

論文

[1025] 球状化した製鋼スラグの超流動コンクリート用細骨材としての利用に関する研究

肥後桂介^{*1}・出光隆^{*2}・山崎竹博^{*2}

1. まえがき

わが国の各製鉄所からは年間約3710万トン(1989年度)の鉄鋼スラグが排出されている。そのうち高炉スラグが2460万トン、製鋼スラグは1250万トンで、製鋼スラグのうち990万トンが転炉スラグ、260万トンが電気炉スラグとなっている〔1〕。現在、高炉スラグは100%利用されているが、転炉、電気炉スラグは約半分が製品として利用されているものの、残りは埋め立て地などに投棄されている。利用されている分も付加価値の低い土木用、道路用として用いられており、高炉スラグに比べて有効に利用されているとは言い難い。

製鋼スラグは遊離石灰分を含むものが多く、コンクリート用材料として用いるためには成分調整を行い、遊離石灰分による膨張を無くさなければならない。しかしながら、成分調整工程を加えるとコスト高となるため、製品としては付加価値の高いものが要求されてくる。そこで、筆者らは製鋼スラグを球状化し、それを付加価値の高い超流動コンクリート用細骨材として利用することを検討した。

2. 球状化した製鋼スラグ細骨材

2.1 製造方法

原理的には、熔融状態の製鋼スラグを粉化し、空中に飛散させ、表面張力を利用して球状化させるのであるが、図-1に示す羽根付きの粉化ドラムで飛散させる方法と圧搾空気で吹き飛ばす方法(風砕化)が実用化されている。本研究では、主として、遊離石灰分の少ない電気炉スラグを粉化ドラムで球状化したものを使用し、比較のため遊離石灰分の多い転炉スラグを風砕化したものも用いた。以下、前者を球状製鋼スラグ、後者を風砕製鋼スラグと呼ぶこととする。

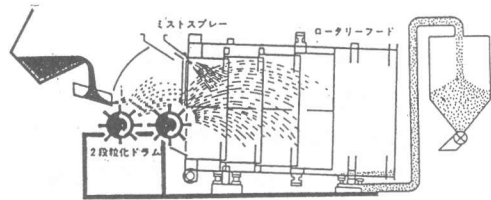


図-1 製造方法

2.2 成分・粒度・粒形

球状製鋼スラグの物理的性質、化学成分を各々表-1、2に示す。表-2からCaOの含有量は少なくいわゆる“フケ”による膨張現象は生じない。粒度分布を図-2に示す。同図には風砕製鋼スラグおよび砂の粒度分布曲線も併示した。球状製鋼スラグの粒子の状況を1.2mm以下および1.2mm以上についてそれぞれ図-3(a)、(b)に示した。1.2mm以下の場合はほとんど球形であるが1.2mm以上には角ばったものが多く含まれている。

表-1 物理的性質

項目	平均値
真比重	3.84
表乾比重	3.43
絶乾比重	3.38
吸水率(%)	1.48
単位容積重量(t/m ³)	2.28

*1 九州工業大学大学院 工学部設計生産工学科専攻、(正会員)

*2 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科、工博(正会員)

表-2 化学成分

CaO	SiO ₂	MnO	HgO	FeO	Fe ₂ O ₃	T.Fe
10.97	8.20	4.69	4.29	14.37	44.69	42.4
Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	SO ₃
6.76	2.05	0.45	0.02	0.13	<0.01	0.02

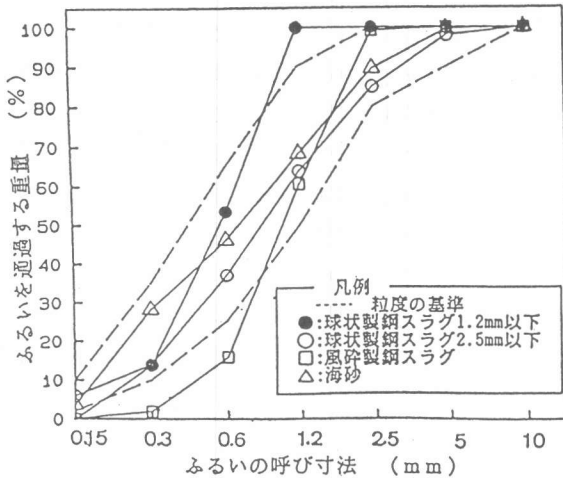
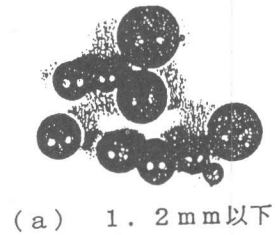
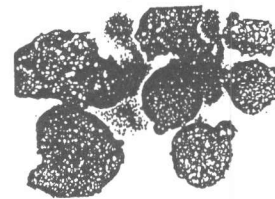


図-2 細骨材の粒度分布



(a) 1.2 mm 以下



(b) 1.2 mm 以上

図-3

球状製鋼スラグの粒子の状況

3. 球状製鋼スラグの超流動コンクリートへの利用

3.1 使用材料及び試験方法

本研究で用いた各材料の諸特性を表-3に示す。これまでの研究結果で、スラグと砂との置換率は50vol%が適当とされている〔2〕。よって、本実験でも、細骨材容積の50%を製鋼スラグで置換した。超流動コンクリートの配合を求める場合、充填性のよい骨材を用いれば、コンクリート中の余剰ペーストが増し流動性が良くなるという考え方にもとずき、まず、 s/a を変えて使用骨材の実積率試験を行い最適な s/a を求める。次に、その s/a の値を一定として、単位水量を変えてコンクリートを打設し、スランプフロー試験および充填試験〔3〕の両試験を行い、その結果から超流動コンクリートの評価を行う。スランプフロー値によって流動性を判断し、鉄筋間を通過して充填される高さによって、実際の型枠への打設し易さと分離抵抗性を判断する。

3.2 球状製鋼スラグを用いた超流動コンクリート

実積率試験結果を図-4に示す。同図より適当な s/a を50%と判断した。そこで $s/a=50\%$ と一定に保ち、単位水量を146, 150, 155 kg/m³と変化させて、コンクリートを

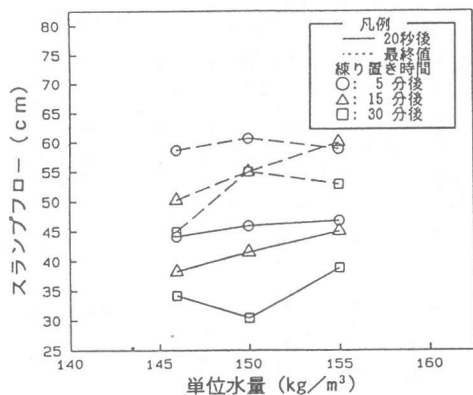
表-3 使用材料の諸特性

使用材料種別		比重	ブレン値粗粒率 (cm ² /g)	
結合材	普通ポルトランドセメント	3.14	2500	—
	高炉スラグ	2.90	6270	—
細骨材	海砂	2.55	—	2.65
	製鋼スラグ	3.47	—	2.96
	風砕製鋼スラグ	3.46	—	3.22
粗骨材	碎石	2.78	—	7.52
種類		主成分		添加量(重量比)
高性能 減水剤	A E	ナフタレンスルホン酸 ホルマリン高縮合物塩		$p \times 1.68\%$
		リグニンスルホン酸化合物 ポリオール複合体		$p \times 0.18\%$
和成剤	A E	変性アクリルカルボン酸化合物 系陰イオン界面活性剤		$p \times 0.01\%$
		多糖類(ペーグルカン 1グレード)		$W \times 1.18\%$

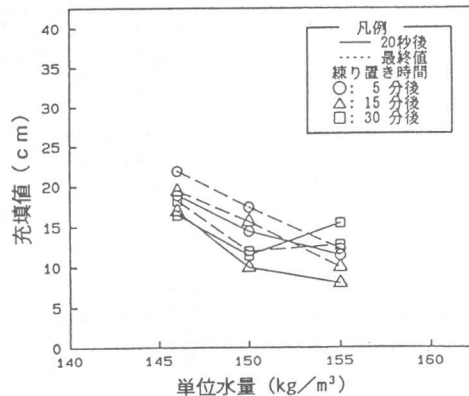
打設した。コンクリートの配合を表-4に示す。
 なお、混和剤等の配合割合はこれまでの研究を参考にして定めた〔2〕。試験結果を図-5 (a)、(b)に示す。両試験結果とも測定開始から20秒後の値と最終値とを示している。なお、練混ぜ後の経時変化を調べるため、練混ぜ後の練り置き時間5, 15, 30分でそれぞれ試験を行った。筆者らは、超流動コンクリート化しているか否かを判断する基準として、20秒後のスランブフロー値：55 cm以上、充填値：30 cm以上を提案しているが〔2〕、同図から明らかなように、両試験結果ともに基準値を大きく下回り、また、充填値の最終までの伸びも小さく、結局、超流動コンクリートを得ることはできなかった。

表-4 コンクリートの配合

細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)								
	水	結合材		細骨材		粗骨材	混和剤		
		普通 ポルトランド セメント	高炉 スラグ	海砂	製鋼 スラグ		AE剤	AE 減水剤	高性能 減水剤
50	146	250	250	413	562	901	0.05	0.9	8.4
	150	250	250	411	559	895			
	155	250	250	409	555	888			
									増粘剤
									1.73
									1.77
									1.83



(a) スランブフロー試験結果



(b) 充填試験結果

図-5 単位水量と各測定項目との関係

原因として、図-3 (b)に示した粒径1.2 mm以上の角張っている粒子が、球状スラグによるベアリング効果を著しく阻害しているものと考えられる。そこで、1.2 mm以上を除き、1.2 mm以下の比較的球状に近いスラグのみを用いて実験を行った。

3.3 球状製鋼スラグ1.2 mm以下を用いた超流動コンクリート

コンクリート中のモルタルと同配合のモルタルのコンシステンシーを調べることで、コン

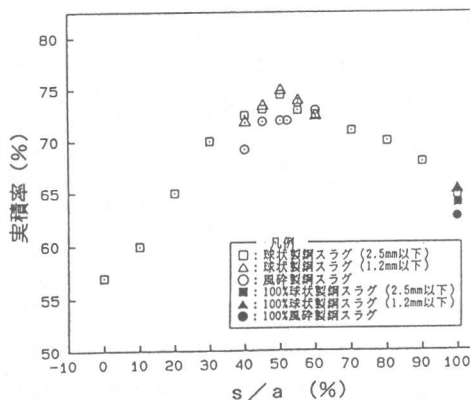


図-4 骨材の実積率試験

クリートの超流動化が可能
 か否かを判断できないかと
 考え、1.2mm以上を含
 むモルタルと以下のモルタル
 についてフロー試験（フ
 ローコーンの寸法、底面直
 径：10cm、高さ：15
 cm）を行い、単位水量の

表-5 モルタルの配合

水結合 材比		単位量(kg/m³)								
		結合材 P		細骨材		混和剤			増粘剤	
W/P (%)	水	普 通 ポルトランド セメント	高炉 スラグ	海砂	製鋼 スラグ	AE剤	A E 減水剤	高性能 減水剤		
30	225	375	375	673	758	0.08	1.4	12.6	2.66	
29	218	376	376	684	763				2.57	
28	212	378	378	691	772				12.7	2.50
27	205	379	379	699	781					2.42

違いによる比較を行った。それらの配合を表-5に、
 試験結果を図-6に示す。当初の期待に反し両モル
 タルフロー値はほぼ同じ値を示し、それぞれの差は
 ほとんどみられなかった。そこで、モルタルについ
 ては別のコンシステンシー試験方法を検討している。

つぎに、1.2mm以下のスラグを用いて実積率
 試験を実施し、図-4に併示した。同図より適当な
 s/a の範囲は45~55%と考えられる。以上の
 結果から、単位水量 $W=145\text{kg/m}^3$ とし s/a を
 45, 50, 55%と変化させてコンクリートを打
 設した。その配合を表-6に示す。増粘剤量は、 W
 $\times 1.28\%$ とした。試験結果を図-7(a), (b)に示す。

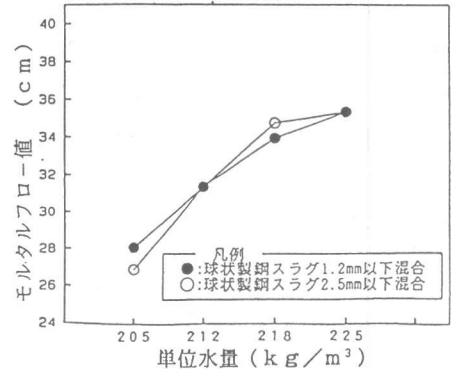
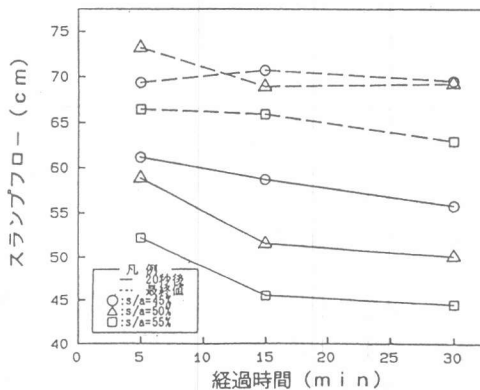


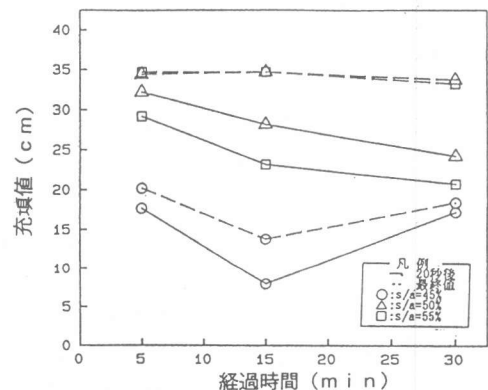
図-6 モルタルフロー試験結果

表-6 コンクリートの配合

細骨材率		単位量(kg/m³)								
s/a (%)	水	結合材		細骨材		粗骨材	混和剤			増粘剤
		普通 ポルトランド セメント	高炉 スラグ	海砂	製鋼 スラグ		AE剤	AE 減水剤	高性能 減水剤	
	45	145	250	250	372	507	992	0.05	0.9	8.4
50	250		250	414	563	902				
55	250		250	455	619	812				



(a) スランプフロー試験結果



(b) 充填試験結果

図-7 時間経過と各測定項目との関係

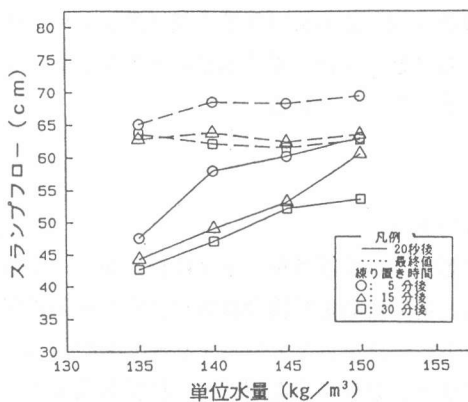
$s/a = 50\%$ の場合は、両試験結果とも粒形の悪い 1.2 mm 以上のスラグを含むコンクリートに比べて高い値を示し、前述した基準値を超えており、材料分離も見られず良質な超流動コンクリートが得られた。

3. 4 風碎製鋼スラグを用いた超流動コンクリート

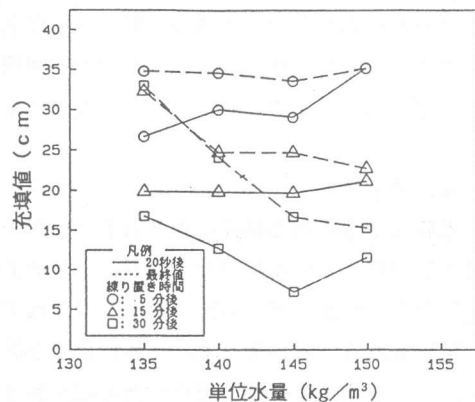
球状製鋼スラグに比べて、風碎製鋼スラグは 1.2 mm 以上でも球状のものが得られる。そこで両者を比較する目的で、風碎製鋼スラグについても同様に試験を行った。まず実積率試験から最適な s/a を求め（図-4 に併示）、その結果から $s/a = 50\%$ とし、 $w = 135, 140, 145, 150 \text{ kg/m}^3$ と変化させてコンクリートを打設した。配合を表-7 に、スランブフロー、充填試験結果を図-8 (a), (b) にそれぞれ示す。

表-7 コンクリートの配合

細骨材率 s/a (%)	水	単位量(kg/m ³)							
		結合材		細骨材		粗骨材	混和剤		
		普通 ポルトランド セメント	高炉 スラグ	海砂	製鋼 スラグ		AE剤	AE 減水剤	高性能 減水剤
50	135	250	250	420	572	916	0.05	0.9	8.4
	140			417	567	909			
	145			414	563	902			
	150			411	559	895			
									増粘剤
									1.59
									1.65
									1.71
									1.77



(a) スランブフロー試験結果



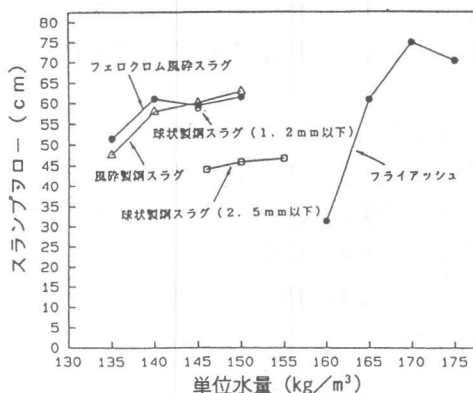
(b) 充填試験結果

図-8 単位水量と各測定項目との関係

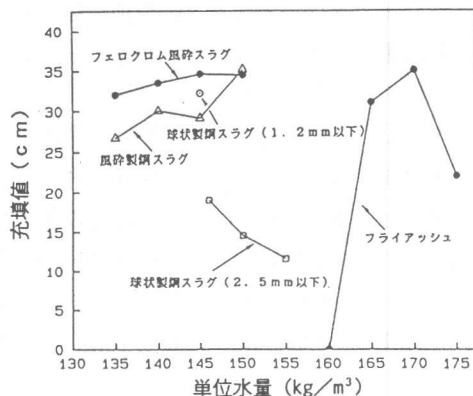
単位水量 135 kg/m^3 以外では、5分後の試験値は両試験結果ともに基準値を満足している。しかしながら、充填試験において球状製鋼スラグよりも経時変化が大きくなる傾向がみられる。この原因として、遊離石灰分の影響も考えられ今後の検討が必要である。

3. 5 球状物質が超流動コンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響

単位水量の変化による各スラグのスランブフローおよび充填試験の結果を図-9 (a), (b) に示す。同図にはフェロクロム風碎を用いた例〔2〕および普通砂とフライアッシュを用いた例〔3〕も併示した。



(a) スランブフロー試験結果



(b) 充填試験結果

図-9 単位水量と各測定項目との関係

球状製鋼スラグ2.5mm混入コンクリートは角張った粒子が含まれているため、他に比べてスランブフロー値、充填値ともに著しく小さい。その粒形の悪い部分を除き1.2mm以下の球状のもののみを使用すると、細骨材の粒度はかなり細粒側となるにもかかわらず、スランブフロー値で約14cm、充填値で13cm改善でき、超流動コンクリートの基準を十分満足するコンクリートが得られる。このとより超流動コンクリートのコンシステンシーは、細骨材の粒度が悪くても粒形が良くなれば大きく改善されることが分かる。また、結合材に球形のフライアッシュを用いたものと比較した場合、細骨材に球状スラグを用いたものは単位水量を約20kg/m³減らしても、それと同等のコンシステンシーが得られること、また、単位水量によるコンシステンシーの変動もフライアッシュの場合に比べて少ないことがなど分かる。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 羽根付きの粉化ドラムで飛散させる方法で製造した球状製鋼スラグは粒径が1.2mm以上になると角張っている粒子が多く含まれてくる。そのため球状細骨材のベアリング効果が著しく阻害される。そこで、1.2mm以上を除き、1.2mm以下でコンクリートを打設してみると、スランブフロー値、充填値とも超流動コンクリートの基準値を超えて、材料分離も見られない、良質な超流動コンクリートが得られた。また、風砕製鋼スラグを用いても超流動コンクリートを得ることができたが、経時変化が大きく若干問題がある。

(2) 超流動コンクリートのコンシステンシーは細骨材の粒度が悪くなくても粒形が良くなれば大きく改善される。

(3) 細骨材に球状スラグを用いたコンクリートは結合材に球状のフライアッシュを用いたコンクリートに比べて、単位水量を約20kg/m³減少でき、単位水量の変動によるコンシステンシーの変化もフライアッシュの場合に比べて小さくなる。

(参考文献) [1] 永井灝：鉄鋼スラグの資源化について、鉄鋼界、平成3年3月号

[2] 出光隆：コンクリート工学年次論文報告集第14巻第1号、p393~398、1992

[3] 新藤竹文：土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部、pp228~229、1990.9