高炉スラグ材料を用いた PCaPC 部材用コンクリート
－ハレーサルト PS－

大阪支店 土木技術部 河中涼一
土木本部 土木本部室 園田強介
技術本部 技術部 橋野哲郎

概要：ハレーサルト PS は，高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を併用した高耐久なプレテンション方式の PCaPC 部材用のコンクリートである．高炉スラグ微粉末は早強ポルトランドセメントに対して質量比で 50%を置換し，高炉スラグ細骨材は天然細骨材と 100%置換する．さらにカルシウムシリケート水和物のナノ粒子系早強剤を添加することで，蒸気養生を不要とした．これらの方法で，生産性の維持と高耐久化を両立し，さらに二酸化炭素の排出量を 50%削減する SDGs 社会の構築に資する次世代型のプレテンション PCaPC 部材用コンクリートが完成した．
Key Words：高炉スラグ微粉末，高炉スラグ細骨材，高耐久，低炭素

１．はじめに

高炉スラグ微粉末（以下，GGBS）は，コンクリートの塩分浸透抵抗性を向上させる効果があり，塩害が懸念される構造物に用いられている．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や凍結融解抵抗性を向上させる効果があることが知られている．一方，GGBS をセメントの一部と置換して用いると，若材齢での圧縮強度が小さくなることも知られている．工場で製造するプレキャストコンクリート（以下，PCa）部材では，製造効率の観点から打込みの翌朝には，脱型に必要な強度を発現する必要がある．特にプレテンション方式の PC 部材では，JIS A 5373「プレキャストプレストレストコンクリート製品」の規定で，プレストレス導入時に 35N/mm² 以上の圧縮強度が必要となる．そのため，一般には，早強ポルトランドセメントを用い，蒸気による促進養生（以下，蒸気養生）が行われることが多い．

コンクリートの強度発現を早める混和剤には，硝酸塩，亜硝酸塩などがあるが，主に極寒地での初期凍害防止に用いられるもので，一般的な環境での強度発現の促進に用いられることはない．カルシウムシリケート系硬化促進剤（以下，硬化促進剤）は，C-S-H のナノ粒子が種結晶として作用することで強度発現を早める混和剤である [1)]．この硬化促進剤は鋼材腐食の恐れのある物質は含んでおらず，一般的な環境で製造されるプレストレストコンクリートにも適用が可能な硬化促進剤とされている．また，細骨材に BFS を用いたコンクリートに硬化促進剤を用いれば，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 [2)]．

本研究では，GGBS と BFS を併用したコンクリート（以下，BFS コンクリート）に硬化促進剤を添加し，強度発現性および耐久性に関する品質を確認した．コンクリートは，試験室および実機プラントで製造した．

河中涼一

園田強介

橋野哲郎

2．実験概要

2.1　コンクリートの練混ぜおよび供試体の養生

コンクリートは，室温約 20℃の試験室のミキサまたは実機プラントのミキサによって製造した．試験室では，容量 60L の強制練りパン型ミキサを用いてコンクリートを練り混ぜた．供試体は型枠へ打込み後，材齢 18 時間まで型枠内で養生し，脱型後は温度 20±2℃の水槽で試験開始まで養生した．実機プラントでは，強制二軸型ミキサ（容量：1.80m³）でコンクリートを製造した．練混ぜは，春期（気温：21.7℃），夏期（気温：32.1℃）および冬期（気温：4.9℃）に行った．実機プラントでは，実部材製造時と同じ養生方法を再現するため，供試体は打込み後，**写真-1** に示すように実部材を模した 1,400×700×900mm の大型ブロックに近接させて設置し，全体をアルミ蒸着シートで覆って養生した．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．

2.2　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/cm³，ブレーン値：4,430cm²/g）および高炉スラグ微粉末 6000（密度：2.91g/cm³，ブレーン値：5,650cm²/g，三酸化硫黄量：3.01%）を用いた．細骨材には，

表-1 試験室で作製したコンクリートの配合

W/B (%)	GGBS/B (%)	s/a (%)	空気量 (設計値) (%)	単位量 (kg/m³)						混和剤 (B×%)			空気量 (測定値) (%)
				W	B		S		G	高性能減水剤	AE 剤	硬化促進剤	
					C	GGBS	砕砂	BFS					
33.0	0	42.4	2.0	160	485	0	711	0	1,000	0.65	0.02	6.0	3.6
							0	752					3.9
	20	42.2			388	97		745					3.3
	40	42.0			291	194		739					2.7
	50	41.9			242	242		735					2.5

表-2 実機プラントで製造したコンクリートの配合

配合名	W/B (%)	GGBS/B (%)	s/a (%)	空気量 (%)	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	754	1,000	1.30	0.02	4.0
配合 2													0.5
配合 3		0				484	0	720	0	1,009	1.00		4.0
配合 4	40.3		40.0	4.5		397		691		1,048	0.65		0.0

高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.73g/cm³，吸水率：0.73%，粗粒率：2.30）および安山岩砕砂（表乾密度：2.58g/cm³，吸水率：0.95%，粗粒率：2.83）を，粗骨材には，安山岩砕石（最大寸法：20mm，表乾密度：2.61g/cm³，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．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．

試験室で作製したコンクリートの配合を**表-1** に示す．水結合材比は 33%，単位水量は 160kg/m³，単位粗骨材

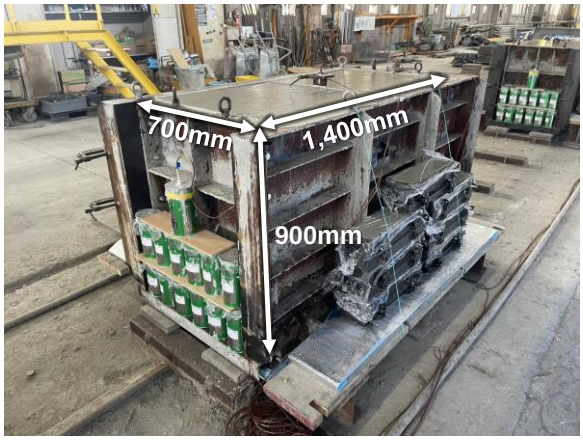

写真-1 実部材製造時を模した供試体の養生

量は 1,000kg/m³ で一定とした．GGBS 率の影響を確認するために，GGBS を質量比で結合材の 0%，20%，40%および 50%の 4 水準とした．また，細骨材の影響を確認するために，砕砂を用いた配合（以下，砕砂コンクリート）も併せて検討した．

実機プラントで製造したコンクリートの配合を**表-2** に示す．試験室での結果を参考に，GGBS を質量比で結合材の 50%用いた配合とした．硬化促進剤の添加量は，大型ブロックの発熱による強度増進を期待して，試験室よりも少ない 4.0%とした．

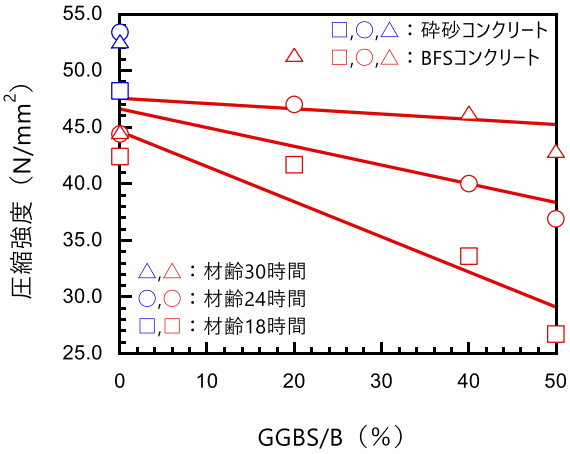

図-1 試験室で作製したコンクリートの若材齢における圧縮強度

2.3　試験方法

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験方法」に従って行った．試験室で作製したコンクリートも実機プラントで製造したコンクリートも，材齢 7 日から，温度 20±2℃，相対湿度 60±5%の恒温恒湿度室で試験を開始した．

クリープ試験には，100×100×380mm の角柱供試体を用いた．供試体の中心には，持続応力導入用の PC 鋼棒（直径 21mm，C 種 1 号 SBPR 1080/1230）を通すために，鋼製シース（内径 23mm，鋼板厚 0.25mm）を埋め込んだ．供試体は，乾燥収縮ひずみ試験の供試体と同じ条件で脱型，養生し，材齢 7 日に初期載荷を行った．初期載荷時には，同条件で養生を行ったφ100×200mm の円柱供試体 3 本の平均圧縮強度および静弾性係数を求め，圧縮強度の 1/3 の圧縮応力となる弾性ひずみが生じるように PC 鋼棒を緊張した．コンクリートの乾燥収縮，クリープおよび PC 鋼棒のリラクゼーションなどによる持続応力の減少が 5%以内になるように，初期載荷後 2 日目，9 日目，22 日目，58 日目および 128 日目に圧縮応力の再導入を行った．再導入は，供試体に与えた圧縮力を一度除荷し，初期載荷時と同じひずみを与える方法で行った．クリープひずみは，本試験で得られた全ひずみから，乾燥収縮試験で得られたひずみを減じることで求めた．

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．試験室で作製したコンクリートは材齢 21 日に，実機プラントで製造したコンクリートは材齢 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た．試験室で作製したコンクリートは材齢 28 日に，実機プラントで製造したコンクリートは材齢 14 日に濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させ，91 日後または 182 日後に供試体を取り出し，供試体の全塩化物イオン濃度の分布を測定した．

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．試験室で作製したコンクリートは材齢 28 日に，実機プラントで製造したコンクリートは材齢 7 日に，供試体をコン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．切除後，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．

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．試験室で作製したコンクリートは材齢 28 日に，実機プラントで製造したコンクリートは材齢 7 日に，試験を開始した．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　試験室で作製したコンクリートの品質

図-1 は，試験室で作製したコンクリートの材齢 30 時間までの圧縮強度試験結果である．図中の直線は，BFS コンクリートの結果を材齢毎に最小二乗法で直線回帰したものである．GGBS の置換量が増加すると，圧縮強度は低下するが，材齢の経過とともに，GGBS 量の影響が小さくなっていることが分かる．**図-2** は，

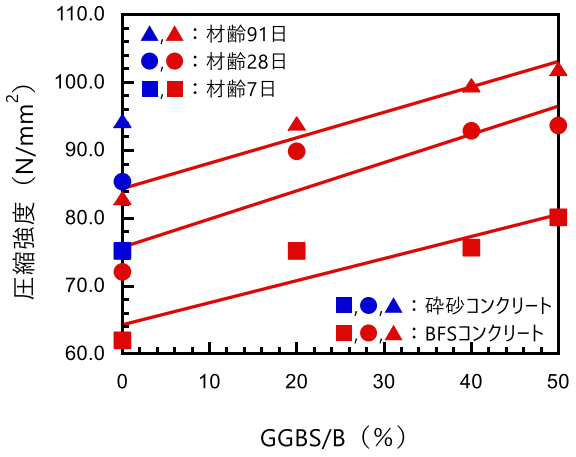

図-2 試験室で作製したコンクリートの材齢 7 日以下の圧縮強度

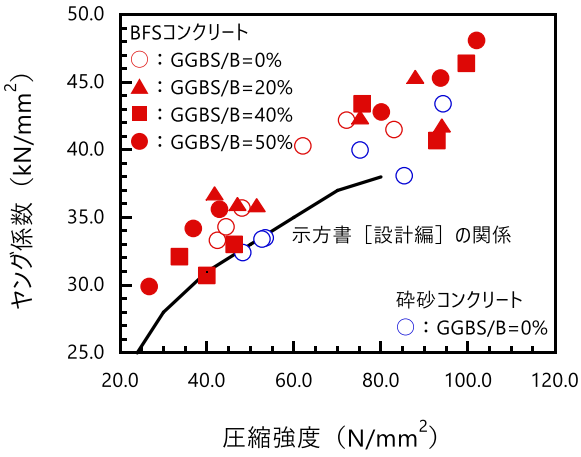

図-3 試験室で作製したコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係

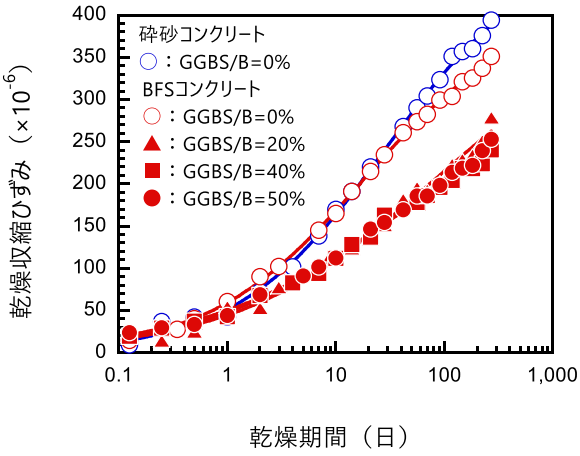

図-4 試験室で作製したコンクリートの乾燥収縮ひずみ

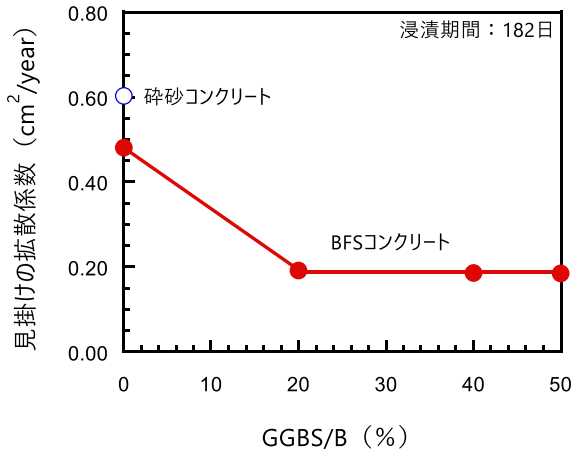

図-5 試験室で作製したコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数

試験室で作製したコンクリートの材齢 7 日以下の圧縮強度試験結果を示したものである. 図中の直線は, BFS コンクリートの結果を材齢毎に最小二乗法で直線回帰したものである．材齢 7 日以下では，GGBS 量が多いものほど，圧縮強度は大きくなっている．なお，GGBS を用いない場合，BFS コンクリートの圧縮強度は砕砂を用いたコンクリートよりやや小さくなる．

図-3 は，試験室で作製したコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示したもので，材齢 18 時間，24 時間，30 時間，7 日，28 日および 91 日の結果を示している．図中の曲線は，2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］（以下，示方書［設計編］）に示される圧縮強度とヤング係数の関係 [3]を示している．青色のマーカーで示される砕砂コンクリートに比べ，赤色のマーカーで示される BFS コンクリートは，同じ圧縮強度に対してヤング係数が大きい傾向にある．

図-4 は, 試験室で作製したコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである. 図中の曲線は, それぞれの結果を双曲線で回帰したものである．砕砂コンクリートに比べて，BFS コンクリートは，乾燥収縮ひずみが小さく，また，GGBS を用いたものは，乾燥収縮ひずみがさらに小さいことが分かる．

図-5 は，試験室で作製したコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数を示したものである．砕砂コンクリートに比べて，BFS コンクリートの見掛けの拡散係数は小さく，GGBS を用いたものは，見掛けの拡散係数がさらに小さくなっている．

図-6 は，試験室で作製したコンクリートの水分浸透速度係数を示したものである．GGBS を用いていないものは，時間の経過とともに水分浸透深さがわずかに増加したが，GGBS を用いたものは，時間が経過して

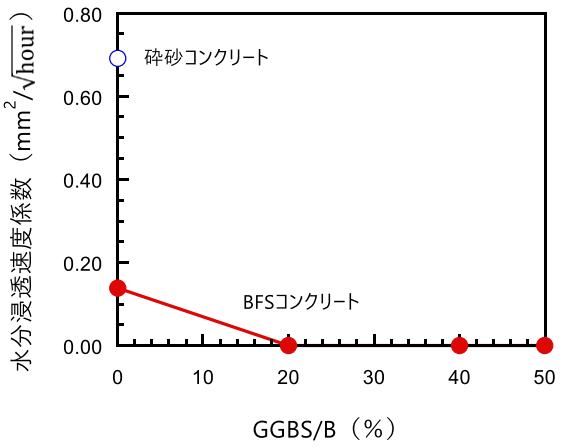

図-6 試験室で作製したコンクリートの水分浸透速度係数

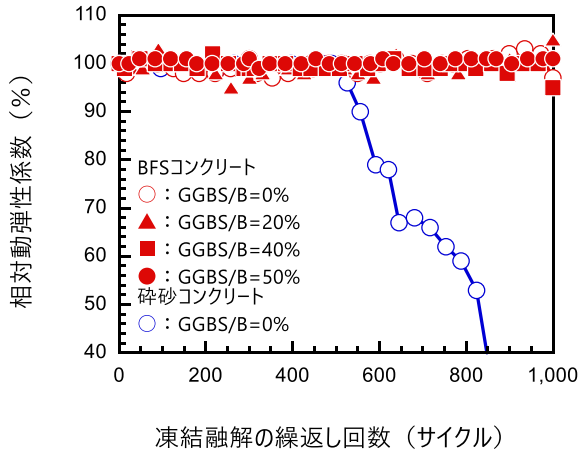

図-7 試験室で作製したコンクリートの凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

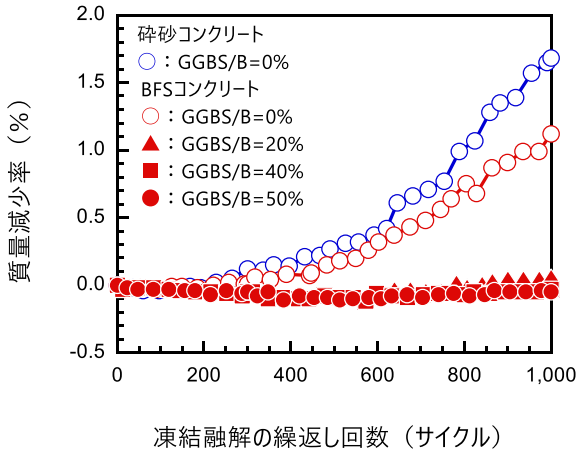

図-8 試験室で作製したコンクリートの凍結融解試験結果（質量減少率）

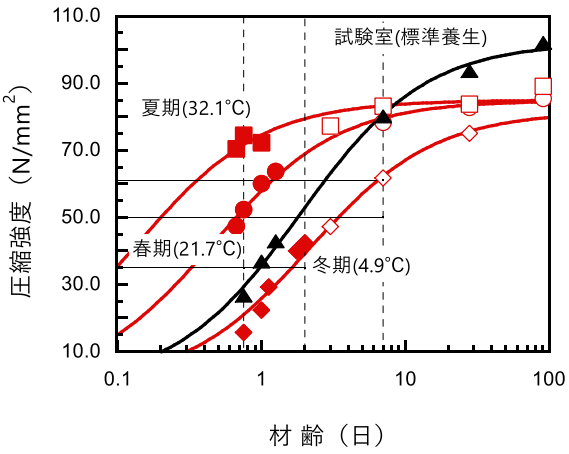

図-9 実機で製造した配合 1 のコンクリートの圧縮強度

も，水分浸透深さは変化しなかった．砕砂コンクリートに比べて，BFS コンクリートの方が水分浸透速度係数は小さかった．

図-7 および図-8 は，それぞれ，試験室で作製したコンクリートの凍結融解試験におけ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．砕砂コンクリートは，500 サイクルを超えたあたりから相対動弾性係数が低下しているのに対し，BFS コンクリートは，1,000 サイクルまで相対動弾性係数が低下していない．また，GGBS を用いていないものは，300 サイクルを超えると，質量減少率が大きくなっているのに対し，GGBS を用いたものは，1,000 サイクルでも質量変化はほとんど生じておらず，高い凍結融解抵抗性を有していると言える．

写真-2 冬期における追加の養生

以上の結果から，砕砂コンクリートに比べて，BFS コンクリートは，乾燥収縮ひずみ，塩化物イオンの見掛けの拡散係数，水分浸透速度係数は小さく，凍結融解抵抗性も高い．また，GGBS を用いた方が，若材齢での強度は小さくなるが，長期強度は GGBS を用いた方が大きくなり，耐久性に関する品質も向上する．

3.2 実機で製造したコンクリート

図-9 は，実機プラントで製造した配合 1 のコンクリートの圧縮強度の経時変化を，試験室で作製し標準養

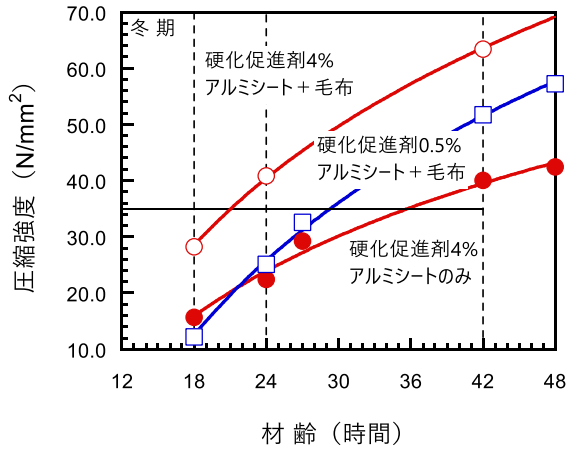

図-10 冬期に実機で製造した配合 1 のコンクリートの追加養生による圧縮強度

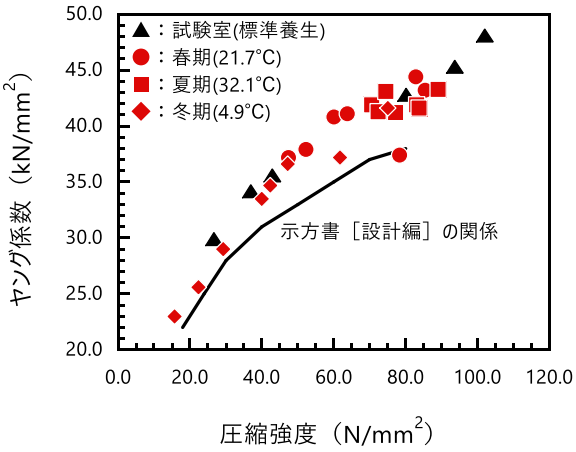

図-11 実機で製造したコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係

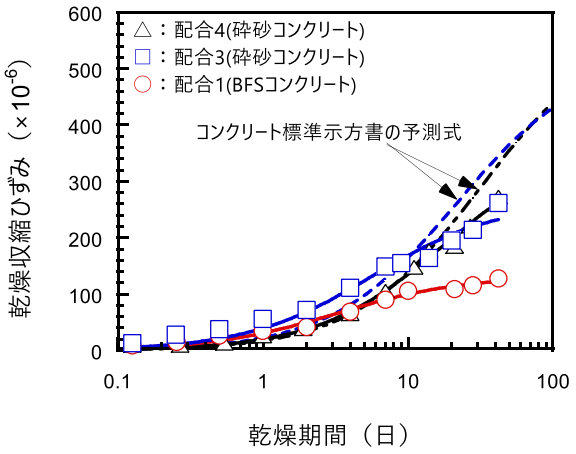

図-12 実機で製造したコンクリートの乾燥収縮

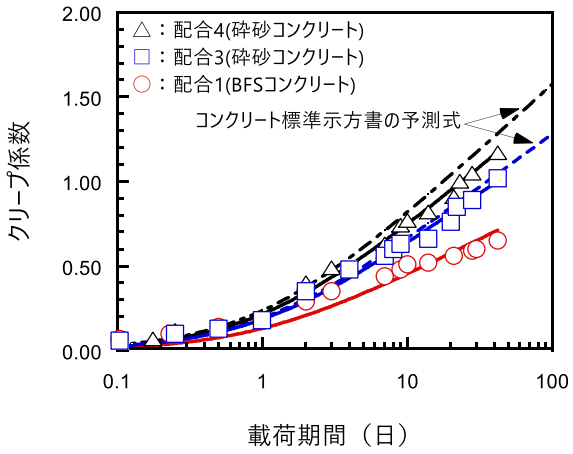

図-13 実機で製造したコンクリートのクリープ

生したものと比較して示したものである．春期および夏期に製造したものは，材齢 18 時間で 50N/mm² を超える圧縮強度を発現している．春期の外気温は 21.7℃と試験室とほぼ同じであったが，実機プラントで製造したものは，大型ブロックの水和熱による温度上昇によって，強度の発現が早くなっている．材齢 7 日では，実機プラントで製造したものと試験室で作製したものと同程度の圧縮強度を発現した．実機プラントで製造したものは，材齢 7 日以下では，水中養生を行った試験室のものよりも強度の増進は小さいが，材齢 28 日で 75N/mm² を超える圧縮強度を発現した．冬季に製造したものは，プレストレス導入時に必要な 35N/mm² の圧縮強度に達したのが材齢 2 日であった．冬期の結果は，外気温が 20℃ を超える春期および夏季と同様に，大型ブロックと供試体をアルミ蒸着シートで覆って養生した結果であるが，**写真-2** に示すように，アルミ蒸着シートに加えて毛布と風よけシートによる追加の保温養生を行うことで，強度の発現を促進することができる．**図-10** はアルミ蒸着シートに加えて毛布と風よけシートによる追加の保温養生を行った際の圧縮強度と初期の材齢の関係を示したものである．この図から，冬期でも，追加の保温養生を施すことによって，材齢約 21 時間でプレストレス導入時に必要な 35N/mm² の圧縮強度を発現していることが分かる．

図-11 は，実機プラントで製造した配合 1 のコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示したものである．実機プラントで製造したものと試験室で作製したものの圧縮強度とヤング係数の関係はほぼ同じであり，図中に曲線で示すコンクリート標準示方書［設計編］の圧縮強度とヤング係数の関係よりも，BFS コンクリートは，同じ圧縮強度に対してヤング係数が大きい傾向にある．

図-12 は，実機プラントで製造した配合 1，配合 3 および配合 4 のコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである．この図より，BFS コンクリートの乾燥収縮ひずみは，砕砂を用いた配合 3 および配

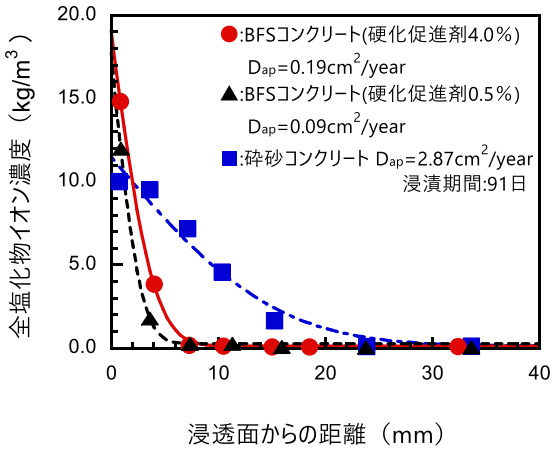

図-14 夏期に製造したコンクリートの塩化物イオン濃度の分布

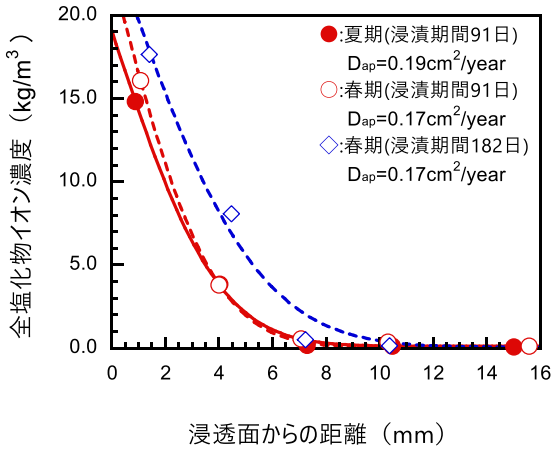

図-15 製造時期が塩分浸透性に与える影響

合 4 のコンクリートよりも小さい傾向にあることが分かる．また，図中の破線および一点鎖線は，それぞれ，配合 3 および配合 4 の乾燥収縮ひずみを 2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］に示される予測式から求めたものである．配合 3 および配合 4 の実験値は，予測値に近い結果であるのに対し，配合 3 と同じ単位水量および水結合材比である配合 1 の BFS コンクリートの結果は，予測式の値よりも小さいことが分かる．

図-13 は，実機プラントで製造した配合 1，配合 3 および配合 4 のコンクリートのクリープ試験から得られた載荷期間とクリープ係数の関係を示したものである．この図より，配合 1 の BFS コンクリートのクリープ係数は，配合 3 および配合 4 の砕砂コンクリートよりも小さい傾向にあることが分かる．また，図中の破線および一点鎖線は，それぞれ，配合 3 および配合 4 のコンクリートのクリープ係数を 2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］に示される予測式から求めた値である．配合 3 および配合 4 の砕砂コンクリートの実験値は，予測値と概ね一致しているのに対し，GGBS および BFS を用いていない配合 3 と同じ単位水量および水結合材比である配合 1 の BFS コンクリートの結果は，予測式の値よりも小さいことが分かる．

図-14 は，夏期に製造した配合 1 および配合 2 の BFS コンクリートおよび配合 4 の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，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 Dap は，硬化促進剤を 4.0%および 0.5%用いた場合で，それぞれ，0.19cm²/year および 0.09cm²/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 2.87cm²/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，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，0.425cm²/year および 0.204cm²/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-15 は，春期に製造した配合 1 の BFS コンクリートの全塩化物イオン濃度の分布を，夏期に製造した配合 1 の BFS コンクリート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 Dap は，0.17cm²/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．

図-16 は，夏期に製造した配合 1 および配合 2 の BFS コンクリートおよび配合 4 の砕砂コンクリートの水

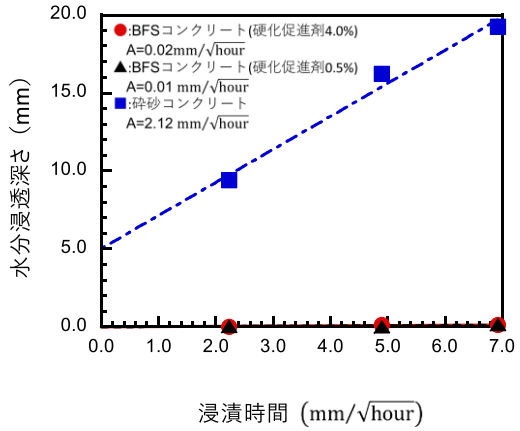

図-16 夏期に製造したコンクリートの水分浸透速度係数試験の結果

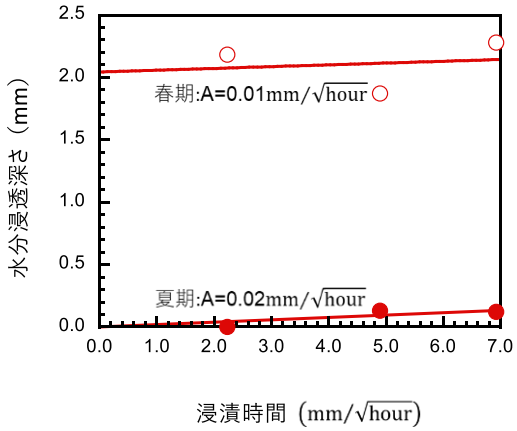

図-17 製造時期が水分浸透性に与える影響

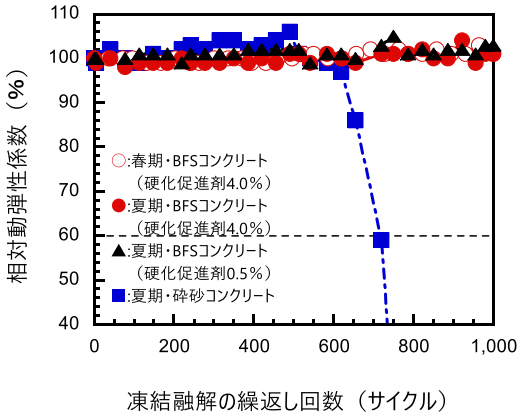

図-18 凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

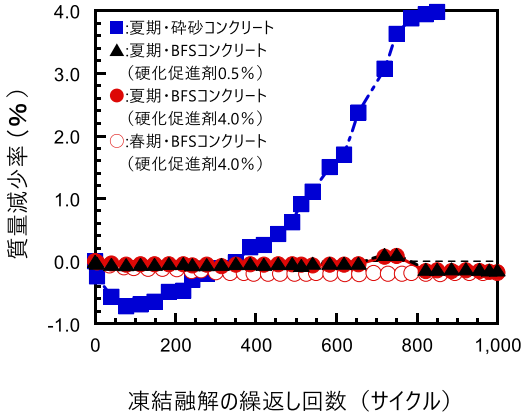

図-19 凍結融解試験結果（質量減少率）

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-17** 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．

図-18 および**図-19** は，それぞれ配合 1，配合 2 の BFS コンクリートと配合 4 の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．**写真-3** は，配合 4 の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，**写真-4** は，配合 1 および配合 2 の 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

(a) 350 サイクル

(b) 619 サイクル

写真-3 砕砂コンクリートの外観

(a) 硬化促進剤 4.0%（1,000 サイクル）

(b) 硬化促進剤 0.5%（1,000 サイクル）

写真-4 BFS コンクリートの外観

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．

４．まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す．

- GGBS の置換量が増加すると，若材齢での圧縮強度は低下するが，材齢の経過とともに影響は小さくなり，材齢 7 日以下では GGBS の置換量が多いものほど圧縮強度は大きくなる．
- BFS コンクリートは，砕砂コンクリートに比べて乾燥収縮ひずみ，クリープ係数，塩分浸透性，水分浸透性は小さくなり，凍結融解抵抗性は向上する．また，GGBS の置換率が高くなると，その傾向は，より顕著になる．
- 春期および夏期に実機プラントで製造した BFS コンクリートは，材齢 18 時間で 35N/mm² 以上の強度を発現する．冬期でも保温養生を行うことで強度発現を促進することができる．

謝辞

本研究で強度発現性および耐久性に関する品質を確認した BFS コンクリートは「ハレーサルト PS」と称して社会実装され，本稿執筆時点（2025 年 6 月）で，2 件の PC 構造物に採用の実績がある．本技術の開発には岡山大学の綾野教授，藤井准教授および学生の皆様に多大なるご指導とご支援を頂いた．関係各位に，心よりお礼申し上げます．

参考文献

1) 小泉信一，井元晴丈，馬場勇介，山﨑遥平：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：2022 年制定コンクリート標準示方書［設計編］，p.45，2023.3