

コンクリート技術シリーズ

火害を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷と
性能の評価に関する調査研究小委員会
(365委員会)
成果報告書

CONCRETE ENGINEERING SERIES
137

土木学会

コンクリート技術シリーズ

火害を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷と
性能の評価に関する調査研究小委員会
(365委員会)
成果報告書

CONCRETE ENGINEERING SERIES
137

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

コンクリートは、従来、耐火性を有する材料であるとされ、火災に対する対策は不要との認識であり、土木分野ではトンネル構造物が耐火性を検討する対象であった。しかし、近年の土木分野における鉄筋コンクリート構造物の火災事故事例において、種々の検討が必要であることが明らかとなっている。

鉄筋コンクリート(RC)構造物が火災などの高温に曝される場合、コンクリート表面付近からセメント水和生成物の熱分解および微細ひび割れが生じる。また、コンクリートの圧縮強度が高くなるほど、爆裂が生じやすいことがわかっている。その結果、コンクリートのバリア機能が低下することで物質侵入抵抗性が低下し、表面から中性化の原因となる酸素や二酸化炭素が侵入しやすくなる。加えて、塩害の原因となる塩化物イオンなどの劣化因子が侵入し内部鉄筋の腐食が発生することで、鉄筋コンクリート部材の耐力低下に繋がる危険性がある。既往の研究では、高温作用および塩水作用、それぞれの作用を受けたコンクリートの耐力および耐久性を検討したものが多く報告されている。一方で、火害を受けたRC構造物の性能評価については、建築学会より構造材料の耐火性ガイドブックと火害診断のガイドラインが出されているが、土木構造物に対するものは少ない。また、火害を受けたRC構造物の耐久性評価に関する指標は皆無に等しい。加えて、火害により、かぶりのバリア機能が低下し、鉄筋とコンクリートの付着性能が低下したRC構造物が劣化した場合の耐久性評価手法についても課題がある。さらに、近い将来に発生が予想される大規模な震災時には火災が生じることは自明であり、それに対する土木構造物の性能評価も重要である。

土木学会では、これまでに、コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会(2004年)とコンクリートトンネル構造物の耐火技術研究小委員会(2014年)が設置され、主にトンネル構造物の耐火性について検討がなされている。最近の土木構造物の火災事故では2008年に発生した首都高速5号池袋線の車両横転事故などがある。2023年9月には山陽自動車道尼子山トンネル火災事故が発生し、復旧までに約4か月を要した。今後、大規模地下空間の利用に伴い、土木構造物の耐火性と火災後の損傷評価はますます重要な課題となると予想される。

上記の背景のもと、本研究委員会では、2021年10月～2024年9月までの期間において、土木系コンクリート構造物で生じた火害に関する情報を整理し、土木構造物が火害を受けた場合の性能低下の現状と補修方法を提案する基礎資料を得ることを目的として活動した。

本委員会では、

WG1：高温履歴を受けたコンクリートと鉄筋の力学性能の整理

WG2：高温履歴を受けたコンクリート部材の損傷評価と耐久性の評価

WG3：高温履歴を受けたコンクリート部材の補修方法の補修後の耐久性評価

について、調査研究を実施した。

本委員会での成果が実務者に対し、少しでも有益な情報になれば幸いである。

2024年11月吉日

土木学会コンクリート委員会
火害を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷と性能の評価に関する調査研究小委員会
委員長 小澤 満津雄

土木学会 365 委員会

火害を受けた鉄筋コンクリート建造物の損傷と性能の評価に関する 調査研究小委員会 委員構成

委員長：小澤 満津雄 (群馬大学)

幹事長：子田 康弘 (日本大学)

主 査

堀口 賢一 (大成建設(株)) 迫井 裕樹 (八戸工業大学) 栗原 哲彦 (東京都市大学)

委 員

新井 崇裕 (鹿島建設(株))

田中 裕章 (ジオスター(株))

飯土井 剛 ((株)復建技術コンサルタント)

土橋 浩 ((一財)首都高速道路技術センター)

岩間 慧大 (横浜国立大学)

檜 学 ((株)日本シビックコンサルタント)

榎本 佑矢 (西松建設(株))

藤本謙太郎 (ピーエス・コンストラクション(株))

川西 貴士 ((株)大林組)

松浦 忠孝 (東京電力ホールディングス(株))

北田 達也 (極東興和(株))

若杉三紀夫 ((株)ケミカル工事)

杉野 雄亮 (太平洋マテリアル(株))

WG1 材料

WG 主査 堀口 賢一

岩間 慧大

WG2 損傷評価

WG 主査 迫井 裕樹

新井 崇裕

飯土井 剛

榎本 佑矢

川西 貴士

檜舘 学

藤本謙太郎

WG3 補修

WG 主査 栗原 哲彦

北田 達也

杉野 雄亮

川西 貴士

田中 裕章

土橋 浩

藤本謙太郎

松浦 忠孝

若杉三紀夫

谷辺 徹 (太平洋マテリアル(株)) (2021年11月～2022年3月)

溝口 愛実 (太平洋セメント(株)) (2021年11月～2023年3月)

目 次

1. はじめに	1
2. 高温加熱を受けたコンクリートの耐久性評価	4
2.1 はじめに	4
2.2 受熱コンクリートの耐久性に関する文献調査結果	4
2.2.1 受熱したコンクリートの中性化抵抗性に関する文献調査結果	13
2.2.2 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する文献調査結果	18
2.2.3 受熱したコンクリートのその他耐久性に関する文献調査結果	24
2.3 受熱したコンクリートの耐久性に関する解析検討	28
2.3.1 受熱したコンクリートの中性化抵抗性に関する解析検討	28
2.3.2 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する解析検討	31
2.4 受熱したコンクリートの耐久性の定量評価にかかわる考察	34
2.4.1 受熱したコンクリートの中性化抵抗性の定量評価にかかわる考察	34
2.4.2 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性の定量評価にかかわる考察	35
2.5 2章のまとめ	36
3. 高温加熱を受けたコンクリート部材の損傷評価技術	41
3.1 はじめに	41
3.2 高温加熱を受けたコンクリートの基礎的特性変化	42
3.2.1 表面の受熱温度の推定	42
3.2.2 力学的特性	43
3.2.3 化学的特性・物理的特性	45
3.2.4 物質移動抵抗性	46
3.3 加熱に伴う損傷の平面方向の分布の評価	47
3.3.1 はじめに	47
3.3.2 非破壊試験	48
3.3.3 微破壊試験	56
3.3.4 おわりに	58
3.4 加熱に伴う損傷の深さ方向に対する分布の評価	60
3.4.1 はじめに	60
3.4.2 非破壊試験	61
3.4.3 微破壊試験	63
3.4.4 コア供試体による試験	65

3.5	高温加熱を受けた部材の力学的特性・耐久性	70
3.5.1	高温加熱を受けた部材の付着特性	70
3.5.2	高温加熱を受けたコンクリート部材の力学的特性	72
3.5.3	部分的または一面加熱を受けた RC はり部材の力学的特性および耐久性	78
3.5.4	ポリマーセメントモルタルによる断面修復部材の高温加熱による爆裂性状	84
3.6	3章のまとめ	86
4.	高温加熱を受けたコンクリート構造物の補修・補強技術	87
4.1	はじめに	87
4.2	国内は発生した火害の補修事例および適用された補修方法	87
4.2.1	鉄筋コンクリート建造物の事例	87
4.2.2	集合住宅の事例	89
4.2.3	東名高速下り線・日本坂トンネルの事例	90
4.2.4	JR 武蔵野線 RC 高架橋の事例	91
4.2.5	国道 53 号津山バイパス平福高架橋下の事例	94
4.2.6	国道 41 号釣鐘洞門の事例	97
4.2.7	国道 1 号守口高架橋の事例	99
4.2.8	首都高速 5 号池袋線の事例	101
4.2.9	新座洞道のマンホール内の事例	105
4.2.10	東名高速道路豊田ジャンクション A ランプ橋の事例	109
4.2.11	山陽自動車道尼子山トンネルの事例	111
4.2.12	国内火害事例から見られる火害補修工法	115
4.3	補修工法・方法の選定に必要な情報	118
4.3.1	ひび割れ注入	118
4.3.2	表面被覆・含浸	119
4.3.3	断面修復・吹付け	120
4.3.4	接着・巻立	123
4.3.5	工法選定に必要な情報	125
4.4	補修後の耐久性確認	126
4.4.1	ひび割れ注入	126
4.4.2	表面被覆・含浸	127
4.4.3	断面修復・吹付け	128
4.4.4	接着・巻立	129
4.4.5	火害補修技術の総括	130

4.5	火害を受けた PC 構造物への対応	133
4.6	4 章のまとめ	135

1. はじめに

図 1.1 に鉄筋コンクリート (RC) 構造物が火災などの高温に曝された場合の損傷度と耐久性について示す。火災を受けると、コンクリート表面付近からセメント水和生成物の熱分解および微細ひび割れが生じる。その結果、コンクリートのバリア機能が低下することで物質侵入抵抗性が低下し、表面から中性化の原因となる酸素や二酸化炭素が侵入しやすくなる。加えて、塩害の原因となる塩化物イオンなどの劣化因子が侵入し内部鉄筋の腐食が発生することで、鉄筋コンクリート部材の耐力低下に繋がる危険性がある。

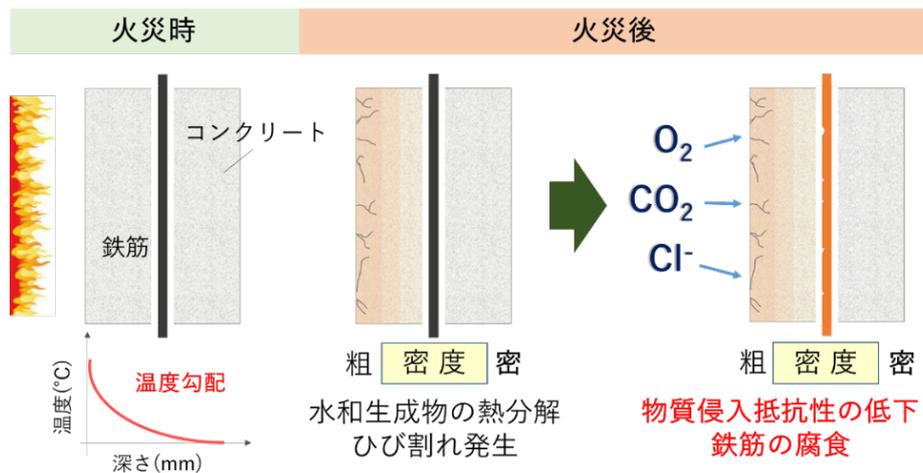


図 1.1 火災を受けた RC 構造物の損傷度と耐久性

既往の研究では、高温作用^{例えば1)}および塩水作用^{例えば2)}、それぞれの作用を受けたコンクリートの耐力および耐久性を検討したものが多数報告されている。一方で、火災を受けた RC 構造物の性能評価については、建築学会より構造材料の耐火性ガイドブック³⁾と火災診断指針⁴⁾が出されているが、土木構造物に対するものは少ない。

図 1.2 にコンクリート構造物の性能低下曲線と時間との関係を示す。構造物は、供用を開始してから時間の経過とともに、性能は低下する。ある時間で、火災が発生すると、性能は大きく低下することが予想されるが、どの程度まで性能が低下しているのかを評価することが重要である。さらに、補修工法の選定と、補修後の耐久性についても評価する必要があるが、不明な点が多く、火災を受けた RC 構造物の耐久性評価に関する指標は皆無に等しい。加えて、火災を受けた RC 構造物は、かぶりのバリア機能が低下し、鉄筋とコンクリートの付着性能も低下することが想定される。火災後の RC 構造物を補修せずに、供用を継続した場合、どの程度、耐久性が低下するのかについても評価指標が皆無である。

加えて、近い将来に発生が予想される南海・東南海地震等の大規模な震災時には、火災が発生とすることは容易に想定できるが、震災と火災を受けた土木構造物の性能評価も重要な課題である。土木学会では、これまでに、コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会 (2004 年)⁵⁾とコンクリートトンネル構造物の耐火技術研究小委員会 (2014 年)⁶⁾が設置され、主にトンネル構造物の耐火性能について検討がなされている。最近の土木構造物の大希望な火災事故は 2008 年に発生した首都高速 5 号池袋線の車両横転事故⁷⁾ (図 1.3) や 2023 年 9 月に発生した山陽自動車尼子山トンネル火災事故⁸⁾ (図 1.4) がある。大規模火災事故が発生すると、火災診断と補修工事に長期間を要し、復旧費用も甚大なものとなることが明らかとなっている。以上のように、社会インフラにおいて火災が生じた場合の影響は大きいいため、土木構造物の耐火性と火災後の損

傷評価は重要な課題である。

火災損傷を受けたRC構造物の性能



図 1.2 火災を受けたRC構造物の性能低下曲線



図 1.3 首都高速火災事故 2008 (国土館大学 津野教授提供)

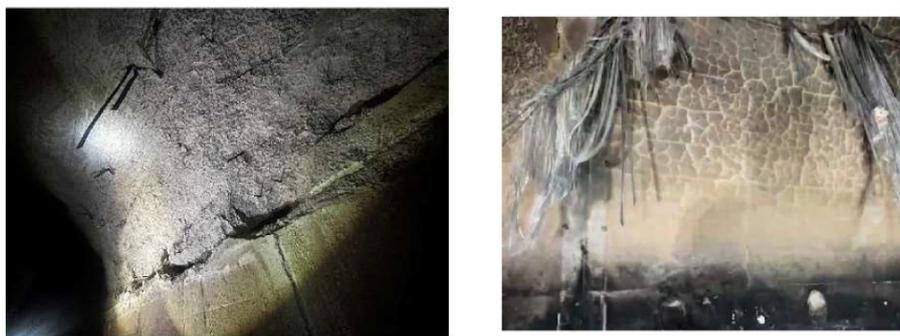


図 1.4 山陽自動車道 尼子山トンネル火災事故⁸⁾

そこで、本研究委員会では、これまでの火災事故と鉄筋コンクリート部材の耐火性とそれに関連する研究情報を整理し、土木構造物が火害を受けた場合の性能低下の現状と補修方法を提案する基礎資料を得ること

を目的として活動を行った。

WG1 では、高温加熱を受けたコンクリートの耐久性にかかわる物質侵入抵抗性について、既往の知見を整理した。

WG2 では高温加熱を受けたコンクリート構造物の損傷評価について、これまでの知見を整理し、必要な指標の検討を行った。加えて、耐久性の評価に必要な項目を整理した。

WG3 では高温加熱を受けたコンクリート構造物の補修方法と耐久性について、既往の知見を整理し、検討が必要な項目を整理した。

土木構造物は、長期供用が常であり、部材の取り換えが難しい構造物が多数存在する。このような状況で、火災損傷の程度を評価し適切に補修する基礎資料となれば幸いである。

なお、本報告書における高温加熱とは、火災によってコンクリート構造物が高温に曝された状況を想定している。

参考文献

- 1) 原田有：高熱を受けた鉄筋コンクリート梁の強度の低減に関する実験的研究，日本建築学会論文報告書，第66号，pp.149-152，1960.10
- 2) 松田耕作，横田優，米澤和宏，松島学：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリート梁の耐荷性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.58A，pp.834-843，2012.3
- 3) 日本建築学会：建物の火災診断および補修・補強方法 指針・同解説，日本建築学会，2024
- 4) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック2017，日本建築学会，pp.29-33，第3版，2017.2
- 5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.63，コンクリート構造物の耐火性技術研究小委員会報告書ならびにシンポジウム論文集，2004
- 6) 土木学会：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），コンクリートライブラリーNo.143，2014
- 7) 桑野忠生，増井隆，鈴木寛久，依田 勝雄：首都高速5号池袋線タンクローリー火災事故の復旧工事 首都高史上最大規模の構造物損傷を73日間で復旧土木学会，土木学会誌，pp.30-33，2008年12月号 第93巻12号，2008，12
- 8) 水野 希典，狛 忠弘，小林 康範：[VI-1044] トンネル内車両火災により損傷したトンネル覆工への対応について，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，土木学会，2024.9

（執筆者：小澤 満津雄）

2. 高温加熱を受けたコンクリートの耐久性能評価

2.1 はじめに

本章では、高温加熱を受けたコンクリートの耐久性能について既往の文献を調査し、得られた知見を整理した。また、受熱したコンクリートの中性化抵抗性と塩分浸透抵抗性について解析的な検討を行い、600℃まで受熱したあとのコンクリートの耐久性能について評価した。さらに、これらの文献や解析的な検討の結果に基づき、比較的軽微な火災を受けたあとに、コンクリートを補修せずにそのまま供用を継続する場合の耐久性能の評価方法について提案した。

2.2 受熱したコンクリートの耐久性能に関する文献調査

受熱したコンクリートの耐久性能に関する文献調査は、以下の論文集や委員会報告を中心に行った。

- ・コンクリート工学論文集
- ・コンクリート工学年次論文集
- ・セメント・コンクリート論文集
- ・土木学会委員会報告
- ・土木学会論文集
- ・土木学会年次学術講演会
- ・建築学会委員会報告
- ・日本建築学会論文集
- ・日本建築学会大会学術講演会
- ・海外委員会報告
- ・ACI
- ・ACT
- ・その他

表 2.2.1 に受熱したコンクリートの耐久性能に関する文献調査結果一覧を示す。この文献調査結果から、国内外での本課題に対する研究の動向は以下の通りである。なお、ここでは、受熱したコンクリートの耐久性能を評価する観点から、著しい爆裂を生じた供試体での測定事例は含まれていない。

- ・受熱したコンクリートの耐久性能としては、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性、凍結融解抵抗性、硫酸塩劣化抵抗性、透水性、および透気性が評価されている。
- ・国内では、受熱したコンクリートの耐久性能に関する研究は限られている。主に受熱後の中性化抵抗性や塩分浸透抵抗性に関する知見が示されているが、受熱後に促進中性化試験を行っている事例は数例、塩水浸漬試験を行っている事例は十数例ほどしか見られない。また、塩水浸漬は、受熱後の塩分浸透抵抗性を評価することに加えて、間接的に物質透過性を評価するトレーサーと位置付けている事例が多い。
- ・海外では、受熱後の耐久性能に関する研究事例は日本国内よりも多く報告されており、さまざまな配合や混和材料、受熱条件での検討が進められている。国内では検討事例が見られない、受熱後の硫酸塩劣化抵抗性についての知見が示されている。
- ・海外では、対象とする強度範囲は普通コンクリートから超高強度コンクリートまで幅広く、繊維補強コンクリートも検討している。また、混和材料として、ポゾラン物質やナノ物質、環境に配慮した混和材（卵

殻やメタカオリンなど) を使ったコンクリートも研究対象となっている。

- ・国内外ともに加熱温度は 100～1200℃程度、冷却方法は気中と散水、水中とあり、再養生を行っている場合もある。
- ・中性化抵抗性は、受熱温度 300℃程度を超えると、急激に中性化深さや中性化速度が大きくなる傾向を示す。
- ・塩分浸透抵抗性は、受熱温度が 300℃程度を超えると、急激に塩分浸透深さや見掛けの拡散係数が大きくなる傾向を示す。
- ・透水性、透気性は、受熱温度が 300～400℃程度までは大きな影響を受けない場合があるものの、受熱温度が 600℃以上になると、急激に低下する傾向が見られる。
- ・凍結融解抵抗性は、300℃程度までは受熱の影響は大きくない。
- ・硫酸塩劣化抵抗性は、受熱の影響を大きく受ける。
- ・受熱したコンクリートの耐久性は、一般的な力学的特性に関する知見と密接な関係があり、受熱温度が高くなるほど耐久性は低下し、再養生を行うと耐久性は回復する傾向を示す。ただし、受熱温度が 600℃程度を超える場合は、加熱を受ける前の耐久性にまでは、完全には回復しない。
- ・散水冷却をすると、ひび割れが伸長することにより、気中冷却した場合よりも、いずれの試験でも耐久性が低下する傾向が見られる。

表 2.2.1 受熱したコンクリートの耐久性に関する文献調査結果一覧

文献番号	種類 混和材	養生条件 養生日数	加熱温度 昇温速度 (保持時間) 冷却方法	再養生条件 養生日数	中性化 試験条件	塩分浸透 試験条件	透水・吸水 試験条件	透気 試験条件	その他 耐久性試験	主な結論
1	NC(H) w-PF w-SF	20°C 水中 28 日間	200, 400, 600°C 10°C/分(2hr) 気中冷却	—	—	—	アウトプット 法	—	—	受熱温度が高いほど加熱冷却後の透水係数は大きくなる。 爆裂抑止のための PP 繊維を混入したコンクリートでは、PP 繊維未混入のコンクリートに比べて透水係数は大きくなる。これは PP 繊維自体による水みちと高温環境下での溶融の影響と考えられる。
2	NC(N, H) w-PF	蒸気, 気中 28 日間	400, 800, 1200°C RABT24°C/分(不明) 気中冷却	—	加熱後 1, 13 か月測定	—	—	—	—	加熱温度が大きくなるほど、普通・高強度コンクリートともに中性化深さが大きくなる。 中性化深さは、PP 繊維混入の有無、普通・高強度コンクリートの違いによる影響は見られない。 中性化深さは、再水和などにより時間の経過とともに大幅に回復することが確認された。
3	NC(N)	封緘 2 か月間	600°C ISO834(6hr) 気中冷却	水中 1 日間	10%塩水 7日間浸漬後	10%塩水 7日間浸漬 硝酸銀噴霧	—	加熱前後 トレント法	—	コンクリート表面の透気係数は、加熱面縁から水平距離が 100mm 以上になると加熱前後の差は小さい。 塩化物イオン浸透深さは、加熱面縁から水平距離が 0, 50, 150, 500mm で、それぞれ 100, 66, 21, 16mm となった。 中性化深さは、加熱面縁から水平距離が 0, 50, 150, 500mm で、それぞれ 210, 170, 75, 40mm となった。
4	NC(H) w-PF	不明	100, 200, 500°C RIREM1°C/分(1hr) 気中冷却	気中 15 日間	—	10%塩水 28 日間浸漬 硝酸銀噴霧および 滴定分析	—	—	—	硝酸銀の発色に基づく塩化物イオン浸透深さは、粗骨材の岩種や PP 繊維の有無によらず、受熱温度 100, 200, 500°C で、それぞれ 5, 30, 50mm 程度となり、加熱温度が高いほど深くなる。なお、100°C は常温とほぼ変わらず、500°C はコア全断面に浸透した。
5	NC(H) w-PF	不明	100, 200, 300, 500°C RIREM1°C/分(1hr) 気中冷却	—	—	10%塩水 28 日間浸漬 EPMA 分析	—	—	—	表面塩分量は、PP 繊維未混入では加熱前後での差異は少なく 20kg/m ³ 程度である。PP 繊維混入では 100°C までは 20kg/m ³ 程度であるが、200, 300°C では 40kg/m ³ 程度に増加し、PP 繊維溶融の影響と考えられる。 見掛けの拡散係数は、PP 繊維未混入で、非加熱、100, 300, 500°C でそれぞれ 0.8, 2.2, 27, 69cm ² /年、PP 繊維混入で、非加熱、100, 200, 300°C でそれぞれ 1.1, 3.1, 4.8, 35 cm ² /年となった。 受熱温度 200~300°C でコンクリート内部に微細なひび割れが生じた影響と推察している。
6	NC(N)	20°C 水中 2.5 か月間	100, 200, 300°C RIREM1°C/分(5hr) 気中冷却	—	—	10%塩水 28 日間浸漬 硝酸銀噴霧	—	加熱前後 トレント法	—	100, 200°C ではひび割れなし。300°C では亀甲状のひび割れが発生した。 塩化物イオン浸透深さは、非加熱が 15mm 程度に対して、100°C で 25mm 程度、200, 300°C では供試体寸法から測定できる最大の 50mm を超えていた。 透気係数は、非加熱に比べて 200°C で 5 倍程度、300°C で 10 倍程度大きくなった。
7	NC(H) w-PF	湿布 28 日間	200, 500°C RIREM1°C/分(1hr) 気中冷却	—	—	10%塩水 1 か月間浸漬 硝酸銀噴霧および XRF 分析	—	—	—	200°C ではひび割れなし。500°C では供試体全体に亀甲状のひび割れが発生した。 硝酸銀の発色に基づく塩化物イオン浸透深さは、非加熱で 10mm 程度に対し、200°C で 40mm 程度、500°C では供試体寸法から測定できる最大の 50mm を超えていた。 見掛けの拡散係数は、非加熱で 0.10cm ² /年に対して、200°C で 0.26 cm ² /年となった。一方、500°C では 0.18 cm ² /年と低い。500°C では内部の塩化物イオン濃度の方が高い逆転現象が生じており、ひび割れにより拡散ではない状態になっているためと推察される。
8	NC(N, H) w-PF	蒸気, 気中 28 日以上	400, 800, 1200°C RABT24°C/分(1hr) 気中冷却	—	加熱冷却後	—	—	—	—	中性化深さは、コンクリート強度や PP 繊維混入の有無によらず、受熱温度が同じであればほぼ同じであった。 受熱温度が 800°C で 30~40mm 程度、1200°C で 60~70mm 程度であった。一方、400°C では殆ど中性化が進行していなかった。
9	NC(N, H) w-PF	蒸気, 気中 28 日以上	1100°C HC55°C/分(4hr) 気中冷却	—	加熱冷却後	10%塩水 3 か月間浸漬 滴定分析	—	—	—	中性化深さは、普通強度で 45mm、高強度で 20mm であった。 見掛けの拡散係数は、普通強度で 193 cm ² /年、高強度で 41.4 cm ² /年であった。これらは、加熱面側が欠損していたため、それぞれ加熱面から 110, 50mm カットした面を塩水浸漬面としている。 コンクリート標準示方書から算定される見掛けの拡散係数に対して、それぞれ約 270 倍、約 300 倍であった。
10	NC(N)	気中 218~344 日間	110, 300, 500, 700°C ISO834(1hr) 気中冷却	—	加熱冷却 4 日後	—	—	加熱前後 トレント法	—	中性化深さは、非加熱、110, 300, 500, 700°C で、それぞれ 3.4, 3.4, 3.3, 8.2, 4.5mm であった。 コンクリート表面の透気係数は、300°C で著しく増加し、500 度までは一定となった。700°C ではひび割れの影響により測定できなかった。
11	NC(N)	不明	800°C 約 16°C/分(3hr) 気中冷却	—	加熱冷却後	—	—	加熱前後 トレント法	—	コンクリート表面の透気係数は、非加熱に比べて 10 ⁵ 倍程度大きくなった。 透気係数と超音波伝播速度には高い相関が見られる。
12	NC(H)	不明	1200°C	気中	加熱直後, 10	—	—	—	—	加熱直後の中性化深さは、引張側で 25mm 程度、圧縮側で 24mm 程度であった。

			RABT24°C/分(1hr) 気中冷却	10 か月	か月から促 進中性化					加熱 10 か月後からの促進中性化 13 週間後の中性化深さは、非加熱面で 1mm 程度、引張側が 19mm 程度、圧縮側が 13mm 程度に小さくなった。この原因は深部からのアルカリ分の供給によるものと推察している。
13	NC(H) w-PF w-FPC	湿潤 28 日間	200, 300, 500°C RILEM1°C/分(1hr) 気中冷却	—	—	10%塩水 1 か月間浸漬 EPMA 分析	—	—	—	塩化物イオンの浸透深さは、PP 繊維未混入の非加熱で 1cm 程度、300, 500°Cで 4cm 以上であった。また、PP 繊維混入の非加熱で 1cm 程度、200°Cで 3cm 程度、300°Cで 4cm 以上であった。受熱温度が高いほど多くの塩化物イオンが深い位置にまで浸透した。
14	NC(H) w-PF w-FPC	不明	1200°C RABT24°C/分(0.5hr) 気中冷却	—	—	10%塩水 28 日間浸漬 硝酸銀噴霧および XRF 分析	—	—	—	硝酸銀の発色に基づく塩化物イオン浸透深さは、標準と PP 繊維混入供試体では全断面に及んでいた。一方、耐火被覆した供試体では加熱面から 20~30mm の範囲に浸透していた。XRF による塩化物イオン浸透量は、受熱温度の増加に伴い多くなる。本実験条件下では、受熱温度 650, 500, 200, 100°Cで、それぞれ 1.4, 0.7, 0.5, 0.3wt%程度であった。
15	NC(N, H) w-PEF	水中 28 日間 加熱前材齢 35, 56 日, 1 年	200, 300, 450, 600, 650, 750°C 5°C/分(150, 100min) 気中冷却, 水冷却 15min	室内気中最大 90 日 恒温恒湿 60 日+室内気中 4 か月 散水湿潤 60 日+室内気中 4 か月	促進中性化 7 日間 CO ₂ 濃度 10 %, 20°C, RH60%	—	—	—	—	W/C50%の促進中性化後の中性化深さは、受熱温度が高くなるほど深くなる。また、加熱後に気中冷却した場合に比べて、水冷却した場合の方が深くなり、急冷却の影響が見られた。さらに、受熱温度が 300°C以下であれば冷却方法によらず、養生時間とともに徐々に減少した。一方、受熱温度が 450°C以上では冷却方法によらず、養生時間とともに増加する傾向を示した。 W/C50%と 35%の 650°C加熱後の促進中性化後の中性化深さを比較すると、冷却方法によらず、高強度の方が普通強度に比べて小さくなった。
16	NC(N)	水中 28 日間 105°C 5 日間乾燥	200, 400, 600,800°C 加熱時間 2hr	—	—	NT BUILD492 電 気泳動法 10%塩水 10~50V 20 時間印加	—	—	—	W/C45, 55, 65%の常温での拡散係数は、それぞれ 0.63, 1.3, 3.2cm ² /年程度で、受熱温度 200°Cでは非加熱とほぼ変わらない。一方、400°Cでは高強度になるほど拡散係数は大きく低下し、それぞれ 2.8, 4.7, 7.9cm ² /年程度になった。さらに、600, 800°Cになると W/C によらず 9.5cm ² /年程度まで低下した。 腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2kg/m ³ とした場合、かぶり 50 mm の鉄筋に腐食が発生する時期は、非加熱で 29 年に対して、加熱したコンクリートでは 7.5 年と解析されている。
17	NC(N)	不明	1200°C RABT24°C/分(0.5hr) 気中冷却	—	—	10%塩水噴霧	—	—	—	RABT30 分加熱を受けた梁試験体に対して、塩水散水と屋外暴露を繰り返した。その後に静的曲げ 載荷試験を行い、鉄筋腐食量と塩化物イオン濃度分布を測定した。その結果、非加熱供試体に比べて、加熱供試体では表面塩分濃度が 2 倍程度大きくなった。
18	NC(N)	不明	1200°C RABT24°C/分(0.5hr) 気中冷却	—	—	3%NaCl 溶液 散水	—	—	凍結融解	RABT30 分加熱を受けた梁試験体に対して、塩水散水と凍結融解を繰り返した。その影響を超音波 伝播速度で評価したところ、超音波伝播速度が低下する範囲は、加熱後で加熱面から深さ 50mm 程 度までの範囲であった。一方、塩水散水と凍結融解を 70 サイクル受けた後は、特に引張側で受熱し た範囲でその影響範囲が拡大した。これは、主鉄筋の腐食による影響と評価している。
19	NC(N)	不明	ISO834(15.30,60min)	—	—	3%NaCl 溶液 散水	—	—	凍結融解	ISO834 加熱を受けた梁試験体に対して、塩水散水と凍結融解を 78 サイクルまで繰り返した。その 結果、加熱なしの場合、試験面全域にわたりスケーリングが生じているのに対して、加熱を受けた 試験体は、加熱領域ではスケーリングが少なく、加熱領域外（はりの両端部）においてスケーリング が生じることが確認された。
20	NC w-ESP	25°C 水中 28 日間	200, 400°C 10°C/分 気中冷却	—	—	—	—	—	硫酸塩劣化 3%硫酸塩溶 液中 56 日間	加熱温度が高くなるほど、コンクリート表面のひび割れ数およびひび割れ幅が上昇する。 加熱後のコンクリートは、加熱前と比較して硫酸塩劣化による強度低下が大きい。 ESP の置換率が大きいほど、加熱後の硫酸塩劣化による強度低下が大きい。
21	NC	20°C 水中 28 日間	400, 500, 600°C 5°C/分 (1 時間) 気中冷却	—	温度 20°C 湿度 70% 濃度 20% 14 日間	—	—	—	—	フェノールフタレイン溶液による加熱後の中性化深さは、濃度に差はあるものの、全体が呈色する。 pH 値は加熱温度が上昇するほど低下するが、10 を下回ることはない。 500, 600°C 加熱時には、中性化促進後、20mm 深さでの pH 値は w/c=40%で 11.5 程度、W/C=60%で 10 程度を示す。 水酸化物イオン濃度は、加熱していない状態の 70% (400°C)、85% (500°C)、95% (600°C) 程度に 減少する。
22	NC ZC w-PF	25°C 水中 28 日間 後 実験室環境 11 週間	800°C 10°C/分 (1 時間) 気中冷却	25°C 水中 25°C 気中 (湿度 65%) 90 日間	—	AASHTO T 358	120 分間 7 日間	RILEM- CEMBUREAU 法	—	受熱直後は透水量が 4 倍、表面抵抗率が 1/10、透気係数が 1000 倍となり、耐久性が著しく低下す る。 再養生（特に水中養生）により耐久性は向上し、透水量も表面抵抗率も 7 割程度に減少する。 ZC は NC と比較して受熱による耐久性の減少が大きく、再養生の効果が小さい。
23	NC RAC	20°C 水中 35 日間 後 20°C 封緘 材齢 6 ヶ月	200, 400, 600°C 2°C/分 (3 時間) 気中冷却	20°C 封緘 試験まで	温度 20°C 湿度 65% 濃度 3% 28 日間	200°C のみ NaCl (12g/L) 600V/m 5 日間	72 時間	RILEM- CEMBUREAU 法	—	受熱前後の耐久性に関して、普通コンクリートよりも再生骨材コンクリートが劣る。 透気係数は 400°C 加熱で約 10 倍、600°C 加熱で約 100 倍に上昇し、透水係数は 600°C 加熱で 2 倍程 度となる。 塩化物イオン拡散係数は、200°C 加熱時に NC では約 10 倍になるが、再生骨材コンクリートではほ

		材齢 12 ヶ月 (中性化用)								ぼ変化しない。 中性化深さおよび中性化速度は、400°C 加熱時に約 1.5 倍、600°C 加熱時に約 2 倍となる。
24	NC w-BFS w-NS	20°C 水中 加熱試験まで	200, 400°C 10°C/分 (2 時間) 600, 800, 1000°C ISO834 (2 時間) 気中冷却 & 散水冷却	-	-	-	IS 3085:1965 (India 基準)	-	-	ナノシリカ置換率 2%以上、スラグ置換率 10%以上 (高置換率) の配合で、400°C 加熱までは耐久性が向上する。 400°C 加熱時の透水係数は、低置換率で約 1.1 倍、高置換率で約 0.9 倍となり、最も差が大きくなる。 透水係数は、1000°C 加熱時に、低置換率で約 1.5 倍、高置換率で約 1.4 倍に上昇する。
25	NC w-NF or w-NM	室温水中 28 日間	ISO834 加熱曲線 30, 60, 90, 120 分間 気中冷却 & 散水冷却	-	-	ASTM C 1202 NaCl (30g/L) 600V/m 6 時間	IS 3085:1965 (India 基準)	-	-	透水係数や塩化物イオン拡散係数は、30 分加熱時の上昇量は小さいが、60 分加熱時に急激に上昇する。 気中冷却と散水冷却を比較すると、散水冷却の方が加熱後のコンクリートの耐久性は低くなる。 散水冷却をすると、透水係数や塩化物イオン拡散係数は、気中冷却の 1.4 倍程度に上昇する。
26	NC w-FPC	20°C 気中 (湿度 95%) 28 日間 後 実験室環境 35 日間	200, 400, 600, 800°C 10°C/分 (2 時間) 気中冷却	-	GB/T 50082 温度 20°C 湿度 75% 濃度 20% 7 日間	-	120 分間	-	-	200°C 加熱時には耐火コーティングによる影響は小さいが、高温になるほど厚いコーティングが効果を発揮する。 吸水量は、400°C 加熱時に 200°C 加熱時の約 2.5 倍、600°C 加熱時に約 4 倍、800°C 加熱時に約 5 倍になる。 中性化深さは、400°C 加熱時に 200°C 加熱時の約 2 倍、600°C 以上では 50mm 全て中性化する。 15mm の耐火コーティングにより、吸水量は約 75%、中性化深さは約 65%まで減少する。
27	NC w-NS and w-AI	室温水中 28 日間	400, 800°C 昇温速度不明 (4 時間保持) 気中冷却	-	-	ASTM C1202	ASTM C 642	-	-	水分浸透は、400°C 加熱時には加熱前の 1.2 倍程度、800°C 加熱時には 2 倍程度となる。 塩分浸透は、400°C 加熱時には加熱前の 1.4 倍程度、800°C 加熱時には 3.3 倍程度となる。 アルコフィンとナノシリカを混和すると、加熱後 (特に 800°C 加熱時) の耐久性が低下する。
28	NC w-FA	20°C 水中 60 日間 後 20°C 気中 (湿度 55%) 21 日間	100-500°C 10°C/分 (2 時間) 気中冷却	20°C 気中 (湿度 50%) 14 日間 (中性化用)	温度 20°C 湿度 60% 濃度 5% 140 日間	NT BUILD 492	-	-	-	塩化物イオン浸透抵抗性は、200°C 加熱時には、加熱前の 30%程度まで減少する。 中性化抵抗性は、100°C 加熱時に 5~20%上昇する。 中性化抵抗性は、200°C 加熱時に急激に低下し、500°C 加熱時には、加熱前の 30%程度まで減少する。 フライアッシュを混入すると、200°C 加熱時に耐久性が急激に低下するが、その後の低下が少ない。
29	NC	室温水中 28 日間	ISO 834 加熱曲線 60 分間 気中冷却	-	-	ASTM C1202	IS 3085:1965 (India 基準)	-	硫酸塩劣化 5%硫酸塩溶 液中 28 日間	透水係数は、受熱前の 500~100000 倍、塩化物イオン拡散係数は、受熱前の 4~25 倍と上昇量に幅がある。 グレードの高いコンクリートほど、透水係数と塩化物イオン拡散係数の増加が著しい (受熱前の値が小さい)。 グレードの高いコンクリートほど、受熱後の硫酸塩劣化による強度低下が大きい (受熱前は逆の傾向あり)。
30	NC w-BF	実験室環境 28 日間	100-600°C 10°C/分 (3 時間) 気中冷却	-	GB/T 50082 温度 20°C 湿度 70% 濃度 20% 28 日間	NaCl (5%mass) 84 日間	-	-	-	加熱直後、促進試験後ともに、フェノールフタレイン溶液 (濃度 1%) による中性化深さの判別が可能である。 中性化深さは、400°C 受熱時に 100°C 受熱時の約 2.5 倍になり、500°C 以上では 50mm 全て中性化する。 バサルト繊維補強をすると補強なしと比べて、400°C までの中性化深さが約 10mm 小さく、耐久性に優れる。 塩化物イオン浸透量は、加熱面から 12.5mm の位置において、600°C 受熱時には、受熱前の約 5 倍となる。
31	SCC w-FA w-SF w-MK	室温水中 加熱試験まで	ISO834 加熱曲線 60, 120 分間 気中冷却	-	-	ASTM C1202	28 日間	-	硫酸塩劣化 5%硫酸塩溶 液中 28 日間	吸水量は、メタカオリン、シリカフェーム、フライアッシュの順で吸水量が小さくなる (受熱前と逆転する)。 緻密な配合ほど、加熱による微細ひび割れが多く生じることで耐久性の低下が著しい。 硫酸塩劣化による強度低下は、60 分加熱時に 40%程度、120 分加熱時に 75%程度となる。 塩化物イオン拡散係数は、60 分加熱時に受熱前の 2.5 倍程度、120 分加熱時に 5 倍程度となる。
32	SFM w-BF	20°C 水中 28 日間	300, 600, 900°C 7°C/分 (3 時間) 気中冷却 & 散水冷却	-	-	-	ASTM C642	-	-	吸水量は、300°C 加熱時には加熱前の約 2 倍、600°C 加熱時には約 2.5 倍に上昇する。 散水冷却時の吸水量は、300°C 加熱時には気中冷却時の約 95%、600°C 加熱時には約 90%になる。
33	NM w-CBN w-CNT	23°C 気中 (湿度 95%) 28 日間	200, 400, 600°C 5°C/分 (1-2 時間) 気中冷却	-	-	電気抵抗 乾式	-	-	-	加熱温度の上昇に伴って、加熱後の電気抵抗は増加し、600°C 加熱時には約 5 倍 (ナノ材料なし) となる。 ナノ材料を混和すると、200°C 加熱時に電気抵抗が 7 割程度に減少する。 電気抵抗は、ナノ材料を混和した場合、600°C 加熱時に急激に増加し、受熱前の 10 倍から 1000 倍程

										度となる。
34	NC w-GF w-SF	20°C 水中 28日間 後 実験室環境 14日間	100-800°C 1.66-3.61°C/分 (3時間) 気中冷却	-	-	電気抵抗 湿式	1面浸水 7時間	-	-	透水深さは、繊維補強なしでは、300°C加熱時には最大値の10mmとなるが、補強すると6mm程度となる。 800°C加熱時に、鋼繊維補強をしたケースの透水深さが最大値の10mmに達する。 電気抵抗は、400°C加熱時には100°C加熱時の7割程度、800°C加熱時には4割程度に減少する。
35	NC w-FA	20°C 気中 (湿度95%) 56日間	150, 300, 450, 600°C 5°C/min (1時間) 気中冷却	-	GB/T 50082 温度20°C 湿度70% 濃度20% 28日間	-	-	-	-	ひび割れがない場合、中性化深さは、300°C加熱時には受熱前の約2倍、600°C加熱時には約4倍となる。 ひび割れがある場合、中性化深さは、300°C加熱時には受熱前の約2倍、600°C加熱時には約5倍となる。 加熱後の中性化深さは、フライアッシュの混入により70%から85%まで抑制される。
36	NC w-BC w-SF	26°C 霧中 (湿度100%) 加熱試験まで	300, 550°C 5°C/分 (1時間) 気中冷却	-	-	-	BS EN 12390-8	-	-	全てのケースにおいて、透水深さは、550°C加熱時に、受熱前の約2倍に上昇する。 シリカフュームやバイオ炭を混和することで、混和していないケースの2/3程度まで透水深さが抑制される。 550°C受熱後においても、混入なしの2/3程度程度であるが、バイオ炭を用いたケースの透水深さが最小となる。
37	NC w-GF	室温水中 28日間	250°C (3時間) 気中冷却	-	30D	-	-	-	-	全てのケースで良好な耐久性を確認できた。
38	NC	実験室環境 28日間	200, 500, 700°C 気中冷却	-	湿度80% 濃度100% 30日間	-	-	-	-	中性化深さは、500°C加熱時に受熱前の約1.3倍、700°C加熱時に約1.5倍となる。 200°C加熱、500°C加熱、700°C加熱時に加熱温度の差はあまり見られない(特に35MPa強度のコンクリート)。
39	NC w-PF	20°C 水中 28日間 後 20°C 気中 (湿度60%) 30日間	350°C 20°C/分 (15分間) 気中冷却	-	JIS A 1153 温度20°C 湿度60% 濃度5% 26週間	NaCl (3%mass) 1日間 後 温度20°C 湿度60% 6日間 30サイクル	-	-	-	受熱前は中性化しなかった水セメント比35%のケースにおいて、受熱後は10mm程度の中性化が見られる。 水セメント比45%のケースの中性化深さは、受熱前の約4倍になる。 受熱前は塩化物イオンが浸透しなかった水セメント比35%のケースでは、受熱後は20mm程度と大幅に上昇した。 水セメント比45%のケースの塩化物イオン浸透深さでは、浸透深さが約3倍となる。
40	NC w-WRF	20°C 水中 28日間	150-750°C 5°C/分 (0.5-2時間) 気中冷却&散水冷却	-	-	NaCl (3%mass) 600V/m 72時間	DIN 1048	-	-	透水深さについて、加熱時間が長くなるほど大きくなり、120分加熱後は750°C加熱時に約1.5倍となる。 塩化物イオン拡散係数は、120分加熱後は300°C加熱時に約5倍、750°C加熱時に約20倍に上昇する。
41	NC w-FA	20°C 気中 (湿度90%) 加熱試験まで	150-550°C 5°C/分 (1時間) 気中冷却	-	温度20°C 湿度70% 濃度20% 14日間	-	-	-	-	中性化深さについて、フライアッシュ混入なしの場合、450°C加熱時に1.5倍程度となる。 フライアッシュ混入ありの場合、350°C加熱時に急激に上昇し、限界値(50mm)に達する。 フライアッシュが混入されていない場合の方が、受熱後の耐久性は高い(中性化深さが小さい)傾向にある。
42	NC w-BFS w-FA	20°C 気中 (湿度95%) 28日間	400, 600, 800°C 5°C/分 (1時間) 気中冷却	-	-	ASTM C1202 NaCl (3%mass) 600V/m 6時間	ASTM C642	-	-	フライアッシュを90%置換したものは、全ての加熱温度で吸水量が大きく、置換無しのものが最も小さい。 高炉スラグを置換した方が受熱による吸水量の増加を抑制することができ、置換率50%で最も吸水量が小さい。 置換なしとフライアッシュ90%置換の配合を除き、800°C加熱時には、吸水量は、受熱前の約2倍となる。 高炉スラグは置換率が上昇するほど塩化物イオン浸透量が減少する。 フライアッシュも同様だが、置換率が90%となると塩化物イオン浸透量が最も大きくなる。 高炉スラグ90%置換の塩化物イオン浸透量は、600°C加熱時に置換なしの40%となる。
43	NC w-PF	20°C 水中 28日間	100, 200, 300, 500°C 1°C/分 (1時間) 気中冷却	-	-	JSCE-G 572 温度20°C NaCl (10%mass) 28日間	-	-	-	PP繊維補強の塩化物イオン浸透深さは、200°C加熱まで小さいが、300°C加熱時には補強なしと同等となる。 PP繊維補強の塩化物イオン拡散係数は、200°C加熱時に4.8cm ² /year、300°C加熱時に35cm ² /yearと急上昇する。 補強なしの塩化物イオン拡散係数は、300°C加熱時に27cm ² /yearとなり、補強ありよりも小さくなる。
44	NM	室温水中 9年間	200-700°C 0.3°C/分 (1時間) 気中冷却	室温水中 2週間	-	-	-	○	-	透気係数は、400°C加熱時に受熱前の20倍程度、700°C加熱時に400倍程度に上昇する。 再養生を行うことで、モルタルの透気係数は小さくなり、700°C加熱時には、受熱直後の半分程度に減少する。
45	NC	?	100, 200, 300, 500°C	-	-	温度20°C	-	-	-	塩化物イオン浸透深さは、加熱前は10mm程度だが、500°C加熱時には40mmまで到達する。

	w-PF		1°C/分 気中冷却			NaCl (10%mass) 28 日間				塩化物イオン量については、500°C 加熱時には、35mm の深さでも暴露面同等の 20kg/m ³ 程度となる。 塩化物イオン拡散係数は、受熱前が 0.8cm ² /year であるのに対し、500°C 加熱時には 69cm ² /year と大幅に上昇する。
46	NC w-BF	28 日間	300, 450, 600°C ISO834	—	—	—	○ (視覚的)	—	凍結融解 150 サイクル	吸水量は、450°C 加熱時に受熱前の約 1.1 倍、600°C 加熱時に 1.3 倍になる。 受熱後の試験体では、ひび割れ部分通って液状水が内部まで侵入し、局所的に透水深さが大きくなる。 300°C 加熱した試験体では、凍結融解による著しい損傷は認められず、強度や質量の減少も小さい。
47	NC w-PF	室温封緘 6 年間	250°C 1°C/分 (24 時間) 350°C 1°C/分 (3 時間) 気中冷却	—	—	NT Build 492	温度 40°C 5 週間	—	—	吸水量は、250°C 加熱時に受熱前の 2.5 倍程度、350°C 加熱時にも受熱前の 2.5 倍程度となる。 塩化物イオン拡散係数は、250°C 加熱時に受熱前の 8 倍程度に上昇する。 PP 繊維の混入量は、350°C 加熱時にのみ PP 繊維補強の試験体の方が受熱後の吸水量の上昇が大きくなる。
48	NC w-SC	20°C 水中 28 日間 後 20°C 気中 (湿度 60%) 90 日間	200-700°C 5°C/分 (2.5 時間) 気中冷却	1 日 2 回散水 1 週間 後 20°C 気中 (湿度 60%) 90 日間	GBT50082 温度 20°C 湿度 60% 濃度 10% 7 日間	—	—	—	—	中性化深さは、300°C 加熱までは受熱後に再養生したケースで中性化深さが小さくなる。 400°C 以上の加熱温度では、再養生をしたケースにおいて中性化深さが大きい (再養生中の中性化の影響か)。 表面コーティングを施すことで中性化深さを半分程度に抑制することができる。 700°C 加熱時には、コーティングの有無にかかわらず最大値の 50mm まで中性化する。
49	NC w-PF	20°C 水中 28 日間 後 20°C 気中 (湿度 60%) 90 日間	150-750°C 5°C/分 (2.5 時間) 気中冷却&散水冷却	20°C 気中 (湿度 60%) 90 日間	温度 20°C 湿度 60% 濃度 10% 7 日間	—	—	—	—	中性化深さは、300°C 加熱までは受熱後に再養生したケースで中性化深さが小さくなる。 400°C 以上の加熱温度では、再養生をしたケースにおいて中性化深さが大きい (再養生中の中性化の影響か)。 750°C 加熱時には、急激に中性化深さが上昇し、再養生による変化 (効果) は確認できない。 気中冷却と散水冷却とを比較すると、全ケースにおいて散水冷却したものの中性化深さが大きい。
50	NC w-FA w-MK	20°C 水中 28 日間 後 27°C 気中 (湿度 65%) 5 ヶ月間	200, 400, 600, 800°C 5°C/分 (2.5 時間) 気中冷却&水中冷却	—	—	AASHTO T 277 6 時間	120 分間	—	—	フライアッシュを置換すると、全ての加熱温度で塩化物イオン浸透量が少なくなる。 メタカオリンを高い置換率で置換すると、受熱前は耐久性が高いが、受熱後の塩化物イオン浸透量は多くなる。 600°C 加熱時に、塩化物イオンおよび水分浸透量が急激に大きくなり、その値は 400°C 加熱時の約 3-5 倍となる。 メタカオリン置換率 5%、またはフライアッシュ置換率 20%とすると、受熱後の耐久性が最も高くなる。
51	NC w-SC	20°C 水中 28 日間 後 20°C 気中 (湿度 60%) 90 日間	150-750°C 5°C/分 (2.5 時間) 気中冷却	1 日 2 回散水 1 週間 後 20°C 気中 (湿度 60%) 90 日間	温度 20°C 湿度 60% 濃度 10% 7 日間	—	—	—	—	中性化深さは、300°C 加熱までは受熱後に再養生したケースで中性化深さが小さくなる。 450°C 以上の加熱温度では、再養生をしたケースにおいて中性化深さが大きい (再養生中の中性化の影響か)。 表面コーティングを施すことで中性化深さを 6~7 割程度に抑制することができる。 700°C 加熱時には、コーティングの有無にかかわらず最大値の 50mm まで中性化する。
52	NM w-FA w-MK	20°C 水中 28 日間 後 27°C 気中 (湿度 65%) 5 ヶ月間	200, 400, 600, 800°C 5°C/分 (3-4 時間) 気中冷却	—	—	AASHTO T 277 6 時間	—	—	—	フライアッシュを置換すると、全ての加熱温度で塩化物イオン浸透量が少なくなる。 メタカオリンを高い置換率で置換すると、受熱前は耐久性が高いが、受熱後の塩化物イオン浸透量は多くなる。 600°C 加熱時に、塩化物イオンおよび水分浸透量が急激に大きくなり、その値は 400°C 加熱時の約 3-5 倍となる。
53	NC w-BFS	20°C 水中 28 日間	150-700°C 5°C/分 (4-6 時間) 気中冷却	—	加熱直後	—	—	—	—	加熱温度が上昇するほど、高炉スラグ置換率が上昇するほど、受熱後の中性化深さが上昇する。 600°C 加熱時と 700°C 加熱時での差が最も大きく、700°C 加熱時には 600°C 加熱時の中性化深さの約 2 倍となる。
54	NC w-FA w-SFS	20°C 水中 最大 365 日間	100, 200, 300°C 1°C/分 (1 時間) 気中冷却	—	—	ASTM C1202	—	—	—	全ての加熱温度において、フライアッシュの置換率が高くなるほど、塩化物イオン浸透量が減少する。 加熱温度が高くなるほど (最大 300°C 加熱)、フライアッシュの置換による耐久性の向上の効果が大きい。 フライアッシュ置換率が 50% の場合、塩化物イオン浸透量は、300°C 加熱時には受熱前の 7 割程度となる。
55	NC RGC w-FA	25°C 水中 or 23°C 気中 (湿度 75%) 60 日間	300, 500, 600, 800°C 5°C/分 (4 時間) 気中冷却	—	—	—	24 時間	—	—	加熱温度が高くなるほど、浸水後 4 時間までの吸水量が大幅に上昇し、気中養生のものの方が 1 割程度大きい。 浸水後 24 時間までの吸水量は、300°C 加熱時に 100°C 加熱時の約 2.5 倍、800°C 加熱時に約 10 倍となる。 再生ガラス骨材コンクリートの吸水量は、普通コンクリートよりも小さく、800°C 加熱時に 7 割程度

										となる。
56	NC w-FA	20°C 水中 最大 91 日間	100, 200, 300°C 1°C/分 (1 時間) 気中冷却	—	—	ASTM C1202	—	—	—	全ての加熱温度において、フライアッシュの置換率が高くなるほど、塩化物イオン浸透量が減少する。 91 日間養生後に加熱試験を行うと、フライアッシュの混和による影響が大きく表れる。 フライアッシュ置換率が 50% の場合、塩化物イオン浸透量は、300°C 加熱時には受熱前の 7 割程度となる。
57	NC w-SF w-PF	?	200, 400°C 10°C/分 (2 時間) 気中冷却	気中 or 水中 180 日間	—	—	DIN 1048	—	—	PP 繊維混入量が多いほど、PP 繊維の長さが長いほど、受熱後の透水係数が大きく上昇する。 PP 繊維の混入量が最も多いものの透水係数は、300°C 加熱時には受熱前の 1000 倍程度となる。 再養生後の透水係数は、水中養生の場合に大きく減少し、180 日後には受熱前と同程度まで回復する。
58	NC w-SC	20°C 水中 28 日間 後 実験室環境 56 日間	ISO834 加熱曲線 2.5 時間 気中冷却&散水冷却	実験室環境 90 日間	温度 20°C 湿度 60% 濃度 10% 7 日間	—	—	—	—	散水冷却をすると、再水和の影響で、全ての加熱温度において受熱直後の中性化深さが 0mm となる。 散水冷却の後、中性化促進を行うと、600°C 加熱までは、気中冷却時の約 2 倍の中性化深さとなる。 750°C 加熱時には、全てのケースで促進試験後の中性化深さが最大値の 50mm に達する。 450°C 以上の加熱温度では、再養生をしたケースにおいて中性化深さが大きい (再養生中の中性化の影響か)。
59	NC w-PF w-SC	20°C 水中 7 日間 後 実験室環境 56 日間	ISO834 加熱曲線 2.5 時間 気中冷却&散水冷却	1 日 2 回散水 1 週間 後 実験室環境 9 週間	温度 20°C 湿度 60% 濃度 10% 7 日間	—	—	—	—	450°C 加熱までは、気中冷却時の中性化深さは、散水冷却時の 4 割程度となる。 750°C 加熱時には、全てのケースで促進試験後の中性化深さが最大値の 50mm に達する。 450°C 加熱時では、受熱後の再養生期間が長くなるほど、促進試験後の中性化深さが大きくなる。 表面コーティングによる効果は非常に大きく、30%~60%程度にまで中性化深さを抑制できる。
60	NC LWC w-SF w-PF	20°C 気中 (湿度 50%) 90 日間	200, 600°C 1°C/分 (1 時間) 気中冷却	20°C 気中 (湿度 50%) 試験まで	—	—	—	○	—	普通コンクリートの透気係数は、200°C 加熱時には受熱前の約 3~5 倍、600°C 加熱時には 2500 倍に上昇する。 軽量コンクリートの透気係数は、200°C 加熱時には、受熱前より少し減少し、600°C 加熱時には 20 倍に上昇する。 600°C 加熱時には、軽量コンクリートの透気係数は普通コンクリートの 1/10 以下となる。
61	NC DAC	20°C 気中 (湿度 100%) 28 日間 後 室温封緘 加熱試験まで	800°C 2°C/分 or 10°C/分 (4 時間) BS476 加熱曲線 30 分間 気中冷却	—	—	ASTM C1202	BS 1881-208	—	—	10 分間における吸水速さは、受熱前には 0.05 mL/(m ² ·s)であるが、受熱後は 90mm 位置まで水分が浸透する。 塩化物イオン浸透量は、800°C 加熱時には受熱前の約 200 倍、BS476 加熱時には約 25~65 倍となる。 普通コンクリートの塩化物イオン浸透量は、800°C 加熱時にはドロマイト骨材コンクリートの約 1.2 倍となる。 普通コンクリートの塩化物イオン浸透量は、BS476 加熱時にはドロマイト骨材コンクリートの 4 割程度倍となる。
62	NC	20°C 気中 (湿度 90%) 60 日間	300, 500, 700°C 5°C/分 (2 時間) 気中冷却	20°C 気中 (湿度 75%) 65 日間	—	NT Build 492	—	—	—	塩化物イオン拡散係数は、700°C 加熱時には受熱前の約 20~30 倍となる。 再養生を行うと、500°C 加熱時には受熱直後の 1/3 程度、700°C 加熱時に受熱直後の 7 割程度まで減少する。
63	NC w-PP	25°C 水中 28 日間 後 25°C 気中 (湿度 75%) 4 週間	200, 400, 600, 800°C 2.5°C/分 (1 時間) 気中冷却	—	—	ASTM C1202	—	—	—	塩化物イオン浸透量は、400°C 加熱時には受熱前の約 3 倍、800°C 加熱時には約 12 倍となる。 軽石粉末の置換率が大きいほど、全ての加熱温度で塩化物イオン浸透量が低下する。 軽石粉末の置換率が 40% の塩化物イオン浸透量は、600°C 加熱時には置換率 0% の 7 割程度となる。 軽石粉末の置換率が 40% の塩化物イオン浸透量は、800°C 加熱時には置換率 0% の 6 割程度となる。
64	NC w-FA w-SF w-MK	20°C 水中 28 日間 後 20°C 気中 (湿度 75%) 材齢 60 日まで	200, 400, 600, 800°C 2.5°C/分 (1 時間) 気中冷却	—	—	ASTM C1202	—	—	—	塩化物イオン浸透量は、600°C 加熱時には受熱前の約 10 倍、800°C 加熱時には約 20 倍となる。 フライアッシュ置換率 20% の塩化物イオン浸透量は、置換率 0% の 4 (高強度)~6 (普通強度) 割程度となる。 メタカオリン置換率 20% の塩化物イオン浸透量は、800°C 加熱時には置換率 0% の 1.3 倍程度となる。 シリカフェームまたはメタカオリンの置換率 5% の塩化物イオン浸透量は、置換率 0% の 8 割程度となる。
65	NCP	20°C 封緘 7 年間	300°C 0.1°C/分 (24 時間) 気中冷却	—	—	—	—	○	—	透水係数は、150°C 加熱時に受熱前の 6 割程度、200°C 加熱時に同等、300°C 加熱時に最大 2 倍程度となる。 ひび割れがない場合の透水係数は、ひび割れがある場合よりも受熱後の値の上下変化が大きい。
66	NC w-BFS w-FA w-SF	20°C 水中 28 日間 後 20°C 気中 (湿度 75%)	200, 400, 600, 800°C 2.5°C/分 (1 時間) 気中冷却	—	—	ASTM C1202	—	—	—	フライアッシュ置換率 30% の高強度、高炉スラグ置換率 40% の普通強度の塩化物イオン浸透量が最小となる。 これらの塩化物イオン浸透量はいずれも置換率 0% の 3 割程度となり、耐久性が大きく向上する。 シリカフェーム置換が耐久性の向上に最も効果が小さく、塩化物イオン浸透量は、置換率 0% の 8 割

		材齢 60 日まで								程度となる。 高強度ではフライアッシュ置換、普通強度では高炉スラグ置換が耐久性の向上への効果が大きい。
67	NC w-BFS w-FA w-SF w-MK	20°C 水中 28 日間 後 20°C 気中 (湿度 75%) 材齢 60 日まで	600, 800°C 2.5°C/分 (1 時間) 気中冷却	20°C 水中 2 時間 後 20°C 気中 (湿度 75%) 20°C 水中 56 日間	—	ASTM C1202	—	—	—	置換率 0% の高強度の塩化物イオン浸透量は、600°C 加熱時に受熱前の約 12 倍、800°C 加熱時に約 24 倍となる。 置換率 0% の普通度の塩化物イオン浸透量は、600°C 加熱時に受熱前の約 7 倍、800°C 加熱時に約 12 倍となる。 これらは再養生によって性能回復し、水中養生で受熱直後の 4 割程度、気中養生で 6 割程度まで減少する。 フライアッシュ置換率 30% の高強度の塩化物イオン浸透量は、再養生後には置換率 0% の 3 割程度となる。 高炉スラグ置換率 40% の普通強度の塩化物イオン浸透量は、再養生後には置換率 0% の 5 割程度となる。 メタカオリン置換率 20% の塩化物イオン浸透量は、置換率 0% の 1.5 倍程度となる。

【コンクリート種類】

NC：普通コンクリート（普通強度（N）、高強度・超高強度（H））、SCC：自己充填コンクリート、ZC：ゼオライト混和コンクリート、RAC：再生骨材コンクリート、RGC：再生ガラス骨材コンクリート、LWC：軽量コンクリート、DAC：ドロマイト骨材コンクリート

【モルタル・セメントペースト種類】

SFM：シリカフェームモルタル、NM：普通モルタル、NCP：普通セメントペースト

【混和材種類】

w-ESP：卵殻粉末混和、w-PF：PP 繊維補強、w-BF：バサルト繊維補強、w-GF：ガラス繊維補強、w-SF：鋼繊維補強、w-WRF：廃ゴム繊維補強、w-BFS：高炉スラグ混和、w-FA：フライアッシュ混和、w-SF：シリカフェーム混和、w-MK：メタカオリン混和、w-BC：バイオ炭混和、w-NS：ナノシリカ混和、w-NF：ナノフライアッシュ混和、w-NM：ナノメタカオリン混和、w-CBN：カーボンブラックナノ粒子混和、w-CNT：カーボンナノチューブ混和、w-Al：アルコフィン混和、w-SFS：鋳物廃砂混和、w-PP：軽石粉末混和。

【コーティング種類】

w-FPC：耐火コーティング、w-SC：表面コーティング

2.2.1 受熱したコンクリートの中性化抵抗性に関する文献調査結果

図 2.2.1.1～図 2.2.1.7, 表 2.2.1.1 に, 受熱したコンクリートの中性化抵抗性を評価している国内文献から抜粋した実験結果を示す.

図 2.2.1.1 は, 普通強度と高強度のコンクリートについて, RABT 加熱曲線に従い, 最高温度 400, 800, 1200℃に加熱し, その後気中冷却した場合の中性化深さを測定した事例である. 中性化深さは, 受熱から 1 か月後と 13 か月後に測定されている. この結果によれば, 加熱温度が高くなるほど, 普通強度, 高強度ともに中性化深さが大きくなるが, PP 繊維混入の有無, 普通・高強度の違いによる影響は見られない. また, 再水和などにより時間の経過とともに中性化抵抗性が回復することが示されている.

図 2.2.1.2 は, 普通強度のコンクリートについて, IS0834 加熱曲線に従い, 最高温度 600℃に加熱し, その後気中冷却, および水中浸漬した場合の中性化深さを測定した事例である. 中性化深さは, 加熱面縁から水平距離が 0, 50, 150, 500mm で, それぞれ 210, 170, 75, 40mm となったことが示されている.

図 2.2.1.3 は, 高強度のコンクリートについて, RABT 加熱曲線に従い, 最高温度 400, 800, 1200℃に加熱し, その後気中冷却した場合の中性化深さを測定した事例である. 中性化深さは, コンクリート強度や PP 繊維混入の有無によらず, 受熱温度が同じであればほぼ同じであった. また, 受熱温度が 800℃で 30～40mm 程度, 1200℃で 60～70mm 程度であった. 一方, 400℃では殆ど中性化が進行していないことが示されている.

表 2.2.1.1 は, 普通強度のコンクリートについて, IS0834 加熱曲線に従い, 最高温度 110, 300, 500, 700℃に加熱し, その後気中冷却した場合の中性化深さを測定した事例である. 中性化深さは, 非加熱, 110, 300, 500, 700℃で, それぞれ 3.4, 3.4, 3.3, 8.2, 4.5mm であった.

図 2.2.1.4 は, 高強度のコンクリートについて, RABT 加熱曲線に従い, 最高温度 1200℃に加熱し, その後気中冷却した場合の事例である. この実験では, 受熱直後と受熱から 10 か月後に促進中性化試験を実施している. 受熱直後の中性化深さは, 引張側で 25mm 程度, 圧縮側で 24mm 程度であった. 一方, 受熱 10 か月後の促進中性化 13 週間後の中性化深さは, 非加熱面で 1mm 程度, 引張側が 19mm 程度, 圧縮側が 13mm 程度と小さくなった. この原因は深部からのアルカリ分の供給によるものと推察している.

図 2.2.1.5～図 2.2.1.7 は, 普通強度と高強度のコンクリートについて, 毎分 5℃の温度上昇をして, 最高温度 200, 300, 450, 600, 650, 750℃に加熱し, その後気中もしくは水冷却した場合の事例である. この実験では, 受熱直後と受熱から 60 日間気中もしくは湿潤養生後に促進中性化試験を実施している. W/C50% の促進中性化後の中性化深さは, 受熱温度が高くなるほど深くなる. また, 受熱後に気中冷却した場合に比べて, 水冷却した場合の方が深くなり, 急冷却の影響が見られる. さらに, 受熱温度が 300℃以下であれば冷却方法によらず, 養生時間とともに中性化深さは徐々に減少している. 一方, 受熱温度が 450℃以上では冷却方法によらず, 養生時間とともに中性化深さは増加する傾向を示している. W/C50% と 35% の 650℃加熱後の促進中性化後の中性化深さを比較すると, 冷却方法によらず, 高強度の方が普通強度に比べて中性化深さは小さくなることが示されている.

また, 海外の文献では, 今回の文献調査の範囲において, 受熱したコンクリートの中性化抵抗性について検討している文献は, 16 編 [文献 21, 23, 26, 28, 30, 35, 37, 38, 39, 41, 48, 49, 51, 53, 58, 59] であった. コンクリートの種類は, 普通コンクリートだけでなく, 再生骨材を使用したもの [文献 23], フライアッシュ等のポゾラン系物質を混和したもの [文献 28, 35, 41, 53], 耐火コーティングや繊維補強を施したもの [文献 26, 30, 37, 39, 49, 59], 受熱後に補修コーティングを施したもの [文献 48, 51, 58, 59] など, さまざまな検討ケースが見られた. また, 加熱温度は 100℃から 800℃で, 受熱後の再養生を経た後の耐久性について検討しているもの [文献 23, 28, 48, 49, 51, 58, 59] もある.

促進中性化試験は、高濃度の二酸化炭素環境の中に短期間暴露している研究がほとんどであり、1件〔文献37〕のみ、実験室環境に暴露したケースが見られた。促進中性化試験は、基本的に各国で推奨される試験方法（GB T 50082, JIS A 1153 など）で行われており、二酸化炭素濃度10%から20%の環境下に、7日から28日間暴露したケースが多かったが、二酸化炭素濃度が3%〔文献23〕や5%〔文献28, 39〕といった比較的低濃度のケースや、暴露期間が140日間〔文献28〕や26週間〔文献39〕といった比較的長期間のケースも見られた。

受熱したコンクリートの中性化抵抗性について総括すると、以下のとおりである。

- ・受熱温度が300℃程度までであれば、受熱から長期間が経過後に、熱分解したセメント水和生成物や未水和セメントの再水和、コンクリート内部からのアルカリの移動により、中性化の進行は抑制される。一方、受熱温度が400℃を超えると中性化抵抗性は著しく低下する。
- ・受熱したコンクリートを水中で再養生すると、高温で分解した水和物の再水和により、中性化抵抗性は改善するが、受熱前の状態にまで回復はしない。また、気中で再養生を行うと、その間に中性化が進む可能性がある。
- ・加熱後に水で急冷した場合に、気中で徐冷した場合よりもその後の中性化は進行しやすくなる。
- ・フライアッシュや高炉スラグ微粉末の混和は、中性化の進行を促進する。
- ・繊維補強コンクリート（本調査範囲においては有機物繊維による補強に限る）では、繊維によるひび割れ抑制効果により受熱温度が400℃程度までは中性化抵抗性への効果が期待できるが、400℃を超えると無混入の場合と同程度となる。
- ・補修によるコーティングは、受熱したコンクリートの中性化抵抗性を改善する効果が期待できる。ただし、受熱温度が700℃程度を超えるとその効果は期待できなくなる。

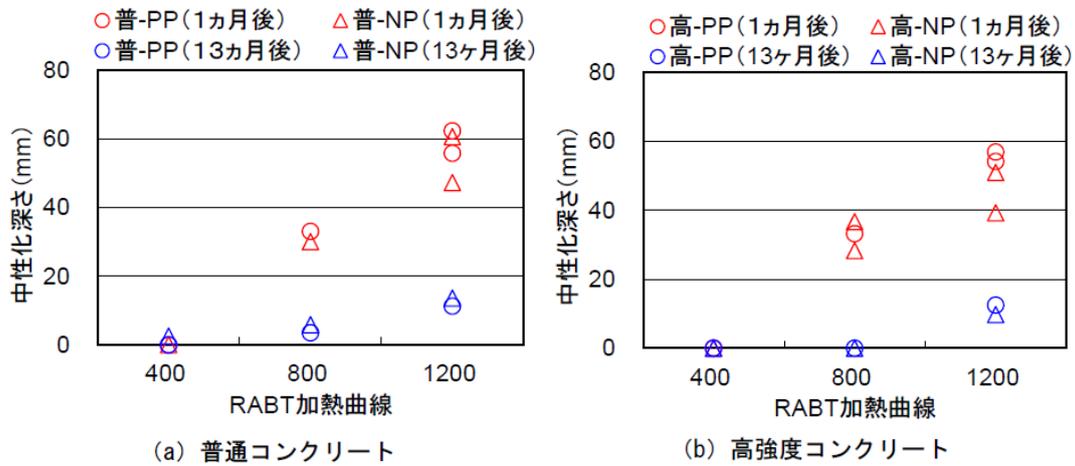


図 2.2.1.1 受熱したコンクリートの中性化深さの経時変化²⁾

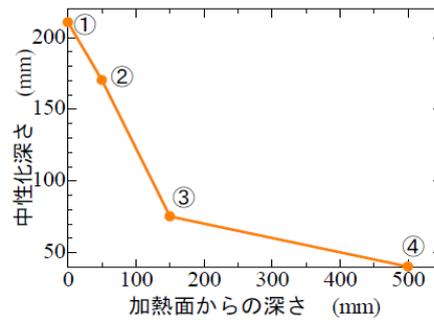


図 2.2.1.2 受熱温度の違いによる中性化深さの測定結果³⁾

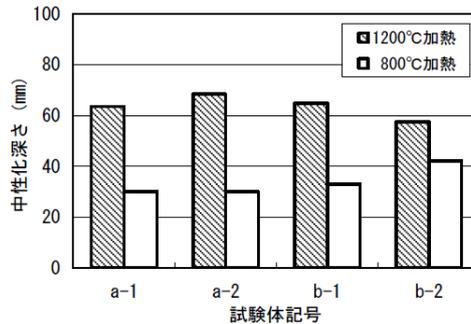


図-1.2 中性化深さ測定結果

図 2.2.1.3 受熱温度の違いによる中性化深さの測定結果⁸⁾

表 2.2.1.1 受熱温度の違いによる中性化深さの測定結果¹⁰⁾

加熱温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	中性化深さ (mm)
未加熱	35.7	27.8	3.4
110	37.3	29.0	3.4
300	28.2	22.7	3.3
500	25.9	13.2	8.2
700	29.4*	20.3*	4.5

注：各試験結果は採取したコア3本の平均値。

*：加熱面から60~80mm部分の劣化が著しいため、80mm以深のコアを成形して圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施。

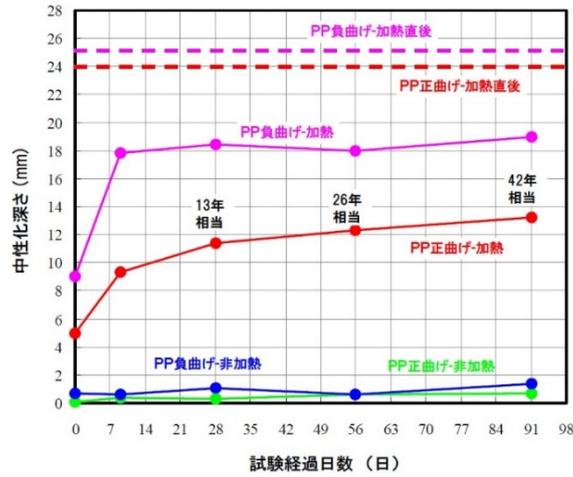
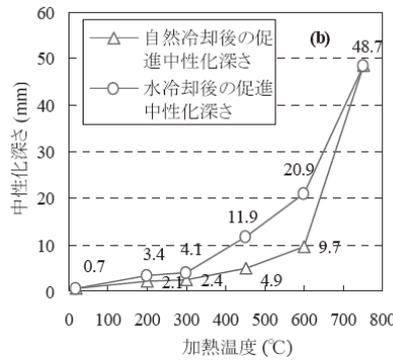
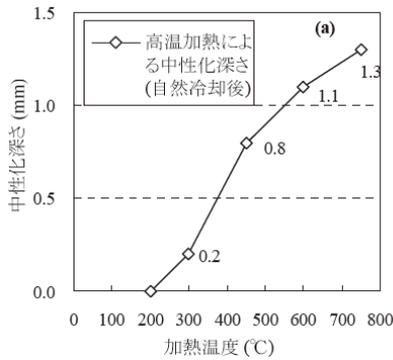
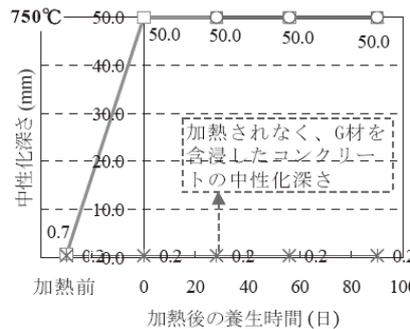
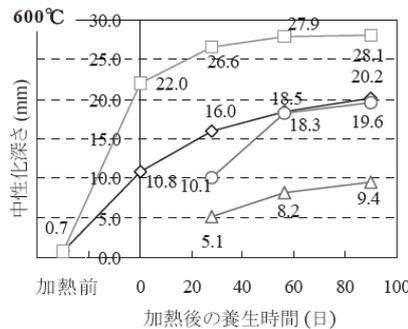
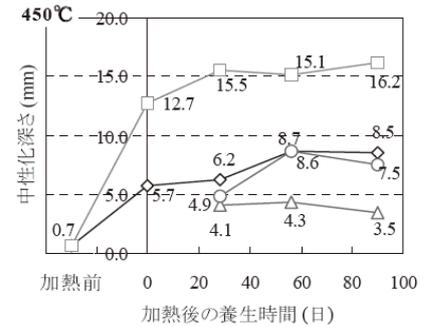
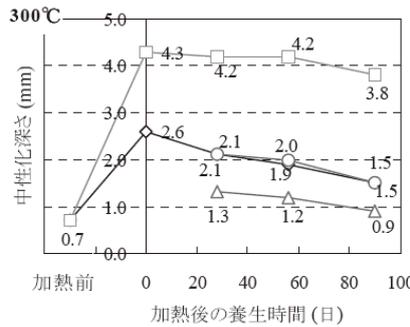
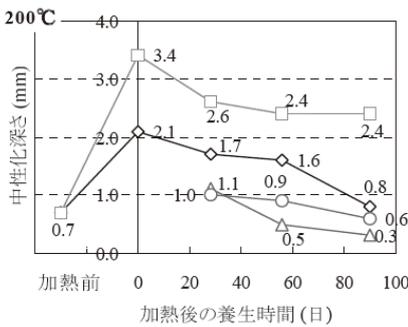


図 2.2.1.4 受熱したコンクリートの促進中性化深さの測定結果¹²⁾



加熱後養生：気中
C1 : W/C=50%

図 2.2.1.5 受熱したコンクリートの促進中性化深さの測定結果¹⁵⁾



加熱後養生：気中
C1 : W/C=50%

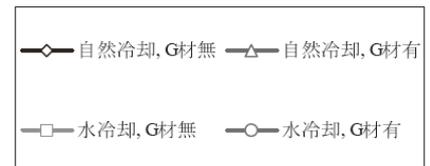


図 2.2.1.6 受熱したコンクリートの促進中性化試験後の中性化深さの経時変化¹⁵⁾

650°C加熱後養生：恒温恒湿+気中

C2 : W/C=50%, C3 : W/C=35%

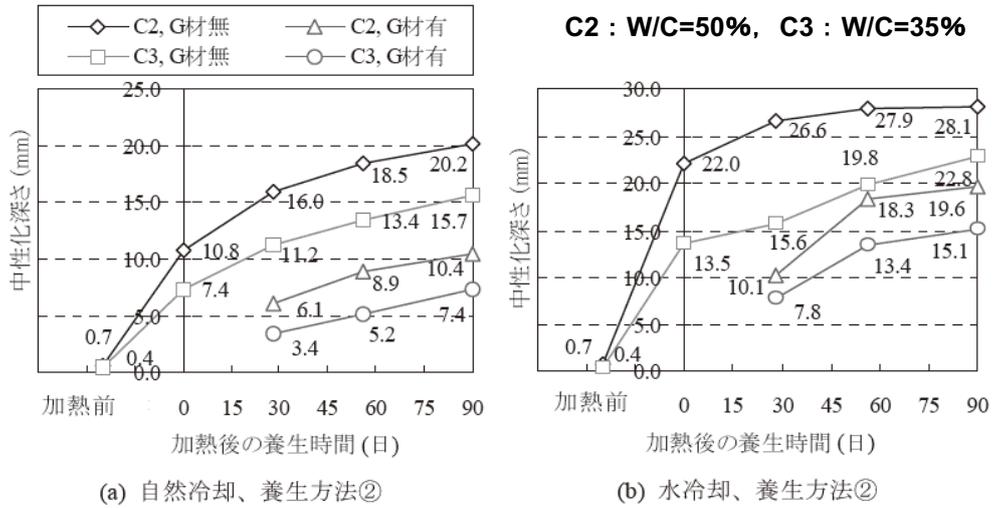


図 2.2.1.7 受熱したコンクリートの促進中性化試験後の中性化深さの経時変化¹⁵⁾

2.2.2 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する文献調査結果

図 2.2.2.1～図 2.2.2.11, 表 2.2.2.1 に, 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性を評価している国内文献から抜粋した実験結果を示す。

図 2.2.2.1 は, 普通強度のコンクリートについて, IS0834 加熱曲線に従い, 最高温度 600℃に加熱し, その後気中冷却, および水中浸漬した場合の塩分浸透量を測定した事例である。塩分浸透深さは, 加熱面縁から水平距離が 0, 50, 150, 500mm で, それぞれ 100, 66, 21, 16mm となった。

図 2.2.2.2 は, 高強度のコンクリートについて, RILEM で提案する 1℃/min で加熱し, 最高温度 100, 200, 500℃に加熱して, 気中冷却した場合の塩分浸透量を測定した事例である。硝酸銀の発色に基づく塩分浸透深さは, 粗骨材の岩種や PP 繊維の有無によらず, 受熱温度 100, 200, 500℃で, それぞれ 5, 30, 50mm 程度となり, 加熱温度が高いほど深くなる。なお, 100℃は常温とほぼ変わらず, 500℃はコア全断面に浸透した。

図 2.2.2.3 は, 高強度のコンクリートについて, RILEM で提案する 1℃/min で加熱し, 最高温度 100, 200, 300, 500℃に加熱し, その後気中冷却した場合の塩分浸透量を測定した事例である。表面塩分量は, PP 繊維未混入では受熱前後での差異は少なく 20kg/m³ 程度である。PP 繊維混入では 100℃までは 20kg/m³ 程度であるが, 200, 300℃では 40kg/m³ 程度に増加し, PP 繊維溶解の影響と考えられる。見掛けの拡散係数は, PP 繊維未混入で, 非加熱, 100, 300, 500℃でそれぞれ 0.8, 2.2, 27, 69cm²/年, PP 繊維混入で, 非加熱, 100, 200, 300℃でそれぞれ 1.1, 3.1, 4.8, 35 cm²/年となった。受熱温度 200～300℃でコンクリート内部に微細なひび割れが生じた影響と推察している。

図 2.2.2.4 は, 普通強度のコンクリートについて, RILEM で提案する 1℃/min で加熱し, 最高温度 100, 200, 300℃に加熱し, その後気中冷却した場合の塩分浸透量を測定した事例である。100, 200℃ではひび割れはなく, 300℃では亀甲状のひび割れが発生した。塩分浸透深さは, 非加熱が 15mm 程度に対して, 100℃で 25mm 程度, 200, 300℃では供試体寸法から測定できる最大の 50mm を超えていた。

図 2.2.2.5, 図 2.2.2.6 は, 高強度のコンクリートについて, RILEM で提案する 1℃/min で加熱し, 最高温度 200, 500℃に加熱し, その後気中冷却した場合の塩分浸透量を測定した事例である。200℃ではひび割れはなく, 500℃では試験体全体に亀甲状のひび割れが発生した。硝酸銀の発色に基づく塩化物イオン浸透深さは, 非加熱で 10mm 程度に対し, 200℃で 40mm 程度, 500℃では供試体寸法から測定できる最大の 50mm を超えていた。見掛けの拡散係数は, 非加熱で 0.10cm²/年に対して, 200℃で 0.26 cm²/年となった。一方, 500℃では 0.18 cm²/年と低い。500℃では内部の塩化物イオン濃度の方が高い逆転現象が生じており, ひび割れにより拡散ではない状態になっているためと推察される。

表 2.2.2.1 は, 普通強度と高強度のコンクリートについて, HC (ハイドロカーボン) 加熱曲線に従い, 最高温度 1100℃に加熱し, その後気中冷却した場合の塩分浸透量を測定した事例である。見掛けの拡散係数は, 普通強度で 193 cm²/年, 高強度で 41.4 cm²/年であった。これらは, 加熱面側が欠損していたため, それぞれ加熱面から 110, 50mm カットした面を塩水浸漬面としている。これらの値は, コンクリート標準示方書から算定される見掛けの拡散係数に対して, それぞれ約 270 倍, 約 300 倍であった。

図 2.2.2.7 は, 高強度のコンクリートについて, RILEM で提案する 1℃/min で加熱し, 最高温度 200, 300, 500℃に加熱して, 気中冷却した場合の塩分浸透量を測定した事例である。塩分浸透深さは, PP 繊維未混入の非加熱で 1cm 程度, 300, 500℃で 4cm 以上であった。また, PP 繊維混入の非加熱で 1cm 程度, 200℃で 3cm 程度, 300℃で 4cm 以上であった。受熱温度が高いほど多くの塩化物イオンが深い位置にまで浸透した。

図 2.2.2.8 は, 高強度のコンクリートについて, RABT30 加熱曲線に従い, 最高温度 1200℃に加熱し, その後気中冷却した場合の塩分浸透量を測定した事例である。硝酸銀の発色に基づく塩化物イオン浸透深さは,

標準と PP 繊維混入供試体では全断面に及んでいた。一方、耐火被覆した供試体では加熱面から 20~30mm の範囲に浸透していた。XRF による塩分浸透量は、受熱温度の増加に伴い多くなる。本実験条件下では、受熱温度 650, 500, 200, 100℃の位置で、それぞれ 1.4, 0.7, 0.5, 0.3wt%程度であった。

図 2.2.2.9, 図 2.2.2.10 は、普通強度のコンクリートについて、加熱時間 2 時間で、最高温度 200, 400, 600, 800℃に加熱し、その後電気泳動法による塩化物イオンの拡散実験を行った事例である。W/C45, 55, 65% の常温での拡散係数は、それぞれ 0.63, 1.3, 3.2cm²/年程度で、受熱温度 200℃では非加熱とほぼ変わらない。一方、400℃では高強度になるほど拡散係数は大きく低下し、それぞれ 2.8, 4.7, 7.9cm²/年程度になった。さらに、600, 800℃になると W/C によらず 9.5cm²/年程度まで低下した。腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2kg/m³とした場合、かぶり 50 mm の鉄筋に腐食が発生する時期は、非加熱で 29 年に対して、受熱したコンクリートでは 7.5 年と解析されている。

図 2.2.2.11 は、RABT30 加熱曲線で加熱した梁試験体に対して、塩水散水と屋外暴露を繰り返し、その後静的曲げ載荷試験を行い、鉄筋腐食量と塩化物イオン濃度分布を測定した事例である。塩化物イオン濃度分布は、非加熱供試体に比べて、加熱供試体では表面塩分濃度が 2 倍程度大きくなった。

また、海外の文献では、今回の文献調査の範囲において、受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性について検討している文献は、27 編 [文献 22, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 39, 40, 42, 43, 45, 47, 50, 52, 54, 56, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67]であった。コンクリートの種類は、普通コンクリートだけでなく、自己充填コンクリート [文献 31]、再生骨材 [文献 23] やドロマイト骨材 [文献 61] を使用したコンクリート、フライアッシュ [文献 28, 31, 42, 50, 52, 54, 56, 64, 66, 67] やシリカフェーム [文献 31, 64, 66, 67]、メタカオリン [文献 31, 50, 52, 64, 67]などのポゾラン系物質を混和したコンクリート、繊維補強を施したコンクリート [文献 22, 30, 34, 39, 40, 43, 45, 47]、ならびにナノ材料を混和したコンクリート [文献 25, 27, 33] など、さまざまな種類が見られる。

塩水浸漬試験は、電気的手法を用いて塩化物イオン浸透深さを検討している研究が多いが、高濃度の塩水に浸漬する手法 [文献 30, 43, 45] や、塩水を用いた乾湿繰り返し [文献 39] により、塩化物イオンの浸透深さを検討している文献も見られる。電気的手法による検討では、いずれの文献でも、北米を中心に広く普及している方法 (ASTM C 1202, NT BUILD 492, AASHTO T 277) を採用している。塩水浸漬による検討では、質量パーセントで 10%の塩化ナトリウム水溶液に 28 日間暴露している。乾湿繰り返しを用いた検討では、3%の塩化ナトリウム水溶液に 1 日間、20℃60%RH の気中に 6 日間を 1 サイクルとして 30 サイクル暴露している事例が見られた。また、加熱温度は 100℃から 800℃で、受熱後の再養生期間を経た後の耐久性について検討している事例 [文献 22, 23, 28, 62, 67]もある。

受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性について総括すると、以下のとおりである。

- 受熱後の塩分の見掛けの拡散係数は、受熱温度が 300℃程度より高くなると、受熱前よりも数~数十倍大きくなる。
- 受熱したコンクリートを水中で再養生すると、高温で分解した水和物の再水和により、塩分浸透抵抗性は改善するが、受熱前の状態にまで回復はしない。
- 加熱後に水で急冷した場合に、気中で徐冷した場合よりもその後の塩分浸透抵抗性は低くなる。
- フライアッシュや高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、メタカオリンの混和は、受熱後の塩分浸透抵抗性を高める。ただし、フライアッシュは置換率を 90%程度に大きくすると、高炉スラグやシリカフェーム、メタカオリンは置換率を 20~40%程度に大きくすると、普通コンクリートより塩分浸透抵抗性は低くなる。
- ナノ材料を混和すると、受熱後の塩分浸透抵抗性は、普通コンクリートよりも低くなる。

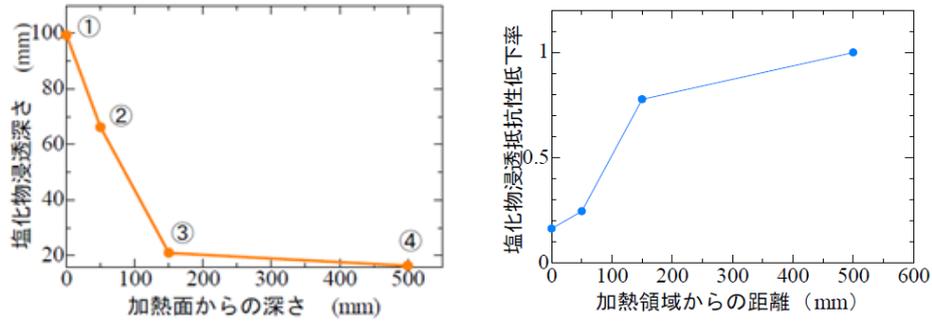


図 2.2.2.1 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性の低下率³⁾

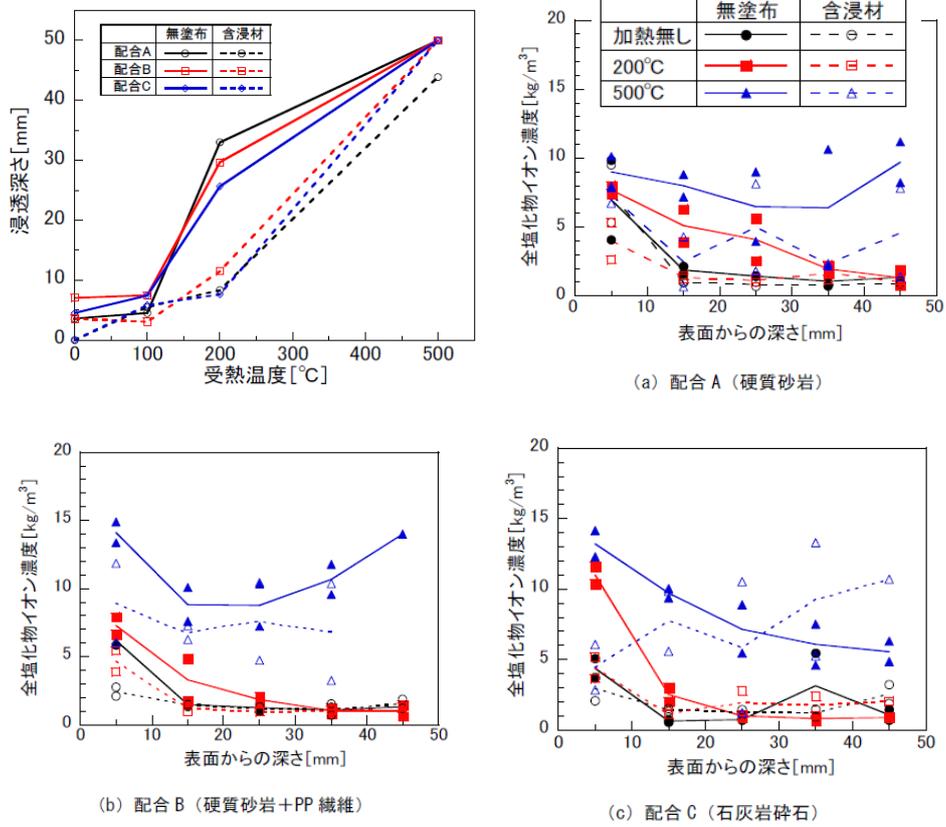


図 2.2.2.2 受熱温度と塩分浸透深さの関係⁴⁾

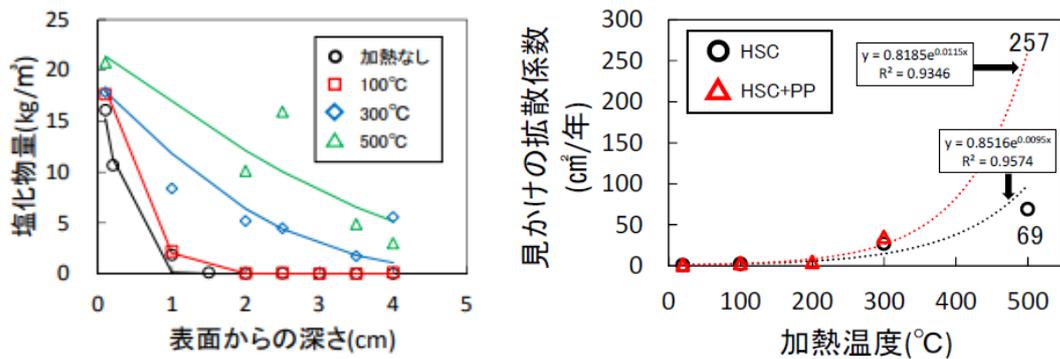


図 2.2.2.3 受熱温度と塩化物イオン濃度分布および見かけの拡散係数の関係⁵⁾

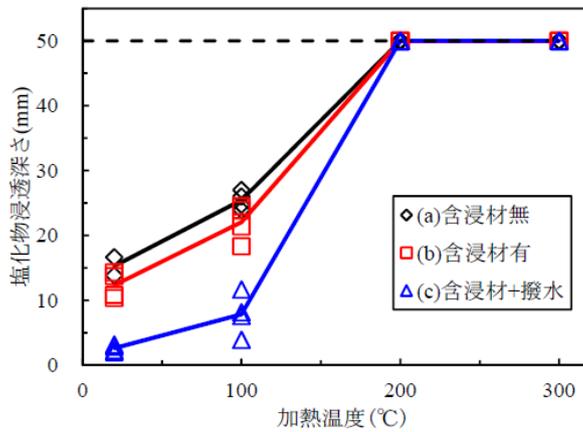


図-12 塩化物イオン浸透深さ

図 2.2.2.4 受熱温度と塩分浸透深さの関係⁶⁾

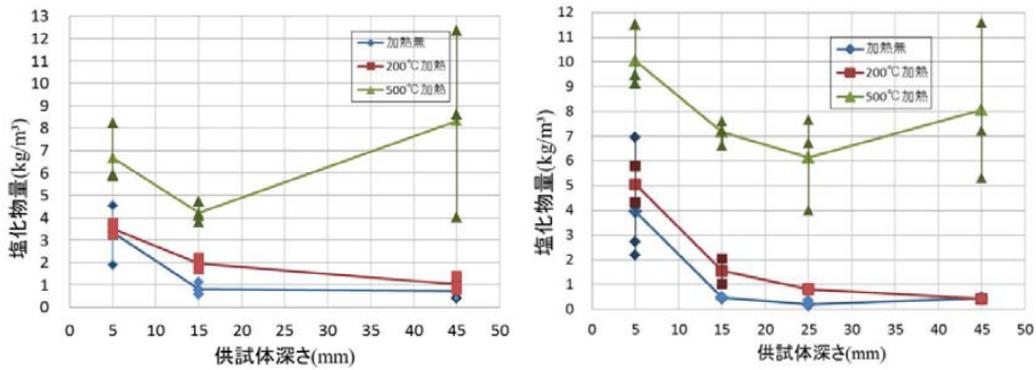


図 2.2.2.5 受熱温度と塩化物イオン濃度分布の関係⁷⁾

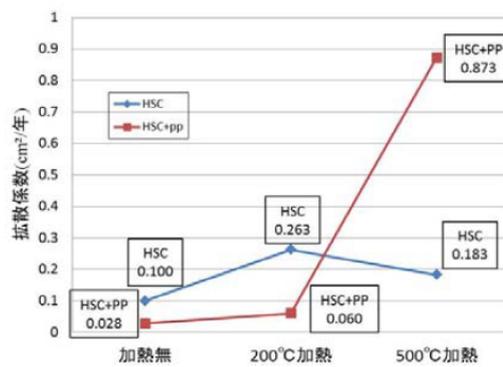


図-8 拡散係数の推定結果

図 2.2.2.6 受熱温度と見掛けの拡散係数の関係⁷⁾

表 2.2.2.1 受熱温度と塩化物イオン濃度分布および見掛けの拡散係数の関係⁹⁾

表-4 塩化物イオン濃度測定結果

	暴露面からの位置 (mm)	加熱面からの位置 (mm)	塩化物イオン濃度 (%)
普通コンクリート	15~25	125~135	0.468
	35~45	145~155	0.397
	55~65	165~175	0.301
高強度コンクリート	15~25	65~75	0.262
	35~45	85~95	0.138
	55~65	105~115	0.087

表-5 見掛けの拡散係数

試験体	表面の塩化物イオン濃度(%)	見掛けの拡散係数(cm ² /年)
普通コンクリート	0.558	193.0
高強度コンクリート	0.383	41.4

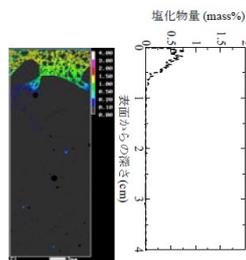


図-1 塩分浸透深さ
(Control : 加熱無し)

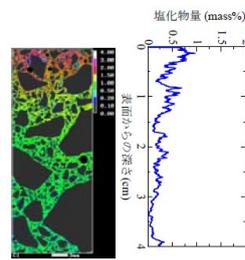


図-2 塩分浸透深さ
(Control : 300°C)

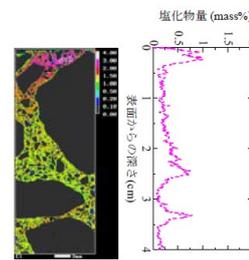


図-3 塩分浸透深さ
(Control : 500°C)

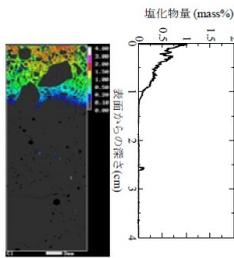


図-4 塩分浸透深さ
(PP : 加熱無し)

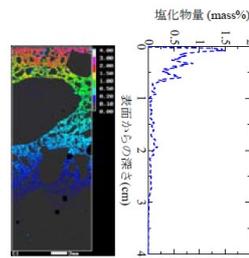


図-5 塩分浸透深さ
(PP : 200°C)

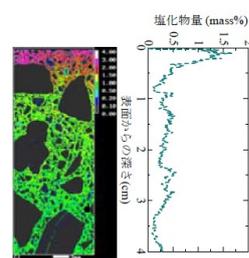


図-6 塩分浸透深さ
(PP : 300°C)

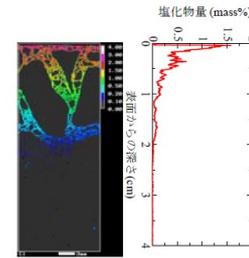


図-7 塩分浸透深さ
(FP : 200°C)

図 2.2.2.7 受熱温度と塩化物イオン濃度分布の関係¹³⁾

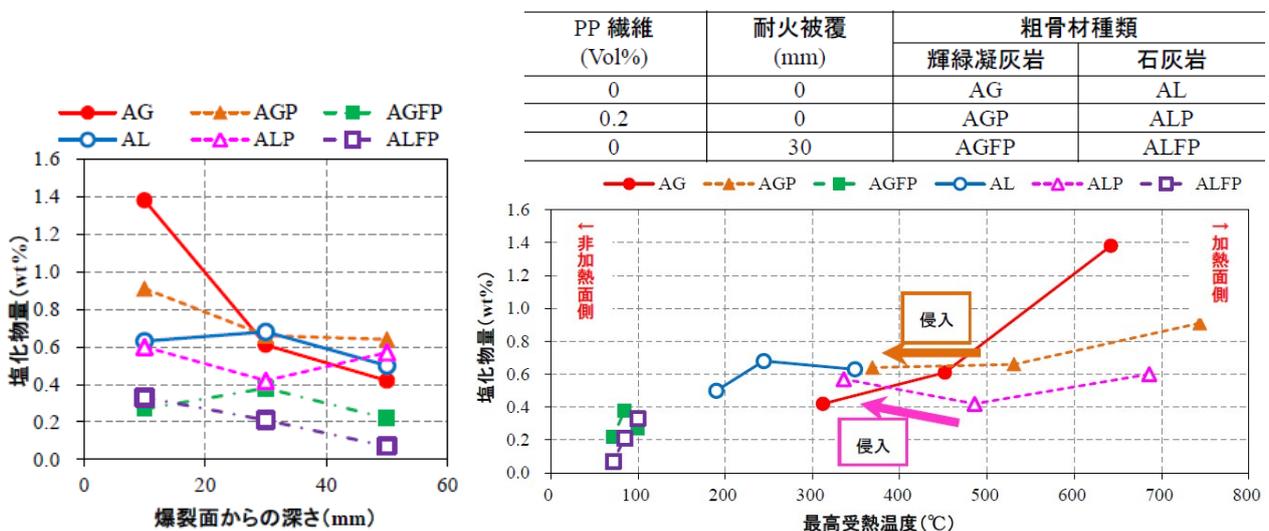


図 2.2.2.8 爆裂面からの深さと塩化物イオン濃度分布の関係¹⁴⁾

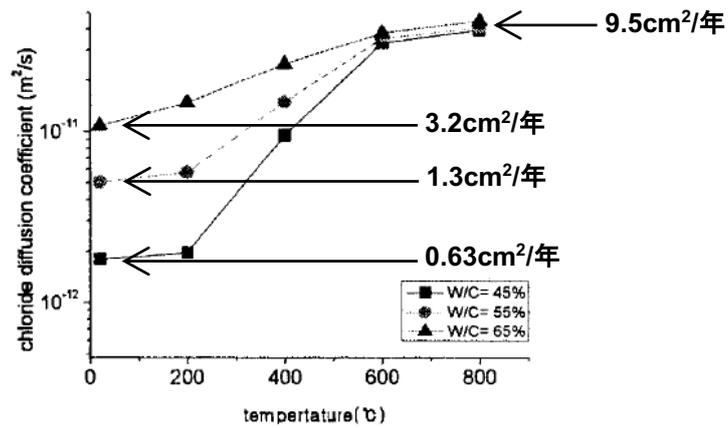


図 2.2.2.9 受熱温度と見掛けの拡散係数の関係¹⁶⁾

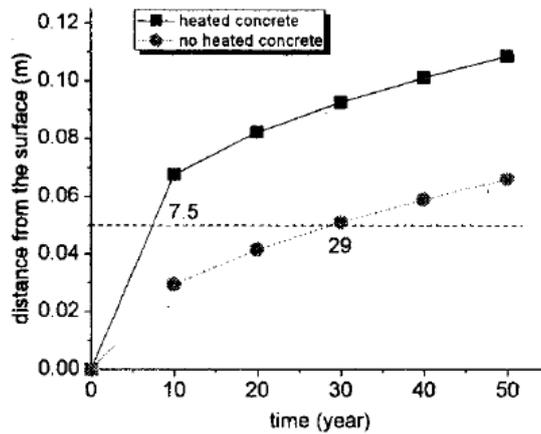


図 2.2.2.10 受熱の有無による腐食発生時期の推定結果¹⁶⁾

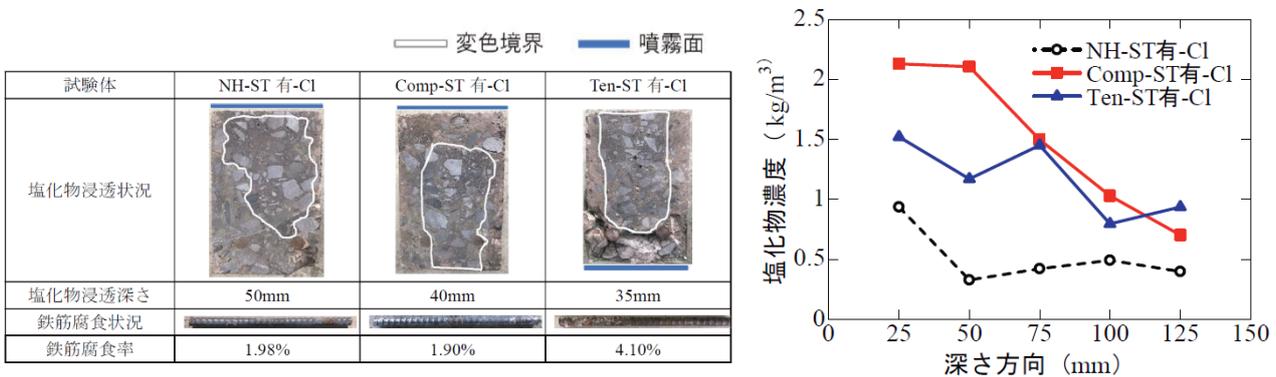


図 2.2.2.11 受熱温度と塩化物イオン濃度分布の関係¹⁷⁾

2.2.3 受熱したコンクリートのその他耐久性に関する文献調査結果

ここでは、受熱したコンクリートの透水性、透気性、凍結融解抵抗性、および硫酸塩劣化抵抗性についての知見を紹介する。なお、受熱したコンクリートのアルカリシリカ反応、硫酸塩劣化以外の化学的な劣化に対する耐久性を評価している文献は国内外ともに見当たらなかった。

(1) 透水性

図 2.2.3.1 に、受熱したコンクリートの透水性にかかわる実験結果を示す。受熱温度が高いほど加熱冷却後の透水係数は大きくなる。また、PP 繊維を混入した場合は、受熱による繊維の熔融により透水係数は大きくなる。

また、海外の文献では、今回の文献調査の範囲において、受熱したコンクリートの透水性について検討している文献は、20 編 [22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 40, 42, 46, 47, 50, 55, 57, 61, 65] であった。透水性や吸水性については、ASTM C642, BS EN12390-8, IS03085, DIN1048 などに則って測定されている。

受熱したコンクリートの透水性について総括すると、以下のとおりである。

- ・受熱したコンクリートの透水係数は、受熱温度が 300℃程度で、受熱前よりも $10^3 \sim 10^4$ 倍程度大きくなる。
- ・受熱したコンクリートを水中養生による再養生を行うと、透水係数は長期的に同程度まで回復することがある。
- ・PP 繊維を混入したコンクリートの受熱後の透水係数は、PP 繊維の熔融により 300℃程度より高温で加熱時に急激に大きくなる。

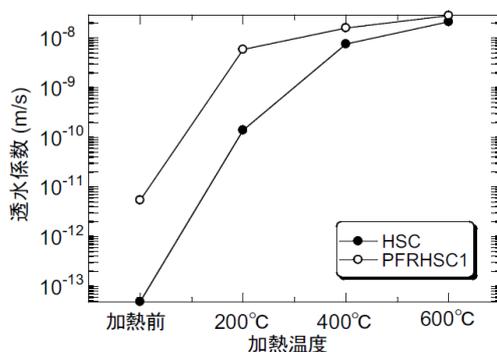


図 2.2.3.1 受熱温度と透水係数の関係¹⁾

(2) 透気性

図 2.2.3.2～図 2.2.3.5 に、受熱したコンクリートの透気性にかかわる実験結果を示す。図 2.2.3.3 によれば、コンクリート表面の透気係数は、非加熱に比べて 200℃で 5 倍程度、300℃で 10 倍程度大きくなった。また、図 2.2.3.4 によれば、コンクリート表面の透気係数は、300℃で 10^3 倍以上増加し、500 度までは一定となった。700℃ではひび割れの影響により測定できなかった。さらに、図 2.2.3.5 によればコンクリート表面の透気係数は、非加熱に比べて 10^5 倍程度大きくなった。

また、海外の文献では、今回の文献調査の範囲において、受熱したコンクリートの透気性について検討している文献は、4 編 [文献 22, 23, 44, 60] であった。透気性については、RILEM-CEMBUREAU 法などに則って

測定されている。

受熱したコンクリートの透気性について総括すると、以下のとおりである。

- 受熱したコンクリートの透気係数は、受熱温度が 300℃程度の場合に、受熱前よりも $10^1 \sim 10^3$ 倍程度大きくなる。特に受熱温度が 500℃を超えると、ひび割れの影響が大きくなる。
- PP 繊維を混入したコンクリートの受熱後の透気係数は、PP 繊維の熔融により 300℃程度より高温で加熱時に急激に大きくなる。

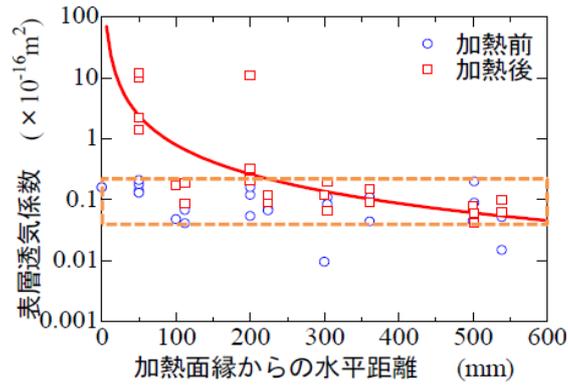


図 2.2.3.2 受熱温度と透気係数の関係³⁾

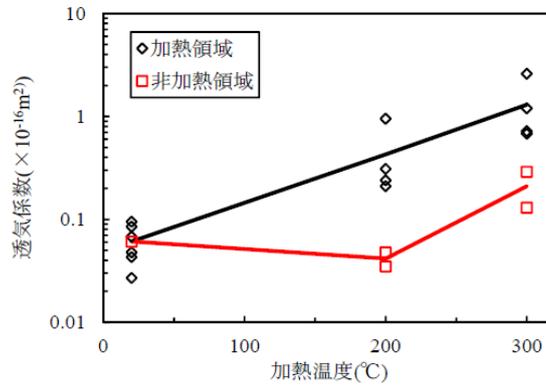


図 2.2.3.3 受熱温度と透気係数の関係⁶⁾

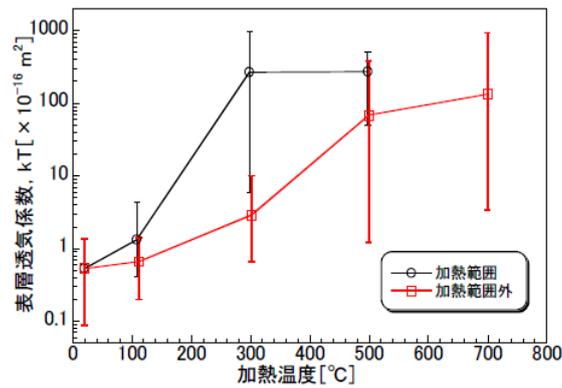


図 2.2.3.4 受熱温度と透気係数の関係¹⁰⁾

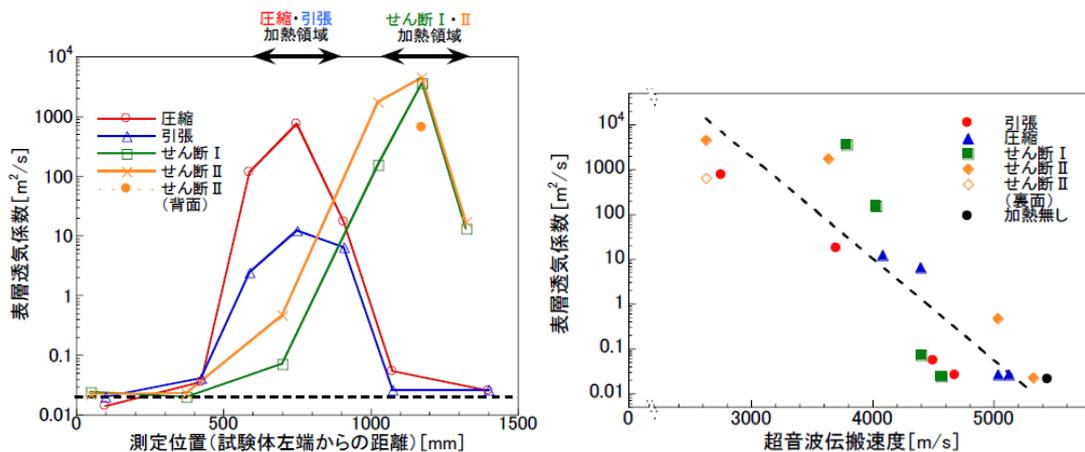


図 2.2.3.5 超音波伝播速度と透気係数の関係¹¹⁾

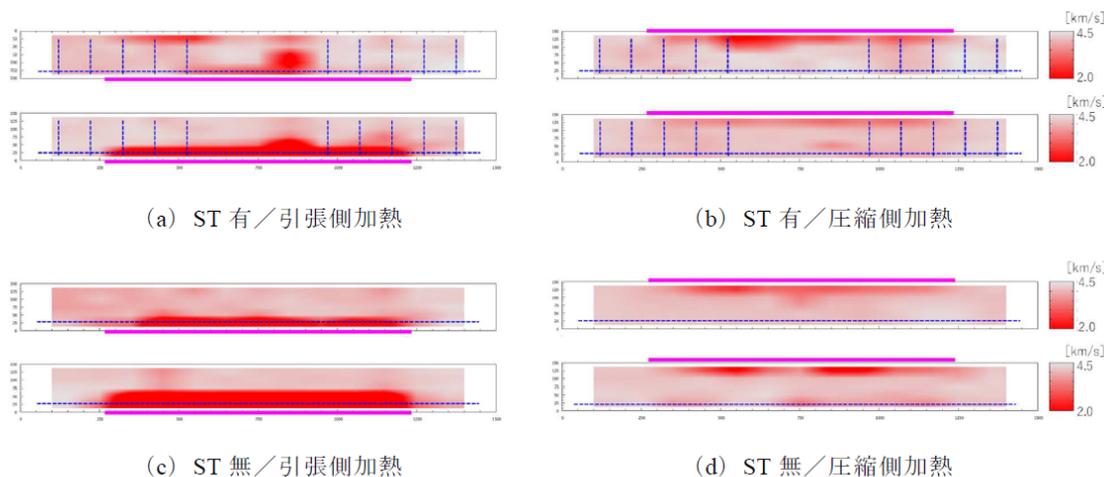
(3)凍結融解抵抗性

図 2.2.3.6, 図 2.2.3.7 に, 受熱したコンクリートの凍結融解抵抗性にかかわる実験結果を示す. これらによれば, ひび割れの多い部分で凍結融解作用を受けていることが示されている.

また, 海外の文献では, 今回の文献調査の範囲において, 受熱したコンクリートの凍結融解抵抗性について検討している文献は, 1 編 [文献 46] であった.

受熱したコンクリートの凍結融解抵抗性について総括すると, 以下のとおりである.

- 300℃程度までの受熱であれば, 凍結融解作用によるスケーリングや強度低下は, 受熱前と大きく変わらず, 影響は比較的小さい. ただし, ひび割れがあると劣化が促進される.
- 高温に受熱したコンクリートを凍結融解した場合は, スケーリングが表面では現れにくい, 内部では劣化していることがある.



図一3 加熱後および凍結融解暴露後の超音波伝播速度分布 (上段: 加熱後, 下段: 凍結融解 70c 後)

図 2.2.3.6 受熱したコンクリートの凍結融解抵抗性¹⁸⁾

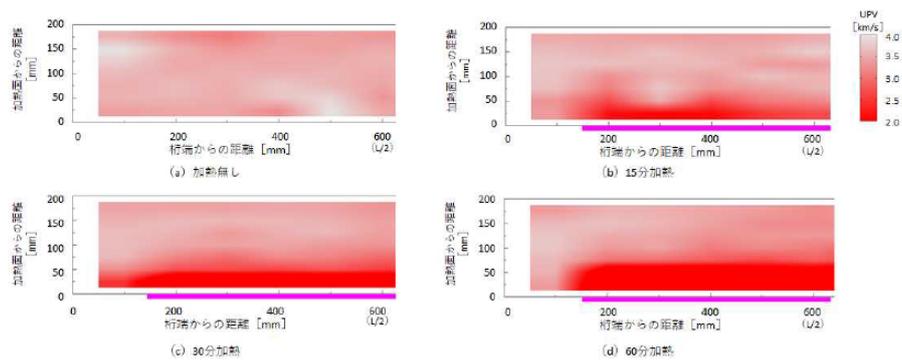


図-2 加熱後の超音波伝搬速度分布

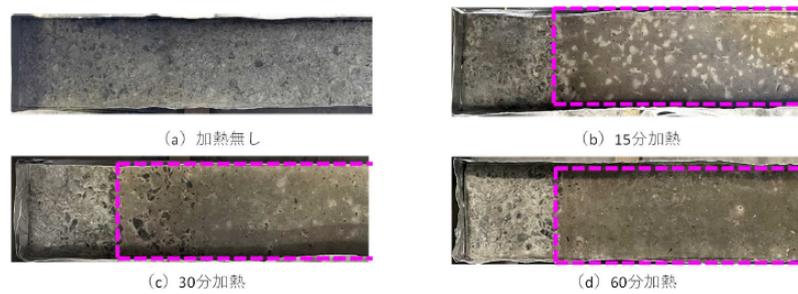


図-3 加熱後に凍結融解作用を受けたRCはりの表面性状

図 2.2.3.7 受熱したコンクリートの凍結融解抵抗性¹⁹⁾

(4) 硫酸塩劣化抵抗性

受熱したコンクリートの硫酸塩劣化を評価している文献は、日本国内では見当たらないが、海外では数件の報告事例が見られた。今回の文献調査の範囲において、受熱したコンクリートの硫酸塩劣化抵抗性について検討している文献は、3編 [文献 20, 29, 31] であった。硫酸塩劣化抵抗性に関しては、受熱したコンクリートを濃度 3% [文献 20] から 5% [文献 29, 31] の硫酸塩溶液中に、28 日間 [29, 31] から 56 日間 [文献 20] 浸漬する方法が採られている。

受熱したコンクリートの硫酸塩劣化抵抗性について総括すると、以下のとおりである。

- ・受熱したコンクリートを硫酸塩水溶液に浸漬した場合、受熱していないコンクリートを硫酸塩水溶液に浸漬した場合よりも強度が低下する。また、より高強度のコンクリートでその影響を受けやすい。

(執筆者：堀口賢一，岩間慧大)

2.3 受熱したコンクリートの耐久性に関する解析検討

本節では、受熱したコンクリートについて、その後に炭酸化の作用を受けた場合、および塩水の作用を受けた場合の影響を解析により定量的に評価した結果を示す。

2.3.1 受熱したコンクリートの中性化抵抗性に関する解析検討

表 2.3.1.1, 表 2.3.1.2 に受熱したコンクリートに及ぼす中性化の影響に関する解析結果を示す。解析の条件は以下の通りである。ここでは、加熱を受けたコンクリートの中性化抵抗性について、一般的な材料を用いた高強度 (W/C35%), および普通強度 (W/C50%) のコンクリートの受熱後の中性化深さを解析的に検討した。なお、解析には DuCOM を用いた。数値解析システムの詳細についてはここでは割愛する ([文献 68, 69, 70] を参照されたい)。

コンクリートの水セメント比 : 35, 50%

セメントの種類 : 普通ポルトランドセメント

養生条件 : 20°C 封緘で 28 日間

加熱速度 : 2°C/分

加熱温度 : 200, 400, 600°C

加熱温度保持時間 : 3 時間

降温速度 : 2°C/分

加熱後養生条件 : 20°C 気中, 20°C 水中で 30 日間

促進中性化条件 : 室温 20°C, 湿度 60%, 二酸化炭素濃度 10%

中性化深さの算定材齢 : 2, 5, 10, 30, 60, 100, 180 日

表 2.3.1.1 に水セメント比 35% のコンクリートにおける解析結果を示す。加熱温度が高くなるほど、中性化深さおよび中性化速度が大きくなる。特に、600°C 加熱時の結果を見ると、暴露開始から 60 日後には、ほとんど試験体の最深部 10cm まで中性化が進んでおり、中性化抵抗性が著しく低下することになる。これは、400°C を超えたあたりから水酸化カルシウムの脱水反応が進むことや、微細なひび割れが成長することの影響と考えられる。さらに、水中で 30 日間の再養生を行った場合では、その効果が大きいことが分かる。200°C 加熱時の再養生後には、加熱なしのケースと同程度まで中性化抵抗性が回復している。また、400°C と 600°C 加熱時の再養生後についても、中性化深さが受熱直後のケースの半分程度まで減少しており、中性化抵抗性が回復していることが確認できる。これは、分解したセメント水和物が再養生により再水和したことや、未水和のセメントの水和が進んだことにより、細孔構造が緻密化した効果と考えられる。

表 2.3.1.2 に水セメント比 50% のコンクリートにおける解析結果を示す。水セメント比 35% の場合と同様に、加熱温度が高くなるほど、中性化深さおよび中性化速度が大きくなる。特に、600°C 加熱時に中性化抵抗性が著しく低下することは、水セメント比 35% のケースと同様である。また、水セメント比 35% の場合と比較すると、全ての温度ケースで中性化深さおよび中性化速度が大きくなる。水中での再養生の効果も見られるが、水セメント比 35% の場合ほどは、再養生の効果が表れていない。これは、水セメント比 50% の場合では、水セメント比 35% の場合と比べ、未水和のセメントが少ないことがひとつの要因と考えられる。

表 2.3.1.1 受熱したコンクリートに及ぼす中性化の影響に関する解析結果

(W/C=35%, 促進中性化 : 室温 20°C, 湿度 60%, 二酸化炭素濃度 10%)

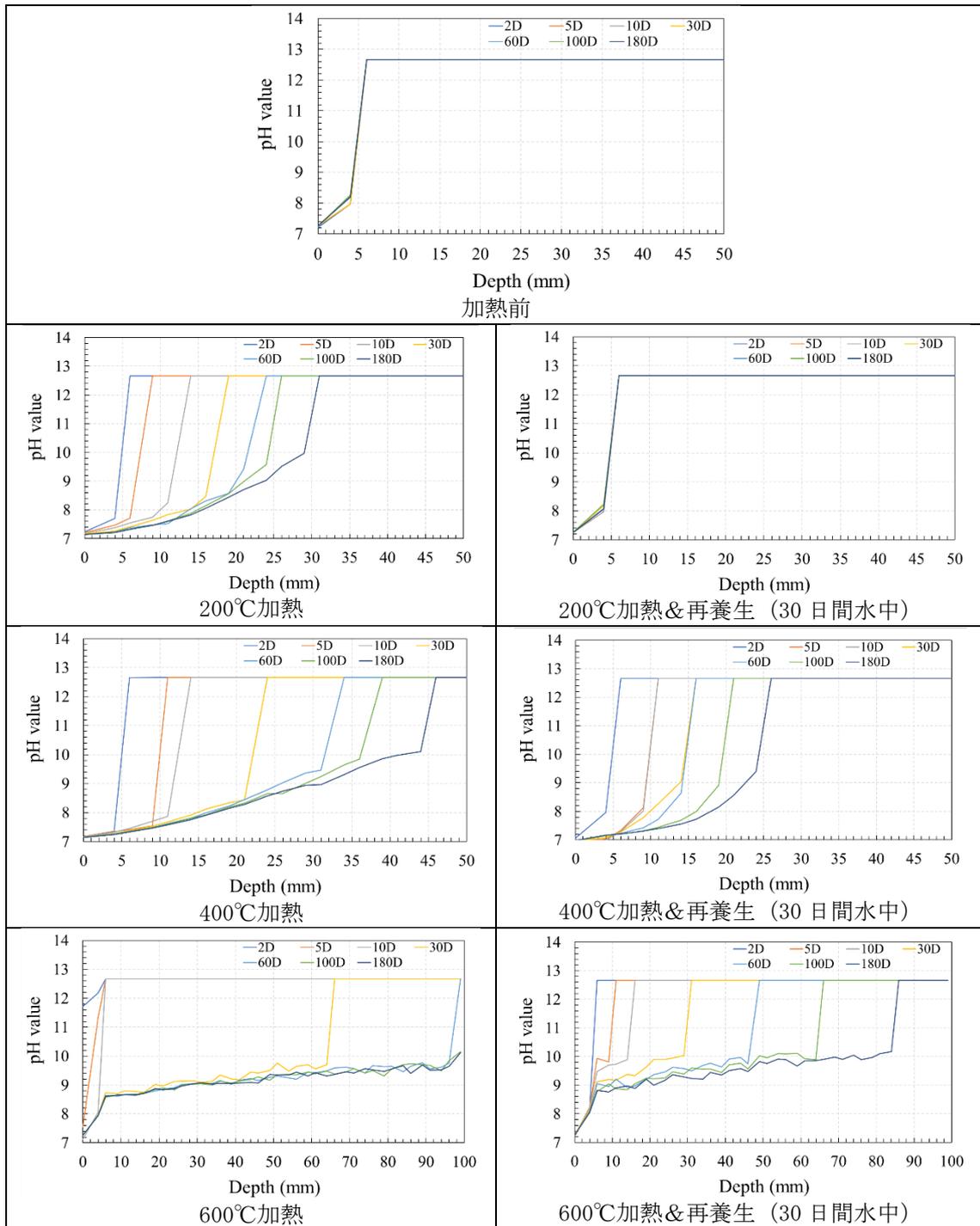
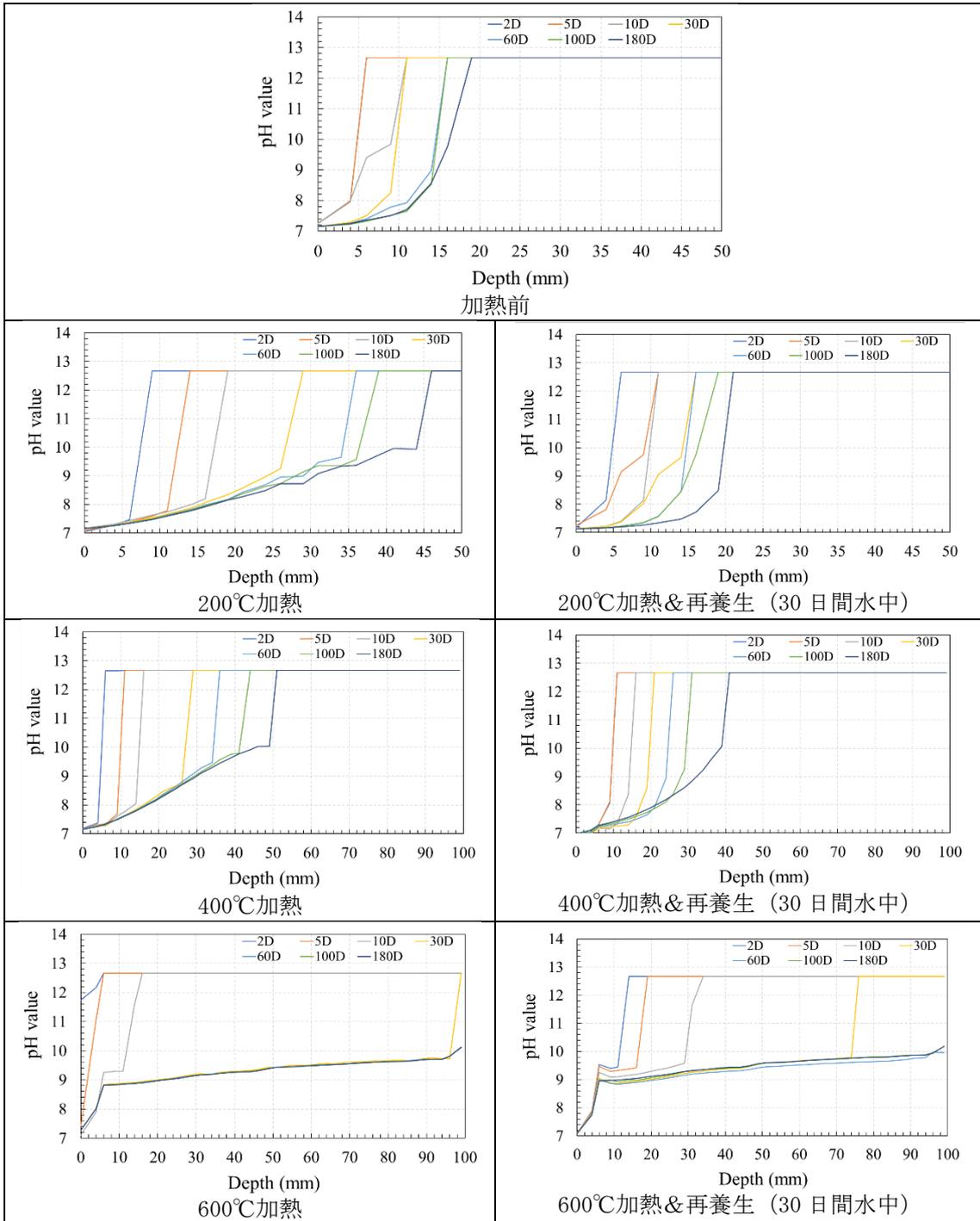


表 2.3.1.2 受熱したコンクリートに及ぼす中性化の影響に関する解析結果
 (W/C=50%, 促進中性化 : 室温 20°C, 湿度 60%, 二酸化炭素濃度 10%)



2.3.2 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する解析検討

表 2.3.2.1, 表 2.3.2.2 に受熱したコンクリートに及ぼす塩分浸透の影響に関する解析結果を示す。解析の条件は以下の通りである。ここでは、加熱を受けたコンクリートの塩分浸透抵抗性について、一般的な材料を用いた高強度 (W/C35%), および普通強度 (W/C50%) のコンクリートの受熱後の塩分浸透深さを解析的に検討した。

コンクリートの水セメント比 : 35, 50%
セメントの種類 : 普通ポルトランドセメント
養生条件 : 20°C封緘で 28 日間
加熱速度 : 2°C/分
加熱温度 : 200, 400, 600°C
加熱温度保持時間 : 3 時間
降温速度 : 2°C/分
加熱後養生条件 : 20°C気中, 20°C水中で 30 日間
塩水浸漬条件 : 室温 20°C, 塩水濃度 10%
中性化深さの算定材齢 : 2, 5, 10, 30, 60, 100, 180 日

表 2.3.2.1 に水セメント比 35%のコンクリートにおける解析結果を示す。加熱温度が高くなるほど、塩分浸透深さおよび塩分浸透速度が大きくなる。これは、中性化抵抗性と同様の傾向である。しかしながら、中性化抵抗性の場合、特に、600°C加熱時での低下が著しかったが、塩分浸透抵抗性の場合には、それほど著しい変化は見られない。これは、主に気体の状態で侵入する二酸化炭素と水に溶解して浸透する塩分との挙動の違い、すなわち、透気と透水の特性の違いに起因しているものと思われる。さらに、水中で 30 日間の再養生を行った場合は、わずかな違いは見られるものの、その効果は大きくない。

表 2.3.2.2 に水セメント比 50%のコンクリートにおける解析結果を示す。水セメント比 35%の場合と同様の結果であった。加熱温度が高くなるほど、塩分浸透深さおよび塩分浸透速度が大きくなるが、再養生の効果は大きくない。

水セメント比 35%, 50%のいずれの場合も、200°C加熱時の再養生後には、塩分浸透深さおよび塩分浸透量は、再養生しない場合よりもやや小さくなるが、400°Cと 600°C加熱時の再養生後では、180 日後の塩分浸透深さはやや増大している。これは、高温での微細なひび割れの発生やセメント水和物の分解の影響がひとつの要因と考えられるが、再養生した場合の塩分浸透深さがより深くなる理由は明確ではない。

表 2.3.2.1 受熱したコンクリートに及ぼす塩分浸透の影響に関する解析結果
(W/C=35%, 浸漬: 室温 20°C、10%塩化ナトリウム水溶液)

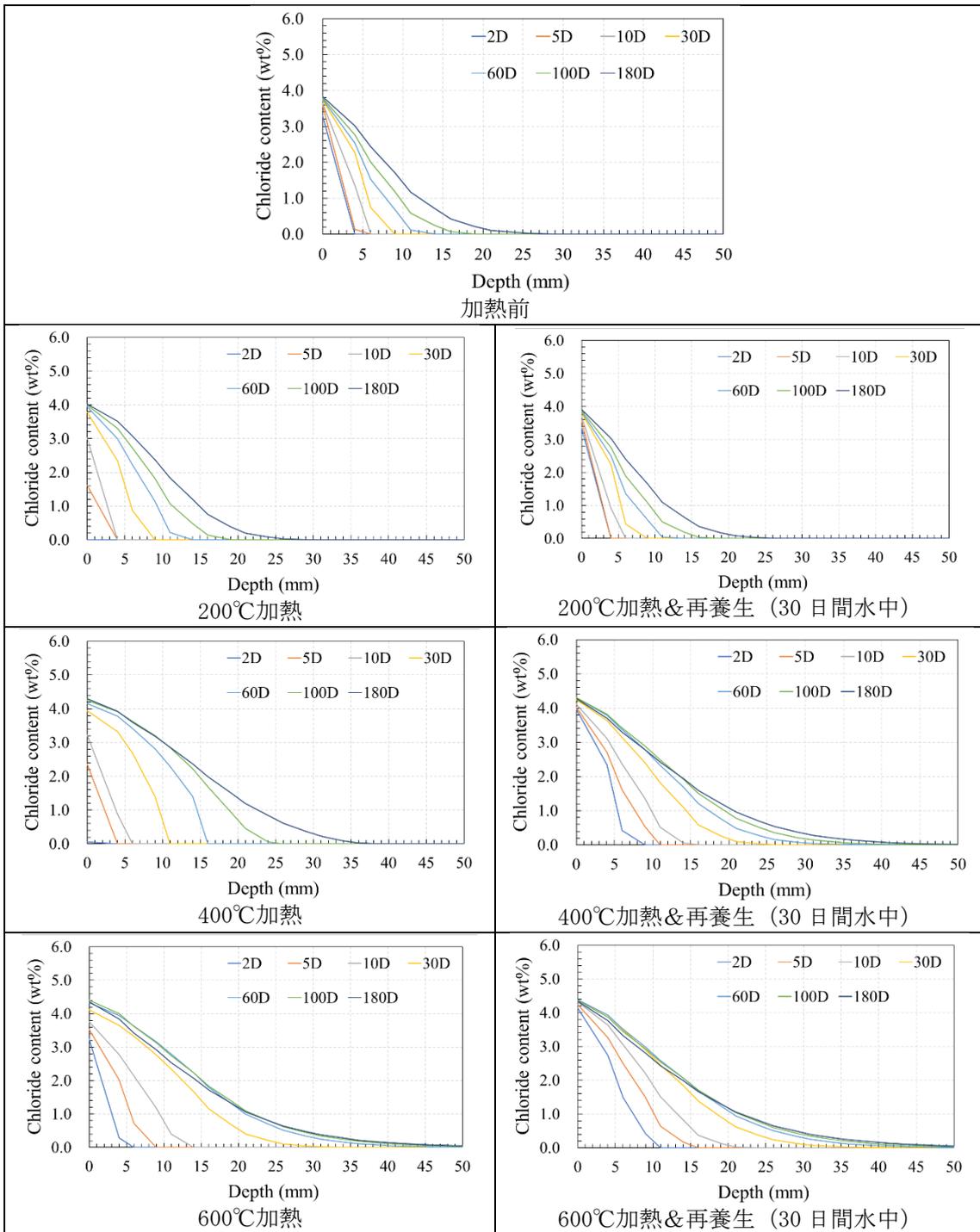
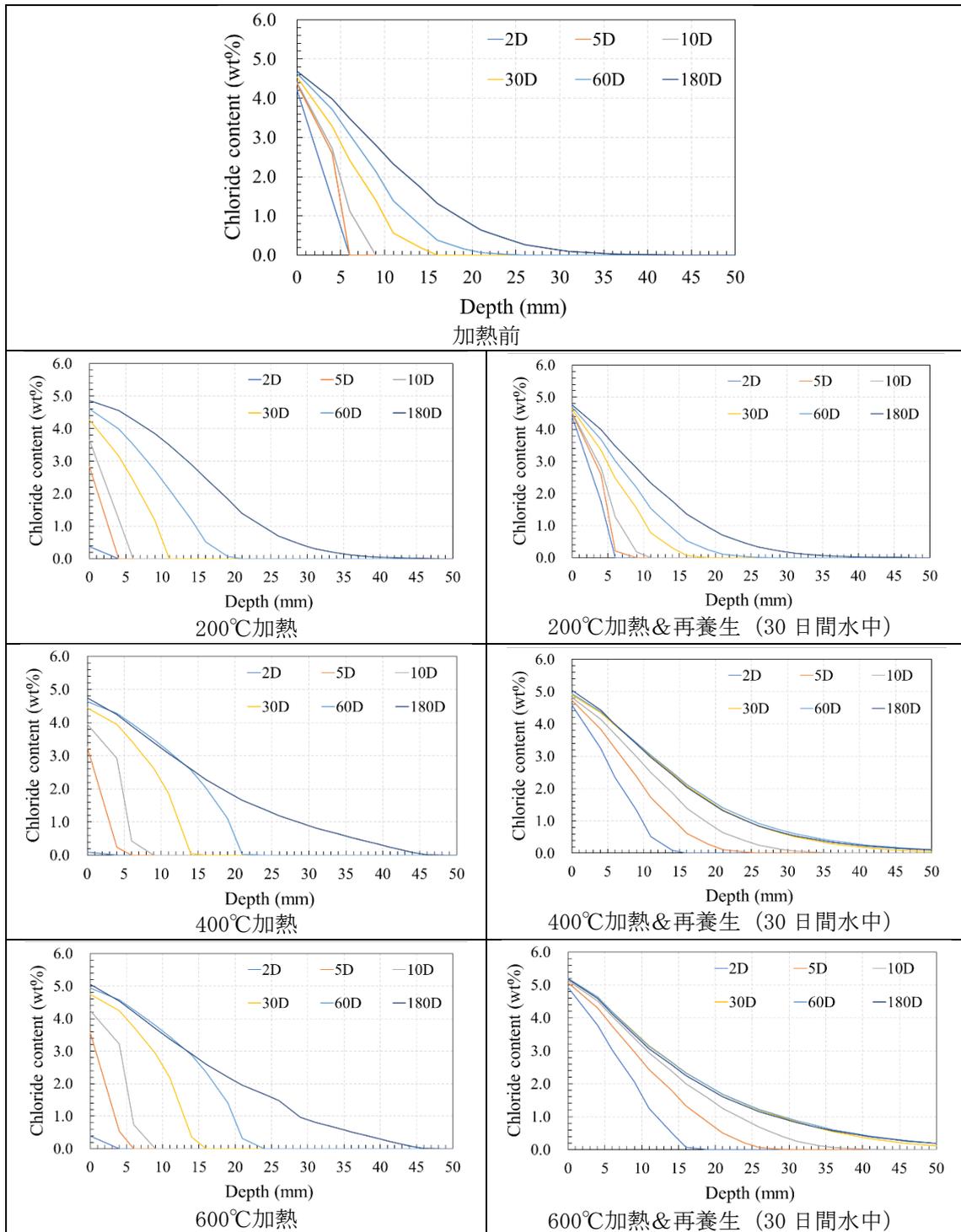


表 2.3.2.2 受熱したコンクリートに及ぼす塩分浸透の影響に関する解析結果
(W/C=50%, 浸漬: 室温 20°C、10%塩化ナトリウム水溶液)



(執筆: 岩間慧大)

2.4 受熱したコンクリートの耐久性の定量評価にかかわる考察

本節では、受熱したコンクリートの耐久性のうち、中性化抵抗性と塩分浸透抵抗性の定量的な評価方法について、上記の既往の文献や解析の結果に基づいた考察を示す。

2.4.1 受熱したコンクリートの中性化抵抗性の定量評価にかかわる考察

式 2.4.1.1 に受熱したコンクリートの中性化深さの予測式（案）を示す。ここでは、受熱したコンクリートの中性化深さは、一般的な気中環境下でのコンクリートの中性化深さと同様に、加熱冷却後の中性化期間 t の平方と受熱後の中性化速度係数 b の積で表されるものと考えた。

$$y = b \sqrt{t} \quad \text{式 2.4.1.1}$$

ここに、

y : 受熱したコンクリートの中性化深さ (mm)

t : 受熱したコンクリートの加熱冷却後の中性化期間 (年)

b : 受熱したコンクリートの中性化速度係数 (mm/√年)

なお、受熱したコンクリートの中性化速度係数 b は、上記の既往の文献や解析の結果に基づき、式 2.4.1.2 に示す通り、受熱したコンクリート最高受熱温度や温度上昇速度、最高受熱温度の保持時間などに関わる係数 γ_1 と、受熱冷却後の再養生、すなわち気中養生や水中養生に関わる係数 γ_2 、ならびに、ひび割れの影響や骨材種類などに関わる係数 γ_3 と、常温環境下での中性化速度係数の予測値 b_0 との積で表されるものと考えた。

$$b = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 b_0 \quad \text{式 2.4.1.2}$$

ここに、

γ_1 : 最高受熱温度や温度上昇速度、最高受熱温度の保持時間などに関する係数

γ_2 : 受熱冷却後の再養生（気中、水中）に関する係数

γ_3 : ひび割れの影響、骨材種類などに関する係数

b_0 : 常温環境下での中性化速度係数の予測値 (mm/√年) = $-3.57 + 9.0W/B$

最終的には、ここに示した γ_1 、 γ_2 、 γ_3 のおのおのを定式化できることが望まれるが、本書での既往の文献調査や解析の範囲では、これらを定式化するまでの十分な知見は得られなかったため、今後のデータや知見の積み重ねに期待したい。

2.4.2 受熱したコンクリートの塩分浸透抵抗性の定量評価にかかわる考察

式2.4.2.1に受熱したコンクリート中の塩化物イオン濃度の予測式(案)を示す。ここでは、受熱したコンクリート中での塩化物イオン濃度は、一般的な気中環境下でのコンクリート中での塩化物イオン濃度と同様に、拡散現象に基づくものと考えた。

$$C(x, t) = C_0 (1 - \operatorname{erf}(x/2\sqrt{D_{ap} \cdot t})) \quad \text{式2.4.2.1}$$

ここに、

$C(x, t)$: 深さ x (cm), 加熱冷却後の期間 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 受熱したコンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D_{ap} : 受熱したコンクリートの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

なお、受熱したコンクリートの見掛けの拡散係数 D_{ap} は、上記の既往の文献や解析の結果に基づき、式2.4.2.2に示す通り、受熱したコンクリート最高受熱温度や温度上昇速度、最高受熱温度の保持時間などに関わる係数 γ_1 と、受熱冷却後の再養生、すなわち気中養生や水中養生に関わる係数 γ_2 、ならびに、ひび割れの影響や骨材種類などに関わる係数 γ_3 と、常温環境下での見掛けの拡散係数 D_{ap0} との積で表されるものと考えた。

$$D_{ap} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 D_{ap0} \quad \text{式2.4.2.2}$$

ここに、

γ_1 : 最高受熱温度や温度上昇速度、最高受熱温度の保持時間などに関する係数

γ_2 : 受熱冷却後の再養生(気中、水中)に関する係数

γ_3 : ひび割れの影響、骨材種類などに関する係数

D_{ap0} : 常温環境下での見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

最終的には、ここに示した γ_1 , γ_2 , γ_3 のおのおのを定式化できることが望まれるが、本書での既往の文献調査や解析の範囲では、これらを定式化するまでの十分な知見は得られなかったため、今後のデータや知見の積み重ねに期待したい。

(執筆者：堀口賢一)

2.5 2 章のまとめ

本章では、高温加熱を受けたコンクリートと鉄筋の耐久性について既往の文献を調査し、得られた知見を整理した。また、受熱したコンクリートの中性化抵抗性と塩分浸透抵抗性について解析的な検討を行い、600℃までの受熱したあとのコンクリートの耐久性について評価した。

受熱したコンクリートの耐久性は、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性、透気性、透水性、凍結融解抵抗性、および硫酸塩劣化抵抗性について、実験結果に基づく知見が文献に示されている。これらの知見と、中性化抵抗性と塩分浸透抵抗性にかかわる解析的な検討の結果によると、受熱したコンクリートの耐久性は以下のように総括される。

- ・文献調査の結果、 CaCO_3 （炭酸カルシウム）やC-S-H（セメント水和物）が分解するとされる600～800℃程度を最高温度とし、その後の各種耐久性を評価している事例が多い。また、トンネル火災を想定したRABT加熱で、最高温度を1200℃としてその後の耐久性を評価している事例も散見される。
- ・受熱温度が300℃程度までであれば、耐久性に及ぼす影響は大きくない。一方、400℃程度を超えると微細なひび割れの進展によると思われる耐久性に及ぼす影響が大きくなる。さらに、600℃程度を超えるとひび割れの進展およびセメント水和物の分解によると思われる耐久性に及ぼす影響が顕著になる。
- ・受熱したコンクリートを湿潤状態で再養生すると、受熱温度が300℃程度までであれば、受熱していないコンクリートと同程度に耐久性は回復する場合がある。一方、受熱温度が400℃程度を超えると、未水和セメントの水和によると思われる効果により、耐久性はある程度回復する。しかしながら、受熱温度が600℃程度を超えると、分解したセメント水和物の再水和は生じるが、受熱していないコンクリートの耐久性までは回復しない。
- ・加熱後に水で急冷するとひび割れが進展するため、気中で徐冷した場合よりもその後の耐久性は低下する傾向を示す。

（執筆者：堀口賢一）

参考文献

- [1] 高野智宏, 堀口敬, 佐伯昇; 高温加熱を受ける高強度繊維補強コンクリートの耐火性能について, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.424-436, 2007.7
- [2] 清宮理, 安本辰也, 本田陵二, 篠田佳男; トンネル内車両火災によるコンクリートの火害と劣化診断, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1129-1134, 2013
- [3] 赤坂春風, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 鉄羅健太; 火害を受けたコンクリートの透気性による損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1069-1074, 2017
- [4] 岩本早耶香, 迫井裕樹, 小澤満津雄, 川邊清伸; 火害を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.820-825, 2014
- [5] 鉄羅健太, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 藤本謙太郎; 火害損傷を受けたコンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数による耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1293-1298, 2016
- [6] 若林瑠美, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 川邊清伸; 火災損傷を受けた普通コンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1003-1008, 2015
- [7] 向井佑真, 小澤満津雄, 谷辺徹, 小林孝一; 火災劣化後のコンクリートの物質移動抵抗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.1147-1152, 2013
- [8] 清宮理, 安本辰也; 車両火災によるコンクリート板の損傷に関する耐火試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1150-1155, 2012
- [9] 伊澤政広, 清宮理; 長時間車両火災によるトンネル構造部材の損傷に関する耐火試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1129-1134, 2017
- [10] 春畑仁一, 迫井裕樹, 内田慎哉, 池田憲一; 表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法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.1075-1080, 2017
- [11] 迫井裕樹, 小澤満津雄, 山本哲, 阿久津裕亮; 高温加熱を受けた RC はりの損傷評価および耐荷力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1025-1030, 2019
- [12] 田嶋仁志, 岸田政彦, 神田亨; 耐火試験後の RC セグメントの中性化及び補修性に関する実験研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.833-834, 2005.9
- [13] 塚越俊, 小澤満津雄; 各種耐火工を用いたコンクリートの火害後の物質侵入抵抗性, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.57-58, 2014.9
- [14] 坂本摂, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 石塚遼, 谷辺徹, 六郷恵哲; 高温履歴を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性に関する研究, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.61-62, 2014.9
- [15] 李柱国, 李慶濤; 高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 666, pp. 1375-1382
- [16] 朴幸弘, 呉相均, 長谷川拓哉, 千歩修; 高温に曝されたコンクリートの塩化物イオン移動抵抗性と寿命予測, 日本建築学会学術講演概要集, pp. 149-150, 2009.9
- [17] 高橋 一彩, 富士田 玲, 小澤 満津雄; 高温作用と塩水作用を受けた鉄筋コンクリート部材の耐力と耐久性評価, 第 23 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.169-171, Vol.23, 2023
- [18] 迫井 裕樹, 澤田 遼和, 小澤 満津雄, 高橋 一紗; 加熱と凍結融解作用を受けた RC の損傷分布と耐荷性能, 土木学会第 78 回年次学術講演会, V-682, 2023

- [19] 迫井 裕樹, 澤田 遼和, 小澤満津雄 ; 加熱を受けた RC はりの損傷分布と加熱後の凍結融解作用による表層劣化, 土木学会第 79 回年次学術講演会, 2024
- [20] S.S. Asgedom and B.B. Mitikie ; Effect of elevated temperature on microstructural and durability properties of high-strength concrete-containing eggshell, *Advances in Civil Engineering*, 2024.
- [21] M. Feng, M. Li, H. Qu, D. Tian, M. Lu, T. Gui and G. Li ; Degradation mechanism and evaluation of the carbonation resistance of concrete after high-temperature exposure, *Structures*, 2023.
- [22] H. Kharrazi, B. Ahmadi, M. Shekarchi and N. Farhoudi ; A comprehensive study of the effects of re-curing on macro- and microstructure of zeolite incorporating concretes after exposure to high temperature, *Materials and Structures*, 2023.
- [23] B. Fernandes, M. Khodeir, C. Perlot, H. Carre', J.C. Mindeguia and C.L. Borderie ; Durability of concrete made with recycled concrete aggregates after exposure to elevated temperatures, *Materials and Structures*, 2023.
- [24] H. Singh, A.K. Tiwary and S. Singh ; Experimental investigation on the performance of ground granulated blast furnace slag and nano-silica blended concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 2023.
- [25] B. Kanagaraj, N. Anand, K.A. Cashell and A.D. Andrushia ; Post-fire behaviors of concrete containing nano-materials as a cement replacement material, *Case Studies in Construction Materials*, 2023.
- [26] Q. Li, H. Li and T. Liang ; Effect of non-intumescent fireproof coating on the durability of concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 2023.
- [27] K. Ashwini and P.R. Srinivasa ; Effect of elevated temperature on strength and durability properties of concrete using nano-silica and alccofine, *Research on Engineering Structures and Materials*, 2021.
- [28] A.V. Monteiro and M. Vieira ; Effect of elevated temperatures on the residual durability related performance of concrete, *Materials and Structures*, 2021.
- [29] M.E. Mathews, T. Kiran, V.C.H. Naidu G. Jeyakumar and N. Anand ; Effect of high-temperature on the mechanical and durability behaviors of concrete, *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [30] L. Lu, F. Han, S. Wu, Y. Qin, G. Yuan and J.H. Doh ; Experimental study on durability of basalt fiber concrete after elevated temperature, *Structural Concrete*, 2021.
- [31] T. Kiran, M.E. Mathews, N. Anand, U.J. Alengaram and A.D. Andrushia ; Influence of mineral admixtures on the residual mechanical properties and durability characteristics of self-compacting concrete subjected to high temperature, *Australian Journal of Civil Engineering*, 2021.
- [32] F. Koksall, E.T. Kocabeyoglu, O. Gencel and A. Benli ; The effects of high temperature and cooling regimes on the mechanical and durability properties of basalt fiber reinforced mortars with silica fume, *Cement and Concrete Composites*, 2021.
- [33] G.H. Nalon, J.C.L. Ribeiro, L.G. Pedroti, E.N.D. Araújo, J.M.F. Carvalho, G.E.S. Lima and L.M. Guimaraes ; Residual piezoresistive properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 2021.
- [34] M.A. Moghadam and R.A. Izadifard ; Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures, *Fire Safety Journal*, 2020.
- [35] D. Zhang, Q. Yang, M. Mao and J. Li ; Carbonation performance of concrete with fly ash as fine aggregate after stress damage and high temperature exposure, *Construction and Building Materials*, 2020.
- [36] S. Gupta, K.H. Wei and P.S. Dai ; Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 2020.
- [37] K.B.S. Reddy, J.S.R. Prasad and V. Malagavelli ; Durability and physical properties of glass fiber reinforced concrete subjected to elevated temperatures, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019.

- [38] J.A. Oliveira, J.C.L. Ribeiro, L.G. Pedroti, C.S. Faria, G.H. Nalon and A.L.O. Júnior ; Durability of concrete after fire through accelerated carbonation tests, *Materials Research*, 2019.
- [39] T. Daungwailailuk, T. Kitagawa, Y. Ogawa and K. Kawai ; Carbonation and chloride penetration into concrete after high temperature exposure, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 2018.
- [40] T. Gupta, S. Siddique, R.K. Sharma and S. Chaudhary ; Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber, *Construction and Building Materials*, 2017.
- [41] W. Wang, C. Lu, Y. Li, G. Yuan and Q. Li ; Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete, *Construction and Building Materials*, 2017.
- [42] O. Karahan ; Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature, *Construction and Building Materials*, 2017.
- [43] M. Ozawa, Y. Sakoi, K. Fujimoto, K. Tetsura and S.S. Parajuli ; Estimation of chloride diffusion coefficients of high-strength concrete with synthetic fibres after fire exposure, *Construction and Building Materials*, 2017.
- [44] Y. Pei, F. Agostin and F. Skoczylas ; Rehydration on heat-treated cementitious materials up to 700°C-coupled transport properties characterization, *Construction and Building Materials*, 2017.
- [45] K. Tetsura, M. Ozawa, K. Fujimoto, Y. Sakoi and S.S. Parajuli ; Estimation of chloride diffusion coefficients of high-strength concrete with synthetic fibers after fire exposure, *The 2016 Structures Congress (Structures16) 2016*.
- [46] W.J. Rek, T. Drzymala, A. Kus and M. Tomaszewski ; Durability of high performance concrete (HPC) subjected to fire temperature impact, *Archives of Civil Engineering*, 2016.
- [47] J. Albrektsson ; Durability of fire exposed concrete, *Licentiate Thesis in Civil and Architectural Engineering*, 2015.
- [48] G. Yuan and Q. Li ; The use of surface coating in enhancing the mechanical properties and durability of concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 2015.
- [49] Q. Li, G. Yuan and Q. Shu ; Effects of heating/cooling on recovery of strength and carbonation resistance of fire-damaged concrete, *Magazine of Concrete Research*, 2014.
- [50] A. Nadeem, S.A. Memonb and T.Y. Lo ; The performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 2014.
- [51] Q. Li, Z. Li, G. Yuan and Q. Shu ; The effect of a proprietary inorganic coating on compressive strength and carbonation depth of simulated fire-damaged concrete, *Magazine of Concrete Research*, 2013.
- [52] A. Nadeem, S.A. Memonb and T.Y. Lo ; Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin mortar at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 2013.
- [53] Q. Li, Z. Li and G. Yuan ; Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material, *Construction and Building Materials*, 2012.
- [54] N. Pathak and R. Siddique ; Effects of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand, *Construction and Building Materials*, 2012.
- [55] T.C. Ling, C.S. Poon, S.C. Kou ; Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 2012.
- [56] N. Pathak and R. Siddique ; Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 2012.
- [57] T. Horiguchi and S.L. Suhaendi ; Recovery behavior of hybrid fiber reinforced high strength concrete after fire exposure, *Journal of Structural Fire Engineering*, 2010.

- [58] Q. Li and Z. Li ; Repair of fire-damaged concrete: Improvement of carbonation resistance, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010.
- [59] Q. Li and Z. Li ; Investigation on the carbonation resistance and recovery of the concrete exposed high temperature, Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2009.
- [60] A.N. Noumowe, R. Siddique and G. Debicki ; Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C), Construction and Building Materials, 2009.
- [61] X. Yan, H. Li and Y.L. Wong ; Assessment and repair of fire-damaged high-strength concrete: Strength and durability, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007.
- [62] W.L. Jin and Y. Zhang ; Fire's effect on chloride ingress related durability of concrete structure, Journal of Zhejiang University Science A, 2007.
- [63] K.M.A. Hossain ; Macro- and microstructural investigations on strength and durability of pumice concrete at high temperature, Journal of Materials in Civil Engineering, 2006.
- [64] C.S. Poon, S. Azhar, M. Anson and Y.L. Wong ; Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures, Cement and Concrete Composites, 2003.
- [65] M.C.R. Farage, J. Sercombe and C. Galle ; Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300°C, Cement and Concrete Research, 2003.
- [66] C.S. Poon, S. Azhar, M. Anson and Y.L. Wong ; Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, Cement and Concrete Research, 2001.
- [67] C.S. Poon, S. Azhar, M. Anson and Y.L. Wong ; Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, Cement and Concrete Research, 2001.
- [68] K. Iwama, K. Higuchi, K. Maekawa ; Thermo-mechanistic multi-scale modeling of structural concrete at high temperature, Journal of Advanced Concrete Technology, 2020.
- [69] K. Iwama, K. Maekawa ; Modeling of carbonation, de-carbonation and re-carbonation processes of structural concrete subjected to high temperature heating, Cement and Concrete Composites, 2022.
- [70] K. Iwama, K. Maekawa ; Redox reaction models for carbonation of hardened cement under elevated temperature up to 1000°C, Cement and Concrete Composites, 2024.

3. 高温加熱を受けたコンクリート部材の損傷評価技術

3.1 はじめに

コンクリートは、火災などの高温加熱を受けた場合、表面の変色やひび割れ・爆裂、化学的変質が生じることはよく知られている。また構造物（部材）を考えると、それら高温加熱に伴い生じる内部ひび割れや断面欠損により、内部鉄筋・PC鋼材の付着・定着が損なわれ、部材としての力学的特性が変化することが考えられる。さらに、火災などの高温加熱を受けたものの、目視評価などにより、損傷が軽微である（あるいは深刻な損傷を生じていない）と判断される場合には、即時の補修・補強などが実施されず、継続して使用することなどが考えられるが、その際にも、高温加熱の影響により硬化体・部材としての耐久性が低下していることが懸念される。

RC、PCを含むコンクリート構造物、特に土木系構造物が火災などの高温加熱を受けることを想定した場合、トンネル内のような閉空間を除き、多くの場合が開放空間であるため、高温加熱が部材全体にわたり作用するケースは少ないことが想定される。つまり、熱源からの距離に応じて、熱源からの平面方向および受熱面からの深さ方向に受熱温度の分布が生じ、これに伴い、コンクリート表面・内部に生じる各種損傷・変状もまた、熱源からの平面方向・深さ方向への分布が生じるものと考えられる。

コンクリートが火災など高温加熱を受けた場合の受熱温度、生じる損傷・変状を評価するための方法・技術は多岐にわたり、これまでも関係各所で鋭意検討が行われているものの、前述のような熱源からの距離に伴う損傷の平面方向・深さ方向の分布や損傷の程度、さらには、それら損傷の分布が部材の力学的特性やその後の耐久性に及ぼす影響については、未だ不明な点が多いのが現状である。

部材において、熱源からの平面方向および受熱面からの深さ方向に対する損傷の程度とその分布を把握することは、補修・補強の有無の判断のみならず、その適用範囲を適切に評価・判断するために必要不可欠であると考えられる。さらに、即時の補修・補強を要せず継続して使用した場合、加熱に伴う損傷の程度・範囲が部材の力学的特性およびその後の耐久性に及ぼす影響を検討することは、将来的な維持管理に関する計画・立案において非常に重要な項目の一つになり得るものと考えられる。

上述の背景を踏まえ本章では、火災など高温加熱を受けたコンクリートの基礎的特性に関する知見を改めて整理するとともに、高温加熱による損傷の範囲・程度の熱源からの平面方向および受熱面からの深さ方向への分布に関する技術・知見について整理・取りまとめを行った。さらに、高温加熱を受けた後のRC・PC部材の力学的特性・耐久性に関する検討の現状について、整理・取りまとめを行った。

(執筆者：迫井 裕樹)

3.2 高温加熱を受けたコンクリートの基礎的特性変化

3.2.1 表面の受熱温度の推定

コンクリートが高温環境下に曝された場合、コンクリート表面に生じる代表的な損傷例として、コンクリート表面のひび割れ、コンクリートの欠損（浮きやはく離、爆裂）、コンクリート表面の変色などがある。コンクリート構造物が火災など高温加熱を受けた場合、コンクリート表面の状態からおおまかな受熱温度の推定を行うことで損傷の範囲や程度を概略的に判断することができ、その後に必要な調査・診断を進めて行くための一つの指標とすることができる。また、火災によりコンクリート表面に付着した煤によっても概略的な判断を行える。一般的に言われているコンクリート表面の変色状況と温度の関係を図 3.2.1.1 に示す。

コンクリートは受熱温度が 300℃を超えると変色し始め、300℃でピンク色、600℃で灰白色、950℃で淡い黄色に変色し、1200℃を超えると熔融する。一方、煤は 300℃を超える温度で加熱されると焼失し始め、500℃程度で完全に焼失する。これらの性質を利用し、コンクリート表面の受熱温度を概略的に判断することができる。しかし、煤の付着状況による判断については、消火活動時の放水により洗い流される可能性や消火による温度降下時にも煤が生じてコンクリート表面に付着する可能性があるため、煤の付着の有無以外にも、火災の進展状況や周囲の火害の状況等も踏まえて判断する必要がある。

受熱温度 [℃]	コンクリート の変色	煤の付着
0		煤が付着
300	ピンク色	煤が焼失し始める
500 600		完全な煤の焼失
	灰白色	
950	淡い黄色	
1200	溶 融	

図 3.2.1.1 コンクリート表面の変色状況
と温度の関係

3.2.2 力学的特性

コンクリートは、セメント、水、細骨材、混和材（剤）から構成されており、コンクリートが火災など高温加熱を受けて物質に変化が生じる主な要因の一つとして、セメントと水の水和反応により生成されるセメント硬化体に含まれる水（結合水、吸着水、毛管水、自由水など）の脱水とそれに伴う微細構造の変化などが影響していると考えられている。

高温加熱によるコンクリートの力学的性状の変化として、圧縮強度、弾性係数、応力-ひずみ関係、引張強度、曲げ強度について報告されている。以降に各項目の力学的特性の変化について示す。

(1) 圧縮強度

コンクリートが火災などの高温環境下に曝されると、骨材の膨張と同時にセメント硬化体に含まれる水の蒸発に起因するセメント水和物の収縮が生じ、それぞれ異なった相反挙動を示す。それに伴い、内部応力が生じる。温度が高くなるにつれ、この内部応力が次第に増大し、内部組織が破壊されることにより強度の低下が生じる。強度の低下割合は、使用材料の種類、配合、材齢などによって異なるため、ばらつきがあるものの概ね 300℃を超えたところから圧縮強度の低下が生じ、500℃程度で常温時の 5 割程度まで低下する（図 3.2.2.1）。また、400℃以上における強度低下率は圧縮強度が高いほど大きくなるとの報告²⁾もあるため、留意する必要がある。

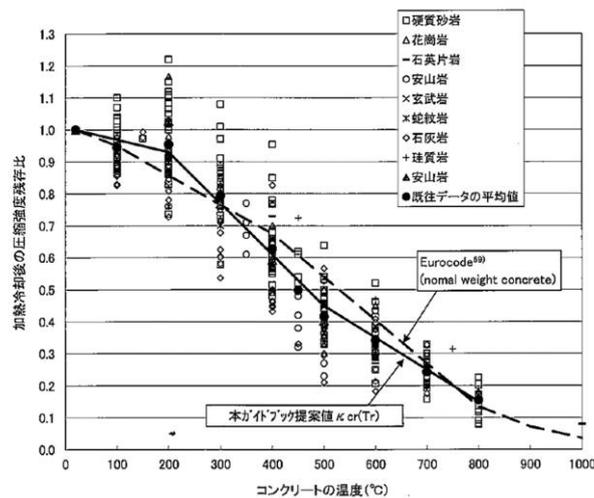


図 3.2.2.1 加熱冷却後の圧縮強度残存比¹⁾

(2) 弾性係数

コンクリートが高温加熱の影響を受けると、(1)圧縮強度で述べたように、セメント硬化体中の水の脱水に伴うセメントペーストの収縮と骨材の膨張の相反作用の影響により、内部応力が生じ内部組織が破壊する。この影響により、圧縮強度同様に弾性係数にも低下が生じる。

弾性係数の低下は、圧縮強度とは異なり 100℃を超える温度で低下が生じ始めたのち、直線的に低下が生じ、常温時に比べて低下する傾向が圧縮強度より大きい。コンクリートの受熱温度と加熱冷却後の弾性係数残存比の傾向を図 3.2.2.2 に示す。また、弾性係数の低下割合は骨材種類に影響を大きく受けることが報告されている。一方、セメント種類や加熱時の材齢による影響は小さいとされている。

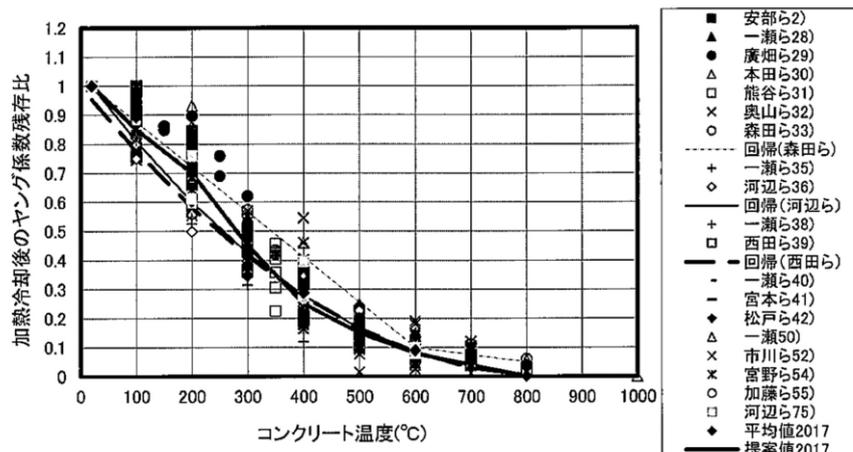


図 3.2.2.2 加熱冷却後の弾性係数残存比¹⁾

(3) 付着強度

コンクリートと鉄筋の付着強度は、セメントペーストと鉄筋の付着力（粘着力）と両材料間の摩擦力、鉄筋表面の凹凸（鉄筋のふし）による機械的抵抗力によるものである。一般的に、付着強度は鉄筋の表面状態によって大きく異なり、付着強度のうち機械的抵抗力が大きな影響を与えている。

コンクリートが高温加熱の影響を受けると、骨材は膨張し、セメントペースト部は収縮する。一方、鋼材は高温時に熱膨張率が常温時に比べて大きくなる性質がある。そのため、高温加熱を受けるとコンクリートと鉄筋の熱膨張率が異なる影響により、セメントペーストと鉄筋の付着力（粘着力）が低下し付着強度が低下すると考えられている。そのため、丸鋼などの表面に凹凸がない鋼材との付着は、低い加熱温度の時から大きく低下する。一方、異形鉄筋などの表面に凹凸がある鋼材の付着強度は機械的抵抗力が支配的であることから、コンクリートの強度低下がほとんど生じない 300°C以下の範囲では、付着強度も大きくは低下しない。しかし、コンクリートの強度低下が著しくなる 400°C前後から、付着強度も大幅に低下することが報告されている³⁾。

(4) 引張強度・曲げ強度

コンクリートが高温加熱の影響を受けると、圧縮強度と同様に引張強度・曲げ強度も低下し、コンクリートの受熱温度が 600°Cで常温時に対する強度比が 15%~30%程度まで低下する。しかしながら、コンクリートの受熱温度と引張強度・曲げ強度に関する報告は少なく、不明な点が多く今後更なるデータの蓄積やメカニズムの解明が必要である。

3.2.3 化学的特性・物理的特性

コンクリートのセメント硬化体は、けい酸カルシウム水和物 (C-S-H)、水酸化カルシウム (Ca(OH)_2) などで構成されている。セメント硬化体の主成分である C-S-H は物性に与える影響が最も大きく、吸着水やその組織内に毛管水を含んでいるが、 $100^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$ でその水分が脱水する。一方、 Ca(OH)_2 は $400\sim 500^\circ\text{C}$ で水が蒸発し、酸化カルシウム (CaO) に分解される。そのため、コンクリートのアルカリ度が低下し中性化が生じる。

物理的な性質の変化としては、コンクリート中の空隙に含まれる自由水やセメントペースト中の結合水などの蒸発に伴い、質量が減少することが知られている。また、熱膨張係数には温度依存性が認められ、高温になるほど熱膨張係数が大きくなることなどが報告されている⁴⁾。一方、コンクリートの熱伝導率や熱拡散率は温度の上昇とともに 600°C 程度まで直線的に減少し、その後は緩やかに減少する。コンクリートの質量減少、熱伝導率や熱拡散率の関係から、コンクリートの高温時の比熱は常温時に比べて大きくなる。また、コンクリートが高温加熱を受けると、コンクリート中に含まれる水が蒸発するがその時に生じる気化熱（蒸発潜熱）により、コンクリートの温度は上昇しにくくなる。Eurocode2⁵⁾では、その蒸発潜熱の影響を考慮した温度と比熱の関係が示されており、含水率が 1.5% および含水率 3.0% のモデル例を提示し、その他の含水率については線形補間して良いとしている。

3.2.4 物質移動抵抗性

コンクリートが火災など高温加熱を受けると、加熱表面に微細なひび割れなどの損傷が生じる。また、セメント硬化体に含まれる水の脱水とそれに伴う微細構造の変化、内部応力による内部組織の破壊など、コンクリート内部でも損傷が生じていると推測される。そのため、高温加熱を受けたコンクリートの補修・補強では外部からの劣化因子の侵入について検討する必要がある。特に、高強度コンクリートなどの爆裂抑制対策として有機繊維を混入したコンクリートでは高温加熱で繊維が熔融するため、熔融箇所から各種劣化因子が侵入しやすくなるため注意が必要である。

高温加熱を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性を、塩分浸透性を指標として評価する方法が提案されている^{6),7)}。上記の手法を用いた調査結果報告⁶⁾によると、受熱温度が200℃程度までは有機繊維の混入の有無にかかわらず高温加熱を受けていない状態のものと同程度の物質侵入抵抗性を示すが、500℃では物質侵入抵抗性が低下することが報告されている(図3.2.4.1)。500℃加熱において塩化物量のバラツキが大きい点については、高温加熱により目視で確認できるひび割れが生じており、その影響によるものと考察されている。また、500℃の場合では有機繊維を混入していない試験体比べて、混入した試験体の方が物質侵入抵抗性は低くなる。これは、マトリックス中のPP繊維が熔融し、空隙が形成されたことによると考察されている。

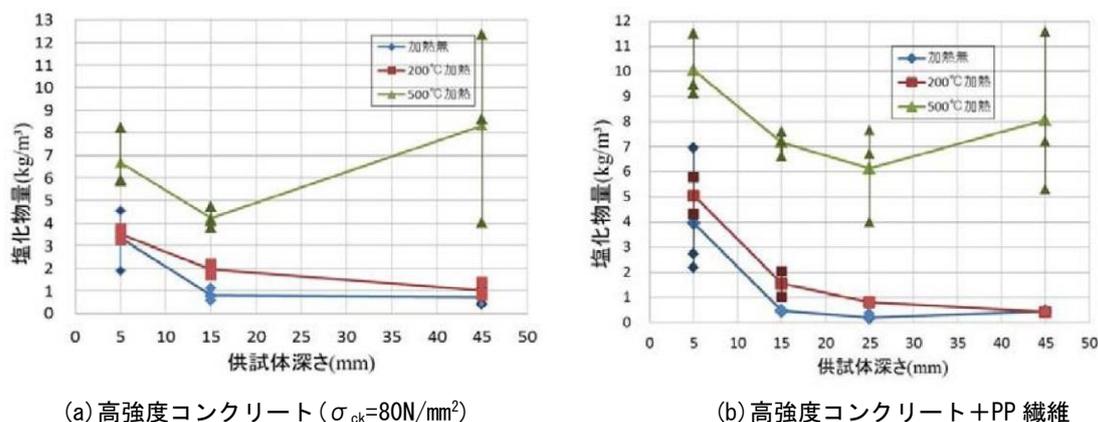


図 3.2.4.1 塩化物量と深さの関係⁶⁾

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.13-48，2017.
- 2) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第515号，pp.163-168，1999.
- 3) Z.Huang：Modelling the Bond between Concrete and Reinforcing Steel in a Fire, Engineering Structures, 32, pp.3660-3669, 2010.
- 4) 徳田弘：コンクリートの熱的性質：コンクリート工学，Vol.22, No.3, pp.29-37, 1984.
- 5) Eurocode2, Design of concrete structures - Part1-2:General rules - Structural fire design, CEN EN 1992-1-2:2004.
- 6) 向井佑真，小澤満津雄，谷辺徹，小林考一：火災劣化後のコンクリートの物質移動抵抗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, 2013.
- 7) 岩本早那香，迫井裕樹，小澤満津雄，川邊清伸：火災を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, 2014.

(執筆：藤本 謙太郎)

3.3 加熱に伴う損傷の平面方向の分布の評価

3.3.1 はじめに

コンクリートは火害などの高温加熱を受けると、セメント硬化物と骨材とはそれぞれが異なった膨張収縮挙動をし、それによってコンクリートの組織の緩みが生じる。また、端部の拘束などによって生じた熱応力によってひび割れが生じ、圧縮強度や耐久性の低下が生じる。このような火災などの高温加熱を受けたコンクリートの健全性を評価し、補修・補強の範囲やその方法を検討するためには、高温加熱によるコンクリートの劣化範囲とその程度を効率的に把握する必要がある。

ここでは、高温加熱を受けたコンクリートの平面方向に対する劣化の広がりを把握することを目的とした、いくつかの非破壊試験、および微破壊試験の方法について調査・検討した事例・結果について紹介する。

3.3.2 非破壊試験

(1) 色彩測定法

コンクリートは高温に曝されると色彩が変化する。色彩測定は、コンクリート表面の変色の状況からコンクリート表面の受熱温度を推定するものである。春畑ら¹⁾は、ガス加熱炉により高温加熱の程度が異なる複数のコンクリート試験体を作製し、加熱面において、加熱面が受けた高温による色彩変化を定量化することを目的として、分光測色計（図 3.3.2.1）を用いて色彩測定を行っている。測定条件は、標準とする光源を D65（色温度：6504K）、分光感度を 2 度視野、拡散反射光のみを計測する正反射光成分除去（SCE）とし、L*a*b* 表示系（JIS Z 8781-4）により数値化している。この結果によれば、加熱面の色彩測定により得られた a* および b* 値から、加熱に伴うコンクリート表面の変色を定量的な数値として示すことができ、L*a*b* 表示系から求めた色差（ ΔE^*_{ab} ）の平均値は加熱温度と相関（図 3.3.2.2）があり加熱温度 110℃～700℃までの範囲において、コンクリート表面の加熱温度を推定できる可能性が示されている。



図 3.3.2.1 分光測色計による色彩測定の様相¹⁾

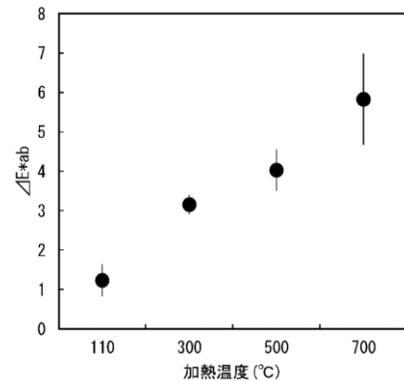


図 3.3.2.2 色差（ ΔE^*_{ab} ）と加熱温度との関係¹⁾

また、コンクリートの水セメント比を 63%、50% および 38% の 3 水準（以下「W/C:63%」、「W/C:50%」、「W/C:38%」と称す）とした試験体を用いて、加熱温度ならびに冷却方法の異なる加熱実験の供試体を用いて、色彩測定を行った研究²⁾がある。この結果では、水セメント比および冷却方法の違いにおいて、放水の影響により若干色合いは異なるようにみえたが、W/C:38%を除いて、概ね指針³⁾で示された色彩（300℃～600℃：ピンク色、600℃～950℃：灰白色、950℃以上：淡黄色）に近い傾向となっており、W/C:63% および 50% では、測色値から試験体加熱面の受熱温度を定量的に把握することが可能であることが示されている（図 3.3.2.3）。

(2) 反発度法

高温加熱を受けたコンクリートの劣化範囲を把握するための手法として反発度測定がある。主に、リバウンドハンマーを用いて、JIS A 1155 に基づ

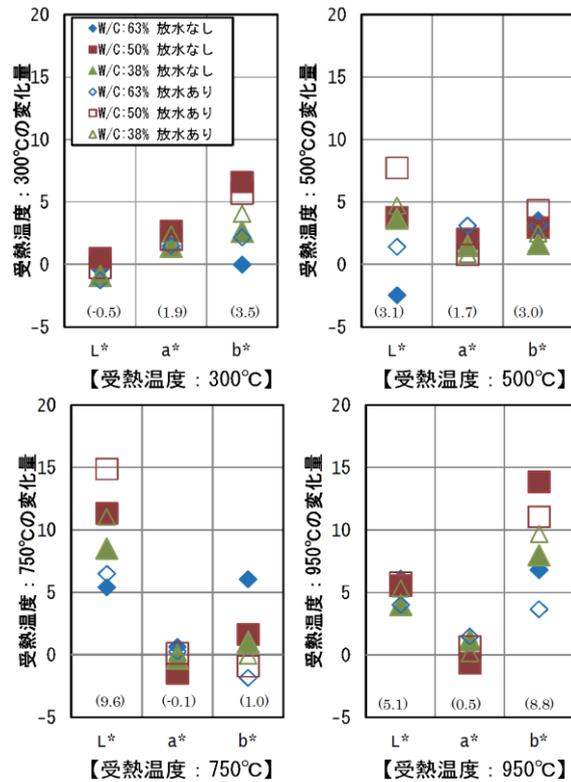


図 3.3.2.3 受熱温度と色彩の変化量の関係²⁾

きコンクリート表面の反発度を測定し、反発度の違いから高温加熱の影響を受けている箇所と把握するものである。既往の研究⁴⁾では、反発度比はコンクリート表面が高温加熱を受けると低下し、その低下傾向は水セメント比によって異なるが、水セメント比、放水の有無に関らず、概ね受熱温度が 500℃以上であれば、反発度比によって高温加熱の影響を判断できるとされている（図 3.3.2.4）。

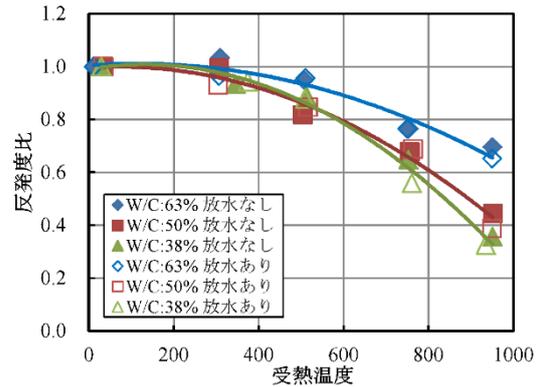


図 3.3.2.4 受熱温度と反発度比の関係⁴⁾

内田ら⁵⁾は、ガス加熱炉により人工的に高温加熱の程度が異なる複数のコンクリート試験体を作製し、加熱面において、非破壊試験として反発度を適用し、高温加熱による劣化評価手法としての適用可能性について検討している。各加熱温度の試験体の反発度は、JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」に規定されているリバウンドハンマー（NR 型）によって有効加熱範囲（670×670mm）内の 16 点の測定を行っている。この結果によれば、反発度は、加熱温度 110、300、500℃において加熱前の反発度より大きくなり、加熱温度が 700℃の場合は加熱前の反発度より小さくなる結果が示されている（図 3.3.2.5）。

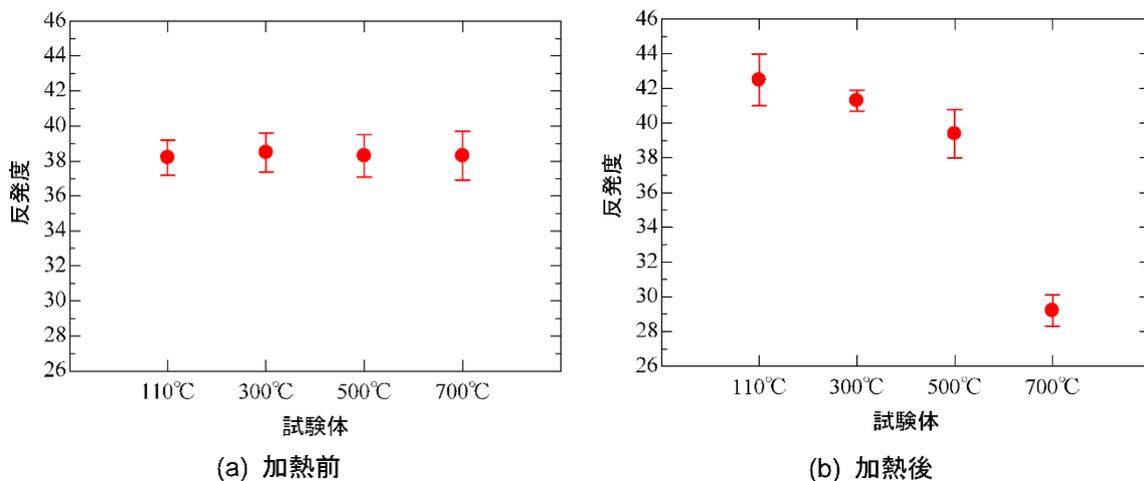


図 3.3.2.5 反発度の測定結果⁵⁾

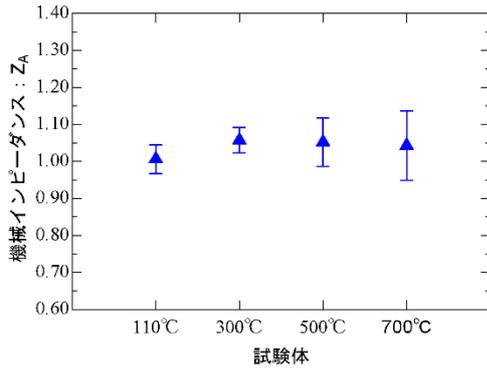
(3) 機械インピーダンス測定

打撃装置により、高温加熱を受けたコンクリート表面を打撃し、打撃力の時間波形の測定、解析を行うことで、高温加熱の影響を把握する試験である。

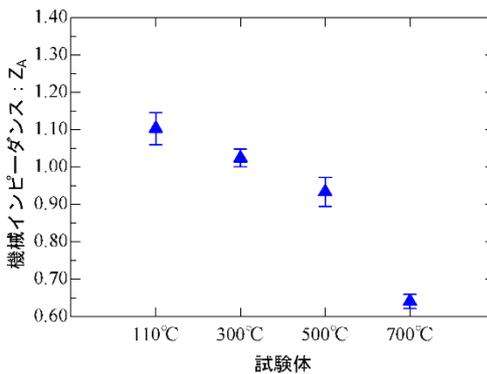
機械インピーダンスの測定については、内田ら⁵⁾が基礎的研究を行っており、未加熱、および加熱温度を 110、300、500、700℃とした 5 水準の供試体（有効加熱範囲 670mm×幅 670mm）に対し、機械インピーダンス貫入抵抗 Z_A および反発仮定 Z_R の測定の測定結果から、高温加熱による影響を測定している。機械インピーダンスの測定は、加速度センサを



図 3.3.2.6 ハンマーによる打撃状況⁵⁾

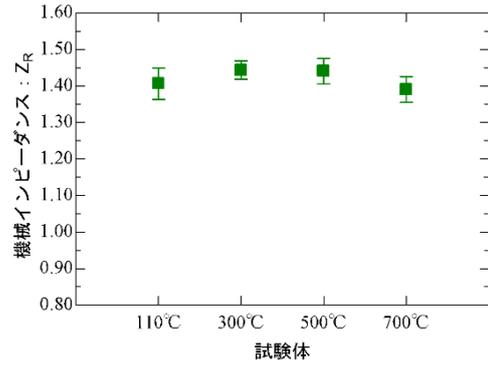


(a) 加熱前

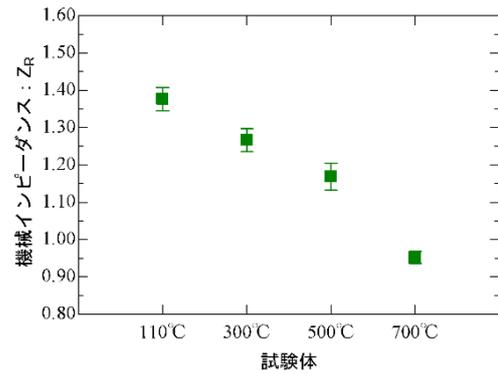


(b) 加熱後

図 3.3.2.7 機械インピーダンス
[Z_A の測定結果] ⁵⁾



(a) 加熱前



(b) 加熱後

図 3.3.2.8 機械インピーダンス
[Z_R の測定結果] ⁵⁾

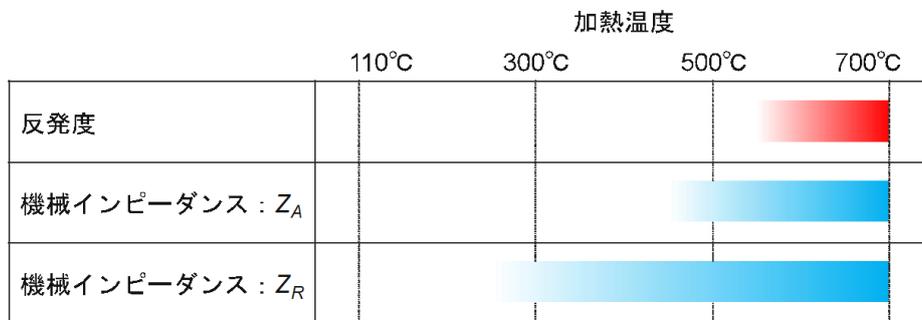


図 3.3.2.9 各非破壊試験で得られた加熱後の指標値が加熱前と比較して低下する加熱温度の範囲 ⁵⁾

内蔵したハンマーを使用し、加速度センサで受信したこの時刻歴波形から、 Z_A および Z_R を算出している(図 3.3.2.6)。各加熱温度の試験体の機械インピーダンスの測定に使用したハンマーは、質量 380g、先端の球面半径 30mm である。

試験の結果では、機械インピーダンス Z_A は、加熱温度が 500°C~700°Cにおいて、加熱温度が大きいほど小さくなり(図 3.3.2.7)、 Z_R は加熱温度が 300°C程度から 700°Cにおいて感度を有する評価指標となる(図 3.3.2.8)ことが示されている。この研究においては、反発度法による試験も同時に行われている。いずれも高温加熱による劣化評価手法として適用可能であり、この試験における加熱温度に対しては、 Z_R を評価指標とした機械インピーダンスに基づく方法は適用範囲が広いとしている(図 3.3.2.9)。

(4) 表層透気試験

高温加熱を受けたコンクリートは、コンクリートの加熱表面にひび割れが生じ、物質侵入抵抗性や密度の低下が生じる。若林ら⁶⁾、迫井ら⁷⁾は、400×400×100mmの平板に対して、加熱なし、及び加熱温度 200℃、および 300℃とし供試体により加熱前後での透気試験(Torrent 法)を行っている。なお、透気試験の測定箇所は加熱領域を 4 箇所、非加熱領域を 2 箇所としている。この試験の結果では、加熱領域の透気係数は加熱温度の上昇に伴い、大きくなっており(図 3.3.2.10)、加熱領域においては透気深さも、透気係数と同様に加熱温度が高くなると深くなる傾向となっている(図 3.3.2.11)。一方、非加熱域では加熱温度 200℃程度までは、加熱無しと同等の透気係数となっているが、加熱温度 300℃の場合は、透気係数が増加しており受熱温度によって加熱域だけではなく、その近傍も損傷を示す結果となっている。このことから、透気試験は加熱領域のみならず、加熱による影響範囲を把握する方法の一つになる可能性を示唆している。

また、春畑ら¹⁾の研究では、長さ 900mm、幅 900mm、厚さ 300mm の供試体を 110、300、500、700℃となるまで加熱し、透気係数の測定を行い高温加熱の影響を評価している。この結果では、加熱温度 700℃では表層透気試験の適用は困難だが、加熱温度 300℃程度までは、表面のひび割れを避けて測定すれば、表層透気試験は適用可能であり(図 3.3.2.12)、加熱範囲の推定に表層透気試験の適用の可能性を示している。

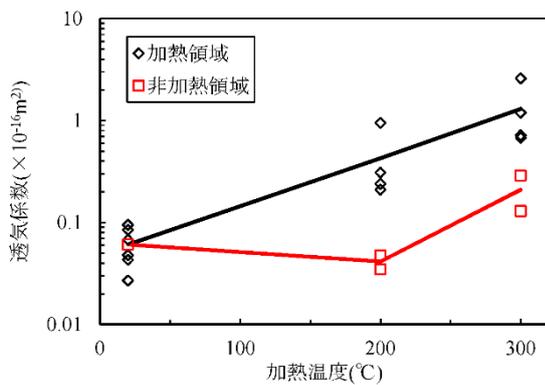


図 3.3.2.10 透気係数⁶⁾

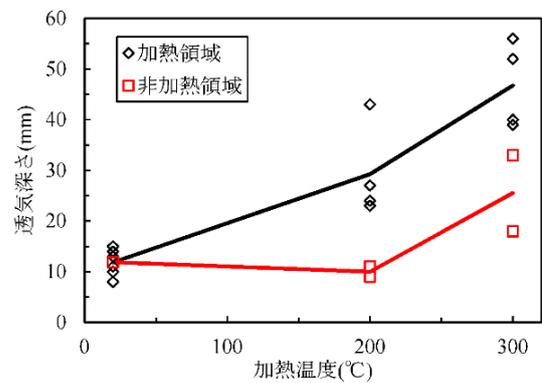


図 3.3.2.11 透気深さ⁶⁾

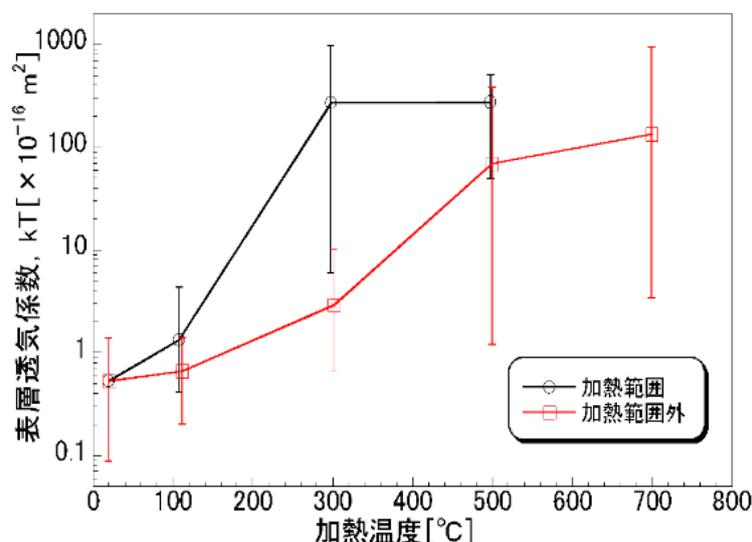


図 3.3.2.12 表層透気係数に及ぼす加熱温度の影響¹⁾

(5) 引っかき傷法

引っかき傷法は、日本塗り床工業会の認定品である引っかき試験器を用いて、コンクリート表面に一定の荷重(9.8N)をかけて引っかき傷を加えた後、ルーペ及びクラックスケールを用いて測定した引っかき傷幅からコンクリートの圧縮強度を推定する方法⁸⁾である。春畑ら⁴⁾は長さ1000×幅500×厚さ200mmの直方体の供試体をガス加熱炉に設置し、コンクリート加熱面の温度が、300、500、750、950℃になるように加熱し引っかき傷幅を各5箇所ずつ測定し、その平均値の測定を行っている。引っかき傷法は、**図 3.3.2.13**に示す日本塗り床工業会の認定品である引っかき試験器を用いて、コンクリート表面に一定の荷重(9.8N)をかけて引っかき傷を加えた後、ルーペ及びクラックスケールを用いて測定した引っかき傷幅からコンクリートの圧縮強度を推定する方法(直読法)、及び、**図 3.3.2.14**に示す、秒速1~1.2cmで引っかき傷をつけ、その傷幅を CCD カメラで撮影し、画像処理により 0.02mm 単位で引っかき傷幅の測定ができる引っかき傷試験器(光学測定法)の2つを使い比較している。

試験の結果では、引っかき傷幅比は、コンクリート表面が高温加熱を受けると増大し、その傾向は水セメント比によって異なるが、水セメント比、放水の有無に関らず、概ね受熱温度が 500℃以上であれば、引っかき傷幅比によって高温加熱の影響を判断できることが示されている(**図 3.3.2.15**)。また、光学測定法は、W/C:50%では直読法の約 1.2 倍、W/C:38%では直読法の約 0.3 倍の結果となっており、同一の引っかき傷幅においても、光学測定法と直読法ではそれぞれ異なった結果を示すことを確認している(**図 3.3.2.16**)。



図 3.3.2.13 引っかき傷法(直読法)の試験状況と引っかき試験機⁴⁾



図 3.3.2.14 引っかき傷法(光学測定法)の測定状況⁴⁾

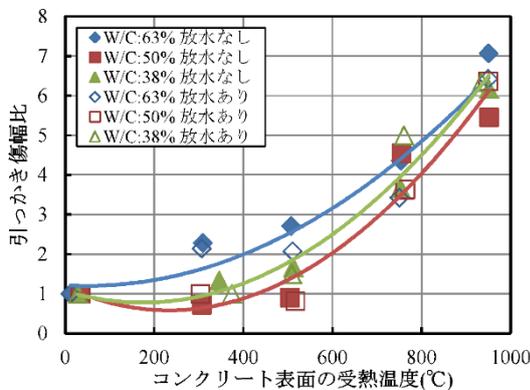


図 3.3.2.15 コンクリート表面の受熱温度と引っかき傷幅比(直読法)との関係⁴⁾

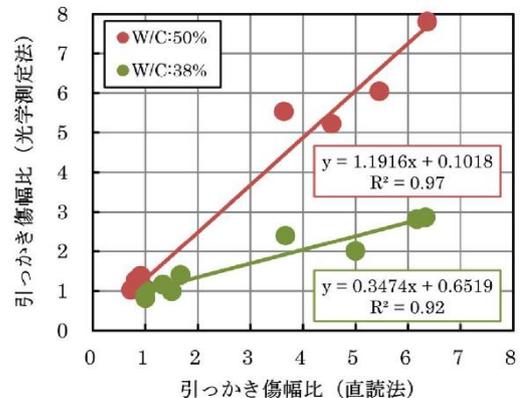


図 3.3.2.16 直読法と光学測定法との関係⁴⁾

(6) 弾性波法

高温加熱を受けて劣化したコンクリートは弾性波速度が低下するため、面的に測定を行うことで、健全部と劣化部を把握することができる。衝撃弾性波法には、コンクリート表面を鋼球やハンマなどの打撃体により打撃し、打撃体がコンクリートに接触している時間を測定する接触時間法（図 3.3.2.17）、およびコンクリート中を伝搬した弾性波を測定する多点表面伝搬時間差法がある。

岩野ら⁹⁾は、長さ 1200mm×幅 900mm×厚さ 400mm の供試体の 300mm×300mm を加熱範囲とし、40 分で炉内温度を 600℃まで昇温し、600℃を 280 分間保持したものを、接触時間法、および多点表面伝搬時間差法により劣化範囲を評価している。この試験によれば、接触時間法の測定値である接触時間は、コンクリートの弾性係数とブリネル硬さを反映することから、高温加熱による劣化部の面的な範囲を評価できる可能性があるとしている（図 3.3.2.18）。ただし、高温加熱による劣化の程度が軽微の場合は、試験方法の測定精度による誤差との判別が困難であったとしている。

また、表面波の伝播特性に着目した音響伝達関数および表面波速度による高温加熱に伴う劣化評価については、寺澤ら¹⁰⁾の研究がある。この研究では、長さ 900mm、幅 900mm、厚さ 300mm の直方体供試体のうち、長さ 670mm×幅 670mm を加熱面積とし、コンクリート表面から 0mm にある 3 本の熱電対でそれぞれ測定した温度の平均値が 110、300、500、700℃となるまで各試験体を加熱したのに対し測定が行われている。加熱の影響を評価するにあたっては音響伝達関数の時刻歴インパルス応答と表面波速度に着目し測定結果の整理がされている。測定の結果から、音響伝達関数による評価方法では、径の大きい鋼球を衝撃入力に用いることで 300℃以上の加熱の影響を評価でき（図 3.3.2.19）、表面波速度では 500℃以上の加熱の影響を評価できる可能性があるとしている（図 3.3.2.20）。



図 3.3.2.17 接触時間法の測定状況⁹⁾

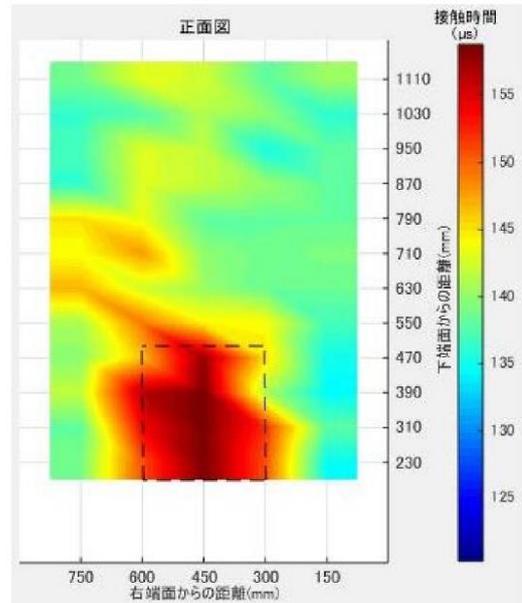


図 3.3.2.18 加熱後の接触時間の測定結果⁹⁾

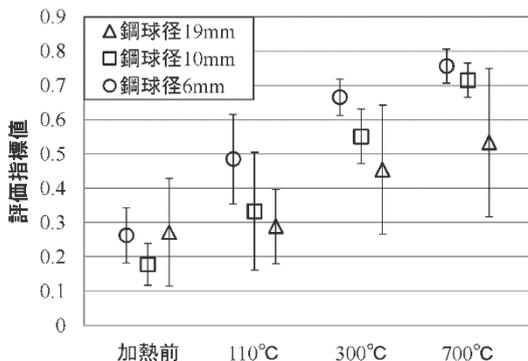


図 3.3.2.19 鉄球径と評価指標値の関係¹⁰⁾

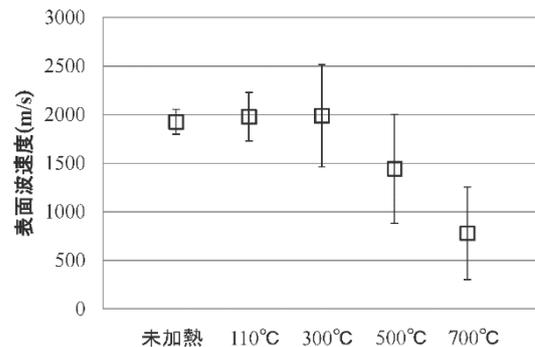


図 3.3.2.20 加熱温度と表面波速度の関係¹⁰⁾

弾性波トモグラフィ法は、計測対象領域内に設置された複数のセンサから多方向の弾性波速度を取得し、これらを計測領域内に設けた要素モデルに弾性波速度を割り当てることで、対象領域内の速度構造を画像情報として表現するものである。大野ら¹¹⁾は、コンクリート表面の温度を 110、300、500、700℃の 4 水準に設定した、長さ 900mm、幅 900mm、厚さ 300mm の直方体試験体に対し弾性波速度を測定し、加熱位置からの平面方向に対する劣化程度の違いをトモグラフィ法により評価している（図 3.3.2.21、図 3.3.2.22）。この結果では、加熱温度の上昇によってコンクリートの力学的特性は低下し、さらにコンクリート表面に目視可能なひび割れが生じることで、弾性波トモグラフィ解析結果から得られる加熱面の速度が低下することが認められ、弾性波トモグラフィ法は高温加熱を受けたコンクリートの劣化を把握する上で有効な手法であることが示唆している（図 3.3.2.23）。

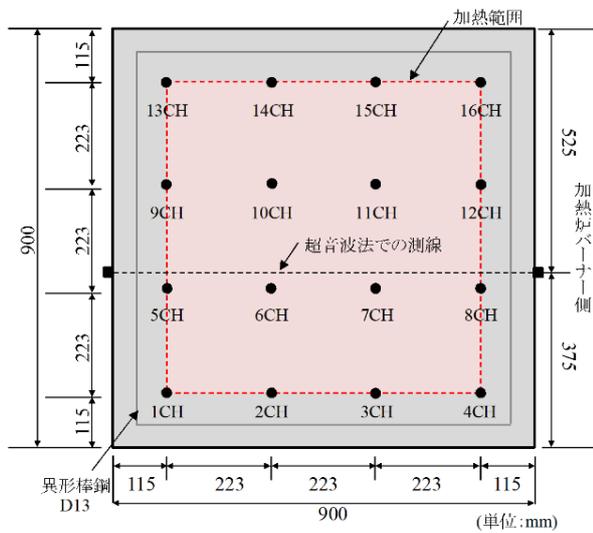


図 3.3.2.21 AE センサ配置位置¹¹⁾

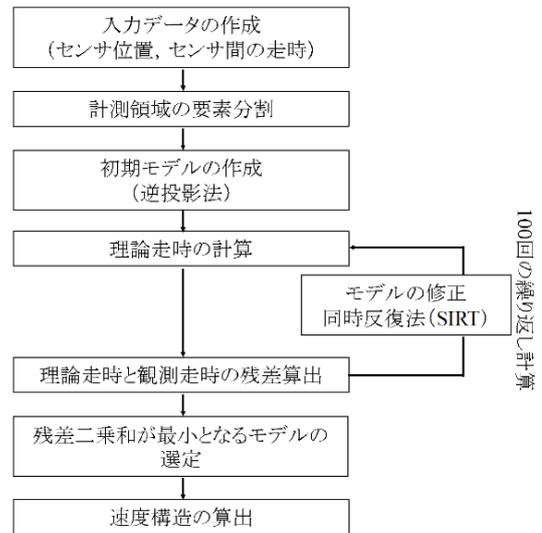


図 3.3.2.22 弾性波トモグラフィ解析フロー¹¹⁾

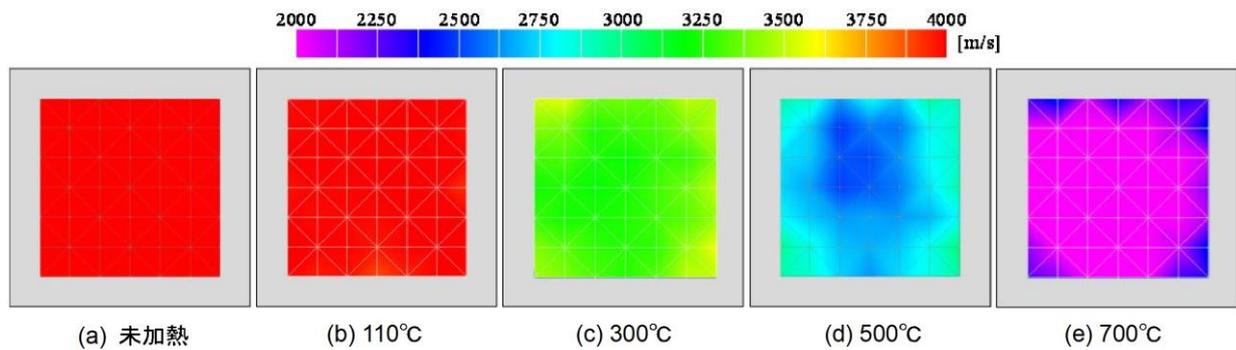


図 3.3.2.23 弾性波トモグラフィ解析結果¹¹⁾

(7) 超音波表面走査法

高温加熱を受けたコンクリートの平面方向に対する劣化の広がりとその深さを把握するための試験方法として、超音波表面走査法がある。超音波表面走査法は、表面からの測定で断面内の劣化深さを評価することを目的とした非破壊試験である。部材の表面に二つの探触子（発信子と受信子）を配置して超音波を伝搬させ、探触子の間隔を変化させ、測定した伝搬速度から劣化を評価するものである（図 3.3.2.24, 図 3.3.2.25）。

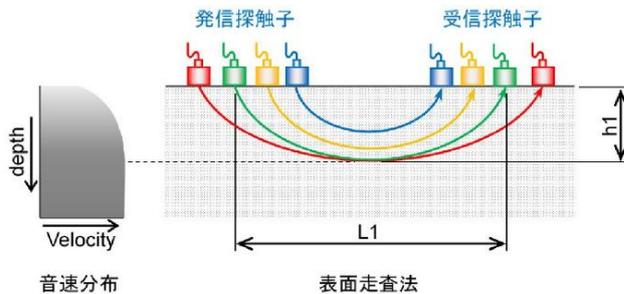


図 3.3.2.24 表面走査法の超音波伝搬経路のイメージ¹²⁾

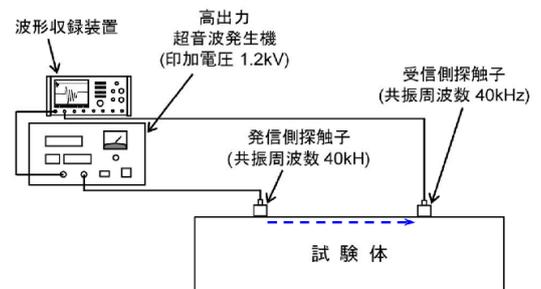


図 3.3.2.25 測定システムの概要¹²⁾

藤原ら¹²⁾は、長さ 900mm、幅 900mm、厚さ 300mm の直方体の供試体のうち、有効加熱寸法を長さ 670mm×幅 670mm とした範囲で、110、300、500、700℃の 4 水準で加熱し、超音波表面走査法による劣化範囲の評価を行っている。この試験の結果では、加熱後は、いずれの試験体も音速が低下し、加熱温度の高い試験体ほど低下の度合いが大きい結果となっている。表面走査法で測定した音速は加熱温度に応じて低下しており、また、表面走査法で測定した各試験体の加熱前後の見掛けの音速と探触子間距離の関係走次曲線にも加熱温度に対応した傾向が見られることから、これらを基準として表面走査法により断面方向の音速分布を定性的に評価できる可能性があること示している（図 3.3.2.26, 図 3.3.2.27）。ただし、加熱後の試験体では、ひび割れの影響で超音波の伝搬経路が大きく変化していた。伝搬経路はひび割れの発生状況や探触子との位置関係によって様々に変化するため、幾何学的に伝搬経路やその距離を推定するのは難しく、現時点では表面走査法で劣化深さを評価することは困難であることを指摘している。

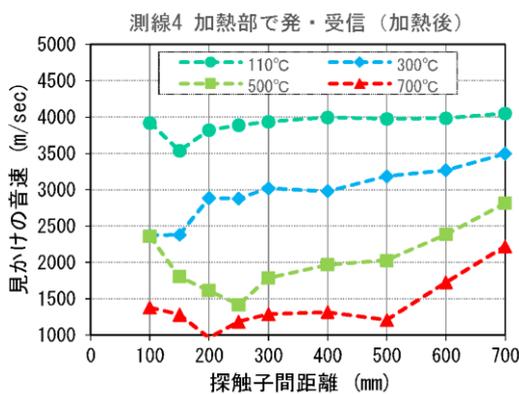


図 3.3.2.26 表面走査法の音速
(加熱部で発・受信：加熱後)¹²⁾

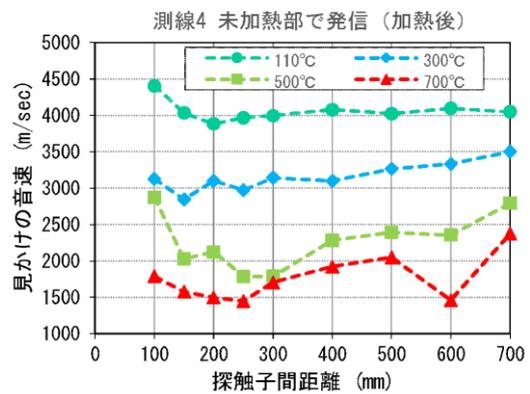


図 3.3.2.27 表面走査法の音速
(未加熱部で発・受信：加熱後)¹²⁾

3.3.3 微破壊試験

(1) 小径コア

高温加熱を受けたコンクリートの調査手法の一つとして、小径コアの抜き取り試験がある¹³⁾。小径コアの直径は、通常抜取られる直径100mmのコアよりも小さい径であり、構造体から直接多くのサンプルを採取できることから、加熱位置からの平面方向に対する劣化分布の評価への適用が考えられる。

春畑ら¹⁴⁾は、1000mm×1000mm×200mm、及び400mm×400mm×150mmのサイズの配合を変えた6種類(図3.3.3.1)に対して、加熱無し、およびRC造集合住宅における火災の特徴を勘案し、300℃、500℃、750℃、950℃の温度条件の供試体から、直径100mmのコアおよび直径30mmのコア(図3.3.3.2)を採取し、圧縮強度と受熱温度との関係について実験的に検討を行っている。この試験によれば、小径コアの圧縮強度残存比は、小径コアの軸方向中央部の温度と高相関性が確認されている(図3.3.3.3)。なお、小径コア圧縮強度残存比は、コンクリート加熱側面および内側において、加熱後の小径コアの圧縮強度を未加熱試験体の小径コアの圧縮強度で除して求めており、小径コアの軸方向中央部の最高温度は、コンクリート内部に設置した熱電対で測定した最高到達温度を直線補完したものとしている。なお、小径コアについては、土木研究所における測定要領(案)¹⁵⁾等も示されており、今後の活用が期待される。

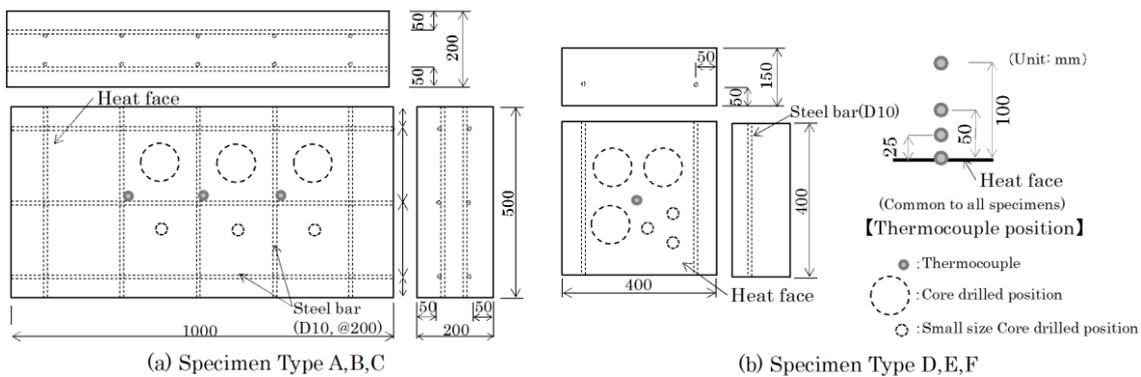


図 3.3.3.1 試験体の形状と寸法¹⁴⁾

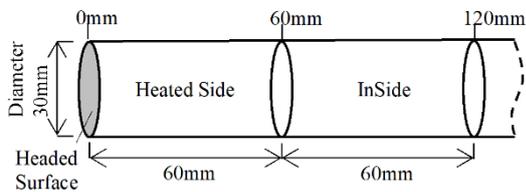


図 3.3.3.2 小径コアのサンプリング位置¹⁴⁾

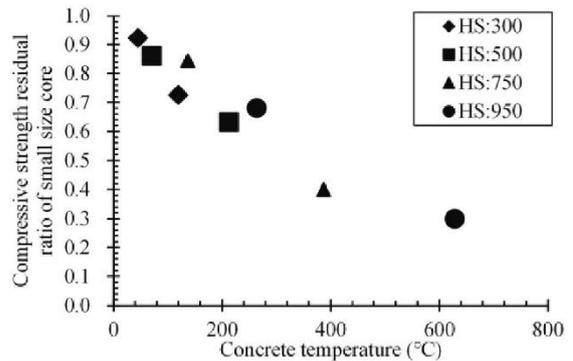


図 3.3.3.3 小径コアの圧縮強度残存率とコンクリート温度の関係¹⁴⁾

(2) 小径ドリル型削孔試験

圧縮強度を小径ドリル型削孔試験の削孔速度により推定する手法が長谷川ら¹⁶⁾により提案されている。この試験機は、一定のトルクおよび一定の回転数で稼働するモータを組み込んだ回転ドリル(図3.3.3.4、図3.3.3.5)を一定の力で押しながら被測定体を削孔し、その削孔速度によって材料の強弱を評価するものである。

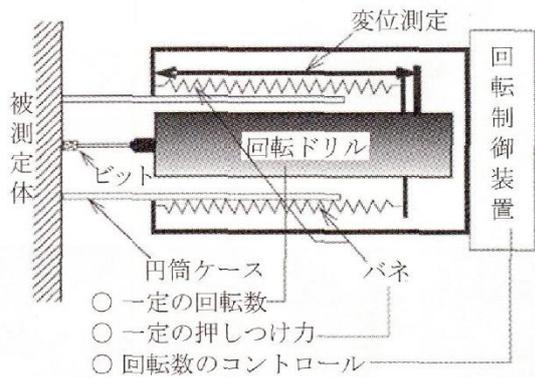


図 3.3.3.4 削孔試験機のイメージ¹⁶⁾

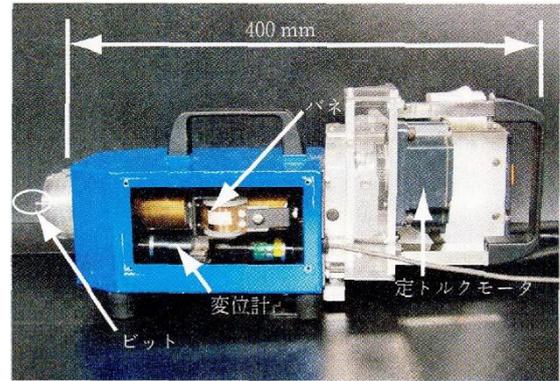


図 3.3.3.5 試作した削孔試験機¹⁶⁾

朴¹⁷⁾は、削孔試験機を用いて高温加熱を受けたモルタルの強度推定に関する研究を行っている。この研究では、100 mm×100 mm×100 mmの立方体試体を、電気炉を用いて500℃、加熱時間は、30分、1時間、4時間、6時間の4水準に加熱したものを小径ドリル型削孔試験機により削孔し、削孔速度とモルタル性状を評価したものである。試験の結果では、未加熱試験体の場合の平均削孔速度は0.224 mm/sと(図 3.3.3.6 a))、試験体表面から深さ方向に向けて安定した削孔速度であるのに対して、1時間加熱試験体では表面から13 mm付近まで(図 3.3.3.6 b))、4時間加熱試験体では表面から20 mm付近まで(図 3.3.3.6 c))削孔速度が未加熱試験体に比べ速くなっており、この領域で高温加熱の影響を受けているとしている。また、加熱時間別試験体と平均削孔速度と削孔深さの関係(図 3.3.3.7)から、1時間以上の加熱を行なった試験体は、表面から試験体内部にかけて削孔速度が低下していき、未加熱試験体と同等の削孔速度へ収束していく傾向がみられた。このように、1時間以上の加熱を受けた試験体での高温加熱の影響による削孔速度の違いが確認されており、また1時間加熱試験体では深さ約20 mm程度まで、4時間加熱試験体では深さ約30 mm程度まで、6時間加熱試験体では深さ約40 mm程度までの劣化範囲を推定し、高温加熱を受けた試験体の損傷程度の推定に削孔試験機の有効性を提案している。

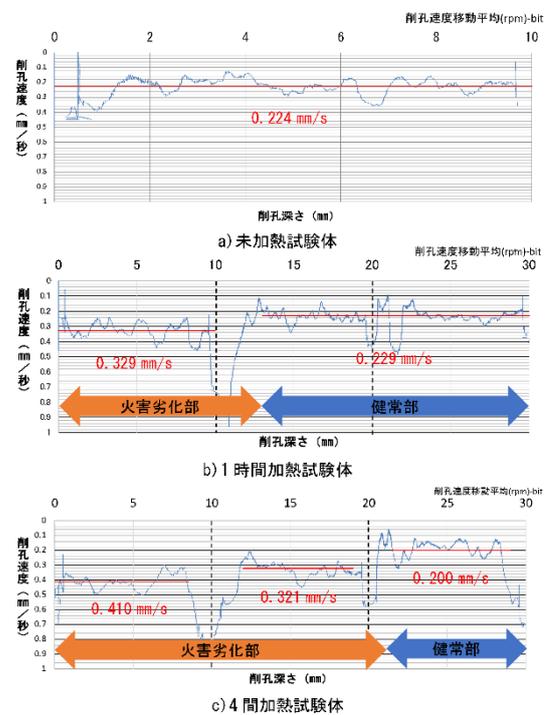


図 3.3.3.6 削孔速度と削孔深さの関係¹⁷⁾

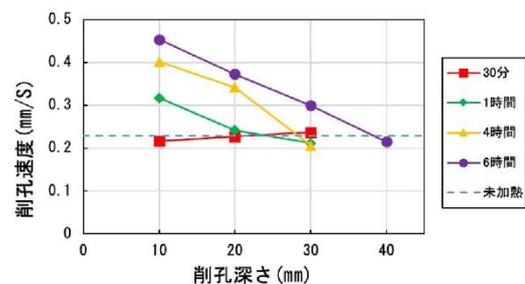


図 3.3.3.8 加熱時間別試験体の平均削孔速度と削孔深さの関係¹⁷⁾

3.3.4 おわりに

道路上のコンクリート構造が火災などの高温加熱を受けると、供用安全性の観点から早期の対策が求められる。対策の立案にあたっては健全性の評価が重要であり、非破壊・微破壊試験による健全性の評価はその迅速性から有用性が高い。また、受熱位置からの平面方向に対する劣化範囲を評価することで、より詳細な調査に向けてのスクリーニングにも重要な試験とも考えられる。今後は、ここで紹介した非破壊・微破壊試験による健全度評価の精度向上と作業性の向上により、より効率的な調査方法の確立が期待される。

参考文献

- 1) 春畑仁一，迫井裕樹，内田慎哉，池田憲一：表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法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. 1，2017
- 2) 春畑仁一，松田司，阪口明弘，水野雄太，皿井剛典：非破壊試験による火害を受けたコンクリートの劣化範囲の評価に関する実験的検討，GBRC Vol. 40 No. 2 2015. 4
- 3) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法 指針・同解説，2015
- 4) 春畑仁一，阪口明弘，山根政夫，皿井 剛典：火害を受けたコンクリートの劣化診断手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，2014
- 5) 内田慎哉，春畑仁一，小松由弥，池田 憲一：反発度および機械インピーダンスによる火害を受けたコンクリートの劣化評価手法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. 1，2017
- 6) 若林瑠美，小澤満津雄，迫井裕樹，川邊 清伸：火災損傷を受けた普通コンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，2015
- 7) 迫井裕樹，小澤満津雄，川邊清伸，若林瑠美：高温加熱によるコンクリートの損傷評価に関する基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第15巻，2015
- 8) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇，篠崎幸代：引っかけ傷によるコンクリートの圧縮強度試験方法の提案，日本非破壊検査協会シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査への期待」論文集，Vol. 1，pp. 115-122，2003
- 9) 岩野聡史，内田慎哉，麓隆行，小澤満津雄：衝撃弾性波法による火害を受けたコンクリートの劣化評価方法に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第28巻，35-45，2017
- 10) 寺澤広基，鎌田敏郎，春畑仁一，内田慎哉：表面波の伝播特性に着目したコンクリート火害劣化の評価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. 1，2017
- 11) 大野健太郎，前田祐輔，内田慎哉，春畑 仁一：弾性波の速度構造による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No. 1，2017
- 12) 藤原規雄，西谷慶彦，春畑仁一，内田慎哉：超音波表面走査法による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法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. 1，2017
- 13) 吉田正友，阪口明弘：火害を受けたコンクリート構造物の調査・診断および補修・補強，コンクリート工学，Vol. 45，No. 9，2007
- 14) 春畑仁一，新井真，池田憲一：鉄筋コンクリート造集合住宅における火災によるコンクリートの強度低下に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第85巻 第769号，439-447，2020
- 15) (株) 錢高組，前田建設工業(株)，日本国土開発(株)，(独) 土木研究所：小径コア試験による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)，2006

- 16) 長谷川哲也, 畑中重光, 三島直生, 谷川恭雄: 小径ドリル型削孔試験機の開発と歴史的建造物の表層強度測定への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol46, No. 6, pp. 10~17, 2017
- 17) 朴相俊, 伊藤花恋, 青木孝義, 長谷川哲也: 小径ドリル型削孔試験機による火害を受けたモルタルの強度推定ための検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023

(執筆者: 飯土井 剛)

3.4 加熱に伴う損傷の深さ方向に対する分布の評価

3.4.1 はじめに

コンクリート構造物が火災などの高温加熱を受けた場合、コンクリートは強度や耐久性が低下するため、劣化部を除去して補修を行う必要がある。そのためには、コンクリートの劣化範囲とその程度を事前に推定し、補修が必要な範囲を特定することが重要である。

ここでは、火災など高温加熱を受けた構造物の表面から深さ方向に対する劣化の分布を評価するための方法について検討した事例について紹介する。

3.4.2 非破壊試験

岩野ら¹⁾は、高温加熱を受けたコンクリートの表面に弾性波の入力点と受信点を複数点設け、各入力点と受信点において、衝撃弾性波の伝搬時間を測定することにより、劣化深さを評価する方法（多点表面伝搬時間差法）を提案している（写真3.4.2.1）。高温加熱を受けたコンクリートでは、表面側の弾性波速度は内部よりも低下し、表面からの深さが大きくなるにしたがって劣化が軽減され、弾性波速度が徐々に大きくなる（ミラージュ層）と想定される。そのため、測定された伝搬時間差からコンクリート表面からの深さと弾性波速度の関係式を推定し、劣化深さを評価する方法である（図3.4.2.1, 図3.4.2.2）。

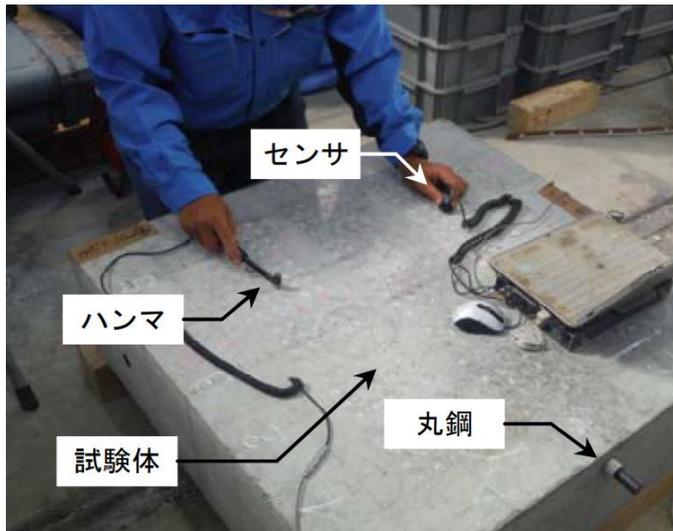


写真 3.4.2.1 測定状況

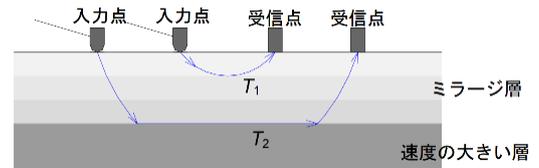


図 3.4.2.1 伝搬経路の模式図

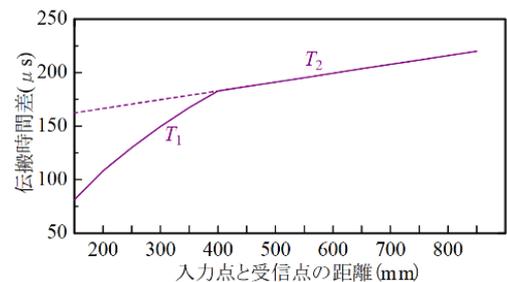


図 3.4.2.2 測定される伝播時間差の例

縦 900×横 900×厚さ 250mm の試験体を用いて、温度 500℃での加熱を 1 時間と 4.5 時間で実施し評価を行っている。入力点にて、周波数範囲 0.4~10000Hz の加速度計を内蔵した球冠半径 7.5mm のハンマで打撃することで弾性波を入力し、受信点に最初に到達した弾性波の伝搬時間を測定している。入力点と受信点の距離は 200mm から 50mm 間隔で走査し、850mm まで測定を行っている（図 3.4.2.3）。

伝播時間差の測定結果（図 3.4.2.4）から、表面速度、速度変化面までの深さ、ミラージュ層最下部での速度、内部速度を解析により算出し、深さ方向の速度分布を求めている（図 3.4.2.5）。

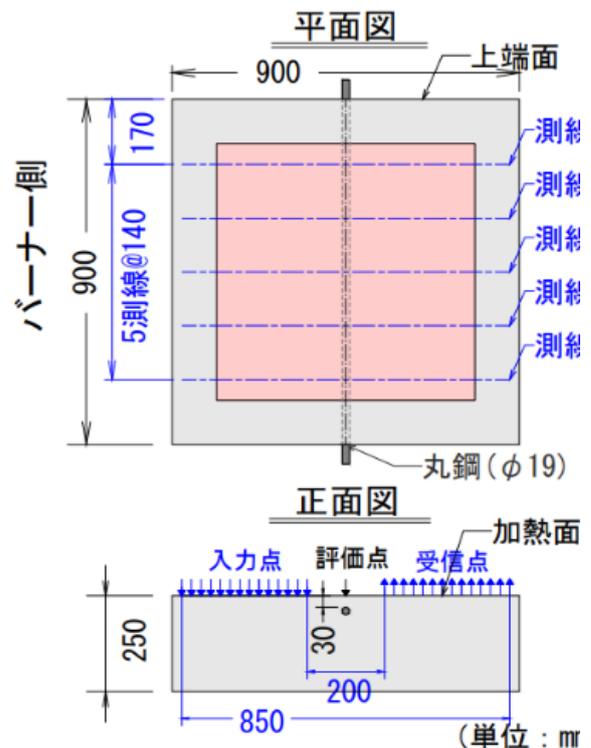


図 3.4.2.3 試験体および測定の概要

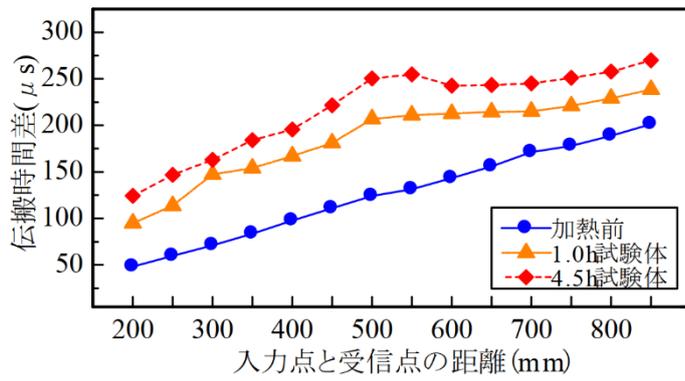


図 3.4.2.4 伝搬時間差の測定結果の例

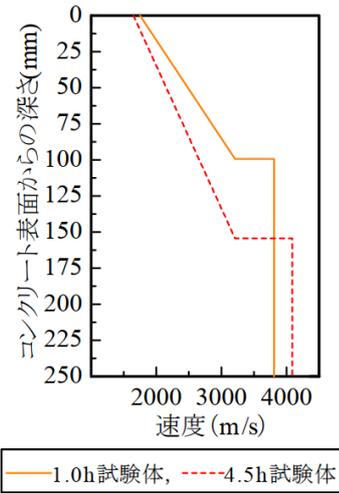


図 3.4.2.5 深さ方向の速度分布の例

3.4.3 微破壊試験

(1) 孔内局部載荷試験

コンクリート表面に 42mm の小径のコア孔を開け、直径 40mm、長さ 270mm と小型の試験装置（孔内局部載荷試験装置）を用いて局部的に載荷試験を行うことにより劣化の程度を調査する方法が提案されている（図 3.4.3.1）。孔内に挿入する試験装置は、変位計や油圧ピストンを内蔵した直径 40mm、長さ 270mm の円柱状の本体とコアの孔壁に貫入させる載荷先端部、載荷位置を目視確認するためのファイバースコープから構成されている²⁾。皿井ら³⁾は、断面が 250mm×250mm の柱と断面が 250mm×200mm の梁からなるコンクリートの

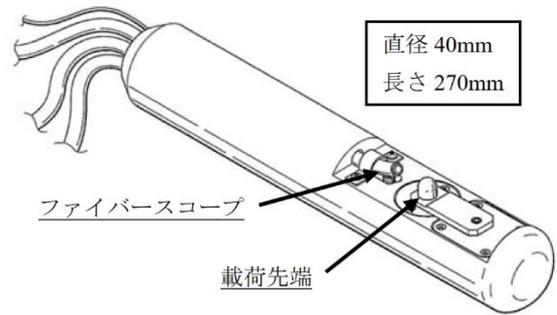


図 3.4.3.1 孔内局部載荷試験装置

呼び強度 21 の試験体を用いて、深さ 4cm の鉄筋位置で最高温度 400℃および 500℃に達するまで加熱し、健全部と併せて深さ方向の強度分布を推定している（図 3.4.3.2）。清宮ら⁴⁾は、縦 600×横 1300×厚さ 200mm の試験体を用いて、RABT 曲線により 1200℃まで加熱し、載荷試験を実施し、深さ方向の貫入抵抗値の分布を

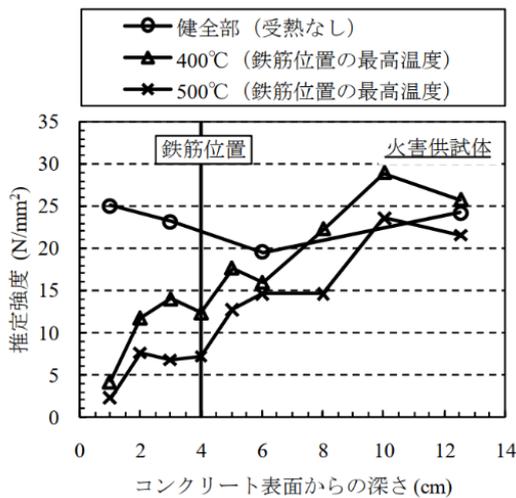


図 3.4.3.2 載荷試験結果

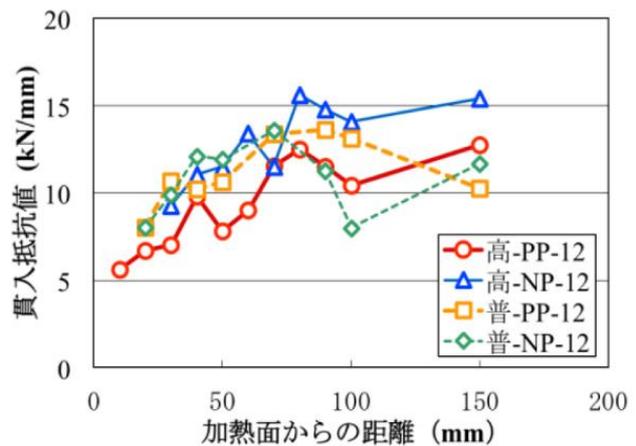


図 3.4.3.3 載荷試験結果

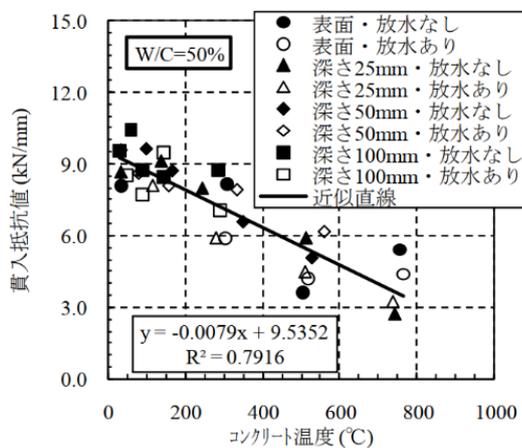


図 3.4.3.4 貫入抵抗値と受熱温度の関係

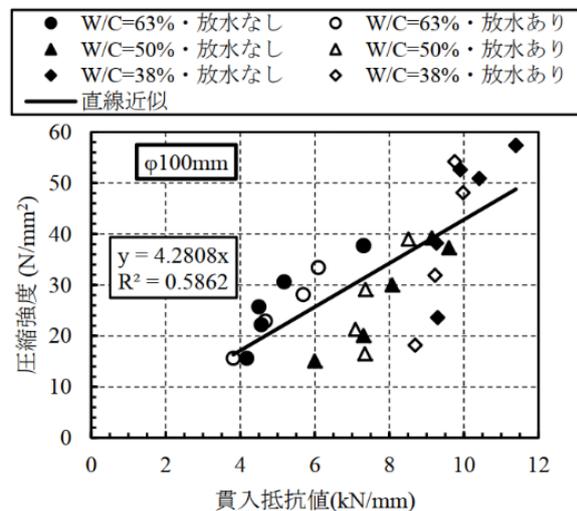


図 3.4.3.5 貫入抵抗値と圧縮強度の関係

測定している（図 3.4.3.3）. 皿井ら⁵⁾は、幅 500×長さ 1000×厚さ 200mm で水セメント比 63～38%の試験体を用いて、300～950℃まで加熱した場合の載荷試験を実施し、受熱温度と貫入抵抗値に相関関係があること（図 3.4.3.4）、 $\Phi 100\text{mm}$ のコア孔でも試験が可能であること（図 3.4.3.5）、圧縮強度との相関関係があることなどを確認し、試験の妥当性について評価している. 澤口らも同様に⁶⁾、幅 900×長さ 900×厚さ 300mm の圧縮強度 31.4N/mm^2 の試験体を用いて、110～700℃まで IS0834 曲線にて加熱した場合の載荷試験を実施し、加熱温度と貫入抵抗値に相関関係があることを確認している.

(2) ハンマードリル法

Felicetti ら⁷⁾は、ハンマードリルで穴をあける際に必要な単位深さ当たりの仕事量から穿孔抵抗を測定し、深さ方向の残存強度を推定する方法を提案している. 割れや骨材の影響のために、穿孔抵抗と圧縮強度の間の相関関係は単純ではないが、健全部に対する相対値とすることで、高温加熱を受けたコンクリートの深さ方向の劣化の重要な情報を得ることができるとしている.

3.4.4 コア供試体による試験

(1) 目視観察

川西ら⁸⁾は、RABT 曲線で 1200℃まで加熱した厚さ 500mm の平板試験体からコアを採取し、コアの表面の目視観察を行い、コンクリートの変色状況から、表層部が 600～950℃の受熱を受けたと推定している（写真 3.4.4.1）。岩野⁹⁾らは、600℃で 280 分間加熱した厚さ 400mm の試験体からコアを採取したコアの目視観察を行っている。深さ 200mm 程度の範囲が劣化していると推定している（写真 3.4.4.2）。



写真 3.4.4.1 コアの外觀状況



写真 3.4.4.2 コアの外觀状況

(2) 物質の変質領域の判定

川西ら⁸⁾は、RABT 曲線で 1200℃まで加熱した厚さ 500mm の平板試験体からコアを採取し、中性化深さの測定を行っている（写真 3.4.4.3）。加熱実験より得られた最高温度分布から 500℃近傍に達する深さが 20～30mm であり、中性化深さと合致することを確認している。また、採取したコアを深さごとに切断して作成した試験片を粉砕した試料から示差熱質量分析を実施し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaCO_3 の含有率から深さ方向の受熱温度を推定している。表層部のコンクリートが 450～900℃程度の受熱を受けたと推定している。

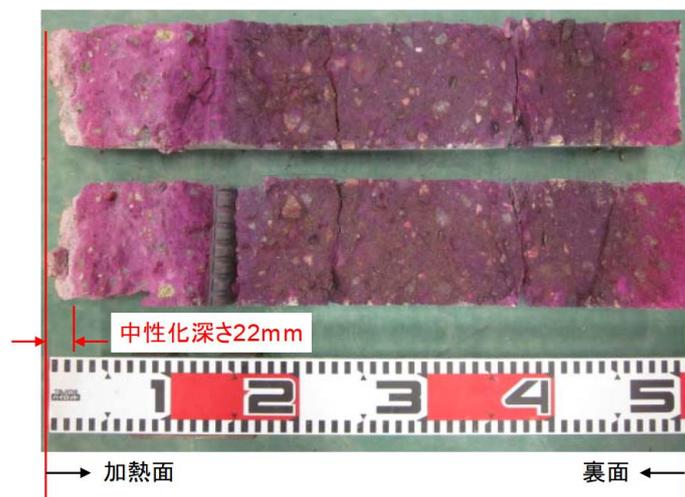
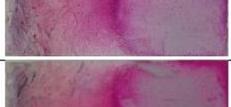


写真 3.4.4.3 中性化深さの測定結果

中性化深さの調査には、一般に JIS A 1152 に記載されている 10%の水を含むフェノールフタレイン溶液（以下、PP 溶液と呼称）が用いられるが、木野瀬ら¹⁰⁾は、水を含む PP 溶液を使用すると火災など高温加熱により生成された CaO が PP 溶液中の水と反応し、細孔溶液中にイオンとして溶解するとともに、Ca(OH)₂が再析出しアルカリ性を示すため、水を含まない PP 溶液（以下、PP(NW)と呼称）と水を含む PP 溶液（以下、PP(W)と呼称）で赤紫色の呈色反応を示す範囲が異なることや、不明瞭な呈色が生じる領域が現れることについて指摘している。150℃以上の熱を受け、ほぼ絶乾状態となった領域で呈色の濃淡が変化すること（図 3.4.4.1）、PP(NW)と PP(W)の違いや、PP 溶液の噴霧からの経過時間によって、呈色状態に変化すること（表 3.4.4.1）、消火活動などによる吸水の影響を受けた場合でも PP(NW)により約 150℃以上の受熱領域を判断できること（図 3.4.4.2）を明らかにしており、150℃以上の受熱を PP(NW)により、約 600℃以上の受熱および中性化の進行を PP(W)により判断する手法を提案している。

表 3.4.4.1 PP 溶液の呈色状態の経時変化

Time	PP(NW)	PP(W)
Before		
Immediately after		
1 min		
5 min		
10 min		
30 min		
1 hour		
12 hour		

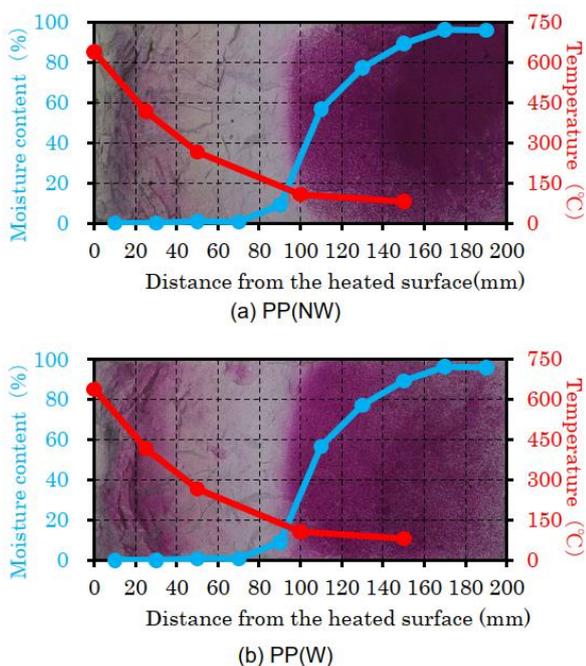


図 3.4.4.1 相対含水比率および受熱温度の結果による PP 溶液の呈色反応

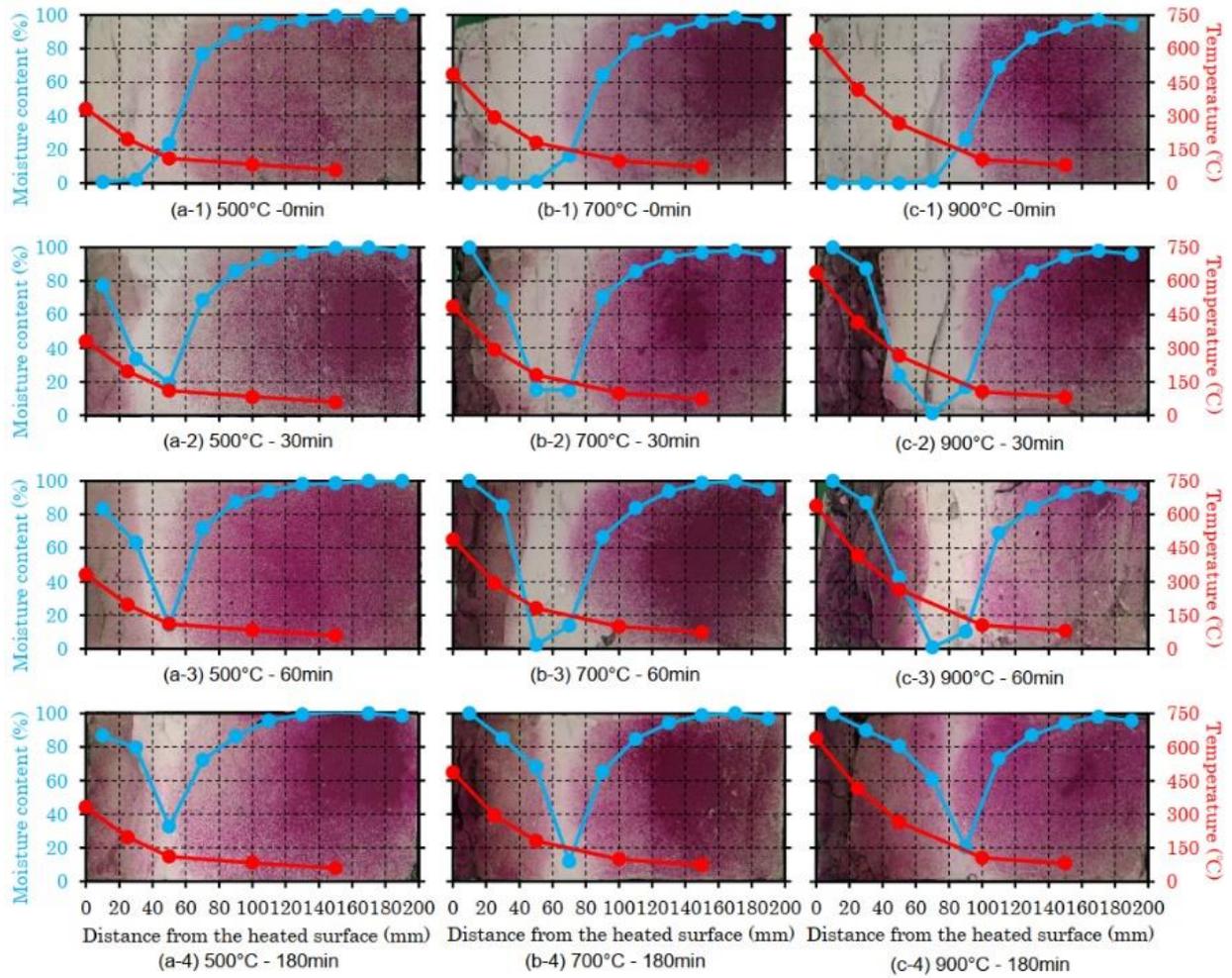


図 3. 4. 4. 2 吸水後の供試体の PP (NW) の呈色状態

(3) 物理的にコンクリートの硬さを調査

川西ら^{8),10)}は、RABT 曲線で 1200℃まで加熱した厚さ 500mm の平板試験体から採取したコアを用いて各種試験を行っている。試験体内部に埋設した熱電対により計測した受熱温度との関係や健全部との比較を行い、深さ方向の劣化の度合いを推定している。採取したコアの断面を半分に切断した供試体を用いて、小型の反発硬度を測定する機械（図 3.4.4.3）を用いて、深さ方向の強度分布を推定している。同様に採取したコアを断面に対して平行に切断し、試験片の表面を高精度で研磨した後に、四角すいのダイヤモンド圧子を試料表面に押し付け、形成された対角線の長さからビッカース硬さを算出し、同様に深さ方向の強度分布を測定している（写真 3.4.4.4）。また、直径 150mm のコアを採取し、コアの側面部を切断し、1 辺 100mm の正方形断面に切り出し、成形した供試体の両側面に発振子と受振子を接触させ、両センサ間の距離と超音波の到達時間から伝播速度を測定し、深さ方向の分布を調査している。これらの試験法の妥当性を確認するために、深さごとに採取したコアをもとに圧縮強度試験を実施し、健全部との残存強度分布が概ね一致することを確認し、表層の 50mm 程度の範囲が強度低下していると推定している（図 3.4.4.4）。また、圧縮強度試験の際に、CCD カメラを用いて側面から撮影し、供試体の圧縮ひずみの分布を画像解析により求めている（図 3.4.4.5）。

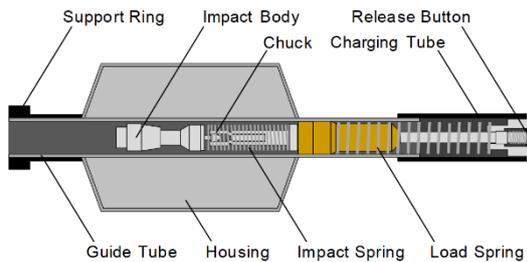


図 3.4.4.3 小型反発硬度測定器

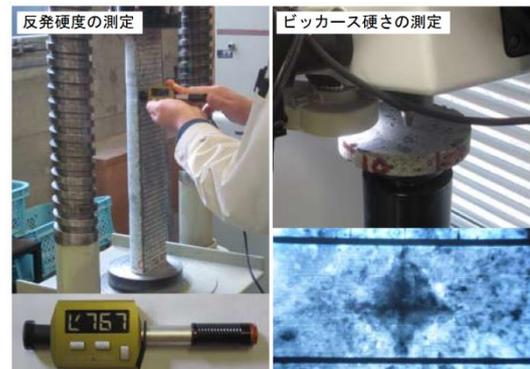


写真 3.4.4.4 反発硬度およびビッカース硬さ測定状況

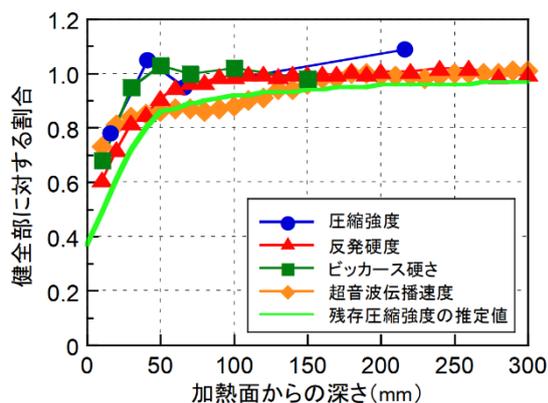


図 3.4.4.4 測定方法による健全部との比較

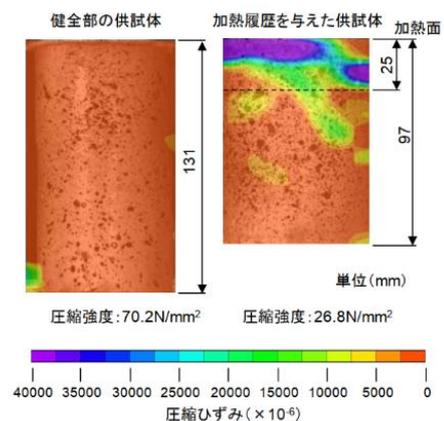


図 3.4.4.5 ひずみ分布の測定結果

山崎らは、強度の異なる直径 125mm の円柱供試体を用いて 700 および 900℃で加熱し、同様に圧縮強度試験時のコンクリート表面を高解像度カメラにより撮影し、ひずみの分布を測定している（図 3.4.4.6）。また、取得した三次元の局部ひずみデータから抽出した縦ひずみと横ひずみから体積ひずみを算出し、その挙動の

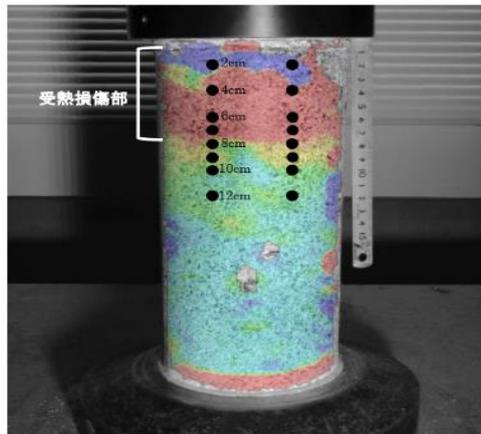


図 3.4.4.6 ひずみ分布の測定結果

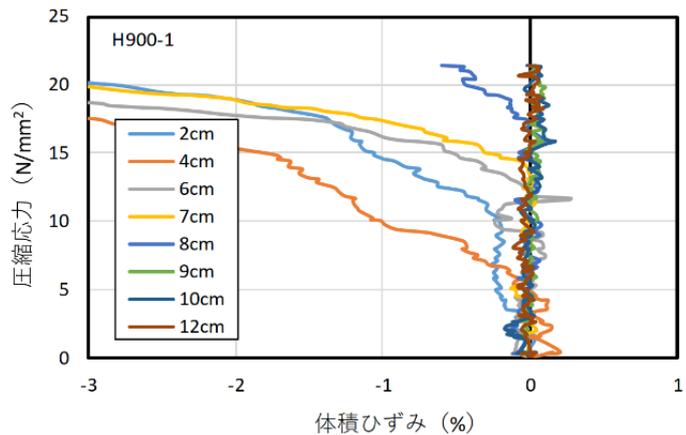


図 3.4.4.7 体積ひずみと圧縮応力の関係

変化から高温加熱によって損傷を受けた劣化深さを推定している。図 3.4.4.7 に抽出したひずみの例を示す。この例では、70～80mm までの体積ひずみが載荷中に負側に挙動しており、損傷を受けた表層コンクリートの劣化深さとして推定している。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 内田慎哉, 春畑仁一, 渡部正: 火害を受けたコンクリートの衝撃弾性波法による劣化深さの評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 1653-1658, 2018. 6
- 2) 皿井剛典, 田中徹, 清水陽一郎, 高橋輝: 孔内局部載荷試験によるコンクリート性状の把握に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 709-714, 2007. 6
- 3) 皿井剛典, 田中徹, 澤口啓希: 孔内局部載荷試験による構造物の深さ方向のコンクリート物性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1828-1833, 2012. 6
- 4) 清宮理, 安本辰也, 本田陵二, 篠田佳: トンネル内車両火災によるコンクリートの火害と劣化診断, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1129-1134, 2013. 6
- 5) 皿井剛典, 澤口啓希, 春畑仁一, 阪口明弘: 火害を受けたコンクリートの孔内局部載荷試験による劣化深さ測定および他手法との比較検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1360-1365, 2014. 6
- 6) 澤口啓希, 春畑仁一, 内田慎哉, 池田憲一: 火害を受けたコンクリートの孔内局部載荷法による劣化評価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. 1063-1068, 2017. 6
- 7) Felicetti R. "The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete." Cement and Concrete Composites, 28, 4, pp. 321-329, 2006
- 8) 川西貴士, 近松竜一, 屋代勉, 香川敦: 火害を受けたコンクリートの劣化範囲の推定方法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1171-1176, 2013. 6
- 9) 岩野聡史, 内田慎哉, 麓隆行, 小澤満津雄: 衝撃弾性波法による火害を受けたコンクリートの劣化評価方法に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 28, pp. 35-45, 2017
- 10) Kawanishi T., Hirata T. Yashiro T., Kawai K. "A Simple Method to Evaluate the Depth of Concrete Degradation by Fire" Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 17, pp. 639-647, 2019.
- 11) 山崎順二, 春畑仁一, 加藤猛, 荒木朗: 画像相関法を適用した表層コンクリートの火害劣化深さの推定, コンクリート工学論文集, Vol. 44, pp. 730-735, 2022. 6

(執筆: 川西 貴士)

3.5 高温加熱を受けた部材の力学的特性・耐久性

前節までにおいて、高温加熱を受けたコンクリート部材の損傷評価方法について整理・取りまとめを行った。しかしながら、加熱に伴う損傷分布等が把握されたとしても、その損傷を生じた部材の力学的特性および耐久性については不明な点が多い。高温加熱を受けた後の力学的特性等に関する検討はそれほど多くないのが現状であるが、実構造物が火災など高温加熱を受けた後、ただちに適切な補修・補強が実施されない場合や、それほど重篤な損傷ではなく、継続して使用される場合も想定されることから、部材としての力学的特性および耐久性について把握しておくことが重要となる。そこで本節では、高温加熱を受けたコンクリート部材の力学的特性およびその後継続使用を想定した際の耐久性に及ぼす影響に関する知見について整理を行った。

3.5.1 高温加熱を受けた部材の付着特性

コンクリート構造物が高温加熱による作用を受けると、ひび割れや剥離、爆裂などを生じる。鋼材位置においてこれらの損傷が生じると、コンクリートと鋼材の付着が低下し、部材の力学的特性に影響を及ぼすことが推察される。

図 3.5.1.1 は、常温から 600℃までの温度範囲において、高温下での付着応力の変化を示している¹⁾。この検討で用いたコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度はそれぞれ 23.9N/mm² および 383N/mm² である。この検討では、温度上昇速度を 3℃/min. とし、供試体内部温度が目標温度に達した時点で载荷を行っている。これによると、高温下での最大付着応力は、100℃で一度低下するものの、200℃では常温時と同程度まで回復し、その後、受熱温度の上昇に伴い付着応力が低下することが分かる。この挙動は、高温下での圧縮強度の変化と酷似しており、圧縮強度の低下が最大付着応力に影響を及ぼすと考えられる。また、文献 1) では、引抜試験初期の付着剛性についても示されており、温度上昇に伴い付着剛性が低下すること、および、400℃から 500℃の間でその低下が著しいことが報告されている。これはつまり、高温加熱により付着性能が低下し、部材の剛性低下、たわみの増大が懸念されることを示唆するものである。

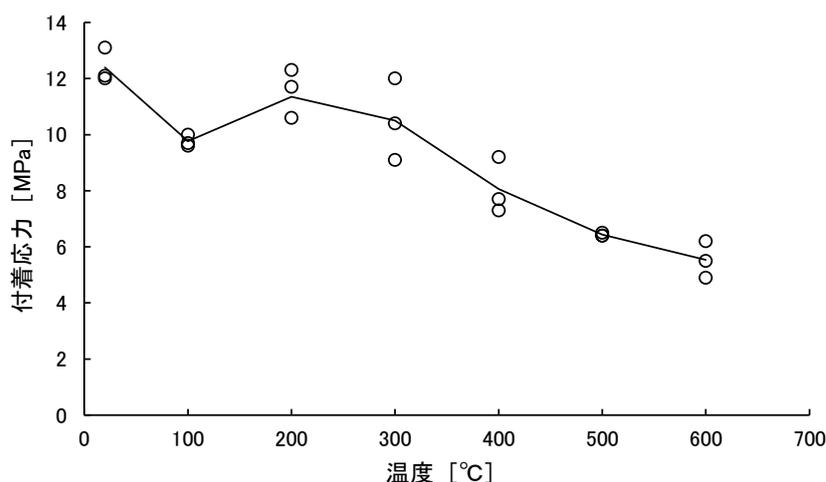


図 3.5.1.1 高温下での付着応力度 (文献 1) を基に作成)

図 3.5.1.2 は、プレテンション方式の PC 部材が高温加熱を受けることを想定し、高温加熱が PC 鋼材の付着特性について検討を行った結果である²⁾。ここでは、コンクリートの設計基準強度を 50N/mm²、PC 鋼材径およびかぶりを実験要因として、700℃、30 分間の加熱を受けた後に引抜試験を実施している。図 3.5.1.2 より、PC 鋼材の径やかぶりによらず、高温加熱を受けることにより最大付着応力が低下することが確認される。

ただし、かぶりが大きい場合、付着応力の低下が小さくなる傾向もまた確認される。これは、加熱条件が一定であるため、かぶりが大きいほど、鋼材位置における受熱温度が低くなり、鋼材位置における損傷が相対的に減少するためと考えられる。換言すると、かぶりが大きく取られていても、鋼材位置における温度がある一定以上になると、付着応力が低下し、プレストレスの減少、部材としての剛性・耐力の低下などが生じることが懸念される。

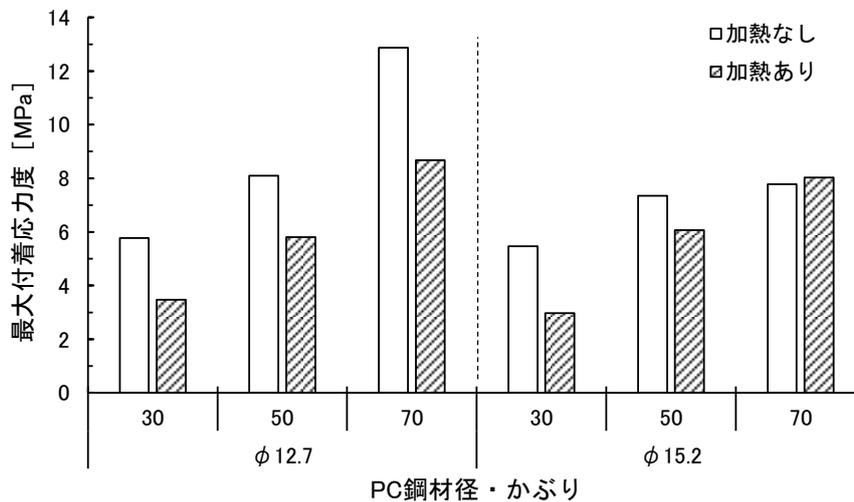


図 3.5.1.2 PC 鋼材径とかぶりの異なるコンクリートの加熱後の付着応力（文献 2）を基に作成）

3.5.2 高温加熱を受けたコンクリート部材の力学的特性

(1) プレストレストコンクリートはり部材

横山ら³⁾は、プレテンション PC はり部材が高温加熱を受けた際の残存プレストレスおよび耐荷特性の把握を目的とした検討を行った。ここでは、図 3.5.2.1 に示すかぶりの異なる供試体（設計基準強度：40N/mm²，全長：3500mm）を用いて、桁下面中央 3000mm を 30 分加熱した後、載荷試験を行っている。加熱は最高温度を 1100℃および 900℃に設定し、1100℃の火災曲線は Eurocode 規定の油火災を対象とした HC 曲線を、900℃の火災曲線は HC 曲線の近似曲線を使用している。

加熱後の外観性状として、加熱面全体にひび割れが発生し、直接加熱を受けていない側面にまで損傷が及んでいることおよび、高い温度履歴を受けるほど、加熱面のひび割れが細かく、上面側へ進展するとされている。また、PC 鋼材のひずみ計測より、より高い温度履歴を受けるほど、プレストレスの減少率が大きいことが示されている（表 3.5.2.1）。加熱後の曲げ載荷試験結果より、耐荷力残存率は、かぶりが小さいほど低く、かぶり 70mm では耐力の低下は認められない（表 3.5.2.2）。さらに、荷重－中央変位関係より、高温加熱を受けることにより、初期剛性が大きく低下し、その傾向はかぶりが小さいほど顕著であること、かぶり 70mm については、耐力の低下は認められないものの、初期剛性の低下が確認され、加熱温度の違いによる差異は認められないことが報告されている。つまり、かぶりが確保されていれば、初期剛性は低下するものの、耐荷力の低下は抑制することが可能であると考えられる。

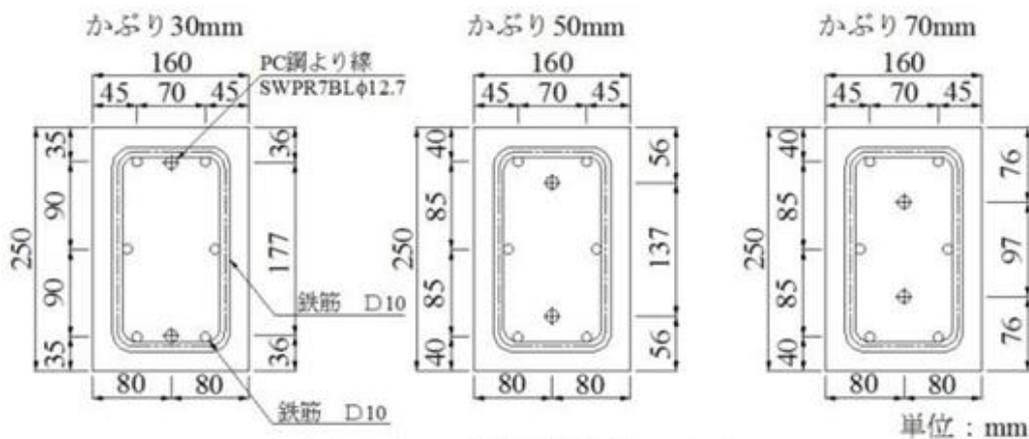


図 3.5.2.1 供試体断面図³⁾

表 3.5.2.1 最高受熱温度とプレストレス減少率³⁾

供試体名	最高受熱温度 (°C)			プレストレス減少率 (%)
	30mm位置	50mm位置	70mm位置	
HC900-30	239 (44)	—	—	— ^{*)}
HC900-50	280 (38)	183 (56)	—	2.7
HC900-70	335 (39)	182 (74)	138 (87)	5.7
HC1100-30	300 (41)	—	—	— ^{*)}
HC1100-50	326 (41)	196 (68)	—	7.5
HC1100-70	406 (40)	219 (69)	166 (92)	8.8

(注) 括弧内は最高受熱温度に達した時間 (分) を表す。

^{*)} 応力計破損のため、算出不能。

表 3.5.2.2 曲げ耐力計算値および実測値³⁾

供試体名	曲げ耐力計算値 P_{max} (kN)	最大荷重実測値 P_{max} (kN)	Nシリーズ に対する 耐力比	最大荷重 実測値比 P_{max}/P_{max}
N-30	76.8	90.3	—	1.18
N-50	68.9	87.6	—	1.27
N-70	62.9	81.2	—	1.29
HC900-30	76.8 ^{*)}	79.0	0.87	1.03
HC900-50	68.9 ^{*)}	79.0	0.90	1.15
HC900-70	62.9 ^{*)}	82.9	1.02	1.32
HC1100-30	76.8 ^{*)}	76.6	0.85	1.00
HC1100-50	68.9 ^{*)}	78.0	0.89	1.13
HC1100-70	62.9 ^{*)}	78.7	0.97	1.25

^{*)} 曲げ圧縮域のコンクリートは高温劣化していないため、計算にはNシリーズのコンクリート強度を用いている。

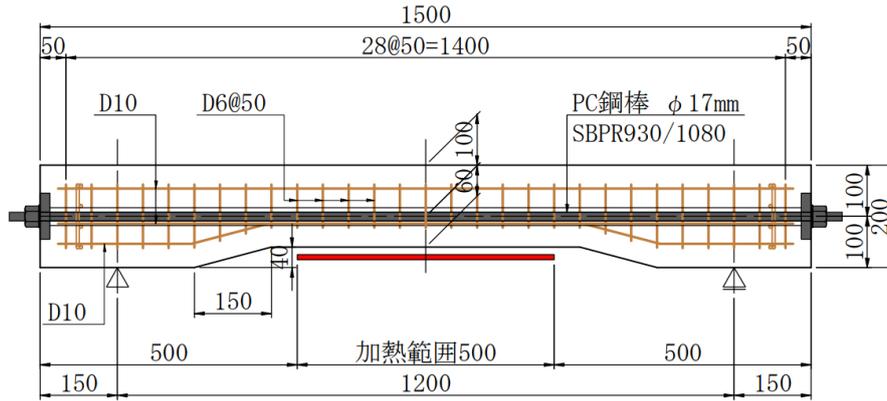


図 3.5.2.2 試験体概要⁴⁾

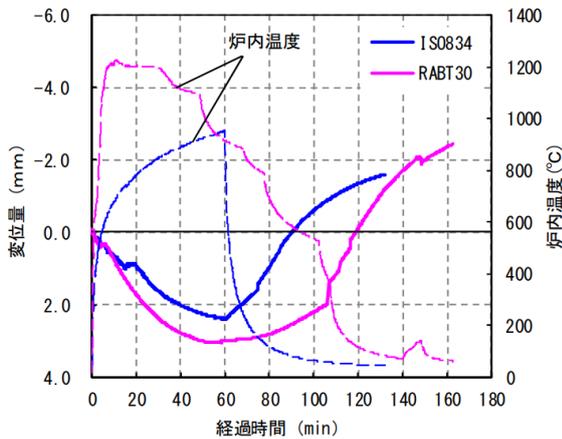


図 3.5.2.3 支間中央部の変位挙動⁴⁾

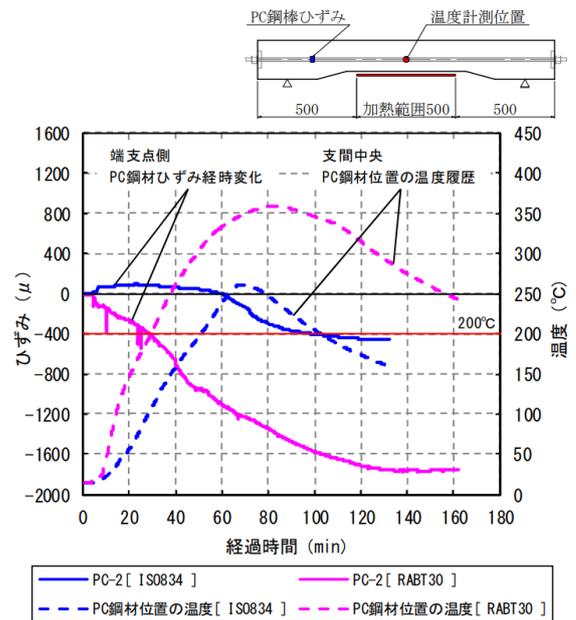


図 3.5.2.4 PC 鋼材ひずみの経時変化と受熱温度履歴⁴⁾

藤本ら^{4), 5)}は、プレストレストコンクリート部材の爆裂挙動および耐荷性に関する検討結果を報告している。文献4)では、定着部が高温加熱による損傷をうけない状態（つまり、定着部が健全な状態）のポストテンション方式のPCはり（図 3.5.2.2、圧縮強度：86.3N/mm²）を対象として、IS0834 標準曲線の 1 時間加熱および RABT30 加熱曲線により一面加熱を実施し、加熱に伴うはり中央変位の経時変化を計測している（図 3.5.2.3：図中縦軸の正の値は下反りの変形を、負の値は上反りの変形を示す）。これは、加熱に伴いプレストレスが減少する挙動を示す（図 3.5.2.4）ことや、加熱・爆裂に伴う PC はり下面の断面損失に起因する PC 鋼材偏心量の増加や断面剛性の低下によるものと考察されている。

文献 5) では、加熱後の常温下での静的曲げ載荷試験による耐荷性能について実験的検討を行っている。初期剛性が大きく低下し（図 3.5.2.5、載荷時のひび割れ幅は、加熱により生じたひび割れが、載荷直後から開きはじめ（図 3.5.2.6）、最大荷重は 10～16%程度低下（図 3.5.2.7）、鉄筋降伏時荷重は 20～33%程度低下する（図 3.5.2.8）ことを示している。つまり、PC 鋼材の受熱温度が PC 鋼材強度の低下が生じない範囲

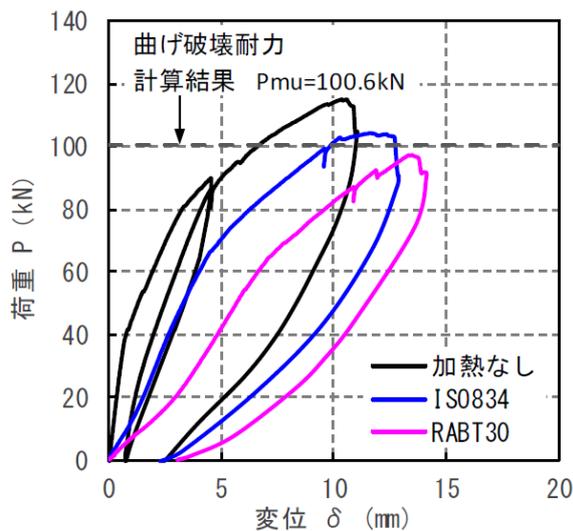


図 3.5.2.5 荷重－変位の関係⁵⁾

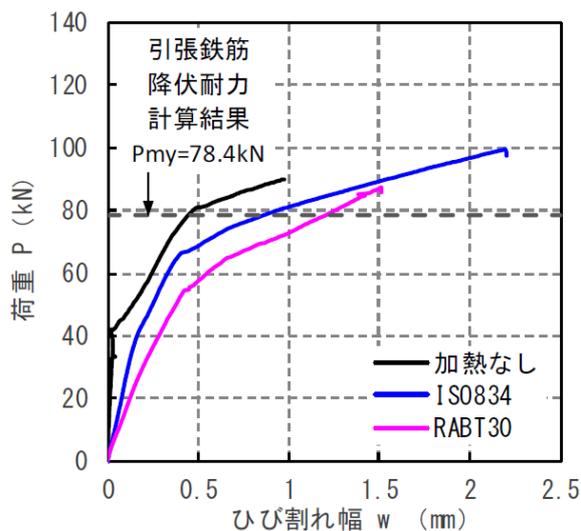


図 3.5.2.6 荷重－ひび割れ幅の関係⁵⁾

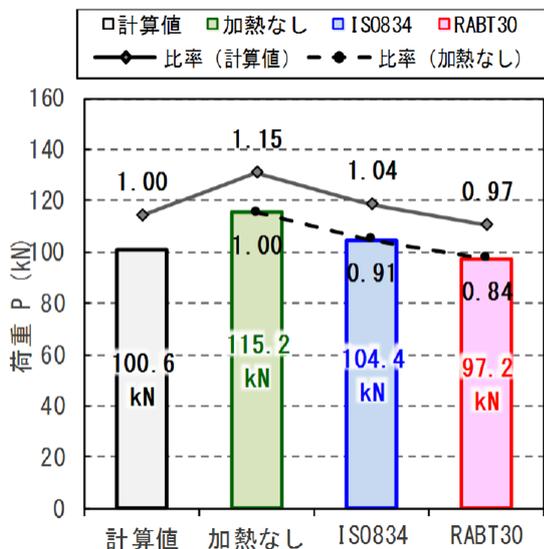


図 3.5.2.7 最大荷重と曲げ耐力の比較結果⁵⁾

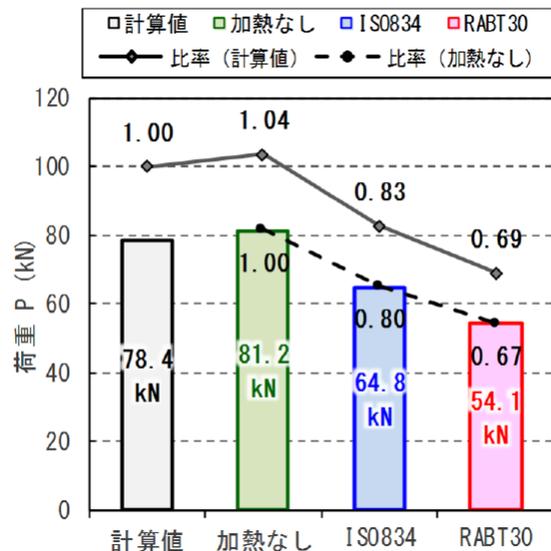


図 3.5.2.8 引張鉄筋降伏荷重と降伏耐力の比較結果⁵⁾

であれば、PC 部材の耐力に大きな低下は生じないが、コンクリートの剛性低下や爆裂による断面欠損の影響などにより導入プレストレス量が減少するため、降伏耐力が低下する可能性がある」と述べられている。また、爆裂や加熱の影響に伴う導入プレストレスの減少を考慮することにより、火災などの高温加熱を受けた後の PC はりの耐力を評価可能であることを示している。

橋田ら⁶⁾は、PP あるいは Jute 繊維混入型 PC はりを対象として、加熱後の残存曲げ耐力について検討を行うとともに、加熱・载荷後の PC はりに対してポリマーセメントモルタル（以下、PCM）を用いた断面修復後の力学的特性を検討している。なお、コンクリートの圧縮強度はそれぞれ、 47.0 N/mm^2 、 55.5 N/mm^2 である。

図 3.5.2.9 は、加熱後の試験面の状況および爆裂深さのコンター図として示したものである。繊維を混入していない供試体 (Control) では、全域にわたって爆裂が生じ、内部のスターラップが露出しているのに対して、繊維を混入することで爆裂が抑制されていることが分かる。特に、Jute 繊維を用いた場合、表面に亀甲状のひび割れが確認されるものの、爆裂が生じていないことが確認される。PC 構造は、導入されるプレストレスの影響により、RC 構造に比べて、高温加熱時に爆裂を生じやすいことが多く報告されているが、繊維

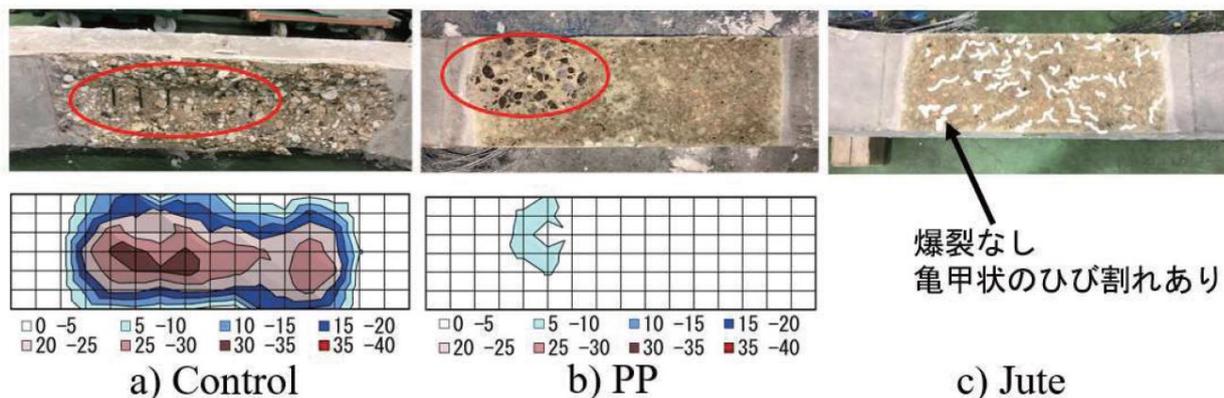


図 3.5.2.9 加熱面の状況およびコンター図 (単位: mm) ⁶⁾

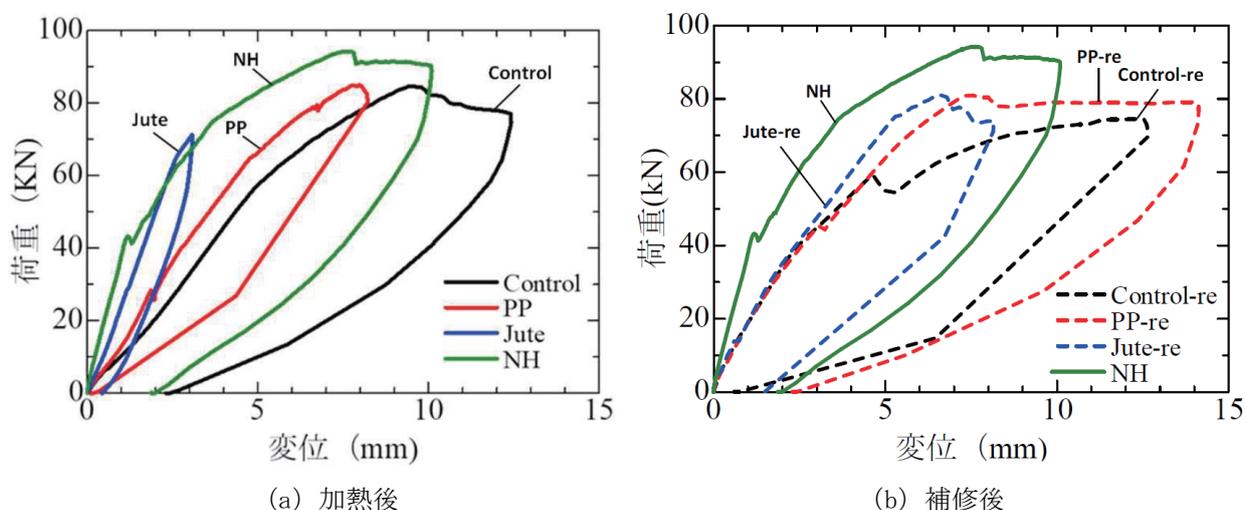


図 3.5.2.10 荷重-変位関係 ⁶⁾

を用いることでPC 構造であっても爆裂を抑制可能であることが示されている。また、加熱時のPC 鋼材ひずみの経時変化より、いずれも加熱に伴いPC 鋼材のひずみが減少するものの、繊維を混入していないものほどの減少量では無く、プレストレスの減少も抑制可能であることが示されている。

加熱後あるいは断面補修後の曲げ試験による荷重-変位関係(図 3.5.2.10)より、加熱を受けた供試体は、加熱を受けていないものよりも初期剛性が低下し、特に、加熱による損傷程度が大きいものほど初期剛性の低下が大きく、また鉄筋降伏荷重が低下することが示されている。さらに、加熱損傷を受けた後PCMにより断面修復した場合、初期剛性は僅かであるものの回復する傾向を示す一方で、終局耐力の回復に及ぼす効果は大きくないことが報告されている。

(2) 供用時を模擬した開削トンネル

中井ら^{7), 8)}は、開削トンネル内での火災を想定し、供用状態(正曲げ、負曲げ)を模擬した加熱および載荷試験を行い、耐荷性能を検討している。開削トンネルの頂版部材を想定した検討⁷⁾では、供試体寸法: 高さ 500mm×幅 1160mm×長さ 6000mm、主筋の純かぶりを 80mm とし、有機繊維混入による影響を検討するため、ポリプロピレン繊維を 1kg/m³ 混入したものと無混入ものを用いている。加熱時の載荷荷重は実際の開削トンネルの頂版下側主筋に作用する引張応力レベルとなるよう載荷し、RABT (60 分) 加熱曲線による一面加熱を

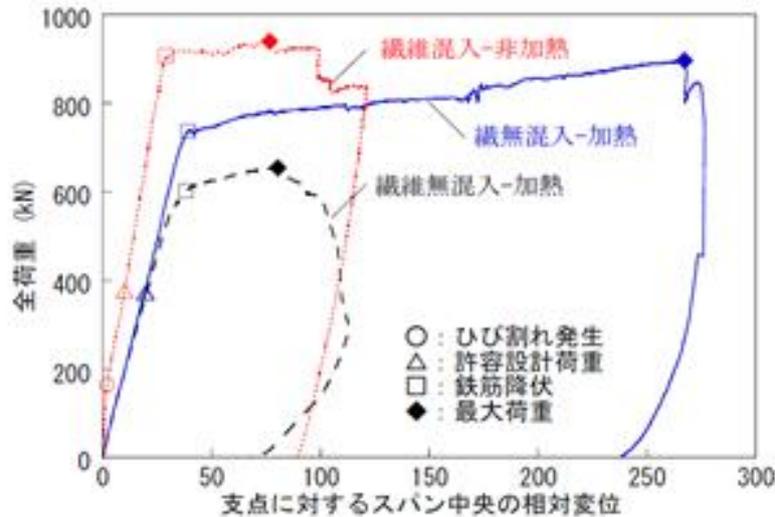


図 3.5.2.11 負曲げ載荷状態で加熱を受けた部材の荷重－変位関係⁸⁾

行っている。なお荷重は、加熱終了後 180 分経過まで荷重を保持している。繊維混入により爆裂が抑制され、これに伴い、繊維を混入した試験体のたわみ量は、繊維を混入していないものと比較して約 50%程度抑制されたことが示されている。また、荷重－スパン中央変位関係より、最大荷重は加熱の有無による影響は小さいことが報告されている。これは、鉄筋の受熱温度が 500℃程度であり、引張強度・降伏点が低下するほどの温度に達していないこと、圧縮側コンクリートの温度上昇が小さく、圧縮強度が低下しなかったことによると述べられている。剛性は、主筋降伏までの領域では、加熱により剛性低下が認められるものの、主筋降伏荷重以上ではほぼ同等であり、主筋降伏荷重もほぼ等しくなっていることが示されている。

爆裂を生じやすいとされる圧縮を受ける部材（負曲げ載荷状態）を想定した検討⁸⁾において、繊維無混入の場合には、圧縮鉄筋が露出するなど、爆裂による大きな断面欠損が認められ、引張力作用状態での加熱試験⁷⁾と比較して、圧縮を受ける部分が加熱を受けると、爆裂の程度が著しくなる一方で、繊維を混入することによる爆裂抑制効果が確認されている。また、繊維を混入することにより、加熱時の試験体のたわみ量が、50%程度抑制されることが示されている。これは、爆裂による断面欠損および高温加熱を受けた部材の強度低下によって中立軸が移動したためと考察されている。荷重－変位関係（図 3.5.2.11）より、加熱を受けた試験体は加熱時に生じたひび割れや材料劣化のために初期剛性の低下が認められた。引張鉄筋降伏荷重および最大耐力は、繊維を混入したものが繊維無混入のものよりも大きい値を示すことが示されている。ただし、繊維を混入した試験体の加熱後（鉄筋降伏後）の変形性能が大きいため、繊維混入試験体の加熱の有無による差はわずかであるとされている。

(3) RC 床版の疲労

富山ら⁹⁾は、高温加熱を受けたコンクリート床版の耐疲労性状を評価するため、800×800×100mm の小型床版を用いて、上面あるいは下面を IS0834 加熱曲線により 30 分および 60 分加熱を行った後、静的耐力および疲労試験を実施した（表 3.5.2.3）。加熱後の供試体試験面の損傷状況として、60 分加熱、30 分加熱ともに、微細ひび割れが生じ、特に上面を 60 分加熱した場合には爆裂が生じ、断面が欠損していた。

床版の静的載荷試験では、加熱無しと比較して、上面・下面加熱は破壊時の最大荷重が 25%程度低下した（図 3.5.2.12）。また、床版の疲労試験においては、60 分加熱を行った場合、加熱無しは 94 万回に対して、

表 3.5.2.3 文献9)における実験因子

No.	Phase	Type	加熱条件	加熱曲線	静的載荷試験	疲労試験	疲労試験の荷重
1	Phase1	Control1	無し	-	1	1	-
2		LH1	下面	ISO834-60min	1	1	Pmax Control1の60%
3		UH1	上面	ISO834-60min	1	1	Pmax Control1の60%
4	Phase2	Control2	無し	-	1	-	-
5		LH2	下面	ISO834-30min	-	1	Pmax Control2の60%
6		UH2	上面	ISO834-30min	-	1	Pmax Control2の60%

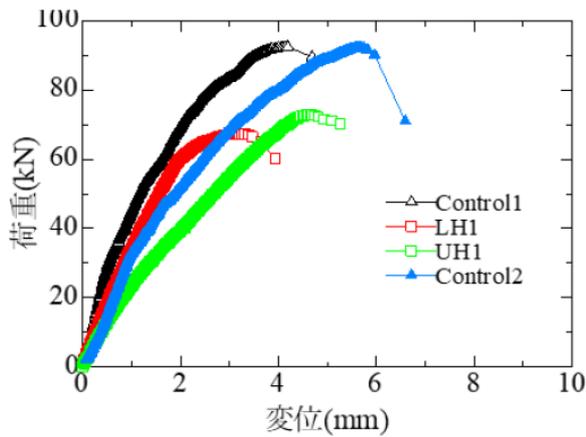


図 3.5.2.12 荷重-変位関係 (静的載荷)⁹⁾

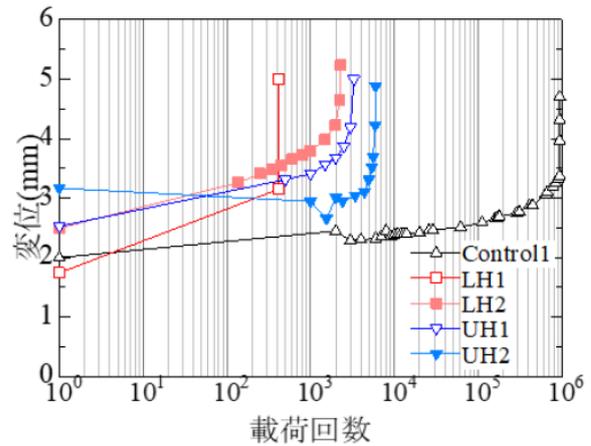


図 3.5.2.13 変位と載荷回数との関係 (疲労試験)⁹⁾

下面加熱・上面加熱はそれぞれ 420 回、3300 回と耐疲労性が大幅に低下し、30 分加熱を行った場合、下面加熱・上面加熱それぞれ 2300 回、6000 回となり、加熱時間が長いほど耐疲労性は低下することが示されている (図 3.5.2.13)。加熱面の違いに着目すると、下面加熱の方が上面加熱よりも疲労回数が少ない。つまり、床版の耐疲労性に及ぼす高温加熱の影響は、加熱時間に加え、床版下面の加熱であると考えられる。なお、載荷による破壊性状は加熱の有無、加熱面の違いによらず、いずれも押し抜きせん断破壊であり、破壊性状に大きな違いは確認されていない。

3.5.3 部分的または一面加熱を受けた RC はり部材の力学的特性および耐久性

(1) 部分的加熱を受けた RC はり部材

迫井ら¹⁰⁾は、100×150×1500mm の RC はり部材（圧縮強度：51.6N/mm²）に対して、図 3.5.3.1 に示すように、部分的（①等曲げ区間の引張領域、②等曲げ区間の圧縮領域、③せん断領域の下面加熱、④せん断領域の側面加熱）に高温加熱を受けた場合の損傷評価および耐荷性能について検討を行った。加熱後の超音波伝搬速度分布より、加熱を受けたものは加熱範囲を中心として低い超音波伝搬速度が確認される一方で、加熱領域の違いによらず、加熱中心から 300mm 程度離れた箇所では、加熱無しにおける超音波伝搬速度と同程度の値を示すことが報告されている。また文献 10) では、加熱後の供試体側面において測定した表層透気係数について検討も行われており、加熱箇所付近では著しく大きな表層透気係数を示すものの、加熱箇所からの距離が離れるほど、表層透気係数は小さな値を示し、十分離れた箇所では加熱無し供試体と同程度の表層透気係数を示すことが報告されている。表層透気係数とその測定位置における超音波伝搬速度との関係には、高い相関関係が認められることから、高温加熱に伴う損傷範囲の評価・推定において、表層透気試験を利用可能であるとしている。これらの RC はりに対して、静的載荷試験により得られた荷重—変位曲線が図 3.5.3.2

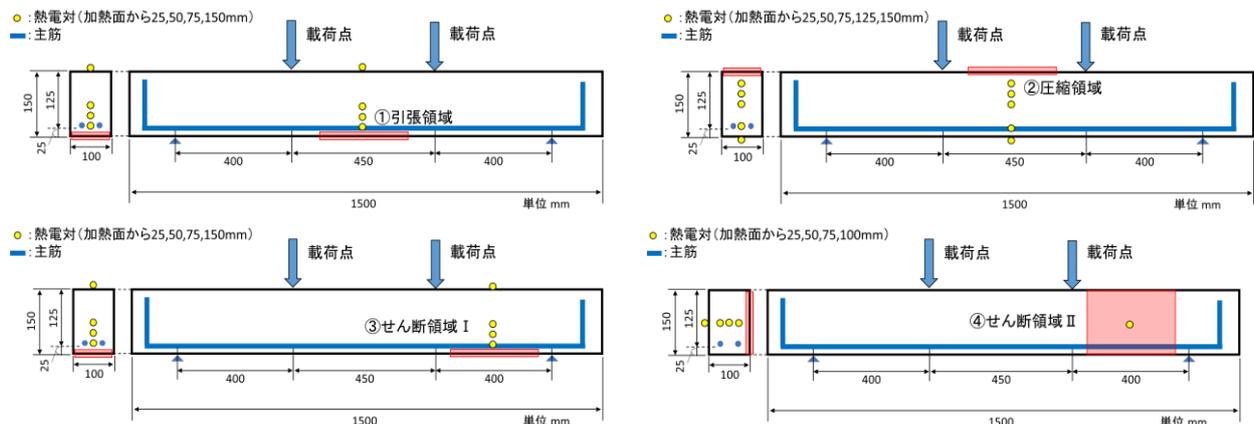


図 3.5.3.1 供試体・加熱範囲概要¹⁰⁾

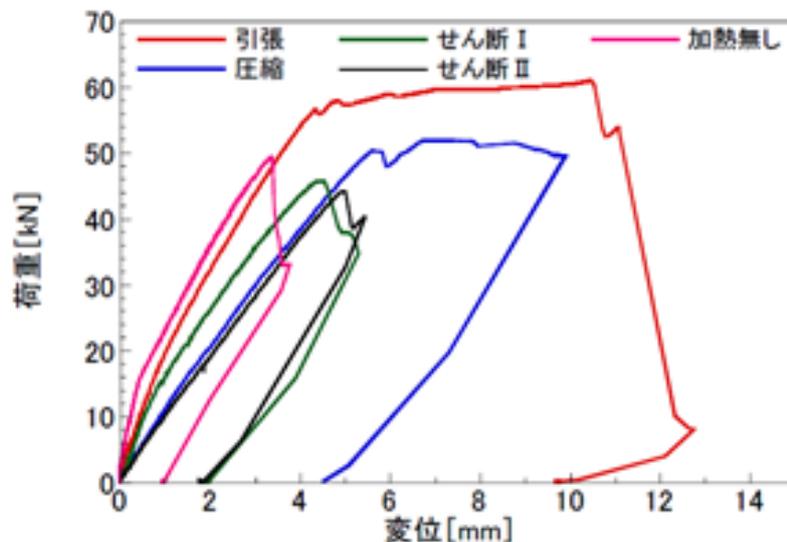


図 3.5.3.2 部分的加熱を受けた RC はりの荷重—変位¹⁰⁾

である。加熱無しに対して、引張領域が加熱を受けた場合の最大荷重は約 20%程度増加した。また圧縮領域が加熱を受けた場合、最大荷重は加熱無しと同程度であるものの、剛性が低下することが示されている。せん断領域が加熱を受けた場合は、加熱箇所の違い（下面／側面）による影響は少なく、いずれも 10%程度低下しかつ、剛性が低下することが示されている。

(2) 一面加熱を受けた RC はり部材

阿久津ら¹¹⁾は、角柱供試体（圧縮強度：30.1N/mm²）を用いて、高温加熱に伴う耐荷力および、加熱後の塩水浸せきによる鉄筋腐食とそれに伴う耐荷力について検討を行った。加熱は電気炉を用いて、1°C/min. で 500°Cまで加熱し、最高温度を 5hr 保持した後、自然冷却としている。その後、一部の供試体を 10%NaCl 溶液に 28 日間浸せきし、塩分浸透、鉄筋腐食性状および耐荷力を測定している。表 3.5.3.1 に、鉄筋降伏時荷重、終局耐力および破壊形態を示す。加熱無しに対して、加熱のみを行った場合、破壊形態は斜め引張破壊（せん断破壊）となり、終局耐力が約 40%程度低下することが示されている。塩水浸せきのみを行った場合は、曲げ引張破壊となり、鉄筋降伏時荷重および終局耐力ともに、加熱無しの場合よりもやや高い値を示した。また加熱後に塩水浸せきを行った場合、破壊形態は曲げ引張破壊であり、鉄筋降伏時荷重および終局耐力ともに、加熱無しと同程度の値を示した。なお、塩水浸せきの場合、鉄筋の一部に腐食が認められる程度である一方で、加熱後に塩水浸せきを行った場合は、鉄筋全体に渡って腐食が確認されている。加熱後に塩水浸せきを行った場合、加熱により耐力の低下がある一方で、塩水浸せきによる水分供給によって再水和が生じたことで、加熱無しと同程度の耐力を示したと考察されている。また、鉄筋が腐食しても、ある程度の範囲では、腐食生成物の膨張圧によって、耐力の低下が抑制されたと考察されている。

表 3.5.3.1 高温加熱および塩水作用を受けたはりの破壊挙動（文献 11）を基に作成）

条件	降伏時荷重	終局耐力	破壊形態
加熱無し	48.0	54.0	曲げ引張破壊後に圧壊 鉄筋降伏後にせん断 斜め引張
加熱	—	29.1	斜め引張
塩水浸せき	50.4	60.0	曲げ引張破壊後に圧壊
加熱+塩水浸せき	47.3	54.9	曲げ引張破壊後に圧壊

高橋ら¹²⁾は、100×150×1500mm の RC はり（圧縮強度 46N/mm²）を用いて、加熱の有無、加熱領域（圧縮側／引張側）、スターラップの有無を要因として、加熱および加熱後の塩水浸せきが耐荷力に及ぼす影響について検討を行った。加熱領域は、はり中央 900mm とし、RABT30 加熱曲線を用いて、5 分で 1200°Cまで昇温、25 分保持した後に冷却を行っている。図 3.5.3.3 は、加熱後に塩水噴霧を行ったはりの塩化物濃度分布の一例である。図中の横軸は、塩水噴霧面からの深さで示しており、鉄筋位置は圧縮側加熱および加熱無しでは 125mm、引張側加熱では 25mm となる。これより、加熱を受けることにより、塩化物イオンの浸透が容易となり、内部での濃度が大きな値を示すことが分かる。また同一部材から鉄筋をはつり出し、腐食減少率を求めた結果が図 3.5.3.4 である。圧縮側加熱を行ったものは、ほぼ腐食が認められず、腐食減少率も加熱無しと同程度である一方で、引張側加熱を行ったものは 2 倍程度の腐食減少率となることが示されている。

これらに対する荷重－変位関係を図 3.5.3.5 に、破壊形態・初期剛性・終局耐力の一覧を表 3.5.3.2 に示す。Control 供試体に対して、加熱無しのケースは、最大荷重に多少の差が認められるものの、ほぼ同様の

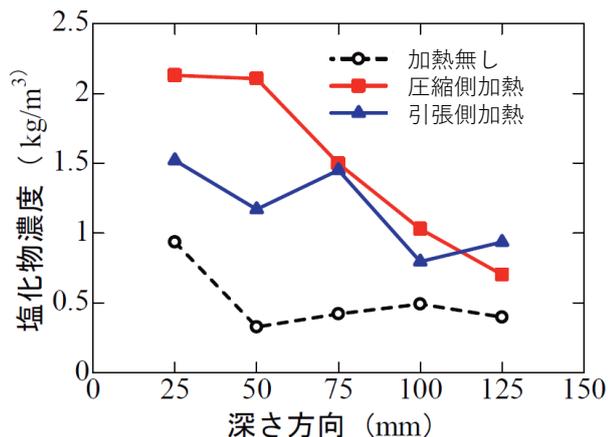


図 3.5.3.3 加熱後に塩水作用を受けたはりの塩化物濃度分布の一例¹²⁾ (一部加筆)

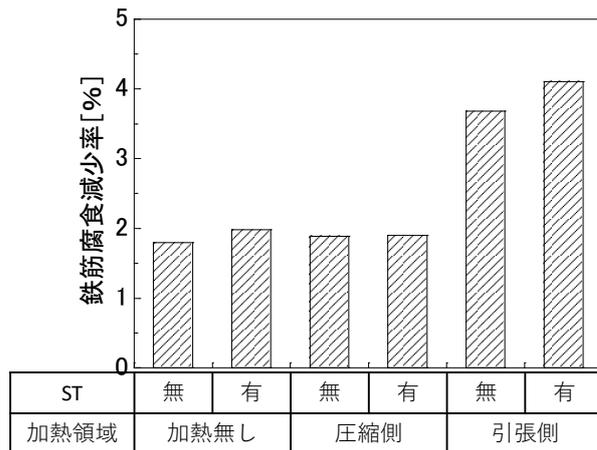
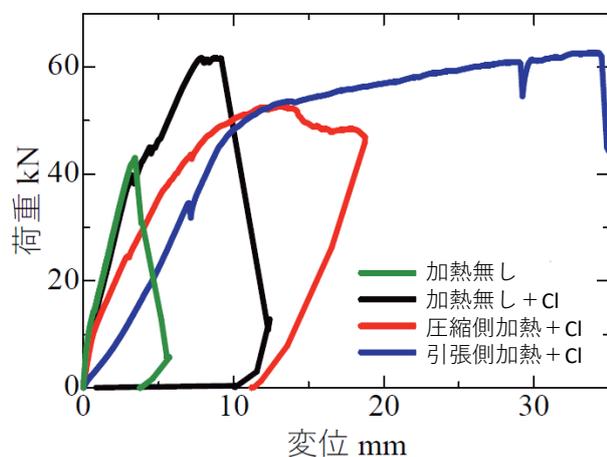
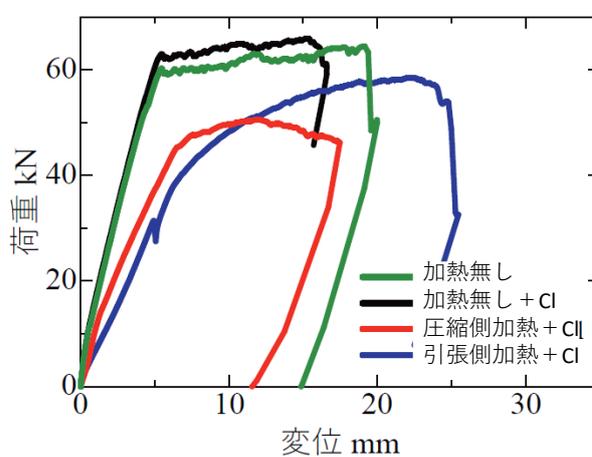


図 3.5.3.4 鉄筋腐食減少率 (文献 12) を基に作成)



(a) スターラップ無し



(b) スターラップ有り

図 3.5.3.5 加熱後に塩水作用を受けた RC はりの荷重-変位関係¹²⁾ (一部加筆)

表 3.5.3.2 初期剛性, 終局耐力および破壊形態 (文献 12) を基に加筆)

加熱の有無 (加熱領域)	塩分浸透 の有無	スターラップ: 無			スターラップ: 有		
		初期剛性	終局耐力	破壊形態	初期剛性	終局耐力	破壊形態
無	無	23.0	49.5	斜め引張	20.5	64.6	圧壊
	有	20.0	61.6	斜め引張	21.5	65.9	圧壊
圧縮側	有	15.5	50.6	せん断圧縮	10.9	47.2	圧壊
引張側		3.9	62.6	圧壊	6.4	58.4	圧壊

挙動を示す。一方、加熱を受けたものについて、加熱領域の違いによらずいずれも初期剛性が低下することが確認される。最大荷重については、圧縮側加熱を受けた場合、低い値を示す一方で、引張側加熱を受けた場合、降伏後の変形が大きく、最終的には加熱無しと同程度あるいはやや低い値を示すことが分かる。

文献 13) では、文献 12) と同一寸法の供試体を用いて、同一条件による加熱を受けた後の凍結融解作用による影響を検討している。凍結融解条件は、試験面を桁底面(引張側)として、+20℃から-20℃、12時間/サイクルとしている。また、試験溶液として 3%NaCl 溶液を用いている。凍結融解作用開始当初は、試験面

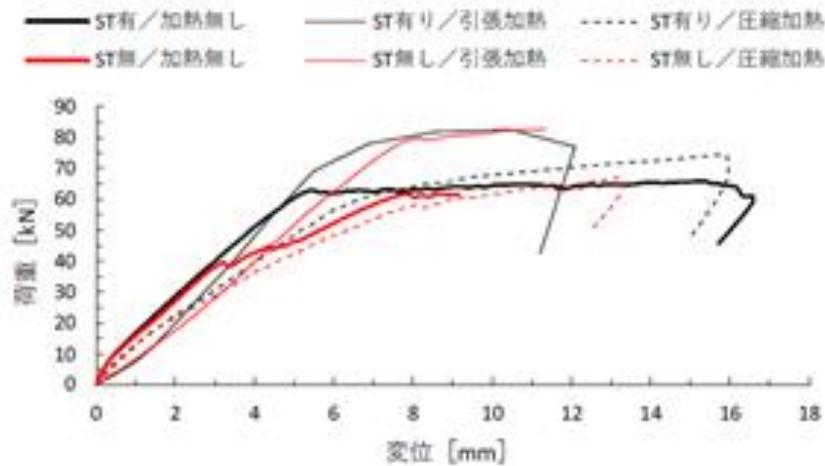


図 3.5.3.6 加熱後に凍結融解作用を受けた RC はりの荷重－変位関係¹³⁾

が 5～10mm 程度浸かるように容器内に供試体を設置した状態で凍結融解を与えていたが、スケーリングやひび割れなど顕著な劣化損傷が確認されなかったことから、試験途中より、桁上面から塩水を散水する方法に変更し、凍結融解作用を与えたとされている。図 3.5.3.6 に、加熱後に凍結融解作用を受けた RC はりの載荷試験における荷重－変位関係を示す。これより、加熱を受けたものは、加熱無しと比較して、加熱領域の違いによらず、初期剛性が低下することが確認された。一方で、最大荷重は、加熱領域の違いによらずいずれも、加熱前と比較して大きな値を示すが、特に引張側が加熱を受けると、加熱前よりも 30%程度大きな値を示すことが確認されている。

図 3.5.3.7 は、150×200×1200mm の RC はりを用いて、引張側中央 900mm を加熱領域として、ISO834 加熱曲線による加熱継続時間の違い（加熱無し、15 分加熱、30 分加熱、60 分加熱）が耐荷性能に及ぼす影響について検討を行った結果である。これより、加熱継続時間に違いによらず、最大荷重は同程度の値を示す一方で、初期剛性は、加熱時間が長いほど小さな値を示す傾向にあることが確認される。なお、30 分加熱にお

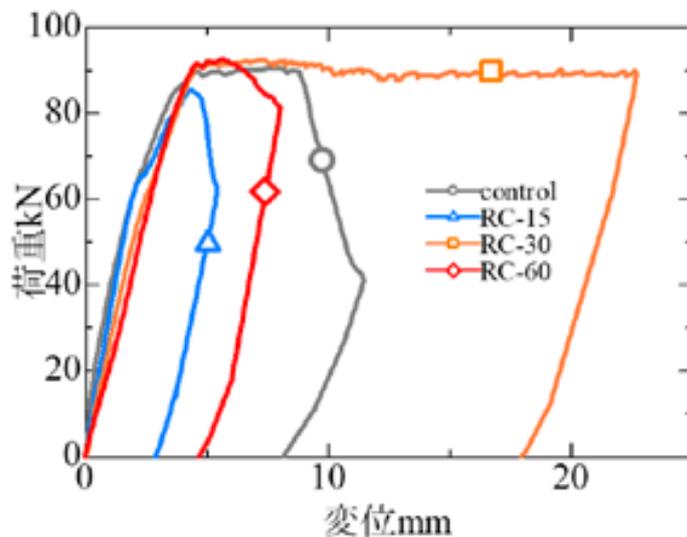


図 3.5.3.7 加熱継続時間が異なる RC はりの荷重－変位関係

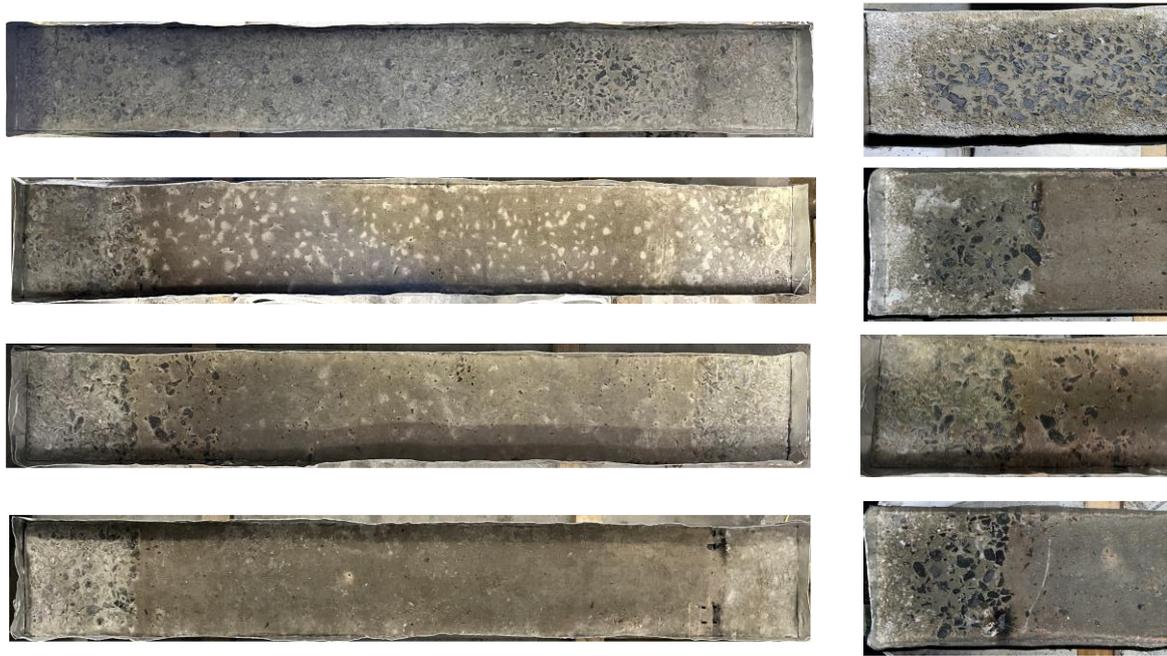


図 3.5.3.8 火害後に凍結融解作用を受けた RC はりの表面性状（上から加熱無し・15 分加熱, 30 分加熱, 60 分加熱。左列：試験面全景, 右列：桁端部）¹⁴⁾

いて、変位が大きく増大している点について、発生するひび割れの方向の違いが変位の増大に影響するとされている。また、迫井ら¹⁴⁾は、使用材料・配合・寸法および加熱条件が図 3.5.3.7 と同一の RC はりを用いて、加熱後の凍結融解に対する耐久性について検討を行っている。図 3.5.3.8 は、加熱後の供試体に対して凍結融解作用を与えた後の試験面（加熱面）の状況である。図 3.5.3.8 より、試験面内で直接加熱を受ける領域においては、加熱時間が短いほど凍結融解作用による劣化が生じて、加熱時間が長いと直接加熱を受ける領域ではほぼ生じていない一方で、むしろ、直接加熱を受けない領域（桁端部）において著しくなることが確認された。これは、加熱を受ける領域では加熱に伴う内部損傷によって、散水された水分が滞留しないものの、同一試験面内でも直接加熱を受けない領域では比較的加熱による損傷が少なく、水分が表層に滞留するために凍結融解による劣化を受けやすい状況にあるためと推察される。ただしこの理由によれば、直接加熱を受ける領域ではより内部まで塩水が浸透するため、内部において塩化物イオン濃度の増加およびそれに伴う内部鉄筋の腐食のリスクが高まることが懸念される。なお、文献¹⁴⁾において、塩化物イオン濃度分布や鉄筋腐食、また、火害および凍結融解作用後の力学的特性については検討が行われておらず、これらの点については今後の更なる検討が望まれる。

図 3.5.3.9 には、既往文献^{10), 15) ~17)}で報告されている高温加熱を受けた RC はりの初期剛性比と終局耐力比の関係を示す。初期剛性、終局耐力いずれも、各検討における加熱無しの結果を基準として算出している。また、図中の赤色で示すマークは圧縮側が加熱を受けたもの、青色で示すマークは引張側が加熱を受けたもの（いずれも加熱作用のみ）を示しており、×および+は、加熱後に塩水作用を受けたものである。

これによると、全ての検討において、初期剛性が低下し、終局耐力は加熱条件によって異なることが分かる。加熱作用のみを受けたものにおいて、文献ごとに加熱領域の違いに着目すると、いずれの検討においても圧縮側加熱の場合に、引張側加熱の場合よりも初期剛性および終局耐力が小さくなることが確認される。また、加熱後に塩水作用を受けたものに着目すると、加熱のみを受けた場合と同様に初期剛性の低下が認め

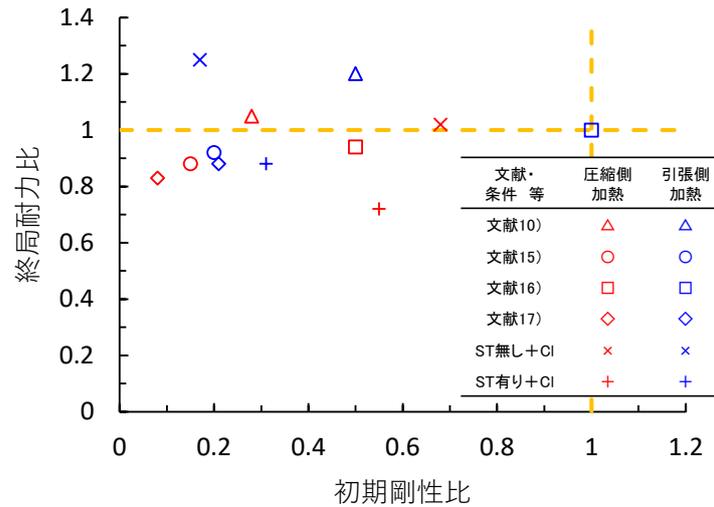


図 3.5.3.9 初期剛性比と終局耐力比の関係

られるが、特に、引張側が加熱を受けた場合に大きく低下していることが分かる。つまり、引張側が加熱を受けた場合、高温加熱の作用のみの場合よりも、塩水作用を受けることにより初期剛性の低下が著しくなる。これは、高温加熱による影響に加え、塩水作用による鉄筋の腐食およびそれに伴う腐食ひび割れの発生と付着力の低下による影響が大きいためと考えられる。また終局耐力に着目すると、加熱後の塩水作用の有無やスターラップの有無によらず、いずれも、引張側が加熱を受けた場合よりも圧縮側が加熱を受けた場合に終局耐力比が低くなる傾向にあることが分かる。つまり、終局耐力については、塩水作用やそれに伴う鉄筋腐食の影響等よりも、高温加熱による影響が大きいものと考えられる。

3.5.4 ポリマーセメントモルタルによる断面修復部材の高温加熱による爆裂性状

後藤ら¹⁸⁾は、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）による断面補修を行った RC 部材が火災など高温加熱を受けることを想定し、その爆裂性状に関する検討を行っている。文献 18) での検討に用いられた試験体は図 3.5.3.10 に示すとおりであり、スターラップの有無および PCM へのナイロン繊維の混入の有無を実験要因としている。試験体の引張側中央 900mm を加熱領域として、RABT30 加熱曲線により加熱試験を行い、はりの爆裂性状を確認している。

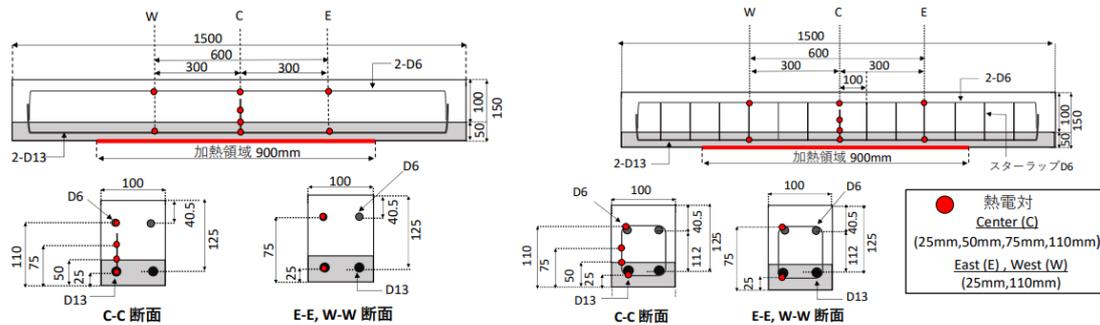


図-3.5.3.10 供試体概要（左：スターラップなし，右：スターラップ有り）¹⁸⁾

加熱後の損傷状況（図 3.5.3.11）より、PCM により断面修復した試験体が加熱を受けると、主筋の一部またはほぼ全てが露出するほどの著しい損傷（爆裂）が生じることが示されている。一方で、PCM にナイロン繊維を混入した場合、爆裂による損傷を抑制することが可能となること示されている。

文献 18) においては、加熱後の耐荷性能および耐久性について検討されていない。PCM は、物質移動抵抗性が高く、補修材として適した性能を有するとされ、主要な断面修復材の一つとして用いられることが多い一方で、ここで示されるように、補修箇所が加熱を受けると、著しい損傷を生じる可能性が高いことに留意が必要となる。

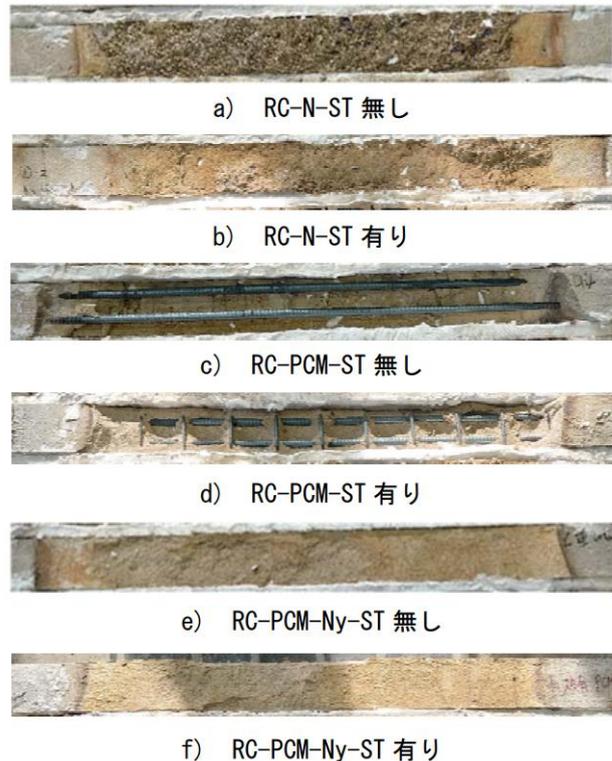


図-3.5.3.11 加熱後の RC はり損傷状況¹⁸⁾

参考文献

- 1) 富永暖子, 西山峰広, 坂下雅信: 高温におけるコンクリートと鉄筋の付着—すべり関係に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1159-1164, 2013
- 2) 稲増克行, 三方康弘, 井上晋: 火災による高温履歴がコンクリート中の PC 鋼材の付着特性に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部, Vol. 65, pp. 995-996, V-498, 2010

- 3) 横山直之, 菊本幸司, 井上晋, 大山理: 火災による高温履歴を受けたプレテンション PC はり部材の耐荷性能に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 68, V-061, 2013
- 4) 藤本謙太郎, 小澤満津雄, 山本哲, 谷辺徹: 火災時におけるプレストレストコンクリート部材の爆裂挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp.1135-1140, 2017
- 5) 藤本謙太郎, 小澤満津雄, 井筒浩二, 谷辺徹, 内田裕市: 火災時におけるプレストレストコンクリート部材の爆裂挙動と火災後の耐火性に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 75, No. 4, pp. 251-264, 2019
- 6) 橋田美知花, 池谷拓由紀, 藤本謙太郎, 杉野雄亮, 小澤満津雄: 火害後にモルタルで補修したプレストレストコンクリートはりの曲げ耐力, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 22 巻, pp. 457-462, 2022
- 7) 中井勉, 藤井康男, 伊藤学, 森田武: 開削トンネルの耐火対策に関する実験検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 5-482, pp. 961- 962, 2004
- 8) 中井勉, 志村敦, 森田武: 圧縮力を受けるコンクリートの耐荷性能に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部, Vol. 60, 5-415, 2005
- 9) 富山隆彦, 阿久津裕亮, 子田康弘, 小澤満津雄: 火害を受けたコンクリート床版の耐疲労性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 875-880, 2020
- 10) 迫井裕樹, 小澤満津雄, 山本哲, 阿久津裕亮: 高温加熱を受けた RC はりの損傷評価および耐荷力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 1025-1030, 2019
- 11) 阿久津裕亮, 小澤満津雄, 山本哲, 迫井裕樹: 高温作用と塩水作用を受けた RC 部材の曲げ破壊特性と耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 1007-1012, 2019
- 12) 高橋一彩, 富士田玲, 小澤満津雄: 高温作用と塩水作用を受けた鉄筋コンクリート部材の耐力と耐久性評価, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 23 巻, pp. 169-174, 2023
- 13) 迫井裕樹, 澤田遼人, 小澤満津雄, 高橋一紗: 加熱と凍結融解作用を受けた RC の損傷分布と耐荷性能, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, V-682, 2023
- 14) 迫井裕樹, 澤田遼人, 小澤満津雄: 加熱を受けた RC はりの損傷分と加熱後の凍結融解作用による表層劣化, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, V-338, 2024
- 15) 原田有: 高熱を受けた鉄筋コンクリート梁の強度の低減に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 66 号, pp. 149-152, 1960
- 16) 富士田玲, 赤坂春風, 杉野雄亮, 小澤満津雄: 火災時における天然繊維混入型高強度コンクリートはりの爆裂性状と火害後の曲げ耐力の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 881-886, 2020
- 17) 富士田玲, 阿久津裕亮, 杉野雄亮, 小澤満津雄: 部分高温作用と塩水作用を受けた RC 部材の鉄筋腐食状況と曲げ耐力評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 706-711, 2021
- 18) 後藤悠太, 杉野雄亮, 祐川真紀帆, 小澤満津雄: 火災時におけるポリマーセメントモルタルで補修した RC はりの爆裂性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 1, pp. 736-741, 2022

(執筆: 迫井 裕樹)

3.6 3章のまとめ

本章では、火災など高温加熱を受けたコンクリートの基本的特性変化および、損傷分布の評価技術に関する知見の整理・取りまとめを行った。また併せて、高温加熱を受けたコンクリート部材に対する加熱後の耐力・耐久性について整理・取りまとめを行った。

コンクリートが火災など高温加熱を受けると、内部においてひび割れ等損傷が生じ、受熱温度に伴い、その力学的特性が低下することは従来より知られているものの、それら損傷の分布とそれが部材としての耐力に及ぼす影響については、検討が十分に行われているとは言い難く、未だ不明な点が多いのが現状である。

高温加熱を受けた部材に対して、その損傷の分布を把握するための技術として、弾性波などを用いた方法のほか、表層透気係数を用いて、平面方向の損傷の広がりあるいは深さ方向の損傷分布を把握するための検討などが行われている。また、高温加熱後の耐力について、トンネルの供用時を想定した検討や、床版の疲労、RCの曲げ載荷などが検討されており、それら成果について整理を行った。耐力については、部分加熱・一面加熱などを想定した検討などがあり、耐荷重は、条件によって、加熱を受けない場合よりも増加する場合が示される一方で、いずれの場合も加熱を受けることにより初期剛性が低下することが報告されている。さらに、高温加熱を受けた後、継続して使用する場合を想定してその耐久性を検討した場合、加熱により外部からの劣化因子が浸透しやすくなり、内部鉄筋の腐食とそれに伴う耐力への影響が報告されている。

高温加熱による劣化損傷、特に、部材の一部が高温に曝される場合などにおいて、その損傷範囲を同定することは、劣化損傷範囲を適切に見極め、適切な維持管理・補修・補強を実施するために必要不可欠となる。前述のように、種々検討は行われているものの、高温加熱による損傷の範囲・程度を定量的に評価するための技術は確立されているとは言い難い。今後、さらなる検討が進み、知見の蓄積・整理によって、火災などの高温加熱により生じる損傷範囲・程度の推定とともに、それらが部材の耐力および耐久性に及ぼす影響をより明らかにすることが望まれる。

(執筆者：迫井 裕樹)

4. 高温加熱を受けたコンクリート構造物の補修・補強技術

4.1 はじめに

本章では、これまで国内において発生したコンクリート構造物の火害事例を調査し、その事例においてコンクリートに対して適用された補修方法をまとめる。さらに、その適用された補修方法を選定する際に必要とされる情報や、適用後の耐久性を確認する際に重要となるポイントを整理した。

4.2 国内で発生した火害の補修事例および適用された補修方法

4.2.1 鉄筋コンクリート建造物の事例¹⁾

(1) 火害状況

火災にあった建物は建築面積 500m² 規模の鉄筋コンクリート造 2 階建ての建築物である。図 4.2.1.1 に火災状況と火煙の流れを示す。火災の発生状況は、竣工間近の時期に隣接工場から発生した火災が 5 時間続き、このときの火煙がコンクリート 2 階部分の RC 造柱・梁・床に及んだ。火煙の流れは 2 階床上 4.0m から上方に集中しており、被害は上部に集中していた。

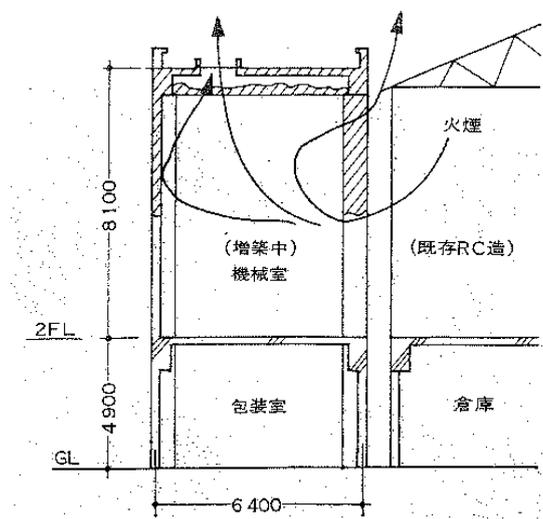


図 4.2.1.1 火災状況と火煙の流れ

(2) 被害調査内容

表 4.2.1.1 に被害調査内容を示す。各種調査の結果、2 階床から 4.0m 以上の部分は火煙を受けており、表面に亀甲状のひび割れが多く、かぶりコンクリートの浮きや強度低下が確認された。また、フェノールフタレイン液を噴霧すると、鉄筋付近は健全部と同程度の呈色であり、火害による熱の影響が 500℃以下であったと推定される。一方、かぶり部分の呈色は健全部と比べて薄くなった。コンクリート中の水酸化カルシウムは 500～580℃に加熱された場合、脱水して酸化カルシウムとなり、フェノールフタレイン液による呈色反応を示さなくなることから、かぶり部は 400～500℃程度、受熱した可能性がある。

表 4.2.1.1 被害調査内容

調査項目	調査方法	調査結果
目視観察	外観観察による損傷範囲確認	2階床から4.0m以上の部分が火煙と接触して損傷した。一部は亀甲状のひび割れがみられ、表層が剥落して鉄筋が露出している箇所もあった。
打音検査	かぶり部分の浮き等の確認	火煙による損傷範囲においては、亀甲状のひび割れが生じており、かぶりコンクリートが浮いている箇所が確認された。
圧縮強度	シュミットハンマーによる確認	2階床から4.0mまでの部分に強度低下等の変状はみられなかった。火煙をうけた範囲は表面に亀甲状のひび割れがみられ、強度低下している箇所もあった。
中性化深さ	フェノールフタレイン液の呈色	火煙による損傷範囲において、亀甲状のひび割れがみられる箇所はフェノールフタレイン液による呈色が淡いピンク色になった。一方、鉄筋埋設位置は健全部に近い赤色を呈した。

(3) 復旧工事

調査の結果、火害による損傷が認められた範囲の柱および梁は、かぶり部を完全にはつとり、メッシュ筋などで付着を確保する対策をとってから型枠を設置し、グラウト材モルタルを圧入して旧断面の形状と同様に復旧した。今回の補修工事は構造体の火害程度が軽微であり、復旧工事をスピーディに行うため、上記工法が採用された。なお、モルタル圧入時の注入圧力により型枠が浮いた箇所が一部で生じたため、型枠の取り付けに際しては、しっかり固定できる箇所からアンカーをとる等の注意が必要であることが確認された。

参考文献

1) 荒井光興：火災を受けた鉄筋コンクリート構造物の補修，建築技術，No. 351，pp. 75-87，1980. 11

(執筆：杉野雄亮)

4.2.2 集合住宅の事例¹⁾

(1) 火害状況

集合住宅の最上階の一戸が全焼した。コンクリートの損傷は火元ベランダ側の損傷が最もひどく、かぶりコンクリートの大部分に浮きが生じ、剥落した箇所もある。なお、コンクリートの損傷状況は部屋毎にかなりの差があった。

(2) 被害調査内容

床スラブの振動試験を行い、剛性低下はみられなかった。鉄筋の露出した梁やスラブについてもたわみなどは認められず、構造耐力上の問題は無いと判断された。

(3) 復旧工事

脆弱化したコンクリートは損傷程度に応じ、はつりおよびケレンによる除去を行い、浸透性のアルカリ付与剤を塗布し、ポリマーセメントモルタルで修復して火害後の中性化対策とした。また、0.3mm 幅以上のひび割れにはエポキシ樹脂を注入して補修した。損傷の激しかった箇所については、鉄筋の付着力低下により補修工事後にひび割れが再発生することも考えられたため、CFRP を接着してこれを防止する対策をとった。接着する CFRP は水平方向、垂直方向の計 2 方向とした。

参考文献

1) 矢田聡：炭素繊維を用いた補修・補強事例，建築防災，1995. 10.

(執筆者：杉野雄亮)

4.2.3 東名高速下り線・日本坂トンネルの事例¹⁾

(1) 火害状況

昭和54年7月11日に東名高速道路下り線日本坂トンネル内の出口から約400メートル地点で大型貨物自動車4台、普通乗用車2台の追突事故に伴う車両火災が発生した。トンネル延長2045mのうち、中央部1122m区間が直接火炎に曝される被害を受け、覆工コンクリートの剥落、内装版、照明・防火設備損壊などの被害が生じた。また、その他の区間においても熱や煙による被害が生じ、防災諸施設などの被害はトンネル全区間に及んだ。

(2) 被害調査内容

覆工コンクリートの被災状況、受熱温度の推定、圧縮強度、中性化深さを調査項目として実施された被害調査の結果を表4.2.3.1に示す。

表4.2.3.1 被害調査内容

調査項目	調査方法	調査結果
覆工コンクリートの被災状況	目視観察による損傷状況確認	覆工コンクリートの剥落面積は、被災区間全面積の約38%に達していた。剥落深さ15cm以下の箇所が全体の90%強を占めた。被災状況は一様ではなく、剥離が連続しているところ、深くまで剥離しているところも随所にみられた。
受熱温度の推定	炭酸ガス分析、炭酸ガス再吸収量分析、偏光顕微鏡によるセメント水和物観察、X線回折によるセメント結晶型の組成分析	温度が高いと思われるコンクリート表面部分で600～1000℃であったと推定される。加熱温度の目安判定として、フェノールフタレイン溶液の呈色有無により、500～580℃の受熱以上か否かの目安とした。
圧縮強度	採取したコアの調査	健全部と比べ、一部に動弾性係数は約20%、圧縮強度は約10%の低下箇所もみられたが、全体的に強度低下はみられなかった。
中性化深さ	フェノールフタレイン液の呈色	大部分の箇所での中性化深さは、コンクリート表面から5cmであり、受熱温度が高いと思われる箇所では25cmまで進んでいた。

(3) 復旧工事

被害状況調査の結果、火害後の覆工コンクリートの力学的性質にほとんど影響は無いと考えられるが、コンクリート表面に劣化、剥離、ひび割れ等が生じており、今後、長期的に安定な構造とする必要があると判断された。そのため、覆工背面に裏込め注入を行い、スチールファイバーコンクリート吹付けによる補強工法を併用した。

参考文献

1) 河村忠孝：日本坂トンネル内の車両火災事故とその復旧，セメント・コンクリート，No. 439，pp. 108-111，1983. 9.

(執筆者：杉野雄亮)

4.2.4 JR 武蔵野線 RC 高架橋の事例^{1), 2)}

(1) 構造物の概要

橋 長：30.000m ～ 32.000m

構造形式：RC 造張出し式ラーメン高架橋

支 間：3 径間（支間長は不明）

(2) 火災の概要

高架橋下に野積みされていた古タイヤ約 40 万本が 43 時間にわたって炎上し、3 線 3 柱式ラーメン高架橋 1 ブロック、4 線 3 柱式ラーメン高架橋 3 ブロックの計約 110m にわたって被災した。構造物の変形はなかったものの、ラーメン高架橋のスラブ、梁、柱などのコンクリートに剥離や浮きが生じ、柱部分では剥離に伴い部分的に露出した鉄筋のはらみ出しが見られるなど、列車を支持できない状態であった。

(3) 調査項目

復旧方法を選定するにあたり、表 4.2.4.1 に示す調査を実施している。すべての試験で被災部と健全部から採取した試料を用いて調査を行い、その結果を対比して確認を行っている。また、コンクリートに関する調査でコア採取時に被災した表面部の破損や中間部での折損が生じたことから、試験体の整形が可能であったスターラップより内部のコンクリートから試料を採取するなどの工夫をしている。

表 4.2.4.1 調査項目一覧

調査項目		試験方法等
外観目視・たたき調査		
コンクリートに関する調査	圧縮強度・静弾性係数試験	コア採取 ^{※1}
	中性化深さ	コア採取試料（フェノールフタレイン 1%溶液）
	受熱温度の推定	コア採取試料（CO ₂ 再吸収量，遊離石灰量，X 線回析）
鉄筋に関する調査	引張強度試験	健全部と被災部の対比（引張強度，降伏点強度）
	受熱温度の推定	電子顕微鏡による金属組織の確認

※1 被災部はコア採取時に表面部の破損や中間部の折損が生じ、整形可能な部分のみ（例えば、スターラップより内部など）を用いて試験を実施

(4) 調査結果

外観調査の結果、被害が大きかったスラブ下面では最大 120mm のコンクリートの剥落が生じていた。柱や梁の隅角部ではコンクリートのほとんどが剥落して鉄筋が露出し、剥落が生じていない箇所では表面が褐色になり亀甲状のひび割れが生じていた。また、一部の柱では主鉄筋がはらみだしており、火災元側の柱の表面は黒色のガラス状になっている部分もあった。一方、タイヤに覆われている部分や地中部では変色やひび割れの発生は生じていなかった。

損傷が大きいスラブ部では、コンクリートの圧縮強度が設計基準強度（ $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ ）を下回っており、静弾性係数が健全部に比べて小さいことが詳細調査の結果明らかになった。また、遊離石灰量から受熱温度を推定したところ、かぶり部分（表面から 50mm）より以深で 500℃以下の受熱があったことが推定された。また、鉄筋とコンクリートの付着面は薄褐色に変色しており、鉄筋とコンクリートの付着力が大きく低下している可能性があった。さらに、鉄筋の引張強度は降伏荷重で最大 40%、引張荷重で 35%程度低下しており、電子顕微鏡で金属組織を確認したところ、1000℃以上の受熱があったと推定された。

一方、梁部表面に確認されたガラス状物質の X 線回析結果より、1200℃以上の受熱が推定されるものの、ス

ターラップより内部のコンクリートでは設計基準強度以上の強度が確保できていた。柱についても同様であった。

(5) 補修・補強内容

a) 補修・補強概要

詳細調査の結果、柱・梁部材のスターラップより内側のコンクリートは設計基準強度と同程度の強度を有していることが確認されたが、スラブはコンクリートの強度低下が大きい箇所があった。以上のことから、柱・梁部はかぶり部分をはつり取り、外巻コンクリート（15cm）で補強することとした。一方、被害が大きかったスラブは全面打替えを基本としている。梁やスラブでコンクリートが剥落していても鉄筋が露出していないような比較的被害が小さい箇所はモルタル吹付けによる補修とした。また、被害を受けなかった地中梁等はそのまま利用している。

補強検討では、自重分については既設のコンクリートと旧鉄筋で負担するものとし、補修等による増加荷重や一時荷重（列車荷重）などは既設コンクリートと補強コンクリート（新コンクリート）、旧鉄筋が受け持つものとし、不足する鉄筋量を補強コンクリート内に新たに配置している。ただし、火災の熱の影響を受けた梁下面、スラブ下面および柱などに配置されている旧鉄筋は規格値の70%程度の強度を有するものとし設計を行っている。梁部材の補強例を図4.2.4.1に示す。

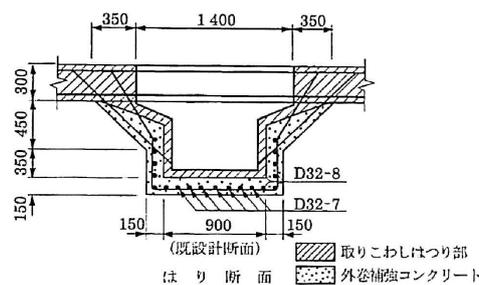


図 4.2.4.1 梁部材の補強例

b) 補修材料

補強コンクリートの断面は旧コンクリート断面から15cm、はつり厚さを加えても20cm程度と小さいので、コンクリートを十分に行きわたらせる程度のスランブを確保するために、特に柱とはりのコンクリートには高性能減水剤（以下流動化剤という）を添加することにした。施工時のスランブとしては、柱、はりを21cm程度とし、スラブは8cm程度を目標とした。はりは逆打ちとなるため、新旧コンクリートの一体化を図る目的でブリージング率0%を目標とした。また、補強部材の厚さが薄く乾燥収縮によるひびわれが心配されたので、膨張材を添加することを基本とした。コンクリートは膨張材に流動化剤を加えたものとしたが、膨張材は生コンプラントで混入し、流動化剤は後添加とした。被害が軽微なはり・スラブに採用する吹付けコンクリートは、工程の都合上線路を切替えた後、列車を通しながらの作業となるため、今回の補修では吹付けコンクリートに鋼繊維とラテックスを加えた配合とした。

c) 施工

損傷を受けたコンクリート部の撤去は、機械を用いてはつり取り、仕上げとして浮きコンクリート部を手はつりで行った。スラブの取壊し範囲は、はりの補強鉄筋の配置と補強コンクリートの打込みやすさを考慮して、ハンチ先端から25cm程度までとし、旧スラブ鉄筋とは重ね継手としている。

参考文献

- 1) 小山堯：鉄道高架下火災事例，コンクリート工学，Vol. 45，No. 9，pp. 25-29，2007.
- 2) 黒田悌且，今木甚一郎，石橋忠良，小林明夫：火害を受けた鉄道高架橋の復旧工事，コンクリート工学，Vol. 20，No. 2，pp. 27-33，1982.

(執筆者：藤本謙太郎)

4.2.5 国道53号津山バイパス 平福高架橋下の事例^{1),2)}

(1) 構造物の概要

橋 長：124.000m (74.400m+49.600m)

構造形式：上部工 PC3 径間+PC2 径間連続中空床版橋

支 間：24.420m+24.800m+24.420m, 24.420m+24.375m

幅 員：8.798m~12.250m (標準部 9.500m)

(2) 火災の概要

高架橋下で仮置きされていたダイボリンプレスト管 (φ1800×5m×3 本) が延焼し、橋梁の一部 (P1~P3 径間) が被害を受けた。火災元に近い P2 橋脚やその直上の上部工下面で広範囲にわたりコンクリートの剥落やひび割れが生じ、鉄筋の露出などの損傷が生じた。

(3) 調査項目 (調査フロー)

調査は全体的な損傷状況の把握を行う一次調査 (外観調査)、代表的な損傷箇所を対象に詳細調査を行う二次調査 (試験・分析) に分けて実施されている。実施項目を以下に示す。

1) 一次調査

- ・外観損傷状況調査

2) 二次調査

- ・材料強度
- ・受熱温度
- ・中性化深さ
- ・載荷試験

(4) 調査方法及び調査結果

a) 外観損傷状況調査

上部工では、P1~P3 径間の床版下面及び側面、張出床版下面、高欄外面の一部にコンクリートのひび割れ、浮き、剥落、鉄筋露出などの損傷が生じていた。各部の剥落の厚みは最大で 40mm 程度、床版下縁の隅角部では最大 80mm 程度の欠け落ちが生じた。

下部工では P2 橋脚の柱部でかぶりコンクリートのひび割れ、浮き、剥落が生じた。損傷は火災元に近い面の柱断面両端の隅角部と柱上部側付近が顕著であり、浮きを叩き落とすと一部で最大 80mm 程度の深さまで損傷を受けていた。また、P2 橋脚上のゴム支承は表面が燃焼して炭化していた。P3 橋脚の支承は、外観上に顕著な変状は見られなかったが、高温に曝された影響で支承表面のゴムが硬化していることが確認された。

b) 材料強度

詳細調査では、コア採取によるコンクリートの圧縮強度および静弾性係数の測定、鉄筋片採取 (損傷により露出した組立鉄筋) による引張強度試験を実施している。また、シュミットハンマーを用いた反発硬度測定試験を行い、損傷範囲を特定するための参考として用いられている。コンクリートの調査結果を表 4.2.5.1 に、鉄筋の調査結果を表 4.2.5.2 に示す。

表 4.2.5.1 コンクリートの調査結果

箇所	設計 基準強度 [N/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]		静弾性係数 [N/mm ²]	
		健全部	損傷部の 最小値	健全部	損傷部の 最小値
上部工	34.3	50.2	40.9	25500	20300
下部工	20.6	33.7	37.5	25400	20400

表 4.2.5.2 鉄筋の調査結果

箇所	降伏点強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
床版下面	354	517
張出水切り部	358	528

※材質 SD295

c) 受熱温度

受熱温度の推定は、定量分析法 (KMnO₄法) および GBRC 吉田法を用いて実施している。調査の結果、上部工では外部損傷が顕著であった P2 橋脚付近の表面から 70mm の位置で約 200℃であった。また、PC 鋼材が下縁に配置される P2 橋脚から 8.55m 離れた付近では、表面から 70mm 位置の受熱温度は 150℃未満であることが推定された。一方、下部工では表層付近 (表面から 15mm) で 500℃未満、表面から 45mm 以深ではほとんどが 200℃未満と推定された。

d) 載荷試験

載荷試験では、P1~P3 の各径間の支間中央に総重量を約 20 トンに調整した大型ダンプトラック 4 台を試験車として載荷した。載荷試験の結果、多少のばらつきがあるがたわみの実測値が解析値の 30~35%程度、ひずみが 40~50%程度であった。いずれも解析値よりもかなり小さく、耐荷性能の低下がないことが確認された。

(5) 補修・補強内容

a) 補修・補強概要

各調査・試験および検討の結果から、コンクリートおよび鉄筋ともに大きな強度低下は認められず、載荷試験でも耐荷性能に問題がないことが確認された。従って、復旧に際しては、損傷した脆弱部をはつり取り、断面を復旧する補修を行っている。また、火災元に比較的近い箇所でコンクリート表面に微細なひび割れが生じているところには、中性化の進行を防止するために表面保護工を実施している。さらに、P2 橋脚の支承は炭化していたことから全数取替えた。一方、P3 橋脚の支承は、撤去した P2 橋脚の支承を用いた詳細調査・検討を実施した結果、劣化は表面付近だけであり使用可能であると判断し取替えは行わないものとした。

b) 補修材料

火害によるコンクリートの剥落厚さは、床版下面の隅角部を除く箇所のほとんどが 40mm 以下であった。剥落した面積が広範囲かつ床版下面などは天井面への施工となること、交差道路への剥落を未然に防ぐ必要があることから、断面修復材料は付着力や変形への追随性に優れた補強繊維入りポリマーセメントモルタルが採用されている。また、既設断面との一体性を高める補強材を埋設している (図 4.2.5.1)。

表面保護工については、供用時の車両の通行によりひび割れが開閉することも考えられることから、通気型で塗装の伸び性能が良い材料を採用している。

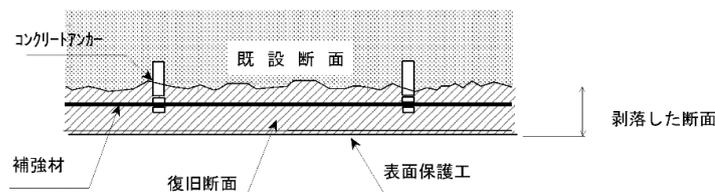


図 4.2.5.1 断面補修方法

c) 施工

脆弱部のはつり取り作業は機械はつりと手はつりを併用して行っている。脆弱部を確実にのはつり取るために、はつり取り後のコンクリート全面にフェノールフタレイン溶液を塗布し、中性化していないことを確認している。また、はつり取り作業完了後に高圧洗浄を行い、浮石や埃を除去した。

断面修復する補修厚さが平均 40mm であることから、補強繊維ポリマーセメントモルタルを 20mm×2 層に分けて吹き付けを行っている。補強材は 1 層目の吹き付けが終了し硬化した後に、アンカー（4 本/m²）で取り付けた。その後、吹き付け面を湿らせた後に仕上げ層として 2 回目の吹き付けを行い、コテ仕上げを行っている。

参考文献

- 1) 岡田直人, 山瀬浩和, 藤田修: 国道 53 号津山バイパス平福高架橋火害報告, 中国地方整備局管内技術研究会論文集, 53rd, pp. 93-96, 2002.
- 2) 藤岡靖, 石田邦洋, 園山孝: 火害を受けた高架橋の補修工事, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, pp. 435-436, 2003.

(執筆者: 藤本謙太郎)

4.2.6 国道41号釣鐘洞門の事例¹⁾

(1) 火害状況

平成15年1月18日にタンクローリーとダンプトラックが正面衝突する事故が発生した。事故は延長316.5mの洞門工の北側から約50m入った位置で発生した。衝突直後、タンクローリーに積載した10kLのガソリンに引火し、洞門工は炎と黒煙に包まれ、断続的に爆裂音が発生した。

(2) 被害調査内容

表4.2.6.1に、調査項目、調査方法、調査結果をまとめた被害調査内容を示す。

表4.2.6.1 被害調査内容

調査項目	調査方法	調査結果
覆工コンクリートの被災状況	損傷状況の確認は、目視観察による損傷状況（コンクリートの浮き、剥離、鉄筋露出、ひび割れ）と熱による変色の分布を記録した。	事故発生箇所から南北に50mの範囲で被害が大きかった。頂版コンクリートは20～70mmの深さで剥落し、柱は角部のコンクリートが剥落し、主鉄筋が部分的に露出した。消防署へのヒアリング結果より、火災時にはぜる音が生じており、コンクリートの爆裂が発生したと考えられる。
簡易中性化深さ試験	ハンマードリルで削孔した削孔粉をフェノールフタレイン液を染み込ませた試験紙に付着させ、呈色状況から中性化深さを簡易的に測定した。	健全部から採取した中性化深さは平均16mmであったのに対し、火害を受けた範囲の簡易中性化深さの結果は全て20mm以下であり、この試験方法においてはコンクリートの中性化が進む状況は確認されなかった。
圧縮強度試験	目視およびシュミットハンマーによる反発硬度測定から損傷が大きい範囲を特定し、その位置のコアを採取して圧縮強度試験を実施した。	熱によりコンクリート表面がピンク、灰白色、淡黄色に変色している箇所からコアを採取した。表面付近のコアは内部のコアに比べて強度低下がみられたが、いずれも設計基準強度21N/mm ² を下回ることは無く、強度的な問題は生じていないと判断した。
静弾性係数試験	圧縮強度試験用のコア採取と同様にコアを採取して静弾性係数を測定した。	圧縮強度と同様、表面付近のコアの方が内部のコアに比べて静弾性係数の低下がみられた。コンクリート表面付近は、火災による熱の影響が大きかったものと推察された。
鉄筋の引張試験	鉄筋が露出した箇所から構造的に問題無い部分の鉄筋を採取し、単純引張試験を実施した。	基準値(SD295A)の引張強さ、伸びを満足し、鉄筋が健全であると判断した。
モルタルのXRD試験	熱を受けたコンクリート表面のモルタル分を粉末にして成分分析を行い、受熱温度を推定した。	健全部のコンクリートにおいてCaOは検出されずCaCO ₃ が検出された。淡黄色に変色した部分ではCaCO ₃ のピークが小さく、未水和セメントクリンカー鉱物の一種とみられるピークが検出されたサンプルもあり、表面色の状態とあわせて考えて700～1200℃に加熱された可能性があると推測した。

(3) 復旧工事

被害調査の結果、既存コンクリートは再使用に耐えられる状態であると判定されたが、コンクリート表面の断面欠損部分（平均厚さ20mm）については、鉄筋防食の観点から修復することになった。頂版の断面修復工は、道路利用状況から片側交互通行にて施工する必要があり、ウォータージェットによる大規模なはつり工程や材料飛散が大きい乾式吹付け工法は不採用となった。工法検討の結果、高圧水洗浄により脆弱コンクリート部を除去し、アンカーで固定したネットを修復断面内に入れて万が一の剥落を防止する「剥落防止装置付き吹付け工法」を採用した。この工法は、繊維ネットを仮押さえした状態で、一次モルタル吹付け工を7.5mm厚さ吹付けた。このネットにはループ繊維が付属しており、モルタルと物理的に接合しやすように工夫した。さらに、一次モルタルの吹付け完了後、アンカーによりネットを確実に固定し、一次モルタル上に二次モルタルを7.5mm厚で重ね吹きし、コンクリート面の不陸を考慮して、全体施工厚さを20mmに管理し

て施工を完了した.

参考文献

- 1) 細江育男, 小柳治: 火害を受けた道路構造物の劣化診断, コンクリート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, 土木学会, 2004. 10.

(執筆者: 杉野雄亮)

4.2.7 国道1号守口高架橋の事例^{1),2)}

(1) 構造物の概要

橋 長：611.100m

構造形式：上部工 プレテンション方式PC単純T桁

：下部工 2柱式RCラーメン（鋼板巻き立て補強）

支 間：35@17.460m

(2) 火災の概要

上り線高架橋に隣接する工務店資材置き場で発生した火災により、地上10mの高さにあるP38～P40径間の上部工（単純プレテンションT桁）および鋼板巻き立て補強されているP39橋脚（2柱RCラーメン）が約30分間熱に曝され損傷を受けた。鎮火直後の外観調査では耐荷力不足によるたわみの変形などは見られなかったが、火災元周辺で全体的にすすが付着し、コンクリートには爆裂やひび割れ、浮きなどの損傷が生じていた。

(3) 調査項目

コンクリートやPC鋼材などの材料物性値の低下やプレストレスの損失等による耐荷力の低下が懸念されたことから、上部工に対して表4.2.7.1に示す項目について調査を実施している。また、下部工や壁高欄（コンクリート製防護柵）についても外観調査、反発硬度測定、中性化試験、コア採取による圧縮強度・弾性係数試験を実施している。さらに、火災元に最も近いP39橋脚上の支承は一部の支承表面のゴムが溶けた箇所もあり、硬度計による調査が行われた。

表 4.2.7.1 上部工の調査項目一覧

調査項目		試験方法等
外観目視・たたき調査		
コンクリートに関する調査	反発硬度測定	リバウンドハンマー法
	中性化深さ測定	ドリル法（鋼材、コア採取の際にも実施）
	圧縮強度・静弾性係数試験	φ75mm コア採取試料による
PC鋼材に関する調査	受熱温度分析	UVスペクトル法（下フランジ下面より資料採取）
	加熱剛性試験	常温、350℃、450℃で実施
	PC鋼線強度試験	JIS G 3536（被災桁より各2試料）
耐荷性能試験		総重量20tのダンプトラック4台

(4) 調査結果

外観調査の結果、PC主桁及び橋脚梁部のコンクリートの一部にピンク色の変色が確認されており、300～600℃の高温に曝されたと推測された。また、火災元近くの主桁については下フランジ隅角部に浮き・剥離等が多数発生しており、支間中央部でひび割れの発生が確認された。受熱温度分析の結果、500℃以上の受熱を受けた範囲は表面から5～6mm程度であり、PC鋼線かぶり位置（表面から35mm）の受熱は350℃未満であったと推察された。コンクリートおよびPC鋼材に関する調査では著しい強度の低下が生じていないことが確認された。耐荷性能試験では、事前に解析した健全モデルと損傷モデルのたわみ量と載荷試験時において健全相当と考えられる径間および被災径間のたわみ量の比較を行っている。その結果、健全径間に比べて被災径間では若干主桁の剛性低下が見られたものの、床版・横桁の挙動については差異が見られず、横桁の健全性が損なわれるような横締めPC鋼材の損傷はないものと推察された。

(5) 補修・補強内容

詳細調査の結果，主桁の取替えを必要とするほどの耐荷力の低下は認められなかったことから，補修と補強を行っている．主桁の補強は鋼板接着工法とし，内主桁については下フランジ部を，外主桁については下フランジ部に加えてウェブ部に鋼板接着による補強を実施している（図 4.2.7.1）．

下部工や壁高欄については，コンクリートのかぶり部分の浮きや剥離が生じているものの，圧縮強度や静弾性係数に大きな低下は生じておらず，設計基準強度以上の材料強度が確保できていたことから剥落防止工を併用した断面修復を行っている．下部工の鋼板巻立て部では表面塗装の焼失や鋼板の変形，充填樹脂の流出・焼け焦げが見られ，柱コンクリートとの一体性が確保されないと判断されたことから，現況の鋼板を撤去し，再度鋼板巻立てを行う対応が取られた．

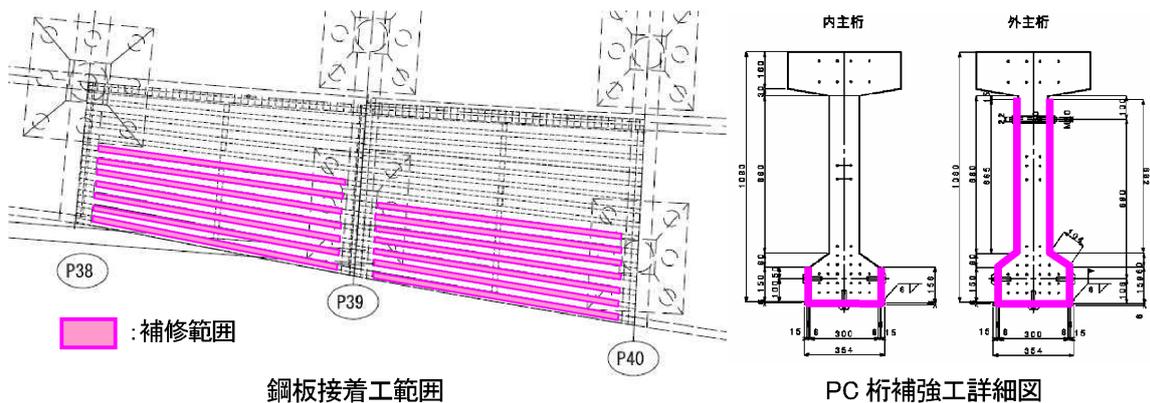


図 4.2.7.1 上部工の補強範囲と鋼板接着配置

参考文献

- 1) 田崎祥二：一般国道 1 号守口高架橋火災被災復旧の取り組みについて～供用中の PCT 桁橋における復旧工法の検討事例～，国土交通省国土技術研究会報告，pp. 33-36，2007.
- 2) 国土交通省近畿地方整備局：「第 2 回一般国道 1 号守口高架橋火災被災復旧検討委員会」の開催結果について：<https://www.kkr.mlit.go.jp/osaka/press/2007/070420.pdf>（閲覧日：2024.5.31）

（執筆者：藤本謙太郎）

4.2.8 首都高速5号池袋線の事例^{1), 2), 3), 4), 5)}

(1) 構造物の概要

上り方向・下り方向がそれぞれ上層・下層に分かれた2層の高架構造となっており、高架下は都道のアンダーパスと側道が併走している。

- ・主構造：(上部工) 単純合成鋼 I 桁橋 (6 主桁, 桁高 1200mm)
 軽量骨材を用いた RC 床版 (床版厚 220mm)
- (下部工) RC 構造による 2 層ラーメン構造
- ・支 間：20.0m

(2) 火害の概要

平成 20 年 8 月 3 日 (日) 午前 5 時 52 分頃、首都高速 5 号池袋線 (下り) 熊野町 JCT 付近において、東京方面から埼玉方面に向けて走行していたタンクローリー (ガソリン 16kl, 軽油 4kl 積載) が横転し、炎上した (図 4.2.8.1)。火災発生直後から、消防による消火活動が行われたものの、鎮火が確認されたのは火災発生から 5 時間以上経過した午前 11 時 30 分頃となった。なお、火災温度は最高で 1,200℃に達すると推定された。

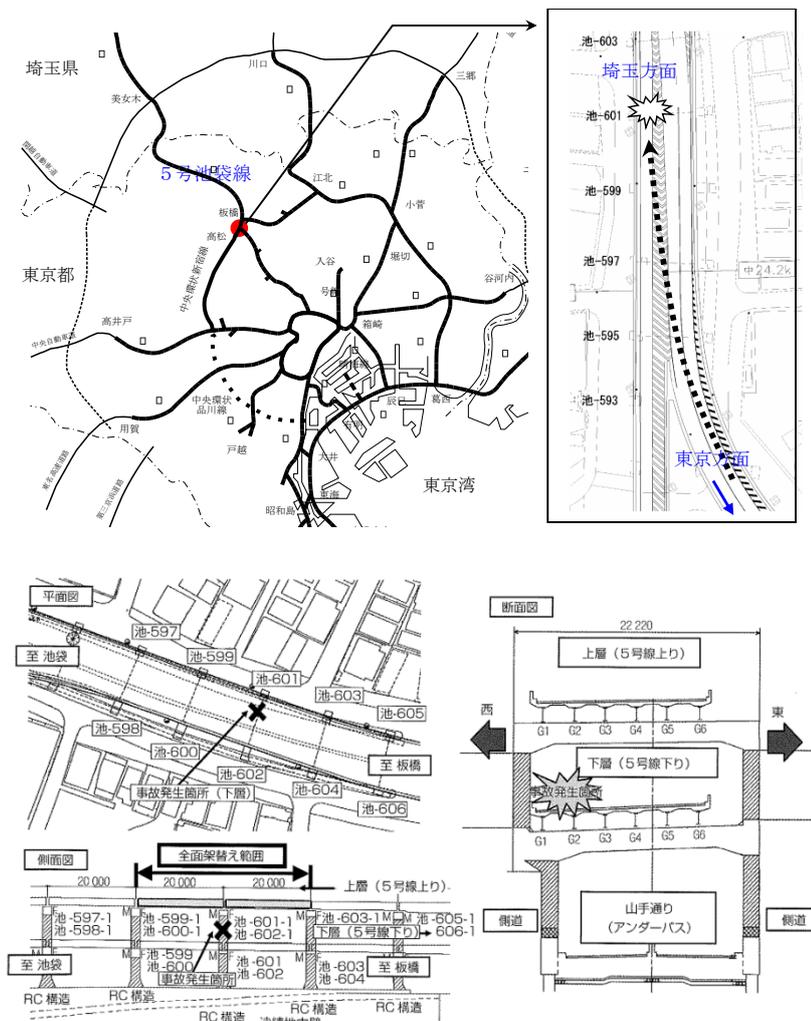


図 4.2.8.1 火災事故発生箇所

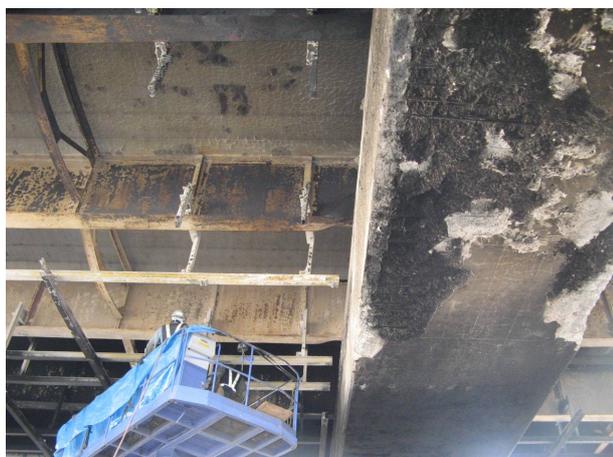
この火災事故は、2層構造の下層で発生したため、上層の橋梁に損傷が集中した。鋼主桁の損傷の範囲は、上下層2径間およびその上層の隣接橋梁の一部に及んだ。上層の鋼桁は熱の影響により変形し、塗膜剥離などの損傷が発生した。特に直上の桁については、1200mmの桁高が600mm程度まで変形し、上層の路面は700mm程度沈下した。床版下面には、亀甲状のひび割れやかぶりコンクリートの剥離、剥落が多数発生した。橋脚についても、かぶりコンクリートの剥離や帯鉄筋が露出した。また、耐震補強として巻き立てられていたアラミド繊維シートが焼失した。その他、遮音壁、裏面吸音板、排水施設、電気配線設備などの付属物も多数焼失および損傷した。写真4.2.8.1に火災による損傷を示す。



(a) 鋼主桁の損傷状況



(b) コンクリート橋脚の損傷状況



(c) 橋脚下面と上層床版裏面の損傷状況



(d) 上層床版裏面の損傷状況

写真4.2.8.1 火災による損傷

(3) 調査項目および結果

火害後の早期復旧を目指すべく、火害発生箇所の調査が行われた。ここでは、RC床版とRC橋脚に対して実施された調査項目とその結果を表4.2.8.1および表4.2.8.2にまとめる。

表 4.2.8.1 RC 床版の調査項目および調査結果

調査項目	調査方法	調査結果
RC 床版の被災状況	近接目視調査による損傷状況確認	火元直上付近の張出部および桁間の床板は、かぶりコンクリートが剥離し鉄筋露出が広範囲に見られ、被害等級Ⅳ～Ⅴ級と判定された。一方、火元直上付近以外の桁間では、かぶりコンクリートの剥離や鉄筋の露出は見られなかった。損傷はすす等の付着、微細なひび割れ程度であり、被害等級Ⅱ～Ⅲ級と判定された。
受熱温度の推定	火災の時間、損傷の状況から推定	最も火勢が激しい状態において、約 1200℃の熱で 90 分間程度熱せられたものと推定される。
圧縮強度	採取したコアの調査及び反発硬度試験	コンクリートの圧縮強度は設計基準強度以上であり、受熱による強度低下はないものと考えられる。なお、採取したコアの表面に見られたひび割れは表面付近のみであった。反発硬度試験の結果は設計基準強度以下となったものの、火害を受けていない隣接橋の床板の結果と比べて大きな差異は見られなかった。
中性化深さ	フェノールフタレイン液の呈色	中性化深さは0.0mm～2.4mmであり、火災による中性化の促進は見られなかった。

表 4.2.8.2 RC 橋脚の調査項目および調査結果

調査項目	調査方法	調査結果
RC 橋脚の被災状況	近接目視調査による損傷状況確認	火元付近の橋脚横梁部では、かぶりコンクリートの剥離、鉄筋露出が見られた。コンクリートの剥離厚さは概ね20mm程度であるものの、横梁角部および下面では80mm程度の大きな欠損、横梁上面および上面角部では最大0.3mmのひび割れが確認された。被害等級はⅢ～Ⅳと判定した。なお、露出した鉄筋に変状はなかった。一方、火元から離れた部位では、すす付着はあるもののコンクリートの剥離等の変状は見られないことから、被害等級はⅡと判定した。 火元側の橋脚柱部では、橋脚耐震性向上のため巻き立てた炭素繊維シートが一部焼失しており、柱上端部のかぶりコンクリートの剥離が確認された。被害等級はⅡと判定した。なお、鉄筋の露出は見られなかった。
受熱温度の推定	非常常一時伝導解析(差分法)	非常常一時伝導解析(差分法)に基づく受熱温度の推定を行った結果、受熱温度は約 400℃と推定された。
圧縮強度	採取したコアの調査及び反発硬度試験	圧縮強度試験の結果、火元に近い横梁部(測定箇所①②)は21N/mm ² (設計基準強度 27N/mm ²)と受熱による強度低下が見られた。なお、既往の研究によると受熱後材令 12 か月後には当初強度の 9 割程度までの回復が一般に期待できる範囲である。一方、火元から離れた横梁部(測定箇所③④)、柱部(測定箇所⑩)の圧縮強度は 25～28N/mm ² と設計基準強度相当であるものの火災の影響を受けていない隣接橋脚の圧縮強度 32N/mm ² と比較すると受熱による強度低下が見られた。
中性化深さ	フェノールフタレイン液の呈色	火災による中性化深さの促進は見られなかった。
露出した鉄筋	引張強度試験	材料規格を満足する結果であった。

(4) 復旧工事の概要

復旧方針は、原形復旧することを基本とした。特に損傷の著しい上層桁については、常時車線規制などによる社会的影響(経済損出)の大きさを考慮し、暫定運用による 2 分割施工を採用した。上 2 径間の上部工(鋼桁および床版)を全面架替えとし、橋脚、下層橋梁および上層隣接橋梁は損傷が局所的に限定されていたため、部分的に補修が行われた。供用可能な部分から順次交通開放された。以下では、主に、RC 床版および RC 橋脚において実施された復旧・補強工事の概要を記す。

a) 上層 RC 床版

原形復旧を基本とし、全面打換えとした。施工にあたっては暫定運用を行いながら早期に全面復旧が可能とする工法を選定した。以下に復旧工事のポイントを列記する。

- ・ 早期の材料の手配および分割施工の可能な場所打ちによる RC 床版構造を採用した

- ・早期強度発現性・床版の重量軽減・初期ひび割れ防止のため、早強ポルトランドセメント、合成短繊維、膨張材を使用した軽量コンクリートを採用した（材齢7日で35N/mm²、1850kg/m³以下）
- ・品質確保のため構造および施工に配慮したコンクリートの配合材料とした
- ・床版厚は下部構造への影響を考慮し現状と同じ22mmとし、舗装厚も60mmとした
- ・耐久性を確保するため床版防水を実施した
- ・急速施工を考慮し、型枠のプレハブ化、24時間間昼夜連続施工、床版から高欄までの一括打設とした

b) RC橋脚および横梁

火災の発生箇所の橋脚の上層柱および横梁のコンクリートは、熱によって表面部が劣化していたため、損傷箇所の断面修復等による部分補修を基本とした

- ・橋脚の上層横梁部下面、側面および柱のかぶりコンクリート部は、受熱温度が400℃程度と推定され、表層部が劣化していると想定されたため、劣化部をはつり取り、ポリマーセメントの吹付け工法により断面修復を行った
- ・コンクリート劣化部のはつり深さは浮きが発生している範囲および中性化が促進している範囲までとした（中性化は主鉄筋以深には達していない）
- ・橋脚上層横梁部は、部分的に主鉄筋等が露出している箇所があるため、安全性の確保、断面修復部のひび割れ防止および剥落防止効果を目的としてアラミド繊維シートによる補修を行った
- ・橋脚の上層西側柱部は、耐震性向上対策として設置されていた既設のアラミド繊維シートが火災により焼失しているため、原形復旧としてアラミド繊維シートによる補修を行い、耐震性の回復を図った

参考文献

- 1) 桑野忠生，増井隆，鈴木寛久，依田勝雄：タンクローリー火災事故により損傷を受けた橋梁の復旧－首都高速5号池袋線 復旧の設計と施工－，橋梁と基礎，Vol. 43，No. 4，pp. 13-18，2009. 4
- 2) 桑野忠生，小西由人，増井隆，富井孝喜，竹田宣典：短繊維を使用した早強軽量骨材コンクリートのポンプ施工《首都高速5号池袋線タンクローリー火災事故復旧工事》，セメント・コンクリート，No. 746，pp. 40-46，2009. 4
- 3) 菅原 聡：PHOTO REPORT 首都高速5号池袋線タンクローリー火災事故に伴う構造物の被災状況，土木学会誌，Vol. 93，No. 12，pp. 8-9，2008
- 4) 桑野忠生，増井隆，鈴木寛久，依田勝雄：首都高速5号池袋線タンクローリー火災事故の復旧工事－首都高史上最大規模の構造物損傷を73日間で復旧－，土木学会誌，Vol. 93，No. 12，pp. 30-33，2008
- 5) 日本コンクリート工学会，高温環境下におけるコンクリート構造物の性能評価に関する研究委員会報告書，2017

（執筆者：土橋浩，川西貴士）

4.2.9 新座洞道のマンホールの事例¹⁾

(1) 概要

2016年10月、東京電力パワーグリッド(株)が保有する新座洞道(埼玉県新座市)の地下マンホール内において電気事故による火災が発生した。この火災により火元階の天井および側壁を中心に写真4.2.9.1に例示するようなポップアウト、ひび割れが生じ、火元から離れた上層階ではすすの付着が確認された。コンクリートの受熱時間は、火災発生から鎮火までの時系列から2時間半～3時間程度と推定している。



(a) ポップアウト



(b) ひび割れ



(c) すす付着

写真 4.2.9.1 火災による劣化状況

(2) 劣化調査

a) 受熱深さ

受熱深さの調査として、フェノール法による中性化深さ測定の結果を図4.2.9.1に、粉末X線回折による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消失深さの結果を表4.2.9.1に示す。これらの結果から、火元(B3F)の天井では中性化深さおよび $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消失深さが約40mmに達していることを確認した。

b) 鉄筋の健全性評価

はつり調査の結果、主筋のかぶり厚は、いずれも受熱深さの40mm以上が確保されていることが確認された。このことから、鉄筋の健全性は確保されているものと判断した。

c) コンクリートの健全性評価

コンクリートコアの圧縮強度試験結果を図4.2.9.2に、リバウンドハンマー測定による圧縮強度の推定結果を図4.2.9.3に示す。この結果から表面変状が悪い状態であるほど強度が低い傾向が認められた。

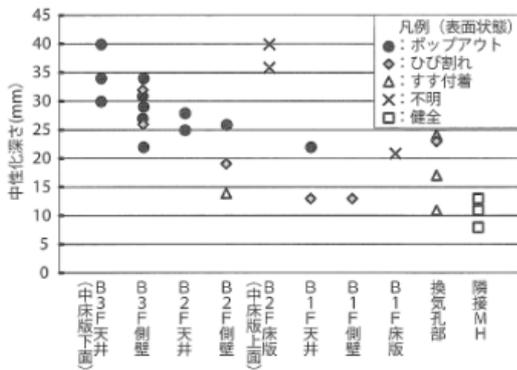


図 4.2.9.1 はつり調査による中性化深さ

表 4.2.9.1 粉末X線回折によるCa(OH)₂消失深さ

測定箇所	粉末X線回折測定	中性化深さ(コア割裂面)	中性化深さ(はつり調査)
中床版上面(B2F床版)	40	33	38
中床版下面(B3F天井)	40	30	35
B3F側壁	25	39	29

(単位：mm)

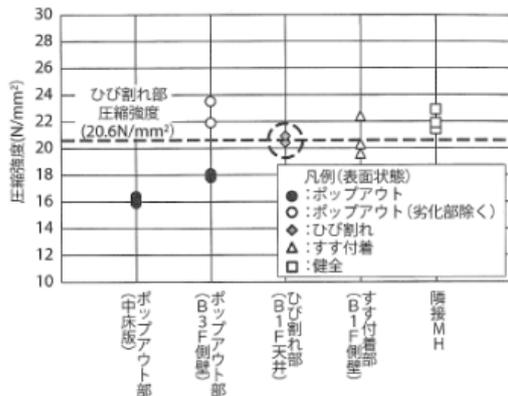


図 4.2.9.2 コンクリートコアの圧縮強度試験結果

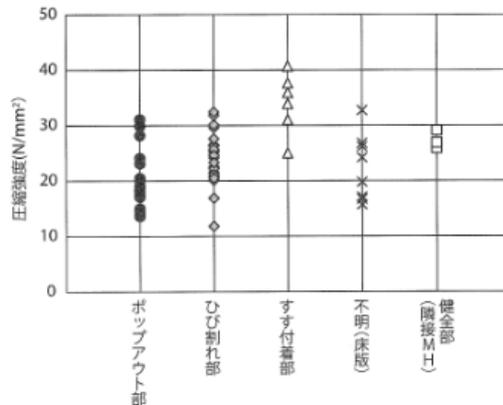


図 4.2.9.3 リバウンドハンマーによる圧縮強度の推定結果

(3) 補修計画

調査の結果から耐荷性能上の対策は不要と判断し、耐久性能に対しては、ポップアウト部、ひび割れ部における中性化の進行ならびにひび割れからの腐食因子の浸入によって鉄筋腐食が発生・進展するリスクがあると判断して対策を講じることとした。図4.2.9.4には表面変状別に区分した補修範囲を示す。

a) ポップアウト部

アルカリ性付与を目的とした表面含浸材には表面硬化型の珪酸リチウム系含浸材を用いた。この含浸材には、断面修復施工時のドライアウト現象の対策としての効果も期待した。はつり後の断面修復は亜硝酸塩系防錆材が含まれるポリマーセメントモルタルを使用することとした。なお、はつりにより鉄筋が露出した場合には鉄筋防錆剤の塗布も行うこととした。

b) ひび割れ部

ひび割れ幅が小さく、ひび割れ注入工の適用が困難であることから、表面含浸材を塗布し、腐食因子の浸入抑制対策とした。

c) すず付着部

耐荷性能および耐久性能に与える影響はないと判断し、表面洗浄のみを実施することとした。

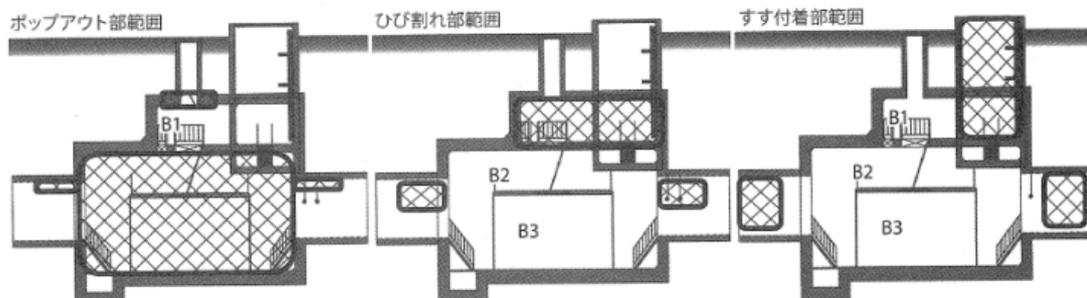


図 4.2.9.4 補修範囲図（斜線部が表面変状別の補修範囲）

(4) 補修工事実績

補修工事は、ケーブル復旧作業の関係から2期に分割し、事故発生からおおよそ1年2ヶ月で完了した。なお、現時点でこれらの補修箇所の不具合は確認されていない。

a) かぶりコンクリートのはつり

かぶりコンクリートのはつりは電動ピックにより実施した。はつり面の品質管理はフェノール法によるアルカリ性の確認およびリバウンドハンマーによる強度測定を実施した。

b) 表面含浸材の塗布

ポップアウト部とひび割れ部を対象に塗布する表面含浸材について、火害による脱水状態のコンクリートへの適正な塗布量を試験施工により求めた。試験施工の結果を表 4.2.9.2 に示す。いずれも通常のコンクリートにおける塗布量 $400\text{g}/\text{m}^2$ (2回塗り) より多くなり、3回塗布を必要とした。塗布方法は、側壁は刷毛、天井はローラーの施工性が良いことが確認された。

c) 断面修復

断面修復材には亜硝酸塩系防錆剤が含まれるポリマーセメントモルタルを用い、修復範囲が小さい箇所ではコテ塗りによる左官仕上げを採用し、修復範囲が広い箇所では吹付け工法を採用した。施工状況を写真 4.2.9.2 に示す。断面修復は厚塗りせず、1層ごとに1日程度時間を空けて施工を行った。また、剥離防止を目的として、ステンレスアンカーを設置し、天井部はさらにビニロン繊維シートを断面修復表面に接着し、トップコート塗布した上からステンレス製アンカーで固定した。

表 4.2.9.2 表面含浸材塗布量試験結果

試験部位	1回目	2回目	3回目	合計
側壁上部	217	721	386	1,324
側壁下部	528	256	236	1,020
天井①	214	177	143	534
天井②	247	130	143	520

(単位：g)



(a) 側壁部施工状況（左官仕上げ）



(b) 天井部施工状況（吹付け工法）

写真 4.2.9.2 断面修復施工状況

参考文献

- 1) 佐藤克晴, 和田好史, 内藤幸弘, 竹原博登: 火害により劣化した洞道コンクリート躯体の調査ならびに補修事例, トンネルと地下, Vol. 49, No. 5, pp. 367-376, 2018. 5.

(執筆者: 松浦忠孝)

4.2.10 東名高速道路豊田ジャンクションAランプ橋の事例¹⁾

(1) 概要

2022年9月、東名高速道路豊田ジャンクションAランプ橋において、車両3台が関係する交通事故が発生した。事故車両の大型貨物に積載されていたLPガスボンベに引火し、爆発を伴ってランプ橋上で延焼した。鎮火までの時間は最大3時間21分、火の勢い低下までは1時間46分と報告されている。

(2) 劣化調査

一次調査として、ひび割れ、浮き、鉄筋露出、爆裂、汚れの付着等の範囲を特定した。一次調査の結果において被害が確認された箇所を対象に、リバウンドハンマーによる反発硬度試験、フェノール法による中性化深さ測定、コンクリートコアの抜き取りを実施した。

この火災による高欄の劣化状況を写真4.2.10.1に示す。表面の変色状況の観察から火害程度が「大」と推察された範囲には、浮き、ひび割れ（微細～0.5mm程度）、爆裂、剥離等の変状が観察された。

リバウンドハンマーによる反発硬度試験の結果を図4.2.10.1に示す。またコンクリートコアによる圧縮強度試験の結果を図4.2.10.2に示す。いずれも設計基準強度 30N/mm^2 を上回っており、浮き等の変状箇所を除けば構造上の性能を満足していると推察される。

現地での中性化試験の結果を写真4.2.10.2に示す。火害を受けた箇所の中性化深さは健全部と比較して浅く、火害による中性化の促進は確認されなかった。また、採取コアの中性化深さ測定の結果においても健全部と比較して火害による中性化の顕著な進行は認められなかった。



写真4.2.10.1 火災による劣化状況

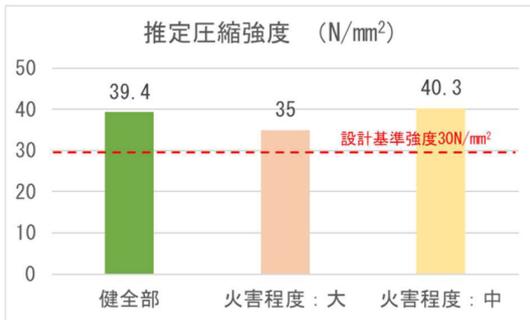


図 4. 2. 10. 1 リバウンドハンマーによる
圧縮強度の推定結果

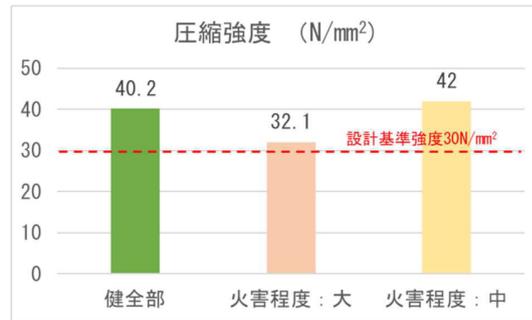


図 4. 2. 10. 2 コンクリートコアの圧縮強度
試験結果



写真 4. 2. 10. 2 現位置でのフェノール法による中性化試験結果

(3) 補修工事

補修については、変色箇所の表面処理、ひび割れ箇所の注入、爆裂・浮き箇所の断面修復が予定されている。

参考文献

- 1) 尾辻千瑛, 山本大貴, 澤祐太郎: 東名高速道路豊田 JCTA ランプにおける火害によるコンクリート壁高欄への影響調査, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, V-480 (2023).

(執筆者: 松浦忠孝)

4.2.11 山陽自動車道尼子山トンネルの事例¹⁾

(1) 概要

2023年9月5日(火)、山陽自動車線下り道、赤穂IC～龍野西ICの尼子山トンネル(全長約600m)内において、焼損車両23台、事故車両9台に及ぶ火災事故が発生した。図4.2.11.1に火災事故箇所(入口から約400m地点)を示す。火災事故の覚知から鎮火まで40時間21分を要し、当該区間は通行止めとなり、通行止め解除まで2433時間47分(約3か月半)を必要とした。

この火災により、約400m区間の覆工コンクリートに剥離・剥落や亀甲状ひび割れが発生した。鎮火後のトンネル内部の亀甲状のひび割れやコンクリートの剥離状況を写真4.2.11.1に示す。



図 4.2.11.1 火災事故箇所¹⁾



(a) すすの付着



(b) ピンクに変色及び剥落



(c) 亀甲状のひび割れ



(d) 亀甲状のひび割れ

写真 4.2.11.1 火災事故現地状況写真^{2,3)}

(2) 技術検討会の立ち上げ

この火災事故の対応を検討するため、学識者による「山陽自動車道 尼子山トンネル火災事故技術検討会」が立ち上がり、火害程度の把握、早期復旧・安全性の確認、復旧方法について検討された。この検討会では、表 4. 2. 11. 1 に示す内容の議論が行われた。

表 4. 2. 11. 1 技術検討会での審議事項（文献 1）より抜粋）

回	開催日	結果概要
第 1 回	2023 年 9 月 13 日 (水)	(● 被災概要, ■ 審議内容) ●長時間にわたり火害を受け、甚大な損傷が発生 ●復旧には相当の時間を要することが想定される ■被害状況把握のため、トンネル覆工の物理的・化学的な調査を行う ■具体的には、コア採取による圧縮強度試験、中性化試験、反発度試験など
第 2 回	2023 年 9 月 28 日 (木)	(● 被災概要, ■ 審議内容) ●調査結果から、火害による覆工コンクリートが部分的に強度低下等脆弱化していることを確認 ■トンネル覆工の損傷状況に応じた復旧方針を審議 ■覆工コンクリート表面からの影響が深い箇所は内巻補強工、浅い箇所は内面補強工を標準的な補修方法とし、早急に着手していくことを確認
第 3 回	2023 年 10 月 20 日 (金)	(● 復旧作業状況, ■ 報告内容) ●復旧作業については、順調に進捗していることを確認 ■第 2 回検討会で示された復旧方針を踏まえて詳細に検討し、計画は策定されていることを確認 ■具体的な復旧計画に基づく、今後の作業内容を確認
第 4 回	2023 年 12 月 7 日 (木)	(● 施工状況の報告, ■ 供用後のモニタリング) ●具体的な復旧計画に基づく、作業が順調に行われていることを確認。また、現場を確認し、現時点で品質が担保されていることを確認。 ■供用後にモニタリングを実施する項目及び頻度について確認

(3) 覆工コンクリートの物理的・化学的調査

技術検討会の審議結果から、火害状況の把握のため、たたき検査、コア抜き等が行われるとともに、覆工コンクリートの圧縮強度、中性化深さ、反発硬度などが調査された。この調査結果から火害による部分的な強度劣化が生じていることが確認された。写真 4. 2. 11. 2 にたたき検査状況およびコア削孔状況を示す。また、覆工厚については電磁波調査およびコア供試体から設計覆工厚 55cm 以上であることが確認されている。さらに、設計断面から 20cm 以深の超音波伝播速度も確認されており、火害の影響を受けた覆工であっても、品質「良」と判定され（表 4. 2. 11. 1）、火害の影響が小さかったことが報告されている。



写真 4. 2. 11. 2 たたき検査状況（左）およびコア削孔状況（右）¹⁾

表 4.2.11.1 伝播速度と品質の関係⁴⁾

伝播速度	品質
4600以上	優
3700～4600	良
3100～3700	やや良
2100～3100	不良
2100以下	不可

(4) 復旧計画および方法

調査の結果から、覆工コンクリートの損傷状況に応じた復旧計画が議論された。主として、覆工コンクリート表面からの影響が深い箇所は、損傷したコンクリートを除去し、新しいコンクリートを打設する内巻補強工が採用された。一方、影響が浅い箇所は、剥離落下の危険性があるコンクリートをはつり落とし、塗布系材料を覆工する内面補強工が補修方法として採用された。復旧作業の流れを図 4.2.11.2 に示す。また、復旧作業状況を写真 4.2.11.3 に示す。

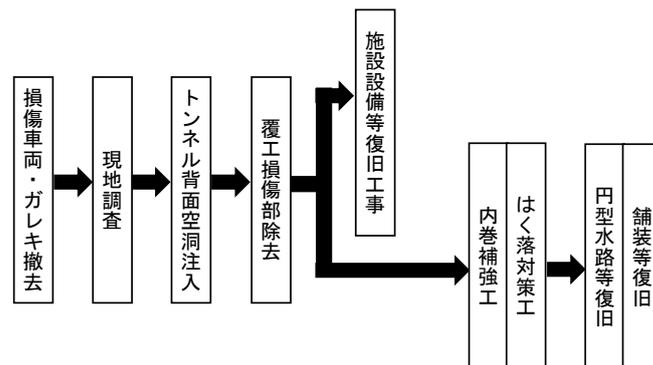
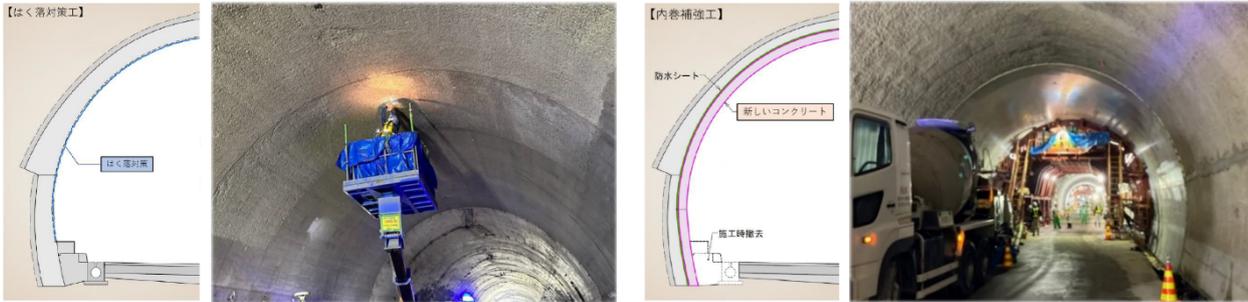


図 4.2.11.2 復旧作業の流れ（文献 1）からアレンジ



(a) 覆工コンクリート損傷部の除去作業状況



(b) 内面補強工（剥落対策）（左）および内巻補強工（右）

写真 4.2.11.3 復旧作業状況¹⁾

参考文献

- 1) NEXCO 西日本：E2 山陽自動車道 尼子山トンネル火災事故の対応報告，2023 年 12 月 20 日
(https://www.w-nexco.co.jp/sanyo_fire_closure/) (2024 年 5 月閲覧)
- 2) 加藤寛之，西岡昌樹，小林康範，吉井直人，徳永隼人，水島 楓：車両火災により火害を受けたトンネル覆工コンクリートの評価について，令和 6 年度土木学会第 79 回年次学術講演会，VI-1045，2024
- 3) NEXCO 西日本：山陽自動車道 尼子山トンネル火災事故技術検討会 第 1 回検討会，現地状況写真
(https://www.w-nexco.co.jp/sanyo_fire_closure/) (2024 年 5 月閲覧)
- 4) 水野希典，粕 忠弘，小林康範：トンネル内車両火災により損傷したトンネル覆工への対応，令和 6 年度土木学会第 79 回年次学術講演会，VI-1044，2024

(執筆者：栗原哲彦)

4.2.12 国内火害事例から見られる火害補修工法

4.2.1～4.2.11 までに、国内で発生したコンクリート構造物の火害事例の概要をまとめた。さらに、その結果を「火災日時」、「場所」、「推定温度」、「調査内容（主にコンクリートに対して）」、「復旧工事」で再整理した。その結果を表4.2.12.1に示す。表より、火害の発生箇所は、住宅、トンネル、高架橋とそれぞれ異なるが、火害後の調査としては、「外観観察」、「受熱温度の推定」、「圧縮強度」、「中性化深さ」、「鉄筋の引張試験」が多く実施されていることが分かる。PC構造物に対しては、さらにPC鋼線の性能確認が行われている。調査後の補修・補強に関しては、「洗浄」、「ひび割れ注入」、「表面塗布、含浸」、「断面修復、吹付」、「接着」が多く適用され実施されていた。これらの補修・補強は、熱により低下したコンクリートの性能回復という観点よりは、内部の鉄筋保護の観点から実施されていると考えられる。なお、補修・補強後の再度の高温加熱による劣化を想定しているものはないと考える。

補修・補強後の注意点として、500℃以下の比較的低温度の受熱であっても、外部物質浸透抵抗性は低下していることが想定される。そのため、その後の中性化・塩害等が進行していないか、中性化深さ・塩分浸透深さ測定等による確認を行う。遊離石灰等の内部からの物質の滲み出しの有無は目視検査等により確認を行う。

また、ひび割れ注入あるいは圧入による補修を行った場合には、浸透圧によって既存のひび割れが開口する恐れがあるため、目視検査等によって補修による悪影響がないことを確認する。断面修復、吹付、接着等により補修・補強を行った場合には、既設コンクリートと補修材料の一体性が確保されていることが重要である。そのため、打音法等によって補修・補強材料の浮き等がないことを確認する。

(執筆者：栗原哲彦)

表 4.2.12.1 コンクリート構造物の火害事例一覧

No.	火災日時	場所	推定温度	調査内容 (主にコンクリートに対して)	補修・補強内容
1	不明	鉄筋コンクリート造 2 階建て	かぶり部 400~500℃程度 爆裂部 800~1000℃	主として材料調査 ・目視観察 ・打音検査 (浮き調査) ・圧縮強度 (シュミットハンマー) ・中性化試験 (フェノールフタレイン)	・火害による損傷が認められた範囲の柱および梁は、かぶり部を完全には取り取り、旧断面形状に復旧 ・床スラブで爆裂・鉄筋露出部は、そのスラブ全体をはつり落とし、コンクリートを打設し直し ・壁では、メッシュ筋を組み込み、膨張系モルタルを圧入
2	不明	集合住宅 (最上階 1 戸が全焼)		・目視調査 ・床スラブの振動試験	・脆弱化したかぶりコンクリートの損傷程度によりければ、アルカリ付与財の塗布・PCM で修復、エポキシ樹脂でひび割れ注入 (3mm 以上) を実施 ・損傷の激しい範囲には CFRP 接着
3	昭和 54 年 7 月 11 日	東名高速下り線・日本坂トンネル	コンクリート表面温度 600~1000℃	覆工コンクリートの調査 ・目視観察 ・炭酸ガス分析 ・炭酸ガス再吸収量分析 ・セメント水和物観察 (偏光顕微鏡) ・セメント結晶型の組成分析 (X 線回折) ・中性化判定 (フェノールフタレイン) ・動弾性係数・圧縮強度 (コア調査)	覆工コンクリート ・覆工背面に裏込め注入 ・スチールファイバーコンクリートの吹付け (アーチアクションを期待)
4	昭和 55 年 8 月 1 日	JR 武蔵野線 RC 高架橋	かぶり部分 (50mm) より以深は 500℃以下 (遊離石灰量から推定) 梁表面 1200℃以上 露出していた鉄筋は 1000℃以上	・外観目視、たたき調査 コンクリート ・圧縮強度・弾性係数 (コア調査) ・中性化深さ (フェノールフタレイン) ・受熱温度の推定 (CO2 再吸着量、遊離石灰量、X 線回折) 鉄筋 ・引張強度 ・受熱温度の推定 (金属組織観察)	・柱および梁はかぶり部分をはつり取り、外巻コンクリートで補強 ・比較的被害が小さい箇所はモルタル吹付による補修 ・被害の大きいスラブ → 打ち換え
5	平成 13 年 11 月 4 日	国道 53 号津山バイパス 平福高架橋下	上部工 ・P2 橋脚表面から 70mm で約 200℃ ・P2 から 8.55m 表面から 70mm で 150℃未満 下部工 ・表層付近 (表面から 15mm) で 500℃未満 ・表面から 45mm より深い箇所では 200℃未満	・外観損傷状況調査 ・材料強度 ・受熱温度 ・中性化深さ ・載荷試験	対策工の方針 コンクリートおよび鉄筋ともに大きな強度低下はなく、また、載荷試験から耐荷性能に問題ないことから、損傷した脆弱部をはつり取り、断面を復旧する補修工を施す 上下部工 ・損傷した脆弱部をはつり取り、断面を復旧する補修工 (断面修復) を実施 (剥離: 40mm 以下 (上部工)、最 80mm (床版下面隅角部)) ・補強繊維入りポリマーセメントモルタルを使用 ・火元に近い部分には表面保護工を施工。車両通行時のひび割れ開閉を考慮し、伸び性能が良い被覆材を使用 支承 ・全数取り換え (P2 橋脚) ・状況に応じてゴム沓を新設
6	平成 15 年 1 月 19 日	国道 41 号釣鐘洞門	受熱温度 700~1200℃	・目視観察 ・中性化深さ測定 (簡易ドリル法) ・表面強度 (シュミットハンマー) ・圧縮強度 (コア) ・鉄筋引張試験 ・モルタルの XRD 試験	残ったコンクリート鉄筋はほぼ健全 頂版 ・高圧水洗浄による脆弱コンクリートの除去 ・剥落防止装置付き吹付工法の実施 (剥落が深い箇所は左官工法により穴埋め、ネット、アンカー)
7	平成 18 年 12 月 30 日	国道 1 号守口高架橋 (近畿自動車道・阪神高速守口線・中央環状線と接続する要所)	コンクリート 300~600℃ (PC 主桁及び橋脚梁部のコンクリートが一部変色: ピンク色) PC 鋼線 かぶり位置 (35mm) で 350℃未満	・外観目視、たたき調査 ・載荷性能試験 (トラック 4 台で計 20t) コンクリート ・反発高度測定 (リバウンドハンマー法) ・中性化深さ測定 ・圧縮強度、静弾性係数試験 PC 鋼線 ・受熱温度分析 (UV スペクトル法) ・加熱剛性試験 ・PC 鋼線強度試験	主桁補修+補強 ・鋼板接着工法 (内主桁、外主桁) コンクリート (かぶり部) ・断面修復 (剥落防止工を併用)
8	平成 20 年 8 月 3 日	首都高速 5 号池袋線	約 1200℃で 90 分間	RC 床版 ・近接目視調査 ・受熱温度の推定 ・圧縮強度 ・中性化深さ RC 橋脚 ・近接目視調査 ・受熱温度の推定 ・圧縮強度 ・中性化深さ ・鉄筋の引張試験	・上層 RC 床版は全面打ち換え ・RC 橋脚および横梁は、損傷箇所の断面修復等による部分補修を実施 (PCM による吹付、アラミド繊維シートの貼付け (原型復旧))
9	平成 28 年 10 月 12 日	新座洞道のマンホール内	受熱時間: 2 時間半~3 時間程度	・中性化深さ (フェノールフタレイン、はつり及びコア) ・Ca(OH) ₂ の消失状況 (粉末 X 線回折) ・表面強度 (リバウンドハンマー測定) ・圧縮強度 (コア: ポップアウト部、ひび割れ部、すず付着部)	ポップアウト部 ・けい酸リチウム系表面含浸材の塗布 (アルカリ性の付与) ・断面修復 (亜硝酸塩系防錆剤入りポリマーセメントモルタル) ・剥落防止 (既設コンクリートとの剥落が懸念 → アンカー) ひび割れ部 ・表面含浸材を塗布 (ひび割れ幅が小さく、注入工が適用不可) すず付着部 ・表面洗浄

表 4.2.12.1 コンクリート構造物の火害事例一覧（続き）

No.	火災日時	場所	推定温度	調査内容 (主にコンクリートに対して)	復旧工事
10	令和4年9月28日	東名高速道路豊田ジャンクション Aランプ橋	すす付着箇所：300℃未満 変色箇所：300～600℃ 火勢低下まで1時間46分（鎮火まで3時間21分）	<ul style="list-style-type: none"> ・近接目視（ひび割れ，浮き，鉄筋露出，爆裂，汚れ） ・反発硬度試験（リバウンドハンマー） ・中性化試験（フェノールフタレイン） ・コアの抜き取り 	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ箇所にひび割れ注入工を実施 ・はつり後，断面修復（爆裂，浮き等の箇所）
11	令和5年9月5日	山陽自動車道尼子山トンネル	トンネル内は400～600℃程度	覆工コンクリート <ul style="list-style-type: none"> ・たたき調査 ・圧縮強度（コア） ・中性化深さ ・反発硬度 	覆工コンクリート表面からの影響が深い箇所 <ul style="list-style-type: none"> ・損傷したコンクリートを除去し，内巻き補強工を実施 影響が浅い箇所 <ul style="list-style-type: none"> ・剥離落下の危険性があるコンクリートをはつり落とし，塗布系材料を覆工する内面補強工を実施

4.3 補修・補強方法の選定に必要な情報

前節「4.2」で整理した過去の火害事例において、コンクリートの補修方法として採用されていた主な補修・補強方法に対して、その概要や特徴を整理し、補修・補強方法を選定する際に必要な情報をまとめる。ここでは、「ひび割れ注入」、「表面被覆・含浸」、「断面修復・吹付け」、「接着・巻立」を取り上げる。

4.3.1 ひび割れ注入

(1) 目的

ひび割れ注入工法は、コンクリートのひび割れ補修工法の一つであり、コンクリートに発生したひび割れからの劣化因子の浸入防止、ひび割れ変状の修復、ひび割れの充填接着が目的で実施される。0.2～1.0mm程度のひび割れ内部に樹脂系あるいはセメント系の材料を注入充填させる工法である。これにより、コンクリート構造物の防水性や耐久性の回復あるいは向上が期待できる。なお、ひび割れ注入工法以外に、ひび割れ被覆工法や充てん工法がある。

(2) 施工方法

ひび割れ注入工法の一般的な施工方法・手順を、**図 4.3.1.1** に示す。

下地処理：補修部表面の油分やホコリの十分な除去。注入材注入用の治具を接着するためにひび割れ表面周辺を乾燥させる。

治具取付：注入治具を接着剤にて貼付ける。

シール：注入材が漏れないよう、治具間のひび割れ表面を止水材で覆う。

注入：注入材にセメント系材料を使用する場合は、注入前に水通しを行う。エポキシ系材料を使用する場合は、ひび割れ内を乾燥させる。その後、適切に注入材を注入する。

仕上げ：注入材の硬化を確認後、サンダー等で表面を平滑に仕上げる

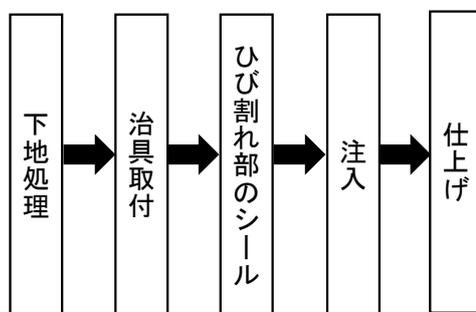


図 4.3.1.1 ひび割れ注入工法の手順

(3) 選定に必要な情報

ひび割れ注入工法を適用する際、その適用が適切であるか、以下の情報をもとに判断される。

- ・ ひび割れの有無：補修対象領域にひび割れがあるか。
- ・ ひび割れ幅：ひび割れ注入工法に適切なひび割れ幅（0.2～1.0mm）であるか。
- ・ 周辺のコンクリートの劣化状況：ひび割れ周辺のコンクリートの強度低下などはないか。
- ・ 含水状態：エポキシ系注入材を使用する場合、ひび割れ内部は乾燥状態が望ましい。

（執筆：栗原哲彦）

4.3.2 表面被覆・含浸

火害に対する補修において、表面被覆・含浸工法の主な目的は、①表面美観の回復、②劣化因子の侵入抑制、③アルカリ性の付与である。

表面被覆・含浸工法の適用にあたっては、塗布面のひび割れ、浮き、剥離等変状の規模に応じて補修の目的を踏まえた要求品質を満足する材料を選定する。過大な変状のために表面被覆・含浸工法の適用では補修の目的を達成することができない場合には、断面修復等の工法に変更する。

なお、火害を受けたコンクリートは一般に脱水される傾向にある。そのため、コンクリート表面は塗料・含浸材を吸収しやすく、塗布量は一般のコンクリートより多くなる傾向にあり、適正な塗布量が確保されていない場合、被覆層の品質・性能が十分に得られず、また、断面修復等を行う場合にはドライアウト現象を誘引する恐れがある。したがって、表面被覆・含浸工法の適用にあたっては、施工品質を一定に保てるよう試験によってあらかじめ適正塗布量の把握をしたうえで施工を行うことが望ましい。一方、塗布面が湿潤状態の場合は、塗料の付着性能あるいは含浸材の含浸性能が確保されるよう、表面含水率等の使用条件を確認したうえで施工を行う。

アルカリ性の付与を目的とする場合は、表面含浸材の含浸深さを考慮のうえ、原コンクリートの中性化深さおよび鉄筋のかぶり深さに応じて塗布面の位置（はつり深さ）を選定するとよい。

（執筆者：松浦忠孝）

4.3.3 断面修復・吹付け

(1) 断面修復工法の概要

断面修復工法とは、一般に既設コンクリートの劣化や鋼材の腐食などにより生じた断面欠損部の修復や補修工事に伴い除去された部分を当初の形状に修復する工法である¹⁾。断面修復に要求される性能として、以下のような内容が挙げられる。

- a) 圧縮、曲げおよび引張強度などが既存コンクリートと同等以上であること。
- b) 熱膨張係数、弾性係数およびポアソン比が既存コンクリートと同等であること。
- c) 乾燥収縮が小さく、接着性がよいこと。
- d) 現場施工であるため作業性がよいこと。

断面修復に用いる材料は、これらの要求性能を満足するものを選定する。断面修復には、一般にセメントモルタルやポリマーセメントモルタルが使用されることが多い。吹付けや充填工法を用いる場合で、補修範囲が大きい場合にはコンクリートも使用されることもある。断面修復を行う際には、修復部材、環境条件、施工法などを考慮して、適切な施工を行う必要がある。

断面修復工法には、左官工法、吹付け工法、充填工法の3つが挙げられる。左官工法とは、こて仕上げにより断面修復材を人力によって塗り付ける工法で、大がかりな機械が不要であり、比較的補修の範囲が小さく、局所的な補修に適している(図4.3.3.1)。左官工法の場合、断面修復材が剥がれ落ちやすいので、下地処理を確実にを行い、こて圧をかけて塗り付けることが重要である。比較的厚い断面の修復や広い面積の修復などで一度に施工できない場合は、コールドジョイントなどの欠陥が生じないように施工時間に配慮が必要である。また、同日中に重ね塗りができない場合には、ドライアウトを防止するために層間にも下地処理が必要である。

吹付け工法とは、圧縮空気を用いて材料を施工面に吹付けることで断面修復する工法で、比較的補修面積の大きい場合に用いられる。左官工法と比べて、時間当たりの施工量が大きく、打継ぎ面における高い付着性能が期待できるなどの特徴があるが、粉塵やリバウンドが大きくなるといった課題もある。吹付け工法には、あらかじめミキサにより練り混ぜられた材料を圧送して吹き付ける湿式吹付け工法(図4.3.3.2)と水以外の材料を圧送し、吹付けノズルの先端で水を加えて吹付ける乾式吹付け工法(図4.3.3.3)がある。

充填工法とは、断面修復部に型枠を設置して、断面修復材を打ち込む工法で、補修面積や補修厚さが大きい場合に用いられる。隅々まで密実に充填させるために、流動性や材料分離抵抗性に優れた材料が使用される。圧送により注入する方法(図4.3.3.4)や、側面や上面から流し込んで打ち込む方法(図4.3.3.5)がある。既存コンクリートの下面より充填する場合は、逆打ちとなるため、はね出し部を設けて水頭差による圧力を作用させたり、端部に空気抜きを設けるなど注意が必要となる。

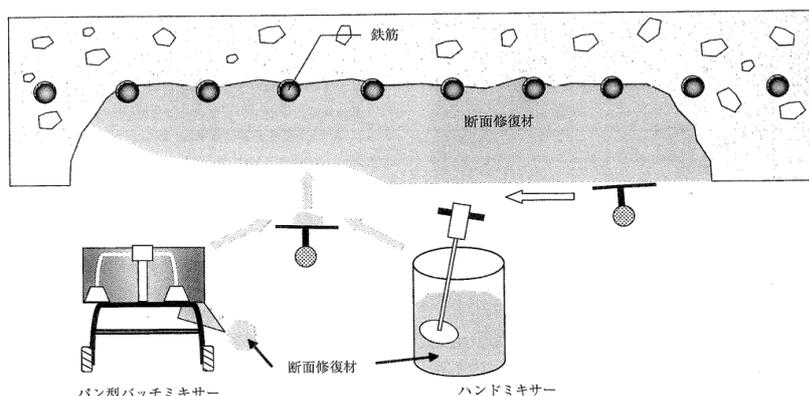


図4.3.3.1 左官工法による断面修復の施工例²⁾

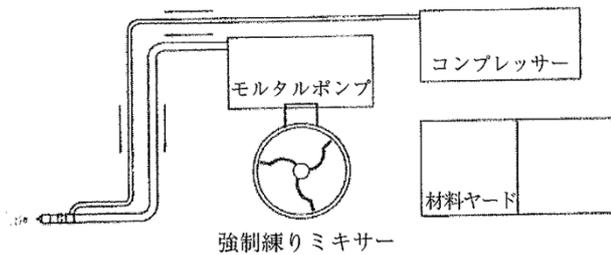


図 4.3.3.2 湿式吹付けシステムの例²⁾

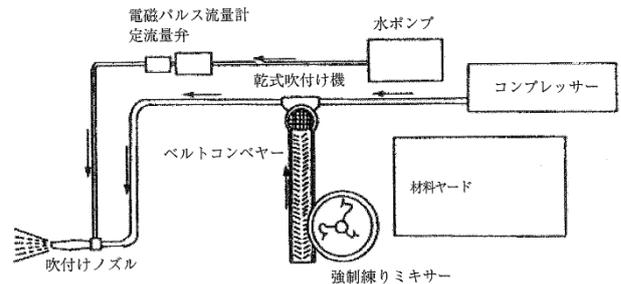


図 4.3.3.3 乾式吹付けシステムの例²⁾

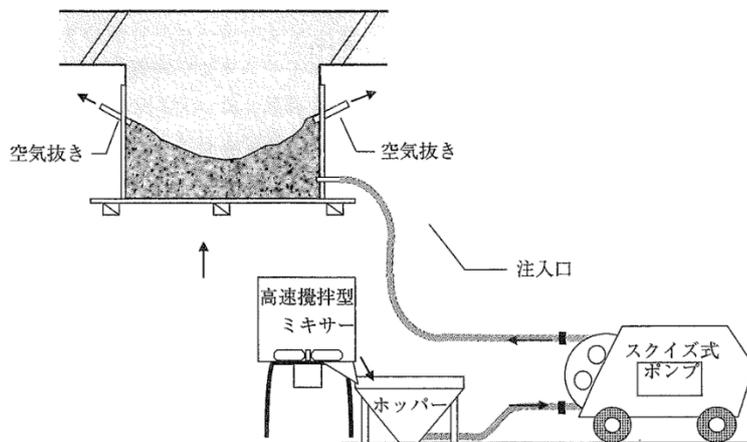


図 4.3.3.4 注入による打込みの例²⁾

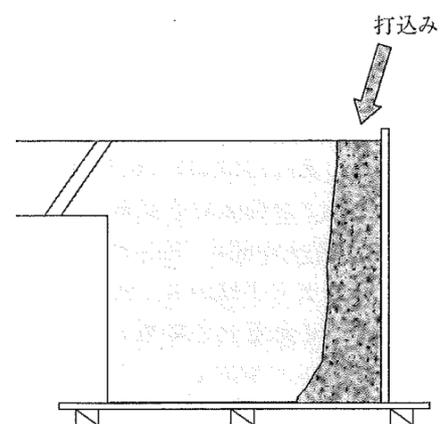


図 4.3.3.5 流し込みによる打込みの例²⁾

(2) 爆裂抵抗性を有する断面修復の検討事例

耐火版や耐火吹付けなどの耐火被覆が施されている場合は、耐火被覆を交換すればよいが、有機繊維を混入してコンクリート自体に爆裂抵抗性を付与する場合がある。再び火災が発生することを想定して、爆裂抵抗性を付与した断面修復工法の検討が進められている。

トンネル火災を想定した RABT 曲線での検討事例として、田嶋ら³⁾および森田ら⁴⁾は、セグメントを模擬した高強度コンクリートの平板の表面をウォータージェットで劣化部を除去した後、吹付けによる補修を行い、RABT 曲線による加熱実験を行っている。ポリプロピレン短繊維を 0.20~0.26vol.%混入することで爆裂を抑制できると報告している。川西ら⁵⁾は、ポリプロピレン短繊維を 0~0.10vol.%混入したポリマーセメントモルタルを用いた吹付けにより補修した試験体を用いて加熱実験を行い、0.10vol.%繊維を混入することで爆裂を抑制できることを確認している。後藤ら⁶⁾および関ら⁷⁾は、耐火実験により加熱した試験体の表面から 6cm 部分をはつりとり、吹付けや左官にて補修を行った試験体を用いて再度加熱を行い、補修材の耐爆裂性や遮熱性について検討しており、その結果、ポリアセタール短繊維を 0.20vol.%混入することで爆裂を抑制できたとしている。屋代ら⁸⁾は、厚さ 30mm および 200mm の窪みを設けたコンクリートに、ポリマーセメントモルタルによる左官で補修した試験体を用いて加熱実験を行い、耐火性の検証を行っている。ポリプロピレン短繊維を 0.50vol.%混入することで爆裂を抑制できること、アンカーとステンレスメッシュを設置することで、加熱後の剥離を抑えられることなどを確認している。杉野ら⁹⁾は、アクリル系粉末樹脂を使用したポリマーセメントモルタルについて、リング拘束供試体¹⁰⁾を用いてポリマーセメント比 0~20%まで変化させた場合の RABT 曲線による加熱実験を行っている。ポリマーセメント比の増加に伴い爆裂規模が増

大することを確認している。また、ナイロン繊維を 0.1vol.%混入することで、爆裂を抑制できることを確認している。また、後藤ら¹¹⁾は、厚さ 150mmのうち、表層 50mmをポリマーセメント比 10%のアクリル系粉末樹脂を使用したポリマーセメントモルタルで補修したはり供試体を用いて、RABT 曲線による加熱実験を行い、ナイロン繊維を 0.5vol.%混入することで爆裂を抑制できることを確認している。

(3)断面修復工法の選定に必要な情報

断面修復工法の選定を行う上で、必要な情報として、既存コンクリート構造物のひび割れの発生状況、剥離・剥落の有無、火害による劣化の程度や範囲が挙げられる。コンクリート構造物が高温履歴を受けた場合、ひび割れを生じる可能性が高い。有害なひび割れが発生すると、劣化因子の侵入抵抗性が低下するため、ひび割れの有無やひび割れ幅などを確認し、断面修復を行う前に必要に応じて補修を行う必要がある。火害を受けた場合、ひび割れとともに受熱温度によっては強度や弾性係数が低下する。断面修復を行う前に剥離・剥落が生じていないか点検し、認められる場合には確実に除去する必要がある。また、断面修復を行う場合、左官工法、吹付け工法および充填工法など施工方法を決める必要がある。補修面積や補修厚さによって工法を選択する必要があるため、劣化範囲の推定が重要となる。また、構造物の種類、環境条件などによっても異なるため、施工条件を整理する必要がある。火害を受けた場合は、打ち継ぎ面が乾燥している場合が多く、ドライアウトが発生しやすいため、下地の状況を確認し、適切な処置をする必要がある。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断士技術' 24 [基礎編]，pp. 294-296，2024. 3
- 2) 宮川豊章，大迫信明，上東泰，小柳光生，清水昭之，守分敦郎：コンクリート補修・補強ハンドブック，朝倉書店，pp. 425-430，2011. 6
- 3) 田嶋仁志，岸田政彦，春日清志，神田亨，森田武：耐火試験後の RC セグメントを用いた熱劣化特性及び補修性に関する実験研究，トンネル工学報告集，Vol. 15，pp. 287-292，2005
- 4) 森田武，田中博一，元売正美，奥山圭也：無機系吹付け補修材の耐火性状に関する実験的検討，土木学会第 62 回年次学術講演会講演梗概集，V-604，pp. 1207-1208，2007
- 5) 川西貴士，平田隆祥，青木茂：ポリプロピレン短繊維を用いた耐火性吹付け工法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 2，pp. 577-582，2007. 6
- 6) 後藤徹，林裕悟：耐火セグメントの加熱実験報告，土木学会年次学術講演会梗概集，Vol. 60，VI-320，pp. 637-638，2005
- 7) 関伸司，森田武，林裕悟，中川拓也：耐火セグメントの加熱実験報告 その 2，土木学会年次学術講演会講演梗概集，Vol. 60，VI-121，pp. 241-242，2005
- 8) 屋代勉，香川敦，川西貴士：ポリプロピレン短繊維を用いた断面修復材の耐火性，土木学会第 69 回年次学術講演会，2014. 9
- 9) 杉野雄亮，小澤満津雄，谷辺徹，常藤光，祐川真紀帆：リング拘束供試体法を適用したアクリル系ポリマーセメントモルタルの火災時の爆裂性状と爆裂発生メカニズムに関する検討，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol. 77，No. 4，pp. 150-163，2021
- 10) 日本コンクリート工学会 JCI 規準：コンクリートの爆裂試験方法，JCI-S-014，2024
- 11) 後藤悠太，杉野雄亮，祐川真紀帆，小澤満津雄：火災時におけるポリマーセメントモルタルで補修した RC はりの爆裂性状評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 44，No. 1，pp. 736-741，2022

(執筆著者：川西貴士)

4.3.4 接着・巻立

(1) 目的

接着工法および巻立工法とは、コンクリートのひび割れ補修・補強工法の一つである。接着工法は、既設部材表面に接着剤やアンカーを用いて補強材を接着し、既設部材を補強材と一体化する工法である。補強材として、FRP や鋼板が使用される。一方、巻立工法は、主に、柱（橋脚）や壁部材を対象として、既設部材の周囲に補強部材あるいは補強材を追加する工法である。コンクリート、FRP、鋼板が使用される。これにより、構造物の力学的な性能の回復あるいは向上が図れる補修・補強工法である。

(2) 施工方法

1) 接着工法

ここでは、鋼板接着工法を例に、一般的な施工方法・手順を、図 4.3.4.1 に示す。

下地処理：補修部表面の油分やホコリの十分な除去。鋼板を接着する部分を十分に乾燥させる。

鋼板取付：アンカーなどを使用し、既存部材に鋼板を取り付ける。

シール：既存部材と鋼板の隙間に接着剤を注入するため、それが漏れないよう、シールする。

注入：主に、エポキシ系材料を適切に注入する。

仕上げ：注入材の硬化を確認後、注入パイプ等を撤去する。

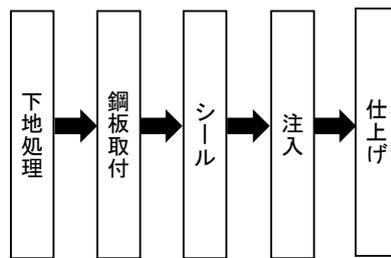


図 4.3.4.1 鋼板接着工法の手順

2) 巻立工法

ここでは、コンクリート巻立工法を例に、一般的な施工方法・手順を、図 4.3.4.2 に示す。

下地処理：ブラストなどで表面の付着物や脆弱部分を除去する。

アンカー設置：型枠取付用などのアンカーを設置する。

鉄筋設置：鉄筋を組立て、設置する。

型枠設置：打込み用の型枠を設置する。

コンクリート打込み：コンクリートを型枠に打込む。

養生：コンクリートが硬化するまで養生する。

脱型：コンクリートが硬化したことを確認した後、型枠を取り除く。

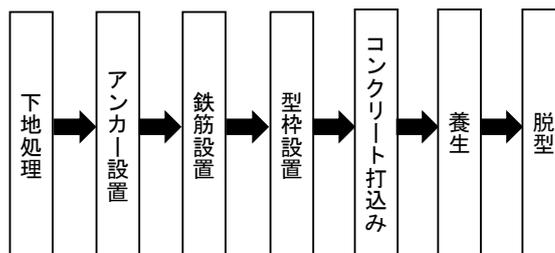


図 4.3.4.2 コンクリート巻立工法の手順

(3) 選定に必要な情報

接着工法，巻立工法を適用する際，その適用が適切であるか，以下の情報をもとに判断される．

- ・コンクリートの劣化範囲と程度：劣化部の範囲（剥離，剥落，劣化深さなど）や強度低下の状況．
接着工法，巻立工法ともに，既存部のコンクリートの強度を期待する工法であるため，既存部に十分な強度が残存しているか．
- ・ひび割れの有無：補修部にひび割れがあるか．
- ・含水状態：接着剤を使用する場合，接着部は十分乾燥している必要がある．

（執筆者：栗原哲彦）

4.3.5 工法選定に必要な情報

4.3.1～4.3.4において、火害を受けたコンクリートに対して適用されている主要な補修・補強工法を概説した。その中で、その工法を選定するに必要な情報を整理し、表4.3.5.1にまとめた。この表から、火害を受けたコンクリートを補修・補強する際に必要な情報としては、主として、「ひび割れ状況」、「劣化範囲」、「含水率」、「鉄筋位置」であると整理できた。これらを的確に把握したうえで、劣化因子になりうる物質の外部からの侵入を防ぐための補修工法等が選定されている。なお、PC構造物の場合は、この他に「残存プレストレス量」の情報が必要である。残存プレストレス量の調査方法については、4.5節で触れる。

表 4.3.5.1 工法選定に必要な情報

補修・補強工法	工法選定に必要な情報
ひび割れ注入（樹脂系、セメント系）	ひび割れの有無 ひび割れ幅 劣化範囲（周辺コンクリートの強度など） 含水率の状況 など
表面被覆（モルタル、樹脂）	ひび割れの有無 ひび割れ幅 はく落・断面欠損の有無 劣化範囲（強度、中性化深さなど） 鉄筋位置 含水率の状況 残存プレストレス量 など
断面修復（モルタル、コンクリート）	ひび割れの有無 ひび割れ幅 はく落・断面欠損の有無 劣化範囲（強度、中性化深さなど） 鉄筋位置 含水率の状況 残存プレストレス量 など
接着・巻立	ひび割れの有無 ひび割れ幅 はく落・断面欠損の有無 劣化範囲（強度、中性化深さなど） 鉄筋位置 含水率の状況 残存プレストレス量 など
解体・打ち換え	ひび割れの有無 ひび割れ幅 はく落・断面欠損の有無 劣化範囲（強度、中性化深さなど） 鉄筋位置 含水率の状況 残存プレストレス量 耐荷性能 など

（執筆者：栗原哲彦）

4.4 補修後の耐久性確認

前節「4.3」では、火害を受けたコンクリートの補修方法のうち、主なものを概説した。さらに、その補修工法を選定する際に必要な情報をまとめた。通常、火害を受けたコンクリート構造物の補修・補強が完了した後は、通常のコンクリート構造物の点検作業に移行し、事後は火害を受けていないものと同じように維持管理・点検が行われる。火害補修後の点検の注意点等を記したものはほとんどない。そこで、ここでは4.3で挙げた補修方法に関して、事後の継続的 point 点検の観点から、火害補修後の点検ポイントを整理した。

4.4.1 ひび割れ注入

ひび割れ注入工法は、①コンクリートに発生したひび割れからの劣化因子の浸入防止、②ひび割れ変状の修復、③ひび割れの充填接着を目的としている。したがって、補修後の維持管理では、注入材あるいは補修した表面部分がこれら①～③を満たしていることを確認する。

注入箇所に関しては、目視にて注入材およびその周辺のコンクリートのひび割れや漏水の有無を確認し、その健全性を確認する。また、ひび割れの補修のみが実施されている場合、その周辺のコンクリートは洗浄など無補修の場合がある。コンクリートは300℃程度の比較的低い熱の作用を受けた場合でも、外部物質の浸透抵抗が劣るとの指摘¹⁾があることから、通常より劣化因子浸透による劣化速度が速くなっている可能性がある。そのため、定期的に中性化深さなどを評価すると良い。

参考文献

1) 例えば、若林瑠美，小澤満津雄，迫井裕樹，川邊清伸：火災損傷を受けた普通コンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，pp. 1003-1008，2015

(執筆者：栗原哲彦)

4.4.2 表面被覆・含浸

火害を受けたコンクリートに適用した表面被覆・含浸工法は、主に①表面美観の回復、②劣化因子の侵入抑制、③アルカリ性の付与を目的としている。補修後の維持管理においては、現状の表面被覆材料あるいはコンクリート表面の状態がこれらの要求品質を満たしていることを確認する。

表面被覆材は、まず、外観目視により塗膜の白亜化、変退化、ひび割れ、浮き、剥がれの有無によりその健全性を評価する。また必要に応じて、表面被覆材の付着強さ試験によって原コンクリートとの界面の健全性を評価する。これらの結果から表面被覆材の変状進行により内部のコンクリートの中性化や鉄筋の腐食進行の恐れがある場合は、必要に応じて再施工等の措置を講じる。

含浸材の効果持続は、アルカリ性付与を目的とした場合はフェノール法等による中性化深さ、表面硬化を目的とした場合は、リバウンドハンマー等による強度推定による評価が考えられる。ただし、これらはコンクリートコアあるいはドリル粉の採取等微破壊を伴う場合があるため、調査位置、標本数等を十分に検討したうえで行うことが望ましい。

(執筆者：松浦忠孝)

4.4.3 断面修復・吹付け

断面修復後は、補修した箇所に変状がないかを点検する必要がある。考えられる変状としては、断面修復箇所の剥離・剥落、ひび割れ、漏水の発生が挙げられる。断面修復を行う場合、既存コンクリートとの打継部において、ドライアウトが生じたり、異物の混入によって、断面修復材が剥がれやすい。火害による劣化部を除去する際に、脆弱部や剥離・剥落片が残っていると、その界面で剥がれる可能性が高い。また、断面修復を行う場合、断面修復材の収縮が既設コンクリートに拘束されるため、ひび割れが生じやすい。さらに、火害が生じた後の既設コンクリートにひび割れが発生すると、そのひび割れから浸透した水が断面修復材の打継部やひび割れから漏れ出してくる。

点検方法としては、まず目視観察により変状の有無を確認する。断面修復材と既存コンクリートとの打継部にひび割れ、段差が生じていないか、ひび割れや漏水が生じていないかの確認を行う。剥離・剥落については、目視観察と併せてハンマの打撃によるたたき調査を行い、異音がしないか確認する。ひび割れが発生している場合は、断面修復材の収縮の拘束によるひび割れなのか、既存コンクリートに発生したひび割れが断面修復材に進展したのか、発生の要因を確認する。有害なひび割れが発生すると、耐久性の低下を招くため、表面被覆やひび割れ注入など、適切な対策を講じる必要がある。ひび割れ部から錆汁が生じている場合には、既存コンクリートの鋼材腐食が進んでいる可能性が高いため、詳細な調査が必要である。

(執筆者：川西貴士)

4.4.4 接着・巻立

接着工法および巻立工法は、①曲げ耐力・②せん断耐力・③じん性を向上させる目的で実施される。そのため、補修後の維持管理では、補強材と既存部材との一体性が重要であり、それにより①～③の向上が果たされているかを確認する。

接着工法では、既存部材の強度を期待して、その表面に補強材として主に鋼板や FRP が接着されるため、目視にて補強材の変状の有無を確認し、たたき試験などにて既存部材との付着切れの有無から、その健全性を確認する。

巻立工法では、接着工法と同様に、既存部材の強度を期待して、その表面に補強材としてセメント系材料や鋼板、FRP が使用される。そのため、目視にて補強材の変状の有無（セメント系材料の場合は、ひび割れの有無も含め）を確認し、同様にたたき試験などにて既存部材との付着切れの有無から、その健全性を確認する。接着工法においても巻立工法においても、既存部材との一体性が最も重要となる。補強材裏面の付着切れ、浮き、空洞の有無は、定期的に確認すると良い。

(執筆者：栗原哲彦)

4.4.5 火害補修技術の総括

4.4.1～4.4.4では、火害の補修に適用される主な補修方法に関して、事後の継続的点検の観点から、今後の点検ポイントを整理した。土木学会の「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)」では、火害レベルを「火害損傷度」としてA～Dの4レベルに分けて整理している(表4.4.5.1¹⁾)。一方、日本建築学会の「建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説2024」では、火害レベルを「被災度」としてA～Cの3レベルに分けて整理している(表4.4.5.2²⁾)。ここでは、両表を参考に、火害レベルを被害規模にて分離することとし、小被害・中被害・大被害に分けて整理した。小被害は「無被害あるいは場合によって補修を要する被害」、中被害は「補修を要する被害」、大被害は「補強あるいは打替えを要する被害」と定義した。

4.4.1～4.4.4で調査した内容を「レベル」、「被害規模」、「定義」、「色」、「補修・補強方法」、「施工後の確認」、「事後の継続的確認」に分けてまとめた結果を表4.4.5.3に示す。これまでは、補修・補強方法の選定方法として、火害診断結果から適切な方法を選択すると良いとの報告書等が多くあるが、補修・補強後の対応については、その言及が乏しかった。ここでは、補修・補強後の対応、点検のポイントを整理した。補修・補強直後においては、その補修・補強方法が適切に実施されているかどうかを主に目視点検により、ひび割れ補修状況や母材と補修・補強材料との一体性を確認する必要がある。PC構造物については、この時点でのプレストレス量の確認も必要である。火害の補修・補強が実施された後は、火害前に実施されていた通常の点検が適用されるケースがほとんどである。しかし、4.4.1でも記載したように、コンクリートは300℃程度の比較的低い熱の作用を受けた場合でも、外部物質の浸透抵抗が劣るとの指摘があるため、無被害・無補修の判断を行った場合でも、熱を受けていないコンクリートに比べ、劣化が早期に進展する可能性がある。こうした点を考慮し、補修・補強後の継続的確認事項として、被害規模ごとに「事後の継続的確認」をまとめた。通常の点検で確認されている項目も多く含むが、母材側のドライアウトの影響や比較的低温域でも劣化がある点など、通常の点検ではあまり留意しない点があるため、火害に対する補修・補強効果が継続されているかどうか、通常の点検時以上に留意して事後の点検を実施する必要がある。

表 4.4.5.1 コンクリートの火害損傷度¹⁾

火害損傷度	火害状況
A	無被害 ① コンクリートの表面の推定受熱温度が300℃未満である。 ② すすの付着は見られるが、ひび割れや剥離は見られない。
B	場合によって補修を要する被害 ① コンクリートの表面の推定受熱温度が300℃以上500℃未満である。 ② コンクリートの表面的なひび割れ、もしくは表面的な剥離が見られる。
C	補修を要する被害 ① コンクリート内部の推定受熱温度は500℃以上だが、部材耐力は設計上必要な耐力を保持している、もしくは部材の変形が許容される範囲にとどまっている。 ② 耐久性を確保する上で許容されないひび割れが見られる。 ③ 鉄筋に達する浮きや剥離が見られる。
D	補強・打替えを要する被害 ① コンクリート内部、鉄筋、PC鋼材のすべて、もしくは一部の推定受熱温度が500℃以上で、部材耐力が設計上必要な耐力を下回る。 ② 部材に許容されない変形が生じている。

表 4.4.5.2 建物全体の火害の程度を示す「被災度」²⁾

被災度	定義
A	構造体に火災の影響がない場合
B	構造体が火災の影響を受け、補修・補強により再使用が可能な場合
C	倒壊の危険性があり、再使用が困難な場合

表 4.4.5.3 火害補修後の継続的確認

レベル	被害規模	定義	色	補修・補強方法	施工後の確認	事後の継続的確認
I	小被害	無被害 場合によって補修を要する被害	ピンク色	無補修（何もしない）		強度 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ）
				汚れ除去 （各種ブラスト）	目視点検（すす除去状況の確認） ひび割れの有無	強度 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ）
				脱臭（オゾン脱臭法）	残存臭気	強度 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ） 臭気
				表面強化剤の塗布 （微細なひび割れ）	目視点検（剥離・ひび割れ）	強度 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ）
				ひび割れ注入	目視点検（漏水・剥離・ひび割れ）	強度 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ）
II	中被害	補修を要する被害	ピンク色 ～灰白色	ひび割れ注入	目視点検（漏水・剥離・ひび割れ）	強度 ひび割れ（コンクリート，注入材） 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ）
				表面被覆・含浸	目視点検（ひび割れ，断面修復状況） コンクリートと塗布剤との一体性	強度 ひび割れ 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ） コンクリートと塗布剤との一体性 残存プレストレス量
				断面修復	目視点検（ひび割れ，断面修復状況） 新旧材料の一体性	強度 ひび割れ 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ） 新旧材料の一体性（打音） 残存プレストレス量
III	大被害	補強あるいは打ち換えを要する被害	灰白色 ～淡黄色	ひび割れ注入	目視点検（漏水・剥離・ひび割れ）	強度 ひび割れ（コンクリート，注入材） 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ）
				表面被覆・含浸	目視点検（ひび割れ，断面修復状況） コンクリートと塗布剤との一体性 プレストレス量	強度 ひび割れ 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ） コンクリートと塗布剤との一体性 残存プレストレス量
				断面修復	目視点検（ひび割れ，断面修復状況） 新旧材料の一体性 プレストレス量	強度 ひび割れ 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ） 新旧材料の一体性（打音） 残存プレストレス量
				増厚	目視点検（ひび割れ，断面修復状況） 新旧材料の一体性 プレストレス量	強度 ひび割れ 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ） 新旧材料の一体性（打音） 残存プレストレス量
				接着	目視点検（ひび割れ，断面修復状況） 新旧材料の一体性 プレストレス量	強度 ひび割れ 漏水 外部物質浸透性（中性化深さ） 新旧材料の一体性（打音） 残存プレストレス量
				解体・打ち換え	解体状況 打ち換え状況	打ち換え後は通常の点検・管理

（執筆者：栗原哲彦）

参考文献

- 1) 土木学会：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)，コンクリートライブラリー143，2014
- 2) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説，2024

4.5 火害を受けた PC 構造物への対応

本章では、国内で発生したコンクリート構造物の火害事例を調査し、そこで適用されている補修・補強工法をピックアップし、「工法選定に必要な情報」や「火害補修後の継続的確認」の観点から、火害後の維持管理について、点検ポイントを整理した。

しかし、本章で取り上げた火害事例には、プレストレストコンクリート（以下、PC）構造物の事例が少ない。他の国内の火害事例を見ても、PC 構造物の火害事例は決して多くない。そのため、本章で記した補修・補強工法は、RC 構造物を対象に適用されてきたものである。PC 構造物の火害補修においても適用可能な工法ではあるが、PC 構造物の観点から整理できていない。

そこで、本節では、火害を受けた PC 構造物の補修・補強を考えた際に、どのような対応が考えられるか、その留意点を記載する。

PC 構造物の火害調査・診断、ならびに補修・補強に関する考え方は、基本的に鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物と同様と考えられる。ただし、PC 構造物の場合、PC 鋼材が配置されており、コンクリートにプレストレスが導入されている点に注意が必要である。

PC 構造物が、火害による損傷を受けた場合、コンクリートの力学的特性の変化（圧縮強度、弾性係数など）に伴い、導入プレストレスの再分配やそれに伴うプレストレス力の低下が生じている可能性が懸念される。また、大規模にかぶりコンクリートの剥落などが生じた場合には、補修・補強後の断面にはプレストレスが導入されないため、構造物の耐力に問題がないか検討が必要となる。そのため、PC 構造物が火害を受けた場合には、RC 構造物で一般的に実施されている火害調査・診断に加えて、残存プレストレス量に関する調査を実施するのが望ましいと考えられる。残存プレストレス量の調査として、コンクリート表面にコアや切込みなどで部分的な溝を作り、それにより開放される応力を調査する「応力開放法」¹⁾がある。また、発生しているひび割れが重荷重により開く動きを測定することで PC 鋼材の残存引張力を推定する「表面ひずみ法」²⁾などがある。これらの評価手法は経年劣化等による損傷を受けた PC 部材の残存プレストレス量調査に用いられている手法である。従って、その採用にあたっては火害による損傷被災状況等を加味し、適切に評価できる手法を採用する必要がある。また、PC 鋼材が高温の環境下に曝された場合は、PC 鋼材の耐力が低下することが報告されているため、PC 鋼材の受熱温度についても留意する必要がある。加えて、ポストテンション方式の PC 部材ではシースやグラウトの品質の確認も必要である。特に PE(ポリエチレン製)シースが用いられている場合には高温の影響により PE シースが融解している可能性もあるため留意する必要がある。また、PC グラウトはコンクリート同様に、セメントと水の水和反応によるセメント硬化体である。2.2 節の加熱を受けたコンクリートの基礎的特性で述べたように、火災の影響により PC グラウトも力学的性質や化学的特性、物理的特性が大きく変化すると考えられる。PC グラウトはコンクリートとは異なり粗骨材を含んでいないため、500°Cを超える温度で圧縮強度がコンクリートに比べて大きく低下するとの研究報告例³⁾もあるため、受熱温度によっては PC グラウトの品質が低下している可能性があることを念頭に調査を実施するのが望ましい。PC 部材のシースやグラウトに着目した火害に関する研究報告は非常に少なく、今後、研究の進展が望まれる。

調査・診断の結果、PC 構造物への補強が必要な場合、設計荷重に対する不足分を鋼板接着や連続炭素繊維シート貼付け、外ケーブル、CFRP プレートなどを用いた補強方法が考えられる。なお、プレストレスを与えて補強を行う場合には、火害による損傷を大きく受けている場所と受けていない場所では、プレストレスの損失状態が異なることも考えられるため、補強時に導入したプレストレスによりオーバープレストレスとならないように留意する必要がある。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：既設 PC ポストテンション橋保全技術指針，プレストレストコンクリート工学会，2022. 1.
- 2) 表面ひずみ法による PC 鋼材残存緊張力の推定手法の開発について：https://www.tus.ac.jp/today/archive/20210120_0102.html（閲覧日：2024. 7. 26）
- 3) 白石真由奈，東洋輔，旭澤広輝，小澤満津雄：ポストテンション方式 PC 部材の耐火性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 46，No. 1，2024.

（執筆者：藤本謙太郎，栗原哲彦）

4.6 4章のまとめ

本章では、国内で発生したコンクリート構造物の火害事例を調査し、そこで適用されている補修・補強工法を整理した。その中から、工法を選定する際に必要な情報をまとめるとともに、火害補修後の継続的維持管理の中で、事後において何を確認すべきであるかをまとめた。現状では、火害補修後のコンクリート構造物は、通常のコンクリート構造物と同様の維持管理が行われているが、より注意を向けて点検・診断作業を実施していくことが必要である。

また、今回事例調査した火害の多くはRC構造物であり、プレストレストコンクリート（以後、PC）構造物の火害事例は多くなかった。昨今、コンクリート工事の省力・省人化による施工時間短縮の観点からプレキャスト化施工が推進されている。PC部材のプレキャスト化施工も今後さらに推進されるものと考えられ、多くがPC構造物となると予想できる。ますますPC構造物が増えていく中、PC構造物が火害を受けるケースが今後増えていくものと考えられる。今回、4.5節において、PC構造物への対応を記述したが、残存プレストレス量やPC鋼材の状態を的確に把握することがより重要となる。

今回整理した情報が、火害補修後のRC・PC構造物の維持管理において一助となれば幸いである。

（執筆者：栗原哲彦）

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】:「シリカフェ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靱性率評価式	／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ラム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標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ー磯焼けを防ぎ藻場を造るー	／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マonitoring技術	／平19.4	／A4・572p	
	【77】:コンクリートー地盤境界問題研究小委員会(332) 報告書ーコンクリートー地盤境界問題に関する現状と課題ー	／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ー時空間における設計の課題と近未来像ー	／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ー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ー	／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】:コンクリートー地盤境界問題研究小委員会(332)第2期 報告書ー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ー	／平22.8	／A4・207p	
	【92】:市民のためのコンクリートをめざしてー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ー	／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ーBack to the Futureー	／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ーBack to the Future IIー	／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ー次世代の「コンクリート標準示方書」に向けてー	／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ー破壊機構と性能評価の将来像を探るー	／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ー時空間性能評価技術の未来予想図ー	／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)成果報告書	／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・施工技术研究小委員会(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2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ー時空間性能評価技術の未来予想図Ⅱー	／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	
	※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」			
	【130】:示方書連絡調整小委員会(230委員会)報告書ー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ー	／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	
	【133】:3Dプリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会(364委員会)成果報告書	／令5.9	／A4・166p	
	【134】:養生および混和材料技術に着目したコンクリート構造物の品質・耐久性確保システム研究小委員会(356委員会)第Ⅱ期成果報告書	／令5.11	／DL	
	【135】:部材詳細の設計と照査に関する研究小委員会(第2期)報告書ー暗黙知から形式知へー	／令6.6	／DL	
	【136】:プレストレストコンクリート黎明期に建設された茂喜登牛水路橋の解体調査研究小委員会(363委員会)成果報告書	／令6.7	／DL	
	【137】:火害を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷と性能の評価に関する調査研究小委員会(365委員会)成果報告	／令7.3	／DL	

ご注意 当該出版物の内容を複製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.137

火害を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷と性能の評価に関する調査研究小委員会(365委員会)成果報告書

2025年3月6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

火害を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷と
性能の評価に関する調査研究小委員会
委員長 小澤満津雄

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 三輪準二

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 978-4-8106-1162

印刷：(株)大應