

高炉セメントB種にフライアッシュを混合した低炭素型高強度コンクリートに関する研究

鈴木好幸^{*1}・石川伸介^{*1}・安部弘康^{*1}

汎用的に使用できる低炭素型高強度コンクリートの実現のために、BBをFAで20%置換した高強度コンクリートのフレッシュ性状の経時変化、圧縮強度および耐久性に関する性能について検討した。その結果、強度性状については、標準養生に比べて模擬柱部材のコア供試体および簡易断熱養生供試体の材齢28日から91日までの強度増進が小さい傾向が認められた。これらの検討より、結合材にBBを使用する場合にはモルタルの線膨張係数が大きくなるため、使用する粗骨材の線膨張係数も事前に把握し、線膨張係数差が大きくなるほど強度増進の停滞が顕著になる可能性も考慮したうえで適切な調合設計を行うことが重要であることを示した。

キーワード：高強度コンクリート、高炉セメント、フライアッシュ、低炭素、圧縮強度、耐久性

1. はじめに

近年、持続可能・低炭素型社会の構築に向けた様々な取組みが地球規模で進められている。わが国においても、国内のCO₂排出量を、2030年度に2013年度比26.0%減の水準とすることが約束草案として示されるなど、省エネ・創エネをはじめとする施策・技術の積上げによる削減努力はより一層加速するものと思われる。国内の総CO₂排出量に占める建設分野の割合は非常に高いことが知られており、材料製造時、それら材料の現場あるいは工場までの輸送時など、構造物の構築に係わる部分を総合的に考慮すると2割程度になるとの試算もある¹⁾。

構造物の構築には、膨大かつ多種の材料が投入されることが建設業の特徴でもあるが、資材製造時のCO₂排出量の観点では、特にコンクリートの影響が大きいことが従前から指摘されている。コンクリートを構成する重要な材料の一つがセメントであり、セメントは、製造時の焼成過程で多くのエネルギーが必要となることに加え、石灰石が主原料であることに起因する脱CO₂反応による排出も大きい。そのため、セメントの一部を高炉スラグ微粉末（以下、GGBFS）やフライアッシュ（以下、FA）などの副産物系混和材料で置換することで、低CO₂化を図るアプローチがなされており、最近では、そうして製造されるコンクリートを「低炭素型コンクリート」と称して、建設会社を中心に様々な技術開発が進められている。

しかしながら、建設会社主導の低炭素型コンクリート開発への取り組みは、セメントの代替として副産物系混和材料を混入する概念は同じものの、建設会社ごとに混和材料の種類や置換率などの仕様が異なるため、実際の製造にあたっては、レディーミクストコンクリート工場

（以下、生コン工場）のサイロや貯蔵ビンの中身を入れ替えたりする煩雑な作業が伴うことや、出荷期間中は特定の混和材料で設備の一部が占有状態となるなど、製造者の負担増大に繋がることが懸念されている。そうした課題に対応するため、低炭素型コンクリートに使用される結合材中のGGBFSに代わって、多くの生コン工場で標準的に貯蔵されている高炉セメントB種（以下、BB）を用いることで、製造側の貯蔵設備の負担を減らすことができる概念も検討されている²⁾。その際、BBをFAで置換するような三成分系のコンクリートとすることで、BB単体のコンクリートと同程度の力学性能を保持したまま、温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れのリスクを低減できることが報告されている^{例えは3), 4)}。

これらの特徴を活かして、当社では結合材として普通ポルトランドセメント（以下、NC）、GGBFS、FAを質量比で6:2:2の割合で用いた三成分系コンクリート（ローカーボンハイパフォーマンスコンクリート：LHC[®]）を開発し、土木工事を中心に展開を進めている。

しかしながら、BBとFAを組み合わせた低炭素型コンクリートは、FAの置換率が高くなるほど、中性化抵抗性が著しく低下することが明らかとなっている^{例えは5)}。そのため、建築物への適用にあたっては、耐久設計の観点から地上躯体に適用する際に多くの制約を受ける可能性があることを考慮しなければならない。

一方で、近年、部材断面の合理化等の観点から、超高層建築物以外の建築物へも使用箇所が拡張しつつある高強度コンクリートについては、単位結合材量が大きく組織が緻密であることから、混合セメントを用いても十分な中性化抵抗性を確保できることが報告されている⁶⁾。

このように、低炭素型コンクリートと称される副産

*1 建築研究第二部

物系混和材料でセメントの一部を置換したコンクリートでは、副産物系混和材料の組み合わせ、置換率および強度レベル等で特徴が異なる性質を持っている中で、それらの各性能が網羅的に整備されているとは言い難い。特に、近年での建築物の高層化や長寿命化に伴い急速に発展し、適用が拡大している高強度領域の性状に関する知見は極めて少ないのが現状である。今後、環境配慮設計として低炭素型コンクリートの適用を検討する場合にあつては、適用箇所求められる性能を十分に満たしたうえで最大限のCO₂排出量削減が得られるように、高強度領域における低炭素型コンクリートの性能に関する知見の蓄積が必要であると考えます。

本研究では、前述の背景をふまえて、建築工事への低炭素型コンクリートの適用性拡大を目的として、建築物の地上躯体に適用可能な中性化抵抗性を保持したまま汎用的に使用できる低炭素型高強度コンクリートの実現のために、BBをFAで置換した高強度コンクリートの諸性状について検討した。

本論文では、シリーズIで生コン工場での実機実験によるフレッシュ性状の経時変化、圧縮強度、耐久性および発熱特性について検討した結果について報告する。さらに、シリーズIIでは、3つの生コン工場での実機実験の結果から構造体強度補正值（以下、S値）を取得し、粗骨材種類が構造体補正強度に及ぼす影響について検証した結果について報告する。

2. 実機実験による諸性状の検討(シリーズI)

2.1 実験概要

シリーズIの実機試験は、首都圏に供給可能な東京湾沿岸部に位置する生コン工場において、夏期、標準期および冬期にわたって実施した。耐久性および発熱特性に関する試験は、実機製造と同一材料を用いた室内試験により実施した。

2.2 目標性能

シリーズIの実機試験における圧縮強度等の目標性能を表-1に示す。材齢28日の圧縮強度の目標値として60~100N/mm²を実現するため、水結合材比（以下、W/B）は生コン工場の実績等を考慮して24、30、40%の3水準とした。スランブフローの目標値は、W/B=40%で55cm、W/B=30%で60cm、W/B=24%で65cmとし、空気量はいずれも2.0%とした。

表-1 実機試験におけるコンクリートの目標性能

項目		目標性能	
圧縮強度 (標準養生：材齢28日)		60~100 N/mm ² 程度	
水結合材比	W/B=40% W/B=30% W/B=24%	スランブフロー	55±10cm 60±10cm 65±10cm
空気量		2.0±1.5%	
コンクリート中の塩化物量		0.30 kg/m ³ 以下	

2.3 使用材料と調合

使用材料を表-2に、使用したFAの品質試験値を表-3に示す。FAは、FAII種で、かつJASS5M-401の品質基準に適合するものを使用した。BBや骨材は、製造工場で標準化されているものを用いた。

コンクリートの調合を表-4に示す。FAの置換率については、置換率が30%になると初期強度低下が大きいことや、FAによる流動性改善効果が置換率15%までは大きいですが、それ以上の置換率では小さくなることが示されている宮本らの報告⁷⁾を参考に、事前試し練りにより性状を確認したうえで、施工性と強度発現性を考慮して20%とした。

表-2 使用材料

材料(記号)	種類・産地等	物性値
セメント (BB)	高炉セメントB種	密度：3.04(g/cm ³)
混和材 (FA)	フライアッシュII種 (竹原産)	表-3参照
細骨材 (S1)	山砂 (千葉県富津市鶴岡)	密度：2.60(g/cm ³)
細骨材 (S2)	石灰砕砂 (高知県吾川郡仁淀川)	密度：2.65(g/cm ³)
粗骨材 (G)	砕石2005 (高知県吾川郡仁淀川)	密度：2.71(g/cm ³) 実績率：58.3 (%)
混和剤 (SP)	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表-3 FAの品質試験値

搬入月	品質項目						
	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)		
					材齢28日	材齢91日	
2015年	最大値	1.6	2.19	3990	107	88	103
	最小値	2.6	2.34	4380	116	89	106
	平均値	1.3	2.19	3960	105	82	99
	標準偏差 (σ)	1.9	2.28	4167	110	86.5	102.8
	標準偏差 (σ)	0.4	0.04	151	2.9	2	2.8
	JIS A 6201規格値	5.0以下	1.95以上	2500以上	95以上	80以上	90以上
	JASSM-401品質基準	4.0以下	—	3000以上	100以上	—	—

表-4 コンクリートの調合

調査記号	空気量 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)						高性能AE減水剤* (C×%)
			W	C	FA	S1	S2	G	
BBFA20-40-55	2	40	170	340	85	507	346	907	1.35
BBFA20-30-60		30	170	454	113	439	298	891	1.55
BBFA20-24-65		24	170	566	142	372	253	875	1.25

*：高性能AE減水剤の添加率は、標準期に実施したものを示す。添加率は、所要性能を満足させるために、コンクリートの温度（シーズン）に応じて調整を行うものとする。

2.4 試験項目

試験項目および参照した試験方法を表-5に示す。フレッシュコンクリートの測定はコンクリート練り上がりから30分間隔で120分まで実施した。圧縮強度試験は、標準養生供試体に加えて、構造体コンクリート強度推定のため、JASS5T-605（コア供試体による構造体コンクリート強度の推定方法）に従った実構造体の寸法形状を想定した模擬柱部材試験体を作製し、それから採取したコア供試体も作製した。さらに、参考にJASS5T-606（簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法）に準拠した簡易断熱試験体による強度確認も実施した。

耐久性試験は中性化、乾燥収縮、凍結融解および自己収縮を、発熱性試験は、断熱温度上昇をそれぞれ表-5に示す試験方法に準拠して実施した。

表-5 試験項目および参照した試験方法

試験項目	参照した試験方法
スランプフロー	JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法
フレッシュコンクリートの温度	JIS A 1156 フレッシュコンクリートの温度測定方法
空気量	JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法-空気室圧力方法
圧縮強度試験	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
静弾性係数試験	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法
中性化	JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法
乾燥収縮	JIS A 1129-3 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第3部：ダイヤルゲージ方法
凍結融解	JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法
自己収縮	日本コンクリート工学協会 自己収縮研究委員会「モールドゲージ法（簡易法）」
断熱温度上昇	日本コンクリート工学協会 品質評価試験方法研究委員会報告書「コンクリートの断熱温度上昇試験方法(案)」

3. 実験結果(シリーズ I)

3.1 フレッシュ性状

図-1にスランプフローおよび空気量の経過時間に伴う測定結果を示す。スランプフローは、W/B=40%と24%では、時間が経過するにつれて低下する傾向がみられたものの、いずれの調合、打設時期においても120分経過後まで目標範囲内で制御可能な水準であることが確認できた。空気量は、いずれの調合、打設時期においても120分経過後まで著しい変化はみられず、安定して制御可能であることが確認できた。

3.2 硬化性状

3.2.1 圧縮強度

図-2に、各種供試体の強度性状を、表-6に模擬柱部材試験体と簡易断熱供試体の温度履歴計測で得られた最高温度を示す。いずれの供試体の場合でも、材齢の経過に伴って強度が増進する傾向が見られるが、模擬柱部材から採取したコア供試体および簡易断熱養生供試体では、材齢28日から91日までの強度増進が小さい。これは、参考文献⁹⁾で示されるように、GGBFSを使用したコンクリートが高湿履歴を受けると材齢28日から91日の強度増進が僅かであるといった報告と整合する。さらには文献^{9), 10)}などで示される粗骨材に石灰砕石を使用した場合、BBと石灰砕石の両者間の線膨張係数の差が大きく、温度変化による高炉セメントペーストの収縮変形が石灰砕石に拘束され、微細なひび割れが生じることで、強度増進が阻害されるといった報告と非常によく一致する傾向といえる。

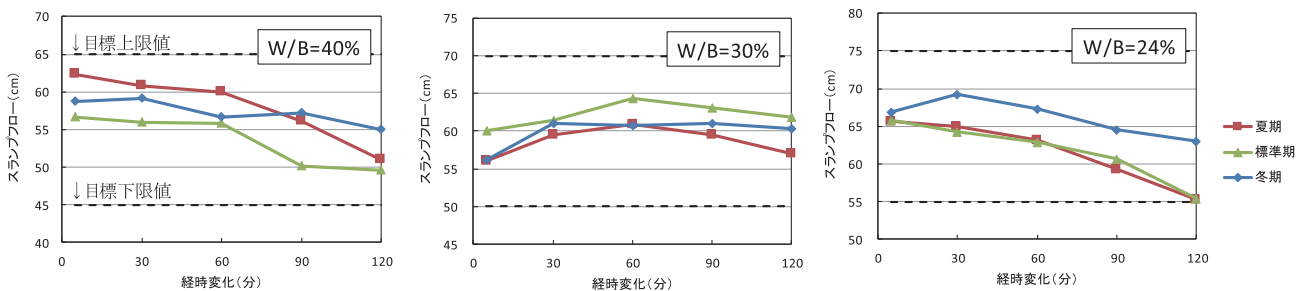


図-1 (a) スランプフロー経時変化

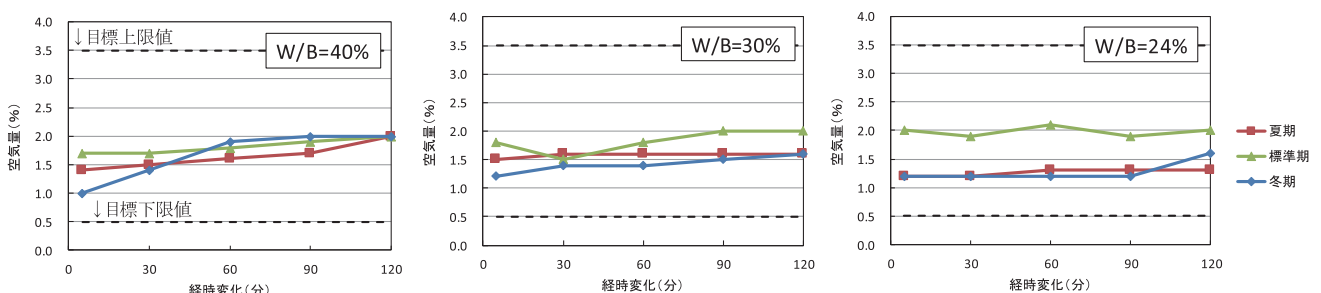


図-1 (b) 空気量経時変化

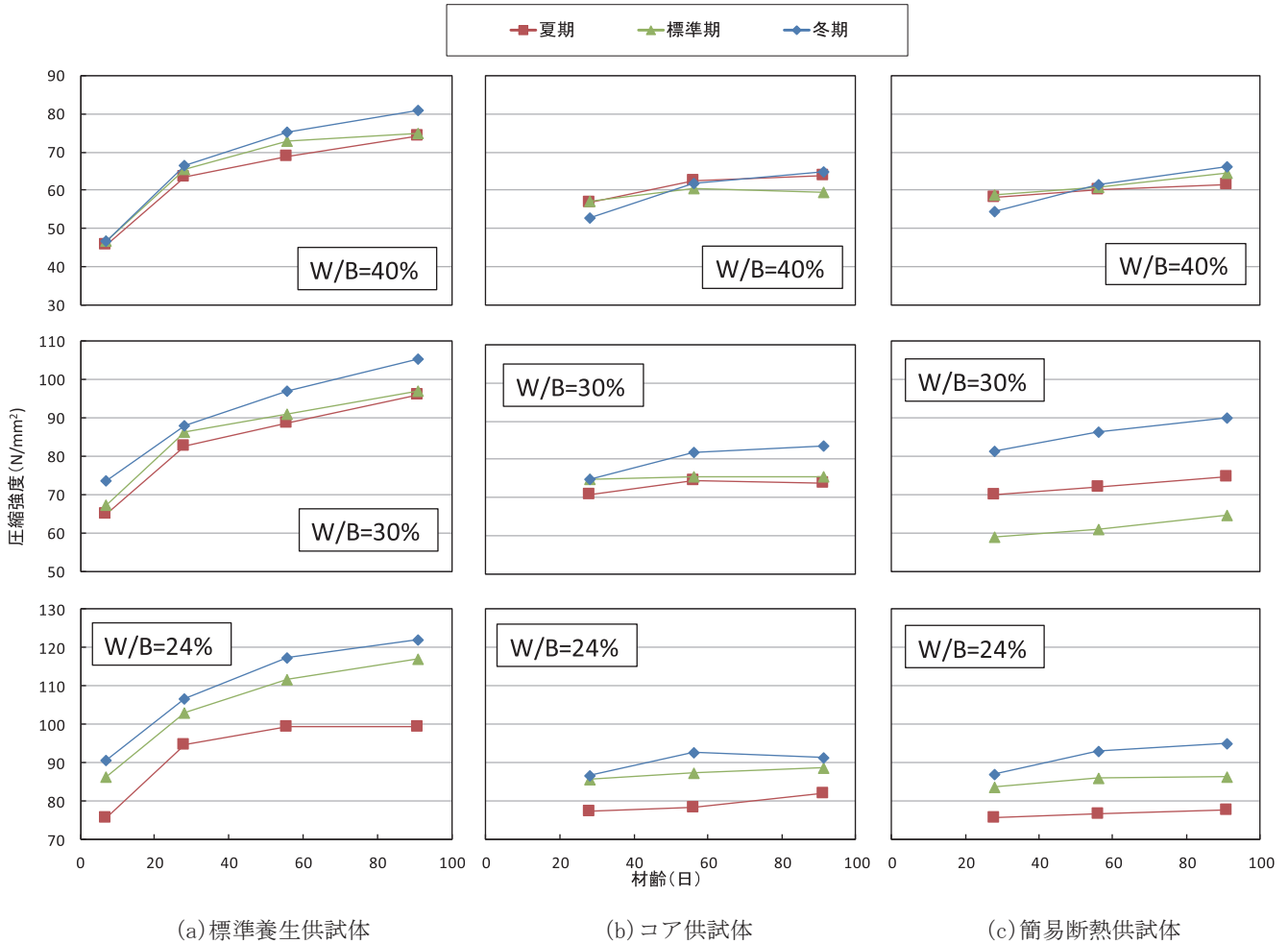


図-2 圧縮強度試験結果

筆者らは、強度増進が阻害されている要因をより具体的に検証するため、本実験で使用したものと同一材料に加えて、硬質砂岩粗骨材を用いた調合による高温履歴の再現実験を行い、高温履歴によりモルタルと粗骨材の線膨張係数の差によるひずみ差が生じて、そのひずみ差に起因した粗骨材界面の剥離が生じることを報告した(図-3)¹¹⁾。

3.2.2 構造体強度補正值と結合材水比の関係

表-7に、構造体強度補正值(材齢28日標準養生供試体強度と材齢91日模擬柱部材コア供試体強度の差(以下、S値)と結合材水比(以下、B/W)の関係を示す。W/B=40%では、標準期のS値が夏期、冬期に比べて大きく、W/B=30%では、冬期が夏期および標準期より小さく、W/B=24%では夏期が標準期および冬期に比べて若干小さい。BBの高強度域のS値に関する報告は多くないが、文献¹²⁾によると、設計基準強度が高くなるほどS値が顕著に大きくなる傾向とは一致しており、これは前述した高温履歴を受けると強度増進が停滞する現象によるものと推測される。

表-6 模擬柱部材試験体と簡易断熱供試体温度測定結果

W/B (%)	実施時期	模擬柱最高温度(°C)		簡易断熱最高温度(°C)
		中心	外側	
40	夏期	60.7	49.1	53.6
	標準期	56.7	47.2	49.4
	冬期	40.5	35.3	33.8
30	夏期	72.9	59.0	65.9
	標準期	69.0	57.4	61.4
	冬期	56.1	49.4	44.5
24	夏期	81.2	65.4	71.5
	標準期	77.5	66.3	67.8
	冬期	65.5	54.9	53.8

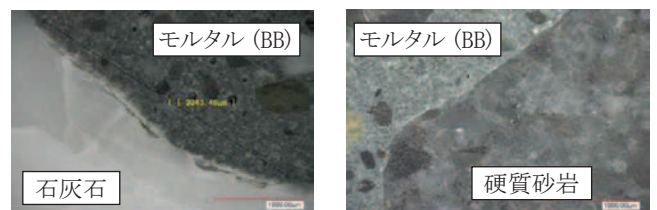


図-3 モルタル(BB)と粗骨材界面の状況¹¹⁾

表一七 実験で得られたS値

W/B (%)	B/W	S 値 (N/mm ²)		
		夏期	標準期	冬期
40	2.500	-0.4	5.8	1.8
30	3.333	8.8	10.8	4.4
24	4.167	12.9	14.2	15.4

3.3 耐久性および発熱特性

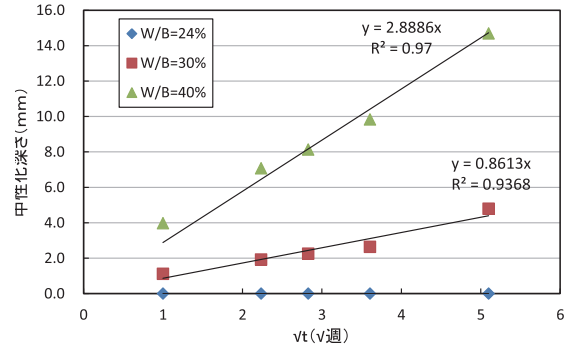
3.3.1 中性化抵抗性

促進中性化試験の結果を図一四に示す。W/B=40%、30%では、中性化の進行が確認され、中性化速度係数はそれぞれ2.89、0.86となり、W/B=24%では中性化の進行が認められなかった。建築工事標準仕様書・同解説 JASS5「鉄筋コンクリート工事」¹³⁾では、中性化促進試験の結果において、セメント種類に関係なく、試験開始時の圧縮強度の逆数と中性化速度係数は直線関係にあることが示されており、耐久設計の考え方の根拠となっている。また、文献¹⁴⁾では、FAを使用したコンクリートの水ポルトランドセメント比（以下、W/C）と中性化速度係数の関係式が記載されていることから、BBやFAを使用したコンクリートにおいても、中性化速度係数を適切に捉えることで耐久設計に基づく調査計画を定めることができると判断される。

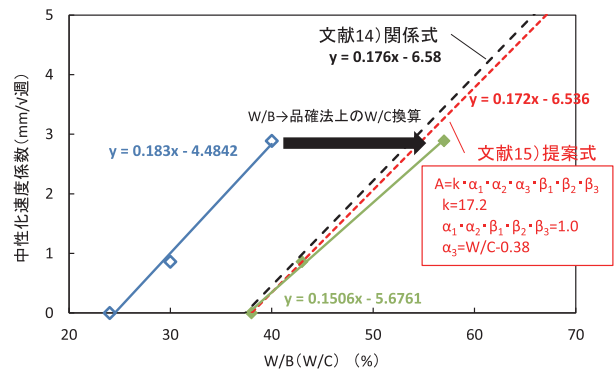
一方で、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」（以下、品確法）の住宅性能表示制度において、鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造の住宅に対して、劣化対策等級3および等級2を表示するためのW/Cの考え方には、「コンクリートのW/Cの算定に当たり、フライアッシュセメントを使用する場合にあっては混合物を除いた部分を、高炉セメントに含まれる高炉スラグの10分の3を除いた部分をその重量として用いるものとする。」と規定されている。

そこで、品確法による考え方をBBとFAを使用したコンクリートに適用した場合の合理性を確認するため、本実験結果から得られたW/Bと中性化速度係数の関係を、品確法で規定されるW/Cに換算した結果を図一五に示す。また、図一五には、文献¹⁴⁾、¹⁵⁾で示されているW/Cと中性化速度係数の関係式による推定値を併せて示している。結合材としてGGBFSおよびFAを全量含むW/Bを横軸にとった場合、概ね線形的な関係は認められ、W/Bが24.5%以下では中性化速度係数は0になる。一方で、品確法に従って換算したW/Cを横軸にとった場合では、文献¹⁴⁾、¹⁵⁾の関係式と同等の直線関係にあり、W/Cが38%以下では中性化速度係数が0になるという文献¹⁵⁾で示される提案式と一致する。

以上より、BBとFAを使用した低炭素型コンクリートであっても、品確法上のW/Cの算定方法を採用することで、普通コンクリートと同様の考え方で合理的に中性化



図一四 促進中性化試験結果



図一五 W/Bと中性化速度係数の関係

抵抗性を評価できると思われる。

3.3.2 乾燥収縮と自己収縮

図一六に乾燥収縮試験結果を示す。乾燥を開始してから経過日数182日での乾燥収縮ひずみは、W/B=40%、30%で 450×10^{-6} 程度、W/B=24%では 350×10^{-6} 程度であった。一般的に高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみは、水結合材比が小さいほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向があり、本測定結果も同様の傾向といえる。

図一七に自己収縮試験結果を示す。自己収縮ひずみは経過日数91日において、W/B=40%、30%が $220 \sim 280 \times 10^{-6}$ に対して、W/B=24%は 550×10^{-6} 程度と大きな差が認められた。宮澤ら¹⁶⁾は、種々のセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を提案しており、比表面積が $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度以下の高炉スラグ微粉末を用いたBBでは、普通ポルトランドセメント（以下、NC）を用いた場合に比べて、W/C=20~40%の範囲で自己収縮ひずみは同等もしくは若干減少することを示している。

図一八に材齢91日におけるW/Bと自己収縮ひずみの関係を、宮澤らによる提案式¹⁶⁾によるBBの計算値と併せて示すが、W/B=30%からW/B=24%にかけて、顕著に自己収縮ひずみが大きくなる挙動が認められ、提案式の傾向と一致する。

3.3.3 凍結融解抵抗性

凍結融解試験の結果から、サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-9に示す。W/B=24%では、300サイクル時点においても、相対動弾性係数の低下はみられず、空気量2%程度であっても十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認された。W/B=30%では、120サイクルで相対動弾性係数が約40%まで低下した。W/B=40%では、30サイクル時点で、相対動弾性係数を測定することができず、凍結融解抵抗性が著しく劣る結果となった。

この結果より、採用するW/Bによっては凍結融解の恐れのない地域、部位に限定するなどの対応を検討する必要がある。

3.3.4 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験の結果を図-10に示す。BBをFAで20%置換したコンクリートのW/B=40, 30, 24%の断熱温度上昇量は、経過時間10日時点で47~63℃となった。図-10には、同一の骨材、調合条件でのNCおよびBBのW/C=24%で実施した試験結果も参考に示すが、NC、BBの断熱温度上昇量は経過時間10日時点でそれぞれ78~80℃であった。これより、BBをFAで20%置換することによって、約17℃の温度上昇量の低下が認められ、マスコンクリート等の温度応力が大きい部材での温度ひび割れ抑制効果が期待できることが示唆された。

4. 構造体強度補正值に及ぼす粗骨材種類の影響の検討 (シリーズII)

4.1 実験概要

シリーズIで実施した実機実験の結果に加えて、仙台地区の2つの生コン工場において、シリーズIと同様の目標性能、調合条件による実機実験を実施した。表-8に本章にて検討対象とする各生コン工場で製造したコンクリートの種類および調合を示す。

仙台地区2つの生コン工場も結合材としてBBとFAを使用し、FAの使用率は結合材の20%とした。水結合材比は、事前の室内試し練りをもとに、標準養生材齢28日で100N/mm²程度となり、かつフレッシュコンクリートの性状が問題とならない水準を設定した。

表-9に使用材料を示すが、BB、細骨材および粗骨材は各生コン工場で標準化しているものを使用しており、A工場、B工場、C工場の粗骨材の岩種がそれぞれ安山岩(以下、AG)、硬質砂岩(以下、SG)、石灰岩(以下、LG)であった。FAについては、それぞれの生コン工場に供給可能な産地のものを選定し使用した。

試験項目および方法は、シリーズIと同様に、生コ

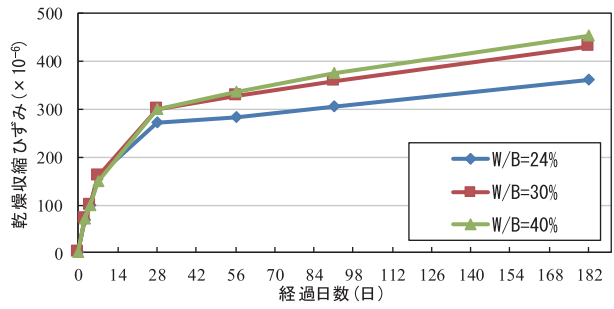


図-6 乾燥収縮試験結果

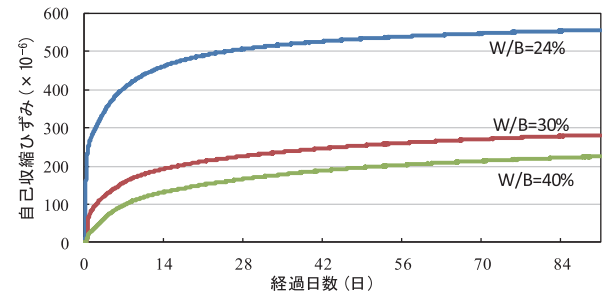


図-7 自己収縮試験結果

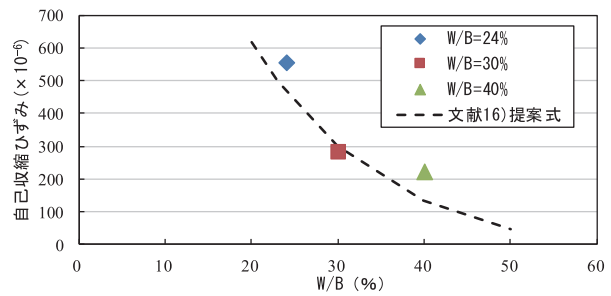


図-8 W/B と自己収縮ひずみの関係

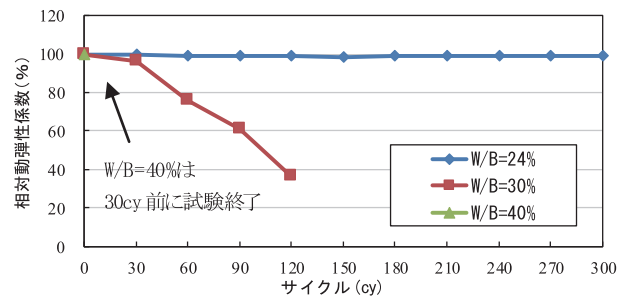


図-9 凍結融解試験結果

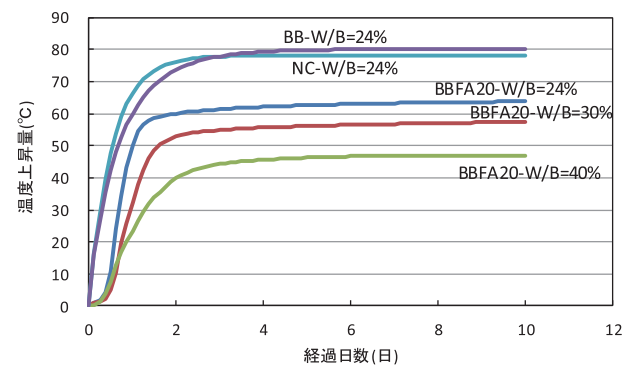


図-10 断熱温度上昇試験結果

表－8 コンクリートの種類と調合

記号	生コン工場	水結合材比 (%)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	粗骨材種類	単位量 (kg/m ³)						
						水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤SP	
						W	BB	FA	S1	S2	G	
A-AG	仙台1	22	65	4.5	AG	170	618	155	85	359	960	B×1.5%
B-SG	仙台2	24	65	4.5	SG	170	567	142	107	420	911	B×1.2%
C-LG	首都圏	24	65	2.0	LG	170	566	142	372	253	875	B×1.25%

表－9 使用材料

材料	生コン工場		
	A	B	C
BB	高炉セメントB種 (密度:3.04g/cm ³)	高炉セメントB種 (密度:3.04g/cm ³)	高炉セメントB種 (密度:3.04g/cm ³)
FA	フライアッシュII種(東北地方産) (密度:2.19g/cm ³)	フライアッシュII種(東北地方産) (密度:2.19g/cm ³)	フライアッシュII種(中国地方産) (密度:2.31g/cm ³)
S1	山砂 (表乾密度:2.56g/cm ³)	山砂 (表乾密度:2.56g/cm ³)	山砂 (表乾密度:2.60g/cm ³)
S2	安山岩砕砂 (表乾密度:2.71g/cm ³)	石灰砕砂 (表乾密度:2.67g/cm ³)	石灰砕砂 (表乾密度:2.65g/cm ³)
G	安山岩砕石 (表乾密度:2.76g/cm ³)	硬質砂岩砕石 (表乾密度:2.71g/cm ³)	石灰岩砕石 (表乾密度:2.71g/cm ³)
SP	ポリカルボン酸系		

ン工場の実機製造設備により製造したコンクリートを用いて、練り上がりから30分経過した時点で、フレッシュコンクリート性状に問題ないことを確認した後、JIS A 1132に準拠して標準養生圧縮強度用供試体を作製し、さらにJASS 5T-605に準拠してS値判定用の構造体模擬試験体を作製した。その後、構造体模擬試験体は、所定の材齢経過後にJIS A 1107に準拠してコアを採取し、標準養生供試体とともに材齢28, 56, 91日時点でJIS A 1108に準拠した圧縮強度試験を実施した。また、構造体模擬試験体においては、硬化過程の温度履歴を測定した。

粗骨材種類がS値に及ぼす影響として、コンクリート内部が高温履歴を受けた場合に、モルタルと粗骨材の線膨張係数の差が大きい場合、降温過程のモルタルの収縮が粗骨材に拘束されることで微細なひび割れが生じ、強度増進が阻害される現象が報告されている¹⁰⁾。筆者らも、結合材にBB、粗骨材にLGを組み合わせた調合において、高温履歴を受けることで、粗骨材界面に剥離現象が生じることを報告している¹¹⁾。そのため、本検討においては、それぞれの生コン工場で使用した粗骨材にひずみゲージを貼り付けて、20℃→70℃→20℃の温度履歴を与えた際の線膨張係数を昇温時、降温時で測定した。

4.2 実験結果 (シリーズII)

4.2.1 粗骨材の線膨張係数

粗骨材の線膨張係数の測定結果を表-10に示す。温度履歴の設定は、実際のコンクリート硬化過程の温度履歴に近い条件を再現するため、昇温時は2.1℃/h、降温時は0.5℃/hの条件にて線膨張係数を測定した。その結果、昇温時ではLGが小さく、AGとSGが同程度であったのに対し、降温時では、LG、AG、SGの順で小さい値を示した。

表－10 粗骨材の線膨張係数測定結果

記号	線膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	
	昇温20℃→70℃ (温度制御2.1℃/h)	降温70℃→20℃ (温度制御0.5℃/h)
LG	4.1	3.6
AG	7.4	5.4
SG	7.5	6.8

表－11 構造体模擬試験体の温度上昇量

時期	構造体模擬試験体 中心部温度上昇量(°C)		
	A工場	B工場	C工場
夏期	60.1	54.2	51.2
標準期	58.6	53.7	51.5
冬期	59.1	46.4	48.5

4.2.2 構造体模擬試験体の温度測定

構造体模擬試験体の中心部の打設直後から最高温度までの温度上昇量を表-11に示す。水結合材比が22%のA工場がやや大きい傾向にあるが、打設時期や工場ごとに顕著な差は認められなかった。

4.2.3 圧縮強度試験

標準養生供試体およびコアの各材齢の圧縮強度試験結果を図-11に示す。標準養生供試体は、打設時期により差が見られるが材齢28日で概ね100N/mm²前後であり、材齢の経過に伴い強度は増進する傾向がみられた。一方、コアの圧縮強度試験結果は、材齢28日以降の強度増進がほとんどなく、全材齢において標準養生よりも小さい傾向にある。

4.2.4 構造体強度補正值 (S値)

図-12に各生コン工場の標準養生供試体の材齢28日とコアの材齢91日の圧縮強度の差から導出したS値を示す。打設時期によるS値の全体的な傾向としては、冬期

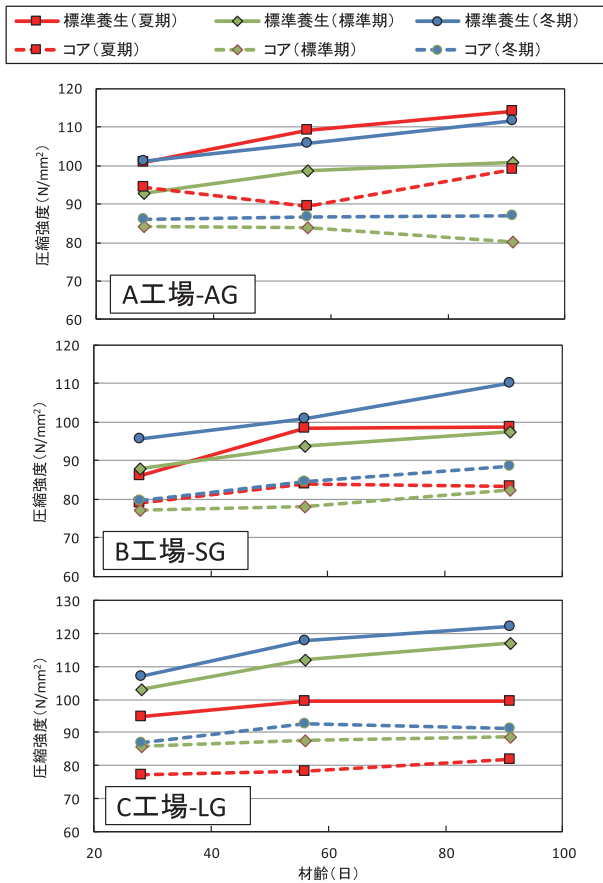


図-11 標準養生供試体とコア供試体の圧縮強度試験結果

が大きく夏期が小さくなっており、一般的に冬期のS値が最も不利になる中庸熱および低熱ポルトランドセメントなどの低発熱系セメントの傾向¹⁷⁾と同様であると判断できる。

粗骨材種類による影響をみると、既往の文献¹¹⁾にて示唆したとおり、降温時の線膨張係数が小さいLG、AGおよびSGの順にS値が大きくなる傾向が認められる。今回モルタルの線膨張係数は測定していないが、文献11)で示した同様の結合材での線膨張係数 $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を仮に採用し、今回測定した温度上昇量分の温度降下量から算出した各粗骨材とモルタルのひずみ差とS値の関係を整理すると図-13のようになる。極端にS値が小さかったA工場の夏期を除くと、ひずみ差が大きいほどS値が大きくなるような一定の傾向がみられる。ただし、閑田ら¹⁸⁾の報告で示されるように、実際には温度降下時の温度応力の発現には、自己収縮を含んだ見掛けの線膨張係数が大きな影響を与えることが考えられるため、温度降下時のセメントペースト、モルタル自体の収縮挙動に着目した詳細な検討を進めたい。

5. まとめ

BBをFAで20%置換した低炭素型高強度コンクリートのフレッシュ性状、強度性状および耐久性について検討した結果を以下に要約する。

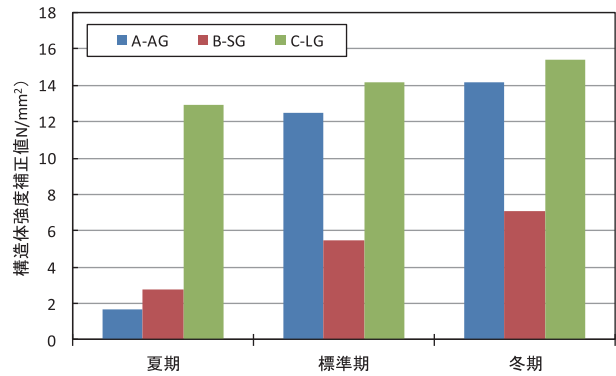


図-12 構造体強度補正值(S値)

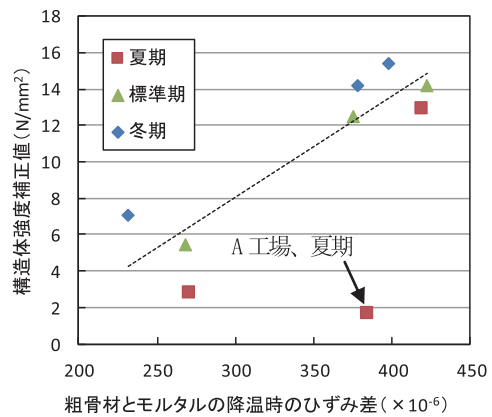


図-13 粗骨材とモルタルのひずみの差とS値の関係

- (1) スランプフローおよび空気量の経過時間に伴う測定結果は、いずれの調査、打設時期においても120分経過後まで目標範囲内であった。
- (2) 強度性状については、標準養生に比べて模擬柱部材のコア供試体および簡易断熱養生供試体の材齢28日から91日までの強度増進が小さい傾向が認められた。
- (3) BBを高強度領域で使用する場合には、使用する粗骨材の線膨張係数も事前に把握し、モルタルと粗骨材の線膨張係数差が大きくなるほど強度増進が緩慢になる可能性も考慮したうえで適切な調査設計を行うことが重要である。
- (4) 中性化の進行はW/Bによる顕著な差が確認され、品確法上のW/Cの算定方法を採用することで、適切かつ安全側に中性化抵抗性を評価できる。
- (5) W/Bが小さくなるほど、乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向にあるが、自己収縮ひずみはW/Bが小さくなるほどより顕著に大きくなる。
- (6) 凍結融解試験の結果から、W/B=24%では、300サイクル終了時点においても、相対動弾性係数の低下はみられず、空気量2%程度であっても十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認されたが、W/B=30%, W/B=40%では、それぞれ150, 30サイクル時点で、試験体が崩壊しており、凍結融解抵抗性が著しく劣る結果となった。

- (7) 断熱温度上昇試験の結果では、BBをFAで20%置換することによって、約17°Cの温度上昇量の低下が認められ、マスコンクリート等の温度応力が大きい部材での温度ひび割れ抑制効果が期待できる。
- (8) S値に及ぼす粗骨材種類の影響は、LGを使用した場合に多くなる傾向が確認され、粗骨材とモルタルの線膨張係数差に伴うひずみ差とS値に一定の関係性が示唆された。

【謝辞】

本報告は、住友大阪セメント株式会社との共同研究で得られた成果の一部を取り纏めたものである。

参 考 文 献

- 1) 日本建設機械施工協会：建設工事における二酸化炭素【CO₂】排出量の算定，建設の機械化，第632号，pp. 70-75, 2002年10月号
- 2) 齋藤尚，草野昌夫，堺孝司，村上祐治，齋藤淳，榎原彩野，鈴木康範：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンハイパフォーマンスコンクリートの実構造物への適用，第4回コンクリート技術大会（長岡），2014.9
- 3) 齋藤淳，堺孝司，鈴木康範，福留和人：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35, No. 1, pp. 1537-1542, 2013
- 4) 齋藤尚，堺孝司，鈴木康範，榎原彩野：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの評価方法の一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36, No. 1, pp. 1853-1857, 2014
- 5) 福井県建設技術公社：「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」（温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート）配合・製造および施工指針（案），産学官共同研究報告書，pp. II-31~37, 平成19年3月
- 6) 吉田泰，山本佳城，陣内浩，黒岩秀介，辻谷薫，並木哲：環境配慮型超高強度コンクリートに関する研究（その4 耐久性），日本建築学会学術講演梗概集，A-1, 材料施工 2011, pp. 211-212, 2011.7
- 7) 宮本欣明，山本康弘：高炉セメントB種にフライアッシュを用いた高流動コンクリートの流動特性およびコンクリートの品質に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol. 69, No. 577, pp. 1-7, 2004.3
- 8) 小野聖久，大城壮司，桐山昭吾：温度履歴を受けた高炉セメントコンクリートの諸性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28, No. 1, pp. 197-202, 2006.7
- 9) 三井健郎，小島正朗，米澤敏男：初期材齢での高温養生条件における超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす骨材品質の影響，コンクリート工学年次論文集，vol. 17, No. 1, pp. 1025-1030, 1995.6
- 10) 藤原浩一，細田暁，相澤健太：高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの引張性状，コンクリート工学年次論文集，vol. 29, No. 2, pp. 169-174, 2007.7
- 11) 宮原健太，小田部裕一，鈴木好幸，石川伸介：高温履歴を受けた高炉スラグ混合高強度コンクリートの強度性状，セメント・コンクリート論文集，Vol. 70, No. 1, pp. 488-493, 2016
- 12) 村上利憲，田村博，榊田佳寛，松藤泰典，谷川泰雄，大野義照：高強度コンクリート性能評価一構造体コンクリート強度を確保するための標準的な水セメント比，GBRC114, Vol. 28, No. 4, pp. 2-13, 2003.10
- 13) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS5「鉄筋コンクリート工事」（2015），pp. 178-182
- 14) 和田真平，阿部道彦，柳啓，藤田克己：フライアッシュコンクリートの中性化，水密性および遮塩性に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集 20(2)，pp. 121-126, 1998.6
- 15) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説（2016），pp. 98-126
- 16) 宮澤伸吾，黒井登起雄，川合雅弘：コンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響，コンクリート工学年次論文集，24(1)，pp. 429-434, 2002.6
- 17) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，pp. 495-497, 2015.7
- 18) 閑田ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36, No. 1, pp. 1720-1725, 2014

A Study on Low Carbon High Strength Concrete Mixed Fly Ash with B-Type Blast-Furnace Cement

Yoshiyuki SUZUKI, Shinsuke ISHIKAWA and Hiroyasu ABE

In order to realize low-carbon high strength concrete for general use, concrete properties such as compressive strength and durability of high strength concrete by replacing BB with 20% FA were examined. As a result, in the core specimen and insulate-treated specimen, the increase in strength from 28 to 91 days tended to be smaller than that of the standard treatment. These findings indicate the importance of obtaining the thermal expansion coefficient of the coarse aggregate to be used beforehand, when using BB for the binder, as well as the importance of compounding design that takes into consideration the stagnation of strength enhancement.