

論文 細骨材の種類が鉄鋼スラグ水和固化体の耐久性に及ぼす影響

藤井 隆史*1・春田 正一*2・綾野 克紀*3・阪田 憲次*4

要旨：本論文は、細骨材の種類が鉄鋼スラグ水和固化体の耐久性に及ぼす影響を示したものである。製鋼スラグを細骨材に用いた鉄鋼スラグ水和固化体は、普通コンクリートに比べて、圧縮強度、中性化、塩化物イオンの浸透性および耐硫酸性が劣る。これに対して、細骨材に高炉スラグを用いた鉄鋼スラグ水和固化体は、圧縮強度の増加は小さいものの、中性化、塩化物イオンの浸透性および耐硫酸性は改善されることが明らかとなった。

キーワード：鉄鋼スラグ水和固化体、製鋼スラグ、高炉スラグ細骨材、中性化、塩化物イオン、耐硫酸性

1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体は、鉄鋼製造工程で発生する副産物を用いて製造される建設材料である。鉄鋼スラグは、高炉スラグと製鋼スラグの二つに大きく分類される。高炉スラグは、銑鉄を製造する高炉で発生するもので、その成分は、天然の岩石に類似したものである。一方、製鋼スラグは、銑鉄を鋼にする工程において生成されるものである。高炉スラグが、銑鉄1トン当たり約290kg生成されるのに対し、製鋼スラグは、粗鋼1トン当たり約110kg生成される。平成18年度における高炉スラグおよび製鋼スラグの発生量は、それぞれ、約2,500万トンおよび約1,400万トンである¹⁾。鉄鋼スラグ水和固化体は、コンクリート用材料としての使用実績が低い製鋼スラグを用いることに特色があり、大量の産業副産物を有効利用できる環境負荷低減型材料として期待されている。鉄鋼スラグ水和固化体は、主に護岸工事用ブロック等の無筋構造物を対象に、試験施工が多く行われている。大量に発生する鉄鋼スラグの有効利用を広げるためには、鉄鋼スラグ水和固化体の有筋材への適用を検討する必要がある。本論文は、細骨材の種類が鉄鋼スラグ水和固化体の耐久性に及ぼす影響を調べたものである。細骨材に高炉スラグを用いることで、鉄鋼スラグ水和固化体の性能が改善されることを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

結合材には、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³、ブレン値：3,300 cm²/g）、JIS A 6206: 1997に規定される高炉スラグ微粉末4000（密度：2.89g/cm³）およびJIS A 6201: 1999に規定されるフライアッシュII種（密度：2.20g/cm³）を用いた。なお、フライアッシュは、鉄鋼スラグ水和固化体中で過剰に生成される水酸化カ

ルシウムによって、鉄鋼スラグ水和固化体が異常な膨張を生じさせないようにする目的で用いている。また、アルカリ刺激材には、石灰集塵微粉末（密度：3.14g/cm³、平均粒径：10μm）を用いた。細骨材には、製鋼スラグ細骨材（密度：3.16g/cm³、吸水率：6.54%）、高炉スラグ細骨材（密度：2.81g/cm³、吸水率：0.36%）および川砂（密度：2.61g/cm³、吸水率：1.80%）を用いた。粗骨材には、製鋼スラグ粗骨材（密度：3.07g/cm³、吸水率：5.57%）および砕石（密度：2.74g/cm³、吸水率：0.59%）を用いた。なお、製鋼スラグ細骨材および製鋼スラグ粗骨材は、沿岸開発技術センター発行の鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル²⁾に従い、エージング処理を行い、JIS A 5015 附属書2による水浸膨張比が1.1%以下になったものを24時間吸水させて用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤および消泡剤を用いた。本実験に用いたコンクリートの配合を表-1および表-2に示す。表-1に示される配合は、単位水量、結合材の体積および細骨材率を一定の条件として決定している。また、表-2に示される配合は、セメントの質量、フライアッシュの質量および細骨材率を一定とした条件で決定したものである。

2.2 試験方法

(1) 中性化試験

中性化試験には、28日間の水中養生を行ったφ100×50mmの円柱供試体を用いた。試験は、温度が30.0±1.0°Cで、相対湿度が60±5%で、CO₂濃度が20.0±1.0%の条件で行った。

(2) 塩化物イオン浸透性試験

塩化物イオン浸透性試験は、JSCE-G 572-2003に規定される「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（案）」に従って行った。ただし、飽和塩化物イオン量は、質量パーセント濃度で10%の塩水にφ80×5mmの薄片のコンクリートを浸漬させ、コ

*1 岡山大学 環境理工学部助教 工博（正会員）

*2 岡山県立岡山工業高等学校 土木科 教諭（非会員）

*3 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻准教授 工博（正会員）

*4 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻教授 工博（正会員）

表-1 結合材の体積を一定とした配合

Type	G _{max} (mm)	W/B (%)	C/B (%)	s/a (%)	Air (%)	Unit content (kg/m ³)								Admixture			
						W	Binder			Sand			Gravel		HRW RA ^{*7} (kg/m ³)	DF ^{*8} (g/m ³)	
							BF ^{*1}	C	LD ^{*2}	SS ^{*3}	BFS ^{*4}	RS ^{*5}	SS ^{*3}	CS ^{*6}			
A	20	23.4	0.0	50.0	4.5	150	562	0	78	925	0	0	899	0	9.0	0.0	
B1		23.5	10.0				575	64	0						9.0		
B2		23.3	20.0				516	129	0						10.3		
B3		22.9	40.0				393	262	0	823	0	764	0	807	11.8		
B4															13.1		
N0															13.1		
N1		23.4	0.0				562	0	78	0	0	764	0	807	9.0		0.0
N2		23.5	10.0				575	64	0						9.0		
N3		23.3	20.0				516	129	0						10.3		
	22.9	40.0	393	262	0	823	0	764	0						807	11.8	
																11.8	

*1 BF: Ground granulated blast furnace slag *2 LD: Lime dust *3 SS: Steel-making slag *4 BFS: Blast furnace slag sand
*5 RS: River sand *6 CS: Crushed stone *7 HRWRA: High-range water reducing admixture *8 DF: Deforming agent

表-2 セメント結合材比およびフライアッシュ結合材比を一定とした配合

Type	G _{max} (mm)	W/B (%)	C/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	Air (%)	Unit content (kg/m ³)								Admixture				
							W	Binder			Sand			Gravel		HRW RA ^{*7} (kg/m ³)	DF ^{*8} (g/m ³)		
								BF ^{*1}	FA ^{*2}	C	SS ^{*3}	BFS ^{*4}	RS ^{*5}	SS ^{*3}	CS ^{*6}				
C1	20	25.1	40.0	30.0	50.0	4.5	150	179	179	239	925	0	0	823	0	899	0	12.1	0.0
C2											0	0						0	10.3
C3											0	0	0	12.1	12.1				
C4											0	764	0	10.8	0.0				
D1											60.0	40.0	30.0	50.0	4.5	175	88	88	117
D2		0	0	0	6.4	64.2													
D3		0	0	0	1.8	35.0													
D4		0	878	0	927	0.9	0.0												

*1 BF: Ground granulated blast furnace slag *2 FA: Fly ash *3 SS: Steel-making slag *4 BFS: Blast furnace slag sand
*5 RS: River sand *6 CS: Crushed stone *7 HRWRA: High-range water reducing admixture *8 DF: Deforming agent

ンクリート中の塩化物イオン量が経時的に一定になったと判断される時点での値とした。なお、コンクリートの薄片供試体の浸漬開始時材齢は5ヶ月で、浸漬期間は49日間である。

可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量は、それぞれ、JIS A 1154: 2003 附属書2 (参考) に記載される「硬化コンクリート中に含まれる温水抽出塩化物イオンの分析方法」および JIS A 1154: 2003 に記載される「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて抽出した。また、塩化物イオン濃度の測定は、チオンアン酸水銀(II)を用い、吸光度法によって求めた。

(3) 耐硫酸性試験

耐硫酸性試験には、2ヶ月間水中で養生を行ったφ100×200mmの円柱供試体を用いた。供試体を、質量パーセント濃度で5%の硫酸に浸漬させ、7日毎に水で洗浄し、劣化した箇所を除去した後、質量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1は、表-1に示される配合の鉄鋼スラグ水和固化体

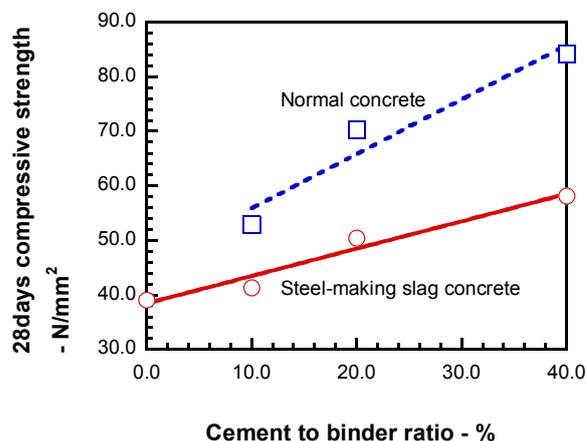


図-1 セメント結合材比と28日圧縮強度の関係

および普通骨材を用いたコンクリート (以下、普通コンクリートとよぶ) の材齢28日における圧縮強度とセメント結合材比の関係を示したものである。図中の○および□は、それぞれ、鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの結果を示している。この図より、セメント量に関係なく、普通コンクリートに比べ、鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度は低いことが分かる。

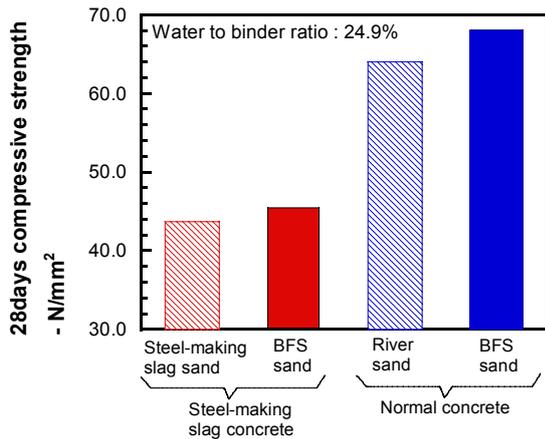


図-2 骨材の種類が28日圧縮強度に及ぼす影響

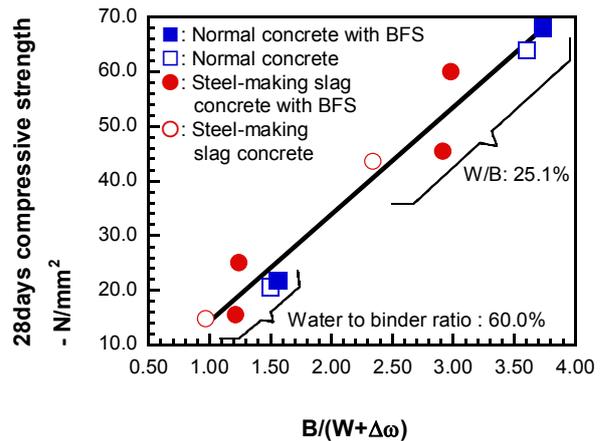


図-3 結合材水比と28日圧縮強度の関係

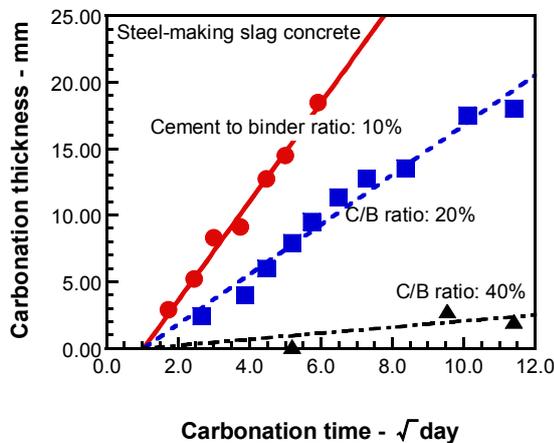


図-4 セメント結合材比が鉄鋼スラグ水和固化体の中性化に及ぼす影響

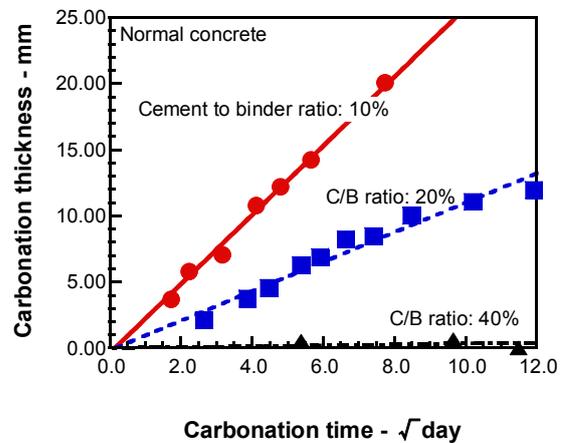


図-5 セメント結合材比が普通コンクリートの中性化に及ぼす影響

図-2は、細骨材に高炉スラグを用いたコンクリートの圧縮強度を示したものである。いずれのコンクリートにおいても、高炉スラグ細骨材を用いることにより、圧縮強度が増加している。しかし、その差は小さい。

図-3は、表-2に示される配合のコンクリートの圧縮強度と骨材中に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を考慮した結合材水比 $B/(W+\Delta\omega)$ の関係を示したものである。図中の○および●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、□および■は、普通コンクリートの結果を示している。ただし、●および■は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた結果である。また、圧縮強度は、材齢28日において求めたものである。骨材中に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を考慮した結合材水比 $B/(W+\Delta\omega)$ を用いると、骨材の種類に関わらず、圧縮強度と $B/(W+\Delta\omega)$ との間に線形関係が成り立つことが分かる。従って、細骨材に高炉スラグを用いることで圧縮強度が高くなるのは、高炉スラグ細骨材の吸水率が小さいためであると考えられる。

3.2 中性化

図-4および図-5は、それぞれ、セメント結合材比が鉄

鋼スラグ水和固化体および普通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●、■および▲は、それぞれ、セメント結合材比が10%、20%および40%の結果を示している。これらの図より、いずれのコンクリートにおいても、セメント結合材比が大きくなるにつれ、中性化の進行は遅くなることが分かる。また、普通コンクリートの中性化が試験開始と同時に進行するのに対し、鉄鋼スラグ水和固化体の中性化は試験開始1日後から進行している。鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの水分損失を示した図-6からも明らかのように、鉄鋼スラグ水和固化体には蒸発可能な水分量が多く含まれており、これによって中性化の開始が普通コンクリートよりも遅れるものと思われる。

図-7は、セメント結合材比が中性化速度係数に及ぼす影響を示したものである。ただし、中性化速度係数は、図-4および図-5中に示される直線の傾きである。図中の○および□は、それぞれ、鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの結果を示している。この図より、同じセメント結合材比においては、鉄鋼スラグ水和固化体

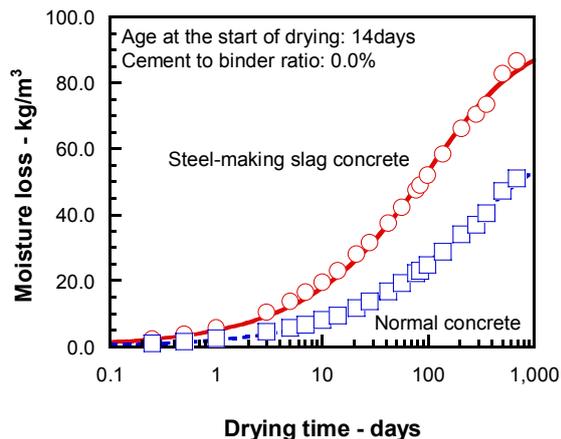


図-6 骨材の種類が水分損失に及ぼす影響

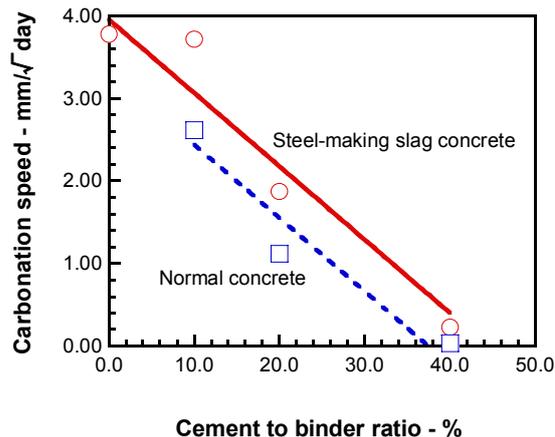


図-7 セメント結合材比と中性化速度の関係

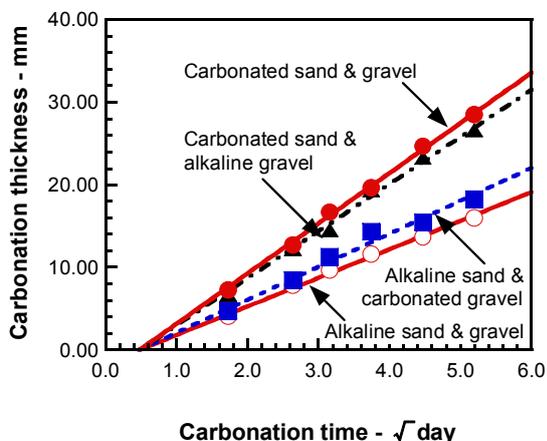


図-8 製鋼スラグのアルカリ性が中性化に及ぼす影響

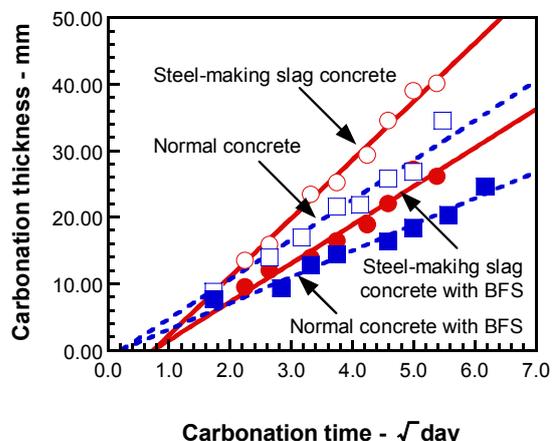


図-9 骨材の種類が中性化に及ぼす影響

の方が普通コンクリートに比べ中性化速度係数が大きいことが分かる。また、いずれのコンクリートにおいても、セメント結合材比が大きくなるにつれ、中性化速度係数が小さくなっている。

図-8は、製鋼スラグ骨材のアルカリ性が、鉄鋼スラグ水和固化体の中性化に及ぼす影響を示したものである。ただし、鉄鋼スラグ水和固化体のセメント結合材比は10%である。図中の○は、細骨材および粗骨材ともに中性化していない製鋼スラグ骨材を用いた結果を示している。また、■の結果を求めるために用いた鉄鋼スラグ水和固化体の粗骨材には、炭酸ガスによって中性化させた製鋼スラグを用いている。▲の結果を求めるために用いた鉄鋼スラグ水和固化体の細骨材には、炭酸ガスによって中性化させた製鋼スラグを用いている。さらに、●は、細骨材および粗骨材ともに中性化させた製鋼スラグを用いた結果である。なお、炭酸ガスによって中性化させた製鋼スラグ骨材は、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤紫色に変化しないことを確認している。この図より、中性化させた製鋼スラグ骨材を用いたものは、アルカリ性の製鋼スラグ骨材を用いたものよりも中性化

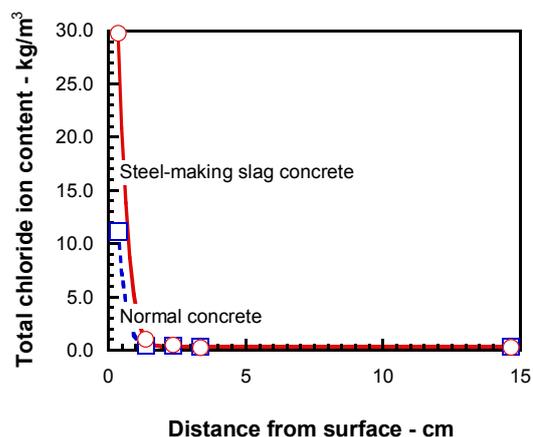


図-10 浸漬による塩化物イオン浸透性試験の結果

の進行が速いことが分かる。また、粗骨材を中性化させたものを用いた場合よりも、細骨材を中性化させたものを用いたものの方が、中性化の進行が速い。普通コンクリートに比べて、鉄鋼スラグ水和固化体の中性化の試験結果にばらつきが大きいのは、練混ぜ前の製鋼スラグ骨材の中性化の影響によるものと思われる。

図-9は、細骨材の種類がコンクリートの中性化に及ぼ

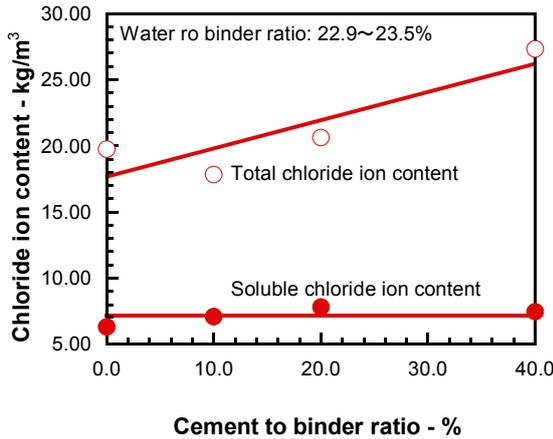


図-11 セメント結合材比が鉄鋼スラグ水和固化体の飽和塩化物イオン量に及ぼす影響

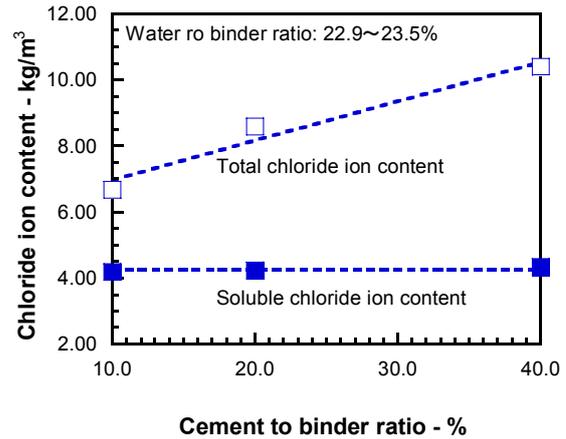


図-12 セメント結合材比が普通コンクリートの飽和塩化物イオン量に及ぼす影響

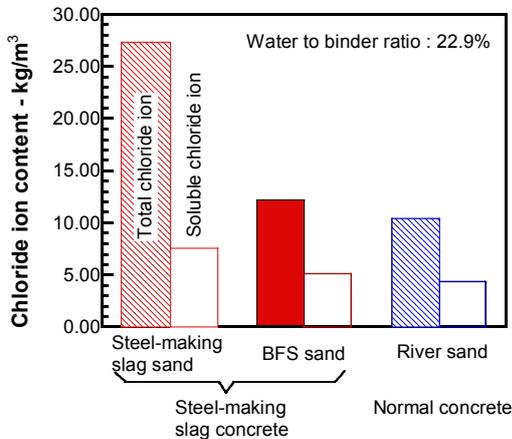


図-13 骨材の種類が飽和塩化物イオン量に及ぼす影響

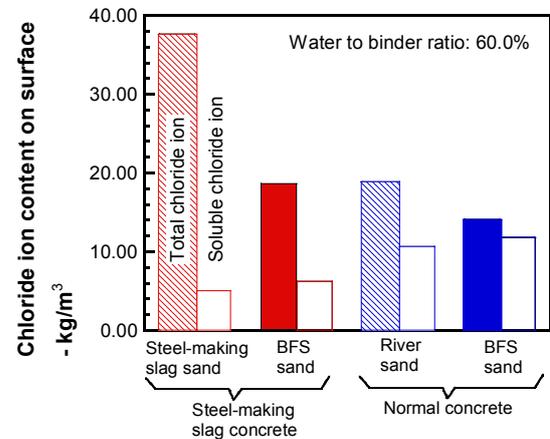


図-14 骨材の種類が表面塩化物イオン量に及ぼす影響

す影響を示したものである。図中の○および●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、□および■は、普通コンクリートの結果を示している。ただし、●および■は、細骨材に高炉スラグを用いた結果である。細骨材に吸水率の小さい高炉スラグを用いることで、いずれのコンクリートの中性化も進行が遅くなるのが分かる。高炉スラグのアルカリ性は、製鋼スラグに比べて高いものではない。従って、骨材のアルカリ性がコンクリートの中性化に及ぼす影響よりも、吸水率の影響の方が大きいものと思われる。

3.3 塩化物イオン浸透性

図-10 は、JSCE-G 572-2003 によって求めた水結合材比が 22.9% の鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの全塩化物イオンの分布を示したものである。いずれのコンクリートも水結合材比が小さいため、塩化物イオンの浸入が少ない。鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの見掛けの拡散係数は、それぞれ、 $0.59\text{cm}^2/\text{year}$ および $0.42\text{cm}^2/\text{year}$ である。土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕に示される予測式³⁾に従っ

て、高炉セメントを用いた普通コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めれば、 $0.33\text{cm}^2/\text{year}$ となり、本実験で得られた値とほぼ同じとなる。また、鉄鋼スラグ水和固化体の表面塩化物イオン量は、普通コンクリートの 3 倍となっている。

図-11 および図-12 は、それぞれ、鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの飽和塩化物イオン量にセメント結合材比が及ぼす影響を示したものである。図中の○および□は、飽和全塩化物イオン量を、●および■は、飽和可溶性塩化物イオン量の結果を示している。これらの図より、いずれのコンクリートにおいても、セメント結合材比が大きくなるにつれ、飽和全塩化物イオン量は多くなる。一方、飽和可溶性塩化物イオン量は、いずれのコンクリートにおいてもセメント結合材比の影響は、小さいことが分かる。また、鉄鋼スラグ水和固化体の飽和塩化物イオン量は、普通コンクリートに比べ 2 倍以上大きいことが分かる。

図-13 は、コンクリートの薄片による方法で求めた飽和塩化物イオン量に骨材の種類が及ぼす影響を示した

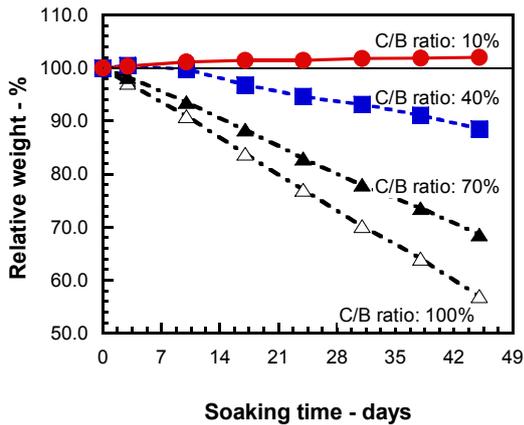


図-15 普通コンクリートの耐硫酸性

ものである。細骨材に高炉スラグを用いれば、鉄鋼スラグ水和固化体の全塩化物イオン量は少なくなることが分かる。吸水率が小さい高炉スラグ細骨材を用いることで、骨材内部に塩化物イオンが浸透しにくくなったものと思われる。しかし、鉄鋼スラグ水和固化体中に浸入する塩化物イオンは、スラグに固定化されるため、細骨材が製鋼スラグであっても、可溶性塩化物イオン量は少ないものと考えられる。

図-14 は、JSCE-G 572-2003 に従って、表-2 に示される水結合材比が60%のコンクリートの表面塩化物イオン量を求めたものである。ただし、浸漬期間は49日である。全塩化物イオン量を左に示し、可溶性塩化物イオン量を右に示している。水結合材比が60%の場合においても、鉄鋼スラグ水和固化体の全塩化物イオン量は、普通コンクリートの2倍であり、細骨材に高炉スラグを用いることで、その量は、半分となっている。また、鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの可溶性塩化物イオン量は、細骨材に高炉スラグを用いてもその差は小さくなっている。

3.4 耐硫酸性

図-15 は、普通コンクリートの耐硫酸性にセメント結合材比が及ぼす影響を示したものである。セメント結合材比が大きいものほど、質量損失が大きいことが分かる。一方、図-16 は、鉄鋼スラグ水和固化体の硫酸による質量変化を示したものである。図中の●および○は、それぞれ、セメント結合材比が40%および0%の結果を示している。ただし、セメント結合材比が40%のものは、細骨材に高炉スラグを用いている。細骨材に高炉スラグを用いたものは、細骨材が製鋼スラグのものよりもセメント量が多いにも関わらず、硫酸による質量変化が小さい。

図-17 は、骨材の種類が硫酸による質量変化に及ぼす影響を示したものである。図中の○および●は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、□および■は、普通コンクリートの結果を示している。ただし、●および■は、細骨

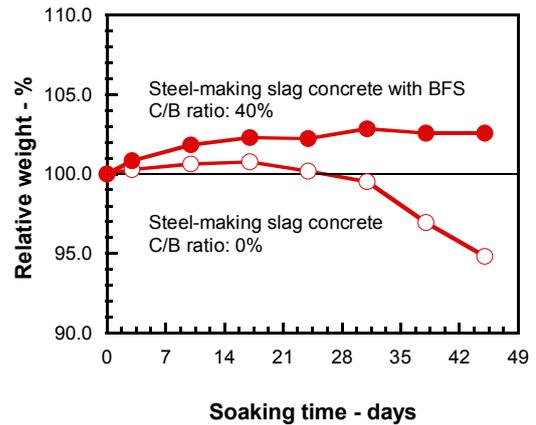


図-16 鉄鋼スラグ水和固化体の耐硫酸性

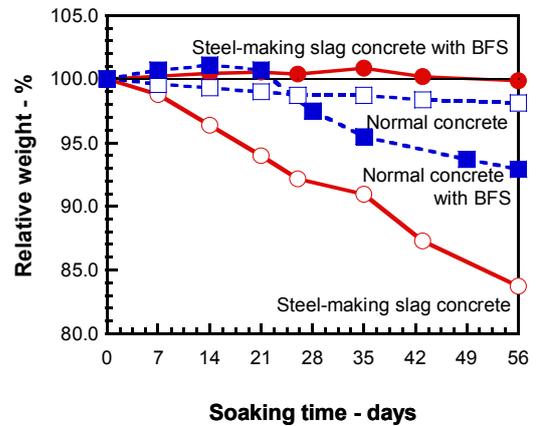


図-17 骨材の種類が耐硫酸性に及ぼす影響

材に高炉スラグを用いたものである。細骨材に高炉スラグを用いた鉄鋼スラグ水和固化体は、硫酸による質量変化が小さいことが分かる。

4. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体は、普通コンクリートに比べ、圧縮強度は小さく、耐久性に劣る。しかし、細骨材に高炉スラグを用いることで鉄鋼スラグ水和固化体の中性化、塩化物イオン浸透性および耐硫酸性は改善される。また、圧縮強度においても、耐久性と比べると大きな効果はないが、製鋼スラグを用いたものに比べて劣るものではない。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報，平成18年度版，2007.8
- 2) 沿岸開発技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルー製鋼スラグの有効利用技術一，沿岸開発技術ライブラリー，No.16，pp.69-112，2003.3
- 3) 土木学会コンクリート委員会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，土木学会，pp.80，2002.3