

論文 高炉スラグを用いたプレキャストプレストレストコンクリートの圧縮強度および耐久性に関する研究

木村 匡宏*1・河中 涼一*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨: 本論文は、カルシウムシリケート系硬化促進剤、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用い、実機プラントで製造したコンクリートの圧縮強度および耐久性に関する特性値を調べたものである。材齢 18 時間における圧縮強度は、養生中の外気温の影響を強く受けるが、材齢 28 日における圧縮強度は、養生中の外気温の影響が小さい。また、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、水分浸透性、塩化物イオン浸透性および乾燥収縮ひずみは小さく、凍結融解抵抗性に優れる結果となった。

キーワード: 高炉スラグ細骨材、高炉スラグ微粉末、硬化促進剤、外気温、プレキャスト、PC 部材

1. はじめに

工場で生産されるプレテンション方式のプレストレストコンクリート（以降、PC）部材には、JISA 5373「プレキャストプレストレストコンクリート製品」の規定や製造サイクルの制約より、打込みから 18 時間後にプレストレス導入時圧縮強度の 35N/mm^2 を下回らないこと、また、品質保証として、出荷時に圧縮強度の特性値として 50N/mm^2 を満足することが求められる。そのため、工場製品には早強ポルトランドセメント（以降、HPC）が用いられ、製造では蒸気養生が行われることが多い。しかし、急激な温度上昇や高温での養生を伴う蒸気養生は、ひび割れの発生や細孔構造を粗大化させ、コンクリートの耐久性に関する特性値を低下させることがある。また、蒸気養生には、重油等の化石燃料が多く用いられ炭酸ガス排出の一因となっている。

高炉スラグ微粉末（以降、GGBS）の添加は、コンクリートの塩分浸透抵抗性の向上に寄与することから、塩害が懸念される構造物に適用される事例が増えている。また、高炉スラグ細骨材（以下、BFS）も、コンクリートの塩分浸透抵抗性を向上させ、AE 剤を用いなくても高い凍結融解抵抗性が得られることが知られている。ただし、GGBS や BFS を用いたコンクリートでは、若材齢における強度発現が小さいことや、凍結融解抵抗性を向上させるには、長い湿潤養生が必要であるとされてきた。しかし、C-S-H の種結晶を生成することで強度発現を早めるカルシウムシリケート系硬化促進剤¹⁾（以降、硬化促進剤）を用いれば、初期強度の増進が期待できるだけでなく、GGBS や BFS を用いたコンクリートの湿潤養生期間が短い場合でも高い凍結融解抵抗性を得ることが可能であることが明らかとなっている²⁾。

本研究では、硬化促進剤、GGBS および BFS を用いたコンクリートを実機プラントで製造し、圧縮強度、水分浸透速度係数、塩化物イオンの見掛けの拡散係数、凍結融解抵抗性および乾燥収縮ひずみを調べた。従来のプレキャスト PC 桁に使用されていたコンクリートよりも、高い耐久性をもつプレキャスト PC 部材を、蒸気養生を行うことなく製造できることを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

結合材には、早強ポルトランドセメント（密度： 3.14g/cm^3 、ブレン値： $4,430\text{cm}^2/\text{g}$ ）および高炉スラグ微粉末 6000（密度： 2.91g/cm^3 、ブレン値： $5,650\text{cm}^2/\text{g}$ 、三酸化硫黄量：3.01%）を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材（表乾密度： 2.73g/cm^3 、吸水率：0.73%、粗粒率：2.30）および安山岩砕砂（表乾密度： 2.58g/cm^3 、吸水率：0.95%、粗粒率：2.83）を、粗骨材には、安山岩碎石（最大寸法：20mm、表乾密度： 2.61g/cm^3 、吸水率：0.71%）を用いた。混和剤には、高性能減水剤、AE 剤およびカルシウムシリケート水和物を主成分とする硬化促進剤（固形分量：24%）を用いた。

本実験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。配合 1 および配合 2 は、結合材の 50% に高炉スラグ微粉末を用い、細骨材の全量に高炉スラグ細骨材を用いた配合（以降、BFS コンクリート）である。また、配合 3 は、一般のプレテンション方式で作製されるプレキャスト PC 桁に用いられている配合（以降、砕砂コンクリート）である。配合 1 および配合 2 の BFS コンクリートは、砕砂コンクリートに比べて、初期強度の発現が小さいため、配合 3 よりも小さい水結合材比としている。硬化促進剤

*1 岡山大学大学院 環境生命自然科学研究科機械システム都市創成科学学位プログラム（学生会員）

*2 ピーエス・コンストラクション(株) 大阪支店土木技術部設計グループ 博(工)（正会員）

*3 岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域准教授 博(工)（正会員）

*4 岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域教授 博(工)（正会員）

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	GGBS/B (%)	s/a (%)	空気量 (設計値) (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤 (B×%)			
					W	B		S		G	高性能 減水剤	AE 剤	硬化 促進剤
						C	GGBS	砕砂	BFS				
配合 1	33.0	50	41.9	2.0	160	242	242	0	742	1,000	1.30	0.02	4.0
配合 2									753				0.5
配合 3	40.3	0	40.0	4.5	160	397	0	691	0	1,048	0.65	0.02	0.0

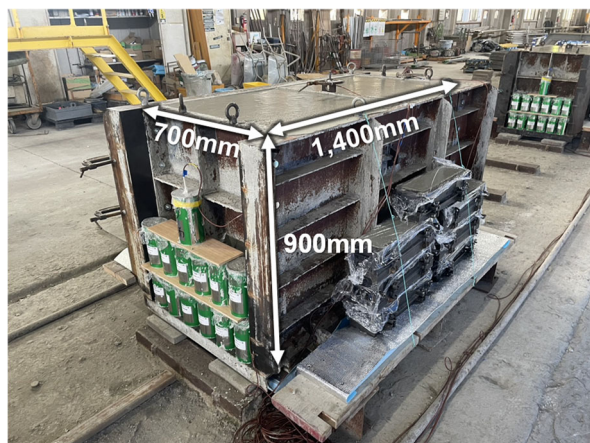


図-1 供試体の養生状況

の添加量は配合 1 および 2 において、それぞれ結合材質量の 4.0% および 0.5% であり、配合 3 には硬化促進剤は使用していない。高性能減水剤、AE 剤および硬化促進剤の水分は練混ぜ水の内割で、硬化促進剤の固形分は細骨材の内割で添加した。

2.2 試験方法

(1) 練混ぜおよび養生

コンクリートの練混ぜには、実機プラントの強制二軸型ミキサ（容量：1.80m³）を使用した。練混ぜは、表-2 に示すように、春期に 1 回、夏期に 1 回、秋期に 12 回行った。春期および夏期の供試体は、打込み後、図-1 に示すように 1,400×700×900mm の大型ブロックに近接させて設置し、全体をシートで覆って養生した。秋期の供試体は、長さ 22.4m×高さ 1.1m×幅 0.6m の実部材に近接させて設置し、全体をシートで覆って養生した。

配合 1 および配合 2 の BFS コンクリートは、蒸気養生は行わず、材齢 18 時間で脱型し、材齢 7 日まで散水養生を行った後、試験開始まで室内で気中養生を行った。配合 3 の砕砂コンクリートは、打込みの 3 時間後から昇温速度 15℃/hr、最高温度 55℃、最高温度保持時間 6 時間の蒸気養生を行った。脱型後は、室内で試験開始まで気中養生を行った。

(2) 水分浸透速度係数試験

水分浸透速度係数試験は、JSCE-G 582-2018「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」に従って行った。供試体は、材齢 7 日にコン

表-2 試験時期と試験項目

時期	春 期 (5 月)	夏 期 (8 月)	秋 期 (10～11 月)
気温	21.7℃	32.1℃	12.4～21.6℃
配合	配合 1	配合 1,2,3	配合 1
回数	1 ロット	1 ロット	12 ロット
項目	圧縮強度、水分浸透、塩分浸透、乾燥収縮ひずみ、凍結融解		圧縮強度

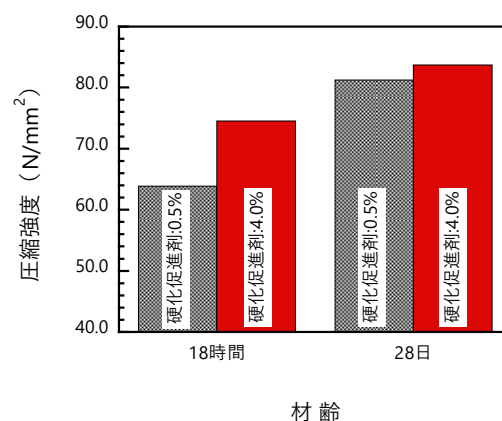


図-2 圧縮強度に硬化促進剤が与える影響

クリートカッターで打込み時の底面側端部を 25mm 切除した後、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の恒温恒湿度室で 91 日間乾燥させた後、側面にエポキシ樹脂を塗布し、硬化を確認してから、底面側の 10mm を水に浸漬させた。

(3) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験

塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験は、JSCE-G 572-2018「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法」に従って行った。材齢 7 日にコンクリートカッターで両端部を切断してφ100×150mm に整形した後、円形の 1 面以外にエポキシ樹脂を塗布し、材齢 14 日に濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた。浸漬から 91 日後および 182 日後で供試体を取り出し、供試体の全塩化物イオン濃度の分布を測定した。

(4) 乾燥収縮ひずみ試験

乾燥収縮ひずみ試験は、JIS A 1129-3 附属書 A(参考)「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試

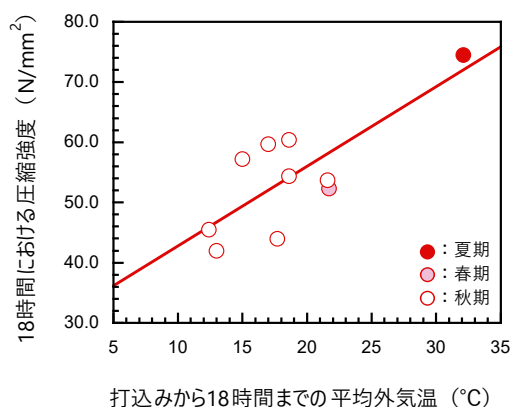


図-3 打込みから 18 時間までの平均外気温が 18 時間圧縮強度に与える影響

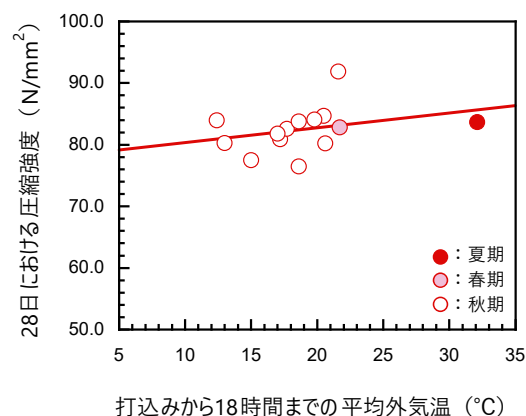


図-4 打込みから 18 時間までの平均外気温が 28 日圧縮強度に与える影響

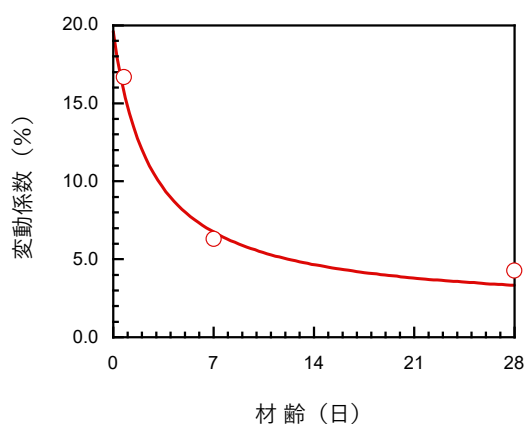


図-5 変動係数の変化

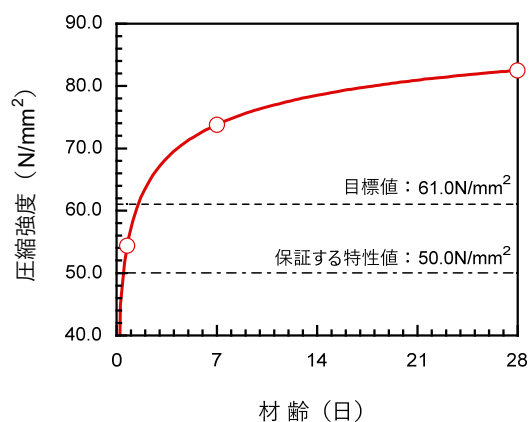


図-6 圧縮強度の経時変化

験方法」に従って行った。配合 1 および配合 2 の BFS コンクリートは散水養生後の材齢 7 日から、配合 3 の砕砂コンクリートは材齢 1 日の脱型直後から、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿度室で試験を開始した。

(5) 凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」の水中凍結融解試験方法 (A 法) に従って行った。ただし、試験は、いずれのコンクリートも材齢 7 日から開始し、供試体表面を覆う凍結水には濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 は、夏期に製造した BFS コンクリートの圧縮強度に硬化促進剤が与える影響を示したものである。材齢 18 時間では、硬化促進剤の添加量が多いものほど、圧縮強度が大きくなっているが、材齢 28 日では、その差が小さくなっている。

図-3 および図-4 は、それぞれ、実機プラントで製造した配合 1 の BFS コンクリートの打込みから 18 時間までの平均外気温と材齢 18 時間および 28 日における圧縮

強度の関係を示したものである。これらの図中の直線は、材齢 t における圧縮強度 $f'_c(t)$ と、打込みから 18 時間までの平均外気温 T との関係を直線回帰した結果で、それぞれ、式(1)および式(2)で与えられる。

$$f'_c(18\text{hour}) = 29.6 + 1.32 \cdot T \quad (1)$$

$$f'_c(28\text{day}) = 77.9 + 0.24 \cdot T \quad (2)$$

式(1)中の T にかかる定数は 1.32 と大きく、材齢 18 時間における圧縮強度は、打込みから 18 時間までの平均外気温の影響を強く受けることが分かる。一方、式(2)中の T にかかる定数は 0.24 と小さく、打込みから 18 時間までの平均外気温が異なる場合でも、材齢 28 日における圧縮強度に与える影響は小さいといえる。また、図-3 より、硬化促進剤を 4% 用いた配合 1 の BFS コンクリートは、外気温の平均が 5°C 以上であれば、材齢 18 時間程度でプレストレス導入に必要な 35N/mm^2 の圧縮強度を確保できる可能性があることが分かる。

図-5 は、実機プラントで製造した配合 1 の BFS コンクリートの各材齢における圧縮強度の変動係数を示したものである。材齢 18 時間における圧縮強度は、製造における偶然誤差に加え、外気温の影響も受け、変動係数が 16.8% と大きくなっている。これに対して、材齢 7 日以降

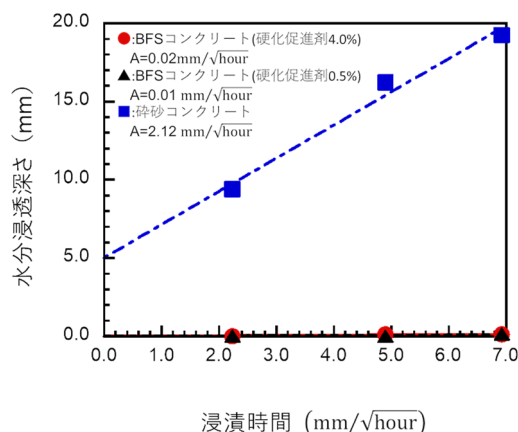


図-7 夏期に製造したコンクリートの水分浸透速度係数試験の結果

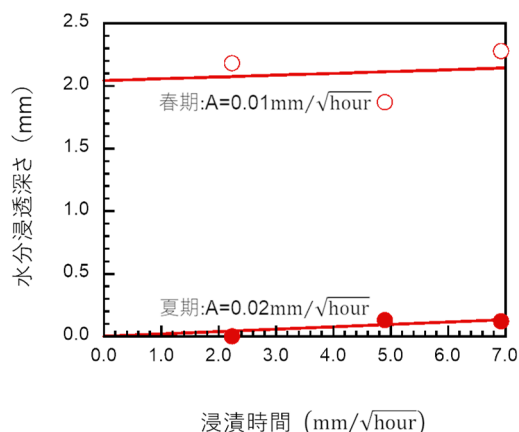


図-8 製造時期が水分浸透性に与える影響

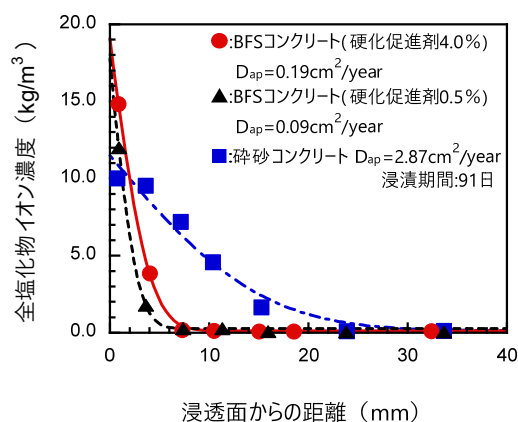


図-9 夏期に製造したコンクリートの塩化物イオン濃度の分布

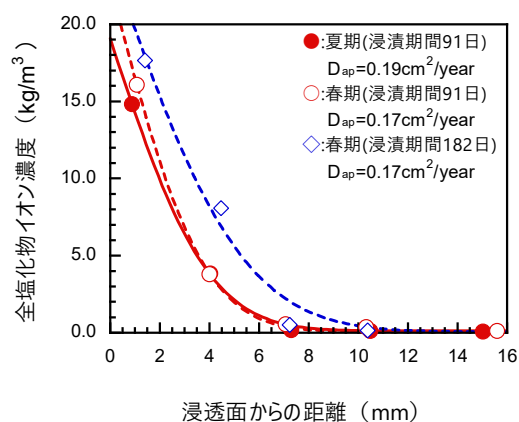


図-10 製造時期が塩分浸透性に与える影響

では外気温の影響は小さく、変動係数は7%以下である。

図-6は、実機プラントで製造した配合1のBFSコンクリートの圧縮強度の平均値の経時変化を示したものである。図中の一点鎖線および破線は、出荷時に保証しなければならない特性値の50N/mm²と、2023年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕（以降、示方書〔施工編〕）に基づき求めた圧縮強度の目標値 f'_{cr} を示している。なお、圧縮強度の目標値 f'_{cr} は、変動係数には図-5を参考に0.07を、不良率および生産者危険には示方書〔施工編〕より5%および10%を用いて次式より求めている。

$$f'_{cr} = \frac{1}{1-3 \times 0.07/\sqrt{3}} \cdot \frac{1-1.282 \times 0.07/\sqrt{3}}{1-1.645 \times 0.07} \times 50$$

$$= 61.0 \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

材齢7日以降の圧縮強度の試験値の平均値は、目標値を大きく上回っており、50N/mm²の圧縮強度の特性値は、材齢7日で十分に保証できるといえる。

3.2 水分浸透速度係数

図-7は、夏期に製造したBFSコンクリートおよび砕砂コンクリートの水分浸透速度係数の試験結果を示したものである。砕砂コンクリートは、浸漬時間の経過と

ともに水分浸透深さが増加するのに対し、BFSコンクリートは48時間浸漬しても水分の浸透はなかった。図中の直線の傾きである水分浸透速度係数 A は、砕砂コンクリートが2.12mm/√hourであるのに対し、BFSコンクリートでは、硬化促進剤を4.0%および0.5%用いた場合で、それぞれ、0.02mm/√hourおよび0.01mm/√hourである。示方書〔施工編〕には、かぶり20mmのコンクリート部材に対して設計耐用期間100年が求められるコンクリートの水分浸透速度係数 A は3.9mm/√hourと示されている。砕砂コンクリートの水分浸透速度係数も十分に小さいが、BFSコンクリートはさらに小さいことが分かる。

図-8は、春期に製造したBFSコンクリートの水分浸透速度係数の試験結果を夏期の結果と比較したものである。春期の水分浸透速度係数も0.01mm/√hourで、製造時期を問わず、十分に小さいことが分かる。

3.3 塩化物イオン浸透性

図-9は、夏期に製造したBFSコンクリートおよび砕砂コンクリートを91日間浸漬して求めた全塩化物イオン濃度の分布を示したものである。砕砂コンクリートは浸透面から20mm程度まで塩分が浸透しているのに対し、

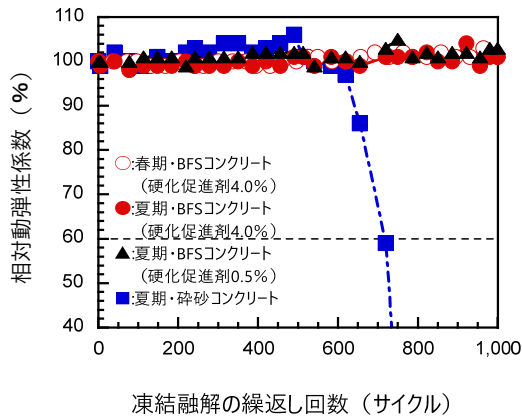


図-11 凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

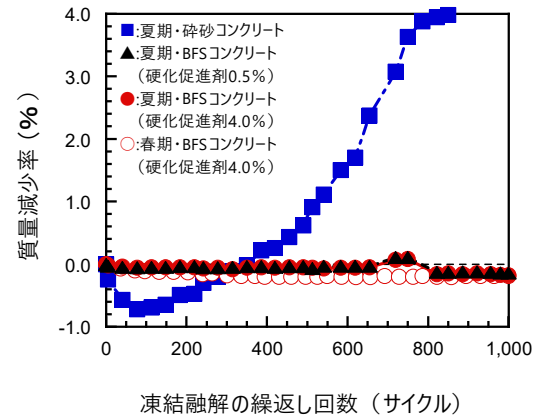


図-12 凍結融解試験結果（質量減少率）

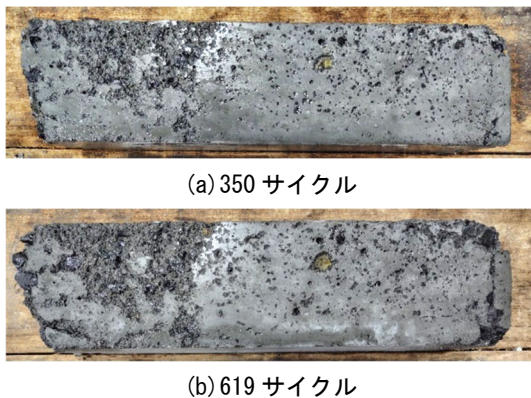


図-13 砕砂コンクリートの外観

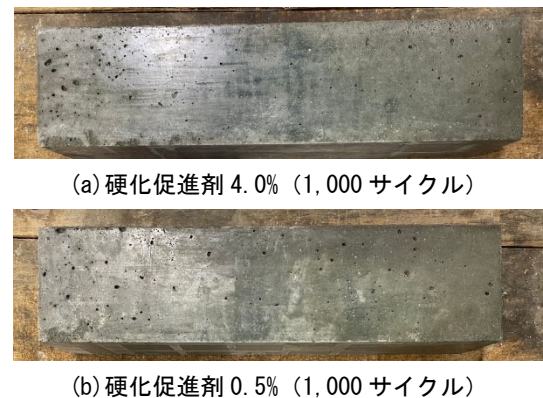


図-14 夏期に製造した BFS コンクリートの外観

BFS コンクリートは、7mm 程度で留まっている。BFS コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} は、硬化促進剤を 4.0%および 0.5%用いた場合で、それぞれ、 $0.19\text{cm}^2/\text{year}$ および $0.09\text{cm}^2/\text{year}$ である。これに対して、砕砂コンクリートの見掛けの拡散係数は $2.87\text{cm}^2/\text{year}$ である。飛沫帯において、かぶり 40mm のコンクリート部材に設計耐用期間 100 年が求められるとき、2022 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕（以降、示方書〔設計編〕）に基づき、水セメント比 33%の高炉セメント B 種を用いた場合と、水セメント比 40.3%の普通ポルトランドセメントを用いた場合の鋼材腐食発生濃度を用いて、コンクリートに必要とされる見掛けの拡散係数を求めると、それぞれ、 $0.425\text{cm}^2/\text{year}$ および $0.204\text{cm}^2/\text{year}$ となる。砕砂コンクリートの見掛けの拡散係数の実験値は、かぶり 40mm の部材を飛沫帯で設計耐用期間 100 年を満足させるために必要とされる見掛けの拡散係数よりも 10 倍大きな値であるが、BFS コンクリートの見掛けの拡散係数の実験値は、硬化促進剤の使用量に関係なく必要とされる見掛けの拡散係数の半分以下である。

図-10 は、春期に製造した BFS コンクリートの全塩化物イオン濃度の分布を夏期に製造したものと比較して示したものである。浸漬期間 91 日の塩化物イオン濃度



図-15 春期に製造した BFS コンクリートの外観（1,000 サイクル）

の分布は、春期と夏期で大きな差はなく、春期に製造したものの塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} は、 $0.17\text{cm}^2/\text{year}$ である。また、浸漬期間 91 日と 182 日の塩化物イオン濃度分布を比較すると、表面から 4mm 程度までの塩化物イオン濃度は浸漬期間とともに増加しているが、7mm より深い位置では塩化物イオン濃度は増加していないことが分かる。

3.4 凍結融解抵抗性

図-11 および図-12 は、それぞれ、BFS コンクリートと砕砂コンクリートの凍結水に塩水を用いた凍結融解試験による相対動弾性係数および質量減少率の変化を示したものである。BFS コンクリートは練上がり直後の空気量は、2%程度であるが、春期に製造したものも夏期に製造したものも、凍結融解の繰返し回数が 1,000 サイクルまで相対動弾性係数は低下することなく、質量減少率も

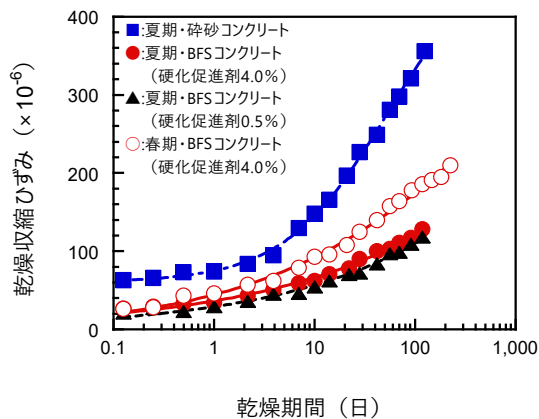


図-16 乾燥収縮ひずみの経時変化

ほとんど変化していない。これに対し、砕砂コンクリートでは、凍結融解の繰返し回数が 600 サイクルを超えると相対動弾性係数が徐々に低下し、質量は 100 サイクルを超えると減少している。図-13 は、砕砂コンクリートの 350 サイクルおよび 619 サイクルでの供試体の外観を示したものである。砕砂コンクリートは、質量が増加から減少に転じる 100 サイクルより、表面のスケーリングや角欠けが発生している。これに対して、図-14 は、それぞれ、夏期および春期に製造した BFS コンクリートの 1,000 サイクルにおける外観を示したものである。GGBS および BFS を用いたコンクリートは、空気量が 2%程度であっても、硬化促進剤の使用量に関わらず目立つ角欠けやスケーリングがなく健全で、高い凍結融解抵抗性が確保できていることが分かる。

3.5 乾燥収縮ひずみ

図-16 は、BFS コンクリートおよび砕砂コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を示したものである。乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみの特性値は、砕砂コンクリートが 380×10^{-6} であるのに対し、夏期に製造した BFS コンクリートは 142×10^{-6} と、単位水量が同じ砕砂コンクリートの 4 割程度である。なお、春期に製造した BFS コンクリートの乾燥収縮ひずみの特性値は 195×10^{-6} で、BFS コンクリートの乾燥収縮ひずみは、製造時期に関係なく非常に小さい値となっている。

3.6 耐久性に関する特性値

表-3 は、夏期に製造した BFS コンクリートおよび砕砂コンクリートの水分浸透速度係数、塩化物イオンの見掛けの拡散係数および乾燥収縮ひずみの実験値を、示方書〔設計編〕に示される予測式に基づく予測値と比較した結果である。なお、BFS コンクリートに使用した硬化促進剤の使用量は、単位結合材量の 4% である。配合 1 の BFS コンクリートの実験値は、示方書〔設計編〕の予測値よりも小さい値となっている。一方、配合 3 の砕砂コ

表-3 示方書〔設計編〕の予測値と実験値の比較

	配合 1		配合 3	
	予測値	実験値	予測値	実験値
水分浸透速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{hour}}$)	3.48	0.02	5.20	2.12
塩化物イオンの見掛け の拡散係数(cm^2/year)	0.64	0.19	2.42	2.87
乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	460	142	494	380

ンクリートの実験値は、水分浸透速度係数および乾燥収縮ひずみは、予測値よりも小さくなっている。GGBS と BFS を併用することで、示方書〔設計編〕で予測される耐久性関係の特性値以上に、高い品質のコンクリートが得られることが分かる。

4. まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す。

- BFS コンクリートの材齢 18 時間における圧縮強度は、硬化促進剤を用いた場合でも養生中の外気温の影響を強く受けるが、材齢 7 日以降において圧縮強度が受ける養生中の外気温の影響は小さい。
- GGBS と BFS を併用したコンクリートでも、蒸気養生を行うことなく、硬化促進剤を用いれば、材齢 18 時間において $35\text{N}/\text{mm}^2$ を下回らない圧縮強度を発現させることが可能である。
- GGBS と BFS を併用することで、高い品質のコンクリートが得られる。

謝辞

本研究は、NEXCO 東日本「技術研究助成」によって実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 小泉信一, 井元晴丈, 馬場勇介, 山崎遥平: C-S-H 系早強剤を用いたコンクリートの強度発現性および耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.154-159, 2014.6
- 2) 丁上, 森本充, 藤井隆史, 綾野克紀: カルシウムシリケート系硬化促進剤が高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.709-714, 2024.6
- 3) 土木学会: 2023 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp.58-60, 2023.9