

高炉セメント B 種を使用して製造した高炉セメント C 種相当コンクリートの基礎性状に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BASIC PROPERTIES OF CONCRETE WITH PERFORMANCE EQUIVALENT TO TYPE C BLAST-FURNACE SLAG CEMENT, PRODUCED WITH TYPE B BLAST-FURNACE SLAG CEMENT

右田周平^{*1}, 梅本宗宏^{*2}, 久須美真悟^{*1}, 前田周磨^{*1}
MIGITA Shuhei, UMEMOTO Munehiro, KUSUMI Shingo and MAEDA Shuma

To reduce environmental impact, laboratory experiments were conducted on a concrete equivalent to type C blast-furnace slag cement, which was produced by mixing type B blast-furnace slag cement with ground granulated blast-furnace slag. The experiments evaluated its fresh properties, strength, and durability. Regarding its fresh properties, type-C equivalent concrete mixes with a low water-to-binder (W/B) ratio exhibited delayed setting and increased water bleeding. In terms of strength, compared with type-B cement-based concrete having the same W/B ratio, the type-C equivalent concrete exhibited lower compressive strength; this difference grew as the curing time increased. With respect to deformation, the autogenous shrinkage strain was equivalent, while the length change ratio was slightly lower. The depth of carbonation increased with increasing W/B ratio. Interestingly, type-B cement-based concrete with a W/B ratio of 45% and type-C equivalent concrete with a W/B ratio of 35% exhibited similar carbonation depths. The results suggested that the freeze-thaw resistance may decrease when the W/B ratio and the content of ground granulated blast-furnace slag are both high.

Keywords : Environmental consideration, Blast-furnace slag cement C-type, Blast-furnace slag, Fresh properties, Compressive strength, Durability

環境配慮, 高炉セメント C 種, 高炉スラグ微粉末, フレッシュ性状, 圧縮強度, 耐久性

1. はじめに

近年, 環境負荷低減のために, 製造時の CO₂排出量が多いセメントの代わりに, 高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業副産物を使用したコンクリートの開発, 適用が進められている^{例えば1)}. 筆者らも, 建築物の上部構造に使用できる環境配慮型コンクリートとして, 普通ポルトランドセメント(以下, OPC)と高炉セメント B 種(以下, BB)を混合して製造する高炉セメント A 種相当コンクリートについて, 開発を行っている²⁾. 今回, さらなる環境負荷低減を目的として, BB と高炉スラグ微粉末(以下, BF)を混合して製造した高炉セメント C 種相当コンクリート(以下, BC コン)について検討を行った. 本報では, 室内実験や実機実験により得られた BC コンの基礎性状について報告する.

2. 実験概要

BB に BF を混入して製造する BC コンのフレッシュ性状, 強度性状および耐久性状について, 室内実験により確認を行った. 表 1 にコンクリートの使用材料を, 表 2 にコンクリートの調合を示す. セメントは, 主要なセメントメーカー 3 社の製品を等量混合して使用した. BB と BF の混合率は, JIS R 5211 に規定される高炉セメント C 種の BF 量を満足するように 60 : 40 とした. 水結合材

比(以下, W/B) は 55%, 45%, 35% の 3 水準とし, 比較のため, WB45%において, 高炉セメント B 種コンクリート(以下, BB コン)および, 製造メーカーの異なる BF (BF1, BF2) を使用した BC コンでも実験を行った. いずれの調合も単位水量は 170kg で一定とし, コンクリートのスランプおよび空気量の目標値は, それぞれ 18±2.5cm, 4.5±1.5% とした. 表 3 に測定項目を示す. フレッシュコンクリートでは, スランプや空気量の他, 凝結時間やブリーディング水量の測定を行った. 圧縮強度試験は, 材齢 7, 28, 56, 91 日で, 標準養生供試体で実施した. 自己収縮ひずみは, JCI 超流動コンクリート

表 1 使用材料

材料	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm ³
	BB	高炉セメント B 種, 密度 3.04 g/cm ³
混和材	BF1	高炉スラグ微粉末 4000, 密度 2.89 g/cm ³ , 比表面積 4520cm ² /g
	BF2	高炉スラグ微粉末 4000, 密度 2.89 g/cm ³ , 比表面積 4280cm ² /g
細骨材	S1	掛川産陸砂, 表乾密度 2.57 g/cm ³
	S2	桜川産硬質砂岩碎砂, 表乾密度 2.63 g/cm ³
粗骨材	G	桜川産碎石, 表乾密度 2.64 g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸, リグニンスルホン酸塩)

* 1 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

* 2 戸田建設(株)技術研究所 工学修士(工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

表2 コンクリートの調合

調合	BF 種類	結合材混合 (%)		BF 混入率 (%)	W/B (%)	かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)					
		BB	BF				W	BB	BF	S1	S2	G
BB-45	—	100	—	40~45	45	0.55	170	378	—	591	258	879
BC-55-BF1	BF1	60	40	64~67	55	0.56	170	185	124	614	271	895
	BF1				45	0.55	170	227	151	586	258	879
	BF1				35	0.54	170	292	194	532	234	863
	BF2				45	0.55	170	227	151	586	258	879

委員会の「高流动コンクリートの自己収縮試験方法」³⁾に則して測定を行った。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

表4に混和剤添加量およびコンクリートのスランプ、空気量の測定結果を示す。いずれの調合も、スランプ、空気量ともに目標値を満足した。

図1に凝結試験結果を、図2に凝結時間を示す。凝結時間について、異なるBFを使用したBC-45-BF1とBC-45-BF2を比較すると、始発時間は同程度であったが、終結時間はBF2が70分程度遅くなった。また、BC-35-BF1のみ、他の調合と比較し、凝結が大幅に遅くなった。これは、結合材の粉体量が多く、さらに混和剤添加率がW/B45%の調合に比べ0.15%多いため、混和剤添加量が1.6kg/m³多くなっていることから、混和剤中のリグニンスルホン酸塩等の凝結遅延成分が大きく影響したためと考えられる。

図3にブリーディング試験結果を示す。BBのブリーディング水量約0.12cm³/cm²に対して、BC-55-BF1、BC-45-BF1、2のブリーディング水量は約0.09~0.10cm³/cm²と少なくなった。また、BC-45-BF1とBC-45-BF2は同程度となり、BF種類による影響は確認されなかった。一方、凝結が遅延したBC-35-BF1のブリーディング水量は約0.14cm³/cm²と、最も多くなった。

3.2 圧縮強度・静弾性係数

図4に圧縮強度試験結果を示す。W/B45%の調合で比

較をすると、BF混入率が小さいBB-45が最も圧縮強度が大きく、材齢が進むにつれて、BCコンとの強度差が大きくなつた。BF混入率の多いBCでは強度発現性が低下する既往⁴⁾の結果と同様の傾向となつた。異なるBF種類を使用したBC-45-BF1とBC-45-BF2では、いずれの材齢においても強度差はなかつた。図5に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数Ecは、JASS5⁵⁾で示されている計算式に沿つて推移し、計算式に対し0から+20%程度の間に入る値となつた。

3.3 自己収縮ひずみ

図6に材齢180日までの自己収縮ひずみの測定結果を示す。BC-55-BF1、BC-45-BF1、BC-35-BF1の材齢180日における自己収縮ひずみは、それぞれ -150×10^{-6} 、 -270×10^{-6} 、 -340×10^{-6} 程度となり、水結合材比の小

表4 混和剤添加量およびスランプ・空気量測定結果

調合	混和剤添加量 (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
BB-45	0.80	18.5	4.6
BC-55-BF1	0.70	18.0	4.7
BC-45-BF1	0.80	20.0	4.8
BC-35-BF1	0.95	20.0	4.8
BC-45-BF2	0.80	18.5	4.4

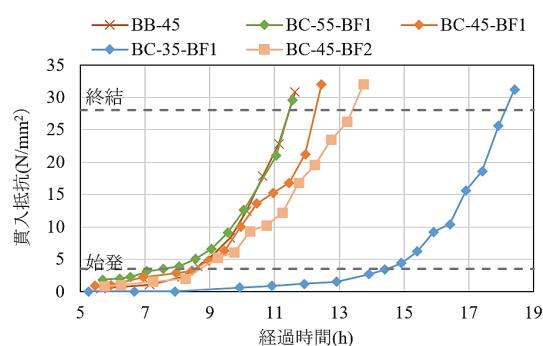


図1 凝結試験結果

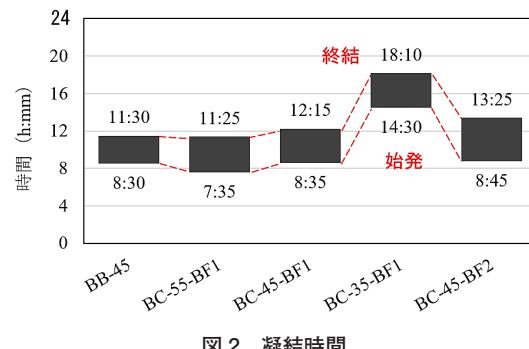


図2 凝結時間

試験項目		試験方法
フレッシュ	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIA A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	ブリーディング	JIS A 1123
	凝結時間	JIS A 1147
硬化	圧縮強度	JIS A 1108, JIS A 1149
	静弾性係数	材齢7, 28, 56, 91日
	長さ変化率	JIS A 1129-1
	自己収縮	JCI 超流动コンクリート委員会 「高流动コンクリートの自己収縮試験方法」
	促進中性化試験	JIS A 1153 (前養生: 水中4週+気中4週) 促進試験時 CO ₂ 濃度 5%
	凍結融解試験	JIS A 1148 A法

さい調合ほど収縮ひずみが大きくなつた。また、水結合材比が同じ BB-45 と BC-45-BF1 とでは差はなかつた。

3.4 長さ変化率・質量変化率

図 7 および図 8 に、材齢 27 週（乾燥材齢 26 週）までの長さ変化試験における長さ変化率および質量変化率の測定結果を示す。BC コンの乾燥材齢 26 週の長さ変化率は -600×10^{-6} から -750×10^{-6} 程度の範囲で、W/B が大きいほど長さ変化率も大きくなつた。同じ水結合材比で比較すると、BB コンと BC コンの長さ変化率はほぼ同等であった。質量変化率は、W/B が大きいほど質量減少も大きく、同一 W/B の調合ではほぼ同等の値となつた。

3.5 中性化深さ

図 9 に促進中性化試験結果を示す。中性化は、室温 20°C, 60% RH, CO₂濃度 5.0% の環境下で促進した。中性化深さは、W/B が大きい調合ほど大きくなつた。BB-45 は、BC-45 よりも中性化深さが小さくなり、BC-35-BF1 と同程度であった。BC-45-BF1 と BC-45-BF2 の中性化

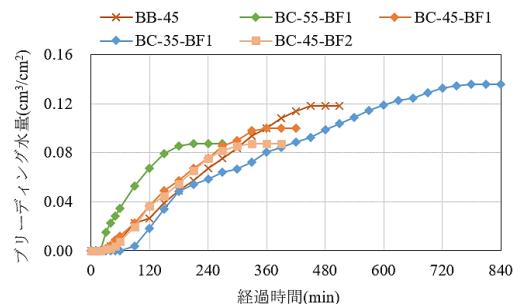


図 3 ブリーディング試験結果

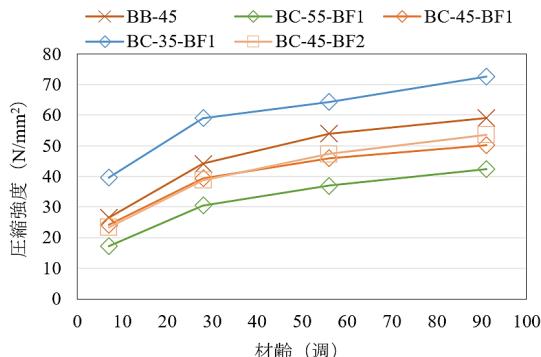


図 4 圧縮強度試験結果

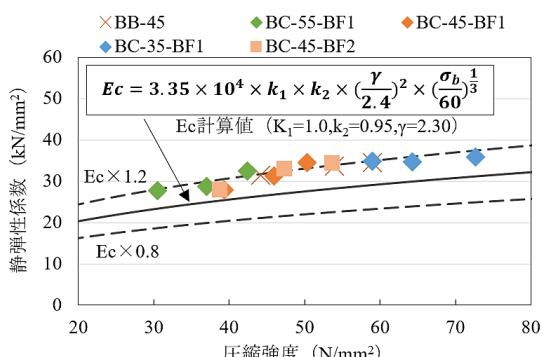


図 5 圧縮強度と静弾性係数の関係

深さは同程度で、BF 種類による差は確認されなかつた。

鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説⁶⁾によると、温度 20°C、湿度 60% RH の大気中の中性化深さは、以下の式（1）で表される。

$$C = A \sqrt{CO_2/5.0} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、C：中性化深さ（mm）、CO₂：CO₂濃度（%）

A：定数（mm/√週）、t：材齢（週）

また、中性化に対する設計劣化外力として、CO₂濃度の標準値を、屋内 0.10%，屋外 0.05% としている。建築工事標準仕様書・同解説 JASS5⁴⁾では、標準～超長期における柱・梁等で、仕上げ無しの場合の最小かぶり厚さを、屋内で 30mm、屋外で 40mm としている。そこで、各調合において、式（1）から求めた中性化速度係数と、室内での中性化深さが最小被り厚さ 30mm に達する時間をまとめると表 5 に示す通りとなる。中性化が 30mm に達する年数は、BB-45 で 170 年程度であるのに対し、BC-

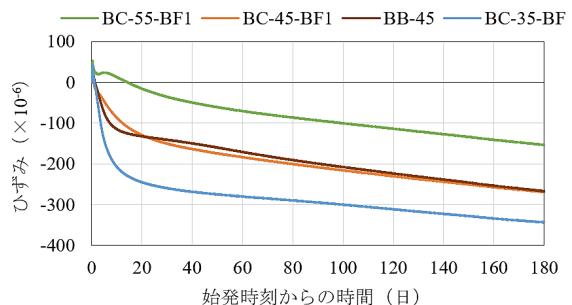


図 6 自己収縮ひずみ測定結果

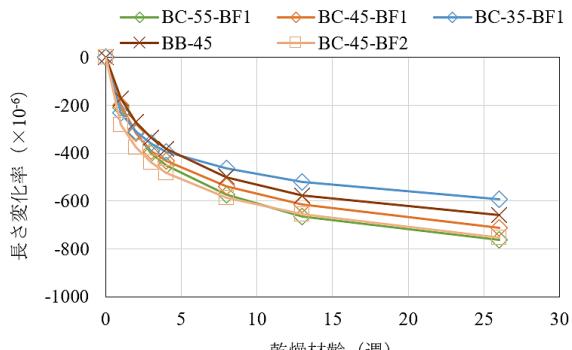


図 7 長さ変化率

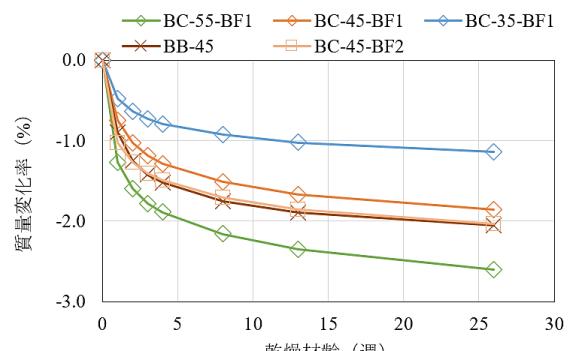


図 8 質量変化率

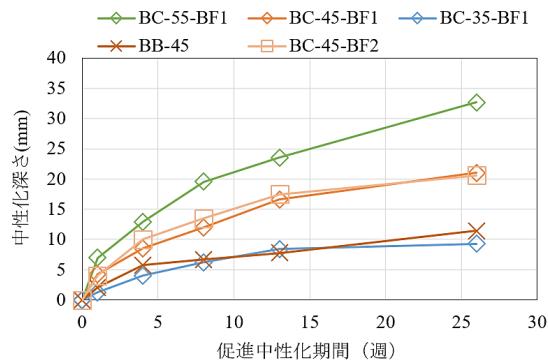


図9 促進中性化試験結果

表5 中性化深さ 30mmに達する時間

調合	A (mm/√週)	中性化深さ 30mmに達する時間 (年)
BB-45	2.24	172
BC-55-BF1	6.41	21
BC-45-BF1	4.12	51
BC-35-BF1	1.82	259
BC-45-BF2	4.04	53

45-BF1, BC-45-BF2では、50年程度となった。

3.6 凍結融解抵抗性

図10および図11に、凍結融解試験による相対動弾性係数および質量変化率を示す。BC-55-BF1のみ、90サイクルを超えた辺りから相対動弾性係数が大きく低下していく、300サイクルで相対動弾性係数が39.2%となった。また、サイクルが進むにつれ、表層の劣化も進み、質量変化率も最も大きくなっている。その他の調合では、質量減少は生じているものの、300サイクルでも相対動弾性係数は95%以上であった。なお、各調合の空気量に大きな違いはなかったため、W/Bが大きく、かつBFの使用量が多いコンクリートでは、凍結融解抵抗性が低下する可能性が考えられる。

4. おわりに

高炉セメントB種と高炉スラグ微粉末を混合して製造した高炉セメントC種相当コンクリートについて、室内実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) W/B=35%のBCコンは凝結が遅延し、ブリーディング水量も多くなった。
- 2) 同じW/Bでも、BBコンと比較し、BCコンは強度が低下し、強度差は材齢が進むほど大きくなった。
- 3) 自己収縮ひずみは、W/Bの小さい調合ほど収縮ひずみが大きくなり、同一W/BのBCコンとBBコンは同等であった。
- 4) 長さ変化率は、同一W/Bでは、BCコンよりもBBコンの方が、わずかに長さ変化率が小さくなった。
- 5) 中性化深さはW/Bが大きいほど大きくなり、また、BB-45とBC-35-BF1の中性化深さは同等であった。
- 6) 凍結融解試験において、BC-55-BF1のみ大きく相対動弾性係数が低下していく、4%以上の空気量で

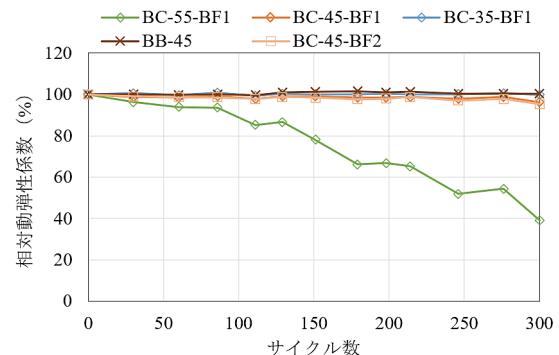


図10 相対動弾性係数

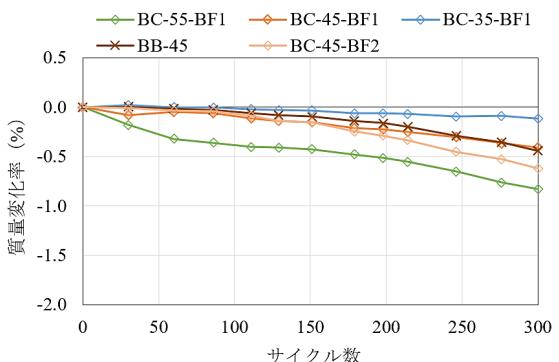


図11 質量変化率

あっても、W/Bが大きく、BF使用量が多いコンクリートでは、凍結融解抵抗性が低下する可能性が考えられる。

本研究は西松建設株式会社と共同で実施したものである。

参考文献

- 1) 和地正浩、金井亮、辻大二郎、井上和政、三井健郎、米澤敏夫：高炉スラグ微粉末高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性に関する研究、竹中技術研究報告、No.67, pp.1~6, 2011
- 2) 右田周平、久須美真悟、木村仁治、長井智哉、異種セメントを混合して製造した高炉A種相当コンクリートの性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.45, pp.1078-pp.1083, 2023
- 3) コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（II），1994.5
- 4) 土木研究所・戸田建設・西松建設：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書、475号、2016年1月
- 5) 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、2022
- 6) 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