

# 論文 高微粉碎した高炉スラグ微粉末の配合と物理的諸性状に関する研究

尾関規史<sup>\*1</sup>・出光隆<sup>\*2</sup>・山崎竹博<sup>\*3</sup>・石松宗一郎<sup>\*4</sup>

**要旨：**スラグの潜在水硬性やセメントの CO<sub>2</sub> 排出抑制などの特徴を持つ高炉スラグ微粉末は、高強度コンクリート、高流動コンクリート、海洋コンクリートなど様々な分野で応用されてきた。しかし、凝結性状や水和反応に複雑に影響を及ぼす石膏の添加量が、コンクリートの施工性や物理的性状へどのように影響を及ぼすか等については、報告された論文が少ない。そこで本研究では、高炉スラグ微粉末の置換率と比表面積を変化させ、さらに、それら全ての配合において石膏の添加率を 0~4%と変化させたときの、モルタルのフロー値、曲げ・圧縮強度を実験的に求め、モルタル性状に及ぼす物理的影響についても検討を行った。

**キーワード：**高炉スラグ微粉末、石膏添加率、フロー値、圧縮強度

## 1. はじめに

高炉スラグの汎用に伴って比表面積が 4000, 6000, 8000 cm<sup>2</sup>/g の高炉スラグ微粉末が開発されてきた。これらの高炉スラグ微粉末を混和材料としてコンクリートに用いた場合、長期の強度改善や塩害防止作用などの特徴をもつことはよく知られている。しかしながら、表-1 に示すように高炉スラグ微粉末を使用してコンクリートの性能を改善するには最大 70%にも達する量を混和する必要がある場合もあり、セメントとの置換率の違いがコンクリートの物理的性状に及ぼす影響を十分に把握する必要がある。

そこで本研究では、比表面積の異なる高炉スラグ微粉末 3 種を用い、セメントとの置換率やセメントの反応制御用に用いられている石膏添加率の変化などが、モルタルのコンシステンシーや曲げ強度及び圧縮強度などに及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験概要

本研究ではコンシステンシーの評価には JIS A 6206(コンクリート用高炉スラグ微粉末)に定

表-1 高炉スラグ微粉末の望ましいとされる置換率の範囲

使用目的	B4000	B6000	B8000
水和熱による温度上昇の抑制	50~70%	60~70%	60~70%
アルカリシリカ反応の抑制	40~70%	40~70%	40~70%
耐硫酸塩性の向上	50~70%	50~70%	50~70%
海水に対する化学抵抗性の向上	45~55%	45~60%	45~70%
高流動化	30~70%	30~70%	30~60%
高強度化	—	30~50%	30~60%

めるフロー試験を、曲げ試験及び圧縮試験には JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) を用い曲げ・圧縮強度試験を行った。

### 2.1 使用材料

実験用モルタルの使用材料を表-2 に示す。高炉スラグ微粉末は表-3 に示す品質で、北九州市で採取することのできる、比表面積 4000, 6000, 8000 cm<sup>2</sup>/g(以下それぞれを B4, B6, B8 と記す)

<sup>\*1</sup> 九州工業大学大学院 工学研究科 設計生産工学専攻

<sup>\*2</sup> 九州工業大学工教授 工学部 建設社会工学科 (正会員)

<sup>\*3</sup> 九州工業大学工教授 工学部 建設社会工学科 (正会員)

<sup>\*4</sup> 九州工業大学大学院 工学研究科 設計生産工学専攻

の高炉スラグ微粉末を用いた。

## 2.2 モルタルの配合

セメント質量の30, 40, 50, 60, 70%を高炉スラグ微粉末により置換し、それぞれについて石膏添加率を0, 1, 2, 3, 4%と変化させた。モルタルの配合を表-4に、本研究の実験の流れを図-1に示す。表中でスラグと石膏いずれも混和しないものを基準モルタルとした。

## 3. 実験結果

### 3.1 スラグの比表面積と流動性

図-2にスラグ微粉末を混和したモルタルのフロー試験結果を石膏添加率ごとに示す。図中に基準モルタルの実測フロー値を一点鎖線で表した。実測フロー値は205mmであった。スラグ置換率の増加に伴うフロー値の変化は、置換率が大きくなるほどフロー値は低下し、低下の

値はスラグの比表面積が大きいほど顕著であることがわかる。石膏添加率の違いにより多少の差はあるものの、どの比表面積のスラグを用いたときもフロー値が改善できるのは、スラグ置換率が30~40%程度の時であると考えられる。また、B8のようにスラグの比表面積が大きくなり粒子が細くなるほど、高炉スラグ微粉末表面の吸着水量が増加するため、流動性の低下が生じたものとする。

表-4 モルタルの配合

置換率 BS/B (%)	水粉体比 W/B (%)	粉体B		細骨材 S (g)	水 W (g)
		セメント C(g)	スラグ BS(g)		
0	50	450	0	1350	225
30		315	135		
40		270	180		
50		225	225		
60		180	270		
70		135	315		

表-2 使用材料

項目	仕様
セメント C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
高炉スラグ微粉末 BS	比表面積 4000,6000,8000 cm <sup>2</sup> /g, 密度 2.91g/cm <sup>3</sup> ,
細骨材 S	セメント強さ試験用標準砂 密度 2.62g/cm <sup>3</sup>
石膏	副産石膏(二水石膏) 密度 2.1g/cm <sup>3</sup>
水	上水道水

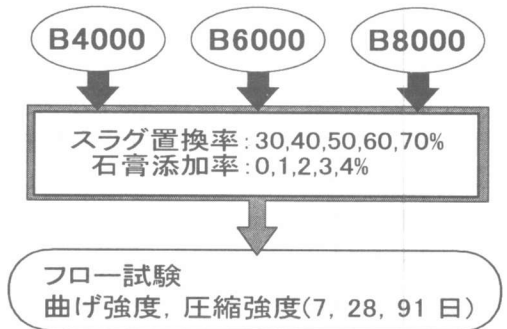


図-1 実験のフローチャート

表-3 使用した高炉スラグ微粉末の品質

品質	種類	高炉スラグ微粉末		
		B4000	B6000	B8000
密度	(g/cm <sup>3</sup> )	2.91	2.91	2.91
比表面積	(cm <sup>2</sup> /g)	4010	5890	7910
活性度指数 (%)	材齢 7日	58	80	96
	材齢 28日	93	108	115
フロー値比	(%)	103	101	98
酸化マグネシウム	(%)	6.4	6.3	6.1
三酸化硫黄	(%)	0.0	0.0	0.0
強熱減量	(%)	0.0	0.2	0.1
塩化物イオン	(%)	0.002	0.002	0.002

### 3.2 石膏添加率と流動性

3.1 に述べたように流動性は置換率するスラグの割合と質量および、比表面積の大小により大きく左右され、石膏添加率の違いが流動性に

及ぼす影響は非常に小さいものである。

### 3.3 スラグの比表面積と曲げ強度の検討

図-3, 4, 5 に石膏添加率をそれぞれ変化させた場合の材齢 7, 28, 91 日での曲げ強度試験結

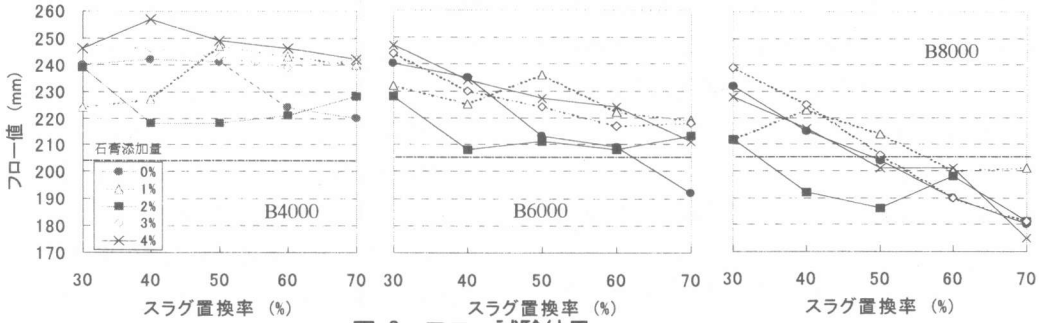


図-2 フロー試験結果

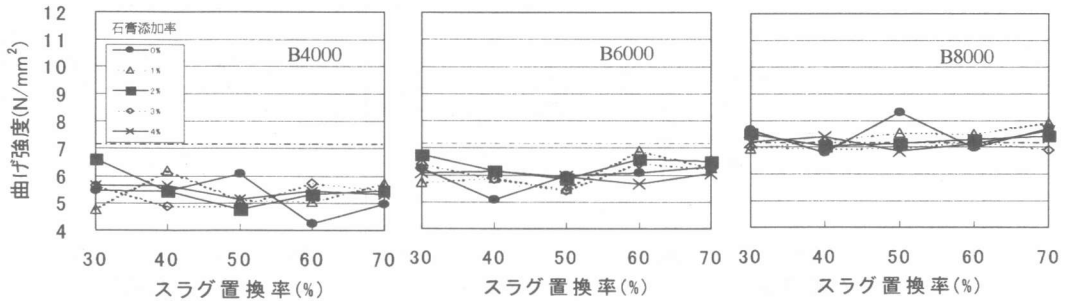


図-3 材齢 7 日曲げ強度試験結果

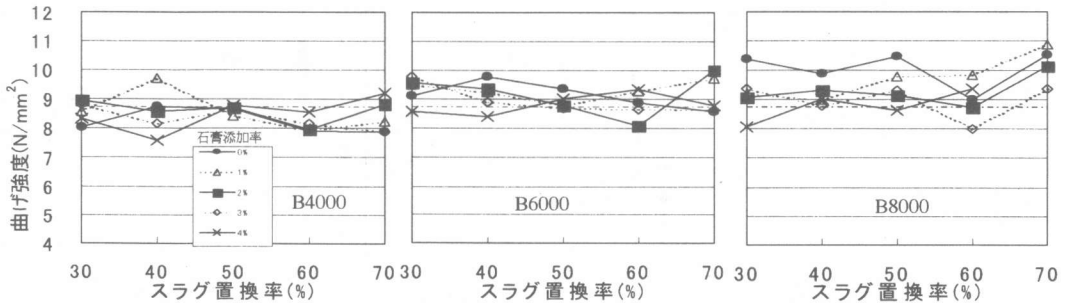


図-4 材齢 28 日曲げ強度試験結果

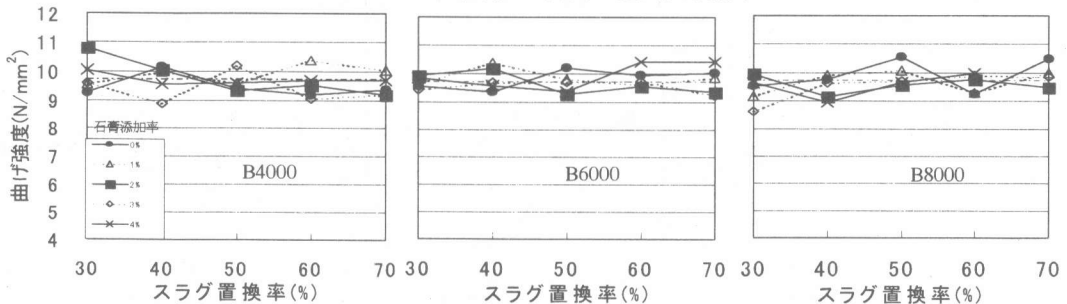


図-5 材齢 91 日曲げ強度試験結果

果を示す。図中に基準モルタルの曲げ強度平均値を一点鎖線で表した。基準モルタルの曲げ強度は7日強度で7.16 N/mm<sup>2</sup>、28日強度で8.75 N/mm<sup>2</sup>、91日強度で9.72 N/mm<sup>2</sup>であった。材齢7日での初期強度は比表面積の大きさに伴って大きくなり、B8においては基準モルタルの強度と同程度もしくはそれ以上の強度発現が見られた。B4、B6の初期強度は基準モルタルの強度よりも低かったものの、材齢が長期になるに従い強度の伸びは著しく、91日強度ではどの供試体も基準強度と同程度の強度を得ることができた。それに比べてB8を用いた時、長期での強度発現に伸びは見られず、初期強度の改善が長期強

度の増加を小さくする結果となっている。また、B4においてわずかではあるが、スラグ置換率の増加に伴い7日強度が減少するという傾向が見られた。よってB4を使用し初期での強度発現が必要な場合、スラグ置換率を低くする必要がある。しかし、材齢が長期になるに従いスラグ置換率、石膏添加率の違いによる曲げ強度への影響は見られず、いずれの比表面積、スラグの置換率においても基準モルタルの強度と同程度の強度を発現することがわかった。

### 3.4 スラグ置換率と圧縮強度の検討

図-6, 7, 8に石膏添加率をそれぞれ変化させた場合の材齢7, 28, 91日での圧縮強度試験結

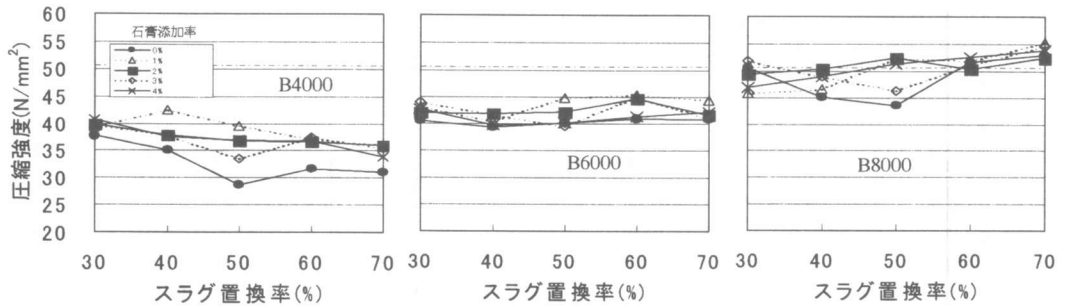


図-6 材齢7日圧縮強度試験結果

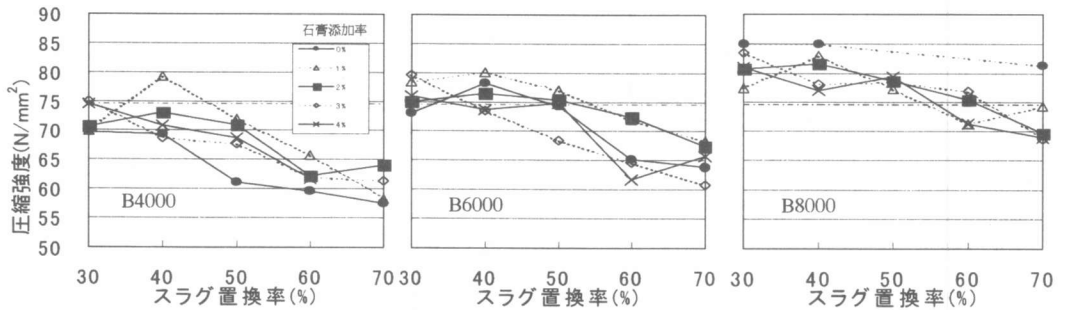


図-7 材齢28日圧縮強度試験結果

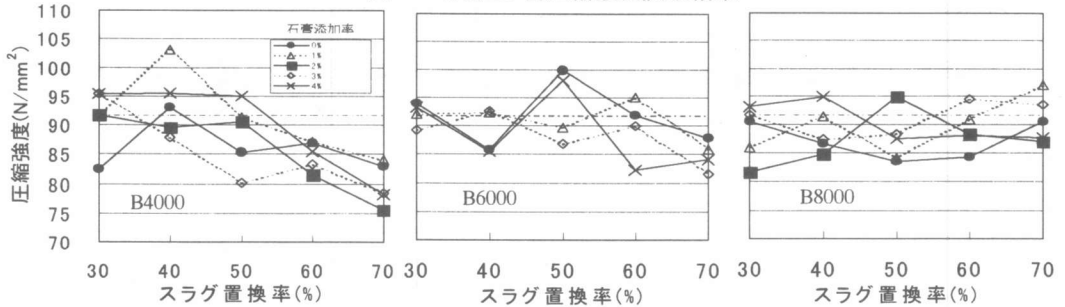


図-8 材齢91日曲げ強度試験結果

果を示す。図中に基準モルタルの圧縮強度平均値を一点鎖線で表した。基準モルタルの圧縮強度は7日強度で50.66 N/mm<sup>2</sup>、28日強度で74.62 N/mm<sup>2</sup>、91日強度で91.69 N/mm<sup>2</sup>であった。図-6より材齢7日での初期強度は比表面積が大きいほど高強度となっていることが分かる。しかしながら B8 で強度は最も強くなり、石膏添加率の違いが圧縮強度に影響しないと考えると、基準モルタルに対するスラグ置換率 50%での圧縮強度比の平均は97%であった。しかしながら、その後28日、91日と材齢が長期になるのに比例して圧縮強度比は小さくなり、JISに定める活性度指数規格値を満足していないものもあった。これは初期の化学反応により長期での強度増加が小さくなったのではないかと考える。B6についてもB8と同じような結果が得られ、基準強度と同程度の強度は得られるものの、材齢が長期になるにつれて圧縮強度比の一部が活性度指数を満足できない例が生じた。この原因として、モルタルの製作に高性能 AE 減水剤を用いていないために、3.1で述べたように高微粉砕のスラグを用いた場合フローが低下し、密実なモルタル供試体を作製することができなかったためではないかと考える。石膏添加率による曲げ・圧縮強度への影響はスラグ置換率、比表面積、材齢が及ぼす影響に比べて非常に少ないものとする。

### 3.5 比表面積と圧縮強度の経時変化

図-9～13 に比表面積の違いによる圧縮強度の経時変化を30～70%のスラグ置換率ごとに示す。3.4にも述べたように、石膏添加率が圧縮強度に及ぼす影響はほとんどなかった。そのため、各材齢における比表面積ごとの圧縮強度を石膏添加率の違いを考慮せずに平均し、グラフ上にプロットした。B8の材齢7日での初期強度は他と比べて高いものの、材齢が長期になるにつれて強度増加が小さくなり、スラグ置換率が30～50%程度の時は、いずれも91日強度でB4、B6より強度が下回る結果となった。それに

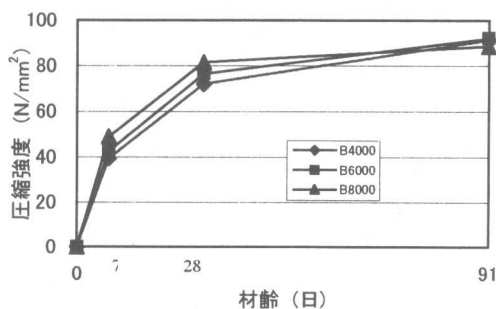


図-9 圧縮強度経時変化  
(スラグ置換率 30%)

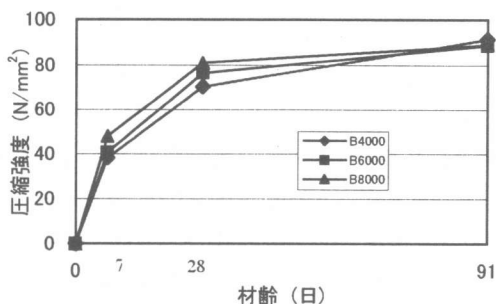


図-10 圧縮強度経時変化  
(スラグ置換率 40%)

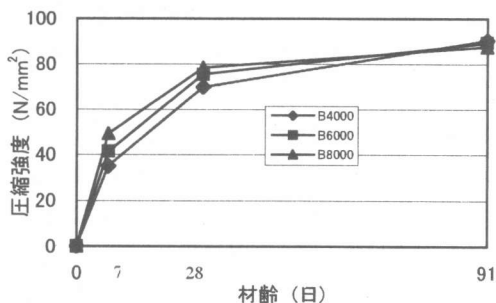


図-11 圧縮強度経時変化  
(スラグ置換率 50%)

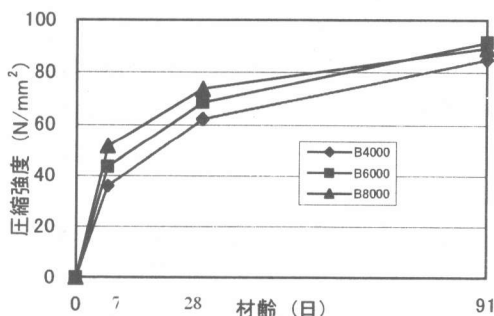


図-12 圧縮強度経時変化  
(スラグ置換率 60%)

比べ、スラグを 60~70%と多量に添加した際には、どの比表面積においても強度増加の割合は変わらないものの、B4 において初期強度の発現が小さかったために、どの材齢においても B8 を下回る強度しか得られなかった。このことより、比表面積の小さい B4 はスラグ置換率を 30~40%程度と低くすることで初期の強度低下を抑制することができ、B8 においてはスラグ置換率を高くした方が長期強度において、潜在水硬性による強度増加をするのではないかと考える。

#### 4. まとめ

本研究では、比表面積の異なる高炉スラグ微粉末とセメントとの置換率を変化させ、石膏の添加率も変化させることにより、高炉スラグ微粉末がモルタルの物理的性状に及ぼす影響を検討した。その結果から明らかになった点を以下に示す。

- 1) 比表面積が 4000, 6000 $\text{cm}^2/\text{g}$ より小さい高炉スラグ微粉末を用いる場合、流動性の改善効果が見られる。比表面積 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$ を用いる場合でも、スラグ置換率を 30~40%以下にすることで、流動性を改善することが可能である。
- 2) スラグ置換率、4%以内の石膏添加率が曲げ強度に与える影響は極めて小さく、長期材齢においてはどの高炉スラグ微粉末を用いた配合でも基準モルタルと同程度、もしくはそれ以上の曲げ強度を有する。
- 3) 比表面積が大きい高炉スラグ微粉末を置換すると、材齢初期の水和反応が一層促進され、曲げ・圧縮強度が改善される。しかし長期材齢での強度増加は小さい。比表面積が小さい高炉スラグ微粉末により置換したモルタルの強度は長期材齢において伸びが大きい。
- 4) 混和剤を用いない本実験では比表面積 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$ を用いたモルタルの圧縮強度比は、JIS に定めるスラグ置換率 50%のとき、活性度指数の規格値を一部満足しておらず、その傾向は材齢が長期になるほど顕著に表れる。
- 5) 石膏添加率の違いが、フロー値、曲げ・圧縮

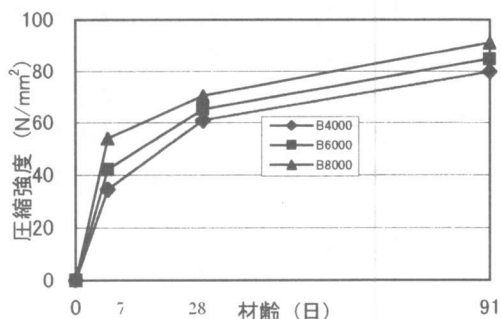


図-13 圧縮強度経時変化  
(スラグ置換率 70%)

強度に及ぼす影響は、スラグ置換率、比表面積、材齢が及ぼす影響に比べて非常に小さいものである。

#### 5. おわりに

本研究においてセメントを比表面積 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末で置換したモルタルの圧縮強度は、長期材齢になるに従い圧縮強度比が低下し、JIS に定める活性度指数規格値を満足できない場合も生じた。現在、8000  $\text{cm}^2/\text{g}$ を高流動コンクリート、高強度コンクリートに用いる場合、界面活性剤である高性能 AE 減水剤を併用することが多く、流動性の改善、活性度指数の評価を目的とした時、高性能 AE 減水剤を使用した新たな評価方法が必要であると考えらる。

#### 参考文献

- 1) 佐藤 美帆, 出光 隆, 山崎 竹博, 渡辺 明: 高粉砕高炉スラグ微粉末の品質規格試験に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.54, No.5, pp1028-1029, 1999.9
- 2) 沼田 晋一ほか, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, コンクリートライブラリー, Vol.86, pp9 - 10.88-91, 1996.3
- 3) K.Sato, etc, Properties of very fine blast furnace slag prepared by classification, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Volume IV