

論文 結合材の種類が高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの性能に与える影響

田中 湧磨^{*1}・藤井 隆史^{*2}・綾野 克紀^{*3}

要旨：高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用いたコンクリートは、AE 剤を用いることなく高い凍結融解抵抗性を得ることが可能である。ただし、早強ポルトランドセメントを用いた場合には、高炉セメントや普通ポルトランドセメントを用いた場合よりもより長い水中養生を行わなければ、その効果が得られない。しかし、早強ポルトランドセメントを用いた場合にも、結合材の一部を高炉スラグ微粉末を用いることで、凍結融解抵抗性が得られやすくなる。高炉スラグ微粉末を用いると、圧縮強度が小さくなるが、硬化促進剤を用いることで水結合材比を下げることなく、若材齢での強度発現性を高められる。

キーワード：高炉スラグ細骨材、早強ポルトランドセメント、凍結融解抵抗性、圧縮強度、硬化促進剤

1. はじめに

高炉スラグ細骨材は、製鉄の際に高炉で副産される高炉水砕スラグを磨砕加工して粒度分布を調整したものである。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、塩化物イオン浸透性が抑制されること¹⁾、耐硫酸性が向上すること²⁾、AE 剤なしで凍結融解抵抗性が得られること³⁾等、コンクリート構造物の耐久性を向上させることが可能であることが示されている。

プレキャストコンクリート製品工場では、生産効率を高めるために、蒸気養生を行い、セメントには普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメントを用いられる。とくに、脱型直後にプレストレスを導入するプレストレスコンクリート製品を製造する工場では、若材齢での強度発現性が必要となることから、早強ポルトランドセメントを用いる場合が多い。

本研究では、高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用いたコンクリートの圧縮強度および凍結融解抵抗性に結合材が与える影響を検討した。高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用いたコンクリートで高い凍結融解抵抗性を得るためには、早強ポルトランドセメントを用いると長い水中養生が必要となること、早強ポルトランドセメントを用いた場合でも、一部を高炉スラグ微粉末に置換することで凍結融解抵抗性が得やすくなることを示す。また、高炉スラグ微粉末を用いた場合に若材齢での強度発現性が低下するが、カルシウムシリケート系硬化促進剤⁴⁾を用いることで、水結合材比を下げたり、養生温度を上げたりすることなく強度発現性を高めることが可能であること、カルシウムシリケート系硬化促進剤による凍結融解抵抗性、スケーリング、乾燥収縮ひずみおよび中性化への影響は小さいことを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験で用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。結合材には、早強ポルトランドセメント(密度:3.13 g/cm³, ブレーン値:4,600 cm²/g)、普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/cm³, ブレーン値:3,350 cm²/g)、高炉セメント B 種(密度:3.04 g/cm³, ブレーン値:3,950 cm²/g) および高炉スラグ微粉末 4000(密度:2.89g/cm³, ブレーン値:4,250 cm²/g)を用いた。細骨材には、高炉スラグ細骨材(表乾密度:2.76 g/cm³, 吸水率:0.53%, 粗粒率 2.19)を、粗骨材には、硬質砂岩砕石(最大寸法:20mm, 表乾密度:2.72 g/cm³, 吸水率:0.52%, 粗粒率 6.82)を用いた。化学混和剤には、増粘剤一液型高性能減水剤およびカルシウムシリケート系硬化促進剤(以下、硬化促進剤)を用い、AE 剤は用いていない。コンクリートの水結合材比は 35%、単位水量は 155kg/m³、単位粗骨材量は 1,078kg/m³ で一定とした。高炉スラグ微粉末は、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートに、質量比で結合材の 20%および 40%を置換して用いた。硬化促進剤は、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに、質量比で結合材の 0.0%および 1.5%を練混ぜ水の一部分として添加した。練混ぜ直後の空気量の実測値を表-1 中に示す。

2.2 養生方法

コンクリートは、打込み後、18 時間型枠内で養生を行った。蒸気養生は、打込み後から 4 時間まで 20±2℃で静置した後、15℃/時間の速さで 40℃まで昇温を行った。最高温度の 40℃を 5 時間保持した後、自然冷却によりコンクリートの温度を下げた。標準養生の供試体は、打込み後から脱型まで、20±2℃の室内で養生を行った。脱型後は、20±2℃の水中で試験開始まで養生を行なった。

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科社会基盤環境学専攻 (学生会員)

*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*3 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

セメント の種類	W/B (%)	GGBS/B (%)	s/a (%)	空気量 (設計値) (%)	単位量 (kg/m³)				混和剤 (B×%)		空気量 (実測値) (%)	
					W	B		BFS*5	G	高性能 減水剤		硬化 促進剤
						C	GGBS*4					
BB*1	35	0	41.6	2.0	155	443	0	781	1,078	1.0	0.0	2.2
OPC*2			42.1					795				4.0
HPC*3			42.0					792				3.0
		20	41.8			354	89	786				2.2
		40	41.6			266	177	779				2.8
		20	41.8			354	89	786			1.5	2.8
		40	41.6			266	177	779				2.7

*1 BB：高炉セメント B 種，*2 OPC：普通ポルトランドセメント，*3 HPC：早強ポルトランドセメント，

*4 GGBS：高炉スラグ微粉末 4000，*5 BFS：高炉スラグ細骨材

2.3 試験方法

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験は、φ100×200mm の円柱供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って行った。

(2) 凍結融解試験

凍結融解試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用いて、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に規定される水中凍結融解方法 (A 法) に従って行った。

(3) スケーリング試験

スケーリング試験は、JSCE-K 572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法 (案)」のスケーリングに対する抵抗性試験に準拠して行った。供試体は、蒸気養生を行った 100×100×400mm の角柱供試体から切り出した 100×100×100mm の立方体供試体を用いた。供試体は、材齢 14 日まで水中養生を行い、成形後、1 日室内で乾燥させた後、型枠に接していた 2 側面を残し、他の 4 面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂が硬化した後、再び水中で材齢 28 日まで養生した。材齢 28 日より、供試体を試験容器内で、高さ 10mm のスペーサーの上に試験面を下にして置き、試験面から 5～10mm が浸漬するように、濃度が 3% の塩化ナトリウム水溶液を入れた。+20℃ から -18℃ までの凍結工程を 3 時間、-18℃ の温度保持を 13 時間、-18℃ から +20℃ までの融解工程を 3 時間、+20℃ の温度保持を 5 時間とする計 24 時間を 1 サイクルとした。14、28、42、および 56 サイクルで、試験面より剥離したスケーリング片を採取し、乾燥後、質量を測定した。

(4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみの測定には、標準養生を行った 100×100×400mm の角柱供試体を用いた。JIS A 1129-2 附属書 A (参考) に示される「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」に従って試験を行った。乾燥開始時材齢は 7 日で、温度が 20±2℃、相対湿度が

60±5% の条件で実施した。長さ変化の測定には、ホイットモア式ひずみ計 (検長: 250mm, 最小目盛り: 1/1,000mm) を用いた。

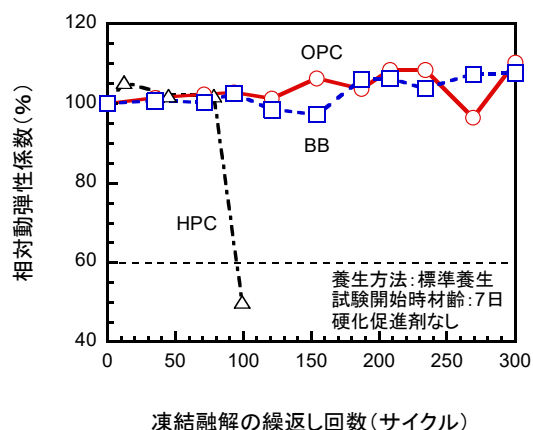
(5) 中性化試験

中性化試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用いて、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して行った。供試体は、脱型後、材齢 14 日まで水中で養生し、1 日室内で乾燥させた後、100×400mm の型枠に接していた側面の 2 面を試験面とし、他の 4 面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂が硬化後、再び 20℃ の水中で養生し、材齢 28 日より、温度 20±1℃、相対湿度 60±5%、炭酸ガス濃度 5.0±0.2% の条件で、試験を開始した。

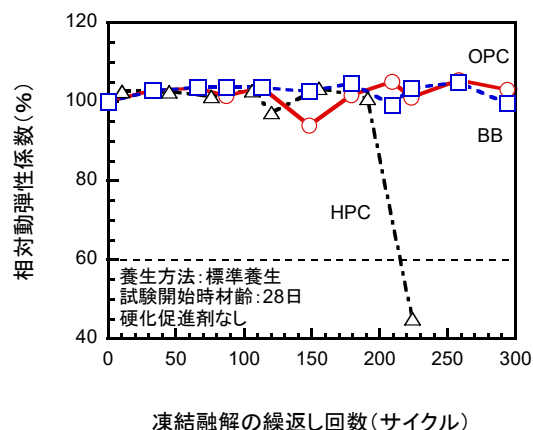
3. 実験結果および考察

3.1 凍結融解抵抗性に与えるセメントの種類の影響

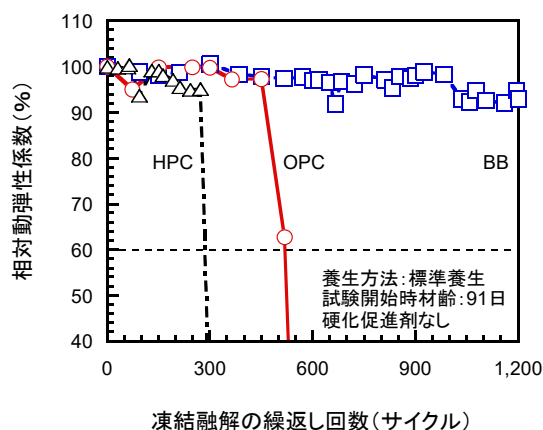
図-1 は、セメントの種類が、高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を調べた結果である。これらの結果は、標準養生を行った供試体を用い、材齢 7 日より凍結融解試験を開始した。いずれのコンクリートにも AE 剤は用いていない。図中の BB、OPC および HPC は、それぞれ、高炉セメント B 種、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた結果を示している。高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントを用いたものは、凍結融解作用を 300 サイクルまで与えても相対動弾性係数は低下していない。これに対し、早強ポルトランドセメントを用いたものは、100 サイクル程度で相対動弾性係数が低下している。図-2 は、材齢 28 日まで水中養生を行った後に凍結融解試験を開始した結果である。早強ポルトランドセメントを用いたものは、凍結融解作用を 200 サイクル与えた頃に相対動弾性係数が低下している。さらに、図-3 は、材齢 91 日まで水中養生を行っ



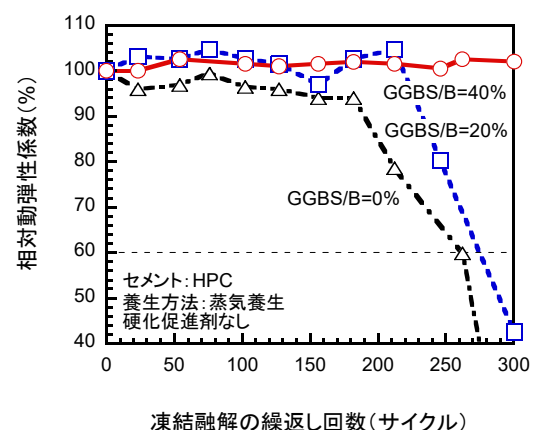
図一 セメントの種類が凍結融解抵抗性に与える影響
(試験開始時材齢 7 日の場合)



図二 セメントの種類が凍結融解抵抗性に与える影響
(試験開始時材齢 28 日の場合)



図三 セメントの種類が凍結融解抵抗性に与える影響
(試験開始時材齢 91 日の場合)



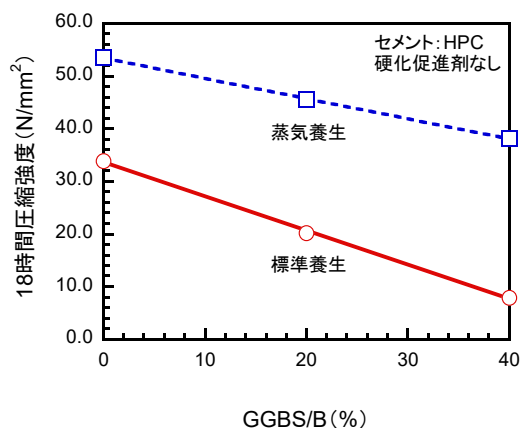
図四 高炉スラグ微粉末が凍結融解抵抗性に与える影響

た後に凍結融解試験を開始した結果である。高炉セメント B 種は 1,200 サイクルまで凍結融解作用を与えても相対動弾性係数が低下しなかったのに対し、早強ポルトランドセメントを用いたものは、凍結融解作用を 300 サイクル与えた時点で相対動弾性係数が 20%にまで低下した。高炉スラグ細骨材を細骨材に用いれば、高炉スラグ微粉末と同様に潜在水硬性により水和反応が生じることで、セメントペーストと細骨材との界面の結合が強固なものになる³⁾。高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用いたコンクリートは、骨材周辺の界面が改善されることで、AE 剤を用いなくても高い凍結融解抵抗性が得られる。一方で、福留らは、保水率の低下によってセメント鉱物の水和反応速度が直線的に低下し、保水率がある値以下になると水和反応が停止するという仮定で計算した水和停止保水率は、普通ポルトランドセメントが 15%であったのに対し、早強ポルトランドセメントが 0%であったことを報告している⁵⁾。早強ポルトランドセメントは、セメント鉱物の水和反応によりセメントペースト中の水が多量に消費され、高炉スラグ細骨材の水和反応に用いられ

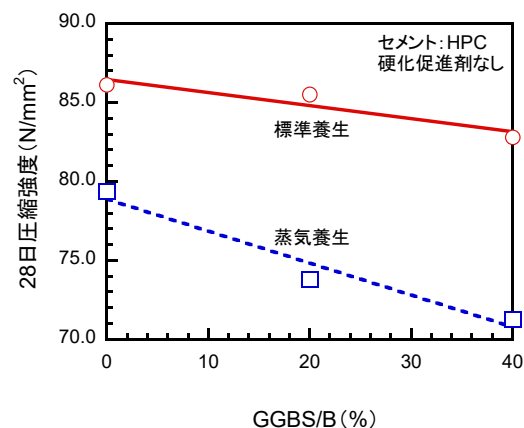
る水が少なくなることが考えられる。早強ポルトランドセメントを用いた場合には、セメントの水和反応でセメントペースト中の水が消費され、高炉スラグ細骨材の水和反応に用いられるペースト内部の水が少なくなり、外部から供給される必要があるため、長い水中養生期間が必要となるものと推察される。これに対し、高炉セメント B 種や普通ポルトランドセメントを用いた場合には、セメントの水和反応により消費される水が少なく、また反応が穏やかであるため、高炉スラグ細骨材の反応に必要な水がセメントペースト中に残り、1 週間程度の水中養生で効果が得られると考えられる。

3.2 高炉スラグ微粉末の影響

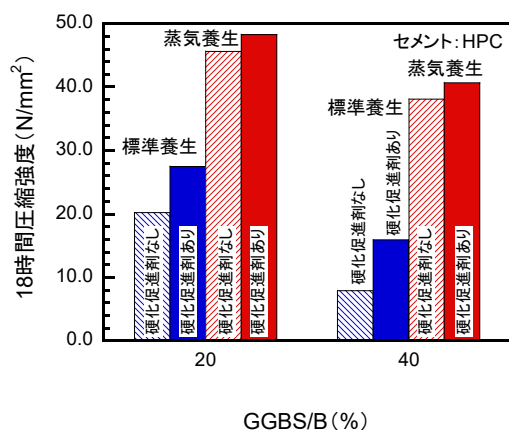
図-4 は、セメントに早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に与える高炉スラグ微粉末の影響について調べた結果である。図中の△、□および○は、それぞれ、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 0%、20%および 40%用いた結果である。これらのコンクリートにも、AE 剤は用いておらず、また、蒸気養生を行っている。結合材に早強ポルトランドセメントの



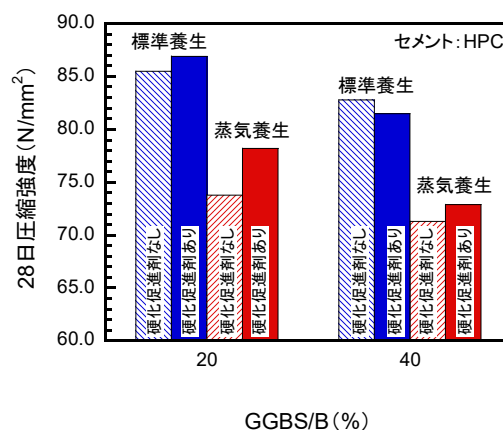
図－5 高炉スラグ微粉末が材齢 18 時間における圧縮強度に与える影響



図－6 高炉スラグ微粉末が材齢 28 日における圧縮強度に与える影響



図－7 材齢 18 時間における圧縮強度に硬化促進剤が与える効果



図－8 材齢 28 日における圧縮強度に硬化促進剤が与える効果

みを用いた場合には、凍結融解作用を 260 サイクル与えた時点で相対動弾性係数が 60%を下回っている。これに対し、結合材の一部を高炉スラグ微粉末に置換することで相対動弾性係数の低下が遅くなっていることが分かる。高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 40%用いた場合には、AE 剤を用いなくても 300 サイクルまで相対動弾性係数が低下することなく、高い凍結融解抵抗性を持つことが分かる。既往の研究³⁾において、砕砂を用いたコンクリートに高炉スラグ微粉末を用いることで、凍結融解抵抗性が向上することが示されている。また、高炉スラグ微粉末の水和反応は、早強ポルトランドセメントに比べて穏やかなため、高炉スラグ細骨材の反応に必要な水も供給されやすくなると考えられる。以上の効果から、早強ポルトランドセメントを用いる場合にも、セメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換することで、凍結融解抵抗性が得られやすくなる。

図－5 および図－6 は、それぞれ、材齢 18 時間および 28 日における圧縮強度に与える高炉スラグ微粉末の影響を示したものである。いずれの養生方法および材齢に

おいても、結合材の一部を高炉スラグ微粉末に置換することで、圧縮強度が低下することが分かる。プレキャストコンクリート製品工場では、蒸気養生を用い、打ち込みの翌日に脱型することが一般的である。とくにプレキャスト PC 製品では、脱型とプレストレスの導入を行うため、材齢 18 時間で、プレストレス導入に必要な 35N/mm²を得る必要がある。高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 40%用いた場合には、材齢 18 時間で必要な圧縮強度が得られない恐れがある。

3.3 硬化促進剤の効果

図－7 および図－8 は、それぞれ、高炉スラグ微粉末を結合材の一部に用いたコンクリートの材齢 18 時間および 28 日における圧縮強度に与える硬化促進剤の効果を示したものである。いずれの配合および養生方法においても、硬化促進剤を用いることで材齢 18 時間における圧縮強度が大きくなっていることが分かる。若材齢での強度発現性を得るためには、水結合材比を小さくする、または、蒸気養生での最高温度を上げ、最高温度保持時間を長くする等の方法が考えられるが、硬化促進剤を用

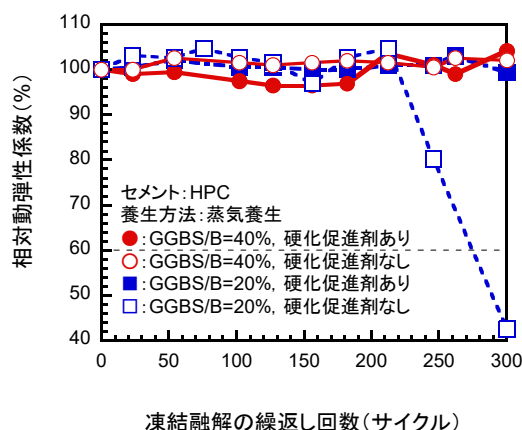


図-9 硬化促進剤を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性

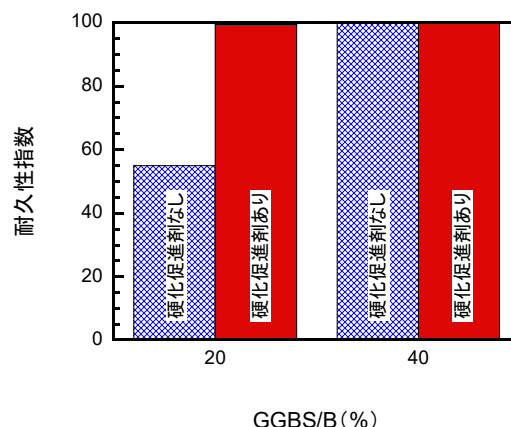


図-10 耐久性指数の比較

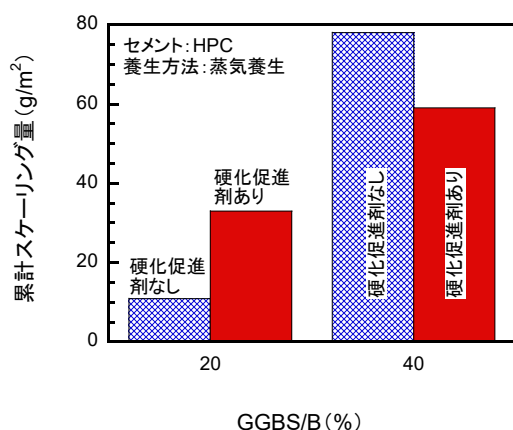


図-11 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのスケールリング試験結果

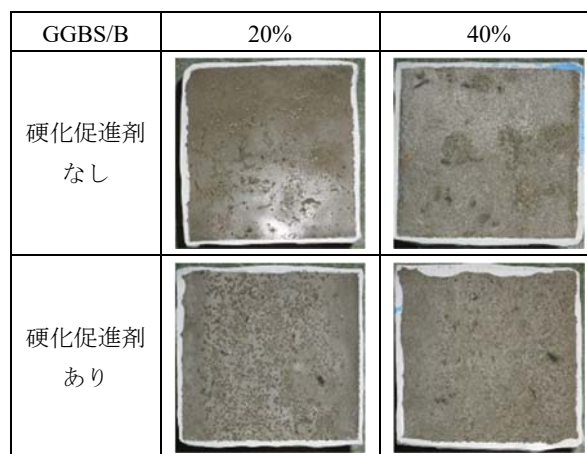


図-12 56 サイクル後のスケールリングの状態

いれば、水結合材比を小さくすることなく、同じ養生方法で若材齢での強度を高めることが可能である。また、材齢 28 日においても、硬化促進剤を用いた場合にも、硬化促進剤を用いていないものと比べて同等以上の圧縮強度が得られていることが分かる。

図-9 は、高炉スラグ微粉末を結合材の一部に用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に硬化促進剤が与える影響を調べた結果である。硬化促進剤を用いたものは、300 サイクルまで相対動弾性係数の低下していないことが分かる。図-10 は、図-9 に示した凍結融解試験結果を、耐久性指数で示したものである。硬化促進剤を用いていない場合には、高炉スラグ微粉末を結合材の 20% 用いたものでは十分な凍結融解抵抗性を得られなかったが、硬化促進剤を用いることで耐久性指数が 100 となっている。本研究で用いた硬化促進剤は、C-S-H の種結晶を添加することで、セメント鉱物の水和反応を促進させるものである⁴⁾。硬化促進剤を用いることで、セメントの水和反応に加えて、高炉スラグ細骨材の水和反応も促進され、凍結融解抵抗性が向上したことが考えられる。

図-11 は、高炉スラグ微粉末を結合材の一部に用いたコンクリートに凍結融解作用を 56 サイクル与えた後の累計スケールリング量を示したものである。また、図-12 に、56 サイクルの凍結融解作用を与えた後のスケールリング試験に用いた供試体の表面を示す。図-11 より、高炉スラグ微粉末の置換量が増加すると、スケールリング量が多くなる傾向にある。しかし、図-12 に示すように、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 40% 用いたものであっても、表面のペーストが削れる程度の劣化である。なお、硬化促進剤を用いた場合でも、スケールリング量は多くなく、影響は小さいと言える。

図-13 および図-14 は、それぞれ、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 20% および 40% 用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに、硬化促進剤が与える影響を示したものである。これらのコンクリートは、標準養生を材齢 7 日まで行った後、測定を開始した結果である。いずれのコンクリートの乾燥収縮ひずみも小さい。硬化促進剤の添加したものの乾燥収縮ひずみは、添加していないものとほぼ同じか若干小さく、硬化促進剤が乾燥収縮ひ

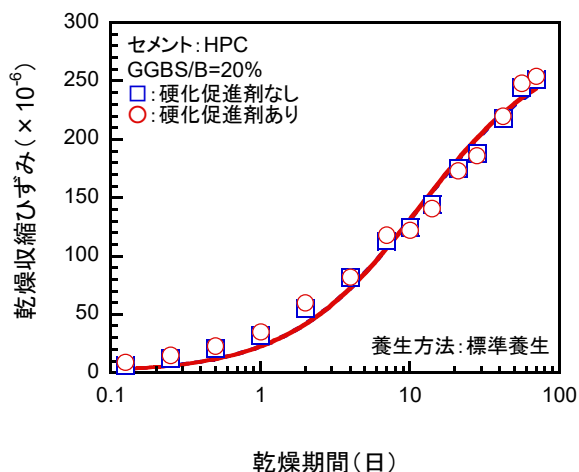


図-13 硬化促進剤が乾燥収縮ひずみに与える影響
(GGBS/B=20%の場合)

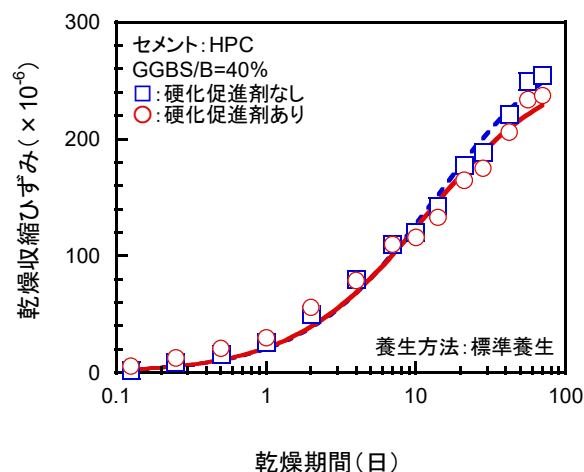


図-14 硬化促進剤が乾燥収縮ひずみに与える影響
(GGBS/B=40%の場合)

ずみに与える影響は小さいと言える。

図-15 は、高炉スラグ微粉末を結合材の一部に用いたコンクリートの促進中性化を 56 日間行った後の中性化の状態を示したものである。促進中性化 56 日の時点では、いずれのコンクリートにも、中性化は生じていない。

4. まとめ

本研究では、高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用いたコンクリートの性能に、結合材の種類が与える影響について検討を行った。以下に実験で得られた知見を示し、本論文のまとめとする。

- (1) 高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用いれば、AE 剤を用いなくても高い凍結融解抵抗性が得られる。ただし、その効果の発現はセメントの影響を受け、早強ポルトランドセメントを用いた場合には、長い水中養生が必要となる。
- (2) 早強ポルトランドセメントを用いた場合でも、高炉スラグ微粉末を併用すれば、凍結融解抵抗性が得られやすくなるが、若材齢での強度は小さくなる。
- (3) 硬化促進剤を用いれば、水結合材比を小さくしたり、蒸気養生の温度を上げたりすることなく強度発現性を高めることが可能である。
- (4) 硬化促進剤が凍結融解抵抗性、スケーリングおよび乾燥収縮ひずみに与える影響は小さい。

参考文献

- 1) 藤原斉, 堀水紀, 細谷多慶, 藤木昭宏: 高炉スラグがコンクリートの塩分浸透性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.757-762, 2017.6
- 2) Paweena JARIYATHITIPONG, 細谷多慶, 藤井隆史, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材によるコンクリートの

GGBS/B	20%	40%
硬化促進剤 なし	試験面 	試験面
	試験面 	試験面
硬化促進剤 あり	試験面 	試験面
	試験面 	試験面

図-15 促進中性化 56 日後の中性化の状況

耐硫酸性改善に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp.337-347, 2013.10

- 3) 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, 2014.12
- 4) 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
- 5) 福留和人, 古川幸則, 庄野昭: ポルトランドセメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生条件の影響評価手法, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.1, pp.26-37, 2012.2