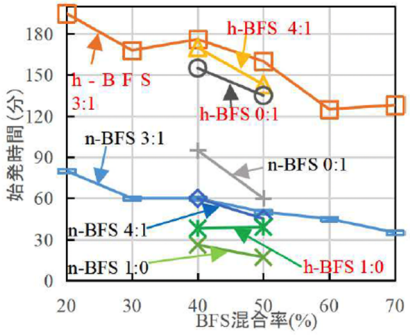
配合	下地処理	白華	コテ作業性	ひび割れ剥離	付着強度(MPa)
K-2*	乾燥	なし	◎	×	---
K-2*	水湿し	なし	◎	◎	2.31

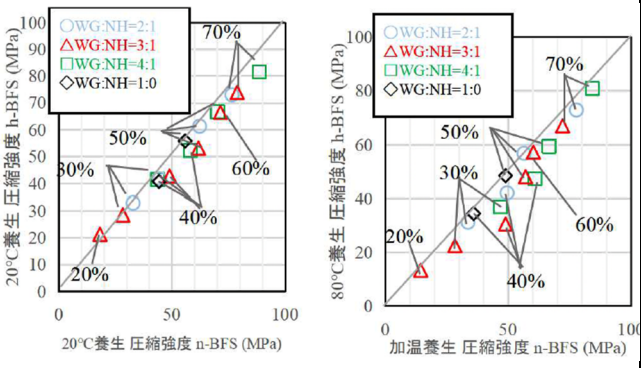
コテ作業性の評価
◎:Na-GP より伸び良好。コテ付着なし
ひび割れ，剥離の評価
◎:2 ヶ月経過時にひび割れ及び剥離なし
×:ひび割れ剥離有り
付着強度の評価
材齢 28 日時における建研式接着力試験結果

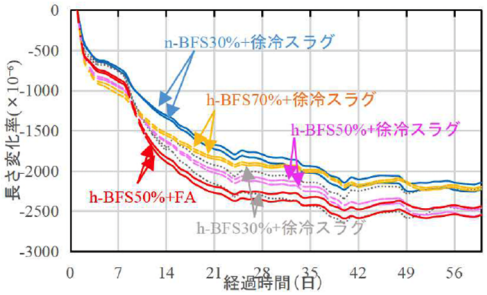
＜提示されている知見・課題＞　左官用常温養生 GP に関して
(1)K 型 GP の粘性は低く，左官作業性は Na 型 GP と比較して良好であった。(2)K 型 GP では白華は発生しなかった。(3)K 型 GP は 1150℃の加熱時に溶融は認められず，Na-GP と比較して高温耐性が高い。(4)K 型 GP の強度発現は Na-GP と比較して遅く，ひび割れ生成に関して下地処理の影響を受けやすい。(5)K 型 GP の収縮ひずみは Na-GP と比較して配合の影響が大きい。

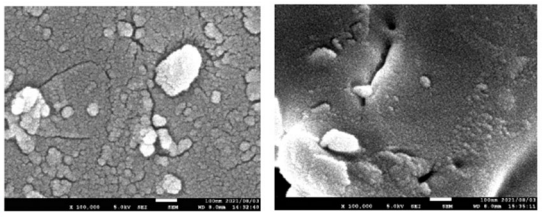
備考	Si 成分粉体添加その場溶解法により，シリカフュームは Si 成分の水ガラス代替として使用。

文献調査表（文献番号 47）

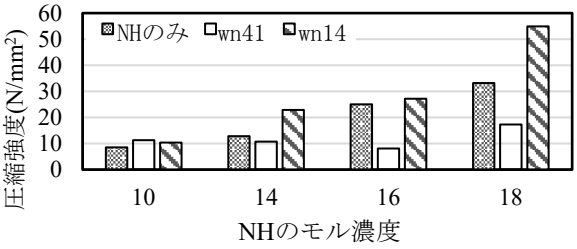
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>凝結時間，圧縮・曲げ強度，乾燥収縮，中性化抵抗性，耐酸性，
内部構造，反応生成物</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル，ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生，高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>高炉水砕スラグ微粉末(BFS)，高炉徐冷スラグ微粉末(SCBFS)</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">深谷竣平，李柱国: 高炉水砕・徐冷スラグを用いたジオポリマーセメントに関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1097-1101,2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">BFS の熱処理による凝結遅延技術を生かし、高炉水砕・徐冷スラグを用いたジオポリマーの製法を開発することを目的として、熱処理有無の BFS(無処理: n -BFS, 700℃12 時間熱処理:h-BFS)と SCBFS を併用するジオポリマーの性能を検討した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：BFS4000 級(0~100%置換)，徐冷スラグ微粉末
● アルカリ溶液:JIS1 号水ガラスの希釈液(WG): 10M の NaOH (NH)＝2：1, 3：1, 4：1
● 養生：常温－20℃気中封緘，加温－80℃ 24 時間→20℃気中封緘</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：凝結時間，曲げ・圧縮強度，乾燥収縮，中性化，耐酸性，化学分析</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● 凝結始発時間と BFS 混合率の関係
 

● 加熱有無の BFS を使ったモルタルの圧縮強度比較
 

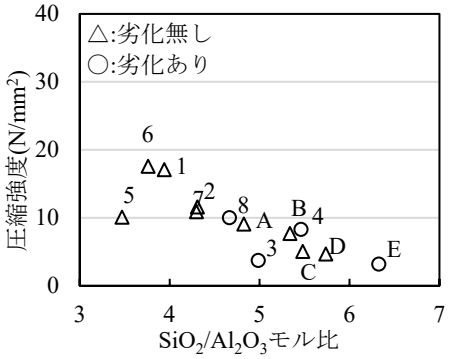
● 乾燥収縮
 

● 加熱前後の BFS 粒子表面の SEM 分析
 
n-BFS　　h-BFS
＜提示されている知見・課題＞
✓高炉水砕スラグ微粉末を加熱処理すれば，ジオポリマー(GP)の凝結始発時間を大幅に延長する。しかし，ケイ酸ナトリウムのみをアルカリ溶液とする場合には遅延効果が低い。
✓h-BFS を使った GP の圧縮強度は n-BFS の使用に比べて殆ど低下しない。高炉水砕・徐冷スラグを用いた GP の強度と凝結時間は BFS の混合率に依存する。
✓h-BFS を用いた GP モルタルの乾燥収縮は，n-BFS を用いた場合よりも若干大きい。
✓徐冷スラグと BFS を併用した GP は従来の GP と同じように耐酸性が優れる。
✓高炉水砕・徐冷スラグジオポリマーの反応生成物は，Al が乏しい C-(A)-S-H ゲルである。
✓高炉スラグ微粉末を熱処理すると、その表面が緻密になるのは、凝結遅延効果の原因である。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 48）

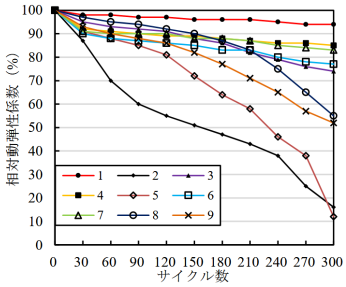
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学性能：圧縮・曲げ強度, 耐久性：吸水劣化</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>パーライト原石粉末(PP), フライアッシュ(FA)</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム, NaOH, アルミン酸ナトリウム</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">岩間祐樹, 李柱国: パーライト原石粉末を用いたジオポリマーに関する研究, コンクリート工学年次論文集, 44(1), 1102-1107, 2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">パーライト原石を用いたジオポリマー(GP)の作製を目的とし、NaOH またはそれとケイ酸ナトリウムをアルカリ溶液として作製した GP の吸水劣化を解決するために,フライアッシュとアルミン酸ナトリウムを使用し, 強度発現性が良いとともに吸水劣化が生じないための原料 SiO_2/Al_2O_3 のモル比を粉体構成比ごとに検討した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成 ： パーライト原石粉末, フライアッシュ(30, 50%置換)
● アルカリ溶液―水ガラス JIS2 号(WG2)：18M の NaOH (NH) = 4:1, 1:1, 1:4
アルミン酸ナトリウム(AN), AN:NH=1:0, 4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2
● 養生 ：24 時間 80℃で封緘養生後, 20℃封緘養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性 ： 圧縮強度, 曲げ強度, 水中浸漬による硬化体の劣化の測定</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● AN と FA を使用しない場合の圧縮強度
 

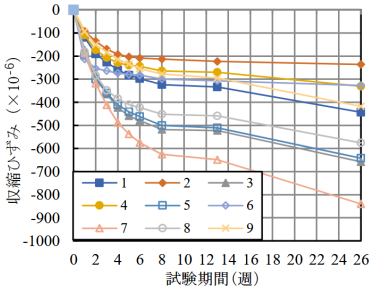
粉体 ： パーライト原石粉末
アルカリ溶液 ：
NH(10, 14, 16, 18mol/L)
wn41 : WG2:NH=4:1
wn14 : WG2:NH=1:4

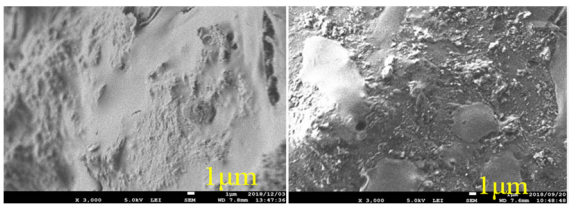
NH18mol/L,wn41 の水中浸漬による劣化
● 調合, 圧縮強度, SiO_2/Al_2O_3 モル比および吸 水劣化の有無
<table>
<tr><th colspan="2">シリーズ</th><th>AN:NH*</th><th>FA:PP**</th><th>AS/AF**</th><th>S/AF**</th><th>SiO_2/Al_2O_3 (モル比)</th><th>圧縮強度 (N/mm²)</th><th>吸水劣化</th></tr>
<tr><td>AH10</td><td>A</td><td>1:0</td><td rowspan="5">0:1</td><td rowspan="15">0.625</td><td rowspan="15">2.0</td><td>4.82</td><td>9.1</td><td>無</td></tr>
<tr><td>AH41</td><td>B</td><td>4:1</td><td>5.34</td><td>7.7</td><td>無</td></tr>
<tr><td>AH31</td><td>C</td><td>3:1</td><td>5.48</td><td>5.07</td><td>無</td></tr>
<tr><td>AH21</td><td>D</td><td>2:1</td><td>5.74</td><td>4.68</td><td>無</td></tr>
<tr><td>AH11</td><td>E</td><td>1:1</td><td>6.33</td><td>3.18</td><td>有</td></tr>
<tr><td>FP37-AH10</td><td>1</td><td>1:0</td><td rowspan="4">3:7</td><td>3.94</td><td>17.1</td><td>無</td></tr>
<tr><td>FP37-AH41</td><td>2</td><td>4:1</td><td>4.31</td><td>11.6</td><td>無</td></tr>
<tr><td>FP37-AH11</td><td>3</td><td>3:1</td><td>4.99</td><td>3.72</td><td>有</td></tr>
<tr><td>FP37-AH12</td><td>4</td><td>1:2</td><td>5.46</td><td>8.29</td><td>有</td></tr>
<tr><td>FP11-AH10</td><td>5</td><td>1:0</td><td rowspan="4">1:1</td><td>3.47</td><td>10.1</td><td>無</td></tr>
<tr><td>FP11-AH41</td><td>6</td><td>4:1</td><td>3.76</td><td>17.6</td><td>無</td></tr>
<tr><td>FP11-AH11</td><td>7</td><td>1:1</td><td>4.30</td><td>10.9</td><td>無</td></tr>
<tr><td>FP11-AH12</td><td>8</td><td>1:2</td><td>4.67</td><td>10</td><td>有</td></tr>
</table>
[注] *:体積比, **: 質量比, AS: アルカリ溶液, AF: 粉体, S: 砂
 

＜提示されている知見・課題＞
✓高温養生により，パーライト原石粉末,ケイ酸ナトリウム及び NaOH を用いて GP 硬化体を作製できるが，水中浸漬により劣化は生じるおそれがある。
✓ケイ酸ナトリウムの代わりにアルミン酸ナトリウムを使用し,パーライト原石粉末の一部を FA で代替すると，GP 硬化体の吸水劣化が防止され, SiO_2/Al_2O_3 モル比が 4.5 以下の場合に圧縮強度が 10N/mm² 以上となる。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 49）

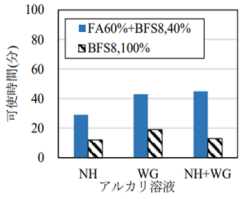
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学：圧縮　耐久性能：乾燥収縮，耐凍害性，中性化抵抗性</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>高温養生と常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>高炉スラグ微粉末，フライアッシュ</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">李柱国, 高垣内仁志, 杉原大祐, 李薛忠:再生粗骨材を用いたジオポリマーコンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集，Vol.42. No.1, pp.1798-1803, 2020</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">アルカリ溶液による再生粗骨材 M と L の改質効果(密度の向上、吸水率の低下、表層構造)，再生骨材 M, L を用いたジオポリマーコンクリートの強度と耐久性を評価した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：高炉スラグ微粉末(BFS)　JIS 3000 級，フライアッシュ　JIS II 種
● アルカリ溶液 GP1：水ガラス JIS 2 号と 10M NaOH の体積比=2：1
● 養生：20℃と 80℃気中封緘</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：再生骨材 M，L の密度・吸水率・表層成分と構造変化，コンクリートの可使時間，圧縮強度，中性化深さ，耐凍害性および乾燥収縮</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">再生骨材 M2005　絶乾密度 2.40g/cm^3，吸水率 4.01%。G: 砕石 2005
再生骨材 L2005　絶乾密度 2.33 g/cm^3，吸水率 5.69%。N: 20℃養生, H:80℃養生
再生骨材コンクリート(RAGP-C)の調合
<table>
<tr><th rowspan="2">No.</th><th rowspan="2">養生温度－粗骨材種類</th><th rowspan="2">GP1/AF (%)</th><th rowspan="2">s/a (%)</th><th rowspan="2">BFS/AF</th><th rowspan="2">FA/AF</th><th colspan="5">単位質量(kg/m³)</th></tr>
<tr><th>GP1</th><th>AF</th><th>S</th><th>G/M/L</th><th>混和剤 CA</th><th>混和剤 AE 剤</th></tr>
<tr><td>1</td><td>N-G</td><td rowspan="9">0.5</td><td>0.42</td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>220</td><td>440</td><td>738</td><td rowspan="9">1000</td><td>13.2</td><td>---</td></tr>
<tr><td>2</td><td>H-G</td><td>0.42</td><td>0.3</td><td>0.7</td><td>250</td><td>500</td><td>725</td><td>---</td><td>1</td></tr>
<tr><td>3</td><td>N-M</td><td>0.41</td><td rowspan="2">0.4</td><td rowspan="2">0.6</td><td>220</td><td rowspan="6">440</td><td>692</td><td>13.2</td><td>---</td></tr>
<tr><td>4</td><td>H-M</td><td>0.37</td><td>220</td><td>590</td><td>---</td><td>0.88</td></tr>
<tr><td>5</td><td>N-M</td><td>0.40</td><td rowspan="2">0.3</td><td rowspan="2">0.7</td><td>220</td><td>654</td><td>13.2</td><td>---</td></tr>
<tr><td>6</td><td>H-M</td><td>0.37</td><td>220</td><td>580</td><td>----</td><td>0.88</td></tr>
<tr><td>7</td><td>H-M</td><td>0.36</td><td>0.2</td><td>0.8</td><td>220</td><td>570</td><td>---</td><td>0.88</td></tr>
<tr><td>8</td><td>N-L</td><td>0.39</td><td rowspan="2">0.4</td><td rowspan="2">0.6</td><td>220</td><td>633</td><td>13.2</td><td>---</td></tr>
<tr><td>9</td><td>H-L</td><td>0.36</td><td>220</td><td>560</td><td>---</td><td>0.88</td></tr>
</table>


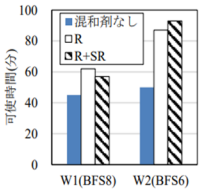
●耐凍害試験－相対動弾性係数


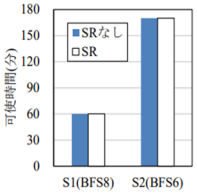
●乾燥収縮試験－収縮ひずみ
＜提示されている知見・課題＞
✓ 砕石の代わりに再生粗骨材を使用した RAGP-C の流動性，空気量及び可使時間は変わらない。
✓ RAGP-C の圧縮強度(Fc)は砕石を用いた場合より低いが，45MPa 以上になりうる。
✓ M 級を用い，BFS 混合率を 4 割以上とすれば耐凍害性を確保できる。


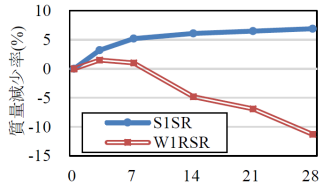
再生骨材 M　再生骨材 L 浸漬後
●アルカリ溶液に浸漬された再生骨材の表面の SEM 画像(×3000)
✓ BFS 混合率を 30%以上とし、高温養生すれば、または常温養生の場合には収縮低減剤を添加すれば、RAGP-C の収縮ひずみを 800×10^{-6} 以内に抑える。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

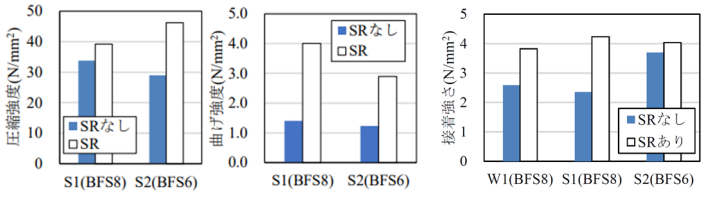
文献調査表（文献番号 50）

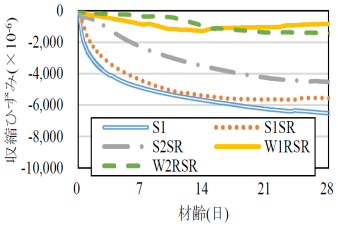
<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>フレッシュ性能：流動性，凝結性　力学・変形性能：圧縮，曲げ
他：ひび割れ補修材としての性能</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>高炉スラグ微粉末，フライアッシュ</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>NaOH，その他（シリカ塗布剤 S）</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">北田達也，李柱国：コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No.1, pp.2059-2064, 2017.7</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">遅延剤および収縮低減剤を添加したジオポリマースラリーの性能を考察。また、新規アルカリ溶液としてケイ酸質系塗布剤(S)を検討。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：高炉スラグ微粉末 8000 または 4000 単独 or フライアッシュ 60%置換
● アルカリ溶液：NaOH（10mol/L）単独 or 水ガラス単独 or NaOH:水ガラス=1:2
または NaOH:S=1:2（いずれも体積比）
● 遅延剤および収縮低減剤の添加有無
● 養生：常温養生（封緘）</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：可使時間，粘度・流動性，保水係数，強度，耐酸性，接着強さ，収縮率</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">• 調合―BFS8:高炉スラグ微粉末 8000 級(BFS6:6000 級)，NH:NaOH, WG:水ガラス，S:シリカ塗布剤，R:遅延剤, SR:収縮低減剤）
<table>
<tr><th rowspan="2">記号</th><th colspan="2">活性フィラー(AF)構成(質量比)</th><th colspan="2">アルカリ溶液の構成(容積比)</th><th rowspan="2">液固比(%)</th></tr>
<tr><th>BFS8</th><th>FA</th><th>NH</th><th>WG</th></tr>
<tr><td>C1</td><td>1.0</td><td></td><td>1.0</td><td>-</td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>C2</td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>1.0</td><td>-</td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>C3</td><td>1.0</td><td></td><td>-</td><td>1.0</td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>C4</td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>-</td><td>1.0</td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>C5</td><td>1.0</td><td></td><td>1.0</td><td>2.0</td><td>0.75</td></tr>
</table>
<table>
<tr><th rowspan="2">記号</th><th colspan="2">活性フィラー(AF)の構成(質量比)</th><th colspan="3">アルカリ溶液の構成(容積比)</th><th colspan="2">混和剤(AF ×%)</th><th rowspan="2">液固比(%)</th></tr>
<tr><th>BFS8</th><th>BFS6</th><th>FA</th><th>NH</th><th>WG</th><th>R</th><th>SR</th></tr>
<tr><td>W1</td><td>0.4</td><td>-</td><td>0.6</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>W1R</td><td>0.4</td><td>-</td><td>0.6</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td></td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>W1RSR</td><td>0.4</td><td>-</td><td>0.6</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>3</td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>W2</td><td>-</td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>W2R</td><td>-</td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td></td><td>0.75</td></tr>
<tr><td>W2RSR</td><td>-</td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>3</td><td>0.75</td></tr>
</table>
<table>
<tr><th rowspan="2">記号</th><th colspan="2">活性フィラー(AF)の構成(質量比)</th><th colspan="2">アルカリ溶液の構成(容積比)</th><th colspan="2">混和剤(AF ×%)</th><th rowspan="2">液固比(%)</th></tr>
<tr><th>BFS8</th><th>BFS6</th><th>NH</th><th>S</th><th>R</th><th>SR</th></tr>
<tr><td>S1</td><td>1</td><td>-</td><td>1</td><td>2</td><td>-</td><td>-</td><td>0.70</td></tr>
<tr><td>S1SR</td><td>1</td><td>-</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>3</td><td>0.70</td></tr>
<tr><td>S2</td><td>-</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>-</td><td>0.70</td></tr>
<tr><td>S2SR</td><td>-</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>-</td><td>3</td><td>0.70</td></tr>
</table>
● 可使時間


(a) C タイプ


(b) 遅延剤を添加した W タイプ


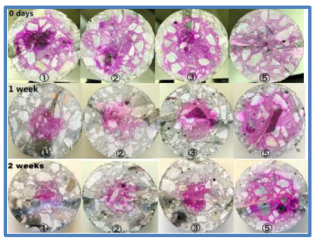
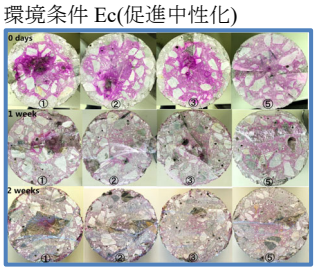
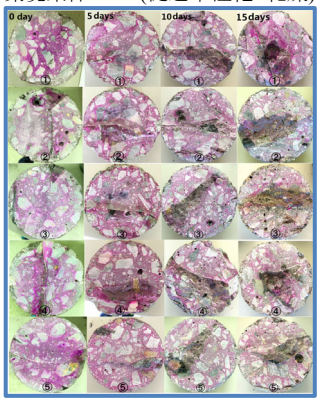
(c) ケイ酸質系塗布剤を用いた S タイプ
● 耐酸性


● 圧縮・曲げ強度と接着強さ(シリカ剤 S を使用した調合)


● 乾燥収縮率


＜提示されている知見・課題＞
✓遅延剤を用いた場合、可使時間は 60 分以上であるが、圧縮強度は 10~30%低下する。
✓ひび割れ充填性を考慮して液固比を高めると、収縮率は大きくなるが，収縮低減剤の添加により収縮を抑えることができる。
✓ケイ酸質系塗布剤を用いた場合，遅延剤無しで可使時間は 60 分以上となり，粘度 3000mPa・s 以下，圧縮強度 36N/mm² 以上、接着強さ 4.0N/mm²，硬化収縮率 1%以下のジオポリマー系ひび割れ補修材が作製可能である。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 51）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>耐久性能：中性化</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>20℃常温，60℃加温</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>高炉スラグ微粉末（BFS），フライアッシュ（FA）</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">S. Li, Z. Li, T. Nagai, and T. Okada：Neutralization resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete，コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No.1, pp.2023-2028, 2017.7</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">CO_2 暴露と水分の移動がジオポリマーコンクリート(GP-C)の中性化に与える影響を明らかにするため、促進中性化試験、CO_2 暴露(R.H60%)と乾燥(R.H.0%)繰り返し、乾湿繰り返しを受けたコンクリートのアルカリ性を調査した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● アルカリ溶液(体積比)：ケイ酸ナトリウム溶液：NaOH 溶液 (10 mol) =3:1；
● 粉体構成(質量比)：FA : BFS=7:3；
● 養生: 常温, 20±2℃, RH.60±5%, 28 日（シリーズ①②③④）；加温, 60℃, 6 時間→28 日常温養生（シリーズ⑤）</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：pH，中性化深さ</td></tr>
<tr><td>主な知</td><td colspan="2">●フェノールフタレイン溶液噴霧後の呈色状況
シリーズ
① ② ③ ⑤
 
0 日
7 日
14 日
環境条件 Ec(促進中性化)
 
0 日
7 日
14 日
環境条件 Ec-d (促進中性化+乾燥)
 
①
②
③
④
⑤
環境条件 Ew-d(乾湿繰り返し)

● GP-C の促進中性化の環境条件
<table><tr><td rowspan="3">Environment conditions</td><td>E_c</td><td>CO_2 concentration: 10±0.4%, T: 20±0.5℃, R.H.: 60±5%. (Except No.④)</td></tr><tr><td>$E_{c\text{-}d}$</td><td>E_c for 7 days →80℃, until the mass didn't change. (Except No.④)</td></tr><tr><td>$E_{w\text{-}d}$</td><td>Soaked into clean water (pH=7.7) for 3 days →80℃, until the mass doesn't change</td></tr></table>
● GP-C とポルトランドセメントコンクリート(OPC-C)の中性化速度の比較
$$D = a \cdot \sqrt{CO_2 / 5.0} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$
ここに, D: 中性化深さ (mm), t: 中性化時間(週), CO_2: CO_2 濃度 (%), a: 中性化速度係数(mm/√week)
圧縮強度が同じである GP-C と OPC-C の中性化速度係数(a)
<table><tr><th>No.</th><th>圧縮強度(R_c, MPa)</th><th>OPC-C</th><th>GP-C</th></tr><tr><td>1A</td><td>25.0</td><td>4.1</td><td>9.4</td></tr><tr><td>2A</td><td>28.4</td><td>3.7</td><td>9.2</td></tr><tr><td>3A</td><td>27.4</td><td>3.8</td><td>9.3</td></tr></table>[注] 1: 1 A, 2 A, 3 A の調合はシリーズ①, ②, ③と同じである。
2: OPC-C の中性化速度計算式 a=-0.13 R_c+7.40, r = 0.999
＜提示されている知見・課題＞
✓ GP コンクリートの CO_2 による中性化速度は OPC-C より高い。
✓ GP-C は CO_2 と水分の脱出による複合中性化の速度が CO_2 による中性化速度より速い。
✓ 水分の移動によるアルカリ物質の溶出も GP の中性化をもたらす。
✓ 加温養生した GP-C の中性化抵抗性が、常温養生されたコンクリートより高い。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 52）

評価性能・特性		放射線元素（Sr, Cs)の固定能力，吸水率，密度，曲げ強度
硬化体タイプ		ペースト
作製条件	養生	20℃気中養生
	粉体種類	製紙スラッジ焼却灰(PSA)
	アルカリ種類	ケイ酸ナトリウム(1 号液)または 10M 苛性ソーダを添加する 0 号液
文献情報		李柱国，池田攻：製紙スラッジ焼却灰を用いたジオポリマーおよびその放射能汚染水の処理への応用に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.1, pp.2337-1342, 2016.7
研究概要		多孔質の製紙スラッジ焼却灰(PSA)の高吸水特性を活かして放射能汚染水の無害化処理技術を開発するために、PS 灰を用いたジオポリマーの Sr, Cs の固定率を調べた。
配合・養生概要		● $Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ をそれぞれ PSA の質量の 1%で単独または混合添加を行った。 ● 20℃気中養生 ● 液固比：1.05 または 1.20
試験概要		● PSA を用いたジオポリマー硬化体の 28 日材齢の密度・吸水率・曲げ強度, 6 週材齢の Sr^{2+}, Cs^{+}の固定率を測定

主な知見

● 使用した 3 種類の PS 灰の物理・化学特性

サンプル名	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	化学組成(%)											
			SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3	その他*
OTo	2.46	4340	12.04	0.90	33.62	1.55	0.03	37.52	1.42	0.24	0.84	4.73	6.15	0.96(0.03)
OTs	2.29	4660	21.22	1.38	28.92	2.18	0.03	31.88	2.93	0.54	1.01	2.34	6.06	1.51(0.04)
N	2.19	4880	23.60	0.72	14.31	2.65	0.34	33.12	10.13	0.78	0.80	3.76	8.93	0.86(0.07)

注：* 微量元素の総量：ZnO, CuO, BaO, SrO, NiO, PbO, ZrO_2, CeO_2, Cr_2O_3, Bi_2O_3,Cl 等，( )内の数字は SrO の量で，Cs_2O は未検出

● PSA-GP の密度と曲げ強度

調合の記号（模擬核種の添加有無）	表乾曲げ強度 (MPa)	密度(g/cm^3) 表乾	気乾
o-0 (添加無)	0.91	1.46	0.97
o-0 ($Sr(NO_3)_2$, 1%添加)	1.00	1.47	0.95
o-0 ($CsNO_3$, 1%添加)	0.85	1.46	1.07
o-1 (添加無)	1.83	1.58	1.11
o-1 ($Sr(NO_3)_2$, 1%添加)	1.72	1.58	1.09
o-1 ($CsNO_3$, 1%添加)	1.78	1.61	1.22
s-0 (添加無)	1.23	1.49	1.08
s-0 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	0.91	1.50	1.14
s-1 (添加無)	0.92	1.59	1.11
s-1 ($Sr(NO3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	0.67	1.62	1.12
N-0 (添加無)	1.14	1.55	1.05
N-0 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	1.10	1.54	1.03
N-1 (添加無)	0.90	1.55	1.00
N-1 ($Sr(NO3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	0.74	1.54	1.00

● PSA-GP からの Sr と Cs の溶出試験結果

調合の記号と添加した核種	GP 粉粒体中の PS 灰の割合 (%)	GP 粉粒体 (12.5g)中の PS 灰の質量 (g)	GP 粉粒体(12.5g)中模擬核種の含有量(mg) SN, CN	Sr^{2+}, Cs^{+}	模擬核種の溶出量(ppb) Sr^{2+}(421nm), Cs^{+}(459nm)	溶出量(対 12.5g) Sr^{2+}(mg), Cs^{+}(mg)	核種の固定率 (%)
(1) ストロンチウム（Sr^{2+}）							
o-0 ($Sr(NO_3)_2$, 1%添加)	70.4	8.80	88.0	36.4	12	0.00150	99.996
o-1 ($Sr(NO_3)_2$, 1%添加)	66.0	8.25	82.5	34.2	1486	0.18575	99.457
s-0 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	64.2	8.03	80.3	33.2	8	0.00100	99.997
s-1 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	70.6	8.83	88.3	36.6	9494	1.18675	96.758
N-0 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	68.0	8.50	85.0	35.2	930	0.11625	99.670
N-1 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	70.1	8.76	87.6	36.3	12560	1.57000	95.675
(2) セシウム（Cs^{+}）							
o-0 ($CsNO_3$, 1%添加)	62.1	7.76	77.6	52.9	18170	2.27125	95.707
o-1 ($CsNO_3$, 1%添加)	60.0	7.50	75.0	51.1	18810	2.35125	95.399
s-0 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	64.2	8.03	80.3	54.8	29560	3.69500	93.257
s-1 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	70.6	8.83	88.3	60.2	14270	1.78375	97.037
N-0 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	68.0	8.50	85.0	58.0	49310	6.16375	89.370
N-1 ($Sr(NO_3)_2$, $CsNO_3$ 各 1%添加)	70.1	8.76	87.6	59.7	40620	5.07750	91.500

＜提示されている知見・課題＞

✓ PS 灰を活性フィラーとしてジオポリマー(PS 灰-GP)を製造しうるが，液固比を大きくする必要がある。また, PS 灰-GP は多孔質であり、吸水率が高く，密度と強度が低い

✓ PS 灰-GP の Sr の固定率は，0 号液を用いた場合には 99.0%以上であり，Cs の固定率は，PS 灰の種類に依存し 89～97%であった。しかし、後続の研究によって Cs の固定の不安定問題を海水の添加で解決した [1]。

✓ 汚染水を溶媒とするアルカリ溶液と PS 灰でジオポリマー固化体を作製することにより放射能汚染水を大量に処理可能である。

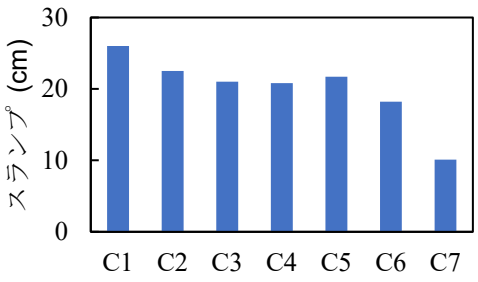
● PSA-GP の調合

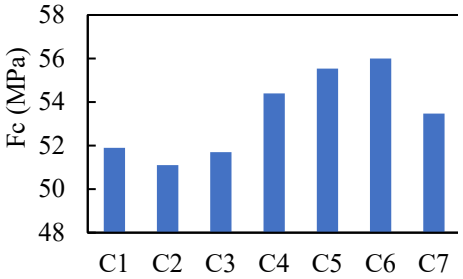
配合の記号		s-0	s-1	o-0	o-1	N-0	N-1
構成材料	PS 灰	OTo		OTs		N	
	アルカリ溶液	0 号液	1 号液	0 号液	1 号液	0 号液	1 号液
水（質量比%）		42.0	41.4	39.4	38.9	42.0	41.4
アルカリ成分 (%)		12.5	13.1	11.8	12.3	12.5	13.1
小計 (%)		54.5		51.2		54.5	
PS 灰 (%)		45.5		48.8		45.5	
合計 (%)		100		100		100	
液固比		1.20		1.05		1.20	
水と PS 灰の質量比		0.92	0.91	0.81	0.80	0.92	0.91

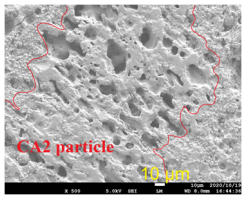
注:アルカリ成分は, 水に溶ける前の水ガラスと苛性ソーダである。

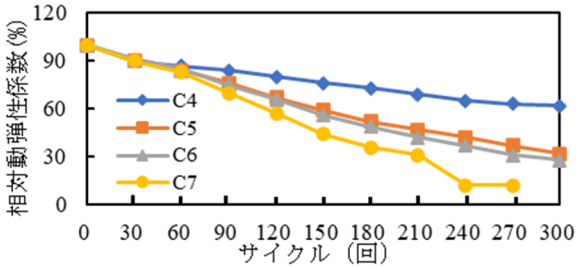
備考	参考文献 1）Z.Li, M. Nagashima, and K. Ikeda: Treatment technology of hazardous water contaminated with radioisotopes with paper sludge ash-based geopolymer — Stabilization of immobilization of strontium and cesium by mixing seawater, Materials, Vol.11, No.1521, 2018.

文献調査表（文献番号 53）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>力学：圧縮・曲げ強度，耐久性能：耐凍害性</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル，コンクリート</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温:20℃，加温: 80℃24 時間</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>高炉スラグ微粉末(BFS)，フライアッシュ(FA)</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">X. Li, Z. Li, D. Sugihara, Properties of geopolymer materials with clinker ash, コンクリート工学年次論文集，Vol.44. No.1, pp.1114-1119, 2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">クリンカアッシュ(CA)をジオポリマー硬化体の粉体と細骨材として利用する可能性を検討するために、CA を用いたモルタルとコンクリートの各種性能を調査した。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体(AF)：高炉スラグ微粉末 JIS3000 級と JIS4000 級，フライアッシュ JIS II 種
● アルカリ溶液(AS)：水ガラス JIS1 号の希釈液または JIS2 号, 10M の NaOH
WG:NH = 3:1 (水ガラス 1 号, AS1); 2:1 (水ガラス 2 号, AS2)
● 養生：20℃, 80℃封緘気中養生</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：コンクリートのスランプ，モルタルのテーブルフロー値，可使時間，圧縮強度，曲げ強度，耐凍害性(相対動弾性係数と質量減少率)</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● クリンカアッシュ 1 (CA1): 絶乾密度 2.07 g/cm^3
● クリンカアッシュ 2 (CA2): 絶乾密度 1.80 g/cm^3
● ジオポリマーコンクリートの調合(S:海砂, G:砕石)
<table>
<tr><th>No.</th><th>置換率</th><th>AS/AF</th><th>AS 種類</th><th>WG/AS</th><th>BFS/AF</th><th>BFS 種類</th><th>AF (kg/m^3)</th><th>AS (kg/m^3)</th><th>CA (kg/m^3)</th><th>S (kg/m^3)</th><th>G (kg/m^3)</th></tr>
<tr><td>C1</td><td>-</td><td rowspan="3">0.6</td><td rowspan="3">AS1</td><td rowspan="7">0.75</td><td rowspan="7">0.3</td><td rowspan="3">BFS30</td><td>440</td><td>264</td><td>-</td><td>654</td><td rowspan="7">1000</td></tr>
<tr><td>C2</td><td>10% FA</td><td>396</td><td>264</td><td>44 (CA1)</td><td>654</td></tr>
<tr><td>C3</td><td>10% FA</td><td>396</td><td>264</td><td>44 (CA2)</td><td>654</td></tr>
<tr><td>C4</td><td>-</td><td rowspan="4">0.5</td><td rowspan="4">AS2</td><td rowspan="4">BFS40</td><td>420</td><td>210</td><td>-</td><td>721</td></tr>
<tr><td>C5</td><td>10% Sand</td><td>420</td><td>210</td><td>70(CA2)</td><td>634</td></tr>
<tr><td>C6</td><td>20% Sand</td><td>420</td><td>210</td><td>137(CA2)</td><td>550</td></tr>
<tr><td>C7</td><td>30% Sand</td><td>420</td><td>210</td><td>202(CA2)</td><td>471</td></tr>
</table>


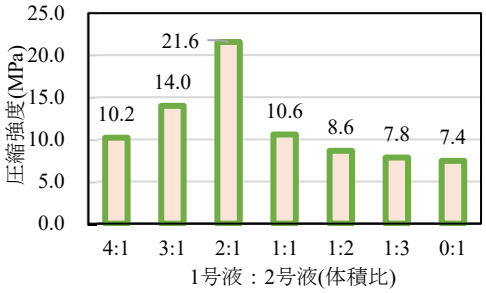
● コンクリートのスランプ


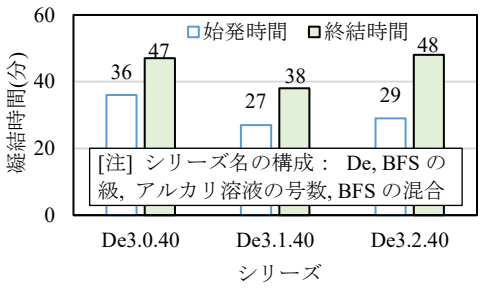
● コンクリートの圧縮強度


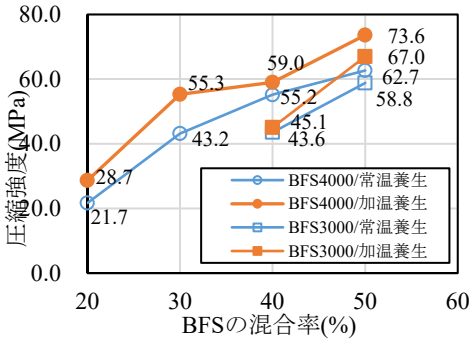
CA2 を用いたモルタル
● モルタルの SEM 画像(×500)


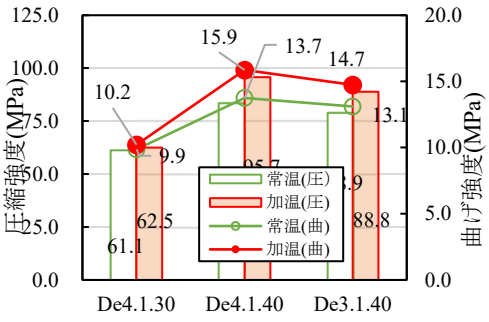
● 相対動弾性係数とサイクル数の関係
＜提示されている知見・課題＞
✓ クリンカアッシュを粉体として使う場合に、ジオポリマーの流動性と強度が低下する。しかし、細骨材として一部の天然砂を置換する場合，置換率が 10-20%であれば、コンクリートの流動性と強度が低下しない。
✓ 常温養生されたジオポリマーコンクリートでは，クリンカアッシュが天然砂を置換する割合が高いほど、凍結融解抵抗性は低くなる。</td></tr>
</table>

文献調査表（文献番号 54）

<table>
<tr><td colspan="2">評価性能・特性</td><td>凝結時間，圧縮・曲げ強度，耐酸性，反応生成物</td></tr>
<tr><td colspan="2">硬化体タイプ</td><td>モルタル，ペースト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">作製条件</td><td>養生</td><td>常温養生，加温養生</td></tr>
<tr><td>粉体種類</td><td>脱水ケーキ乾燥粉末(De)，高炉水砕スラグ微粉末(BFS)</td></tr>
<tr><td>アルカリ種類</td><td>ケイ酸ナトリウム，NaOH</td></tr>
<tr><td>文献情報</td><td colspan="2">李柱国: 脱水ケーキ乾燥粉末を用いたジオポリマー硬化体に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1078-1083, 2022</td></tr>
<tr><td>研究概要</td><td colspan="2">湿式砕石粉(De)を粉体としてジオポリマー(GP)にリサイクルする可能性を検討するために、De を単独に使用する GP および De と BFS を併用する GP の凝結時間、力学性能、耐酸性および反応生成物を調べた。</td></tr>
<tr><td>配合・養生概要</td><td colspan="2">● 粉体構成：脱水ケーキ乾燥粉単独、または DE と BFS4000 級(30~50%置換)の併用
● アルカリ溶液:JIS1 号水ガラスの希釈液(1 号液), 10M の NaOH (2 号液), 1 号液と 2 号液を 3:1 の体積比で混合するもの(0 号液)
● 養生：常温－20℃28 日気中封緘，加温－80℃ 24 時間→20℃27 日気中封緘</td></tr>
<tr><td>試験概要</td><td colspan="2">● 評価特性：凝結時間，曲げ・圧縮強度および耐酸性を測定し，XRD 分析を行った。</td></tr>
<tr><td>主な知見</td><td colspan="2">● De のみを粉体とした GP ペーストの強度
 

● De と BFS を併用した GP の凝結時間
 

● De と BFS を併用したモルタルの圧縮強度
 



(a) 0 号液を使用　　1 号液を使用
＜提示されている知見・課題＞
✓ 今回の脱水ケーキ乾燥粉末を単独に使用しても GP 硬化体を作製できる。活性フィラーと不活性フィラーの区別基準は今後の検討課題である。
✓ 高炉スラグ微粉末を混合すれば、脱水ケーキまたは乾式砕石粉、流動床石炭灰などの不活性フィラーを使っても GP を作製できる。
✓ 1 号液または 0 号液を使えば，De を用いて高強度 GP を作製することができる。なお，高分子凝集剤を含む De を使っても GP 硬化体の耐酸性が優れる。
✓ 脱水ケーキと BFS を併用した GP の凝結時間と強度性能は殆ど BFS に依存する。
✓ 脱水ケーキまたは乾式砕石粉を粉体として GP にリサイクルすることができれば、砕石粉の分離が必要ではなくなり、砕石・砕砂の製造は容易になる。</td></tr>
<tr><td>備考</td><td colspan="2">乾式砕石粉を用いた GP の参考文献
山口拓臣，李柱国: 岩粉を用いたジオポリマーセメントに関する研究，2017 年度日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.41, pp.41-44, 2018.3</td></tr>
</table>

２．レビュー論文の紹介

本委員会と並行で活動した，土木学会重点研究課題「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究」(233 委員会）では，海外論文を中心に，以下の 31 編のレビュー論文を収集した．ジオポリマーはアルカリ活性材料（AAMs）の一部に含む，とする解釈も多いことから，AAMs に関する知見は，ジオポリマーを理解するうえで極めて参考になると考えられる．233 委員会の報告書は，土木学会ホームページで公開されているので，参照されたい．

https://committees.jsce.or.jp/s_research/taxonomy/term/6

参考文献

1) Jorge Osio-Norgaard et al.: A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete, Construction and Building Materials, Volume 186, 20 October 2018, Pages 191-206, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119
2) Osama Ahmed Mohamed: A Review of Durability and Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Concrete, Materials 2019, 12(8), 1198, https://doi.org/10.3390/ma12081198
3) Wengui Li et al.: An Review on Durability of Alkali-activated System from Sustainable Construction Materials to Infrastructures, ES Materials & Manufacturing, 2019, 4, 2-19, https://dx.doi.org/10.30919/esmm5f204
4) Kamel Arbi: A Review on the Durability of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Systems: Advances, Issues, and Perspectives, Industrial & Engineering Chemistry Research 2016 55 (19), 5439-5453, https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00559
5) M. B. Mohd Salahuddin et al: A review on thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers, Ceramics International, Volume 41, Issue 3, Part B, April 2015, Pages 4273-4281, https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.119
6) Vishojit Bahadur Thapa et al.: A short review on alkali-activated binders and geopolymer binders, University of Luxembourg Library, https://orbilu.uni.lu/handle/10993/35284
7) Adeyemi Adesina: ALKALI ACTIVATED MATERIALS: REVIEW OF CURRENT PROBLEMS AND POSSIBLE SOLUTIONS, SynerCrete’18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete
8) John L. Provis et al.: Advances in understanding alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 110-125, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013
9) Fernando Pacheco-Torgal et al.: Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 7, July 2008, Pages 1305-1314, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015
10) Fernando Pacheco-Torgal et al.: Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue

7, July 2008, Pages 1315-1322
11) Mehrab Nodehi et al.: Alkali-Activated Materials and Geopolymer: a Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy, Circular Economy and Sustainability (2021), https://doi.org/10.1007/s43615-021-00029-w
12) John L. Provis: Alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, Volume 114, December 2018, Pages 40-48, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009
13) Tero Luukkonen et al.: Application of alkali-activated materials for water and wastewater treatment: a review, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 18, pages271-297 (2019), https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-019-09494-0
14) Beatryz C. Mendes et al.: Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review, Journal of Building Engineering, Volume 35, March 2021, 102010, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102010
15) Katalin Orosz et al.: Autogenous Deformation of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Concrete Subjected to Variable Curing Temperatures, Advances in Civil Engineering, Volume 2019 Article ID 6903725, https://doi.org/10.1155/2019/6903725
16) Bahmani, S.H. et al: Review on recent developments in alkali-activated materials, Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium. Eds. GJ Alexander & CY Chin, Napier
17) Zhu Pan et al.: Effect of Temperature on Thermal Properties of Alkali activated Fly Ash/Slag Binders, Proc. 1st International Conference on Structural Engineering Research (iCSER 2017), ISBN: 978-0-6480147-6-8
18) QINGBO TIAN et al.: EFFECTS OF COMPOSITION OF FLY ASH-BASED ALKALI-ACTIVATED MATERIALS ON COMPRESSIVE STRENGTH: A REVIEW, Ceramics-Silikáty 65 (1), 9-23 (2021), https://doi.org/10.13168/cs.2020.0037
19) Mugahed Amran et al.: Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review, Journal of Building Engineering, Volume 45, January 2022, 103638, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103638
20) Priyadharshini Perumal et al.: Influence of alkali source on properties of alkali activated silicate tailings, Materials Chemistry and Physics, Volume 271, 1 October 2021, 124932, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124932
21) Cuifang Lu et al.: Rheology of alkali-activated materials: A review, Cement and Concrete Composites, Volume 121, August 2021, 104061, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104061
22) R. V. Silva et al.: Us of municipal solid waste incineration bottom ashes in alkali-activated materials, ceramics and granular applications: A review, Waste Management, Volume 68, October 2017, Pages 207-220, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.043
23) Peiliang Cong et al.: Advances in geopolymer materials: A comprehensive review, "Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 8, Issue 3, June 2021, Pages 283-314, https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004
24) Ning Li et al.: A review on mixture design methods for geopolymer concrete, Composites

Part B: Engineering, Volume 178, 1 December 2019, 107490, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107490
25) Furqan Farooq et al.: Construction and Building Materials, Volume 306, 1 November 2021, 124762, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762
26) Mohsin Nawaz et al.: Geopolymers in construction - recent developments, Construction and Building Materials, Volume 260, 10 November 2020, 120472, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472
27) R.S. Krishna et al.: A review on developments of environmentally friendly geopolymer technology, Materialia, Volume 20, December 2021, 101212, https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101212
28) Peng Zhang et al.: A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar, Composites Part B: Engineering, Volume 152, 1 November 2018, Pages 79-95, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031
29) S. Luhar et al.: Impact of incorporation of volcanic ash on geopolymerization of eco-friendly geopolymer composites: A review, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 572 (2019) 012001, https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012001
30) Sk S. Hossain et al. Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review, Construction and Building Materials, Volume 310, 6 December 2021, 125218, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218
31) Blessen Skariah Thomas et al.: Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review, Journal of Building Engineering, Volume 40, August 2021, 102332, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332

３．アンケート

上記のレビュー論文の整理と同様に，233 委員会では，土木関係の様々な業種の技術者を対象に，AAMs の実用化に向けた課題抽出を目的としたアンケート調査を行った．質問項目を，以下に示す．AAMs やジオポリマーは，カーボンニュートラルに向けた一つの選択肢として期待が高まっている材料である一方で，基準類の整備や試験法，性能評価手法の整備，法整備などが必要，といった多くの意見が寄せられた．アンケート結果については，土木学会ホームページで公開されているので，参照されたい．

https://committees.jsce.or.jp/s_research/taxonomy/term/6

Q1. ジオポリマーコンクリートあるいは AAM という材料についてご存じですか？
① 理解している．
② 聞いたことはあるが詳しくはわからない．
③ 全く知らない，聞いたこともない．

Q2. あなたの仕事の中で，ジオポリマーコンクリートあるいは AAM という材料を使用してみたいですか？
① 使用したことがある．
② 使用してみたいが，不安がある．
③ 使用したいと思わない．

Q3. Q2.で「①使用したことがある.」と回答された方のみにお尋ねします．どのような目的，対象物で使用されましたか？（自由記述）

Q4. Q2.で「使用してみたいが不安がある」「使用たいと思わない」と回答された方にお尋ねします．どのような理由でしょうか？（複数回答可）
□ JIS などの規格が未整備であり，品質管理に不安があるから．
□ 通常のセメントコンクリートよりもコストがかかりそうだから．
□ 通常のセメントコンクリートよりも設計や施工に手間がかかりそうだから
□ GP や AAM を用いた構造部の設計規準等が未整備であり，何を参考に設計施工したらよいのかわからないから．
□ 新しい材料なので，長期耐久性の検討が十分でないと考えるから
□ その他

Q5. あなたの職場において SDGs，脱炭素への取組は近年推進されていると感じまずか？
① 推進されている．
② 特に推進されてはいない．

Q6. あなたの職場において，GP や AAM の使用が SDGs，脱炭素の取組につながると感じますか？

① つながると感じる.

② 関係ないと思う／わからない.

Q7. GP あるいは AAM の今後の活用について，あなたのご意見をお聞かせください.（自由記述）

Q8. あなたの業種を教えてください.

選択肢：発注者（公的機関），コンサルタント（個人営業含む），建設会社，材料・素材メーカー，研究機関，その他

Q9. あなたの年代を教えてください.

選択肢：20 代以下（就職前），～30 歳，31～40 歳，41～50 歳，51～60 歳，61～70 歳，71 歳以上

コンクリート技術シリーズ一覧

No.：標題／発行年月／判型・ページ数／本体価格

	【 1】:連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集	／平4.4	／B5・314p	
	【 2】:コンクリートの力学特性に関するワークショップ	／平5.10	／B5・108p	
	【 3】:STATE-OF-THE-ART REPORT ON CONTINUOUS FIBER REINFORCING MATERIALS	／平5.10	／B5・164p	
	【 4】:「シリカフュームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集	／平5.11	／B5・178p	
	【 5】:プレストレストコンクリート構造の現況と設計方法の動向	／平6.5	／B5・196p	
※	【 6】:コンクリート標準示方書改訂小委員会 舗装部会報告	／平6.8	／B5・104p	／3786円
	【 7】:コンクリートの規準の動向	／平6.8	／B5・62p	
	【 8】:マスコンクリート技術の現状と動向	／平6.10	／B5・125p	
	【 9】:コンクリート構造物の耐震設計法の動向	／平7.1	／B5・96p	
	【10】:高流動コンクリートシンポジウム論文報告集	／平8.3	／B5・341p	
	【11】:コンクリート標準示方書をめぐる環境・施工技術の最近の動向・設計施工照査システム	／平8.5	／B5・302p	
	【12】:阪神淡路大震災被害分析と靭性率評価式	／平8.7	／B5・82p	
	【13】:土木学会コンクリート委員会 コンクリート教育研究小委員会報告書	／平8.8	／B5・102p	
	【14】:最新のマスコンクリート技術	／平8.11	／B5・139p	
	【15】:高流動コンクリートに関する技術の現状と課題	／平8.12	／B5・239p	
	【16】:コンクリート構造物の品質保証	／平9.2	／B5・95p	
※	【17】:将来の示方書改訂のための検討課題	／平9.2	／B5・68p	／1200円
	【18】:コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線	／平9.5	／B5・92p	
	【19】:自己充填コンクリートセミナー論文報告集	／平9.5	／B5・204p	
	【20】:コンクリート構造物の耐震技術 －現状と将来展望－	／平9.7	／B5・232p	
	【21】:構成モデル小委員会(301)成果報告書	／平9.7	／B5・158p	
	【22】:RC・PC構造物の設計に関する現状と今後の展望 －RC・PC部会報告－	／平9.8	／B5・127p	
	【23】:RECOMMENDATION FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES USING CONTINUOUS FIBER REINFORCING MATERIALS	／平9.10	／B5・325p	
	【24】:コンクリートのクリープおよび乾燥収縮	／平9.10	／B5・130p	
※	【25】:コンクリート教育研究小委員会報告集・論文集	／平9.11	／B5・194p	／2380円
	【26】:鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向	／平9.12	／B5・235p	
	【27】:フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集	／平9.12	／B5・229p	
	【28】:コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像 －性能照査型補強設計指針(試案)－	／平10.4	／B5・455p	
	【29】:コンクリートと資源の有効利用	／平10.11	／B5・322p	
	【30】:PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON SELF-COMPACTING CONCRETE	／平11.3	／B5・399p	
	【31】:RECOMMENDATION FOR SELF-COMPACTING CONCRETE	／平11.8	／B5・77p	
	【32】:コンクリート標準示方書改定に関する中長期ビジョン	／平11.9	／B5・358p	
	【33】:将来の骨材試験方法改訂のための検討	／平12.1	／B5・41p	
	【34】:コンクリート構造物の耐震性能照査 －検討課題と将来像－	／平12.4	／B5・210p	
	【35】:コンクリート構造物のデザイン	／平12.5	／B5・164p	
	【36】:阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証 －検討課題と将来像－	／平12.5	／B5・310p	
	【37】:フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題	／平12.7	／A4・164p	
	【38】:コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価 －現状と今後の課題－	／平12.9	／A4・137p	
	【39】:コンクリートのクリープおよび乾燥収縮Ⅱ	／平12.11	／A4・101p	
	【40】:鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2)	／平12.12	／A4・325p	
	【41】:RECOMMENDATIONS FOR UPGRADING OF CONCRETE STRUCTURES WITH USE OF CONTINUOUS FIBER SHEETS	／平13.3	／A4・250p	
	【42】:性能照査型システムにおけるコンクリート構造物の補強	／平13.6	／A4・308p	
	【43】:プレキャストコンクリート部材の力学的特性 －現状と課題－	／平13.6	／A4・310p	
	【44】:コンクリートの環境負荷評価	／平14.5	／A4・186p	
	【45】:水辺のコンクリート構造物 －コンクリートによる豊かな水辺環境の創造－	／平14.7	／A4・157p	
	【46】:コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集	／平14.12	／A4・82p	
	【47】:コンクリート用化学混和剤の性能評価	／平14.12	／A4・225p	
	【48】:コンクリート構造物の耐震性能照査技術 －現状と将来展望－	／平14.12	／A4・138p	
	【49】:阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証 －解析手法の適用と比較－	／平14.12	／A4・303p	
※	【49CD】:CD-ROM 阪神淡路大震災被害分析小委員会の報告－地盤震動解析プログラム(FDEL)付－(コンクリート技術シリーズ49の内容を含む)	／平14.12	／CD-ROM	／2857円
	【50】:コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会成果報告書	／平15.1	／A4・522p	
	【51】:岩盤斜面防護用吹付けコンクリート－現状と今後の課題－	／平15.2	／A4・69p	
	【52】:PC構造物の現状の問題点とその対策	／平15.6	／A4・332p	
	【53】:コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状(付録CD付き)	／平15.6	／A4・232p	
	【54】:フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題(Ⅱ)	／平15.7	／A4・170p	
	【55】:コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向	／平15.9	／A4・149p	
	【56】:クリープ・収縮研究小委員会報告書	／平15.9	／A4・49p	
※	【57】:コンクリート標準示方書[維持管理編]に準拠した維持管理マニュアル(その1)および関連資料	／平15.11	／A4・258p	／3000円
	【58】:コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状	／平16.2	／A4・281p	
	【59】:コンクリートの表面被覆および表面改質に関するシンポジウム論文集 付録:表面被覆および表面改質に関する耐久性能調査シートおよび試験方法調査シート ／	／平16.2	／A4・178p	
※	【60】:コンクリート教育研究小委員会報告書	／平16.7	／A4・172p	／3000円
	【61】:弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集	／平16.8	／A4・350p	
	【62】:コンクリートの環境負荷評価(その2)	／平16.9	／A4・123p	
	【63】:コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集	／平16.10	／A4・368p	
※	【64】:複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用	／平17.7	／A4・224p	／2500円
	【65】:示方書連絡調整小委員会報告書 コンクリート標準示方書の役割と将来像	／平17.8	／A4・84p	
	【66】:非線形解析によるコンクリート構造物の性能照査 －手順と検証例・照査例－	／平17.9	／A4・264p	
	【67】:地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計 －設計と照査の現状と将来展望－	／平17.9	／A4・256p	

	【68】:コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告	／平18.4	／A4・301p	
	【69】:硬化コンクリートのミクロの世界を拓く新しい土木学会規準の制定 －EPMA法による面分析方法と微量成分溶出試験方法について－	／平18.4	／A4・127p	
※	【70】:PC構造物の現状の問題点とその対策(その2)委員会報告	／平18.5	／A4・191p	／3000円
	【71】:材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	／平18.9	／A4・361p	
※	【72】:豊かな沿岸を造る生態系コンクリート －磯焼けを防ぎ藻場を造る－	／平18.11	／A4・191p	／3500円
	【73】:弾性波法の非破壊検査小委員会報告および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集	／平19.2	／A4・236p	
	【74】:混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)報告書ならびにシンポジウム講演概要集	／平19.3	／A4・368p	
	【75】:設計認証・保証システム研究小委員会報告書 コンクリート標準示方書と構造物の照査・検査システム	／平19.3	／A4・55p	
	【76】:コンクリート構造物のヘルスモニタリング技術	／平19.4	／A4・572p	
	【77】:コンクリート－地盤境界問題研究小委員会(332) 報告書―コンクリート－地盤境界問題に関する現状と課題 ―	／平20.2	／A4・64p	
※	【78】:コンクリート教育研究小委員会報告書	／平20.3	／A4・121p	／2000円
	【79】:コンクリート構造物のインフラマネジメント検討小委員会報告書 市民にとって良いインフラとそれを支える技術・技術者システム	／平20.3	／A4・64p	
	【80】:構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(335委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集	／平20.4	／A4・393p	
	【81】:地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査設計－時空間における設計の課題と近未来像－	／平20.7	／A4・246p	
※	【82】:Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)	／平20.7	／A4・191p	／1800円
	【83】:コンクリート構造物の信頼性設計法に関する研究小委員会(336委員会)成果報告書	／平20.12	／A4・334p	
	【84】:土木学会規準として制定が望まれる試験方法の動向 －コンクリートの性能評価を可能とする新しい規準体系とは－	／平21.4	／A4・134p	
	【85】:続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能	／平21.6	／A4・349p	
	【86】:コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書	／平21.10	／A4・518p	
	【87】:歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会(216委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集	／平21.11	／A4・138p	
	【88】:コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339委員会)成果報告書	／平21.12	／A4・134p	
	【89】:混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)No.2	／平22.5	／A4・462p	
	【90】:コンクリート教育研究小委員会 報告書	／平22.8	／A4・126p	
	【91】:コンクリート－地盤境界問題研究小委員会(332)第2期 報告書－コンクリートと地盤の境界問題の統一的評価に向けた課題分析-	／平22.8	／A4・207p	
	【92】:市民のためのコンクリートをめざして－コンクリート構造物のインフラマネジメント研究小委員会報告書－	／平22.8	／A4・108p	
	【93】:構造物の設計におけるコンクリートの収縮の考慮	／平22.12	／A4・149p	
	【94】:コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会(341委員会)委員会報告書	／平23.5	／A4・206p	
	【95】:鉄筋コンクリート構造物の設計システム -Back to the Future-	／平23.5	／A4・203p	
	【96】:環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究委員会成果報告書	／平23.8	／A4・153p	
	【97】:構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(JSCE335委員会)第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集	／平24.7	／A4・682p	
	【98】:材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会(342委員会)委員会報告書およびシンポジウム講演概要集	／平24.7	／A4・412p	
	【99】:コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)成果報告書(その2)およびシンポジウム論文集	／平24.10	／A4・410p	
	【100】:コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339委員会)(第Ⅱ期)報告書ならびにシンポジウム講演概要集	／平24.11	／A4・212p	
	【101】:コンクリート構造物のせん断力に対する設計法研究小委員会報告書	／平24.12	／A4・423p	
	【102】:コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会(341委員会)第2期委員会報告書	／平25.11	／A4・360p	／4000円
	【103】:セメント系構築物と周辺地盤の化学的相互作用研究小委員会(345委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集	／平26.7	／A4・502p	
※	【104】:鉄筋コンクリート構造物の設計システム -Back to the Future Ⅱ-	／平26.7	／A4・296p	／3500円
※	【105】:コンクリート構造物の設計と維持管理の連係による性能確保システム研究小委員会成果報告書	／平26.7	／A4・76p	／2000円
	【106】:繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書	／平27.8	／A4・362p	
※	【107】:示方書連絡調整小委員会報告書－次世代の「コンクリート標準示方書」に向けて－	／平27.8	／A4・191p	／2500円
※	【108】:コンクリート構造物の安全確保のためのシステムに関する研究小委員会成果報告書	／平27.9	／A4・154p	／2500円
	【109】:鉄筋コンクリート構造の疲労破壊－破壊機構と性能評価の将来像を探る－	／平27.9	／A4・450p	
	【110】:材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会(342 委員会(第2期))委員会報告書	／平27.11	／A4・378p	
	【111】:塩害環境の定量評価に関する研究小委員会(348委員会)委員会報告書	／平27.11	／A4・220p	
※	【112】:コンクリートにおける水の挙動研究小委員会(349委員会)委員会報告書	／平29.6	／A4・189p	／3000円
※	【113】:コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法 -時空間性能評価技術の未来予想図-	／平29.6	／A4・406p	／3000円
	【114】:コンクリート構造物の品質・耐久性確保マネジメント研究小委員会(229委員会)成果報告書	／平29.7	／A4・428p	
※	【115】:セメント系構築物と周辺地盤の化学的相互作用研究小委員会(345委員会)第2期成果報告書	／平30.6	／A4・180p	／3000円
※	【116】:既設コンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会報告書およびシンポジウム講演概要集	／平30.6	／A4・181p	／3000円
※	【117】:高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会(354委員会)成果報告書	／平30.7	／A4・208p	／3000円
	【118】:混和材料を使用したコンクリートの物性評価技術と性能規定型材料設計に関する研究小委員会(353委員会)成果報告会	／平30.7	／A4・187p	
	【119】:繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会(第2期)委員会報告 繊維補強コンクリートの構造設計とその課題	／平30.9	／A4・279p	
※	【120】:コンクリートの性能に及ぼす高温作用の影響評価研究小委員会(352委員会)成果報告書	／平30.10	／A4・124p	／3000円
	【121USB】:塩害環境の定量評価に関する研究小委員会(348委員会(第2期))委員会報告書およびシンポジウム講演概要集	／平30.12	／USB	
	【122】:コンクリート構造物の養生効果の定量的評価と各種養生技術に関する研究小委員会(356委員会)成果報告書およびシンポジウム論文集	／令元.9.	／A4・244p	／3000円
	【123】:締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会(358委員会)委員会報告書	／令2.5.	／A4・308p	
	【124】:コンクリート構造物の品質確保小委員会(第二期)(350委員会)委員会報告書	／令2.8.	／DL	
※	【125】:コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法－時空間性能評価技術の未来予想図Ⅱ－	／令2.10.	／A4・616p	／3000円
※	【126】:部材詳細の設計と照査に関する研究小委員会報告書	／令2.11.	／CD-ROM	／3000円
※	【127】:コンクリート構造物の耐凍害性確保に関する調査研究小委員会(359委員会)委員会報告書およびシンポジウム論文集	／令3.10.	／A4・384p	／3000円
	【128】:既設コンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会(第2期)委員会報告書	／令3.11.	／DL	
	【129】:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質・性能評価に関する調査研究小委員会成果報告書	／令3.11.	／DL	
	【130】:示方書連絡調整小委員会(230委員会)報告書-持続可能な社会の実現に向けたコンクリート標準示方書の将来像-	／令4.1.		／3000円
	【131】:コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関する研究小委員会(362委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集	／令4.11.	／A4・260p	
	【132】:土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会(361委員会)成果報告書	／令4.12.	／DL	

※は，在庫有り(2022年1月現在)．最新の在庫は土木学会のホームページにてご確認ください．
http://www.jsce.or.jp/ → 書籍・試験器 販売 → 刊行図書目録 の 「講習会テキスト類」

ご注意　当該出版物の内容を複写したり他の出版物へ転載するような場合は，必ず土木学会の許可を得て下さい。

コンクリート技術シリーズ　No.132
土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（361委員会）成果報告書

2022年12月14日　第１版・第１刷発行

編　集　者　〒160-0004　東京都新宿区四谷一丁目外濠公園内
土木学会 コンクリート委員会
土木分野におけるジオポリマー技術の実用化
推進のための研究小委員会 (361委員会)
委員長　一　宮　一　夫

発　行　者　〒160-0004　東京都新宿区四谷一丁目外濠公園内　公益社団法人　土木学会　塚　田　幸　広
発　行　所　公益社団法人　土　木　学　会
〒160-0004　東京都新宿区四谷一丁目外濠公園内
電話　03-3355-3441番 (代表)　　FAX. 03-5379-0125　　振替・00140-0-763225番

ISBN　978-4-8106-1087-1　　印刷：(株)大應