

論文 高炉スラグ細骨材が低度処理再生骨材モルタルの硬化性状に与える効果

宮崎 優治*1・橋本 親典*2・渡辺 健*3・石丸 啓輔*4

要旨 : L・M級の低度処理再生骨材を用いたコンクリートの硬化性状を向上させる可能性について、高炉スラグ細骨材を用いることの有効性をモルタル試験体により検討した。また、高炉スラグ細骨材の粒度および各粒径範囲による影響を検証するため、粒度の異なるもの2種類および粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材を用いた。その結果、粒度による乾燥収縮、凍結融解抵抗性への影響は認められなかったが、再生細骨材Lを用いたモルタルであっても顕著な改善効果を示した。また、粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材の粒径が小さくなるに従い、凍結融解抵抗性は向上することを確認した。

キーワード : 再生骨材, 高炉スラグ細骨材, 凍結融解抵抗性, 乾燥収縮ひずみ

1. はじめに

良質な天然骨材資源の枯渇が問題視されており、産業副産物をコンクリート用骨材として実用拡大することが急務となっている。その有力候補として、廃コンクリート塊から製造される再生骨材が挙げられるが、これをコンクリート中に使用した場合、強度および耐久性が劣るため、普及には至っていない。

本研究室では、LまたはM級の低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートの品質向上を目指した研究を実施している。平田ら¹⁾は、高強度域の配合条件で、細骨材に高炉スラグ細骨材(BFS5)を全量置換したところ、凍結融解抵抗性の向上が得られたことを報告している。辻本ら²⁾は、細骨材に粒度が異なる高炉スラグ細骨材(BFS5, BFS1.2)それぞれを一部置換し、普通強度域の配合条件で施工性能および凍結融解抵抗性について検討しており、低度処理再生粗骨材とBFS1.2を用いたコンクリートの間隙通過性は向上したことで、凍結融解抵抗性は低度処理再生粗骨材のみの配合よりも高く、十分な凍結融解抵抗性を有していたことを明らかにしている。著者ら³⁾は、再生骨材の使用で懸念されるASRの抑制対策を想定して、セメントに高炉セメントB種を使用し、辻本らと同一の配合条件で耐久性について検討した。辻本らの報告とはセメントが相違するため一概には比較できないが、高炉スラグ細骨材の粒度により耐久性が相違したことを報告し、なかでもBFS5を混合した再生骨材コンクリートにおいて長期強度および凍結融解抵抗性が向上したことを確認した。

一方、斎藤ら⁴⁾は、高炉スラグ細骨材の各粒径の特性について検討しており、高炉スラグ細骨材は粒径が小さ

いほど強度増進や乾燥収縮低減の効果が高いことを報告している。また、山内ら⁵⁾は、細粒度の高炉スラグ細骨材ほど凍結融解抵抗性を改善する効果が高いことを報告している。これらのことを再生骨材コンクリートに当てはめた検証は、著者らが知る限り見当たらない。

本論文は、低度処理再生骨材を用いたコンクリートの硬化性状を向上させる可能性について、高炉スラグ細骨材を用いることの有効性をモルタル試験体により検討したものである。そこでまず、粒度の異なる高炉スラグ細骨材が再生骨材モルタルの硬化性状に与える影響を検証した。次に、斎藤ら⁴⁾および山内ら⁵⁾の知見をもとに、高炉スラグ細骨材を4つの小さい粒径範囲に分級し、それらをそれぞれ混合した場合における硬化性状を検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に供した使用材料の物性値を表-1に示す。再生細骨材は、基礎PC杭(詳細は不明)をジョークラッシャーにより破碎した再生粗骨材の残分であり、5mmふるいを通過したものを全量使用した。なお、品質は、JISにおける密度および吸水率により区分すると再生細骨材Lに該当する。ペースト付着率は、5%濃度の塩酸に再生細骨材を浸漬した後、水洗いの際に0.075mmふるいを通過したものの割合を示したものである。高炉スラグ細骨材は、福山産のBFS5と倉敷産のBFS1.2の2種類を使用した。4つの小さい粒径範囲に分級する際は、細粒分の割合が多いBFS1.2を1.2-0.6mm, 0.6-0.3mm, 0.3-0.15mm, 0.15mm以下となるように調整した。また、高炉スラグ細

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学 技術支援部 常三島技術部門 技術専門職員 (正会員)

表-1 使用材料

種類	記号	産地・物理的性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³ , 比表面積3340cm ² /g)
細骨材	S	阿波産砂岩砕砂 (表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率1.77%, 実積率64.0%, F.M.2.63)
	RS	再生細骨材 (表乾密度2.35g/cm ³ , 吸水率8.13%, 実積率62.9%, F.M.3.48, 微粒分量4.6%, ペースト付着率33.2%)
	BFS5	福山産高炉スラグ細骨材 (表乾密度2.73g/cm ³ , 吸水率0.78%, 実積率56.5%, F.M.2.56)
	BFS1.2	倉敷産高炉スラグ細骨材 (表乾密度2.78g/cm ³ , 吸水率0.29%, 実積率58.8%, F.M.2.21)
微粉末	GG	高炉スラグ微粉末 (密度2.91g/cm ³ , 比表面積4150cm ² /g)
	BF	石灰石微粉末 (密度2.72g/cm ³ , 比表面積4960cm ² /g)
	LSP	二酸化ケイ素 (密度2.65g/cm ³ , 比表面積1000cm ² /g)
	SiO ₂	
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤
	AEA	高アルキルカルボン酸系AE剤
	De-f	ポリアルキレングリコール誘導体系消泡剤

骨材の0.15mm以下の粒径に近い高炉スラグ微粉末、比較として水硬性を示さない石灰石微粉末およびコンクリート用混和材としては使用されていない二酸化ケイ素も用いた。なお、これらの微粉末は、高炉スラグ細骨材の0.15mm以下の粒径範囲と比較するため、細骨材として置換した。粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材および微粉末の物理的性質を表-2に示す。再生細骨材および粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材は、絶乾状態でそれぞれ供し、練混ぜの際に吸水量を補正水として練混ぜ水に加水した⁶⁾。また、絶乾状態の細骨材に対して、吸水量に相当する水が骨材内部に満たされるよう20分程度練り置いた後に供試体を作成した。

2.2 配合

実験に供したモルタルの配合を表-3に示す。W/C=50%, S/C=3.0で一定とした。STDシリーズとして、細骨材にSおよびRSを全量用いたモルタル(配合名はNおよびR)を作製した。シリーズ1における高炉スラグ細骨材は、細骨材容積に対し50%置換した。シリーズ2では、粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材および微粉末を細骨材容積に対し30%置換した。目標空気量はAE剤を用いて3.0%とした。なお、高炉スラグ細骨材を混合した配合には、消泡剤を適宜添加した。配合名BFS1.2-50では、消泡剤による空気量の調整を試みたが、目標空気量を得られなかったためそのまま試験に供した。型枠への打ち込みが困難な場合には、高性能AE減水剤を用い、打ち込み可能であったフロー値150mm以上を目標に添加した。配合名について、高炉スラグ細骨材を混合した配合は、高炉スラグ細骨材の種類と容積置換率で表し、細骨材に再生細骨材を使用した場合は末尾にRを示した。

表-2 粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材および微粉末の物理的性質

種別	記号	粒径範囲 (mm)	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	比表面積 (cm ² /g)
BFS1.2および粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材	BFS1.2	未調整(1.2-0)	2.78	0.29	-
		1.2-0.6	2.77	0.44	
		0.6-0.3	2.81	0.07	
		0.3-0.15	2.85	0.02	
		0.15	2.88	0.00	
微粉末	GGBF	未調整	2.91	-	4150
	LSP		2.72		4960
	SiO ₂		2.65		1000

表-3 モルタルの配合

シリーズ	配合名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				Air (%)	(C×%)		
			W	C	S・RS	BFS・P		SP	AEA	De-F
STD	N	50	283	566	1382	-	3.8	-	0.006	-
	R				1264	-	2.9	-	0.008	-
1	BFS5-50	50	283	566	691	734	3.8	-	0.006	0.006
	BFS1.2-50				748	5.5	-	-		
	BFS5-50R				632	734	3.0	-	0.008	0.004
	BFS1.2-50R				748	3.4	-	-		
	BFS1.2-30				449	2.2	-	-		
	1.2-0.6				447	2.8	-	-		
	0.6-0.3				453	4.0	-	-		
	0.3-0.15				460	2.4	0.2	0.006	-	
	0.15				465	3.1	1.3	-	-	
	GGBF				470	3.5	1.0	-	-	
2	LSP	30	283	566	439	2.8	1.3	-	-	-
	SiO ₂				428	-	0.6	-	-	
	BFS1.2-30R				449	2.8	-	-	0.004	
	1.2-0.6R				447	2.5	-	-	-	
	0.6-0.3R				453	3.3	-	-	-	
	0.3-0.15R				460	3.5	-	0.008	-	
	0.15R				465	3.4	-	-	-	
	GGBFR				470	3.4	0.8	-	-	
	LSPR				439	2.4	0.8	-	-	
	SiO ₂ R				428	-	0.4	-	-	

また、粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材を混合した配合は、各粒径範囲を組み合わせた記号で示した。

2.3 試験項目及び試験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は所定の材齢まで標準養生を行った後、JSCE-G 505-2010に準じて実施した。供試体寸法はφ50×100mmの円柱供試体であり、試験材齢は7, 28, 91日とした。

(2) 長さ変化試験 (迅速法)

長さ変化試験は井上ら⁷⁾が提案している長さ変化試験(迅速法)により実施した。本試験は、供試体を低温炉乾燥により、乾燥収縮を促進させ、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法：コンタクトゲージ法」の1/4の日数で最終的な乾燥収縮量を把握できる方法である。

供試体は角柱供試体(40mm×40mm×160mm)とし、打設面を上にした時の両側面に対し、中央から左右に

50mm 離れた箇所にコンタクトチップを貼り付けた。測定にはホイットモア式のひずみ計を用い、一回の測定につき、片面2回、両面で計4回の測定を行った。測定値は最小表示量である0.001mmまで読み、各面における測定の前平均値を長さとした。

試験工程は、まず供試体を脱型した後、7日間標準養生を行ったものを試験材齢0日として測定した。その後、乾燥炉内温度40°Cで6日間乾燥させ、1日間20°C・60%RHの環境下に静置してから測定する工程を試験材齢56日まで繰り返した。また、長さ変化の測定とともに供試体質量も測定した。

(3) 液体窒素を用いた急速凍結融解試験

凍結融解抵抗性は、液体窒素を用いた急速凍結融解試験⁸⁾により評価した。供試体はφ100×200mmの円柱供試体とし、試験材齢7日まで標準養生した。

試験方法は、まず、供試体の端面を上下にして保冷容器中央に設置し密閉した。その後、供試体下部の近辺から液体窒素を30秒間噴射し、噴射後30秒間静置させた。凍結させた供試体は45~50°Cの温水に5分間浸漬した。供試体を取り出した後、供試体下部における端面からの高さが5mmの箇所にセンサを対面に設置して、透過法により超音波伝播時間を計測し、超音波伝搬速度を算出した。ここまでの工程を1サイクルとし、10サイクルまで実施した。なお、本試験の10サイクルは、JIS A 1148の300サイクルに相当する⁹⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルの流動性

STDとシリーズ1におけるモルタルの15打フロー値を表-4に示す。高炉スラグ細骨材を混合することにより基準とした両細骨材のフロー値は、NおよびRに対して約15~20mm程度大きくなる傾向が見られた。

3.2 圧縮強度

BFS1.2の置換率(シリーズ1のBFS1.2-50R, シリーズ2のBFS1.2-30R)と強度および強度比の関係を図-1に示す。置換率50%の各材齢における強度発現は、BFS置換率0%(シリーズSTD)と同等か低い値であった。砕砂を基準細骨材としたモルタルにBFS1.2を50%置換した配合(BFS1.2-50)は、目標とした空気量を大幅に超えたため、この傾向がより顕著となっている。一方、置換率30%における材齢91日強度はBFS置換率0%よりも高い値となった。これには、高炉スラグ細骨材が潜在水硬性を有し長期にわたって強度増進する材料である¹⁰⁾ことが考えられる。

シリーズ2の材齢28日における圧縮強度を図-2に示す。砕砂を基準細骨材としたGGBFは、潜在水硬性による顕著な強度増進を示したのに対し、BFS1.2を分級し

表-4 モルタルの15打フロー値

シリーズ	配合名	(C×%)			フロー (mm)
		SP	AE	De-F	
STD	N		0.006	-	168
	R		0.008		205
1	BFS5-50	-	0.006	0.006	182
	BFS1.2-50				185
	BFS5-50R		0.008	0.004	226
	BFS1.2-50R				223

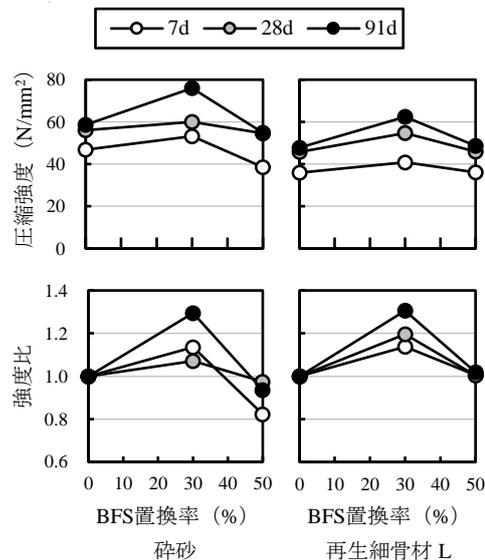


図-1 BFS1.2置換率と強度および強度比の関係

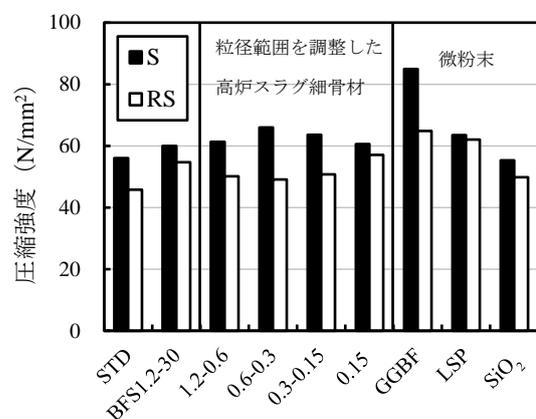


図-2 材齢28日における圧縮強度(シリーズ2)

た配合では、粒径が小さくなることによる潜在水硬性の強度増進効果は認められない。一方で、再生細骨材を基準細骨材とした0.15は微小ながら強度増進効果を示した。これは砕砂を基準とした配合の観点から推察すると、潜在水硬性による強度増進よりも、粉末の物理的作用によるフィラー効果が寄与していると考えられる。著者らの研究室ではこれまでに、水硬性を示さない鉱物質微粉末を再生骨材モルタルに混合した場合においても同様の傾向にあることを報告している¹¹⁾。ここで、0.15および微粉末を混合した配合における強度増加率の相関を図-1

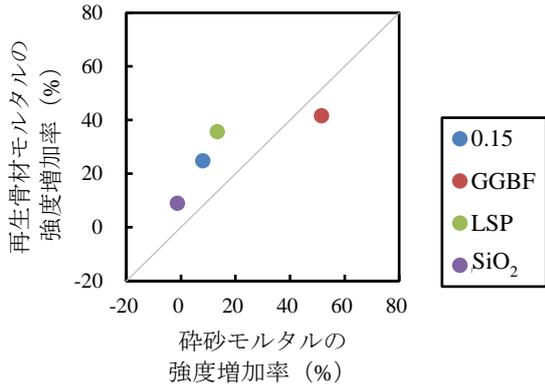


図-3 0.15 および微粉末を混合した配合における強度増加率の相関

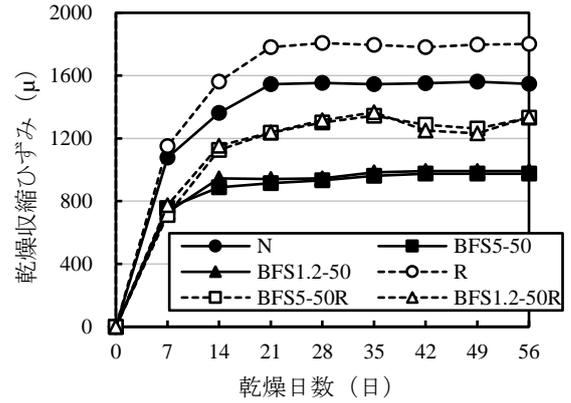


図-4 乾燥収縮ひずみ (シリーズ 1)

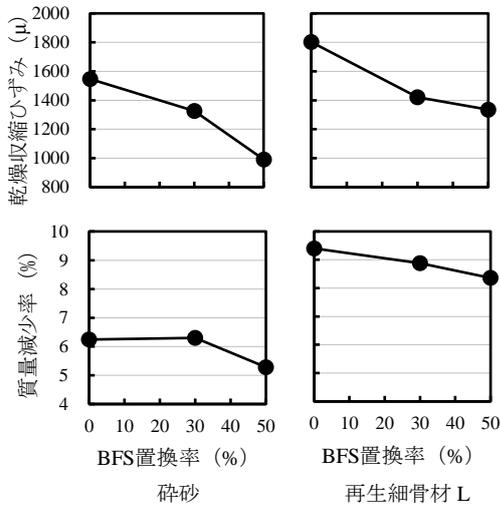


図-5 乾燥日数 56 日における BFS1.2 置換率と乾燥収縮ひずみ、質量減少率の関係

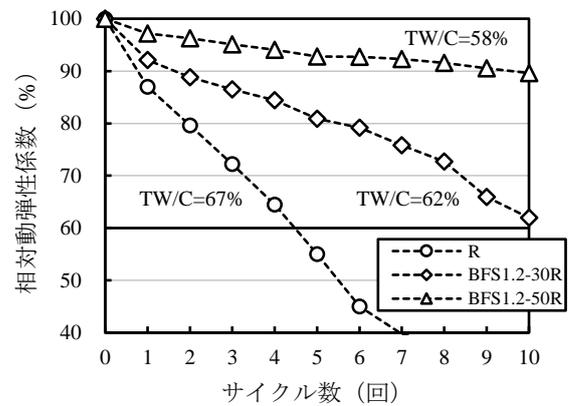


図-6 BFS 置換率による影響

3 に示す。0.15 の強度増加率は、GGBF ほどの改善効果を示さないが、再生骨材モルタルにおける強度増加率の方が大きくなっていることが分かる。水硬性を示さない LSP は 0.15 に比べやや大きく、LSP より比表面積の小さい SiO₂ は 0.15 に比べ小さくなった。

以上は、材齢 28 日時点での結果であるが、高炉スラグ細骨材を混合した場合、長期材齢において品質がより向上することが示唆されている¹⁰⁾。そのため今後は、材齢 91 日での検討も実施する予定である。

3.3 乾燥収縮

シリーズ 1 における乾燥収縮ひずみを図-4 に示す。BFS5 および BFS1.2 を 50% 混合することにより、乾燥日数 56 日における再生骨材モルタルの乾燥収縮ひずみは、R に対してそれぞれ約 470 μ、碎砂モルタルにおいては N に対して約 570 μ および約 560 μ も低減した。これには、高炉スラグ細骨材の吸水率が極めて低いことや高炉スラグ細骨材をコンクリート中に混合した場合、静弾性係数が高くなる¹⁰⁾ こと等が起因していると考えられる。

一方で、高炉スラグ細骨材の粒度あるいは産地による

乾燥収縮低減効果の違いは、あまり見られなかった。鵜飼らの報告¹²⁾によれば、骨材の粒径が小さいほど、セメントペーストの体積変化に対する拘束が小さくなることを指摘している。つまり、粗粒率が小さい細骨材を使用した場合、乾燥収縮ひずみの増大が懸念される。しかし、本研究の範囲内では、粒度の細かい BFS1.2 を使用しても乾燥収縮ひずみの増大は見られなかった。これには、高炉スラグの反応性が起因していると考えられるが、詳細について今後、粗粒率を調整した水硬性を示さない細骨材を用い比較検討したいと考えている。

次に、BFS1.2 の置換率 (シリーズ 1 の BFS1.2-50R, シリーズ 2 の BFS1.2-30R) と乾燥収縮ひずみ、質量減少率の関係を図-5 に示す。碎砂を基準としたモルタルの乾燥収縮ひずみは、置換率の増加に伴い顕著に低減している (乾燥収縮低減率、BFS1.2-30 : 約 14%、BFS1.2-50 : 約 36%)。これに対し、再生細骨材 L を基準としたモルタルでは、高炉スラグ細骨材の混合による乾燥収縮ひずみと質量減少率の低減傾向は伺えるものの、置換率 30% から乾燥収縮ひずみの低減は、やや頭打ちになる傾向を示した (乾燥収縮低減率 : BFS1.2-30R : 約 21%、BFS1.2-50R : 約 26%)。

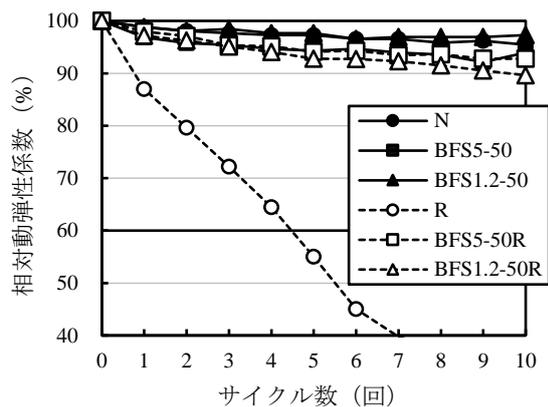


図-7 急速凍結融解抵抗性 (シリーズ 1)

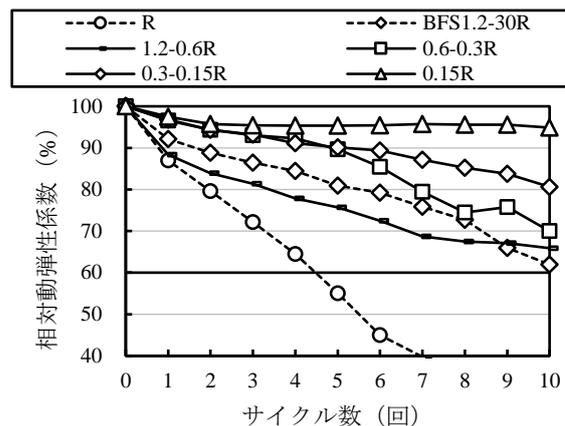


図-8 高炉スラグ細骨材の粒径範囲による影響

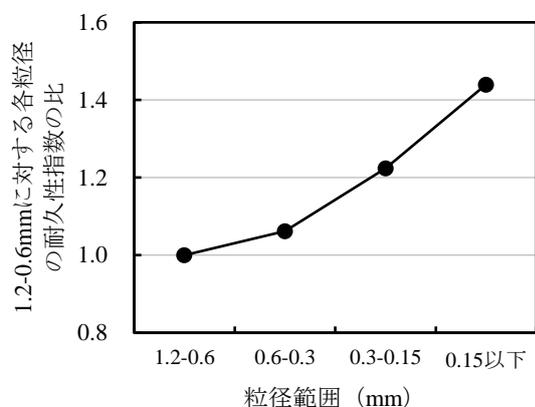


図-9 粒径範囲と 1.2-0.6mm に対する各粒径の耐久性指数の比の関係

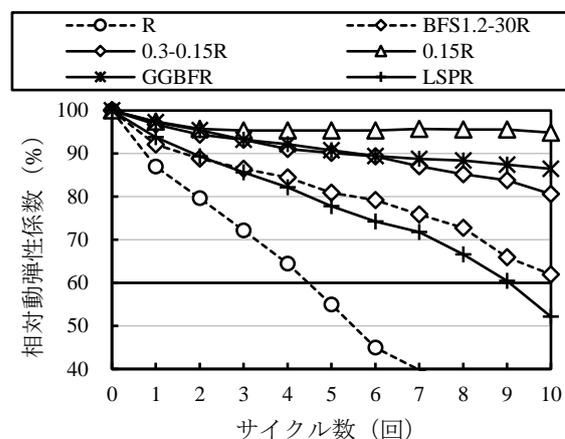


図-10 0.3mm 以下の粒径範囲の高炉スラグ細骨材と微粉末の比較

3.4 凍結融解抵抗性

図-6 は再生細骨材に占める BFS1.2 の置換率(シリーズ 1 の BFS1.2-50R, シリーズ 2 の BFS1.2-30R) が急速凍結融解抵抗性に及ぼす影響を示したものである。細骨材に全量再生細骨材を用いた配合 R は 5 サイクル目で相対動弾性係数が 60% を下回っているが, BFS1.2 の置換率が高くなるにしたがって, 凍結融解抵抗性は向上していることが分かる。この改善効果の一つに, 高炉スラグ細骨材の吸水率が極めて低いことがあげられる。そこで, 再生骨材コンクリートの簡易的な品質予測手法として麓ら¹³⁾によって提案されている総単位水量 (Total Water Content : TW) セメント比 TW/C により評価した。TW は以下の式 (1) によって求めた。

$$TW = W + s \times \gamma_{ds} \times w_s / 100 \quad (1)$$

ここに, TW : 総単位水量 (kg/m³)

W : 単位水量 (kg/m³)

s : 再生細骨材の体積 (l/m³)

γ_{ds} : 再生細骨材の絶乾密度 (g/cm³)

w_s : 再生細骨材の吸水率 (%)

図中に示す各配合の TW/C に着目すると, 置換率の増加

に伴い TW/C が小さくなることで, 凍結融解抵抗性は向上している。

また, 綾野らの研究¹⁴⁾から, 普通骨材コンクリートと同様に低品質再生骨材コンクリートも, 付着モルタルや付着ペーストに残存する Ca(OH)₂ が凍結過程で溶出すると考えられる。これに対し, 高炉スラグ細骨材を用いた場合, 総単位水量を減じられることに加えて, 骨材界面に Ca(OH)₂ が溶出しにくくなる¹⁴⁾ため, 凍結融解抵抗性が向上したと考えられる。

シリーズ 1 における急速凍結融解試験結果を図-7 に示す。粒度の異なる高炉スラグ細骨材を置換した各配合における差異は, 基準とした両細骨材で, 明確には現れなかった。そこで今後は, 置換率, 試験開始材齢や試験水等を考慮し, 改めて検証したいと考えている。

高炉スラグ細骨材の粒径範囲による影響を図-8 に示す。分級した高炉スラグ細骨材の粒径が小さくなるにしたがって, 10 サイクル終了後の相対動弾性係数は向上している。これは, 粒径が小さくなるにしたがって表面積が大きくなり, 前述した低温における高炉スラグ細骨材の表面の Ca(OH)₂ の溶出がより抑制されたためであると

考えられる。図-9 に示す 1.2-0.6mm に対する各粒径範囲の耐久性指数の比によると、0.3mm 以下の粒径範囲からこの傾向が強くなることが確認できる。図-10 には 0.3mm 以下の粒径範囲の高炉スラグ細骨材と微粉末を比較した結果を示す。0.3-0.15R および 0.15R における 10 サイクル終了後の相対動弾性係数は GGBFR の付近にあることから、本研究のような再生細骨材 L を用いたモルタルでは、0.3mm 以下の粒径から GGBF に近い改善効果を示すことが示唆される。LSP は水硬性を示さない微粉末であることから、GGBFR ほどの凍結融解抵抗性の向上は認められない。なお、本研究の範囲内では、粒度(図-7)と各粒径範囲での一律的な評価、比較ができなかった。

4. まとめ

本研究では、低度処理再生骨材を用いたコンクリートの硬化性状を向上させる可能性について、高炉スラグ細骨材を用いることの有効性をモルタル試験体により検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 再生細骨材 L に該当する再生細骨材を用いたモルタルであっても、高炉スラグ細骨材を置換することで乾燥収縮ひずみは低減し、凍結融解抵抗性は向上した。なお、高炉スラグ細骨材の粒度による乾燥収縮・凍結融解抵抗性への影響は認められなかった。
- 2) 粒径範囲を調整した高炉スラグ細骨材を混合した場合の凍結融解抵抗性は、粒径が小さくなるに従って向上した。

以上より、再生骨材コンクリートの構造体コンクリートへの適用を見据えた施工と耐久性の観点から、粗粒率をより小さく調整した高炉スラグ細骨材を用いて、さらに検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 平田大希, 橋本親典, 横井克則, 渡辺 健: 多量のフライアッシュおよび高炉スラグ細骨材の使用による低度処理再生粗骨材コンクリートの耐凍害性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No.1, pp.1785-1790, 2016
- 2) 辻本和敬, 山田悠二, 橋本親典, 近藤拓也: 高炉スラグ細骨材と低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートの施工性能および急速凍結融解抵抗性に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.595-602, 2018
- 3) 宮崎優治, 山野裕貴, 辻本和敬, 橋本親典: 高炉スラグ細骨材と低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートの耐久性に関する研究, 第 24 回土木学会四

国支部技術研究発表会講演概要集, V-18, 2018

- 4) 斎藤和秀, 吉田 亮, 吉澤千秋, 梅原秀哲: 高炉スラグ細骨材のコンクリートの硬化物性向上効果に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.4, pp.355-367, 2016
- 5) 山内 守, 中溝 翔, 藤井隆史, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのスケーリングに与える粒度分布の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.963-968, 2016
- 6) 柏木洗一, 麓 隆行, 岡田祐樹: 絶乾状態の再生骨材を用いたコンクリートの基礎性状に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-473, pp.945-946, 2010
- 7) 井上裕貴, 橋本親典, 渡辺 健, 石丸啓輔: 骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.473-478, 2011
- 8) 湯北記代彦, 橋本紳一郎, 加地 貴, 橋本親典: 液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No. 1, pp.887-892, 2006
- 9) 弓場上有沙, 橋本親典, 渡辺 健, 石丸啓輔: 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A 法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.941-946, 2011
- 10) 石 東昇, 枘田佳寛, 李 榮蘭: 高炉スラグ細骨材を使用した高強度コンクリートの力学的性質に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.64, pp.184-189, 2010
- 11) 永野哲平, 橋本親典, 青井洋視, 渡辺 健: 鉱物質微粉末を細骨材の一部に混合した再生骨材モルタルの強度発現メカニズムに関する一考察, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.664-671, 2016
- 12) 鶴飼貴史, 齊藤和秀, 吉田 亮, 梅原秀哲: 骨材の寸法および種類がセメント硬化体の乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-154, pp.307-308, 2010
- 13) 麓 隆行, 山田 優: 再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.61-73, 2004
- 14) 綾野克紀, 藤井隆史: 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関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.417-427, 2014