

# 論文 鉄鋼スラグ水和固化体の各種耐久性に関する研究

松永 久宏\*1・藤井 隆史\*2・綾野 克紀\*3

**要旨:** 骨材に製鋼スラグ, 主な結合材に高炉スラグ微粉末を用いる鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ疲労寿命, 耐硫酸塩性, 室内暴露による中性化の評価および屋外暴露した材齢約 10 年の試験体について調査した。その結果, 曲げ疲労寿命は細骨材率およびペースト率と相関性があること, 耐硫酸塩性は同等の強度の普通コンクリートよりも優れること, 耐中性化はアルカリ刺激材に普通ポルトランドセメントを細骨材に高炉スラグ細骨材を使用すると効果があること, 材齢約 10 年の試験体は強度増加が認められ, また細粒の製鋼スラグの配合が中性化を起さにくくす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, 疲労寿命, 耐硫酸塩, 中性化, 製鋼スラグ, 高炉スラグ微粉末

## 1. はじめに

環境への負荷が少ない循環型社会の形成を目的に, 産業副産物やリサイクル材を有効利用する技術開発がさまざまな分野で進められている。このような背景のもと, 鉄鋼スラグの新しい利用技術として, 骨材に鉄鋼生産の製鋼工程で副産する製鋼スラグ, 主な結合材に高炉スラグ微粉末を用いた環境調和型材料である鉄鋼スラグ水和固化体が開発され, 異型ブロックなどの無筋コンクリート代替や捨石代替などとして港湾工事などで利用されている<sup>1)</sup>。また, 鉄筋コンクリート代替としての適用も検討され始めている<sup>2)</sup>。

鉄鋼スラグ水和固化体の耐久性については, 促進試験による中性化や塩分浸透性などの検討がされている<sup>23)</sup>ものの, 実用化されてからまだ 10 年弱と短いこともあり必ずしも十分ではない。また, 鉄筋コンクリート代替としての適用拡大を図るためには, 中性化などの特性について, さらにデータの蓄積をする必要がある。

そこで, 本研究では, 鉄鋼スラグ水和固化体の疲労寿命, 耐硫酸塩性, 室内暴露による中性化の評価および屋外暴露した材齢約 10 年の試験体について調査をすることにより, 鉄鋼スラグ水和固化体の耐久性を評価するとともに, 必要な耐久性を確保するための配合条件などについて検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

鉄鋼スラグ水和固化体の使用材料を表-1に示す。高炉スラグ微粉末の水硬性を促進させるためのアルカリ刺激材としては, 普通ポルトランドセメントまたは消石灰を用いた。本研究の実験期間が長期にわたることもあり, 製鋼スラグは実験毎に生成した製鉄所や生産時期が

異なるものを用いたため, 密度や吸水率の値に幅がある。

### 2.2 曲げ疲労試験

#### (1) 配合

鉄鋼スラグ水和固化体の配合を表-2に示す。曲げ疲労試験に用いた配合は, H1 から H9 である。細骨材率や骨材容積(ペースト率)の影響を検討するために様々な配合とした。疲労試験時の曲げ強度は, 3.40~4.81N/mm<sup>2</sup>である。比較として用いたコンクリートの配合を表-3に示す。疲労試験に用いた配合は, HC1 である。水セメント比は, 曲げ強度が鉄鋼スラグ水和固化体と同等程度となるように 60%とした。

#### (2) 試験方法

試験体は 100×100×400mm とし, 材齢 28 日まで 20°C で水中養生し試験に供した。載荷方法は 3 等分点載荷とした。載荷条件は, 上限応力(応力比)を JIS A 1106 によ

表-1 鉄鋼スラグ水和固化体の使用材料

材料	記号	種類・物性値
高炉スラグ微粉末	BP-1	JIS A 6206 高炉スラグ微粉末4000 (せっこう添加), 密度:2.89g/cm <sup>3</sup>
	BP-2	JIS A 6206 高炉スラグ微粉末4000 (せっこう無添加), 密度:2.87g/cm <sup>3</sup>
普通ポルトランドセメント	C	JIS R 5210 普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm <sup>3</sup>
消石灰	CH	JIS R 9001 特号, 密度:2.24g/cm <sup>3</sup>
フライアッシュ	FA-1	JIS II種 密度:2.25g/cm <sup>3</sup> , 強熱減量:0.8%
	FA-2	JIS II種 密度:2.27g/cm <sup>3</sup> , 強熱減量:1.2%
	FA-3	JIS II種 密度:2.20g/cm <sup>3</sup>
製鋼スラグ	SS-1	0-5mm, 表乾密度:2.62~3.73g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:2.88~9.06%
	SS-2	5-20mm, 表乾密度:2.97~3.32g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:4.50~5.64%
	SS-3	0-0.15mm (0-20mm, 表乾密度:3.05g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:4.96%を0.15mm以下に粉砕)
高炉スラグ細骨材	BF-S	0-5mm, 表乾密度:2.71g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.38%
混和剤	Ad-1	JIS A 6204 高性能減水剤 標準型 I種(ポリカルボン酸系)
	Ad-2	JIS A 6204 AE剤 I種

\*1 J F E スチール (株) スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員 (正会員)

\*2 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻助教 工博 (正会員)

\*3 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－2 鉄鋼スラグ水和固化体の配合

配合の 記号	W/B (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )											混和剤 (g/m <sup>3</sup> )		疲労試験時 の曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢28日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )							
				W	BP-1	BP-2	C	CH	FA-1	FA-2	FA-3	SS-1	SS-2	SS-3	BF-S	Ad-1			Ad-2						
H1	40.6	43.0	2.0	176	297	0	53	0	0	0	0	865	1,143	0	0	3,250	0	4.50	-						
H2	29.9	45.0		173	413		83					83	864			1,056		5,780		4.46					
H3	42.1	51.2		202	300		50					130	1,057			957		4,000		4.81					
H4	42.1	93.6					2,013					130	2,013			130				3,64					
H5	37.5	53.0	2.5	197	278	70	177	0	0	0	0	1,204	872	0	0	1,750	0	4.05							
H6	37.6	58.0										1,215	838			1,750		4.28							
H7	37.6	52.8										1,106	940			1,750		4.08							
H8	37.6	49.4										914	963			350		4.16							
H9	36.2	57.3										870	735			350		3.40							
R1	23.5	50.0	4.5	150	0	0	0	0	0	0	0	896	931	0	0	7700	96	42.9							
R2	23.1																	455	195	1,167	52.0				
R3	22.7																	331	331	2,333	51.6				
C1	60.0																	292	0	1,167	0				
C2	45.0	52.2	389	0	2,333	0																			
C3	30.0	2.0	175	150	150	0	0	0	0	0	0	983	926	0	0	3,500	0	-							
C4	60.0											88	117			88			1,071	967	1,750	18			
C5	45.0											51.2	117			156			117	1,017	917	3,111	31		
C6	30.0											175	233			175			907	818	4,667	47			
C7	30.0											150	200			150			992	895	5,000	50			
Y1	43.9	41.2	2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		19.0						
Y2	43.9	290																	599	60	572	817	0	0	17.7
Y3	64.7	284																	392	59	561	801	2,610	0	20.2
Y4	74.4	240																	313	38	941	513	0	0	19.4
Y4	74.4	76.3	275	225	225	33	112	1,134	434	257	0	0	0	0	0	0	0								

表－3 コンクリートの配合

配合の 記号	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	スランブ <sup>*</sup> (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (g/m <sup>3</sup> )			疲労試験時 の曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢28日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
						W	C	BB	S	G	AE 減水剤	高性能 減水剤	AE剤		
HC1	20	60.2	46.4	8	4.5	160		266	850	1,023	665	665		4.70	-
RC1		21.7	50.0	-	4.5	150	691	0	755	802	0	13,800	20.7	-	87.7
RC2		30.0	39.6			175	583		608	985		5,830	9.3		77.1
RC3		60.0	47.7			292	846		985	2,920		1.5	36.3		
CC1		60.0	50.2	2.0	175	292	930	978	583	0	1,556	0	-	-	
CC2		45.0	50.2			389	889	935	2,917		0	-			
CC3		30.0	50.2			583	809	851	2,917		0	-			

り測定した曲げ強度の50%または60%とし、下限応力を上限応力の5%とした。繰り返し載荷速度は7Hzとした。各条件における載荷試験本数は1~3本とした。

2.3 耐硫酸塩試験

(1) 配合

耐硫酸塩試験に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の配合は、表－2におけるR1からR3である。アルカリ刺激材として普通ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末(BP)と普通ポルトランドセメント(C)の比率(C/(BP+C))を10%、30%、50%と変えた3種類とした。比較であるコンクリートの配合は、表－3におけるRC1からRC3である。セメントとして普通ポルトランドセメントを使用し、水結合材比は21.7%、30.0%、60.0%の3種類とした。

(2) 試験方法

試験体はφ100×200mmとし、材齢14日まで水中養生した後、10%硫酸ナトリウム水溶液に浸漬した。定期的にJIS A 1127により動弾性係数を測定するとともに外観観察を行い、硫酸塩による劣化を評価した。

2.4 中性化試験

(1) 配合

中性化試験に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の配合は、表－2におけるC1からC7である。アルカリ刺激材無添

加の配合(C1~C3)と、アルカリ刺激材に普通ポルトランドセメントを、細骨材に高炉スラグ細骨材を使用した配合(C4~C7)に大別される。水結合材比はそれぞれ30%、45%、60%の3種類とした。比較であるコンクリートの配合は、CC1からCC3である。水セメント比は、鉄鋼スラグ水和固化体と同様に30%、45%、60%とした。

(2) 試験方法

試験体はφ100×200mmとし、材齢2日で型枠を取外し、材齢14日まで散水養生した。さらに材齢1ヶ月までシートで覆った。その後、材齢1年まで室内に暴露し、JIS A 1152により中性化深さを測定した。

2.5 屋外暴露試験

(1) 配合

屋外暴露試験に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の配合は、表－2におけるY1からY4である。フライアッシュ無し(Y1)、有り(Y2、Y3)、0.15mm以下の細粒の製鋼スラグを配合(Y4)した4種類である。Y4は、水結合材比が74%と大きいのが、0.15mm以下の細粒の製鋼スラグを結合材に含めるものとすれば、その水結合材比は44%となり、Y1やY2と同じである。

(2) 試験方法

材齢約3ヶ月まで20℃で水中養生した後、屋外に暴露した。材齢9年から10年となった後、外観観察をする

とともに、JIS A 1108 により圧縮強度と JIS A 1152 により中性化深さを測定した。また、20℃で水中養生した材齢 7 日から 1 年の試験体の圧縮強度を測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 曲げ疲労寿命

曲げ疲労寿命と細骨材率の関係を図-1 に示す。図-1 にはペースト率が 42.1% 以下のデータをプロットした。ここに、ペースト率は、容積の高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、アルカリ刺激材、水および空気に対する比率である。応力比 50% における鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ疲労寿命は、細骨材率が 52% 以下では約 400 万回であり普通コンクリートと同等であるが、細骨材率が大きくなると低下する傾向にある。応力比 60% における疲労寿命は、細骨材率が 50% では約 100 万回であるが、細骨材率が 93% では 1/250 の約 4,000 回に低下する。細骨材率約 50% において応力比 50% と 60% の疲労寿命を比較すると、応力比 50% は、応力比 60% の 4 倍の寿命となる。

曲げ疲労寿命とペースト率の関係を図-2 に示す。図-2 には細骨材率が 52.1% 以下のデータをプロットした。応力比 50% における鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ疲労寿命は、ペースト率が 42.1% 以下では普通コンクリートと同等の約 400 万回であるが、ペースト率が 42.3% を越えると徐々に低下し、45.0% では約 1/5 の約 75 万回となる。また、応力比 60% でペースト率 40% の配合と応力比 50% でペースト率 45% の配合が同程度の疲労寿命となる。

これらの結果より、鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ疲労寿命を普通コンクリートと同等程度とするためには、細骨材率を約 52% 以下かつペースト率を約 42% 以下の配合にする必要があると考えられる。

製鋼スラグは、製鋼スラグ中に含まれる free-CaO の水和により膨張することが知られている<sup>4)</sup>。鉄鋼スラグ水和固化体に用いる製鋼スラグは、free-CaO の水和膨張を原因とする固化体のひび割れ発生を抑制するために、その品質基準が定められている<sup>5)</sup>。鉄鋼スラグ水和固化体の材料として適用可能な細骨材相当の製鋼スラグの粒度分布の例を図-3 に示す。図-3 には JIS A 5005 で規定されるコンクリート用砕砂の粒度範囲を合わせて示した。鉄鋼スラグ水和固化体へ適用可能な製鋼スラグは、産地によって異なるが、粒度分布がコンクリート用砕砂よりも粗いことが多い。また、形状も角張っていることがある。コンクリートの配合設計では、砂の粗粒率が変わった場合、所要のワーカビリティを確保するために、一般に粗粒率が 0.1 だけ大きいごとに細骨材率を 0.5 だけ大きくする。したがって、図-3 に示したような粗い製鋼スラグを使用した場合には、細骨材率が大きくなる。また、製鋼スラグの形状が角張っていれば、骨材の実積

率が小さくなり、空隙を充填するためにペースト率が大きくなることもある。粗粒率が大きかったり、角張っていたりする形状の製鋼スラグを用いた場合には、疲労耐久性が普通コンクリートよりも劣る範囲の細骨材率やペースト率の配合となることがある。疲労耐久性が要求されるような用途に用いる場合には必要に応じて使用する製鋼スラグの粒度分布や形状を調整するなどの措置をとり、細骨材率やペースト率を所定値以下に設定することが重要であると考えられる。

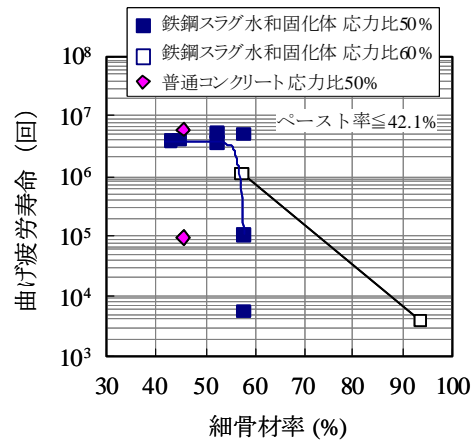


図-1 曲げ疲労寿命と細骨材率の関係

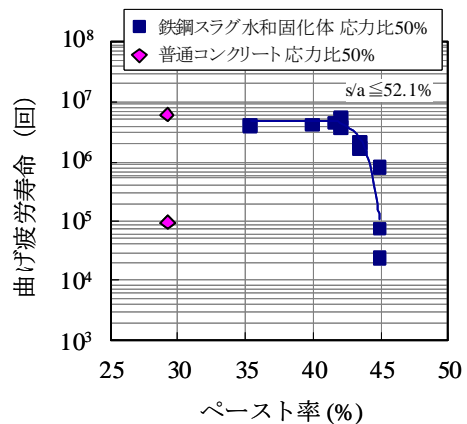


図-2 曲げ疲労寿命とペースト率の関係

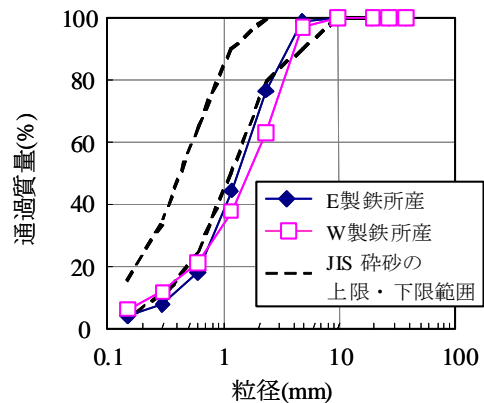


図-3 鉄鋼スラグ水和固化体へ適用可能な製鋼スラグの粒度分布の例

### 3.2 耐硫酸塩性

モルタル供試体の耐硫酸塩性は、高炉スラグ微粉末などの混和材の使用により向上することが知られている<sup>6)</sup>。鉄鋼スラグ水和固化体では、高炉スラグ微粉末のアルカリ刺激としてセメントを使用することがあるため、セメントと高炉スラグ微粉末の比(C/B)によって耐硫酸塩性が異なる可能性がある。そこで、C/Bの影響を調べた。

水結合材比を23%としC/Bを変えた鉄鋼スラグ水和固化体の10%硫酸ナトリウム水溶液への浸漬時間と相対動弾性係数の関係を図-4に示す。相対動弾性係数は、何れの配合においても4年7ヶ月経過の間において、徐々に大きくなっている。相対動弾性係数の上昇レベルは、結合材中のセメント比が小さいほど大きい。これら試験体の4年7ヶ月経過後の外観を写真-1に示す。結合材中のセメント比10%の試験体はほとんど劣化が見られないが、セメント比30%と50%の試験体は端部の劣化が見られ、その劣化レベルはセメント比50%が大きい。これらの結果より、鉄鋼スラグ水和固化体は、結合材中のセメント比が小さい、すなわち高炉スラグ微粉末比を大きくするほど耐硫酸塩性に優れると考えられる。

水結合材比が同じ配合の場合、鉄鋼スラグ水和固化体は普通コンクリートよりも圧縮強度が小さくなるため、同等の強度となる配合で比較する方が好ましい場合がある。そこで、比較となる普通コンクリートでは、水セメント比を変えて、耐硫酸塩性を評価した。普通コンクリートの10%硫酸ナトリウム水溶液への浸漬時間と相対動弾性係数の関係を図-5に示す。相対動弾性係数は、水セメント比60%では4ヶ月、30%では約5年で急激に低下し、劣化が顕著に見られた。一方、水セメント比21.7%では4年経過後も相対動弾性係数の低下が見られない。これらの結果より、普通コンクリートでは、水セメント比を小さくすることにより耐硫酸塩性が向上すると考えられる。

図-5の普通コンクリートの材齢28日圧縮強度は、水セメント比60%が36.3N/mm<sup>2</sup>、水セメント比30%が77.1N/mm<sup>2</sup>である。図-4の鉄鋼スラグ水和固化体は、42.9N/mm<sup>2</sup>から51.6N/mm<sup>2</sup>である。したがって、同等程度の強度となる水結合材比とした場合の耐硫酸塩性は、鉄鋼スラグ水和固化体が優れると判断される。

なお、同程度の水結合材比(W/B≒23%)とした場合の鉄鋼スラグ水和固化体とコンクリートの耐硫酸塩性は、約5年経過後も試験体の劣化がわずかであり、現時点では優劣の判断ができない。

### 3.3 中性化

室内で1年間暴露した試験体の中性化深さと水結合材比の関係を図-6に示す。アルカリ刺激材無添加の鉄鋼スラグ水和固化体とアルカリ刺激材として普通ポルト

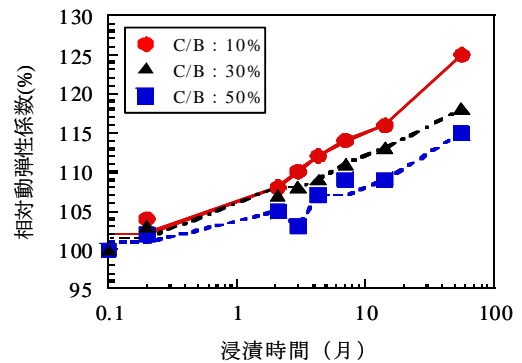


図-4 鉄鋼スラグ水和固化体の10%硫酸ナトリウム水溶液への浸漬時間と相対動弾性係数の関係

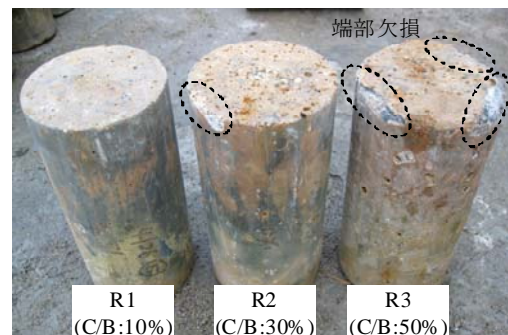


写真-1 10%硫酸ナトリウム水溶液へ4年7ヶ月浸漬後の鉄鋼スラグ水和固化体の外観

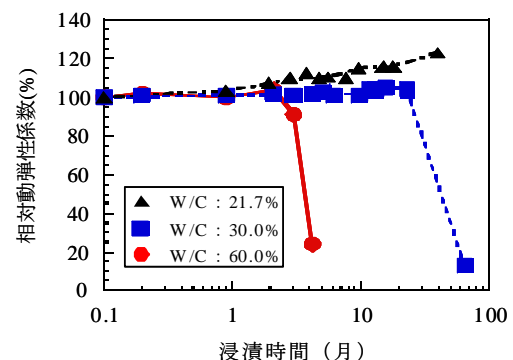


図-5 普通コンクリートの10%硫酸ナトリウム水溶液への浸漬時間と相対動弾性係数の関係

ランドセメントを添加した鉄鋼スラグ水和固化体の中性化深さは、普通コンクリートと同様に水結合材比と相関性があり、水結合材比が小さいほど中性化しにくくなる。同じ水結合材比で比較した中性化深さは、鉄鋼スラグ水和固化体が普通コンクリートよりも大きい、アルカリ刺激材としてセメントを添加し高炉スラグ細骨材を使用することにより、小さくすることができる。

コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>では中性化速度係数の予測値の算出には式(1)で表される有効水結合材比が用いられている。

$$W/B = W / (C_p + k \cdot A_d) \quad (1)$$

ここに、W/B：有効水結合材比

W：単位体積あたりの水の質量

B：単位体積あたりの有効結合材の質量

$C_p$  : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

$A_d$  : 単位体積あたりの混和材の質量

$k$  : 混和材の種類により定まる係数

フライアッシュの場合,  $k=0$

高炉スラグ微粉末の場合,  $k=0.7$

鉄鋼スラグ水和固化体は、主な結合材として高炉スラグ微粉末を使用することから、ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較して水結合材比が同じ場合でも有効水結合材比が異なることとなる。そこで、中性深さと有効水結合材比の関係を調べた。室内で1年間暴露した鉄鋼スラグ水和固化体と普通コンクリートの中性化深さと有効水結合材比の関係を図-7に示す。有効水結合材比が同じ場合の中性化深さは、アルカリ刺激材を添加した鉄鋼スラグ水和固化体が普通コンクリートよりもやや小さく、良好な耐中性化を示す。藤井らは、細骨材の種類が中性化速度に及ぼす影響について促進中性化試験により検討しており、高炉スラグ細骨材を用いるとコンクリートや鉄鋼スラグ水和固化体の中性化の進行が遅くなることを報告している<sup>2)</sup>。図-7においてアルカリ刺激材を添加した鉄鋼スラグ水和固化体は、高炉スラグ細骨材を使用している。したがって、中性化速度係数が普通コンクリートよりもやや小さいのは、高炉スラグ細骨材を使用したことによるためと思われる。

一方、アルカリ刺激材無添加の鉄鋼スラグ水和固化体の中性化深さは、同じ有効水結合材比で比較しても大きい値となっている。鉄鋼スラグ水和固化体は、アルカリ刺激材無添加でも硬化するものの強度発現が遅く、無添加の材齢7日強度は添加した場合の約1/4である<sup>8)</sup>。アルカリ刺激材無添加の鉄鋼スラグ水和固化体の中性化深さが大きい理由として、細骨材の種類が製鋼スラグであることと暴露開始までの強度発現性の違いの影響があげられる。

これらの結果より、鉄鋼スラグ水和固化体の耐中性化を向上させるには、アルカリ刺激材と高炉スラグ細骨材を使用すること、また有効水結合材比を考慮した配合設計が必要であると考えられる。

### 3.4 屋外長期暴露

屋外で暴露した材齢約10年の $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の鉄鋼スラグ水和固化体の外観を写真-2に示す。表面に亀甲状の微細なひび割れが観察される。内部を観察したところ、このひび割れはごく表面層に限定されていたことから、乾燥収縮が原因と考えられる。また、一部に $\phi 5\text{mm}$ 程度の小さなポップアウトの痕跡が見られる。ポップアウト跡には錆びが観察されることから、表面近傍に存在する製鋼スラグの中性化にともない、製鋼スラグに含まれる金属鉄が酸化膨張したことが原因であると考えられる。全体としては経年劣化が進んでいるものの大きな損傷

などが無いことから、おおむね良好であると判断される。

圧縮強度の経時変化を図-8に示す。図中の材齢12ヶ月までのデータは20℃水中養生試験体、材齢100ヶ月超のデータは屋外暴露試験体のものである。圧縮強度は、各配合とも材齢約10年の屋外暴露試験体が材齢2ヶ月から12ヶ月の20℃水中養生試験体よりも高くなっている。材齢約10年の屋外暴露試験体は、材齢28日の約2倍の強度である。また、0.15mm以下の細粒製鋼スラグを配合したY4は水結合材比が74%と大きいのが、材齢約10年の屋外暴露試験体の圧縮強度は、水結合材比が44%で細粒製鋼スラグ無配合のY1やY2と同程度の38N/mm<sup>2</sup>である。製鋼スラグは弱い水硬性を有することから、細粒の製鋼スラグの配合が強度増加に寄与していると思われる。

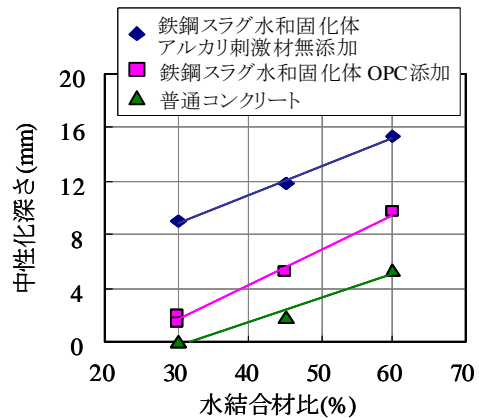


図-6 中性化深さと水結合材比の関係

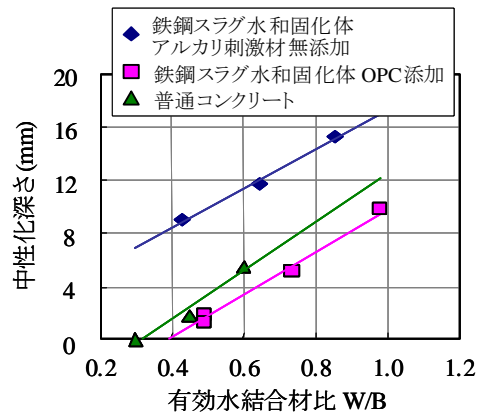


図-7 中性化深さと有効水結合材比の関係

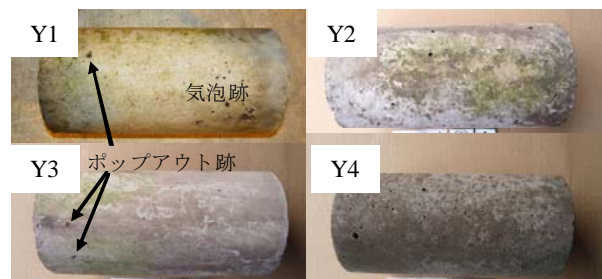


写真-2 屋外で暴露した材齢約10年の鉄鋼スラグ水和固化体の外観 ( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ )

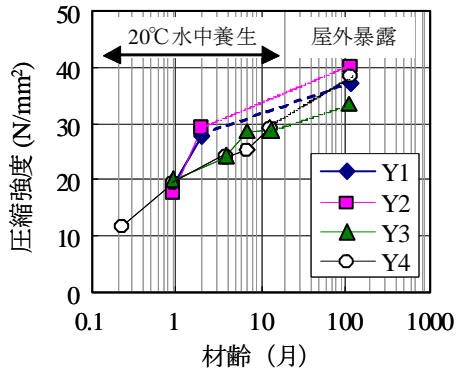


図-8 圧縮強度の経時変化

屋外暴露試験体の中性化深さの測定結果から暴露期間を基に中性化速度係数(mm/√年)を算出し、前出の式(1)で表される有効水結合材比との関係を調べた。消石灰の $k$ は1.0として計算した。中性化速度係数と有効水結合材比の関係を図-9に示す。屋外で暴露した試験体の中性化速度係数は、図-7の室内暴露試験の結果と同様に有効水結合材比と相関性が見られる。また、0.15mm以下の細粒製鋼スラグを配合したY4は、有効水結合材比が1.45と大きいにもかかわらず、一般製鋼スラグ使用で有効水結合材比が0.6から0.94の試験体よりも中性化速度係数が小さい。したがって、細粒製鋼スラグの配合は、鉄鋼スラグ水和固化体の中性化を起きにくくするのに有効である。製鋼スラグは水と接触するとアルカリ性を示すことが一般に知られている。細粒の製鋼スラグを配合することにより、製鋼スラグからアルカリ成分が多く供給され中性化が起きにくくなったと考えられる。

鉄鋼スラグ水和固化体は、結合材に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用することから、通常の配合では普通コンクリートよりも耐中性化において劣るが、アルカリ刺激材にセメントを使用したり、高炉スラグ細骨材や細粒の製鋼スラグを使用することにより中性化の進行を生じにくくすることが可能であることがわかった。

#### 4. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体は、骨材に製鋼スラグ、結合材に高炉スラグ微粉末を用いた固化体であり、必要に応じて、アルカリ刺激材としてセメントや骨材の一部に高炉スラグ細骨材などを使用する。鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ疲労耐久性、室内暴露による中性化、耐硫酸塩性の評価および材齢約10年の屋外暴露した試験体について調査をし、配合などの影響について以下の知見を得た。

- (1) 曲げ疲労寿命は、細骨材率を約52%以下かつペースト率を約42%以下の配合とすることにより、普通コンクリートと同等の耐久性が得られる。
- (2) 耐硫酸塩性は、同等程度の強度を有する普通ポルトランドセメントを使用した普通コンクリートより

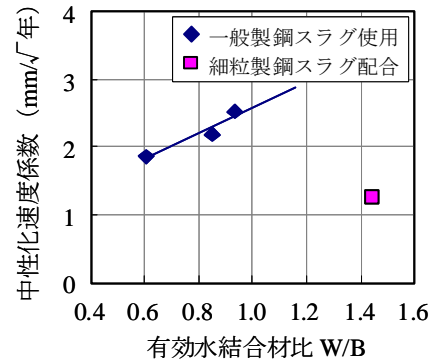


図-9 中性化速度係数と有効水結合材比の関係

も優れる。

- (3) 室内で1年間暴露した試験体の中性化深さは、アルカリ刺激材に普通ポルトランドセメント、細骨材に高炉スラグ細骨材を使用することにより、同じ有効水結合材比の普通コンクリートと同等以下にすることができる。
- (4) 屋外暴露した材齢10年の試験体は、圧縮強度の増加が確認された。また、0.15mm以下の細粒製鋼スラグの配合は、中性化を起きにくくする。

これらの結果より、鉄鋼スラグ水和固化体は、要求性能に応じて配合を適切に設定することにより、各種耐久性の向上が可能であることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 松永久宏, 小菊史男, 高木正人, 谷敷多穂: 鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発, コンクリート工学, Vol.41, No.4, pp.47-54, 2003.4
- 2) 大即信明ほか: 海洋環境下における鉄鋼スラグ水和固化体のRC部材への適用可能性に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.64, No.1, pp.186-196, 2008.2
- 3) 藤井隆史ほか: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.493-498, 2008.7
- 4) 水渡英昭ほか: 転炉滓の遊離石灰の影響による風化崩壊, 鉄と鋼, Vol.63, pp.2316-2325, 1977.12
- 5) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル(改訂版), (財)沿岸技術研究センター, p.101, 2008.2
- 6) 山下弘樹ほか: セメントの耐硫酸塩性におよぼす混和材の複合効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.621-626, 2008.7
- 7) 2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編: 本編, 土木学会, p.54, 2008.3
- 8) 松永久宏, 藤井隆史, 綾野克紀: 鉄鋼スラグ水和固化体の強度発現性に及ぼすアルカリ刺激材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1831-1836, 2009.7