高炉スラグ微粉末を大量使用した改良型高炉セメントC種による脱炭素と品質確保の両立

鹿島建設(株)　正会員　○境　美緒　正会員　関　健吾
正会員　塚田　美佑　正会員　古橋　佳
正会員　取違　剛　正会員　橋本　学
フェロー会員　坂井　吾郎

1．はじめに

2050 年のカーボンニュートラル社会の実現に向け，国土交通省は建設分野の脱炭素化に向けた国策として，2026 年 8 月に「国土交通省土木工事の脱炭素アクションプラン」（以下、国交省 AP と称する）を更新した[1]．国交省 AP では，高炉スラグ微粉末などの低炭素材料でセメントの 55%以上を置換した低炭素コンクリートについて，2030 年から用途を指定して使用を原則化し，順次対象を拡大していく方針が示されている．現在，国内では高炉セメント B 種（以下，BB と称する）が流通しているが，セメントの置換率は約 40%に留まる．これに対して，高炉セメント C 種（以下，BC と称する）はセメントの置換率が 60～70%であり，BB に比べてセメント使用量を大幅に削減できるものの，収縮量の増大や初期強度の低下が懸念され，土木構造物への利用は限定的である．そこで当社らは，これらの課題を克服した改良型高炉セメント C 種（以下，改 BC と称する）を開発した[2]．

一方で，これからのコンクリートに求められる性能は脱炭素化のみではない．土木構造物は長期にわたり供用されるため高い耐久性が求められる．また，この耐久性を確実に発揮するには，施工性に優れ，劣化因子の侵入経路となる初期欠陥やひび割れを生じにくいことが重要である．加えて，大幅なコストの増加を伴うことなくこれらを実現することが求められる．

そこで本稿では，改 BC の既往の開発成果を整理するとともに，これまでに十分な知見が得られていなかった暑中期におけるフレッシュ性状，長期暴露試験による耐久性および温度ひび割れ抵抗性について追加の評価を行い，土木構造物への適用性を検討した事例を報告する．

2．改良型高炉セメントC種（改BC）の概要

改 BC は，製造時の CO_2 排出量が多い普通ポルトランドセメントの約 70%を副産物である高炉スラグ微粉末で置換した混合セメントであり，JIS R 5211 の高炉セメント C 種に適合している．従来，高炉スラグ微粉末を大量に含むセメントは，自己収縮や乾燥収縮の増大によりひび割れ発生リスクが高まることや，過大なブリーディング，凝結遅延といった課題があったが，改 BC は石膏量の調整による SO_3 量の最適化（**図-1**）および専用混和剤の適用により，これらの課題を解決し，BB と同様の使い勝手となるよう工夫している．これにより，BB と比較してセメント製造時の材料に起因する CO_2 排出量を約 38%削減できる（**図-2**）．現在，BB は国内セメント生産量の約 2 割を占めるとされており[3]，その流通量は年間約 360 万 t と推定される．仮に，これら

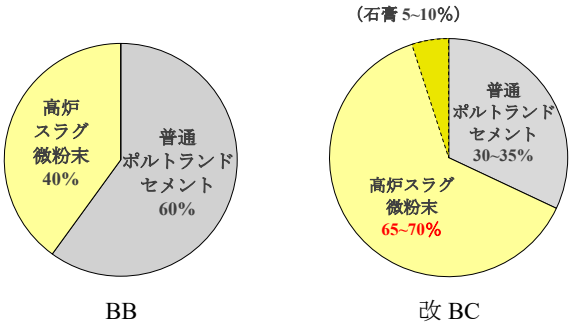


図-1　BB と改 BC の構成割合の比較

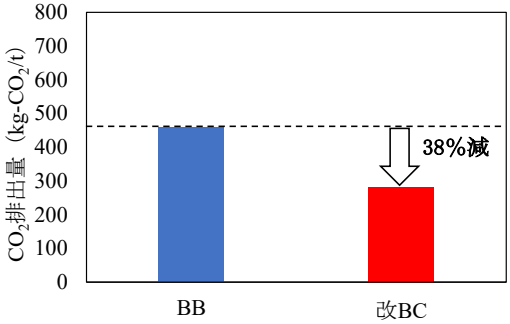


図-2　BB と改 BC の CO_2 排出量の比較

キーワード　改良型高炉セメントC種，脱炭素アクションプラン，低炭素コンクリート，品質確保，ECM®
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL. 042-485-1111

が全て改 BC に置き換わった場合，年間約 63 万 t の CO_2 削減が期待される．

これまでに取得している改 BC と BB の強度発現性の比較を**図-3** に示す．改 BC は BB と比較して若干強度発現性が低下するため，BB と同等の圧縮強度とする際は，改 BC の水セメント比を 5%程度低減することが有効と考えられる．

また，従来の BC では凝結遅延やブリーディング量の増加が課題であったため，改 BC は SO_3 量を調整することで凝結の始発および終結を BB と同程度としている（**図-4**）．さらに改 BC 用の専用混和剤を用いることで，BB よりもブリーディング量が抑制される（**図-5**）．このことから，改 BC は BB と同様の取扱いが可能となることに加え，ブリーディングを抑制することでコンクリートの品質を向上することも期待される．

3．改 BC の土木構造物への適用性評価

筆者ら[4]は，改 BC を用いたコンクリートの土木構造物への適用を目的として，フレッシュ性状，強度発現性，発熱特性および耐久性について検討を行い，適用に必要な基礎的知見を蓄積している．一方で，暑中期におけるフレッシュ性状の経時変化，長期暴露試験による耐久性および温度ひび割れ抵抗性に関する検証事例は十分でない．そこで本研究では，これらの項目について追加の検証を実施した．

(1) 実機試験による施工性評価

改 BC の施工性評価を目的として，実機による製造とスランプの経時変化試験を実施した．試験は修正標準配合（夏期）を対象とし，改 BC の出荷実績を有する生コン工場にて 7 月に実施した．製造したコンクリートについて，トラックアジテータに積載して撹拌しながらスランプ，空気量，コンクリート温度を測定し，所定時間経過後の経時変化を確認した．

改 BC の使用材料を**表-1** に示す．本研究で用いた改 BC は普通ポルトランドセメントの比率が 32%，高炉スラグ微粉末 4000（SO_3 含有量 3.65%）の比率が 68%である．コンクリートの配合を**表-2** に示す．水中コンクリートを対象とし，呼び強度は 30，目標スランプは荷卸し時で 18.0±2.5cm，目標空気量は 4.5±1.5%とした．フレッシュ性状は練上がり直後，30 分後，60 分後および 90 分後に測定した．

スランプの経時変化を**図-6** に示す．試験当日の外気温は約 30℃であり，コンクリート温度は練上がり直後

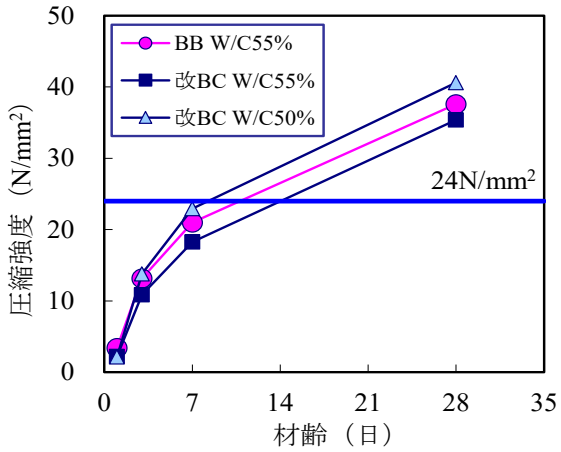


図-3　改 BC と BB の強度発現性の比較

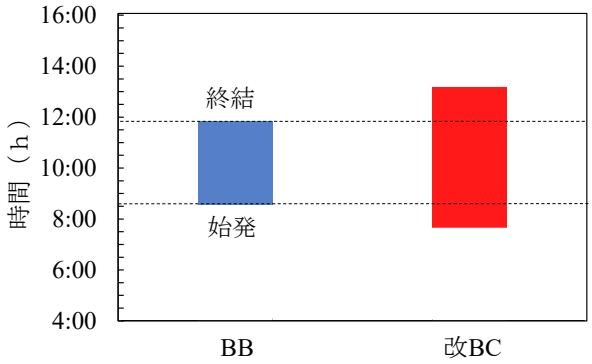


図-4　凝結時間の比較（20℃）

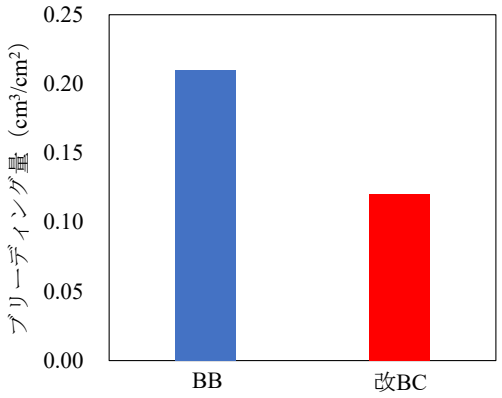


図-5　ブリーディング量の比較（20℃）

表-1　改 BC の使用材料

項目	記号	摘要
水	W	水道水，密度 1.00g/cm³
ｾﾒﾝﾄ	C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ，密度 3.16g/cm³
混和材	BFS	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末 4000，密度 2.89g/cm³ SO_3 含有量 3.65%，比表面積 4,660cm²/g
細骨材	S	混合砂，表乾密度 2.62g/cm³，F.M. 2.60
粗骨材	G	砕石，表乾密度 2.70g/cm³，Gmax20mm
混和剤	Ad	改 BC 用高性能 AE 減水剤(遅延型)， 変性ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物とﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸系化合物

表-2　改 BC を用いたコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³）					
		W	C	BFS	S	G	Ad
47.5	47.6	170	114	244	830	940	3.94

から 90 分後まで 31℃であった．スランプは経時的に低下したものの，90 分後においても目標値の 18.0±2.5 cm を満足した．また，空気量についても 90 分後まで目標範囲内を維持した．以上より，改 BC を用いたコンクリートは，暑中下においても良好なフレッシュ性状を保持できることが確認された．なお，当該コンクリートの水中養生した供試体の圧縮強度は，材齢 28 日の時点で 36.4N/mm^2 であった．

(2) 長期耐久性

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは，中性化に対する抵抗性が懸念される[5]。そこで，改 BC の中性化抵抗性を評価するため，壁部材を模擬した大型ブロックを製作して屋外での長期暴露試験を実施している（**写真-1**）．大型ブロックは改 BC を用いて製作したものと BB で製作したものの 2 種類である．それぞれの諸元を**表-3** に示す．暴露開始から約 3 年および約 13 年の時点でコア供試体を採取し，中性化深さを測定して中性化速度係数を算出した．また，約 13 年の時点ではテストハンマーにて推定圧縮強度を測定した．

圧縮強度と中性化速度係数の関係を**図-7** に示す．図中には土木学会コンクリートライブラリー151[6]（以下，CL.151 と称する）に示される実環境で取得された BB の圧縮強度と中性化速度係数の関係をスラグ置換率毎に併記している．本研究で取得した改 BC の中性化速度係数は 2.72mm/√年，推定圧縮強度は 32.6N/mm^2 であった．改 BC の中性化速度係数は，本研究で取得した BB の値（1.38mm/√年）と比較すると大きくなるものの，CL.151 に示される同程度の圧縮強度を有する BB の実環境データと概ね同等の範囲にあることが確認された．今後も暴露試験を継続し，中性化に関するデータを蓄積する予定である．

(3) 温度ひび割れ抵抗性の評価

土木構造物は供用期間が長く，高い耐久性が求められる．そのため，設計時点において各種劣化要因に対する抵抗性を付与するためのコンクリートの配合設計がなされる．しかしながら，施工の段階で初期欠陥や温度ひび割れ等の変状が発生してしまうと，設計どおりの耐久性を発揮するのが困難となる．特に土木構造物はマスコンクリートが多いため，温度ひび割れに対する抵抗性を評価することは重要である．

そこで，改 BC について，断熱温度上昇特性を取得するとともに，圧縮強度と静弾性係数および割裂引張強度の関係などの各種データを取得して，温度ひび割れに対する抵抗性を 3 次元温度応力解析で評価した．断熱温度上昇特性の実験ケースを**表-5** に示す．また，測

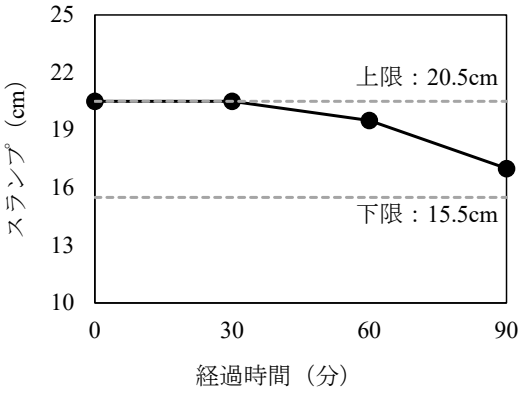


図-6　スランプの経時変化



写真-1　壁部材を模擬した大型ブロックの暴露試験状況

表-3　大型ブロックの諸元

項目	改BC	BB
寸法	厚さ0.7m，長さ1.5m，高さ1.0m	
W/B	50%	55%
単位セメント量	300 kg/m^3	
打設年月日	2013年9月20日	
暴露場所	埼玉県中央部	

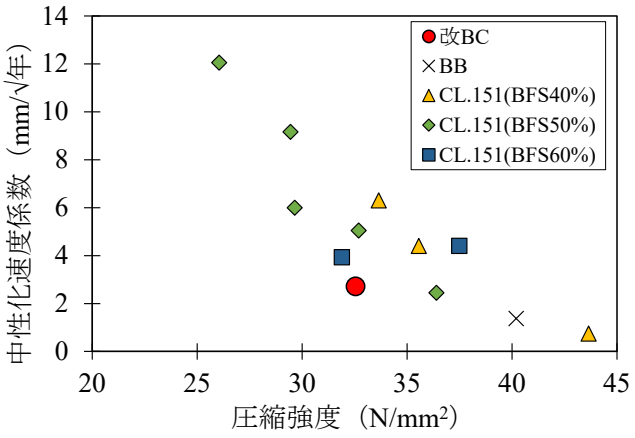


図-7　圧縮強度と中性化速度係数の関係

定結果の一覧を**表-6** に，終局断熱温度上昇量を**図-8** に示す．**図-8** 中には，マスコンクリートのひび割れ制御指針 2025[8]（以下，マスコン指針）に示される他セメントの値も併記した．**図-8** より，改 BC の終局断熱温度上昇量は BB よりも小さく，中庸熱ポルトランドセメント（M）よりも小さい結果となった．これは，高炉スラグ微粉末の置換率が大きいためと考えられる．

また，改 BC の圧縮強度と静弾性係数の関係を**図-9** に示す．**図-9** より，改 BC の静弾性係数はマスコン指針に示される関係とほぼ同等であった．次に，改 BC の圧縮強度と割裂引張強度の関係を**図-10** に示す．**図-10** より，改 BC の割裂引張強度はマスコン指針に示される関係よりも大きい結果であった．これは，改 BC に多く含まれる石膏がエトリンガイトを形成し，引張強度が増加した可能性がある[9]．

これらの試験結果を用いて 3 次元温度応力解析を行い，改 BC の温度ひび割れ抵抗性を BB と比較した．解析モデルは厚さ 1.0m，高さ 4.0m，長さ 10m の壁部材とし，地盤および底版（厚さ 1.0m，幅 4.0m，長さ 10m）をモデル化した．解析ケースおよび解析条件の一覧を**表-4** に示す．施工時期を標準期，夏期および冬期の 3 水準とし，外気温は東京都府中市の気象庁データを用いた．コンクリートの初期温度は外気温+5℃とした．

解析結果の一覧を**表-7** に示す．表より，改 BC の最小ひび割れ指数はいずれの時期においても BB より大きな値となり，温度ひび割れのリスクを低減できることが分かった．そこで，温度ひび割れによる最大ひび割れ幅の予測値を 2022 年制定コンクリート標準示方書【設計編】[10]（以下，示方書【設計編】と称する）に示される式を用いて評価した．鉄筋比は，一般的な土木構造物を想定して 0.50%とした．評価結果を**図-11** に示す．図より，鉄筋比が 0.50%の場合，BB は標準期および夏期で最大ひび割れ幅が 0.20mm を上回る結果となったが，改 BC はいずれの時期においても最大ひび割れが 0.20mm を下回る結果となった．

以上のように，改 BC は BB と比較して温度ひび割れ

表-5　実験ケース（断熱温度上昇特性）[7]

単位セメント量 (kg/m³)	打込み温度 (℃)			セメント種類
	10	20	30	
300	○	○	○	改 BC
350	○	○	○	
400	○	○	○	

表-6　改 BC の断熱温度上昇特性[7]

単位 ｾﾒﾝﾄ量 (kg/m³)	打込み温度 (℃)	終局断熱温度上昇量 (℃)	断熱温度上昇速度 (-)	発熱開始材齢 (日)
300	10	36.80	0.591	0.440
	20	32.02	1.261	0.364
	30	31.70	2.592	0.273
350	10	41.33	0.671	0.642
	20	41.55	1.170	0.300
	30	38.73	2.068	0.314
400	10	43.09	0.660	0.721
	20	46.96	1.152	0.345
	30	41.28	2.207	0.378

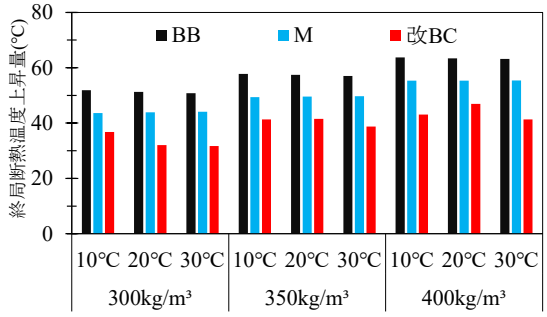


図-8　終局断熱温度上昇量の比較

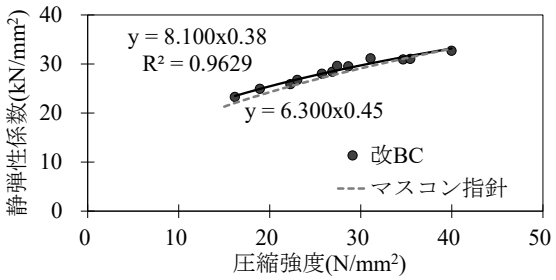


図-9　改 BC の圧縮強度と静弾性係数の関係[7]

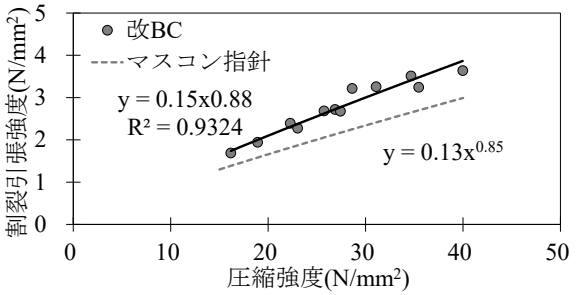


図-10　改 BC の圧縮強度と引張強度の関係[7]

表-4　解析ケースおよび解析条件一覧

Case ｾﾒﾝﾄ種類	配合強度 (N/mm²)	水ｾﾒﾝﾄ比 (%)	単位水量 (kg/m³)	単位ｾﾒﾝﾄ量 (kg/m³)	熱膨張係数 (μ/℃)	断熱温度上昇特性	強度推定式 圧縮強度	強度推定式 ﾔﾝｸﾞ係数 引張強度	自己収縮特性	養生日数(日) 標準期 夏期	養生日数(日) 冬期
BB	37.0	51.4	154	300	12	マスコン指針				7	12
改 BC		48.0	151	315		**表-6**	文献[7]	**図-9，図-10**	文献[7]	8	14

に対するリスクが低いことが示された.

４．改 BC の土木構造物への適用実績

ここまで述べてきたように, 改 BC は良好なフレッシュ性状を有するほか, BB と比較してひび割れ抵抗性と CO_2 排出量が少ない点で優れる. そこで本稿では, 愛媛県大洲市内の山鳥坂ダム仮排水トンネル工事での適用事例を紹介する.

(1)工事概要

本工事は, 山鳥坂ダム建設に伴う河川転流を目的とした仮排水トンネルの建設工事である. 工事概要を以下に示すほか, 主要工事数量を**表-8** に示す.

工事名：令和 5－7 年度山鳥坂ダム仮排水トンネル工事
発注者：国土交通省 四国地方整備局
施工者：鹿島建設株式会社
工事場所：愛媛県大洲市肱川町山鳥坂地先
工期：2023.7.25～2026.3.31

(2)適用箇所

本工事では, トンネルのインバート（底版）の一部に改 BC を適用した. 当初は, BB を用いたコンクリートを打ち込む計画であったが, インバート全体の約 32%にあたる 912.4 m^3 に改 BC を適用した（**写真-2**）.

(3)適用結果

a) 室内試験

実施工に先立ち, 生コン工場での室内試験により, フレッシュ性状, 経時変化および圧縮強度を確認した. 使用材料を**表-9** に, コンクリートの配合を**表-10** に示す. 今回使用した改 BC は, 普通ポルトランドセメント, 高炉スラグ微粉末および石膏をあらかじめ所定の割合で混合したプレミックス品を使用した. 呼び強度は 24, 目標スランプは荷卸し時で 8.0±2.5cm, 目標空気量は 4.5±1.5%とした. 練混ぜには容量 60L の強制二軸ミキサを用い, 1 バッチあたりの練混ぜ量は 35L, 練混ぜ時間は注水後 120 秒とした. 環境温度は 20℃とし, 経時変化は練上がり直後, 30 分後, 60 分後および 90 分後に測定したほか, ブリーディング試験を JIS A 1123 に準拠して行った. 圧縮強度試験用の供試体は, φ125mm×h250mm とし, 20℃標準養生した.

スランプの経時変化を**図-12** に, 空気量の経時変化を**図-13** に示す. 改 BC におけるスランプの保持性能は BB よりも優れており, 空気量の経時変化は BB と同等であった. また, スランプおよび空気量

表-7　解析結果一覧 [7)]

Case	BB			改 BC		
	最高温度 (℃)	最大引張応力 (N/mm^2)	最小ひび割れ指数	最高温度 (℃)	最大引張応力 (N/mm^2)	最小ひび割れ指数
標準期	52.9	5.22	0.58	48.4	4.49	0.86
夏期	64.0	5.89	0.48	58.4	5.11	0.76
冬期	30.2	3.11	0.78	28.4	2.57	1.20

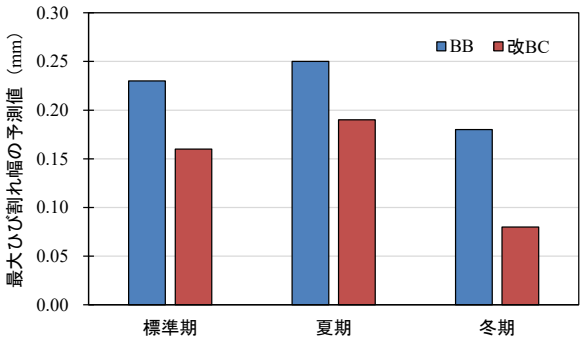


図-11　最大ひび割れ幅の予測値（鉄筋比 0.50%）

表-8　主要工事数量

項目	主要工事数量
トンネル掘削延長	682.1m
断面直径	8.0m
標準内空断面積	45.0m^2
縦断勾配	1/80

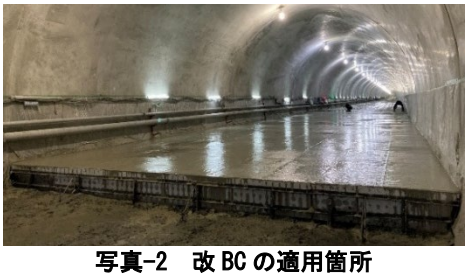


写真-2　改 BC の適用箇所

表-9　使用材料

項目	記号	摘要
水	W	水道水，密度 1.00g/cm^3
ｾﾒﾝﾄ	BB	高炉セメント B 種 密度:3.04 g/cm^3
	改 BC	改良型高炉セメント C 種 密度:2.96 g/cm^3,比表面積:3900cm^2/g
細骨材	S1	海砂，北九州市若松区岩屋沖, 密度:2.58 g/cm^3 粗粒率:2.50
	S2	砕砂，喜多郡内子町産, 密度:2.98 g/cm^3 粗粒率:2.80
粗骨材	G	砕石，喜多郡内子町産，Gmax40mm 密度:3.03 g/cm^3 実積率:60.1%
混和剤	Ad	AE 減水剤（標準型I種），主成分：ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物とﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸ｴｰﾃﾙの複合体

表-10　コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）						
		W	BB	改 BC	S1	S2	G	Ad
59.0	44.5	150	255	－	330	575	1216	2.17
54.3	44.5	144	－	265	330	575	1216	1.86

は，いずれも練上がりから 90 分後まで目標範囲内を維持した．ブリーディング量の測定結果を**図-14** に示す．改 BC および BB のブリーディング量は，材齢初期には概ね同等の推移を示したが，改 BC は約 210 分でブリーディングがほぼ終了したのに対し，BB では約 300 分までブリーディング量が増加した．最終的なブリーディング量は，改 BC が約 0.14cm^3/cm^2，BB が約 0.18cm^3/cm^2 であり，これまでの知見と同様に，改 BC は BB と比較してブリーディング量が小さいことが確認された．圧縮強度の結果を**図-15** に示す．改 BC は水セメント比を約 5%低減することで BB と同等の圧縮強度を確保しており，材齢 28 日における圧縮強度は目標の 24N/mm^2 を満足する結果であった．以上の結果から，改 BC はフレッシュ性状，ブリーディング特性および強度発現性において所要の性能を有するほか，BB と同様の取扱いが可能となることを確認し，**表-10** に示す配合を実機試験の配合として選定した．

b) 実機試験

実機試験は，標準期である 4 月に実施し，当日の外気温は 14.1℃であった．実機試験の使用材料とコンクリートの配合は，前述の室内試験と同様である．ただし，実機ミキサの練混ぜ性能を考慮し，AE 減水剤の使用量は室内試験時よりも C×0.1%分増加した．コンクリートの練混ぜは容量 3m^3 の強制二軸ミキサにて行い，2m^3 練りの 2 バッチ合わせとし，練混ぜ時間は材料投入後 30 秒間とした．練上がり直後のコンクリートのフレッシュ性状を確認した後，アジテータ車に積み込み，現場まで約 20 分運搬した．経時変化の確認として現場内でアジテータ車を待機させ，練上がり直後から 60 分後および 90 分後にスランプと空気量を測定した．圧縮強度試験用の供試体は φ125mm×h250mm とし，室内試験と同様に 20℃標準養生した．

スランプの経時変化を**図-16** に，空気量の経時変化を**図-17** に示す．スランプの経時変化は，室内試験よりも保持性がやや向上しており，90 分後まで目標範囲内を維持した．空気量については，待機中にアジテータ車の攪拌によりコンクリート中に空気が巻き込まれたことで増加傾向であったが，スランプと同様に 90 分後まで目標範囲内を維持しており，良好なフレッシュ性状を有していると判断できる．圧縮強度の結果を**図-18** に示す．室内試験と実機試験で同等の圧縮強度を確保しており，材齢 28 日における圧縮強度は目標の 24N/mm^2 を

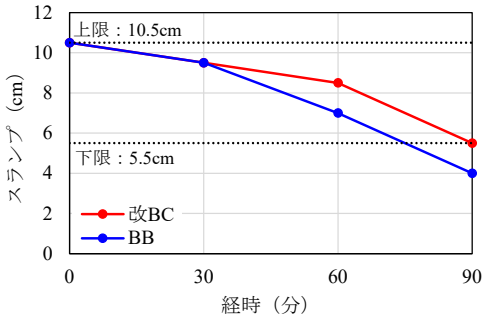


図-12 スランプの経時変化（室内試験）[11)]

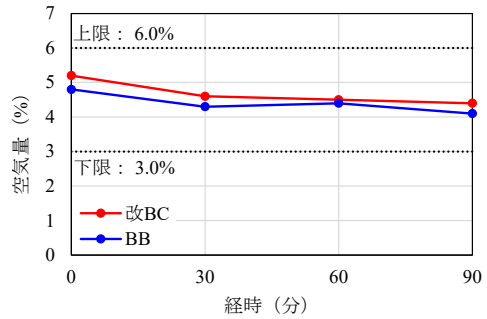


図-13 空気量の経時変化（室内試験）

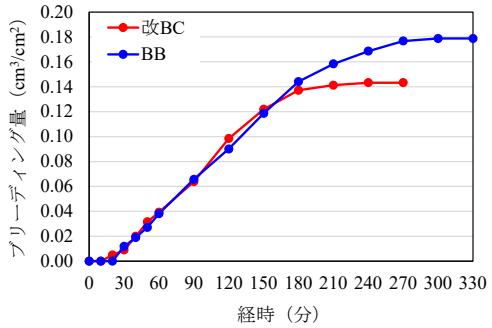


図-14 ブリーディング量（室内試験）

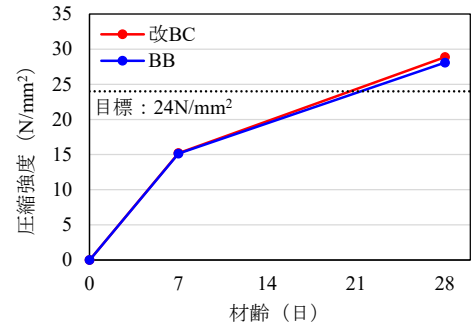


図-15 圧縮強度（室内試験）[11)]

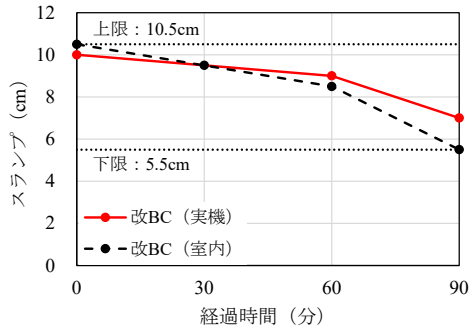


図-16 スランプの経時変化（実機試験）

満足する結果であった．以上の結果から，改 BC のフレッシュ性状，経時変化および圧縮強度発現は総じて良好であり，室内試験と実機試験で同等の品質が得られることを確認した．

c） 実施工

実施工は 5 月に実施し，環境温度は約 20℃であった．改 BC の荷卸し時のスランプ（規格値：8.0±2.5 cm）および空気量（規格値：4.5±1.5%）は，100m³ につき 1 回，計 10 回の品質管理試験において，**図-19** および**図-20** に示すとおり，いずれも規格値を満足し，十分な製造・受入れの管理が可能であった．実施工ではコンクリートポンプ車のブームを用いて打ち込んだ結果，圧送性は良好であり BB と同様の取扱いが可能であった．また，筒先のコンクリートは材料分離や過剰なブリーディングを生じることなく，良好な施工性を有していた．

熱電対をインバートの中心（表面から 250 mm）に埋設し，温度を計測した．インバート内部のコンクリートの温度履歴を**図-21** に示す．硬化時の最高温度は，改 BC の方が 2℃程度低い結果であった．単位セメント量は，改 BC の方が BB よりも 10 kg/m³ 多いが，断熱温度上昇量や発熱速度が小さいため，最高温度は低下したと考えられる．

改 BC を用いたコンクリートの適用数量（912.4 m³）を基に，CO_2 削減効果を試算した．CO_2 試算結果を**図-22** に示す．本検討では材料運搬時とセメント製造時との CO_2 排出量を分けて試算した．改 BC は BB と比較して，製造拠点が福岡県と遠方であったため，材料運搬時の CO_2 排出量が増加した．しかし，セメント製造時の CO_2 削減効果の方が大きく，合計の CO_2 排出量で比較をすると，改 BC の適用により 44.2 t の CO_2 削減効果があったと算出された．以上の結果から，改 BC は BB と同様に安定した製造，運搬および打込みが可能であり，土木構造物への適用においても良好な施工性および品質を確保できることが確認された．また，温度ひび割れ抵抗性に優れるとともに，CO_2排出量の低減効果も有することから，低炭素型セメントとして有効であると考えられる．

5．まとめと今後の課題

本稿では，改 BC を用いたコンクリートの物性データ取得を通じて，これからのコンクリートに求められる脱炭素，施工性，耐久性および温度ひび割れ抵抗性について検討した．検討結果に基づく BB と改 BC の比較一

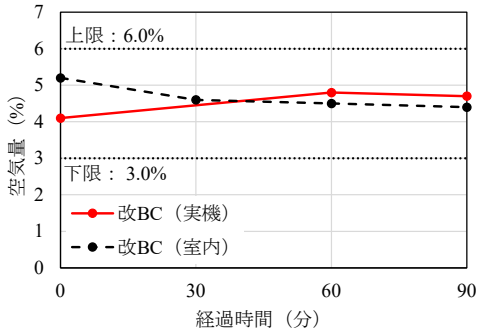


図-17　空気量の経時変化（実機試験）

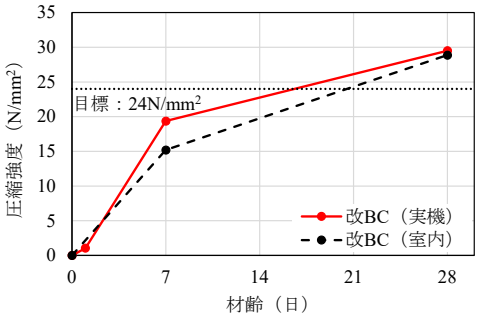


図-18　圧縮強度（実機試験）

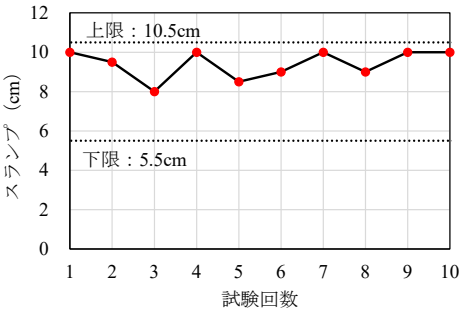


図-19　品質管理（スランプ）

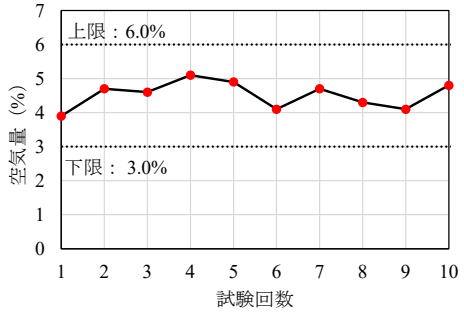


図-20　品質管理（空気量）

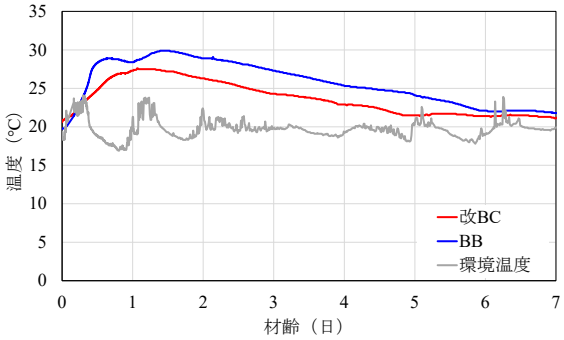


図-21　インバートの温度履歴 [11)]

覧を**表-11** に示す．表より，改 BC は CO_2 排出量だけでなく，施工性，長期耐久性および温度ひび割れ抵抗性において BB と同等以上の良好な品質を期待できる．

改 BC の課題として，コンクリート 1m³ あたりのコストが BB と比較して増加することが挙げられる．改 BC のコストが増加する要因の一つに，供給体制が整備されておらず，輸送コストが高くなることが挙げられる．改 BC は建築分野において累計約 50 万 m³ の適用実績を有するが，現在の供給体制は東京都，大阪府および福岡県等の大都市圏が中心である．そのため現状では，土木分野で多い地方や山間部での適用に際しては，材料メーカーや生コン工場との協力と連携が必須である．今後，国交省 AP が実行に移されるとともに，改 BC のように高炉スラグ微粉末の置換率が大きいセメントについても，供給体制の整備が進んでいくことが期待される．改 BC は構造物の低炭素化と品質確保を両立できる有力な選択肢の一つであると考えられるため，さらなるデータ蓄積を続け，2050 年カーボンニュートラル社会の実現に貢献していきたい．

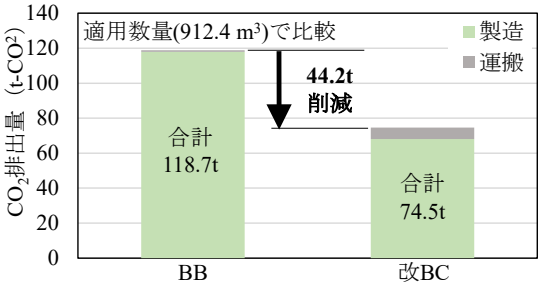


図-22　CO_2 排出量の試算結果 [11)]

表-11　BB と改 BC の比較一覧

項目	BB	改 BC
強度発現性	○	○
ブリーディング量	○	◎
凝結	○	○
中性化抵抗性	○	○
温度ひび割れ抵抗性	○	◎
コスト	○	△
供給体制	◎	△

参考文献

1) 国土交通省：国土交通省土木工事の脱炭素アクションプラン～建設現場のカーボンニュートラルに向けて～（令和 8 年 7 月改定），https://www.mlit.go.jp/report/press/content/002014475.pdf（2026 年 8 月 3 日閲覧）.

2) 米澤敏男，坂井悦郎，鯉渕清，木之下光男，釜野博臣：エネルギー・CO_2 ミニマム（ECM）セメント・コンクリートシステム，コンクリート工学，Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010.

3) 一般社団法人セメント協会：セメントの LCI データの概要，https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1i_01.pdf（2026 年 8 月 3 日閲覧）.

4) 橋本学：改良型高炉セメント C 種を用いたコンクリートの土木構造物への適用に向けた研究，九州大学博士学位論文，2019.

5) 郭度連，國府勝郎，宇治公隆：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの中性化進行速度の評価，土木学会論文集，No.802，V-69，pp.49-59，2005.

6) 土木学会：コンクリートライブラリー151 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，pp.120-121，2018.

7) 関健吾，塚田美佑，境美緒，古橋佳，坂井吾郎：改良型高炉セメント C 種を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性の評価，第 26 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，投稿中，2026.

8) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2025，pp.30-43，pp.144-151，2025.

9) Shaheen, Y,. et al. :Effect of Aggregates with High Gypsum Content on the Performance of Concrete, Challenge Journal of Concrete Research Letters, Vol.8, No.4, pp.96-108, 2017.

10) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，pp. 334-335，2023.

11) 藤井広志，古橋佳，関健吾，外山定夫：改良型高炉セメント C 種を用いたコンクリートの山鳥坂ダム仮排水トンネルへの適用，第 81 回土木学会年次学術講演会，投稿中，2026.