

石炭ガス化溶融スラグ細骨材を用いたモルタルの諸性状に関する実験的研究

宇都宮大学	学生会員	○小林 亮太郎
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
宇都宮大学大学院		山中 友仁
日本コンクリート技術(株)	正会員	篠田 佳男
日本コンクリート技術(株)		松田 敦夫

1. はじめに

我が国における電力供給割合構成は、東日本大震災の影響により、原子力発電に代わり、火力発電の割合が増加した¹⁾。しかし、既存の石炭火力発電方法では、CO₂を大量に排出するため、今後 CO₂ 削減対策が必要となる。現在、従来の石炭微粉炭発電よりも高効率とされる石炭ガス化複合発電（IGCC）の商用利用を推進している。IGCC 技術では、ガス化炉で石炭中の灰分は溶融され、石炭ガス化溶融スラグとして排出される。IGCC 技術の商用利用においてこの新たな産業廃棄物である石炭ガス化溶融スラグの有効利用方法の確立は不可欠となる。

一方、近年、環境保護の観点から天然骨材資源の採取制限により、コンクリート用骨材の枯渇および品質低下が問題となっている。そこで、石炭ガス化溶融スラグをコンクリート用骨材として利用することが可能となれば、骨材資源の安定供給に寄与できると考えられる。

本研究では、石炭ガス化溶融スラグ骨材の有効活用を目指し、細骨材としての特性および石炭ガス化溶融スラグを細骨材として用いた際のモルタルの基本的諸性状を把握し、問題点の検討を行った。

2. 石炭ガス化溶融スラグ細骨材を用いたモルタルの
基本性状

2.1. 試験概要

石炭ガス化溶融スラグ細骨材（以下 Sg）を混和したモルタルの諸性状について実験を行った。

2.2. 使用材料

本試験で用いる使用材料を表 1 に示す。また、Sg および Sg の SEM 画像を写真 1 に示す。

表 1 使用材料

種別	名称	記号	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.
水	上水道水	W	1.00	-	-
結合材	普通ポルトランドセメント	C	3.16	-	-
細骨材	砂岩系砕砂	Sc	2.64	1.33	2.73
	霞ヶ浦産砕砂	Sr	2.64	1.71	2.50
	石炭ガス化溶融スラグ細骨材	Sg	2.68	0.17	2.68
混和剤	消泡剤	DF	1.00	-	-
	高性能減水剤	SP	1.00	-	-

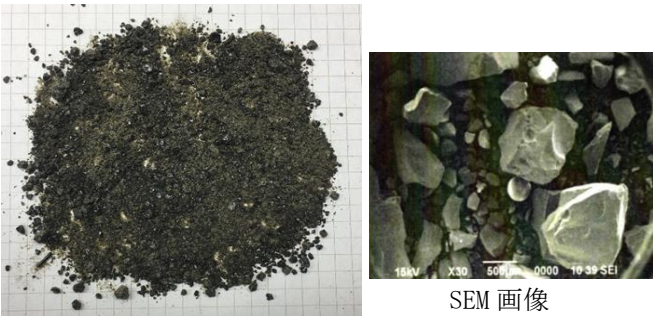


写真 1 石炭ガス化溶融スラグ細骨材

2.3. 配合条件

本試験の配合条件を表 2 に示す。

本試験における配合条件について、水セメント比 (W/C) を 35%、40%、50%、65% の 4 水準とした。各 W/C において、細骨材の全量を Sg とした場合のモルタルの 15 打フロー値が 200±10mm となるように細骨材セメント比 (S/C) を定め、これを一定として Sg 体積割合を 0～75% になるように砕砂または川砂で置換した。

なお、W/C 35% については、S/C を W/C 40% と同等とし、Sg100% のモルタル 15 打フローが目標値となる高性能減水剤 (SP) 添加率を求め、他の置換率では同一添加率とした。

キーワード IGCC、細骨材、石炭ガス化溶融スラグ

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部材料研究室 TEL.028-689-6211 E-mail:t142811@cc.utsunomiya-u.ac.jp

表 2 配合条件

C種	砂種	W/C	S/C	Sg/S	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加率(%)	
					W	C	Sr	Sc	Sg	DF	SP
普通	砕砂	35%	1.4	0%	283	819	0	1146	0	0.1	0.4
				50%				573	582		
				75%				287	873		
				100%				0	1164		
		40%	1.4	0%	314	786	0	1100	0		
				50%				550	559		
				75%				275	838		
				100%				0	1117		
		50%	2.3	0%	290	581	0	1336	0		
				50%				668	678		
				75%				334	1017		
				100%				0	1356		
		65%	3.5	0%	277	428	0	1496	0		
				50%				748	760		
				75%				374	1136		
				100%				0	1519		
	川砂	35%	1.4	0%	283	819	0	1146	0	0.1	0.4
				50%				573	582		
				75%				287	873		
				100%				0	1164		
		40%	1.4	0%	314	786	0	1100	0		
				50%				550	559		
				75%				275	838		
				100%				0	1117		

2. 4. 試験項目

(1) フレッシュ性状試験

モルタル 15 打フロー試験は、JIS R 5201 に準拠した。
ブリーディング率試験は、JSCE-F 522 に準拠し、水セメント比 50% の場合のみ実施した。

(2) 硬化性状試験試験

圧縮強度試験は、JSCE-G 505 に準拠した。
曲げ強さ試験は、JIS R 5201 に準拠した。曲げ強さ試験は水セメント比 50% の場合のみ実施した。養生条件は、いずれも 20℃ 水中養生とし、材齢は、圧縮強度試験については 7、28、91、182 日、曲げ強さ試験については 28 日とした。

(3) 乾燥収縮による長さ変化率

乾燥収縮による長さ変化率は、JIS A 1129-3 に準拠した。供試体打設から 24 時間後に脱型し、材齢 7 日まで 20℃ 水中養生を行い、養生後の供試体の測定値を基長とした。測定および供試体の保存は、室温 20±3℃、相対湿度 60±5% に調整した恒温恒湿室内で行った。

3. 試験結果

3. 1. フレッシュ性状試験結果

15 打フロー試験結果について、Sg 置換率 100% におけるモルタル 15 打フロー値を 100% とした場合の各 Sg 置換率のモルタル 15 打フロー値との比を 15 打フロー値比とし、これと Sg 置換率の関係を図 1 に示す。

砕砂または川砂に対して Sg を置換した場合、いずれも Sg 置換率の増大に伴い、15 打フロー値比は大きくなる傾向が認められた。これは砕砂および川砂に比べ写真 1 に示すように表面が平滑であるため Sg は拘束水量

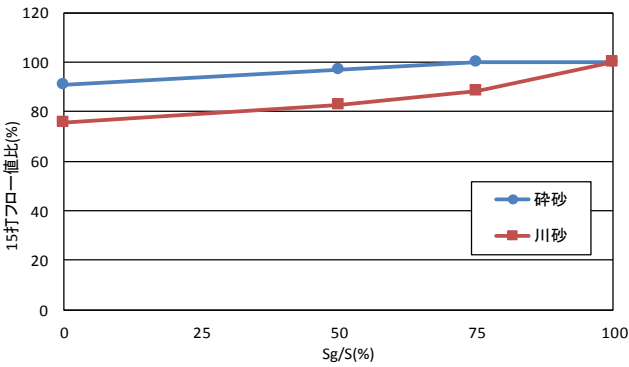


図 1 フロー値と置換率の関係(W/C=50%)

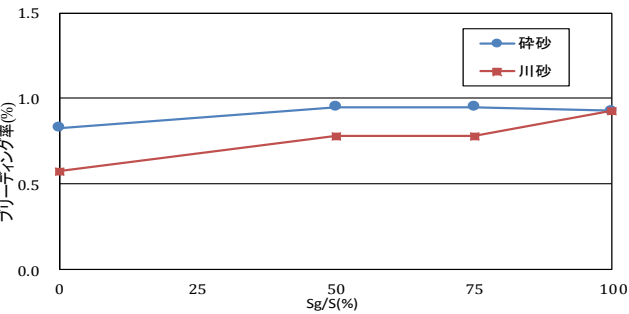


図 2 ブリーディング率と置換率の関係
(3 時間,W/C=50%)

が少なく、モルタル中における余剰ペースト量および余剰水が増加することで、Sg 置換率の増加に伴い流動性が向上すると考えられる。そのため、普通のコンクリートにおいて Sg を用いる際、無使用と比べて同一スランプを得るための単位水量を減少させることが可能であると考える。

ブリーディング試験の結果を図 2 に示す。Sg を置換した 3 水準において、Sg 置換率 0% のものと比べ、3 時間後におけるブリーディング率はやや大きくなることが確認された。

3. 2. 硬化性状試験結果

モルタルの圧縮強度試験結果について、砕砂に対して Sg を置換した場合を図 3 に、川砂に対して Sg を置換した場合を図 4 にそれぞれ示す。いずれの場合も Sg 置換率が大きくなると圧縮強度は低下した。また、曲げ強さ試験結果を図 5 に示す。曲げ強さは、概ね Sg 置換率の増加に伴い低下する傾向が認められた。これらの原因として、Sg の骨材表面が滑らかであることからセメントペーストとの付着力が低く界面の剥離が生じやすいこと、砕砂および川砂に比べ Sg の骨材強度が低いことが考えられる。しかし、フレッシュ性状試験結果において Sg の混和により配合設計上、単位水量を減じる

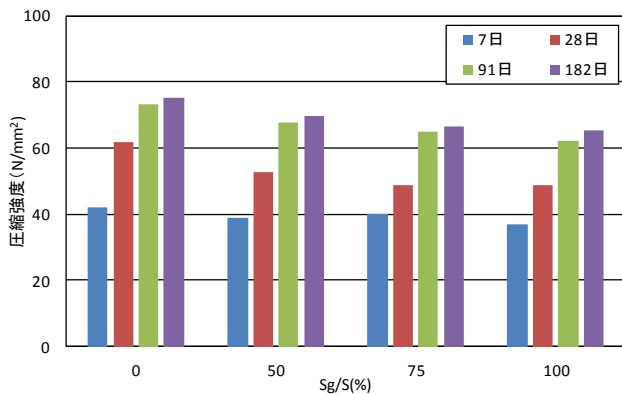


図3 圧縮強度と置換率の関係(砕砂, W/C=50%)

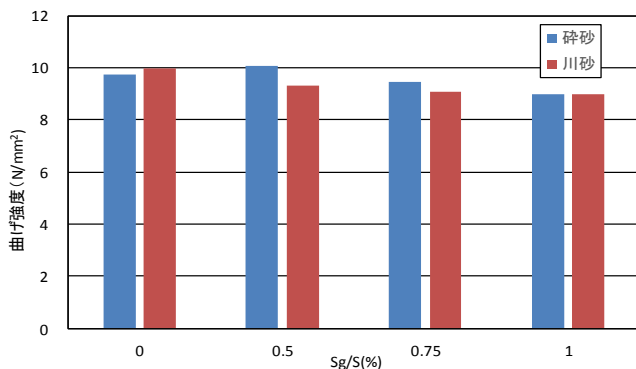


図5 曲げ強度と置換率の関係(28日, W/C=50%)

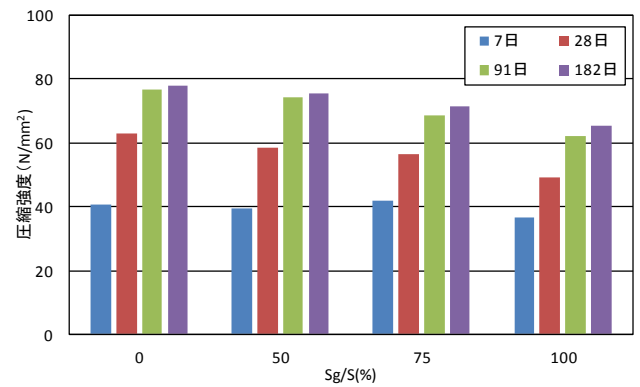
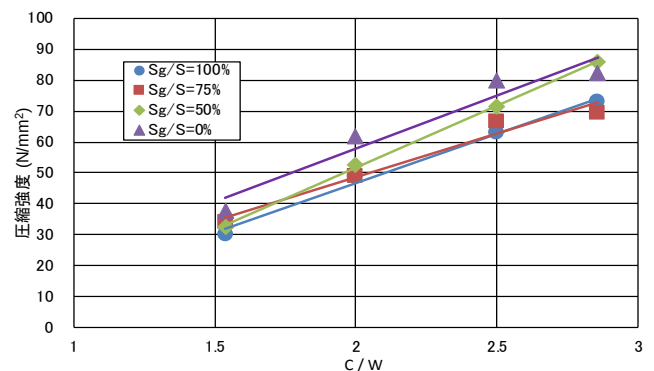


図4 圧縮強度と置換率の関係(川砂, W/C=50%)

図6 セメント水比と圧縮強度の関係
(28日, 砕砂置換)

ことが可能であることから、強度低下の影響は緩和できると考えられる。セメント水比と圧縮強度の関係を図6に示す。Sgの置換率に関わらず、セメント水比と圧縮強度は概ね直線関係で表すことができ、セメント水比の増加に伴い圧縮強度は増加することが認められた。これらより、Sgをモルタルに使用した場合においても、普通骨材やほかのスラグ骨材の場合と同様に、セメント水比を元にした強度設計が可能であるといえる。

3.3. 乾燥収縮による長さ変化率について

砕砂に対してSgを置換した場合を図7に、川砂に対して置換した場合を図8にそれぞれ示す。いずれもSg置換率の増大に伴い乾燥収縮が小さくなる傾向が認められた。これはSg使用モルタルでは供試体成形時、硬化過程において、ブリーディング量がやや増加する傾向を示すため、これにより硬化体中の自由水が減少し乾燥作用による蒸散水分量が少なくなり、収縮現象の主原因となる間隙中の余剰水が減少するためであると考えられる。

4. 骨材の物理的特性に関する試験

圧縮強度および長さ変化試験の結果から、それぞれの結果には、Sgの強度特性が影響していると考えられ

ることから、次に示す簡易的な骨材試験を行った。

4.1. 骨材強度指標値試験および破砕値試験

Sgの強度および骨材としての弾性変形能力を簡易に把握するため、内径33mm、高さ88mmの鋼製容器を用い、Sg、砕砂および川砂について以下に示す骨材強度指標値測定試験を行った。ここで骨材強度指標値とは、圧縮力に対する変形抵抗性と定義し、骨材強度指標値が大きいほど変形抵抗性が高いことを示すこととした。試験手順を以下に示す。

細骨材試料を絶乾状態とし、ふるいわけにより1.2～2.5mmの範囲の粒子を抽出し、この試料60gを鋼鉄製容器につめ、上面を指でならす。その後鋼製の加圧用丸棒(φ32mm)を挿入し、精密万能試験機により荷重P(kN)を加えながらレーザー変位計で変位d(mm)を読み取り、最大90kNまで荷重を加えた。測定値から荷重—変位曲線を描き、その比例変化を示す部分の傾きを骨材強度指標値I(kN/mm)とし以下の式[1]により求めた。

$$\text{骨材強度指標値 } I(\text{kN/mm}) = \text{荷重} \triangle P(\text{kN}) / \text{変位} \triangle d(\text{mm}) \quad [1]$$

試験後の試料を0.30mmふるいおよび0.15mmふるい

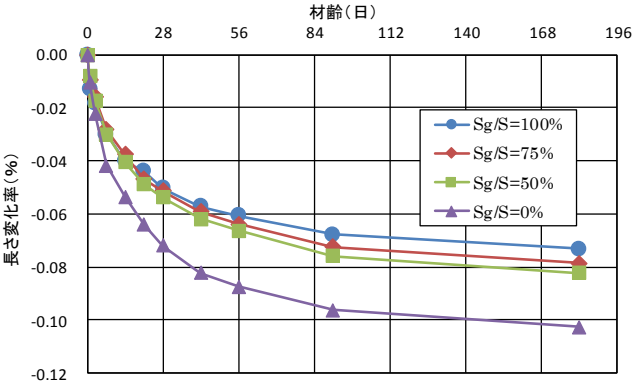


図 7 長さ変化率(砕砂, W/C=50%)

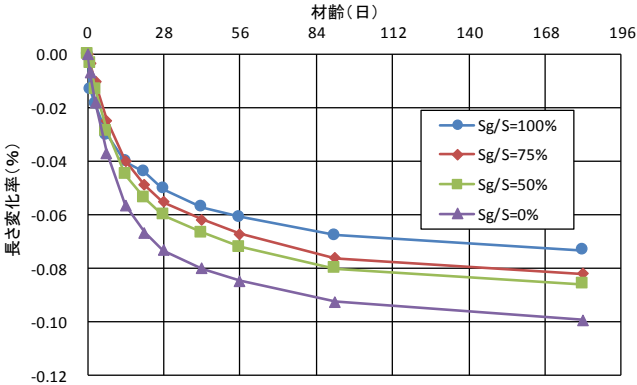


図 8 長さ変化率(川砂, W/C=50%)

表 3 骨材強度指標値試験結果

	Sg	Sc	Sr
骨材強度指標値	18.2	13.7	13.9
0.30破砕値(%)	29.5	21.7	21.8
0.15破砕値(%)	16.0	13.0	12.5

でふり、それぞれのふりの通過量から 0.30 破砕値 (%) および 0.15 破砕値 (%) を算出した。ここでの破砕値とは骨材試料の破壊の程度を表すものであり、破砕値が大きいほど骨材試料が破壊されていることを示す。それぞれの破砕値は以下の式により求めた。

$$0.30 \text{ 破砕値}(\%) = B_{0.30}/A \times 100 \quad [2]$$

$$0.15 \text{ 破砕値}(\%) = B_{0.15}/A \times 100 \quad [3]$$

ここに、A：破砕した試料質量(=60g)

$B_{0.30}$ ：0.30mm ふりを通過した試料質量(g)

$B_{0.15}$ ：0.15mm ふりを通過した試料質量(g)

4. 2. 骨材試験結果

Sg の骨材強度指標値測定試験により得られた荷重—変位関係を図 9 に、各指標値を表 3 にそれぞれ示す。試験結果より川砂および砕砂に比べ Sg の骨材強度指標値が大きいことから外力による変形に対する抵抗性が高いことが認められた。また、各材料の破砕値から Sg は砕砂および川砂に比べ骨材強度が低いことが認められた。

5. まとめ

- (1) Sg 混和モルタルでは流動性は向上し、同一スランプを得るための単位水量を減じることができた。
- (2) Sg を混和した場合、モルタルの圧縮強度、曲げ強さは Sg 置換率の増加に伴い減少した。
- (3) Sg 混和モルタルの乾燥収縮による長さ変化は、

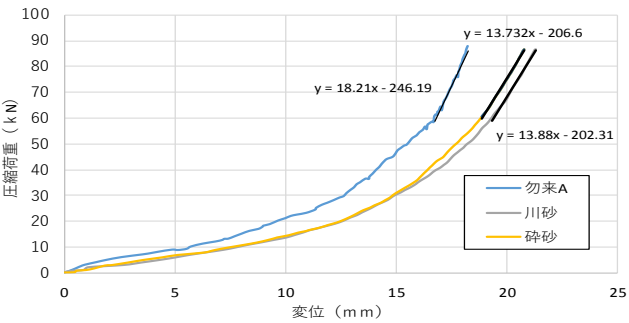


図 9 骨材の圧縮強度測定時の圧縮荷重と変位の関係

Sg 置換率増加に伴い減少する。これは Sg 混和により、ブリーディング量が増加し自由水が減少したためと考えられる。

(4) Sg は、硬化性状において、砕砂、川砂と比較してモルタルの圧縮強度、曲げ強さにおいては若干劣るものの、フレッシュ性状においては単位水量の低減などの優れた点が見られたため、モルタルおよびコンクリート用細骨材としての利用が十分可能であると考えられる。

謝辞：

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。また、一般財団法人石炭エネルギーセンター (JCOAL) には石炭ガス化溶融スラグの提供と試験実施の機会・サポートを頂き、心より感謝申し上げます。

参考文献：

1) Sustainable Japan サステナビリティニュースメディア：【エネルギー】日本の発電力の供給量割合
<https://sustainablejapan.jp/2016/05/18/electricity-proportion/1396>