

論文

[1009] ペーストの流動性に及ぼす微粉末物性の影響

緑川猛彦\*1 · 丸山久一\*2

1. はじめに

近年、労働者不足による工事の合理化および省力化やコンクリート構造物の耐久性の向上などの観点から、高流動コンクリートの研究・開発が各方面で進められている。しかしながら、高流動コンクリートの配合に関してはまだ十分に確立されておらず、混和材である微粉末量については技術者の勘および試験練りによって求められているのが現状である[1]。

そこで本研究は、コンクリートの流動性に及ぼす微粉末の影響を調べることを目的とし、特に微粉末の物理的性質がペーストの物性に及ぼす影響について、ペーストのフロー試験およびJロート試験の結果より検討することとした。

2. 微粉末の物理的性質

実験に使用した材料の物理的性質を表1に示す。粉体密度は土質工学会の土粒子の密度試験に準じ、また比表面積はブレン空気透過装置により測定した。

図1に各微粉末の粒径加積曲線を示す。このグラフは分散媒として0.025wt%ヘキサメタリン酸水溶液を用い、レーザー回折・散乱式粒度分布測定装置により粒子形状を球に還元して求めたものである。各微粉末ともそれぞれ異なる幅の広い粒度分布を持った粉体である事がわかる。ペーストの粘性および流動性は、微粉末の粒径、粒子形状および粒度分布が複雑に関連し、水との相互作用により粒子間距離が変化することにより影響されると考えられる。これらのことから、本研究においては特に微粉末の粒径に着目し、比表面積球相当径を微粉末の物性を代表する指標として用いることとした。また、粒子形状は球形と仮定した。

一般に、比表面積と粒子半径の関係は次式で表されることが知られている[2]。

$$r = \frac{K}{2\rho \cdot Sw} \quad (1)$$

ここで、

r : 平均粒子半径 (cm)

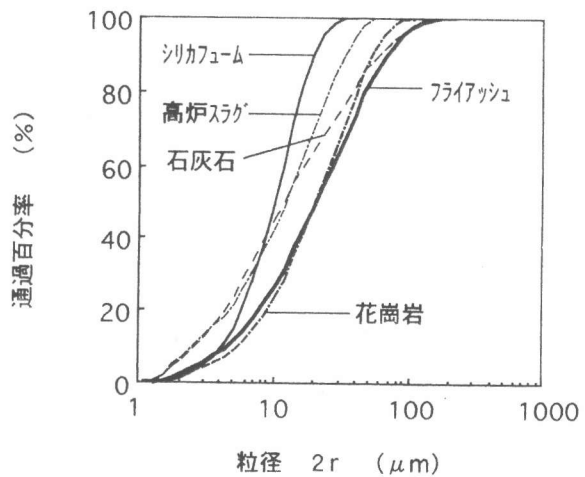


図1 各微粉末の粒径加積曲線

表1 使用材料の物理的性質

材 料	密 度 (gf/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /gf)	平均粒子半径 (μm)	記号
シリカフェーム	2.245	38460	0.3	---○
石灰石	2.739	7030	1.6	--△
高炉スラグ	2.948	4330	2.4	—□
普通ポルトランドセメント	3.150	3330	2.9	--▲
花崗岩	2.870	2740	3.8	---●
フライアッシュ	2.095	3240	4.4	—■

\*1 福島工業高等専門学校助手 土木工学科、工修 (正会員)

\*2 長岡技術科学大学教授 建設系 Ph.D (正会員)

- K : 形態係数 (K=6)
- r : 粉体の密度 (gf/cm<sup>3</sup>)
- Sw : 比表面積 (cm<sup>2</sup>/gf)

この関係より各微粉末の平均粒子半径は表1のようになる。

### 3. 実験方法

#### 3. 1 ペーストの配合

ペーストの配合は微粉末 (p) と水 (w) の質量比  $p/(p+w)$  (%) をパラメータとして、材料分離が生ぜず練混ぜ可能な範囲内で10%毎に変化させた。また、練り混ぜたペーストの体積が2000cm<sup>3</sup>となるようにした。

#### 3. 2 実験方法

##### (1) 粘度測定

ペーストはハンドミキサーによる強制練りとし、単一円筒回転粘度計 (B型粘度計) によりペーストの粘度を求めた。ペーストは非ビンガム流体と考えられ、測定時の回転数により粘度が変化するため、回転数は6、12、30、60r.p.mの4種類で測定し、30r.p.mと60r.p.mの間の勾配を粘度として用いることとした。

##### (2) フロー試験

微粉末はシリカフェーム、石灰石、高炉スラグ、普通ポルトランドセメント、花崗岩、フライアッシュの6種類とし、各ペーストの粘度測定後、砂の表面乾燥飽水状態試験用フローコーン (V=248.2cm<sup>3</sup>) によりフロー値を求めた。

##### (3) Jロート試験

微粉末はシリカフェーム、高炉スラグ、普通ポルトランドセメント、花崗岩、フライアッシュの5種類とし、各ペーストの粘度測定後Jロート (V=576.0cm<sup>3</sup>) 流下時間を測定した。その後、図2に示すように落下したペーストのフロー値を測定した。

### 4. 結果および考察

#### 4. 1 ペーストの粘度

図3に微粉末混入率と粘度との関係を示す。粘度は微粉末混入率の増加にともない指数関数的に増加しているが、特に同じ混入率であればシリカフェームや石灰石微粉末の様な平均粒子半径の小さい微粉末がペーストの粘度を著しく増加させている。

図4は、ペースト中の微粉末が均一球で各々の粒子が一定の間隔を保っていると仮定したときのユニットセルを図示したものである。この時の粒子配列は六方最密充填であり、空隙率は、

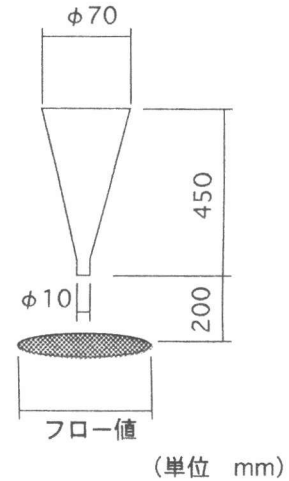


図2 Jロート試験によるフロー値の測定方法

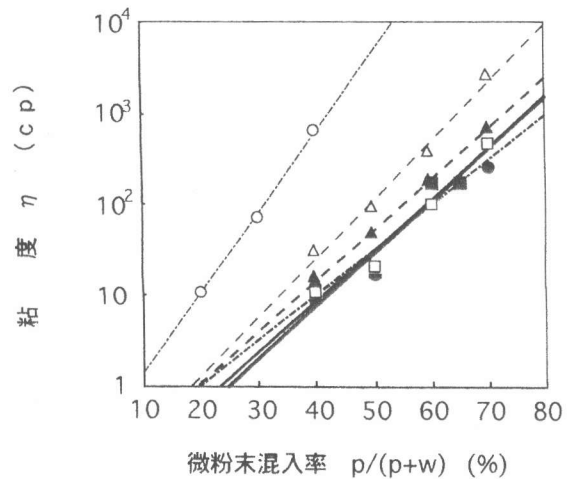


図3 微粉末混入率と粘度の関係

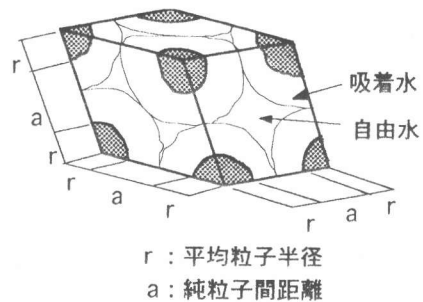


図4 六方最密充填のユニットセル

$$n = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} (2r + a)^3 - \frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{1}{\sqrt{2}} (2r + a)^3} \quad (2)$$

と示される[3]。また、ペーストの空隙は水で満たされていると考えられるので、ペーストの空隙率は配合条件より次式で求められる。

$$n = \frac{w}{\frac{p}{\rho} + w} \quad (3)$$

式(2)と式(3)より、ペーストの配合条件が求まれば粒子中心間距離(2r+a)及び純粒子間距離(a)を求めることができる。

図5は粒子中心間距離と粘度との関係を示したものである。各ペーストの粘度は粒子中心間距離が増加するにしたがい減少し、同じ粒子中心間距離であれば平均粒子半径が大きいものほど粘度が高い傾向を示す。また、同じ粘度であれば平均粒子半径が小さなものは粒子中心間距離が小さい。これは、同じ粒子中心間距離であっても粒径が大きいものは純粒子間距離が小さくなるため、粒子間の作用力が増加することに起因すると考えられる。

図6は純粒子間距離と粘度との関係を示したものである。図5と同様に純粒子間距離が増加するに従い粘度は減少する傾向にあるが、同じ純粒子間距離においても各ペーストにより粘度が異なり、シリカフェームの様な平均粒子半径が小さなものは粘度の増加率が大きいことがわかる。これは、同じ純粒子間距離であれば平均粒子半径の大きい微粉末の方が粒子間に及ぼす作用力が大きくなるためと予想され、また、作用力は粒子間距離が小さくなるにしたがって指数関数的に大きくなると考えられる。これらのことより、ペーストの粘度は粒子間に作用する力に影響されると考えられる。

今、粒子の直径(2r)に対する粒子中心間距離(2r+a)の比を相対粒子間距離cとし

$$c = \frac{2r + a}{2r} = 1 + \frac{a}{2r} \quad (4)$$

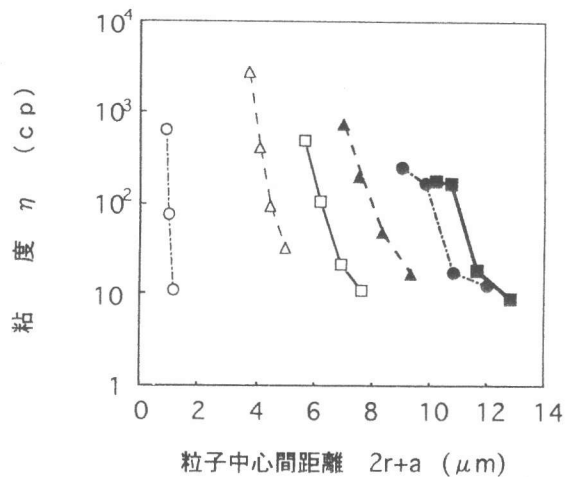


図5 粒子中心間距離と粘度の関係

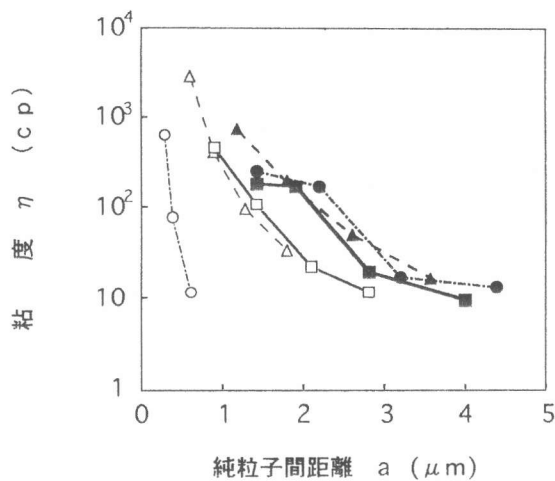


図6 純粒子間距離と粘度の関係

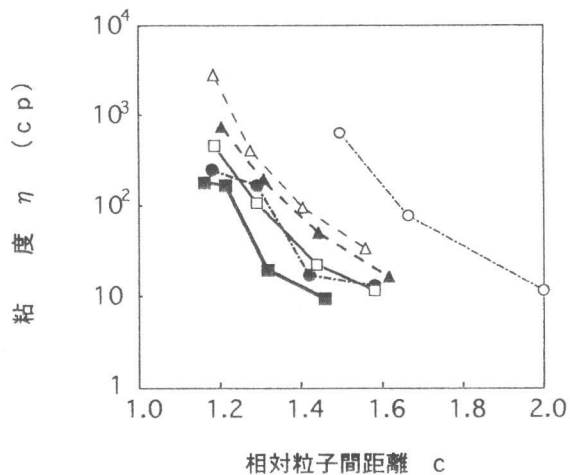


図7 相対粒子間距離と粘度の関係

とくと、相対粒子間距離と粘度との関係は図7に示すようになる。各微粉末とも相対粒子間距離が大きくなるに従い粘度は減少し、また相対粒子間距離が同じであれば平均粒径の小さい微粉末の粘度が大きい傾向を示している。これは、粘度が相対粒子間距離と粒径の影響を受けていることを表している。

ペンジュラー状態では、粉体同士の接触部に液体が存在する（液体架橋）ときの2粒子間に働く付着力は、粒径が小さくなるに従い小さくなるが、それ以上に粒子の自重が減少するために小さい粒子ほど凝集しやすいことが知られている[4]。いま、液体架橋により支えられる粒子の個数をNとすると、

$$N = \frac{H}{W} = \frac{f(c, r)}{\frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho \cdot g} \quad (5)$$

ここで、  
 N : 粒子の個数  
 H : 付着力  
 W : 粒子1個の自重  
 r : 平均粒子半径  
 ρ : 粒子の密度

となり、またペーストの粘度はその個数Nに比例すると考えられるから、

$$\eta \propto N \quad (6)$$

$$\eta \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho \cdot g \propto f(c, r) \quad (7)$$

図8は式(7)の左辺を平均粒子半径で除したものと相対粒子間距離との関係を示したものである。縦軸は粘度に関する項目であり、相対粒子間距離が大きくなるにしたがい指数関数的に減少し、粒子の種類にかかわらずほぼ同じであることが分かる。また、データのばらつきは粒子形状や粒度分布の影響であると考えられる。

以上の結果より、ペーストの粘度は微粉末の種類に関係なく粒子間付着力によって凝集される粒子個数に影響され、以下の式で表されることが明かになった。また、本実験において定数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  は次のようになった。

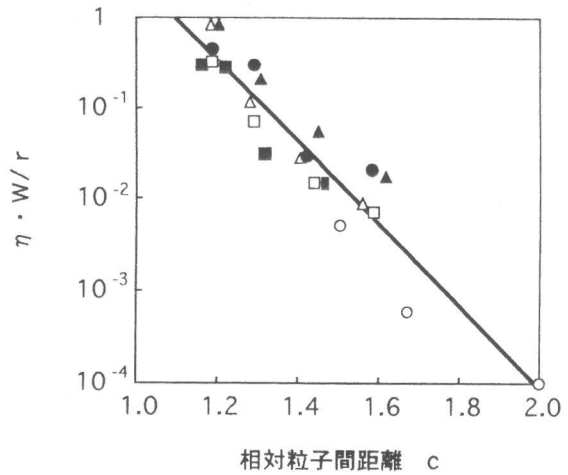


図8 相対粒子間距離と粘度に関する項目との関係

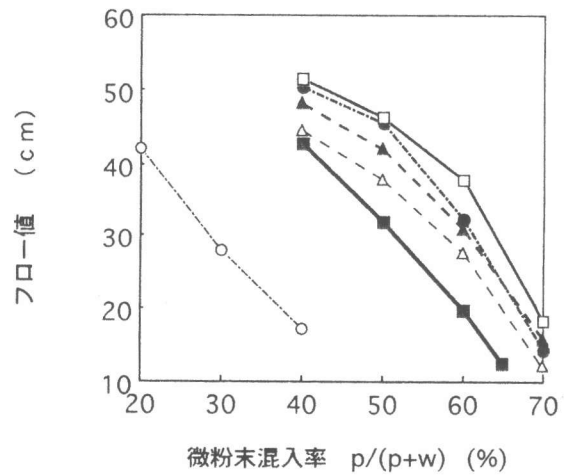


図9 微粉末混入率とフロー値の関係

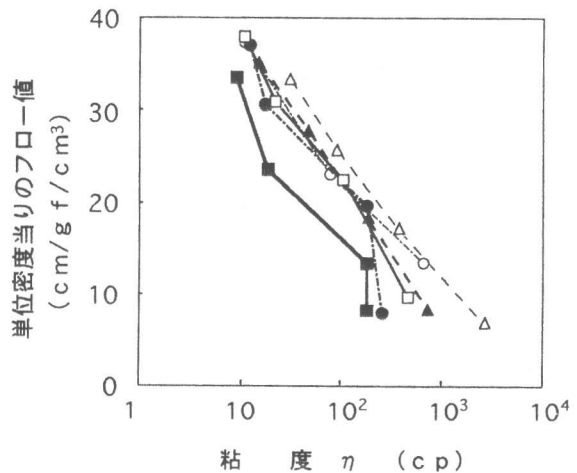


図10 粘度とフロー値の関係

$$\eta = \frac{\alpha_1 \cdot r}{10^{(\alpha_2 \cdot c)} \cdot W} \quad (8)$$

ここで、  
 $\eta$  : ペーストの粘度  
 $c$  : 相対粒子間距離 ( $1+a/2r$ )  
 $W$  : 粒子1個の自重  
 $r$  : 粒子半径  
 $\alpha_1 = 8.6 \times 10^4$   
 $\alpha_2 = 4.5$

#### 4.2 フロー値

図9に微粉末混入率とフロー値の関係を示す。各微粉末とも混入率が増加するに従いフロー値は減少している。

次に、粘度と単位密度当りのフロー値の関係を図10に示す。ここで単位密度当りのフロー値とは、各ペーストのフロー値をペースト密度で除した値である。各ペーストとも粘度が増加するに従いフロー値も減少するが、粘度が同じであれば、平均粒子半径が大きいほどフロー値が小さいことがわかる。これは、同じ粘度であれば平均粒子半径が大きいほど相対粒子間距離が小さいために、粒子相互の移動が妨げられフロー値が減少すると考えられる。

図11はJロート試験において落下したペーストの単位密度当りのフロー値と粘度の関係を示したものである。この試験においてもフロー試験とほぼ同様の結果を得、ロート試験における落下ペーストのフロー値もフロー試験によるものと同様に評価できることが明らかになった。

#### 4.3 Jロート流下時間

図12に粘度と単位密度当りのJロート流下時間の関係を示す。ここで、流下時間は測定値から水の流下時間を引いたものである。流下時間は粘度に比例して指数関数的に増加しており、また同じ粘度においても流下時間は異なり、シリカフェームの様な平均粒子半径が小さい微粉末ほど流下時間が早いことがわかる。

図13に平均粒子半径と粘度におけるJロート流下時間の増加率の関係を示す。平均粒子半径が

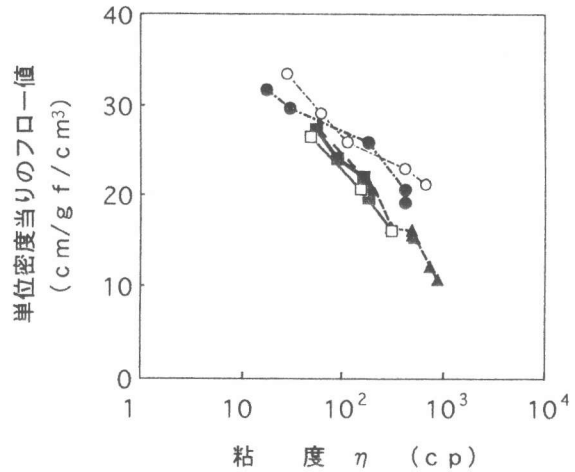


図11 粘度とフロー値の関係 (Jロート試験)

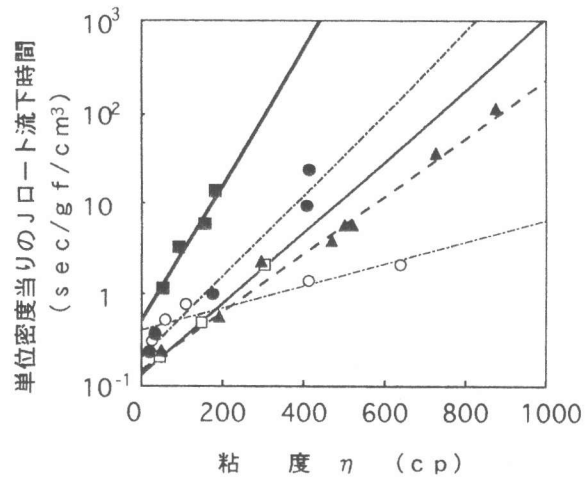


図12 粘度とJロート流下時間の関係

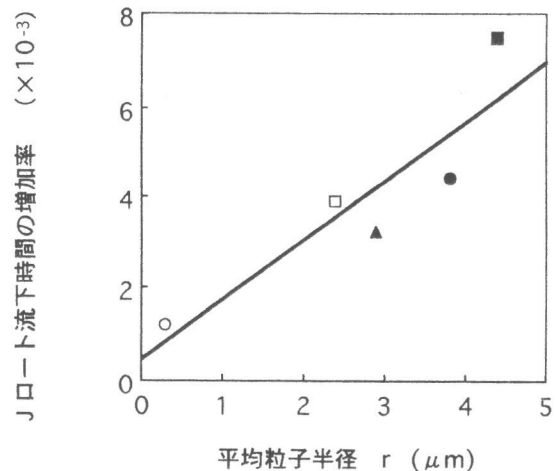


図13 平均粒子半径と流下時間の増加率

大きくなるに従い、増加率は直線的に増加する傾向にあり、同じ粘度であれば粒径が大きいほど J ロット流下時間が大きいことがわかる。

一般に、コンクリートにおいて流れが絞られる場合には、その箇所で粗骨材が凝集し、その後粗骨材同士のアーチングにより流れが閉塞することが確認されている[5]。また、粗骨材の凝集を抑さえるためには、モルタルあるいはペーストの粘性が非常に重要であることが明らかになっている[6]。

これらのことを考慮すると、ペースト中においてもコンクリート中と同様に、粒子間の凝集やアーチング等が生じていると考えられ、平均粒径が小さい微粉末を用いたペーストは、同じ粘度であれば相対粒子間距離が大きい為に粒子の凝集が起りにくく、粒子間の接触・衝突が少なくなり流下時間が早くなると考えられる。

## 5. 結論

微粉末の粒径が一定でかつ粒子形状を球と仮定し、微粉末ペースト物性について検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. 微粉末を用いたペーストの粘度は微粉末の種類に関係なく粒子間付着力によって凝集される粒子個数に影響され、粒径が小さくまた軽い微粉末を用いたものは凝集される粒子個数が多くなるために粘度の増加が大きい。
2. ペーストのフロー値はペースト密度が同じであれば粘度と微粉末粒径の影響を受け、同じ粘度であれば粒径が小さい微粉末の方が相対粒子間距離が大きくなりフロー値は大きくなる。
3. ペーストの P ロット流下時間はペースト密度が同じであれば粘度と微粉末粒径の影響を受け、同じ粘度であれば粒径が小さい微粉末の方が相対粒子間距離が大きくなり粒子間接触が少なくなるため流下時間は小さくなる。

## 参考文献

- 1) 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報告書 (I)、1993
- 2) 久保輝一郎、水渡英二他：粉体 理論と応用、丸善、pp.132、1968
- 3) 三輪茂雄：粉体工学通論、日刊工業新聞社、pp.31-36、1993
- 4) 粉体工学の基礎編集委員会：粉体工学の基礎、日刊工業新聞社、pp.133-138、1992
- 5) 橋本親典、丸山久一、清水敬二：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化に関する実験手法、コンクリート工学 Vol.26, No.2、pp.119-127、1988
- 6) 岡村甫、小沢一雅：締固め不要への挑戦 コンクリート工事の近代化をめざして、セメント・コンクリート No.539、pp.2-9、1992