

# 論文 高炉スラグ超微粉末が高流動コンクリートのフレッシュ時の性状に及ぼす影響について

為石昌宏\*1・上村和也\*2・山口孝史\*3・川上正史\*4

要旨：本研究は、比表面積が 10,000 cm<sup>2</sup>/g 以上の高炉スラグ超微粉末を高流動コンクリートの混和材に用いた場合、その比表面積の違いおよびポルトランドセメントとの混合割合（スラグ置換率）の違いが、コンクリートのフレッシュ性状にどのような影響を与えるのかを、工学量を表す各種試験により調査、考究したものである。結果として、比表面積 8,000 および 11,500 cm<sup>2</sup>/g の高炉スラグを高流動コンクリートの混和材に用いたとき、そのフレッシュ性状が実用的に安定していることが判った。

キーワード：高流動コンクリート、高炉スラグ微粉末、比表面積、置換率

## 1. はじめに

高炉スラグ微粉末は高炉セメントの原料としてその大半が使用されている[1]が、近年は微粉末系高流動コンクリートの混和材料としても注目され[2]既に実用に供されている。これは、平成7年にコンクリート用高炉スラグ微粉末として、3種類（4,000、6,000 および 8,000）が JIS 規格化された[3]ことも一因であろう。ところで、比表面積が 10,000 cm<sup>2</sup>/g より大きい高炉スラグ微粉末（以後、高炉スラグ超微粉末と呼ぶ）を用いたコンクリートのフレッシュ性状についてはあまり報告されていない。そこで本研究は、10,000 cm<sup>2</sup>/g 以上の比表面積を持つ高炉スラグ超微粉末に着目し、これを高流動コンクリートの混和材として使用した場合、その比表面積の大きさおよびポルトランドセメントとの混合割合（以後、スラグ置換率と呼ぶ）がコンクリートのフレッシュ性状にどのような影響を及ぼすのかをスランブフロー試験、L型フロー試験、Oロート流下試験等の工学量を表す各種試験により実験し、これらの高炉スラグ超微粉末を用いた高流動コンクリートが、どのような性状を示すのかを調べてみた。なお、比較検討のため比表面積 4,000、6,000 および 8,000 cm<sup>2</sup>/g の高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートにも同様の検討を加えた。

## 2. 実験概要

### 2. 1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメントを、また、細骨材と粗骨材にはそれぞれ岐阜県揖斐川産の川砂と川砂利を用いた。高炉スラグ超微粉末には特別に調整した比表面積 11,500、15,000 および 22,100 cm<sup>2</sup>/g の3種類を用い、

表-1 使用材料の物理的性質

種類	物理的性質、その他
セメント	普通ポルトランドセメント、比重:3.15、比表面積:3320(cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	岐阜県揖斐川産陸砂、表乾比重:2.55、吸水率:1.97%、FM:2.94、実積率:64.7%
粗骨材	岐阜県揖斐川産川砂利、最大骨材寸法:25(mm) 表乾比重:2.58、実積率:63.5%、吸水率:1.97%、FM:6.90
混和材	高炉スラグ微粉末、比重:2.92、 比表面積:4000.6000.8000.11500.15000 および 22100(cm <sup>2</sup> /g)
混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

- \* 1. (株) 鴻池組 技術研究所 土木材料研究室研究員 (正会員)
- \* 2. (株) 鴻池組 技術研究所 土木材料研究室研究員、工修
- \* 3. 住金鹿島鉱化(株) 役員付
- \* 4. (株) 鴻池組 技術研究所 土木材料研究室副部長、工博 (正会員)

比較のため市販の比表面積 4,000、6,000 および 8,000 cm<sup>2</sup>/g の 3 種類の高炉スラグ微粉末をも使用した。また、高性能AE減水剤にはポリカルボン酸系のものを使用した。表-1 に使用材料の産地、物理的性質等を一括して示す。

## 2. 2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は表-2 に示す 6 種類の比表面積を持つ高炉スラグに対し、スラグ置換率を 15、30、50 および 70 % に変化させた合計 24 種類とした。単位結合材量を 600 kg/m<sup>3</sup>、単位水量を 160 kg/m<sup>3</sup> 一定とし、高性能AE減水剤の添加量は単位結合材量の 2.0 % 一定とした。

表-2 コンクリートの配合

高炉スラグ置換率 (%)	スラグの種類 (比表面積 cm <sup>2</sup> /g)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水	セメント	高炉スラグ	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤
15	4,000、6,000	26.7	48.6	160	510	90	765	819	12.0
30	8,000、11,500	26.7	48.4	160	420	180	759	819	12.0
50	15,000 および	26.7	48.1	160	300	300	751	819	12.0
70	22,100	26.7	47.9	160	90	510	744	819	12.0

表-3 試験方法

## 2. 3 コンクリートの作製

容量 70ℓ の水平パン型強制練りミキサを用い、川砂、セメント、高炉スラグ超微粉末あるいは高炉スラグ微粉末、川砂利の順にミキサに投入した後、30 秒間空練りを行い、さらに高性能AE減水剤を添加した練り混ぜ水を投入して 120 秒間練り混ぜコンクリートを作製した。ただし、コンクリートの粘性が強く、練り混ぜ不足が目視観察された配合については、練り混ぜ時間を 180 秒とした。なお、コンクリートの練り上がり温度は 20±3℃ である。

## 2. 4 試験項目

練り上がった試料は、直ちにスランブフロー試験、L型フロー試験、Oロート流下試験、空気量試験、コンクリート温度および凝結試験の順に実験した。これらの試験方法を一括して表-3 に示す。

試験項目	測定値	試験方法
スランブフロー試験	スランブフロー値	土木学会基準 「自己充填型の高流動コンクリートの試験方法(案)」に準ずる
	50cmフロー到達時間	
	流動停止時間	
L型フロー試験	Lフロー値	
	沈下量	
	流動速度	
	流動停止時間	
Oロート流下試験	流下時間	
空気量試験		
練り上がり温度		サーミスタセンサによる
凝結試験	始発時間	JIS A 6204
	終結時間	

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 スランブフロー試験

#### (1) スランブフロー

図-1 に種々の比表面積を有する高炉スラグに対するスランブフロー値とスラ

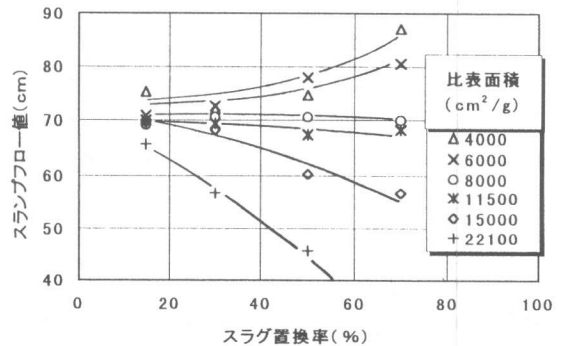


図-1 スランブフロー値とスラグ置換率の関係

換率との関係を示す。比表面積 4,000 および 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、スランプフロー値が増大していく傾向が認められる。

一方、比表面積 15,000 および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、スランプフロー値が逆に減少する傾向が認められる。

ところで、比表面積 8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率を変化させても、スランプフロー値は 70 cm 一定となり、殆ど変化が認められない。この理由は今のところ明らかではないが、スランプフロー値に対して、8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  の比表面積を有する高炉スラグがスラグ置換率に対して安定的であり、これらを用いた高流動コンクリートを施工に供する場合、配合の管理が容易であることを意味している。

### (2) 50cm フロー到達時間

図-2 に種々の比表面積を有する高炉スラグに対する 50cm フロー到達時間とスラグ置換率との関係を示す。比表面積 4,000 および 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものについてはスラグ置換率の増加に伴い、50cm フロー到達時間が短くなる傾向が認められる。

一方、比表面積 15,000 および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、50cm フロー到達時間が長くなる傾向が認められる。また、この現象は、比表面積が大きくなる程顕著になっている。

比表面積 8000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率を変化させても 50cm フロー到達時間はそれぞれ約 4 秒および約 5 秒となり殆ど変化していないことがわかる。一般に 50cm フロー到達時間は粘性を表す[5]ものとされている。従って、比表面積 8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグは、置換率を変化させてもコンクリートの粘性は変化せず、言い換えれば一定の分離抵抗性が得られることを意味している。

### (3) 流動停止時間

図-3 に種々の比表面積を有する高炉スラグに対するスランプフロー流動停止時間とスラグ置換率との関係を示す。比表面積 4,000 および 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、流動停止時間が長くなる傾向が認められる。一方、比表面積 15,000 および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、逆に流動停止時間が短くなる傾向が認められる。

比表面積 8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率を変化させても流動停止時間はそれぞれ約 100 秒および約 90 秒となり、殆ど変化していない。

これらの傾向は先に述べた(2)のスラン

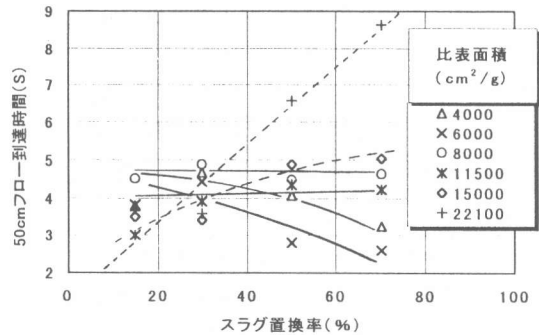


図-2 50cmフロー到達時間とスラグ置換率の関係

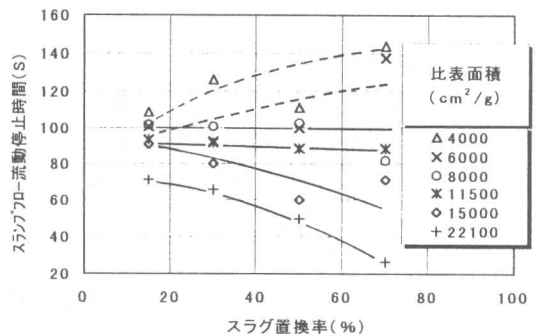


図-3 スランプフロー流動停止時間とスラグ置換率の関係

プフローの結果に類似している。

### 3. 2 L型フロー試験

#### (1) Lフロー値

図-4に種々の比表面積を有する高炉スラグに対するLフロー値とスラグ置換率との関係を示す。なお、本試験で用いたL型フロー試験器のフロー値測定能力は100 cmであるため、Lフロー値が100 cmを超えた場合は測点を図中より省略した。

比表面積 11,500 および 15,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率が増加しても、Lフロー値の変化は緩やかで安定的であるが、比表面積 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものは、スラグ置換率の増加に伴い、Lフロー値が大きく減少していく傾向が認められる。

#### (2) 沈下量

図-5に種々の比表面積を有する高炉スラグに対する沈下量とスラグ置換率との関係を示す。比表面積 4,000 および 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものは、スラグ置換率の増加に伴い、沈下量がわずかに増大する傾向が認められる。

一方、比表面積 15,000 および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、沈下量が減少していく傾向が認められる。

比表面積 8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率を変化させても沈下量は殆ど一定である。すなわち、これらの比表面積を有する高炉スラグを用いた高流動コンクリートは、置換率の影響を殆ど受けないことが判る。

#### (3) 流動速度

図-6に種々の比表面積を有する高炉スラグに対する流動速度とスラグ置換率との関係を示す。なお、流動速度は、試験器開口ゲート端部から3 cmの位置と8 cmの位置の2箇所に、コンクリートの先端が到達する時間を光電検出器により測定し、これを速度に換算して求めたものである。

比表面積 4,000 および 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、流動速度が速くなる傾向が認められる。

一方、比表面積が 8,000、11,500、15,000 および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものは置換率 30 % 近傍で

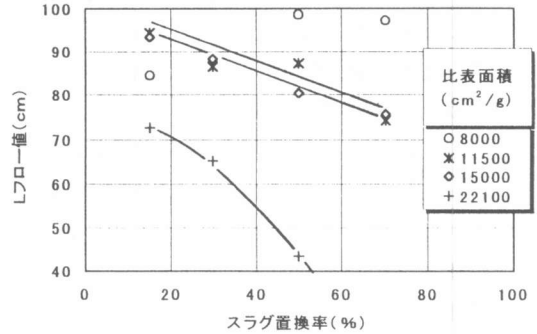


図-4 Lフロー値とスラグ置換率の関係

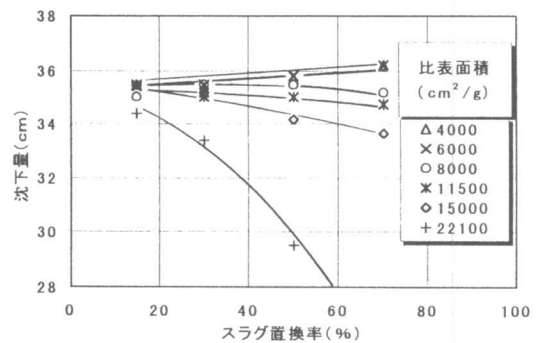


図-5 沈下量とスラグ置換率の関係

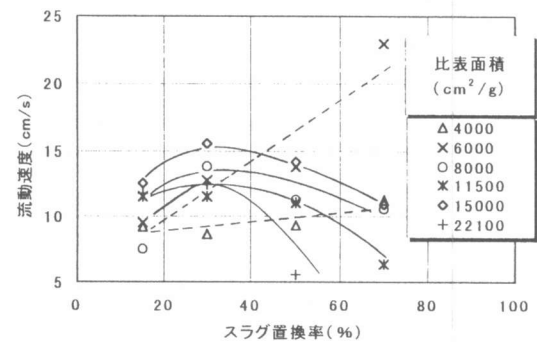


図-6 流動速度とスラグ置換率の関係

ーク値を有する放物線を描いており、流動速度が最も速くなる。言い換えれば、流動性が最も高まる置換率が存在していることが判る。

### 3. 3 Oロート流下試験

#### (1) 流下時間

図-7に種々の比表面積を有する高炉スラグに対するOロート流下時間とスラグ置換率との関係を示す。両者の関係は比表面積 6,000、および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものを除くその他の高炉スラグにおいて、図のようにスラグ置換率 30%付近で流下時間が最も小さくなる曲線となっており、スラグ置換率 30%付近で流動性が高くなる傾向が認められる。このことは3.2(3)に述べた流動速度の結果と類似している。

### 3. 4 凝結試験

#### (1) 始発時間

図-8に種々の比表面積を有する高炉スラグに対する始発時間とスラグ置換率との関係を示す。比表面積 4,000、6,000 および 8,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  ものはスラグ置換率の増加に伴い、始発時間が遅れる傾向が認められる。この傾向は比表面積が小さくなる程顕著である。

一方、これとは逆に比表面積 11,500、15,000 および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率の増加に伴い、始発時間が早くなる傾向が認められる。この傾向は比表面積が大きくなる程顕著である。

#### (2) 終結時間

図-9に種々の比表面積を有する高炉スラグに対する終結時間とスラグ置換率との関係を示す。比表面積 4,000、6,000 および 8,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  ものはスラグ置換率の増加に伴い、終結時間が遅れる傾向が認められる。この傾向は比表面積が小さくなる程顕著である。

一方、比表面積 15,000 および 22,100  $\text{cm}^2/\text{g}$  の超微粉末についてはスラグ置換率の増加に伴い、終結時間が早くなる傾向が認められる。この傾向は比表面積が大きくなる程顕著である。

比表面積 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものはスラグ置換率が変化しても、終結時間は殆ど変化していない。

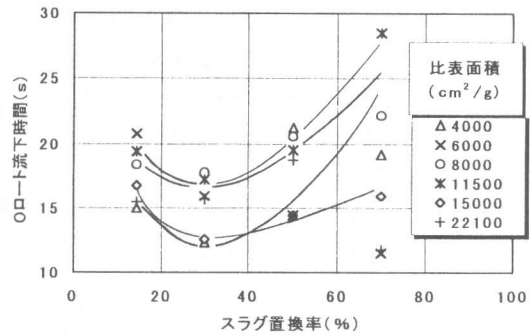


図-7 Oロート流下時間とスラグ置換率の関係

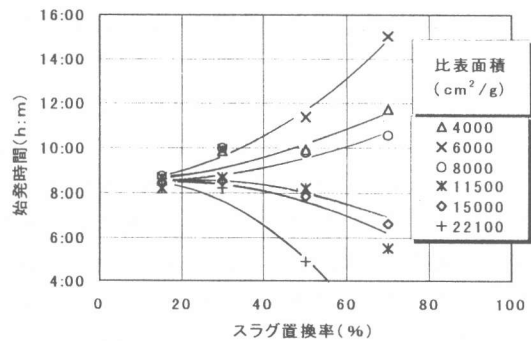


図-8 始発時間とスラグ置換率の関係

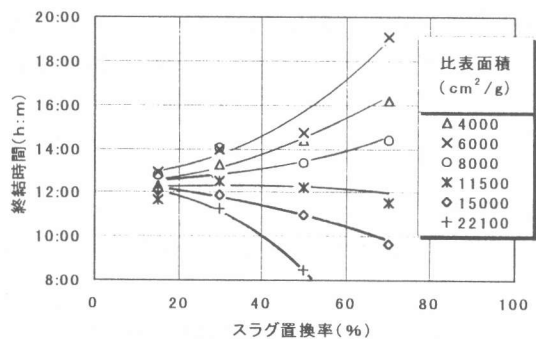


図-9 終結時間とスラグ置換率の関係

すなわち、この比表面積を有する高炉スラグを用いたコンクリートの終結時間は、スラグ置換率の影響を殆ど受けないことが判る。このことはこの比表面積を有する高炉スラグ超微粉末を高流動コンクリートに用いた場合、型枠脱型時期の判定等の施工管理が容易であることを意味している。

### (3) 始発時間と終結時間の関係

図-10に始発時間と終結時間の関係を示す。この図から明らかなように、両者の間には高い相関性が成り立ち、また、始発から終結に至る時間は、配合の種類に関係なく、

何れも約4時間である。このことは高炉スラグの比表面積および置換率は、始発から終結に至るまでの時間に殆ど影響を及ぼさないことが判る。

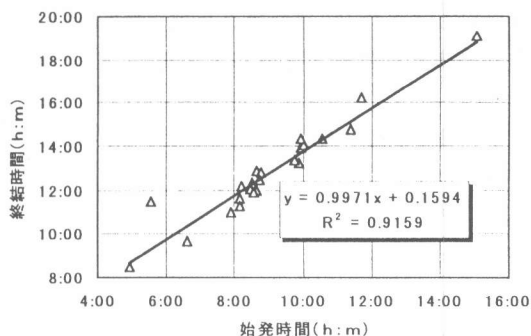


図-10 始発時間と終結時間の関係

## 4. 結論

本実験により得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) 比表面積 4,000 および 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグ微粉末は、スラグ置換率の増加に伴い、高流動コンクリートのスランプフローを大きくする。一方、比表面積 15,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  以上のものは、スラグ置換率の増加に伴い、スランプフローを低下させる。比表面積 8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものは、スラグ置換率を変化させてもスランプフローは殆ど変化しない。従って、8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  の比表面積を用いた高流動コンクリートを施工に供する場合、配合の管理が容易であることを意味している
- 2) 比表面積 8,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  以上の高炉スラグを用いた高流動コンクリートは、スラグ置換率が約 30%において、流動性の高い傾向を示す。
- 3) 比表面積 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグ超微粉末を用いた高流動コンクリートの凝結時間は、スラグ置換率の影響を殆ど受けず、型枠脱型時期の判定等の施工管理を安定的に行うことができる。
- 4) 比表面積 8,000 および 11,500  $\text{cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグを用いた高流動コンクリートは、スラグ置換率に対してフレッシュ性状および凝結時間等が安定的であり、実用上有利であると考えられる。

## 参考文献

- [1] (社)日本建築学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状、(社)日本建築学会、pp.1、1992.6
- [2] (社)日本コンクリート工学協会・超流動コンクリート研究委員会：超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)、(社)日本コンクリート工学協会、pp.5、1994.5
- [3] 鐵鋼スラグ協会：日本工業規格 コンクリート用高炉スラグ微粉末、(財)日本規格協会、1995.5
- [4] 土木学会コンクリート委員会 高流動コンクリート小委員会：高流動コンクリートシンポジウム論文報告集、(社)土木学会、pp.215-226、1996.3
- [5] 土木学会コンクリート委員会 高流動コンクリート小委員会：高流動コンクリートシンポジウム論文報告集、(社)土木学会、pp.280、1996.3