

論文 石炭ガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用に関する基礎的研究

北辻政文^{*1}

要旨：石炭ガス化複合発電は、蒸気タービンにガスタービンを組み合わせた高効率石炭火力発電技術である。本研究は、この発電システムで生成された石炭ガス化溶融スラグの品質とこれを用いたコンクリートの性質を明らかにし、さらに実証試験の一環としてプレキャスト鉄筋コンクリート製品を作製し、実用の可能性を検討したものである。研究の結果、スラグの物理的、化学的性質、および環境安全性は問題なく、良質の骨材であり、これを用いたコンクリートの強度特性、耐凍害性能は良好であることが明らかとなった。

キーワード：石炭ガス化溶融スラグ、細骨材、鉄筋コンクリート製品、圧縮強度、耐凍害性

1. はじめに

石炭は化石燃料資源の中で最も埋蔵量が多く、資源の乏しい我が国において、その価格および供給の安定性から利用価値の高い重要な発電用燃料と位置づけられている。しかし、現在の微粉炭焚きの火力発電所は重油・LNG 等と比較して、発電効率が悪く、CO₂等の環境負荷物質の排出量が多い。そこで、電力各社が中心となり国家プロジェクトとして、発電効率を高めるために従来の蒸気タービンにガスタービンを組み合わせた石炭ガス化複合発電を推進している。これは、21 世紀の高効率石炭火力発電技術として中長期に導入拡大を図るべき技術と考えられている。

さらに、微粉炭焚きの火力発電所では、産業副産物である石炭灰が大量に発生し、その処理が大きな問題となっているが、石炭ガス化複合発電では石炭灰が発生せず、石炭ガス化溶融スラグ（以下、溶融スラグ）として排出される。溶融スラグは建設材料として利用の可能性が高く、これまでも高炉、フェロニッケル、銅等

の金属系スラグが JIS 化され、最近では、ごみ溶融スラグ¹⁻²⁾がコンクリート材料として利用され始めている。

本研究では、石炭ガス化複合発電で生成される溶融スラグ自身の品質とこれを用いたコンクリートの性質を明らかにし、さらにコンクリート製品工場の実機を用いてプレキャスト鉄筋コンクリート製品を製作し、各種試験を実施したので、この結果も合わせて報告する。

2. 試験に用いた溶融スラグの品質

溶融スラグはやや粒径が大き過ぎることとスラグ中の脆弱部分（亀裂）の影響を減少させるため、破碎処理を施し試料とした。

2.1 溶融スラグの化学特性

スラグの化学組成を高炉スラグの平均的値とともに表-1に示す。溶融スラグはSiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃およびCaOの4成分が多く、その合計は90%以上を占め、他成分は微量であることがわかる。

コンクリート用高炉スラグ骨材（JIS A 5011）において有害となる化学成分量（質量%）は

表-1 スラグの化学成分

種 類	化 学 成 分 (%)												
	igloss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl ⁻
溶融スラグ	<0.1	30.4	11.5	11.4	40.0	3.16	0.67	1.34	0.42	0.52	0.39	0.01	—
高炉スラグ*	—	33.3	14.1	0.45	41.9	6.3	0.04	0.21	0.33	0.98	—	0.33	0.003

*1991～93年の平均値

*1 宮城大学 食産業学部環境システム学科助教授 博（農）（正会員）

CaO $\leq$ 45.0, SO₃ $\leq$ 0.5, FeO $\leq$ 3.0 と規定されているが、本研究のスラグにおいては鉄分 (Fe₂O₃ を FeO に換算) と硫黄分がやや多く含まれている。鉄は、形態によってコンクリートの汚れの原因となる可能性があるため、今後長期試験等により、品質へ及ぼす影響を確認しておく必要がある。また、硫黄分(SO₃)については、水砕スラグの場合、ガラス中に硫黄分が分散され安定するので、悪影響を及ぼさないと考えられる²⁾。

溶融スラグは、溶融状態から水で急冷され、非結晶化のガラスとなる。そのため結晶エネルギーを内在し、潜在水硬性を有する可能性がある。

本研究で使用したスラグの塩基度は 1.80 と高く、潜在水硬性を有する可能性が高く、溶融スラグを用いたコンクリートの長期強度は大きくなることが期待される。

2.2 溶融スラグ骨材の物理的性質

骨材試験結果を JIS の砕砂の規定値とともに表-2 に示す。

溶融スラグは、普通骨材に比べて密度が大きく、吸水率が小さい特徴を有するが、コンクリート用細骨材として大きな問題となる点の一つもなく、すべての項目において JIS の規格値を満足している。

また、ガラス質でシリカを多く含む骨材はアルカリシリカ反応の危険性があり、フェロニッケルスラグの中にはアルカリシリカ反応をおこすものがあることが報告³⁾ されているが、本実験に用いた溶融スラグは無害の判定であった。

2.3 有害物質の溶出

溶融スラグがコンクリート用細骨材として利用されるためには、その品質とともに安全性が確保されなければならない。すなわち、有害物質の溶出量が環境基準値以下でなければならない。

ごみ溶融スラグに関する環境基準を標準情報 (TR)²⁾ では最も厳しい土壤環境基準を判定基準とし、表記した 6 項目を対象有害物に定めているので、ここではこれを運用した。表-3 にスラグからの重金属の溶出試験結果を示す。溶融

表-2 スラグ骨材試験結果

試験項目	溶融スラグ	砕砂 JIS A 5005
ふるい分け (粗粒率)	2.69	—
絶乾密度 (g/cm ³)	3.08	2.5 以上
吸水率 (%)	1.02	3.0 以下
単位容積質量 (kg/m ³)	1,963	—
実積率 (%)	63.4	—
微粒分量 (%)	5.0	7.0 以下
密度 1.95 g/cm ³ の液体に浮く粒子 (%)	0.0	—
安定性 (%)	0.2	10.以下
塩化物 (%)	0.000	—
Rc(mmol/l) ASR* Sc(mmol/l)	26 5	Rc>Sc

*アルカリ・シリカ反応

表-3 重金属の溶出試験結果

計量物質	単位	溶融スラグ	土壤環境基準
水銀	mg/l	<0.0005	$\leq$ 0.0005
カドミウム	mg/l	<0.0005	$\leq$ 0.01
鉛	mg/l	<0.005	$\leq$ 0.01
ヒ素	mg/l	<0.001	$\leq$ 0.01
6 価クロム	mg/l	<0.01	$\leq$ 0.05
セレン	mg/l	<0.002	$\leq$ 0.01

スラグは、すべての項目においていずれも基準値以下であり、環境へ与える負荷は極めて小さいことが判明した。

3. スラグを用いたコンクリートの性質

3.1 供試体の作製方法および試験項目

セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³) を用いた。粗骨材は最大寸法 20mm の碎石 (表乾密度 2.77 g/cm³, 吸水率 1.50%, 粗粒率 6.83) を用いた。細骨材は川砂 (表乾密度 2.59 g/cm³, 吸水率 2.48%, 粗粒率 2.54) と表-2 に示した粒度調整したスラグを用いた。また混和剤はリグニンスルホン酸、ポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤とアルキルアリルスルホン酸を主成分とする空気調整剤を用いた。

配合は土木用硬練りコンクリートの標準的な水セメント比 55%, スランプ 8 $\pm$ 1.5cm, 空気量 6 $\pm$ 0.5%に統一した。細骨材に対するスラグ置換

表-4 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状試験結果

配合名	最大寸法 G_{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								フレッシュコンクリートの性状試験結果	
				水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G	AE減水剤 AD	AE剤 AE	消泡剤	スランプ SL (cm)	空気量 Air (%)
						スラグ	山砂						
S0	20	55	44.4	158	287	-	794	1042	2.98	0.57	-	8.5	5.9
S25			44.9	160	291	242	603	1031	2.91	-	1.42	7.0	6.5
S50			45.4	161	293	485	406	1012	2.93	-	1.58	7.5	5.9
S75			45.9	164	298	735	205	1002	2.98	-	1.74	7.0	5.6
S100			46.4	168	305	957	-	993	3.05	-	1.92	7.0	5.7

率は0, 25, 50, 75 および 100%とした。これらの配合をフレッシュコンクリートの性状試験結果とともに表-4 に示す。

試験項目は、ブリーディング試験 (JIS A 1123 (置換率 0,50,100%)), 凝結試験 (JIS A 1147 (置換率 0,50,100%)), 圧縮強度試験 (JIS A 1108 (材齢 3,7,28, 91 日)), 静弾性係数試験 (JIS A 1149 (材齢 28 日)), 曲げ強度試験 (JIS A 1106 (材齢 28 日)), 割裂引張強度試験 (JIS A 1113 (材齢 28 日)) および凍結融解試験 (ASTM C 666 A 法 (置換率 0,50,100%)) である。圧縮強度, 静弾性係数および引張強度試験用の供試体は $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の円柱とし, 曲げ強度試験および凍結融解試験用は $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ の角柱供試体とした。脱型は打設翌日に行い, 養生はすべて標準養生とした。

3.2 結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

スラグ置換率が高くなるにつれ, 空気量が増加する傾向にあった。これは今回用いたスラグの微粒分がやや多く, 練り混ぜ時にエントラプトエアが多く巻き込まれたものと考えられる。そこで, 消泡剤を用いて目標空気量の範囲に入るよう調整した。なお, スラグの骨材修正係数はスラグ置換率 25,50,75,100%において, それぞれ 0.2,0.3,0.4,0.5%程度であった。

コンクリートのブリーディング試験結果を図-1 に示す。ブリーディング量は, スラグ置換率が高くなるほど増加する傾向が見られた。これはスラグ表面が滑らかでガラス質になっているため, 吸水率が小さく親水性が低いことによるものと考えられる。

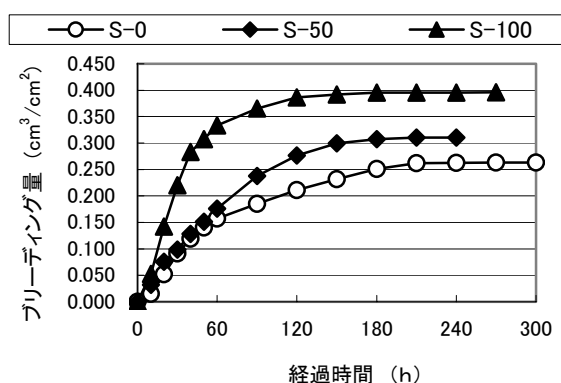


図-1 ブリーディング試験結果

表-5 コンクリートの凝結試験結果

コンクリートの種類	始発時間 (時:分)	終結時間 (時:分)
S-0	6 : 00	8 : 10
S-50	7 : 30	10 : 30
S-100	8 : 10	12 : 00

凝結試験結果を表-5 に示す。スラグ置換率が高くなるにつれて始発時間, 終結時間の双方においても遅くなる傾向がみられた。このため, 高置換率のスラグコンクリートを寒中コンクリートに使用する場合, 初期養生において注意する必要がある。

(2) 硬化コンクリートの強度特性

スラグ置換率と圧縮強度の関係を図-2 に示す。スラグを置換したコンクリートの圧縮強度は, 材齢, 置換率にかかわらず, ほぼ同等かそれ以上の強度を示しており, スラグを置換した悪影響は見られなかった。材齢 28 日以降では, スラグ置換率にかかわらずスラグコンクリート

が普通コンクリートの強度を上回っており、長期強度の伸びが大きくなっていることがわかる。これは、化学組成の項でも述べたように、熔融スラグの塩基度が高く、潜在水硬性の影響による強度発現が付加されたことによる考えられる。

引張強度と圧縮強度の関係グラフを図-3、曲げ強度と圧縮強度の関係グラフを図-4に示す。一般にコンクリートの引張強度は圧縮強度の1/9～1/13の範囲内に、曲げ強度は圧縮強度の1/5～1/7の範囲内にある。各スラグを用いたコンクリートの引張強度は、いずれも普通コンクリートのそれに比べ、やや低い強度となっているが、その程度は比較的小さい。また、各スラグを用いたコンクリートの引張強度は圧縮強度の1/13以上に分布していることが認められた。曲げ強度特性に関しては、普通コンクリートと同等であると判断できる。

図-5にスラグ置換率と静弾性係数の関係を示す。スラグを用いたコンクリートの静弾性係数は、置換率100%においてやや低下したものの全体的にはスラグ置換率が高くなるほど大きくなる傾向が見られた。この結果は、既報¹⁾の研究と一致している。

(3) 硬化コンクリートの耐凍害性

寒冷地コンクリートにおいて、耐凍害性が高いことは不可欠な条件である。置換率50%、100%のスラグコンクリートおよび普通コンクリートについて凍結融解試験を行った。試験結果を図-6に示す。

凍結融解抵抗性の判断基準として、(社)土木学会コンクリート標準示方書では気象条件や断面の厚さおよび露出状態の違いにより300サイクル終了時の相対動弾性係数を、60、70および85%以上としている。同様に(社)日本建築学会のJASS 5では、最も厳しい環境における基準を60%以上としている。また、これらの基準の試験方法はJIS A 1148 A法であり、ASTM C 666 A法に比べて試験開始までの養生期間が14日間長くなっているため、ASTM C 666 A法は過酷な条件であるといえる。そこで本研究の場合、仮に

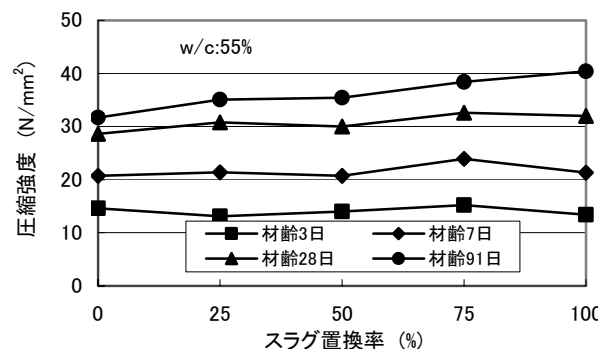


図-2 圧縮強度とスラグ置換率の関係

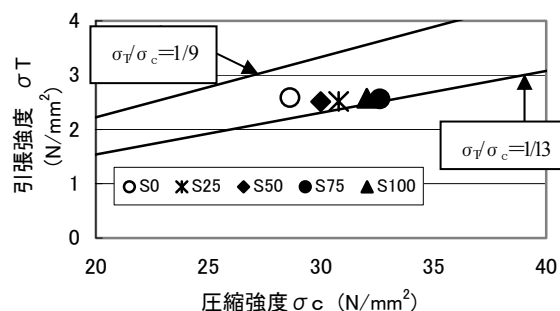


図-3 引張強度試験

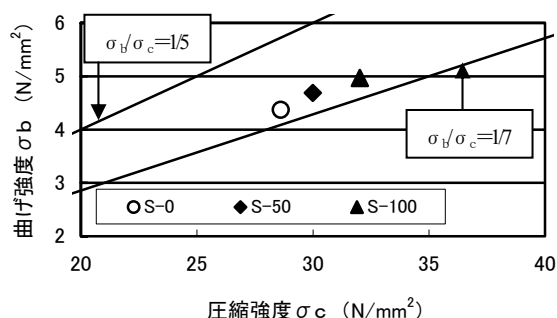


図-4 曲げ強度試験

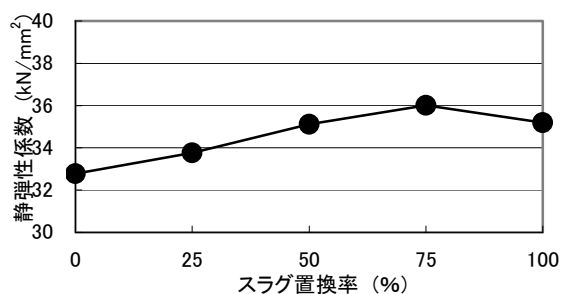


図-5 静弾性係数試験結果

60%を判定基準として試験結果をみると、スラグを置換したコンクリート S-50、S-100 はブリーディング量が多かったにもかかわらず、共に80%前後と高い値を示している。これに対して、

普通コンクリート S-0 の値がやや低下しているが 60%は満足している。これらのことから、耐凍害性に及ぼすスラグ混入の悪影響は認められないといえる。

4. スラグを用いたプレキャスト鉄筋コンクリート製品の試作

4.1 材料および試験方法

前章までの室内試験に引き続き、コンクリート二次製品工場の実機を用いて流し込み法によりプレキャスト鉄筋コンクリート製品を作製し、実用の可能性について検討した。

配合設計では細骨材(砕砂:表乾密度 2.60g/cm^3 , 吸水率 1.29%, 粗粒率 2.84)に対するスラグ置換率を 0, 25 および 50%とした。すべての配合において水セメント比 46.5%, スランプ $8.0\pm 2.5\text{cm}$, 空気量 $5.0\pm 1.0\%$ に統一した。これらの配合を表-6 に示す。製品工場における配合の種類は少なく、当工場出荷される製品の大部分は、この配合が用いられている。試作したコンクリート製品は、幅 40cm, 高さ 40cm, 長さ 2m の道路用鉄筋コンクリート側溝 2-400A 種 (JIS A 5345) である。コンクリートの養生は工場で行われている蒸気養生(最高温度: 65°C) である。いずれの供試体も型枠にコンクリートを詰め、テーブルバイブレータを用いて 60 秒間締め固めて、型枠のまま蒸気養生を行った。約 24 時間後に脱型し、試験材齢 (14 日) まで屋外に放置した。なお、比較のために強度試験の供試体は標準養生も行った。試験項目は、圧縮強度 (JIS A 1108), 静弾性係数 (JIS A 1149), 凍結融解試験 (ASTM C 666 A 法), 製品の曲げ強度試験 (JIS A 5363: 板状部材の単純はり形式載荷試験) である。

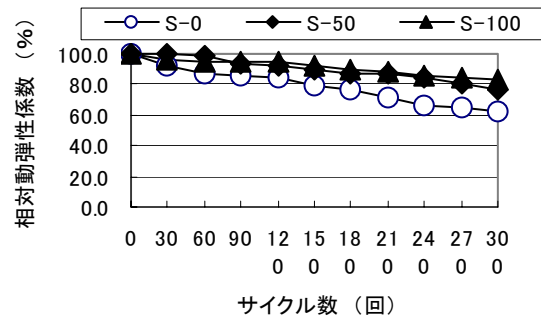


図-6 凍結融解試験

圧縮強度および静弾性係数試験用の供試体は $\phi 10\times 20\text{cm}$ の円柱とし凍結融解試験用は $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体とした。

4.2 実験結果および考察

練上り後のフレッシュコンクリートの性状試験値は目標範囲内であり、作業性においてスラグの混入の影響は認められなかった。脱型後の製品にはジャンカ, 材料分離および色むら等はみられず外観上とくに問題はなかった。

圧縮強度試験結果, 静弾性係数試験結果を表-7 に示す。圧縮強度の設計基準強度は 24.0N/mm^2 である。標準養生, 蒸気養生のすべての置換率において設計基準強度を満足していた。静弾性係数は, 前章と同様にスラグを置換することにより, 静弾性係数が若干高くなる傾向がみられた。

図-7は製品による曲げ試験結果を示したも

表-7 強度試験結果

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm^2)		静弾性係数 (kN/mm^2)	
	標準 (28 日)	蒸気 (14 日)	標準 (28 日)	蒸気 (14 日)
S-0	26.3	26.8	26.2	27.7
S-25	36.2	33.8	31.7	30.4
S-50	41.2	31.4	33.9	30.2

表-6 コンクリート製品の配合

配合 名	最大寸 法 Gmax (mm)	スラン プ SL (cm)	空気量 A i r (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材 率 s / a (%)	単位量 (k g / m ³)						
						水 W	セメ ント C	細骨材 S		粗骨材 G	AE 減 水剤 AD	AE 剤 AE
								スラグ	砕砂			
S-0	20	8.0±2.5	5.0±1.0	46.5	44.0	150	323	-	798	1075	1.62	3A
S-25					44.5	155	333	207	622	1053	1.67	2A
S-50					45.0	155	333	437	437	1042	1.67	3A

のである。コンクリート側溝のJIS規格値は56.0kNである。いずれのスラグコンクリートも普通コンクリートの強度を上回り、規格値を満足している。

凍結融解試験の養生方法は、前章とやや異なる。すなわち、前章では試験開始までの14日間は標準養生であり、供試体は湿潤状態にあるが、本章では製品と同一養生をしており、蒸気養生終了後に屋外気中養生を行っているため供試体は乾燥し、飽水度が小さい。そこで、その影響を抑えるために試験開始前24時間水中に浸せきした。試験結果を図-8に示す。すべてのコンクリートにおいて相対動弾性係数が増加認められる。これは、乾燥により水和反応が一時低下したコンクリートが試験中に水分の供給を受け、再び水和反応が促進されたためである。このため劣化による動弾性係数の低下だけを見ることは難しいが、動弾性係数の大きな低下は認められないことから、いずれのコンクリートの耐凍害性は大きいと判断される。

これらの試験結果からスラグ置換率 50%程度までの範囲において、溶融スラグはプレキャスト鉄筋コンクリート製品の細骨材として利用できる可能性が高いことが明らかとなった。そこで、スラグ置換率 0,25 および 50%のコンクリート製品を福島県磐城国道 6 号線バイパスにそれぞれ 25 本ずつ設置した。今後、スラグコンクリートから近傍土壌への重金属の溶出を経年的に調査し、スラグの安全性を確認する予定である。

5. まとめ

石炭ガス化溶融スラグについて、コンクリート用細骨材としての利用の可能性について検討し、以下のことが明らかとなった。

- 1) スラグはコンクリート用細骨材としての物理的・化学的性質および環境安全性において問題なく、良質の骨材である。
- 2) スラグ置換率が高くなるにつれ凝結時間の始発、終結時間ともに遅くなり、ブリーディング量も増加する。

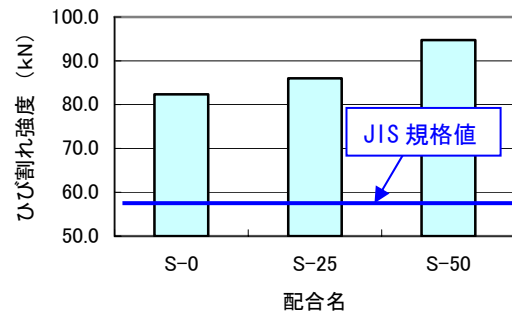


図-7 製品の曲げ強度

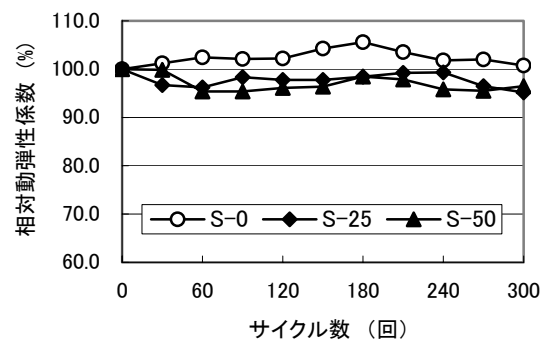


図-8 凍結融解試験結果

- 3) スラグを用いたコンクリートにおける強度の発現は、普通コンクリートと同等かそれ以上である。とくに、長期材齢における強度発現が大きい。
- 4) スラグを用いたコンクリートの耐凍害性は普通コンクリートと同等である。
- 5) スラグを用いたプレキャスト鉄筋コンクリート製品は、強度特性および耐凍害性において問題はない。

参考文献

- 1) 例えば北辻政文・田中礼治・遠藤孝夫・鳴海繁実(2002)：都市ごみガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用コンクリート工学論文集，第 13 巻 2 号，pp.89-98，2002.5
- 2) 日本工業標準調査会：TR A 0016，一般廃棄物，下水汚泥等の溶融固化物を用いたコンクリート用細骨材，pp.1-18，2002.7
- 3) 秋山 淳・山本泰彦：コンクリート用細骨材としてのフェロニッケルスラグの利用，土木学会論文集，366/V-4，pp.103-112，1986.2