

自己養生法による高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの湿潤養生の簡略化

(株)ピーエス三菱 正会員 ○ 中瀬 博一
 岩手大学 正会員 博(工学) 小山田 哲也
 (株)ピーエス三菱 正会員 博(工学) 鈴木 雅博
 (株)ピーエス三菱 正会員 遠藤 俊之

Abstract : Ground granulated blast furnace slag improves the durability of the concrete while contributing to environmental load reduction by using the concrete admixture. On the other hand, as for the concrete using the ground granulated blast furnace slag, wet curing after demoulding is required from the viewpoint of strength development and durability. However, wet curing after demoulding is sometimes difficult to carry out due to restriction of space availability and cost. Accordingly, We gave self-curing from the concrete inside by replacing normal fine aggregate with porous fine aggregate which retained water, and We developed ground granulated blast furnace slag concrete having the superior strength development and durability without curing itself from the outside.

Key words : Self-Curing, Blast Furnace Slag, Precast concrete

1. はじめに

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、強度発現および耐久性の確保の観点から脱枠後の初期材齢時に湿潤養生が必要とされ、プレキャスト部材に用いる場合も同様である。しかし、湿潤養生のための水槽などの設備の設置は、場所の確保や水温管理などが困難な場合があり部材製造コストにも影響する。このため、脱枠後の湿潤養生の省略を目的に検討を行い、飽水させた軽量細骨材を一般細骨材に適量置換使用し、軽量細骨材の放水によりコンクリート内部から湿潤養生を行うことで、外部からの湿潤養生を行った場合と同等以上の強度発現および各種耐久性が得られる自己養生型の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート（以降、自己養生型高炉スラグコンクリートとする）を開発した。本稿では、強度発現性および各種耐久性について検討を行った結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と試験項目

実験の要因と試験項目一覧を表-1に示す。実験は検討項目により STEP1～STEP3 の3ステップにて実施した。STEP1 では飽水した細骨材によるコンクリート内部からの湿潤養生効果を目的に用いた多孔質な細骨材（以降、自己養生材と呼ぶ）を、3種（SC1～SC3）用いて自己養生材の細骨材容積に対する置換率の影響を検討した。STEP2 では水結合材比と圧縮強度の関係を検討し、プレキャスト PC 床版を適用対象として想定したコンクリートの仕様を満足する自己養生型高炉スラグコンクリートの配合を決定した。STEP3 では決定

表-1 実験の要因と試験項目一覧

STEP1 自己養生材置換率の検討試験						STEP2 W/Bの検討試験		STEP3 耐久性試験		
結合材	自己養生材	自己養生材置換率	養生	圧縮強度	収縮ひずみ	水結合材比(W/B)	圧縮強度	凍結融解	凍害スケーリング	塩分浸透
HC + BFS	SC1	3水準 (30,50,70%)	気中	○	○	3水準 (32.5,37,42%)	○	○	○	○
	SC2	3水準 (30,50,70%)	気中	○	○	3水準 (32.5,37,42%)	○	—	—	—
	SC3	2水準 (30,50%)	気中	○	○	3水準 (32.5,37,42%)	○	—	—	—
	なし	—	気中	○	○	—	—	—	—	—
			湿潤3日	○	○	—	—	—	○	○
HC	なし	—	気中	—	—	—	—	—	—	○

した配合の自己養生型高炉スラグコンクリートについて各種耐久性を検討した。

2.2 使用材料

使用材料を表-2に示す。自己養生材として用いた SC1~SC3 はプレウエッティングしたものとした。以降、各種材料の略記号は表-2によるものとする。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3に示す。

STEP1 では高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの実績配合 (配合 BFS) を基準として、SC1~SC3 の自己養生材で細骨材容積の30~70%を置換し、自己養生材による置換率の影響を検討した。STEP2 では自己養生材の置換率を30%一定として、水結合材比 (W/B) を32.5~42.0%とした場合の強度発現性を確認した。STEP3 ではSTEP2 で決定した自己養生型高炉スラグコンクリート配合 (SC-BFS) と、比較用の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの実績配合 BFS を脱砕後3日間湿潤養生した場合 (BFS-W3) および早強セメント単味の実績配合 (HC) について耐久性試験を行った。

2.4 練混ぜ方法および養生方法

コンクリートは、20±3°Cの室内で容量55

表-2 使用材料

使用材料	記号	種類	性質・主成分
セメント	HC	早強セメント	密度:3.14g/cm ³ , 比表面積:4570cm ² /g
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末	密度:2.91g/cm ³ , 比表面積:6010cm ² /g
細骨材	S	砕砂	表乾密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:1.67%
細骨材 (自己養生材)	SC1	人工軽量細骨材1 (膨張頁岩系)	密度(プレウエッティング後):1.87g/cm ³ , 吸水率:15.0%
	SC2	人工軽量細骨材2 (膨張頁岩系)	密度(プレウエッティング後):2.00g/cm ³ , 吸水率:18.0%
	SC3	多孔質セラミック (廃瓦細骨材)	骨材粒径:5-1mm, 7日水中後の密度:2.26g/cm ³ , 7日含水率:8.97%
粗骨材	G	砕石	表乾密度:2.92g/cm ³ , 吸水率:0.67%
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸系
	AE	AE剤	天然樹脂酸塩

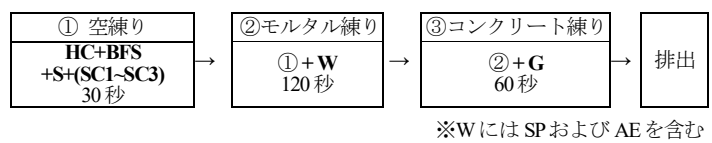


図-1 コンクリートの練混ぜ方法

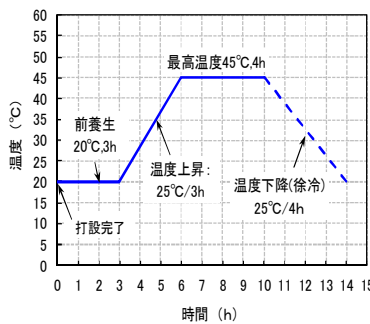


図-2 給温養生の温度設定

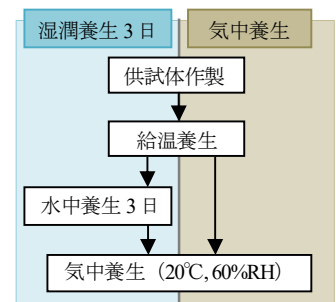


図-3 供試体の養生方法

表-3 コンクリートの配合

STEP	自己養生材	配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
						水	結合材		細骨材			粗骨材			
							W	HC	BFS	S	SC1		SC2	SC3	G
STEP1	なし	BFS(BFS-W3)	6.0	32.5	46.9	158	243	243	771	-	-	-	964		
		SC1							541	163	-	-			
		SC1-50							387	273	-	-			
		SC1-70							231	381	-	-			
	SC2	SC2-30							541	-	167	-			
		SC2-50							387	-	280	-			
		SC2-70							231	-	392	-			
		SC3							541	-	-	197			
STEP2	SC1	SC1-30-32.5	32.5	46.9	158	243	243	541	163	-	-	964			
		SC1-30-37	37.0	48.4		214	214	575	174	-	-				
		SC1-30-42	42.0	49.8		188	188	607	183	-	-				
		SC2	SC2-30-32.5	32.5		46.9	243	243	541	-	167		-		
		SC2-30-37	37.0	48.4		214	214	575	-	179	-				
		SC2-30-42	42.0	49.8		188	188	607	-	188	-				
	SC3	SC3-30-32.5	32.5	46.9	243	243	541	-	-	197					
		SC3-30-37	37.0	48.1	214	214	575	-	-	210					
		SC3-30-42	42.0	49.8	188	188	607	-	-	221					
		STEP3	SC1	SC-BFS	6.0	36.0	48.1	158	220	220	572	172	-	-	964
			なし	BFS-W3	32.5	46.9	243		243	771	-	-	-		
				HC	35.2	42.0	160		455	-	708	-	-	-	

【備考】・STEP1の配合名(例) SC1-30の(ハイフン)の前のSC1は自己養生材種類を表し、後の数値は自己養生材による容積置換率を表す。
 ・STEP2の配合名(例) SC1-30-37の末尾の数値は水結合材比 (W/B) を表す。
 ・STEP3の SC-BFSは自己養生型高炉スラグコンクリート、BFS-W3は脱砕後3日間湿潤養生とした高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート、HCは早強セメント単味のJIS工場実績配合をそれぞれ示す。

L の強制練り 2 軸ミキサを用いて図-1 に示す手順で混練し、型枠に打設したコンクリートは、図-2 に示す温度設定で給温養生を行った。脱枠は打設の翌日とし、脱枠後は室温 20°C、湿度 60%RH の室内で気中養生とした。ただし、自己養生材を用いない高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート配合（プレキャスト工場の実績配合）では、図-3 に示すように実際の部材製作時と同様に脱枠後 3 日間の湿潤養生（20°C 水中養生）を行った後に気中養生とした場合（以降、BFS-W3 とする）も検討した。

2.5 試験項目、試験方法および目標値

試験項目、試験方法および試験材齢の一覧を表-4 に示す。

(1) フレッシュコンクリート試験

スランプの目標値は、各配合共通で 18.0cm としたが、STEP3 の比較用 HC 配合のみ実績に合わせて 12.0cm とした。また空気量は凍害危険地域を想定して 6.0% とした。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験は、材齢 1, 7, 14, 28 日で実施し、静弾性係数試験は材齢 28 日にも実施した。

(3) 収縮ひずみ試験

STEP1 における収縮ひずみ試験では、10×10×40cm 角柱供試体の中心部に埋込み型ひずみ計を設置し計測した。供試体への型枠の拘束をなくすため、型枠の底版にはテフロンシートを敷設し、妻枠には厚さ 3mm の発泡スチロールを設置したうえ、ポリエチレンシートを打込み面を除く 5 面に添付した。供試体は給温養生後に脱枠し、全面を乾燥面として室温 20°C、湿度 60%RH の室内で気中養生とした。供試体 BFS-W3 の場合は給温養生後に 3 日間の湿潤養生を行った後に気中養生とした。

本試験では、コンクリート打設からの全ひずみを計測しており、計測値には自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみが共に含まれる。なお、収縮ひずみは線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して算出した。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験は「JIS A 1148 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）に準拠して実施した。試験体の養生は給温養生後に室温 20°C、湿度 60%RH の室内に静置し、凍結融解試験は材齢 28 日から実施した。

(5) 凍害スケーリング試験

凍害スケーリング試験は ASTM-C672 に準拠して行い、試験開始は材齢 28 日とした。試験体は脱枠後に気中養生を 28 日間行った後（比較用の BFS-W3 配合は脱枠後 3 日間の湿潤養生後に材齢 28 日まで気中養生）、24 時間浸水後に試験に供した。試験体は図-4 に示すように 240×240×80mm とし、塩水を溜めるために試験面の外周に高さ 20mm×幅 10mm の土手を形成し 220×220mm の試験面とした。試験は仕上げ面および底面（型枠面）とした。

(6) 塩分浸透性試験

塩分浸透性試験は「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（JSCE-G 572-2013）」に、全塩化物イオン分布の測定は「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法（案）（JSCE-G-574-2013）」に準拠して行った。塩水浸漬期間は 12 カ月とした。

表-4 試験項目と試験方法

試験項目		試験方法、材齢
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 (材齢 1,7,14,28 日)
	静弾性係数	JIS A 1149 (材齢 28 日)
	凍結融解	JIS A 1148 (A 法)
	凍害スケーリング	ASTM-C672
	塩分浸透性 (Cl 分布測定)	JSCE-G 572-2013 (JSCE-G-574-2013)

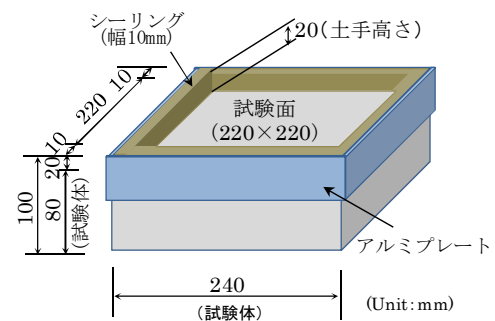


図-4 スケーリング試験体の形状

3. 実験結果

3.1 STEP1 (自己養生材置換率の検討) の実験結果

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5に示す。

いずれの配合でも混和剤添加量に大きな差異はなく目標とするフレッシュ性状が得られ、自己養生材の種類および置換率によるフレッシュ性状への影響は小さかった。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

試験材齢と圧縮強度の関係を図-5に示す。自己養生材 SC1 を使用した配合では、初期材齢から強度発現は良好であり、置換率に関わらずいずれの材齢でも自己養生材を用いない BFS 配合に比べ大きな値を示し、材齢 28 日では 75N/mm² 以上の圧縮強度を示した。自己養生材 SC2 を使用した配合では、BFS 配合に比べて大きな強度発現を示し、材齢 28 日では置換率に関わらず 70N/mm² 以上の圧縮強度であった。多孔質セラミックの自己養生材 SC3 を使用した配合では、人工軽量骨材の自己養生材 SC1 および SC2 を用いた場合に比べ強度発現は若干小さく、材齢 28 日の圧縮強度は 65~70N/mm² あった。

材齢 28 日における BFS 配合 (気中養生) に対する圧縮強度比 (各配合における圧縮強度を BFS 配合の圧縮強度で除した値を百分率で表したものと定義) を図-6に示す。BFS 配合は SC1~SC3 を用いた配合と同様に脱枠後に気中養生とした場合と、3 日間湿潤養生の後に気中養生とした 2 種の養生方法としたが、湿潤養生を 3 日行った場合、気中養生のみの場合に比べ 6% 大きな強度発現を示し、従来の知見と同様に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートにおける脱枠後の湿潤養生の有効性が確認された。一方、自己養生材 SC1~SC3 を用いたコンクリートは、湿潤養生を行わない場合でも、SC1 では 18~21%、SC2 では 9~14%、SC3 では 4~7% の範囲で BFS 配合 (気中養生) に比べ大きな強度発現を示した。また、SC1 では自己養生材の置換率 50% でもっとも大きな強度発現を示したが、SC2 および SC3 では置換率が大きくなると、若干ではあるが強度が小さくなる傾向が認められた。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-7に示す。SC1~SC3 のいずれの自己養生材の場合も、置換率が大きくなるに従い、静弾性係数は小さくなる傾向であった。また、いずれの自

表-5 フレッシュコンクリート試験結果

配合	SP (B×%)	AE (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	室温 (°C)
BFS	0.38	0.08	19.5	6.7	21	18
SC1-30	0.38	0.08	19.5	5.8	21	19
SC1-50	0.38	0.08	17.5	5.9	21	19
SC1-70	0.39	0.08	15.5	5.5	21	19
SC2-30	0.37	0.08	19.5	6.0	20	18
SC2-50	0.37	0.08	17.5	6.1	20	18
SC2-70	0.39	0.08	17.0	6.6	20	19
SC3-30	0.36	0.08	20.5	6.0	20	18
SC3-50	0.36	0.08	20.0	6.5	20	19

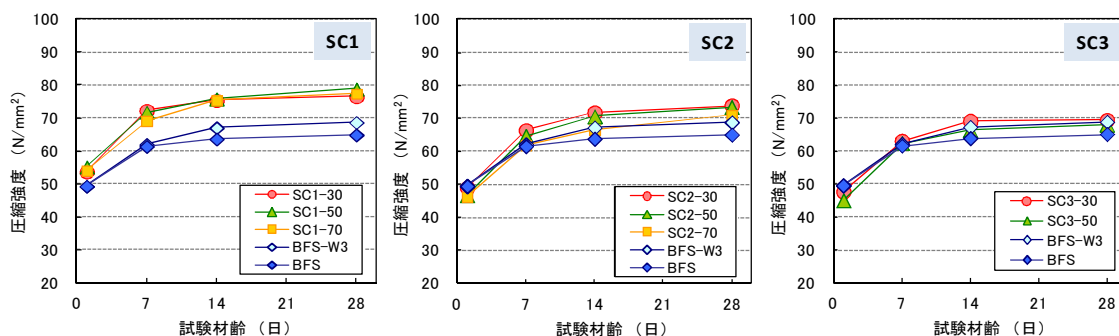


図-5 材齢と圧縮強度の関係

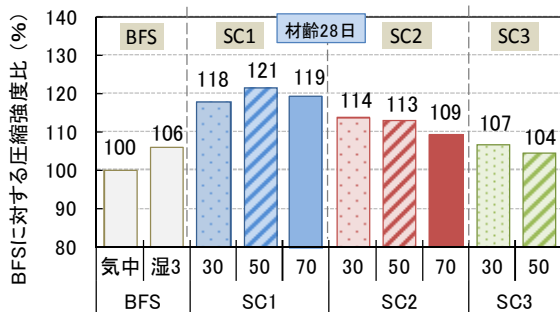


図-6 BFS 配合に対する圧縮強度比

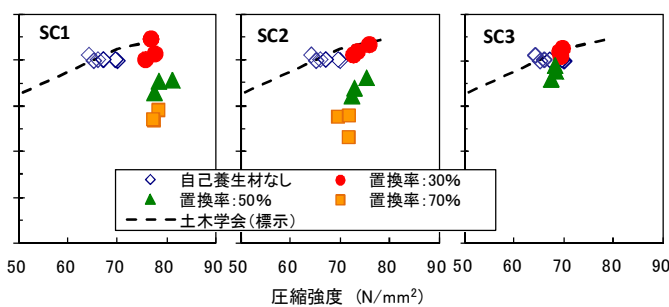


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

己養生材でも置換率が 30 % の場合は土木学会コンクリート標準示方書に記載の圧縮強度と静弾性係数の関係式(標式)と同等の値を示したが、置換率が 50%および 70%の場合は、標式に比べて小さくなる傾向であった。このため、圧縮強度と静弾性係数との関係の観点では、自己養生材の置換率は 30%以下とすることが望ましいと考えられる。ただし、

SC3 に関しては自己養生材の置換率が大きくなった場合でも、静弾性係数の低下は小さかった。これは、SC3 の骨材自体の静弾性係数が SC1 および SC2 に比べて大きいことが一因と考えられる。

(3) 収縮ひずみ

収縮ひずみの計測結果を図-8に示す。左側にコンクリート打設から材齢 7 日までの結果、右側に材齢 91 日までの計測結果を示した。

左図を見ると、自己養生材を用いず脱枠後に気中養生とした BFS では、脱枠後に材齢が進むにつれて収縮ひずみ大きくなったが、3 日間の湿潤養生とした BFS-W3 の場合は、湿潤養生期間の収縮はごく僅かとなり、湿潤養生の終了後に収縮が認められた。一方、自己養生材 SC1~SC3 を用いた配合では、いずれの配合でも脱枠後に一旦、膨張側の挙動を示した後に収縮に転じる傾向が認められた。また、いずれの自己養生材の場合も、置換率が大きいほど膨張ひずみは大きくなる傾向であった。この膨張挙動は、自己養生材の内部とペーストマトリックスの含水率あるいは液圧の平衡が、ペーストマトリックスの硬化および自己乾燥の進行に伴い移動し、自己養生材内部から水が供給されたことにより水和生成物間の距離が押し広げられたことなどによるものと推察される。また、右図を見た場合、材齢 91 日までの収縮ひずみは、SC1 および SC2 を用いて置換率を 50%もしくは 70%とした場合に小さくなる傾向であったが、その他の場合は自己養生材を用いない場合と同等であった。

(4) 自己養生材の置換率の決定

これまでの検討結果より自己養生材の置換率は、圧縮強度発現の観点から見ると 30%もしくは 50%が有効であり、収縮ひずみ低減の観点からは 50%もしくは 70%が有効であると考えられた。しかし、静弾性係数の観点からは置換率 30%以外は土木学会のコンクリート標準示方書の標準値を下回る結果であり、さらに、静弾性係数が小さいコンクリートは、プレストレス導入時の弾性変形が大きくなることや、クリープひずみが大きくなる恐れがあり、プレストレストコンクリート部材には適さない可能性があるため、STEP2 以降では自己養生材の置換率を 30%として検討を行った。

3.2 STEP2 (W/B の検討) の実験結果

結合材水比(以降 B/W)と圧縮強度の関係を図-9に示す。いずれの自己養生材を用いた場合でも、本実験範囲では B/W と圧縮強度の関係は相関性が高い線形を示した。このため、本実験の強度レベルにおいては、多孔質な自己養生材を用いることによる強度発現の頭打ち現象は認められなかった。また、自己養生材の種類で比較すると、いずれの材齢でも強度発現は SC1>SC2≧SC3 の関係にあった。

実験データをもとに表-6に示すコンクリートの仕様を満足する W/B を算出した場合、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは初期材齢での強度発現が鈍くなる傾向があるため、いずれの自己養生材を用いた場合も、PC 導入時所要強度で W/B が決定される結果となった。W/B の算出結果を列記すると、SC1 を使用した場合の W/B は 36.0%、SC2 および SC3 の場合は 34.0%となった。これより、STEP3 では、強度発現がもつ

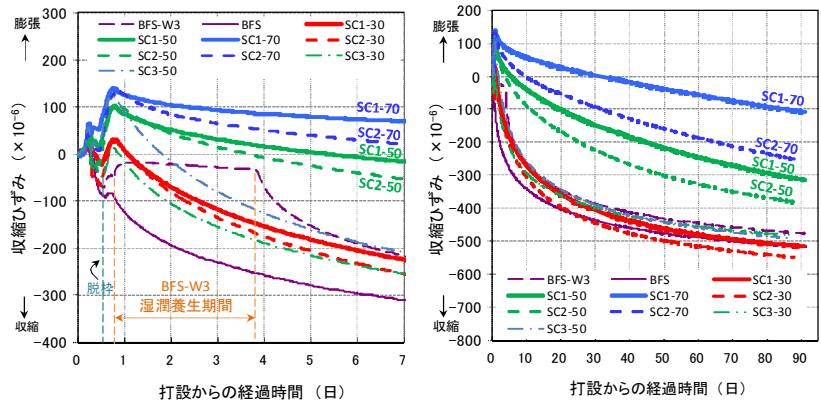


図-8 収縮ひずみ計測結果

表-6 コンクリートの仕様

1	設計基準強度	$\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$
2	プレストレス導入時強度	$\sigma_{14d} = 35 \text{ N/mm}^2$
3	変動係数	$V = 10.0\%$
4	目標スランプ	$18 \pm 2.5 \text{ cm}$
5	目標空気量	6.0%
6	設計基準強度の配合強度	$\sigma = 60 \text{ N/mm}^2$
7	PC 導入時強度の配合強度	$\sigma_{14d} = 42 \text{ N/mm}^2$

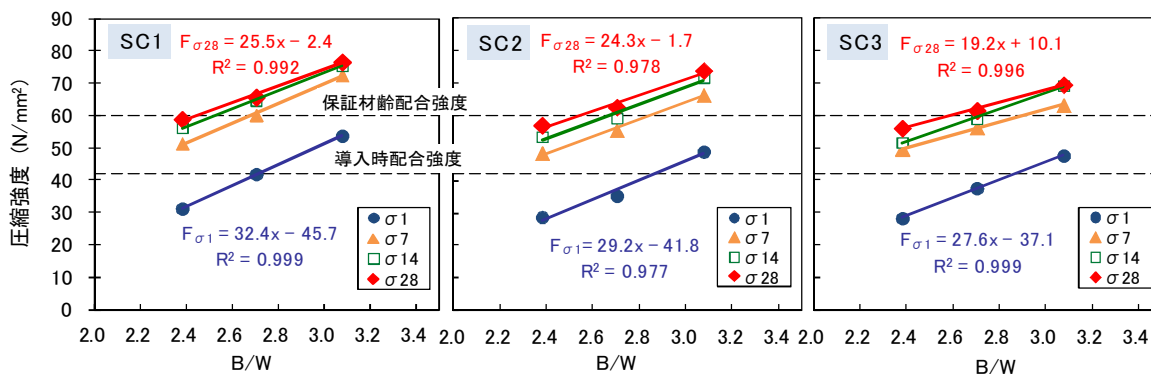


図-9 結合材水比 (B/W) と圧縮強度の関係

とも良好である SC1 を使用した自己養生型高炉スラグコンクリートを対象に耐久性の検討を行った。

3.3 STEP3 (耐久性の検討) の実験結果

(1) 耐凍害性

自己養生型高炉スラグコンクリートの凍結融解試験結果は、凍結融解 300 サイクルにおいても相対動弾性係数は 100 となり、優れた耐凍害性を有することが確認された。また、自己養生型高炉スラグコンクリート SC-BFS および、湿潤養生 3 日とした一般の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート BFS-W3 の凍害スケーリング試験結果を図-10 に示す。SC-BFS は、BFS-W3 に比べ若干スケーリング量が大きいが、型枠面、仕上げ面のいずれにおいても既往の研究¹⁾を参考に設定した指標値である 0.3kg/m²を下回り、優れた凍害スケーリング抵抗性を有していることが確認された。

(2) 塩分浸透性

塩分浸透性試験結果を図-11 に示す。高炉スラグ微粉末を用いた BFS-W3 および SC-BFS 配合は、早強セメント単味の HC に比べ塩分浸透抵抗性が高い結果となった。また、SC-BFS は BFS-W3 と比べても塩分浸透抵抗性が高い結果となり、自己養生型高炉スラグコンクリートは湿潤養生を行わない場合でも湿潤養生を 3 日行った場合と比べて同等以上の優れた塩分浸透抵抗性を有することが確認された。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに飽水させた多孔質な細骨材を自己養生材として一般細骨材に適量を置換使用した場合、軽量細骨材の内飽水によりコンクリート内部から湿潤養生が行われ、水中養生に代表される外部からの湿潤養生を行った場合と同等以上の強度発現および各種耐久性が得られることが確認された。このため、諸条件により高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに必要とされる脱枠後の湿潤養生が困難である場合などでも、自己養生型高炉スラグコンクリートとすることで、脱枠後の湿潤養生を行うことなく高品質なプレキャスト部材用コンクリートが得られることが明らかとなった。

参考文献

1) 月永洋一, 庄谷征美, 笠井芳夫: 凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎研究, コンクリート工学論文集, Vol. 8, No. 1, pp. 121-133, 1997.

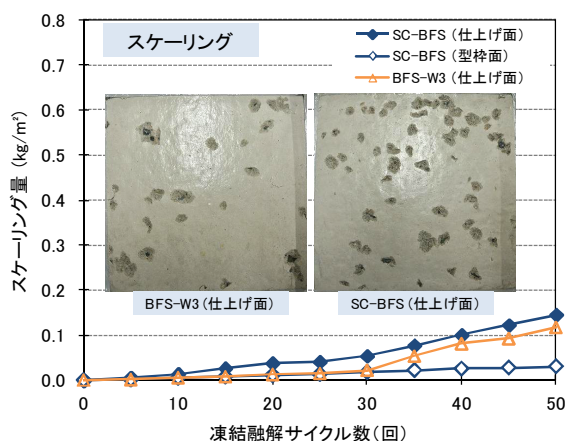


図-10 凍害スケーリング試験結果

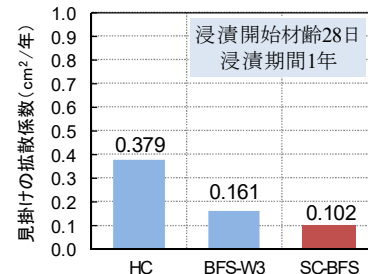


図-11 塩分浸透性試験結果