

# 論文 廃棄物溶融スラグ粉体の高流動コンクリートへの適用に関する研究

中村博之\*1・丸山久一\*2・下村 匠\*3・桃井清至\*4

**要旨：**下水汚泥溶融スラグ粉体とは、汚泥を燃焼させた際に生成される産業廃棄物であり、現在各方面において、その有効な利用が検討されている。本研究では、微粉末状にした溶融スラグの高流動コンクリート用混和材としての適用性について検討したものである。粉体の特性と高流動コンクリートの配合関係を明確にすることにより、粒度を適切に調整することで混和材として利用できることが分かった。

**キーワード：**溶融スラグ微粉末、高流動コンクリート、水膜厚、配合設計

## 1. はじめに

下水汚泥などの廃棄物は、その量において増加の一途をたどっている。そのため減量、減容、安定無害化が廃棄物処理の原則であり、その最大限の具現化のために、溶融処理の適用が図られている。その結果、溶融スラグが生成され、この有効利用が課題となっている。現在、溶融スラグの利用例としては、窯業原料や一部の建設資材として利用されているのみである。利用率を向上するために、大量に消費される分野での利用が望まれている。[1] [2] [3]

近年、セメント以外の粉体材料を混和材として比較的多量に用いる高流動コンクリートが、開発・実用化されている。筆者らは、これまで平均粒径を  $100 \mu\text{m}$  に粉砕した溶融スラグ微粉末を混和材として使用した高流動コンクリートが自己充填性を有していることを明らかにしている[4]。しかし、製造された高流動コンクリートは、コンクリート表面に水が浮き上がり材料分離する傾向がみられるものであった。本研究では、溶融スラグ微粉末の高流動コンクリート用混和材としての適用性を検討するため、粉体の特性と高流動コンクリートの配合との関係と明確化し、任意に粉砕した溶融スラグ微粉末を高流動コンクリート用混和材としてどのように粒度を調整すれば適用できるか検討した。

## 2. 高流動コンクリートの配合手順

最大寸法 20mm の粗骨材を用い、粉体材料として、中庸熟ポルトランドセメントのみを用い、増粘剤を用いない自己充填コンクリートの配合設計が提案されている [5] (図-1)。この配合設計の手順では、粗骨材体積は、その実積率の 50% に相当する量とし、細骨材体積は、空気量を含まないモルタル容積の 40% としている。水セメント体積比は、モルタルフロー面積比が 5、相対ロート速度比が 1 となる点を、モルタル試験を行って定める。高性能 A E 減水剤は、モルタル試験の値をもとに、コンクリートのスランプフローが 65cm、空気量が 6% となるように、コンクリートの試し練りを行って定める。

この配合手順は、中庸熟ポルトランドセメントのみを使用することを前提として提案されてい

\* 1 (株)大林組、工修 (正会員)

\* 2 長岡技術科学大学 環境・建設系、Ph.D. (正会員)

\* 3 長岡技術科学大学 環境・建設系、工博 (正会員)

\* 4 長岡技術科学大学 環境・建設系、工博

るものであり、種々の粉体を使用する時には、基本的には、上述の配合設計と同様であるが、使用する粉体特性により、図-1に示す方法を若干修正する必要がある[5]。しかし、本研究では、簡潔かつ統一的な方法により配合設計を行うことを優先し、種々の粉体を用いた場合にも、図-1に示す方法を用いることとした。

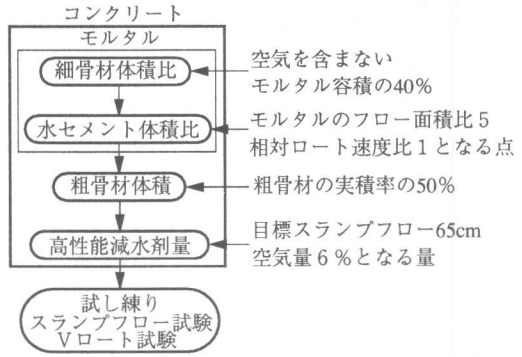


図-1 自己充填コンクリートの配合設計手順

### 3. 単一粉体を用いた高流動コンクリートの検討

粉体の特性がペーストやモルタル、コンクリートのフレッシュ性状に大きな影響を及ぼすことが明らかにされているが、その要因は粉体と水との相互関係によるものと考えられる。そこで、各種粉体を単独で用いた高流動コンクリートを作製し、フレッシュ性状を測定した。粉体粒子に拘束される水を、粒子表面の水膜モデル[6]と粉体の粒度分布より評価し、水粉体体積比を決定した。

#### 3.1 使用材料

本研究に用いた粉体の物理的特性を表-1に示す。ここで、比表面積はブレン空気透過装置により測定し、平均粒径はメジアン径を採用した。また、粒度分布はレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置により測定した。

熔融スラグ微粉末MS10、15の数字は、熔融スラグを平均粒径10μm、15μmを目標に粉砕したことを示している。石灰石微粉末LS100、LS200、LS325の数字は、その値のメッシュを通過させたことを示しており、数字が大きくなるほど粒度が細かいものである。

パラメータBは、式(1)により粒度分布を表したときの定数である。Bの値は、パラメータCを一定(C=1.000)として実測の粒度分布に最も良く近似するように求めた値であり、値が大きくなると粒度が細かいことを表している。各粉体の凝集比率も表-1に示す[6]。

高流動コンクリートに使用した骨材と混和剤を表-2に示す。

表-1 粉体の物理的特性

| 粉体名           | 記号    | 比重   | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) | 粒径 (mm) | パラメータB | 凝集比率  |
|---------------|-------|------|---------------------------|---------|--------|-------|
| 熔融スラグ微粉末      | MS10  | 2.99 | 3990                      | 7.9     | 87851  | 8.53  |
|               | MS15  | 3.04 | 3360                      | 18.0    | 38530  | 2.98  |
| 石灰石微粉末        | LS100 | 2.69 | 4280                      | 12.5    | 55496  | 8.36  |
|               | LS200 | 2.69 | 5050                      | 10.1    | 68833  | 10.00 |
|               | LS325 | 2.69 | 6410                      | 4.2     | 164643 | 26.30 |
| フライアッシュ       | FA    | 2.31 | 3410                      | 23.9    | 29051  | 5.45  |
| 普通ポルトランドセメント  | OPC   | 3.16 | 3400                      | 16.9    | 40045  | 3.23  |
| 中濃熱ポルトランドセメント | MPC   | 3.22 | 3230                      | 16.0    | 43458  | 3.40  |

表-2 使用骨材および混和剤

| 材料  | 材料の特性  |
|-----|--|
| 細骨材 | 信濃川産川砂 (比重2.69, 吸水率2.07, FM 3.58)            |
| 粗骨材 | 石灰砕石 (Gmax=20mm, 比重2.54, 吸水率0.50%, 実積率58.5%) |
| 混和剤 | ポリカルボン酸系                                     |

$$V(D_p) = 1 - \exp(-BD_p^C) \quad (1)$$

$D_p$ : 粒子径 (m)、 $V(D_p)$ : 累積質量積分関数、 $B, C$ : 関数の形状を決定するパラメータ

### 3.2 コンクリートの配合

細骨材体積は、空気を含まないモルタル容積の40%、粗骨材体積は、その実積率の50%に相当する量とした。

水粉体体積比は、緑川ら [6] が提案している粉体粒子の凝集を考慮した水膜モデルを用いて決定することとした。図-2に水膜モデルの概要を示す。水膜モデルの基本概念は、「粒子を取り巻く水の膜厚が同じであれば、同一のスランブフローおよび同一のVロート流下時間を示す」というものである。本モデルは以下の仮定に基づくものである。

- ・粉体粒子はすべて球である。
- ・粉体粒子の粒度分布は式(1)で表される。
- ・粉体粒子は凝集を生じる。ただし、凝集は同一粒径どうしで起こる。
- ・同一種類の粉体においては、粒径に関わらず凝集個数は同じである。
- ・凝集した粒子群の扱いは、同体積をもつ1個の粉体粒子と考え、水膜厚を算出する。

実験結果を基にモデルにより計算した結果、各粉体の凝集個数を凝集比率で表すと、粉体の粒度を表すパラメータBと凝集比率との関係は、図-3のように表される。この図より、任意の粉体について、粒度分布を示すパラメータBが定められると、その粉体の凝集比率を求めることができる。このことは、ある種類の粉体について要求性能（スランブフロー：65±5 cm、Vロート流下時間：10~20sec）を満たす水粉体体積比（W/P）を求めておくと、他の粉体を用いた場合でも、その粉体の粒度分布から凝集比率が求まり水膜厚も決定されるため、所要のW/Pが決定されることになる。

今、LS200を基準としてフレッシュコンクリートの要求性能を満たす高流動コンクリートを作製する時、必要な水粉体体積比は、W/P=64.9%となった。LS200の凝集比率を便宜上10.00とすると、粉体の水膜厚は0.1586 μmとなる。この結果を基に他の粉体のW/Pを算定し、コンクリートの配合を決定すると表-3のようになる。

### 3.3 試験方法

練上がったフレッシュコンクリートについて、スランブフロー試験、Vロート試験 [5]、キッチンペーパーを用いた材料分離評価試験 [7] を行った。Vロート試験に用いた試験器を図-4に示す。材料分離評価試験は、静置したフレッシュコンクリートのペーストの分離を評価するため

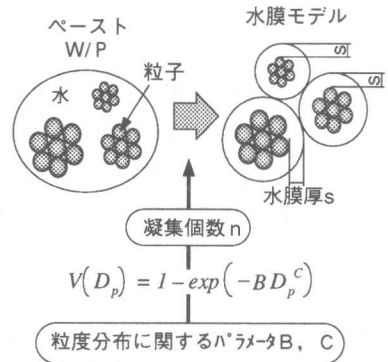


図-2 水膜モデルの概要

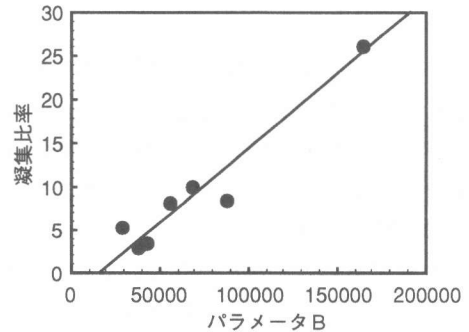


図-3 パラメータBと凝集比率との関係

表-3 コンクリート配合

| 使用粉体<br>P | W/P<br>(%) | 単体量 (kg/m³) |     |     |     | 混和剤<br>P X (%) |
|-----------|------------|-------------|-----|-----|-----|----------------|
|           |            | W           | P   | S   | G   |                |
| MS10      | 84.8       | 195         | 687 | 719 | 787 | 0.50           |
| MS15      | 92.4       | 204         | 671 |     |     | 0.53           |
| LS100     | 61.1       | 162         | 707 |     |     | 0.57           |
| LS200     | 64.9       | 167         | 692 |     |     | 0.55           |
| LS325     | 69.1       | 173         | 675 |     |     | 0.65           |
| FA        | 54.2       | 149         | 636 |     |     | 0.85           |
| OPC       | 85.9       | 196         | 722 |     |     | 1.50           |
| MPC       | 87.3       | 198         | 730 |     |     | 0.90           |

に行った。

### 3.4 実験結果および考察

各試験を行った結果を表-4に示す。選定した配合はスランプフロー値が $65 \pm 5$  cm、Vロート流下時間を10~20secを目標にしたものであり、各粉体においてほぼその性能を満足しているといえる。スランプフロー値が目標値を上回った熔融スラグ微粉末MS10を用いたコンクリートについては、高性能減水剤の添加量を微調整することで要求性能を満たすことができると思われる。

キッチンペーパーを用いた材料分離評価試験では、ペーパーへのペーストの付着量が3g以上の場合は、材料分離が顕著であると判定される[7]。本実験により測定した付着量は、いずれの粉体の配合においても3g以下となっており、ペーストの分離は問題ないと判定された。

本実験により、熔融スラグ微粉末MS10、MS15を含む種々の粉体を単独で用いた場合について、前節で述べた水膜モデルを用いた配合設計方法に基づき、粉体の粒度分布をもとに、スランプフロー、Vロートの値が要求性能を満たす高流動コンクリートの製造が可能であることが示された。これらの粉体を任意の割合で混合して用いる場合についても、混合粉体の粒度分布を用いることにより、同様の手順で配合を決定することは可能であると思われる。

### 4. 粒度分布の粗い廃棄物粉体の高流動コンクリートへの適用についての検討

前章では、粉碎処理により粒度分布を既存のコンクリート用混和材と同程度に調整した下水汚泥熔融スラグ微粉末を取り上げ、既存の粉体と同様の方法により混和材として利用できる可能性を示した。しかしながら、処理設備などの事情により、粒度分布をこの範囲に調整することが困難な場合もある。ここでは、粒度分布が既存の混和材よりも粗い範囲にある廃棄物粉体の高流動コンクリートへの適用について検討する。これらの粉体は、他の粉体と粒度分布がかけ離れているため、他の粉体と混合して使用することを考えた。

#### 4.1 使用材料

粒度分布が粗い熔融スラグ微粉末MS100、ならびに下水汚泥球形灰MFAを用いた。球形灰は下水汚泥を高温で熱した際に発生する灰であり、炉内が非常に高温であるために表面が熔融し、表面張力により球形をなしている。各粉体の物理的特性を表-5に示す。

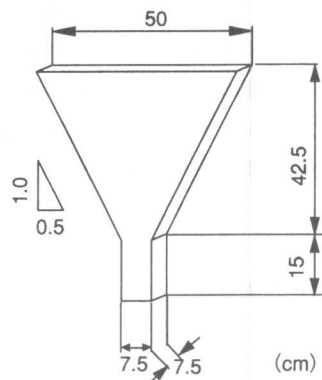


図-4 V型ロートの形状・寸法

表-4 試験結果

| コンクリート配合の粉体 | スランプフロー (cm) | Vロート流下時間 (sec) | ペーパー付着量 (g) |
|-------------|--------------|----------------|-------------|
| MS10        | 79.5         | 11.19          | —           |
| MS15        | 68.0         | 10.51          | 2.9         |
| LS100       | 71.5         | 19.09          | 1.5         |
| LS200       | 63.5         | 17.21          | 1.7         |
| LS325       | 67.5         | 15.17          | 1.4         |
| FA          | 73.0         | 15.11          | 1.5         |
| OPC         | 65.0         | 21.44          | 1.1         |
| MPC         | 75.5         | 13.93          | —           |

注) MS10、MPCのペーパー付着量は未測定である。

表-5 粉体の物理的特性

| 粉体名      | 記号    | 比重   | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) | 粒径 (mm) | ハラムータB |
|----------|-------|------|---------------------------|---------|--------|
| 熔融スラグ微粉末 | MS100 | 2.92 | 850                       | 86.9    | 7980   |
| 下水汚泥球形灰  | MFA   | 2.23 | 1110                      | 48.4    | 14327  |

#### 4.2 混和材の混合割合

セメントの40%をMS100により置換して高流動コンクリートを製造した場合、材料分離を生じることを報告した [4]。ここでは、材料分離を抑制するため、粒度の細かい粉体を混合して使用することとした。

粉体の混合割合は、混合した粉体の粒度分布を表すパラメータBが、普通ポルトランドセメントと同等かそれ以上になるよう調整した。普通ポルトランドセメントとMS100の2成分では、この条件を満足することができないので、粒度の細かいLS325を混合して、粒度分布を調整することとした。3種類の粉体を混合した粉体の粒度分布は、各粉体の粒度分布の測定値を、重みづけ平均したものである。この粒度分布から混合粉体のパラメータBを算出した。パラメータBが目標値を満足しない場合は、粉体の混合割合を変えて目標値を満足するまで繰り返し計算を行う。混合した粉体の比重は、混合粉体の単位体積重量から求めた。溶融スラグ微粉末と球形灰をそれぞれ混合した3成分粉体の混合割合と比重、パラメータB、凝集比率を表-6に示す。なお、凝集比率は、図-3より求めたものである。

表-6 3成分粉体の特性

| 3成分粉体           | 混合割合          | 比重   | パラメータB | 凝集比率 |
|-----------------|---------------|------|--------|------|
| OPC+LS325+MS100 | 5 : 2.5 : 2.5 | 2.89 | 41087  | 4.42 |
| OPC+LS325+MFA   | 5 : 2.5 : 2.5 | 2.81 | 42919  | 4.66 |

#### 4.3 コンクリートの配合

混合粉体の粒度分布を用いて、前章に述べた方法により決定したコンクリートの配合を表-7に示す。

表-7 3成分粉体のコンクリート配合

| 使用粉体            | W/P (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |       |       |     |     |     | 混和剤 P× (%) |
|-----------------|---------|--------------------------|-----|-------|-------|-----|-----|-----|------------|
|                 |         | W                        | OPC | LS325 | MS100 | MFA | S   | G   |            |
| OPC+LS325+MS100 | 70.9    | 176                      | 392 | 167   | 181   | —   | 719 | 787 | 1.10       |
| OPC+LS325+MFA   | 74.1    | 181                      | 385 | 164   | —     | 136 | —   | —   | 1.30       |

#### 4.4 試験方法

フレッシュコンクリートの試験は、3.3と同様にスランプフロー試験、Vロート試験、キッチンペーパーを用いた材料分離評価試験を行った。

#### 4.5 実験結果および考察

試験結果を表-8に示す。溶融スラグ微粉末MS100を混合した粉体では、フレッシュコンクリートの要求性能（スランプフロー：65±5 cm、Vロート流下時間：10~20sec）を満たす高流動コンクリートを作製することができた。球形灰MFAを混合した粉体では、同様の方法ではスランプフロー値およびVロートの流下時間を同時に満足する配合を得ることはできなかった。球形灰の粉体粒子を電子顕微鏡により観察した結果、表面に多くの穴を持った粒子も含まれていることが認められることから、粉体自体の吸水性の高いことがこの原因と考えられる。したがって、粒子表面の水膜を仮定して水粉体体積比を求める

表-8 試験結果

| コンクリート配合の粉体     | スランプフロー (cm) | Vロート流下時間 (sec) | ペーパー付着量 (g) |
|-----------------|--------------|----------------|-------------|
| OPC+LS325+MS100 | 67.0         | 20.57          | 1.0         |
| OPC+LS325+MFA   | 72.0         | 23.49          | 1.1         |

方法では、要求性能を満足する配合が適切に求められなかったのではないと思われる。球形灰を写真-1に示す。

本実験により、粒度の粗い溶融スラグ微粉末MS100は、他の粉体と混合し適切な粒度分布に調整することで、スランプフロー、Vロートの値が要求性能を満たす高流動コンクリートの製造が可能であること、前章で述べた水膜モデルを用いた配合設計方法は、混合粉体にも適用できる可能性があることが示された。

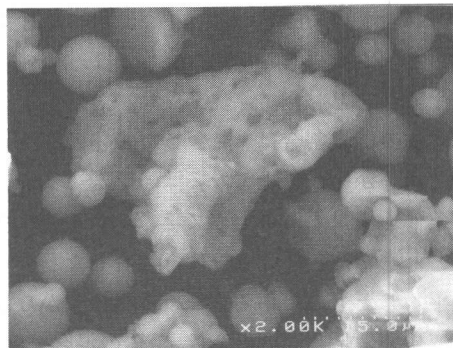


写真-1 下水汚泥球形灰

## 5. 結論

本研究により以下の知見が得られた。

- (1) 粒度分布を既存のコンクリート用混和材と同程度に調整した下水汚泥溶融スラグ微粉末MS10、MS15は、コンクリート中の粉体を任意の割合で置換して高流動コンクリートに用いることができる。
- (2) 粒度の粗い下水汚泥溶融スラグ微粉末MS100は、粒度分布の細かい粉体と適切な割合で混合することにより、高流動コンクリートに用いることができる。
- (3) 粉体の凝集と粒子表面の水膜を考慮したモデルの基づき、粉体の粒度分布から、高流動コンクリートに用いる際の適切な水粉体体積比を算定することができる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、溶融スラグ微粉末を株式会社クボタに提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 下水汚泥資源利用協議会：下水汚泥の建設資材利用マニュアル（案）、1991
- [2] 財団法人 エンジニアリング振興協議会：平成6年度廃棄物溶融スラグの窯業原料化調査報告書、1995.3
- [3] 財団法人 下水道新技術推進機構：平成6年度新技術活用モデル事業高品質溶融スラグ製造技術に関する実用化研究中間報告書、1995.3
- [4] 中村博之、丸山久一、下村 匠、桃井清至：下水汚泥溶融スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの流動特性、土木学会第51回年次学術講演概要集第5部、pp.636-637、1996.9
- [5] 岡村 甫、前川宏一、小沢一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- [6] 緑川猛彦、丸山久一、下村 匠、中村博之：凝集状態を考慮した粉体の保水能力の評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、投稿中
- [7] 皆口正一、丸山久一、稲葉美穂子、坂田 昇：高流動コンクリートの材料分離測定方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.89-92、1996