

電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートの基本的性状に関する研究

宇都宮大学工学部 学生会員 ○迫田貴秀

宇都宮大学大学院 正会員 藤原浩已

宇都宮大学大学院 正会員 丸岡正知

日本コンクリート技術（株） 正会員 野島省吾

1. はじめに

我が国の鉄鋼業界の CO₂ 排出量は、日本全体の 14% 強（2008 年度）を占め、産業別排出量の第 1 位となっている。現在、CO₂ 排出量の抑制に寄与する鋼材生産として電炉法が注目され、今後増加することが予想される。これに伴い、鉄スクラップを溶解・精錬する際に生成する電気炉酸化スラグの増加が予想される。環境に配慮した資源再利用の循環型社会形成のために電気炉酸化スラグの有効活用が望まれている。

この様な背景のもと、2003 年 3 月に土木学会より「電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案）」が策定、また同年 6 月に JIS A 5011-4「コンクリート用スラグ骨材」第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材」が制定され、電気炉酸化スラグをコンクリート用細骨材に適用することが可能となった。

一方、現在の我が国のコンクリート用骨材を取り巻く情勢は、天然資源の枯渇から代替骨材資源の確保が重要な課題となっている。

そこで、本研究では電気炉酸化スラグ細骨材の中でも特殊製法で製造された、球状の粒形を有するハイパーグリッド品を用いたコンクリートの基本的性状の把握を目的として、フレッシュ・硬化性状及び耐久性に関して検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究の使用材料を表-1 に示す。また、用いた電気炉酸化スラグ細骨材（Sg）の品質を表-2 に、粒度分布を図-1 にそれぞれ示す。電気炉酸化スラグ細骨材の品質は JIS A 5011-4 の規定を満たすものである。

写真-1 は電気炉酸化スラグ細骨材の粒径 0.15mm 以下の粒子を走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて 300 倍で撮影したものである。

これより、電気炉酸化スラグ細骨材の粒子形状は球形で、骨材表面に層や亀裂は見受けられず、非常に滑らかな表面であることがわかる。

表-1 使用材料

種別	記号	名称	密度 (g/cm ³)
結合材	C	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	S1	川砂（粗目）	2.60
	S2	川砂（細目）	2.64
	Sg	電気炉酸化スラグ細骨材	3.80
粗骨材	G	碎石	2.67
混和剤	SP	ポリカルボン酸系化合物 高性能AE減水剤	1.05
	AE	樹脂酸系界面活性剤 AE助剤	1.00

表-2 電気炉酸化スラグ細骨材の品質

品質			試験値
化学成分	酸化カルシウム (CaOとして)	%	26.2
	酸化マグネシウム (MgOとして)	%	4.3
	全鉄 (FeOとして)	%	15.2
	塩基度 (CaO/SiO ₂ として)		1.8
絶乾密度			g/cm ³ 3.79
吸水率			% 0.13
単位容積質量			kg/l 2.57

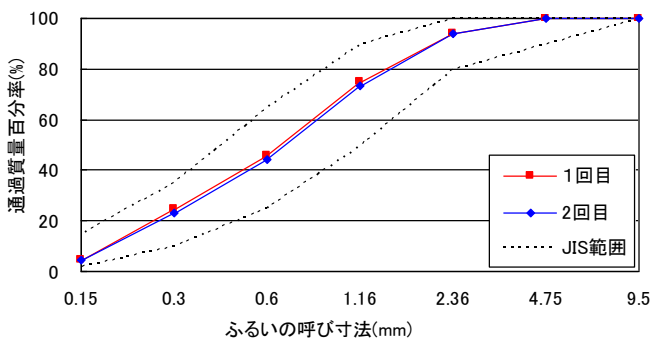


図-1 電気炉酸化スラグ細骨材の粒度分布

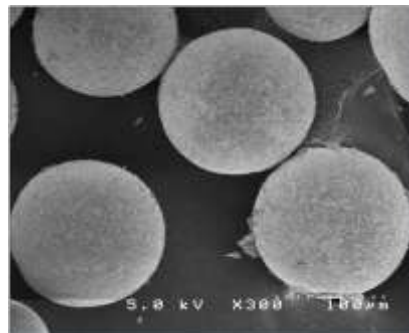


写真-1 SEM（電気炉酸化スラグ細骨材）

キーワード： 電気炉酸化スラグ細骨材 代替細骨材 ブリーディング

連絡先： 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科材料研究室

TEL 028-689-6211

2.2 配合および養生条件

配合条件を表-3 に示す。記号は、スランブー Sg 置換率ー水セメント比を意味している。目標スランブ（SL）は 8cm（土木用）及び 18cm（建築用）の 2 水準を設定し、目標空気量は 4.5%とした。

目標スランブ 8cm の配合において、Sg 置換率を 0,30,50,70,100%の 5 水準とした。また、目標スランブ 18cm の配合において、Sg 置換率を 0,15,30,50,100%の 5 水準とした。建築学会の設計施工指針によれば、建築用は Sg 置換率 30%以下を対象としているために Sg 置換率を低めに設定した。水セメント比はスランブ 8 及び 18cm の配合共に 45,50,55,60%の 4 水準とした。このうち、45,50,60%の 3 水準がフレッシュ性状及び硬化性状の評価の対象とし、55%を耐久性の評価の対象とした。なお、混和剤として高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系化合物）及び AE 助剤（樹脂酸系界面活性剤）を添加し、目標スランブ 8 ±2.5 及び 18±2.5cm、目標空気量 4.5±1.5%となるように適宜調整した。

供試体の養生は、標準養生（20℃,水中）とした。

2.3 試験項目及び方法

A.ブリーディング試験

ブリーディング試験は JIS A 1123 に準拠し、水セメント比 45,50,60%の配合で実施した。

B.圧縮強度試験

圧縮強度試験は φ10×20cm の円柱供試体を用いて JIS A 1108 に準拠し、水セメント比 45,50,60%の配合で実施した。材齢は、3 日、7 日、28 日とした。

C.凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148 に準拠し、水セメント比 55%の配合で実施した。

D.乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は JIS A 1129 に準拠し、水セメント比 55%の配合で実施した。

3. 試験結果及び考察

3.1 ブリーディング試験結果

SL8cm の配合におけるブリーディング試験結果を図-2、また、SL18cm の配合におけるブリーディング試験結果を図-3 にそれぞれ示す。これらの結果より、Sg 置換率の増加に伴いブリーディング率も増加する傾向が認められた。さらに、

表-3 配合条件

配合 番号	記号	S _g 置換率 (%)	水セメント 比(%)	細骨材比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					フレッシュ性状試験値		
							水 W	結合材 C	細骨材		粗骨材 G	スランブ (cm)	空気量 (%)	
									S(粗)	S(細)				
1	8-0-45	0	45	46	8±2.5	4.5±1.5	160	356	489	331	0	983	9.5	3.8
2	8-0-50		320					498	337	1000		6.5	4.3	
3	8-0-55		291					504	341	1013		7.0	4.4	
4	8-0-60		267					510	345	1024		6.0	4.6	
5	8-30-45	30	45				160	356	343	232	358	983	6.5	5.0
6	8-30-50		320					348	236	364	1000	7.0	4.8	
7	8-30-55		291					353	239	368	1013	6.5	3.8	
8	8-30-60		267					357	242	373	1024	7.5	4.1	
9	8-50-45	50	45				155	344	248	168	604	996	7.0	3.7
10	8-50-50		310					252	170	613	1012	8.0	4.1	
11	8-50-55		291					252	171	614	1013	8.5	3.8	
12	8-50-60		267					255	173	621	1024	9.0	4.0	
13	8-70-45	70	45				150	333	151	102	856	1008	9.0	4.5
14	8-70-50		290					155	105	878	1035	9.0	4.6	
15	8-70-55		264					156	106	889	1047	9.5	3.6	
16	8-70-60		242					158	107	897	1057	9.5	5.3	
17	8-100-45	100	45				145	322	0	0	1237	1020	9.0	3.5
18	8-100-50		135					270			1284	1059	7.0	4.1
19	8-100-55		255					1283			1059	8.0	4.8	
20	8-100-60		233					1295			1068	8.0	4.9	
配合 番号	記号	S _g 置換率 (%)	水結合 材比(%)	細骨材比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					フレッシュ性状試験値		
							水 W	結合材 C	細骨材		粗骨材 G	スランブ (cm)	空気量 (%)	
									S(粗)	S(細)				
21	18-0-45	0	45	47	18±2.5	4.5±1.5	175	389	481	326	0	929	19.0	4.9
22	18-0-50		350					490	332	947		18.5	5.3	
23	18-0-55		318					498	337	961		18.0	4.3	
24	18-0-60		292					504	341	973		19.0	4.2	
25	18-15-45	15	45				175	389	409	277	176	929	18.5	4.3
26	18-15-50		350					417	282	179	947	19.0	4.8	
27	18-15-55		318					423	286	182	961	16.0	5.3	
28	18-15-60		292					428	290	184	973	17.5	3.9	
29	18-30-45	30	45				175	389	337	228	352	929	18.0	4.9
30	18-30-50		350					343	232	358	947	19.0	4.1	
31	18-30-55		318					348	236	364	961	19.0	4.6	
32	18-30-60		292					353	239	368	973	19.0	4.2	
33	18-50-45	50	45				165	367	247	167	602	953	17.5	4.5
34	18-50-50		330					251	170	612	970	19.0	4.5	
35	18-50-55		309					252	170	613	972	17.0	4.7	
36	18-50-60		292					252	171	614	973	19.0	4.3	
37	18-100-45	100	45	48			150	333	0	0	1275	971	17.0	5.0
38	18-100-50		300					1295			985	19.5	4.3	
39	18-100-55		273					1310			997	18.5	5.0	
40	18-100-60		233					1351			1029	18.0	5.0	

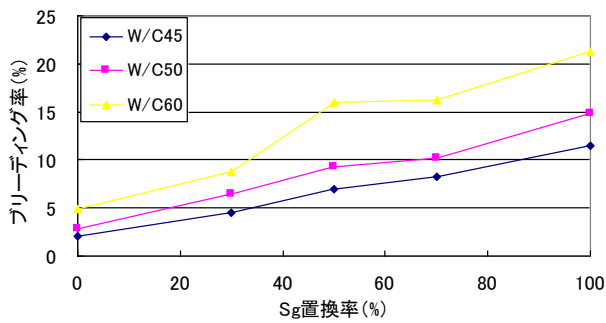


図-2 ブリーディング試験結果 (SL8cm)

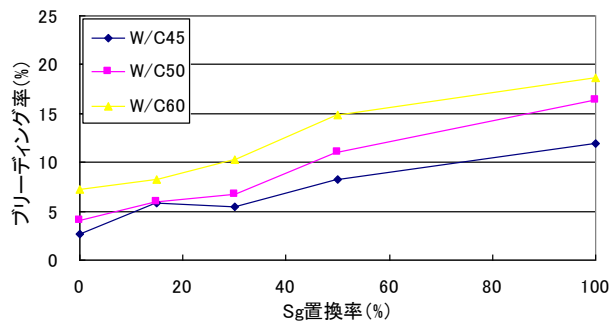


図-3 ブリーディング試験結果 (SL18cm)

Sg 置換率の増加に伴うブリーディング率は、水セメント比増大により顕著となった。Sg 置換率の増加に伴うブリーディング率の増加の理由として、電気炉酸化スラグ細骨材が高密度で、Sg 置換率の増加に伴い骨材が沈下する力がより大きくなることと、電気炉酸化スラグ細骨材の微粒分が Sg 置換率の増大に伴い少なくなるためと考えられる。

電気炉酸化スラグ細骨材の表面とセメントペースト部との付着が強固なものとならなかったことと、ブリーディング増加に伴う微細組織内の空隙の増大が強度発現性に影響を与えたものと推察される。なお、材齢に伴う強度増進性の差は、Sg 無混和の普通コンクリート及び Sg 置換した全てのコンクリートで認められなかった。

3.2 圧縮強度試験結果

SL8cm の配合における材齢毎の圧縮強度試験結果を図-4、また、SL18cm の配合における圧縮強度試験結果を図-5 にそれぞれ示す。これらの結果より、材齢に関わらずセメント水比と圧縮強度の間には良好な線形関係が認められた。また、初期強度及び材齢 28 日における電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度発現性は、Sg 無混和の普通コンクリートと比較すると同程度以下であった。これは電気炉酸化スラグ細骨材の粒子形状が影響し、本研究で用いた

3.3 凍結融解試験結果

SL8cm の配合における凍結融解試験結果を図-6、また、SL18cm の配合における凍結融解試験結果を図-7 にそれぞれ示す。これらの結果より、Sg 無混和の普通コンクリートが 90 サイクルで破壊したのに対して、電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートは相対動弾性係数 100% 程度を保っており、高い凍結融解抵抗性を示した。既往の研究¹⁾において、溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートは、蒸気養生を行うと凍結融解抵抗性が高まるとされている。今回の電気炉酸化スラグにおいても同様の結果が得

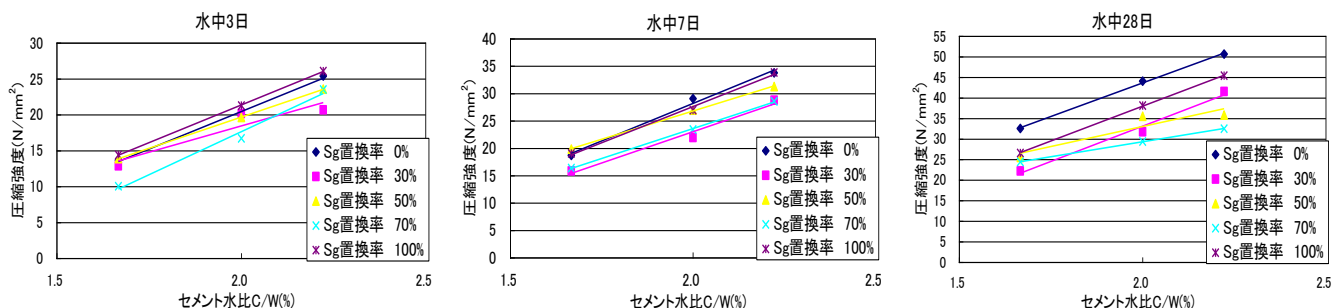


図-4 C/W－圧縮強度関係 (SL8cm)

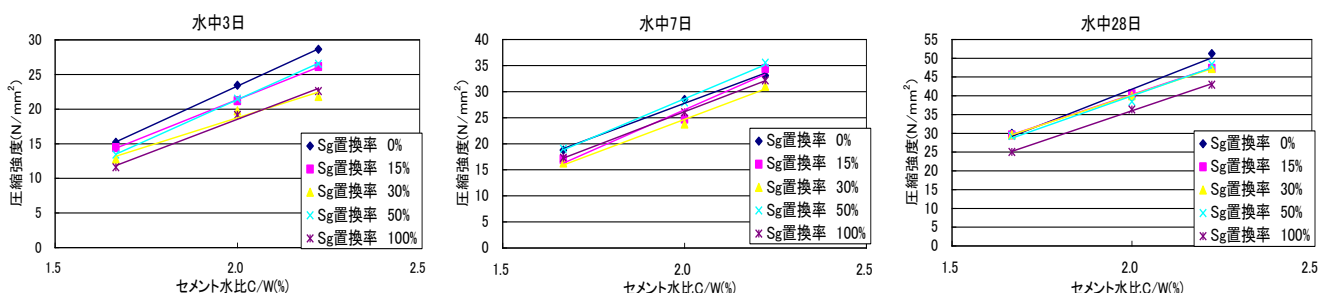


図-5 C/W－圧縮強度関係 (SL18cm)

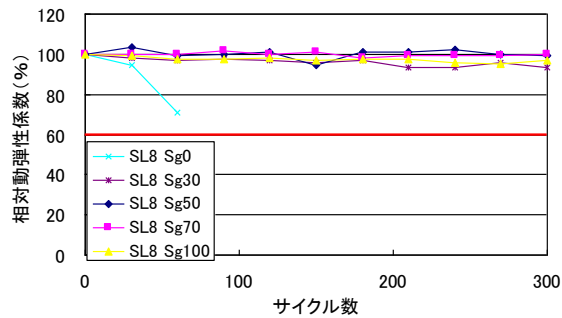


図-6 凍結融解試験結果 (SL8cm)

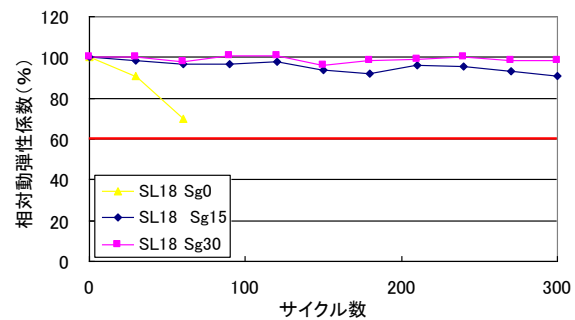


図-7 凍結融解試験結果 (SL18cm)

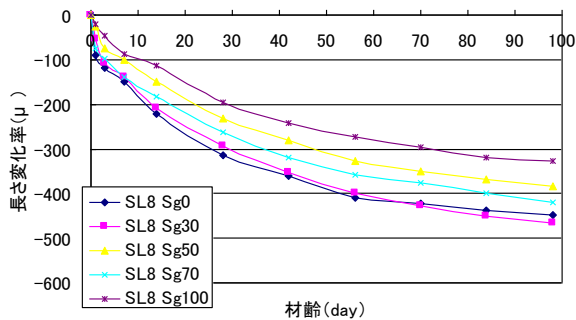


図-8 乾燥収縮試験結果 (SL8cm)

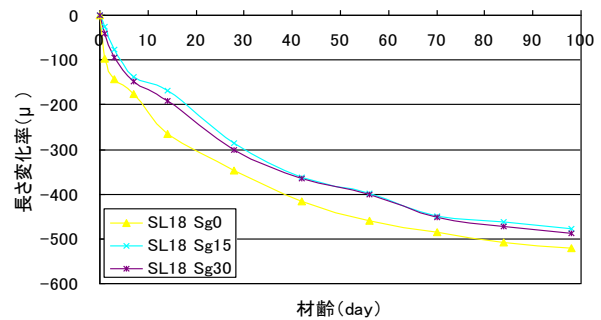


図-9 乾燥収縮試験結果 (SL18cm)

られた。また、他の既往の研究³⁾において、電気炉酸化スラグ細骨材の混入により微細な空気泡が連行されたとしており、この微細気泡がそれぞれ独立してセメント粒子及び細骨材粒子の周辺に均等に分布することで、凍結時における自由水の絶対量が減少し、移動距離が短くなることから水の膨張圧によるコンクリート組織の破壊が分散され、凍結融解の繰り返し作用に対する抵抗性が増大したと推察される。

3.4 乾燥収縮試験結果

SL8cm の配合における乾燥収縮試験結果を図-8、また、SL18cm の配合における乾燥収縮試験結果を図-9 にそれぞれ示す。これらの結果より、Sg 無混和の普通コンクリートに比べて Sg 置換率が高くなるほど長さ変化率は小さくなる傾向を示した。これは、フレッシュ性状において Sg 置換率の増加に伴い単位水量が減少したことや、電気炉酸化スラグ細骨材のヤング係数が大きく、変形抵抗性に優れることから乾燥収縮に対する抵抗性が増加したものと考えられる。さらに、硬質かつ緻密な電気炉酸化スラグ細骨材が、セメントペースト部の収縮を拘束する効果によるもの等の影響も考えられる。

4. まとめ

電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートの基本的性状として以下の知見が得られた。

(1) Sg 置換率の増加に伴いブリーディング率は増大した。また、水セメント比が大きいほど、Sg 置換率の増加に伴いブリーディング率の増加

は顕著となった。

(2) 材齢に関わらずセメント水比と圧縮強度の間には良好な線形関係が認められた。また、電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度発現性は、Sg 無混和の普通コンクリートと比較すると同程度以下となった。さらに、材齢に伴う強度増進性の差は、Sg 無混和の普通コンクリート及び Sg 置換した全てのコンクリートで認められなかった。

(3) 電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートの相対動弾性係数は 100% 程度を保ち、高い凍結融解抵抗性を示した。

(4) 電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は Sg 無混和の普通コンクリートに比べて Sg 置換率が高くなるほど長さ変化率は小さくなる傾向を示した。

【謝辞】

本研究を行うにあたって、愛知工業大学の長瀧教授に多くの助言を頂いた。また、日本コンクリート技術(株)、その他関係者各位の皆様にも多大なご協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 安田浩二ほか：下水汚泥溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの諸性状改良に関する研究，宇都宮大学卒業論文，2004
- 2) 中里侑司ほか：電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.133-134，2004,8