

論文 凝集状態を考慮した粉体の保水能力の評価

緑川猛彦*¹・丸山久一*²・下村匠*³・中村博之*⁴

要旨: 粉体の拘束水比や変形係数等の保水能力は、粉体の物性の違いにより種々な様相を示す。一般的に高流動コンクリート用粉体は拘束水比や変形係数の小さいものが好ましいとされているが、粉体の物性と保水能力との関係は未だ明確ではなく、高流動コンクリートの配合設計を複雑なものとしている。本研究は、粉体の凝集と粒子周りの水膜を粒度分布を基礎にモデル化し、粉体の保水能力の評価を行ったものである。その結果、微粉を多く含む粉体ほど凝集しやすいこと、凝集を考慮することによりペーストの性状と水膜厚との関係が明確になることなどが明らかになった。

キーワード: 粒度分布、水膜厚、凝集、拘束水比、変形係数

1. はじめに

高流動コンクリートに用いられる粉体の拘束水比や変形係数等の保水能力は、粉体の種類や粒度分布、粒子形状が異なると種々の様相を示す [1]。一般的に高流動コンクリートに用いられる粉体は拘束水比や変形係数の小さなものが良いとされているが、粉体の物性と保水能力との関係は今だ明確にされているとは言い難く、粉体物性が異なる度にペーストのフロー試験から保水能力を評価しているのが現状である [2]。

そこで本研究は、粉体物性と保水能力との関係を明らかにするために、粉体の粒度およびその分布に着目し、粒度分布と凝集性との関係、および凝集を考慮した粉体粒子周りの水膜厚とペースト性状との関係について検討したものである。

2. 粒度分布のモデル化および水膜厚の算出方法

2.1 粒度分布のモデル化

(1) 累積質量分布関数

粉体の粒度分布は、粒径が数 nm から数百 μ m まで連続的に分布していると考えられる。そこで、粒子径を D_p としたとき、単位質量中において粒径が無限小から D_p までの累積質量百分率が、ある D_p の連続関数 $V(D_p)$ により表せると仮定する。 $V(D_p)$ を累積質量分布関数と定義する。本研究においては関数 $V(D_p)$ を以下の式をもって表わした [3]。

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

ここで、
 $V(D_p)$: 累積質量分布関数
 D_p : 粒子径 (m)
 B, C : 関数の形状を決定するパラメータ

* 1 福島工業高等専門学校助手 建設環境工学科、工修 (正会員)
 * 2 長岡技術科学大学教授 環境・建設系、Ph.D (正会員)
 * 3 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系、工博 (正会員)
 * 4 (株)大林組、工修 (正会員)

(2) パラメータ B 、 C の決定

式 (1) は、パラメータ B 、 C を変化させることにより、粒度分布のピークを与える粒径およびピークを中心とした分布のなだらかさを変化させることができる。本研究においては、事前の検討結果より、パラメータ C を一定 ($C=1.000$) とすることとした。

式 (1) で粉体の粒度分布が表せるか否かを検討するため、表-1 に示す 7 種類 13 ケースの粉体について、パラメータ B 、 C の同定を行った。その相関性は、以下の式により相関係数として表すこととした [4]。

$$R = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2 \cdot \sum(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (2)$$

相関係数 $= R^2$

- ここで、 y_i : 実測累計百分率
- \bar{y} : 実測累計百分率の平均値
- \hat{y}_i : 算定累計百分率
- $\bar{\hat{y}}$: 算定累計百分率の平均値

図-2 に本研究で使用した粉体についての粒度分布の実測値と式 (1) で相関性が最も高くなるように、 B 、 C を定めた場合の粒度分布との比較を示す。また、表-1 に用いた B 、 C の値および相関係数を示す。いずれの粉体においても実測値と算定値との相関が高く、式 (1) により粒度分布が表せると考えられる。

2.2 水膜厚の算出方法

累積質量分布関数が式 (1) で表せると仮定すると、質量分布密度関数は式 (1) を微分することにより次式で求めることができる。

$$\frac{dV(D_p)}{dD_p} = BCD_p^{C-1} \exp(-BD_p^C) \quad (3)$$

一方、粒径 D_p なる粒子 1 個の体積 V_{D_p} および質量 W_{D_p} は、粒子形状を球と仮定すると

$$V_{D_p} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3 \quad (4)$$

$$W_{D_p} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3 \rho \quad (5)$$

ここで、 ρ : 粉体の密度

したがって、単位体積当たりにおける粒径 D_p の粒子個数 n は次のようになる。

$$n = \frac{dV(D_p)}{dD_p} \rho / W_{D_p} \quad (6)$$

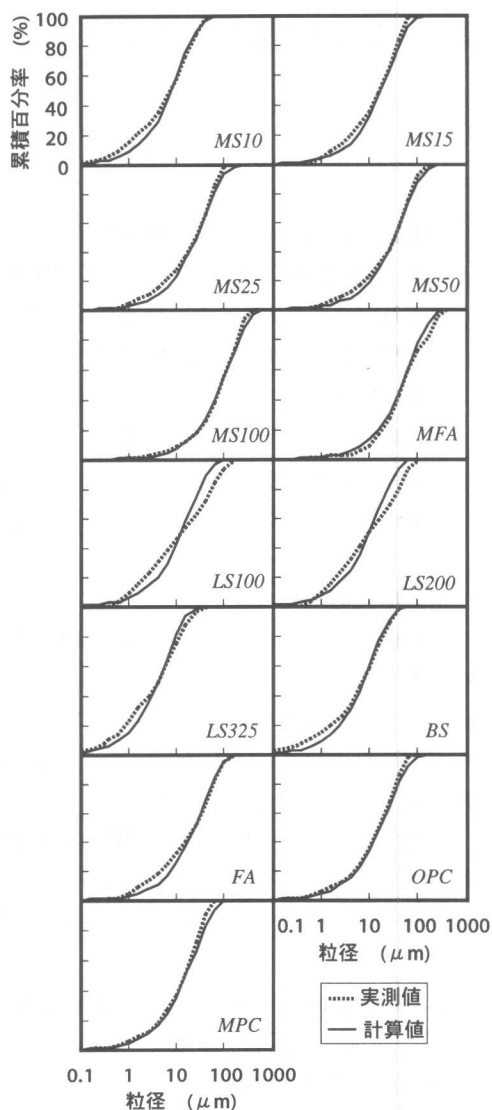


図-2 各粉体の粒度分布

今、図-1に示すように、ペースト中において粒子の大小に関わらず粒子の膜厚を一定と考えると、ペーストの水粉体体積比は、単位体積当たりにおける粒子全体にわたり膜厚分の水量を加算すればよく、ペーストの水粉体体積比と水膜厚との関係は、次式で表される。

$$W/P = \int \frac{4}{3}\pi \left(\left(\frac{D_p}{2} + s \right)^3 - \left(\frac{D_p}{2} \right)^3 \right) n dD_p \quad (7)$$

ここで、 W/P : ペーストの水粉体体積比
 s : 水膜厚 (m)

2.3 凝集を考慮した水膜厚の算出方法

粒子の凝集パターンは、大きな粒子の回りに小さな粒子が凝集するものや小さな粒子同士が凝集するものなどさまざまである。また、凝集は小さな粒子ほど起こりやすいため、同一粉体中であっても微粒部分と粗粒部分とでは凝集個数が異なると考えられる。しかしながら、凝集によって粒度分布が見かけ上粗粉側にシフトする傾向となること、また、粒度分布の範囲が数 μ mから数百 μ mとほぼ同じ粉体を対象としていることから、本研究においては凝集に関して以下の仮定を設けることとした(図-1)。

- ・凝集は同一粒径同士で起こる。
- ・同一粉体中においては、粒径に関わらず凝集個数は同じである。

・凝集した粒子群は、凝集した粒子と同体積をもつ球な粒子と考え、水膜厚は仮定した粒子径において算定する。

今、粉体粒子が G 個凝集していると考え、凝集している1ユニットの体積 V_{un} および質量 W_{un} は、

$$V_{un} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_p}{2} \right)^3 G \quad (8)$$

$$W_{un} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_p}{2} \right)^3 \rho G \quad (9)$$

よって、凝集した粒子群と同体積なる球粒子の粒径 D_G は

$$D_G = \sqrt[3]{D_p^3 G} \quad (10)$$

したがって、単位体積当たりにおける粒径 D_G の粒子(粒径 D_p の粒子が G 個凝集している見かけの粒子)の個数 n_G および W/P と水膜厚との関係は、

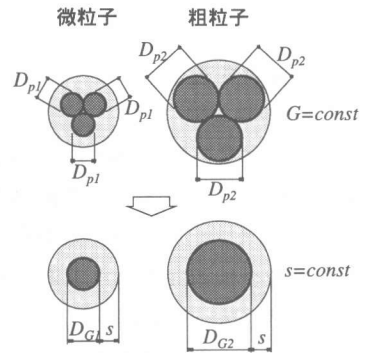


図-1 モデル化に関する仮定

表-1 使用材料

材 料	記号	比 重	比表面積 (cm ² /g)	粒径 (μ m)	パ ^ラ メ-タ B	パ ^ラ メ-タ C	相関係数
下水汚泥溶融スラグ	MS10	2.99	3990	7.9	87851	1.000	0.996
	MS15	3.04	3360	18.0	38530	1.000	0.997
	MS25	2.98	2280	24.5	26486	1.000	0.997
	MS50	2.93	1540	45.6	20828	1.000	0.998
	MS100	2.92	850	86.9	7980	1.000	0.998
下水汚泥焼却灰	MFA	2.23	1110	48.4	14327	1.000	0.995
石灰石微粉末	LS100	2.69	4280	12.5	55496	1.000	0.964
	LS200	2.69	5050	10.1	68833	1.000	0.971
	LS325	2.69	6410	4.2	164643	1.000	0.991
高炉スラグ	BS	2.89	4200	7.7	90019	1.000	0.998
フライアッシュ	FA	2.31	3410	23.9	29051	1.000	0.995
普通ポ ^ル トランドセメント	OPC	3.16	3400	16.9	40045	1.000	0.998
中庸熱ポ ^ル トランドセメント	MPC	3.22	3230	16.0	43458	1.000	0.997

$$n_G = \frac{dV(D_p)}{dD_p} \rho / W_{un} \quad (11)$$

$$W/P = \int \frac{4}{3} \pi \left(\left(\frac{D_G}{2} + s \right)^3 - \left(\frac{D_G}{2} \right)^3 \right) n_G dD_p \quad (12)$$

3. 実験方法

3.1 使用材料

本研究に使用した粉体の物理的性質および粒度分布に関するパラメータを表-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、粒径は粒径加積曲線から求まるメジアン径を採用した。パラメータ B はメジアン径を用いて式 (1) により算出したものであり、 B が大きいほど粒径加積曲線は細粒径の方にシフトするものである。

3.2 各種水粉体体積比の測定

(1) 拘束水比

ペーストのフロー試験はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定されている方法で行い、ペーストに振動を与えない水平な広がり方をフロー値とした。ペーストのフロー面積比 ($\Gamma_p = (F_p / 100)^2 - 1$ 、 F_p はペーストのフロー値 (mm)) と水粉体体積比との関係が線形関係にある [2] ことから、フロー面積比が零となる水粉体体積比を拘束水比とした。また、回帰直線の傾きを変形係数とした。

(2) 30cm フロー時水粉体体積比

ペーストのフロー面積比と水粉体体積比との関係から、拘束水比および変形係数を求め、フロー値 30cm に相当する水粉体体積比を逆算した。

(3) 脱水時水粉体体積比

図-3に示す容器を作製し、遠心力を利用したペーストの脱水を行った [5]。遠心脱水には内径 25mm、高さ 50mm の塩化ビニール製の円筒容器を用いた。下面には濾紙と $\phi 3\text{mm}$ の穴を有する塩化ビニール製フィルターを設け、水分が排出できるようにしてある。その下に同内径で高さ 40mm の排水を収納する容器を設けた。この容器内には排水の逆流を防ぐために脱脂綿を挿入した。また、遠心加速度および脱水時間は、予備実験から 5000G、30分とした。脱水後容器からペーストを取り出し炉乾燥し、乾燥前後の質量および比重から脱水時の水粉体体積比を算出した。

4. 結果および考察

図-4に粉体種類と各状態下の水粉体体積比との関係を示す。脱水時、拘束水比時、30cm フロー時とも、ペーストの状態を同じとするために粉体が必要とする水量は異なり、全体的に細かい粉体ほど水量が多く必要なことが分かる。また図-5に、粉体種類と式 (7) から求まる膜厚との関係を示す。この図においても粉体種類ごとに膜厚は異なった値を示している。

そこで、フロー面積比が零となる拘束水比の時点で、水膜厚は一定であるとの仮説を立て、粉体の種

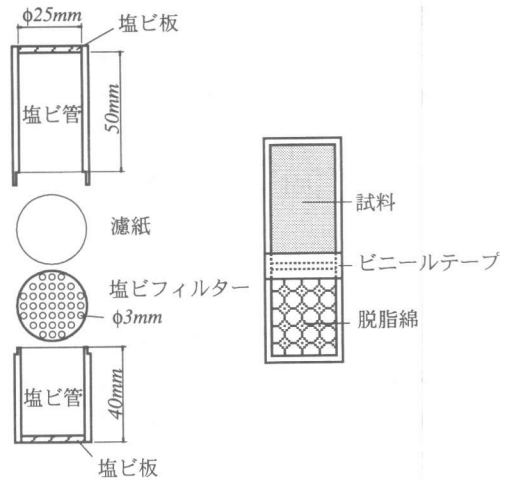


図-3 遠心脱水容器

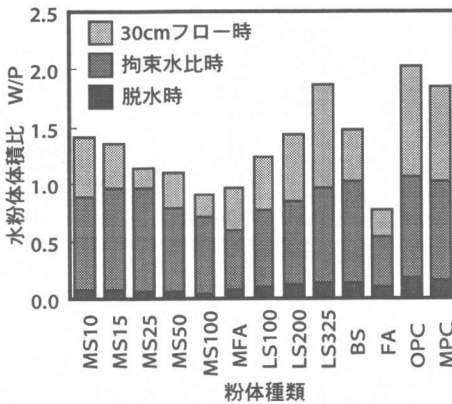


図-4 各種状態下的水粉体容積比

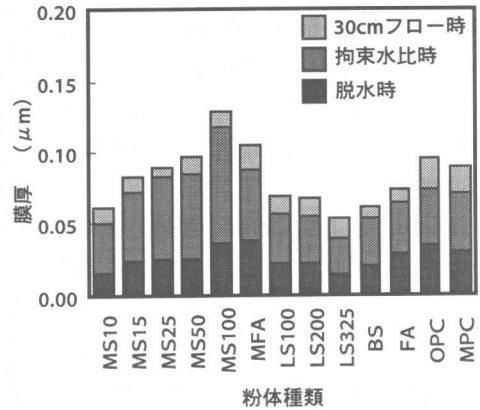


図-5 各種状態下的水膜厚

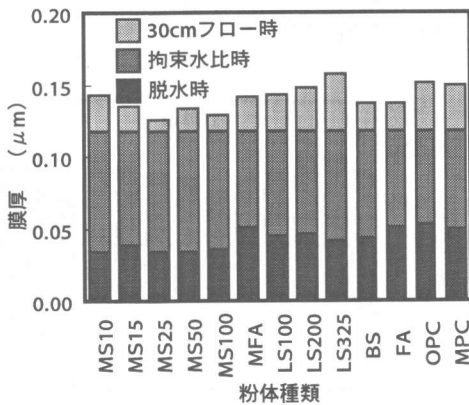


図-6 凝集を考慮した各状態下的水膜厚

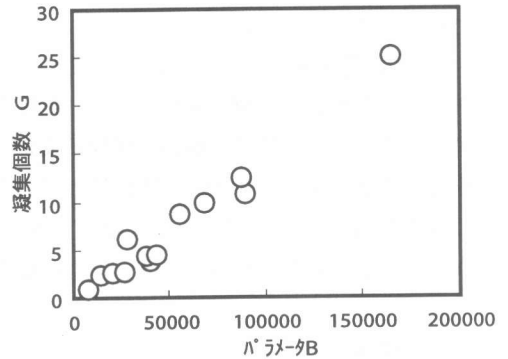


図-7 粒度分布と凝集性との関係

類として石灰石微粉末 (LS200) の水膜厚を基準とし、その他の粉体について膜厚が一定となるための凝集比率を式 (12) により算出した。ここで、基準となる LS200 の凝集比率を便宜上 10.00 とした。凝集比率は凝集個数と同じ意味であるが、実際のペースト中での凝集個数を測定することは困難であるため、粉体種類の相互比較という理由から凝集比率という名称を用いた。

図-6 に凝集比率を考慮し、拘束水比時の膜厚を一定とした場合の粉体種類と膜厚の関係を示す。粉体によりばらつきはあるものの、拘束水比時の膜厚が一定であると仮定することにより、脱水時や 30cm フロー時での膜厚もほぼ一定値を示すこととなった。これは、ペーストの状態を同じとするために必要な膜厚は、粉体の種類によらず一定であることを示しており、凝集比率を考慮することにより、膜厚とペースト性状が一意的に対応することを表している。なお、ポルトランドセメント系の粉体においては、水和の進行により脱水時の膜厚が見かけ上大きくなることが予想されたが、脱水時の膜厚が他の粉体とほぼ同じであることから、その影響は小さいものと考えられる。

次に、粉体の粒度分布と凝集比率との関係を求めるために、図-7 にパラメータ B と凝集比率との関係を示した。粉体の種類に関わらず、パラメータ B が大きくなるにしたがい凝集比率も増加し、両者は線形関係で表されることが分かる。つまり、細かい粉体は粗い粉体に比べてペースト中でより多く凝集していることを示している。

山崎の研究 [6] によれば、粉末粒子が細くなり比表面積が大きくなるほど、フロキュレーションが著しくなることが示されており、また本研究においてもこのことを確認するために、各

種粉体を用いた希薄溶液の顕微鏡写真を撮影した(図-8)。この写真からも、パラメータ B が大きい粉体は小さいものより凝集しやすいことがわかり、図-7の傾向が確認された。

以上のことより、粉体の粒度分布の変化は粒子の凝集に影響し、細かい粒子ほど凝集しやすいことが明らかになった。また、凝集を考慮することにより、性状が同じペースト中においては、粉体群表面に付着する水膜厚は同じであることから、粉体種類に関係なく拘束水比を評価できると考えられる。

図-9に実験値と計算値における変形係数の比較を示す。ここで計算値の変形係数は、凝集を考慮し膜厚を変化させた時の水粉体体積比の変化率から算出したものである。実験値と計算値とでは多少ばらつきがあるものの傾向としては同じであり、本モデルにより変形係数についても評価できると考えられる。

5. 結論

粉体の拘束水比や変形係数などの保水能力を、粒度分布から求められるパラメータを用いて、ある仮定をもつ凝集傾向を考慮した水膜厚の観点から考察した。本研究範囲内で得られた見地を以下に示す。

- (1) 粒度分布から求められるパラメータ B と凝集比率は線形関係にあり、粒子が小さいほど凝集を起しやすと考えられる。
- (2) ペースト性状が同じであれば、凝集した粒子群周りの水膜厚は、粉体種類に無関係に一定である。
- (3) 本モデルにより粉体の保水能力の評価が可能である。

参考文献

- [1] 緑川猛彦、丸山久一：保水能力に関する各種粉体の粒子形状や粒度分布の評価、土木学会論文集、No.544/V-32、pp.121-130、1996.8
- [2] 岡村甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、pp.38-43、1993.9
- [3] 下村匠、小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.631-636、1992
- [4] 土木材料実験教育研究会：新示方書による土木材料実験法、鹿島出版会、pp.225-228、1991
- [5] 辻幸和、二羽淳一郎、伊東靖郎、岡村甫：遠心力を利用した細骨材の保有水試験方法、土木学会論文集、No.384/V-7、pp103-109、1987.8
- [6] 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートのウォーカビリチーにおよぼす効果に関する基礎研究、土木学会論文集、No.84、pp98-120、1962

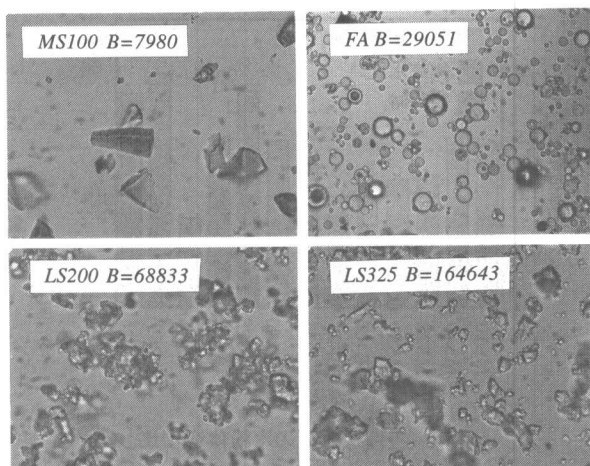


図-8 希薄溶液中の粒子群 (200倍)

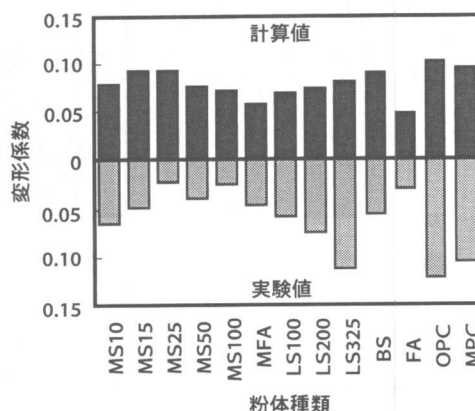


図-9 各粉体の変形係数