

## 論文 コンクリートの耐久性に及ぼす高炉スラグ細骨材の影響

藤井 隆史<sup>\*1</sup>, パウイナ ジャリヤティティポン<sup>\*2</sup>, 細谷 多慶<sup>\*1</sup>, 綾野 克紀<sup>\*3</sup>

## Effect of Blast Furnace Slag Sand to Durability of Concrete

Takashi FUJII<sup>\*1</sup>, Paweena JARIYATHITIPONG<sup>\*2</sup>, Kazuyoshi HOSOTANI<sup>\*3</sup> and Toshiki AYANO<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、高炉スラグを用いたコンクリートの中性化、耐硫酸塩性および凍結融解抵抗性の検討を行ったものである。高炉スラグを細骨材に用いることで、細骨材周辺に集積する水酸化カルシウムがなくなり、骨材表面とペーストとの界面が強固なものとなるため、コンクリートの中性化および耐硫酸塩性が向上する。また、結合材の一部を高炉スラグ微粉末に置き換えるか、または、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、AE剤を用いることなく、また、蒸気養生を行っても、十分な凍結融解抵抗性が得られる。

**キーワード**：高炉スラグ細骨材, 中性化, 耐硫酸塩性, 凍結融解抵抗性

## 1. はじめに

中性化や塩害による鉄筋腐食、硫酸イオンによる化学的侵食、凍結融解作用等の様々な要因によるコンクリート構造物の劣化が顕在化しており、社会問題になってきている<sup>1)</sup>。補修、補強による修復が困難な劣化の著しい構造物においては、部分的あるいは全体の更新が行われる。限られた予算で社会基盤を維持していくために、新規に建設または更新される構造物には、高耐久で長寿命な材料を用いることで、今後の維持管理費用を抑える努力がなされている。

高炉スラグは、銑鉄を製造する高炉において生成される副産物である。溶融状態のスラグを急冷処理された高炉水砕スラグは、コンクリートの細骨材として用いられ、また、高炉水砕スラグを微粉化した高炉スラグ微粉末は、高炉セメントの原料やコンクリート用混和材として、広く用いられている<sup>2)</sup>。高炉スラグ細骨材には、アルカリシリカ反応の恐れがなく、コンクリー

トの耐久性に悪影響を及ぼす有機不純物等を含んでいないといった特徴がある。また、高炉スラグ細骨材を骨材の一部に用いたコンクリートでは、乾燥収縮ひずみや自己収縮ひずみが小さくなる、中性化の進行が遅くなるといった報告もある<sup>3)</sup>。本研究では、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの中性化、耐硫酸塩性および凍結融解抵抗性について検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料および配合

表-1 に中性化試験および耐硫酸塩性試験に用いたコンクリートの配合を示す。結合材には、普通ポルトランドセメント（密度： $3.15\text{g/cm}^3$ ，比表面積： $3,350\text{cm}^2/\text{g}$ ）および高炉スラグ微粉末（密度： $2.89\text{g/cm}^3$ ，比表面積： $4,150\text{cm}^2/\text{g}$ ）を用いた。細骨材には、川砂（密度： $2.60\text{g/cm}^3$ ，吸水率： $1.98\%$ ）および高炉スラグ細骨材（密度： $2.73\text{g/cm}^3$ ，吸水率： $0.40\%$ ）を用いた。粗骨材に

\*1 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

\*2 ランデス株式会社本部技術センター研究所 研究員

\*3 ランデス株式会社本部技術センター 副センター長

\*4 岡山大学大学院環境生命科学研究科環境科学専攻 教授

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

G <sub>max</sub> (mm)	W/B (%)	C/B (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )					HRWRA (B×%)		
					W	B		S			G	
						OPC	GGBF	RS	BFS			
20	25.0	40.0	2.0	45.0	175	280	420	668	0	860	1.0	
								0	701			
	60.0	1,066				0	827	0				
									0	869		
	25.0	100.0				878	0	684	0	700	0	718
	0	875										

GGBF: Ground granulated blast furnace slag, RS: River sand, BFS: Blast furnace slag sand, HRWRA: High-range water reducing admixture

表-2 凍結融解試験に用いたコンクリートの配合および空気量, 圧縮強度の測定値

G <sub>max</sub> (mm)	W/B (%)	GGBF/B (%)	BFS/S (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )					HRW RA (B×%)	AE (B×%)	Measu red air (%)	Strength (N/mm <sup>2</sup> )		
						W	B		S					G		
							OPC	GGBF	CSS	BFS					7days	28days
20	40.0	0.0	0.0	4.5	50.0	175	438	0	849	0	878	0.5	0.004	3.6	39.5	52.4
							438	0	883	0	913	0.5	0.000	2.2	50.6	59.6
							350	88	879	0	909			2.4	48.6	64.0
							263	175	876	0	906	0.4	2.5	42.1	48.5	
							175	263	873	0	902	0.3	2.2	37.3	46.7	
							263	175	590	290	906	0.4	2.6	41.3	63.3	
							263	175	292	593	906		3.3	44.1	69.1	
							263	175	0	889	906	4.2	45.8	55.0		

GGBF: Ground granulated blast furnace slag, CS: Crushed stone sand, BFS: Blast furnace slag sand, HRWRA: High-range water reducing admixture, AE: Air entraining agent

は、硬質砂岩砕石（最大寸法: 20mm, 密度: 2.74g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.36%）を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。単位水量は 175kg/m<sup>3</sup> で一定とし、水セメント比は、25%および 60%とした。

表-2 に凍結融解試験に用いたコンクリートの配合を示す。結合材には、普通ポルトランドセメント（密度: 3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3,350cm<sup>2</sup>/g）および高炉スラグ微粉末（密度: 2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 4,150cm<sup>2</sup>/g）を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂（表乾密度: 2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.70%）および高炉スラグ細骨材（表乾密度: 2.69g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.61%）を用いた。粗骨材には、硬質砂岩砕石（最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.74g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.49%）を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤および AE 剤を用いた。コンクリートの水結合材比は 40%とし、単位水量は 175kg/m<sup>3</sup> で、細骨材率は 50%と一定の条件で配合を決定した。練混ぜ直後の空気量および標準水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度を表-2 中に示す。

## 2.2 試験方法

中性化試験には、φ100×50mm の円柱供試体

を用いた。供試体の片方の円断面からのみ中性化させるため、円柱供試体の側面および一方の円断面にはエポキシ樹脂を塗布した。供試体は材齢 28 日まで水中で養生を行い、温度 20±1℃, 湿度 60±5%, 炭酸ガス濃度 5.0±0.2% の中性化装置内に設置して、試験を開始した。所定の期間中性化させたのち、円柱供試体を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して非呈色域の長さを測定して中性化深さとした。

耐硫酸塩性試験には、φ100×200mm の円柱供試体を用いた。供試体は、打込み後、蒸気養生を行った。蒸気養生は、2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に示される方法<sup>4)</sup>に従い、打込み後 2 時間室温で静置した後、1 時間あたりに 20℃の速さで 65℃まで昇温させ、その後 4 時間保持した後、自然冷却によりコンクリートの 20±5℃の室温まで温度を下げた。また、蒸気養生後は、水中養生を材齢 7 日まで行った。養生完了後、質量パーセント濃度で 10% の硫酸ナトリウム水溶液に供試体を浸漬させ試験を開始した。試験は、屋外(年平均気温: 16℃, 最高気温: 36℃, 最低気温: -4℃)で行った。

凍結融解試験は、JIS A 1148: 2010 に規定され

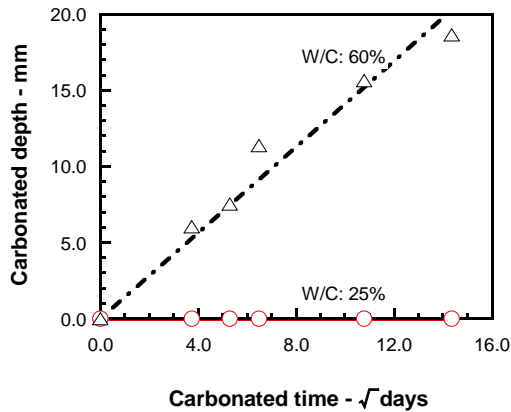


図-1 普通コンクリートの中性化試験結果

る水中凍結融解方法(A法)に準拠して行った。本実験では、ゴム製の供試体容器内の供試体を覆う水(凍結水)に、質量パーセント濃度で10%の塩化ナトリウム水溶液を用いて、実験を行った。竹田らは、凍結水に塩素イオン濃度で1.8%の海水を用いた場合、水セメント比が40%のコンクリートで、真水を用いた場合に比べて、相対動弾性係数が5~10%低下すると報告している<sup>5)</sup>。凍結水に塩水を用いることで、JISで規定されている凍結水に真水を用いる方法よりも、より厳しい条件の実験となる。実験には、蒸気養生または標準水中養生を材齢14日まで行った100×100×400mmの角柱供試体を用いた。蒸気養生は、耐硫酸塩性試験と同様に、2012年制定土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕に示される方法<sup>4)</sup>に従って行った。蒸気養生後は、水中養生を材齢14日まで行った。標準水中養生を行った供試体は、コンクリート打込み後、24時間、20±5℃の常温で型枠内養生を行った後に脱型し、材齢14日まで水中養生を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 中性化

図-1は、普通コンクリートの中性化試験の結果を示したものである。また、図-2は、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の中性化試験の結果を示したものである。これらの図より、いずれのコンクリートにおいても、水結合材比の大きいコンクリート

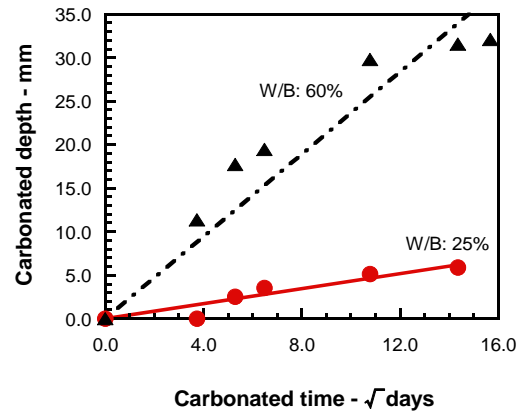


図-2 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの中性化試験結果

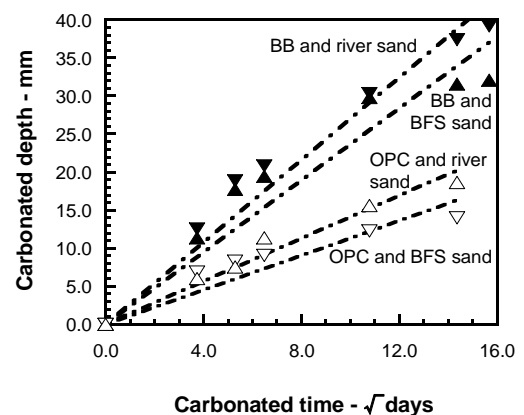


図-3 結合材および骨材の種類が中性化に及ぼす影響

ほど、中性化の進行が速いことが分かる。

図-3は、結合材および細骨材の種類がコンクリートの中性化に及ぼす影響を示したものである。図中の△は、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材には川砂を用いた結果を示している。▼は、結合材に高炉スラグ微粉末および普通ポルトランドセメントを質量比で60:40の割合で混合して用い、細骨材には川砂を用いた結果を示している。▽は、結合材には普通ポルトランドセメントを用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いた結果を示している。▲は、結合材に高炉スラグ微粉末および普通ポルトランドセメントを質量比で60:40の割合で混合して用い、細骨材には川砂を用いた結果を示している。コンクリートの中性化に及ぼす影響は、骨材よりも結合材の方が大きい。同じ骨材を用いた場合、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べ、

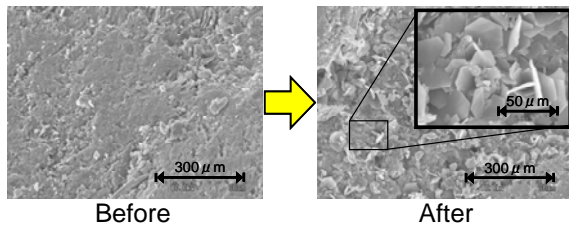


写真-1 飽和水酸化カルシウム水溶液に浸漬させた川砂の表面

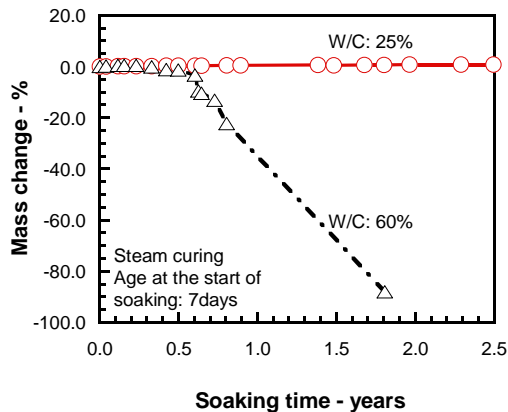


図-4 普通コンクリートの耐硫酸塩性

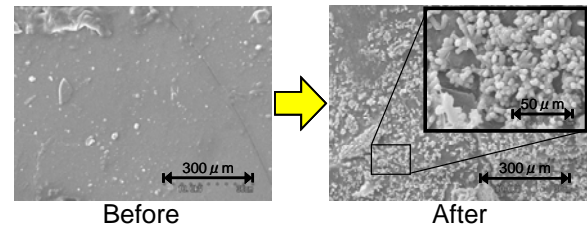


写真-2 飽和水酸化カルシウム水溶液に浸漬させた高炉スラグ細骨材の表面

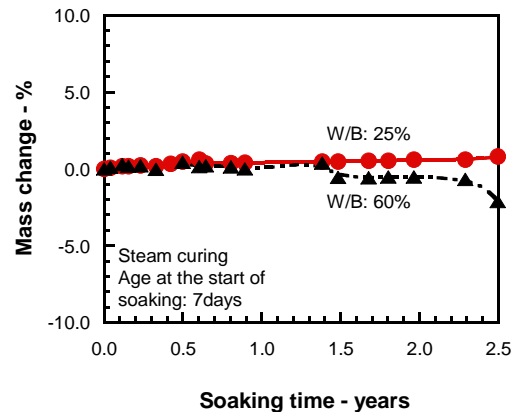


図-5 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐硫酸塩性

高炉スラグ微粉末を用いたものでは、中性化の進行は速くなっている。一方、同じ結合材の場合、川砂を用いたものに比べて、高炉スラグ細骨材を用いたものは、中性化の進行が遅くなっている。写真-1および写真-2は、それぞれ、川砂および高炉スラグ細骨材を川砂および高炉スラグ細骨材を飽和水酸化カルシウム水溶液に浸漬させる前と浸漬させた後の骨材表面を、走査型電子顕微鏡により撮影したものである。飽和水酸化カルシウム水溶液に浸漬させた後の川砂の表面には、水酸化カルシウムの六方晶系の板状の結晶が確認される。一方、飽和水酸化カルシウム水溶液に浸漬させた後の高炉スラグ細骨材の表面には、球状の結晶が確認される。川砂のような水酸化カルシウムと反応しない骨材では、骨材表面に水酸化カルシウムが析出し、脆弱な部分ができるのに対し、高炉スラグ細骨材のように、水酸化カルシウムと反応する骨材では、骨材表面とペーストとの界面が強固なものとなるため、中性化の進行も遅くなったものと考えられる。

### 3.2 耐硫酸塩性

図-4は、普通コンクリートを質量パーセント濃度で10%の硫酸ナトリウム水溶液に浸漬させた場合の質量変化を示したものである。図中の○および△は、それぞれ、水セメント比が25%および60%の結果を示している。水セメント比が60%のものは、1.8年(660日)、浸漬させると質量が88%も減少し、2年を超えると完全に崩れてしまっている。水セメント比が大きいものほど、質量損失が大きく、耐硫酸塩性が低いことが分かる。一方、図-5は、結合材に高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントを質量比で60:40の割合で混合して使い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートを質量パーセント濃度で10%の硫酸ナトリウム水溶液に浸漬させた場合の質量変化を示したものである。普通コンクリートの場合と同様に、水結合材比の大きいものの方が、質量損失が大きくなっている。しかし、水結合材比が60%のもので、浸漬期間が2年半を超えても、質量変化は-2%程度で、図-4に示される普通コンクリートに比べ

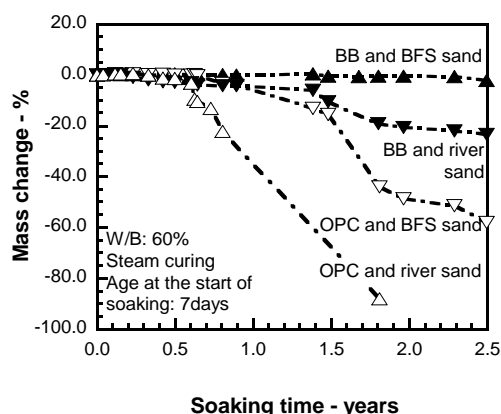


図-6 結合材および骨材の種類が耐硫酸塩性に及ぼす影響

ると、耐硫酸塩性は高いといえる。

図-6は、結合材および骨材の種類が、コンクリートの耐硫酸塩性に及ぼす影響を示したものである。図中の△は、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材には川砂を用いた結果を、▼は結合材に高炉スラグ微粉末および普通ポルトランドセメントを質量比で60:40の割合で混合して用い、細骨材には川砂を用いた結果を示している。▽は、結合材には普通ポルトランドセメントを用い、細骨材には高炉スラグ細骨材を用いた結果を、▲は、結合材に高炉スラグ微粉末および普通ポルトランドセメントを質量比で60:40の割合で混合して用い、細骨材には川砂を用いた結果を示している。コンクリートの耐硫酸塩性に及ぼす影響は、骨材の影響よりも結合材の影響が大きく、結合材に普通ポルトランドセメントを用いたものの方が、高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントを質量比で60:40の割合で混合し用いたものよりも質量損失が大きくなっている。一方、同じ結合材の場合、川砂を用いたものよりも、高炉スラグ細骨材を用いたものの方が、質量損失が小さく、耐硫酸塩性が高いことが分かる。骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、細骨材周辺に集積する水酸化カルシウムがなくなり、エトリングが生成されにくくなることで、耐硫酸性が向上したものと考えられる。

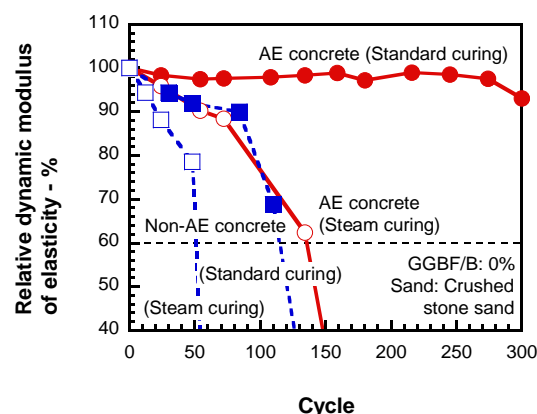


図-7 普通コンクリートの空気量および養生方法が凍結融解抵抗性に及ぼす影響

### 3.3 凍結融解抵抗性

図-7は、普通コンクリートにおける養生方法および空気量が、凍結融解抵抗性に及ぼす影響を調べた結果である。結合材には、普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材には、硬質砂岩砕砂のみを用いている。図中の●および○は、それぞれ、AE剤を用い標準水中養生および蒸気養生を行ったコンクリートの結果を示している。また、■および□は、それぞれ、AE剤を用いていない標準水中養生および蒸気養生を行ったコンクリートの結果を示している。AE剤を用いない場合には、いずれの養生方法のものも120サイクル程度で相対動弾性係数が60%を下回り、十分な凍結融解抵抗性が得られないことが分かる。一方、AE剤を用いた場合でも、蒸気養生を行ったものでは、150サイクル程度で相対動弾性係数が60%を下回っている。普通コンクリートでは、蒸気養生を行うと、AE剤を用いた場合でも十分な凍結融解抵抗性が得られない場合がある。この原因には、AE剤によって連行された微細な気泡が、蒸気養生による温度上昇で膨張してしまう可能性が考えられる。

図-8は、結合材への高炉スラグ微粉末の置換量が、凍結融解抵抗性に及ぼす影響を示したものである。いずれのコンクリートも、細骨材には硬質砂岩砕砂を用い、蒸気養生を行っている。また、AE剤は用いていない。この図より、高炉スラグ微粉末の置換量が多くなるほど、劣化



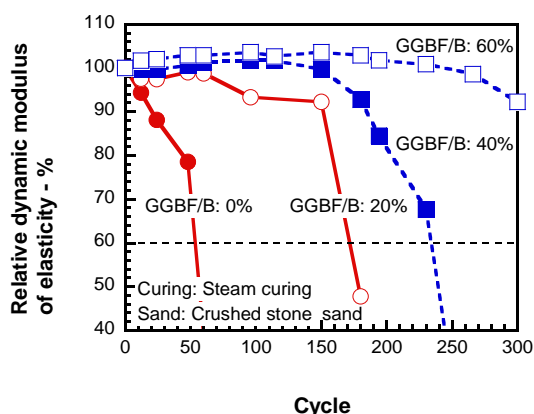


図-8 高炉スラグ微粉末量が凍結融解抵抗性に及ぼす影響

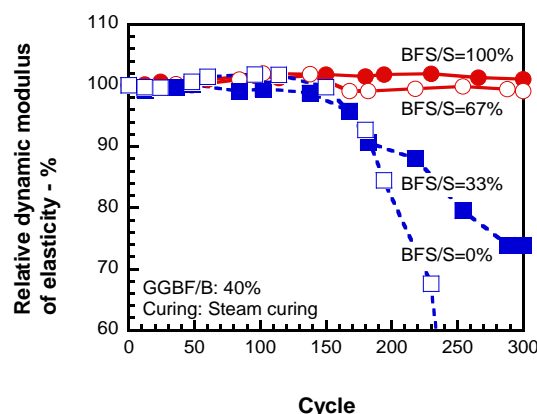


図-9 高炉スラグ細骨材量が凍結融解抵抗性に及ぼす影響

の進行が遅くなっている。高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 60%用いることで、AE 剤を用いなくても十分な凍結融解抵抗性が得られることが分かる。高炉スラグ微粉末量が増加することで、水酸化カルシウムの生成が抑制され骨材との界面が強固になること、微細な細孔が増加すること等が影響している可能性が考えられる。一方、図-9 は、細骨材に占める高炉スラグ細骨材の置換量がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響を示したものである。結合材には、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 40%用いている。養生は蒸気養生を行い、AE 剤は用いていない。この図より、高炉スラグ細骨材の置換量が多くなると、コンクリートの凍結融解抵抗性が向上することが分かる。高炉スラグ細骨材を用いることで、骨材とペーストとの界面が強固になる等の影響で、凍結融解抵抗性が向上している可能性が考えられる。

#### 4. まとめ

結合材に高炉スラグを用いた場合、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて、耐硫酸塩性は向上するものの、中性化の進行は早くなる。一方、同じ結合材であれば、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合には、骨材表面とペーストとの界面の水酸化カルシウムがなくなり強固なものとなるため、川砂を用いた場合に比べ、中性化の進行が遅く、また、耐硫酸

塩性も向上する。一方、普通コンクリートでは、AE 剤を用いてエントレインドエアを連行しても、蒸気養生を行った場合には十分な凍結融解抵抗性が得られない場合がある。しかし、結合材の一部を高炉スラグ微粉末に置き換えるか、または、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、AE 剤を用いることなく、また、蒸気養生を行っても、十分な凍結融解抵抗性が得られることを、条件がより厳しいとされる塩水を凍結水に用いた凍結融解試験によって確認した。

#### 参考文献

- 1) 本荘清司ほか：凍結防止剤による塩害で劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査，コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集，Vol. 11, pp.529-536, 2011. 10
- 2) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成 23 年度実績），2012. 7
- 3) 齊藤和秀ほか：高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009.6
- 4) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，p. 355, 2013. 3
- 5) 竹田宣典，十河茂幸：凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.2, pp.427-432, 2009. 6