

# 粉体の特性とペーストの フロー値との関係

枝松良展<sup>1</sup>・下川浩児<sup>2</sup>・岡村 甫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 (〒551 大阪市大正区南恩加島7-1-55)

<sup>2</sup>藤沢薬品工業株式会社 特薬事業部 筑波コンクリート研究所 (〒300-26 つくば市東光台5-2-3)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

本研究は、ペースト流動に対する粉体の特性値である粉体の拘束水比および変形係数を、粉体の粒度分布特性、粒子形状および水和活性度から予測する方法を提案するものである。粉体の拘束水比は、粉体の粒子径の大きさを表す指標と、粒度分布の形を表す指標との積に比例し、その比例定数は、粉体の粒子形状や活性度によって異なる。粉体の変形係数は、粒子径の大きさを表す指標と、粉体の粒子形状や活性度を表す指標との積に比例し、その比例定数を一定値と仮定すると、定数項は粒子表面の状態を表す指標になる。

**Key Words :** *paste, powder, water retaining factor, flowing factor, particle size distribution, particle shape.*

## 1. はじめに

コンクリートに使用されるセメントや高炉スラグ微粉末等の粉体材料は、コンクリート構成材料の中で最も小さい固体粒子であるため、その粒度分布や粒子形状等の特性が、コンクリートの流動特性に影響を及ぼすことは良く知られている。また、ペースト流動に対する粉体の特性値を、粉体の拘束水比(ペーストの相対フロー面積比<sup>1)</sup>が0となる最大の水粉体容積比、すなわちペーストが変形し始めるときの水粉体容積比を表す)と変形係数(相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水粉体容積比、すなわちペーストが変形する際のペーストの変形のし易さの程度を表す)によって、定量的に表せることが既に明らかにされている<sup>2),3)</sup>。拘束水比および変形係数は、振動を与えないペーストのフロー試験<sup>1)</sup>により得られるものであるが、粒度分布等の特性値は、粉体の品質管理の指標として用いられるものであり、これらの特性値から拘束水比と変形係数を予測することができれば、自己充填ハイパフォーマンスコンクリートに適した粉体の設計が可能となり、コンクリートの配合設計システム<sup>4)</sup>もより合理的なものになる。

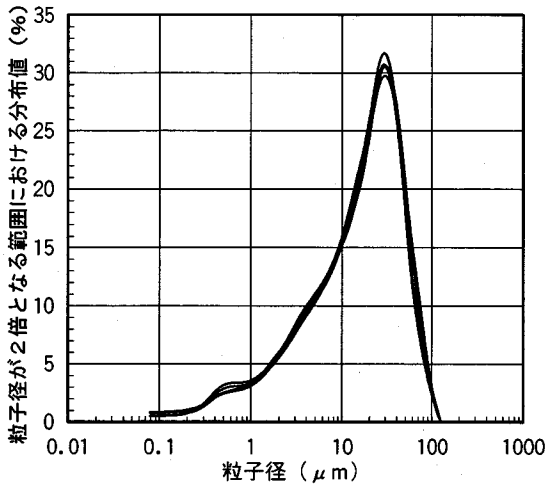
本研究は、粉体の拘束水比と変形係数を、粉体の特性から予測する方法を提案することを目標にして、粉体の特性と拘束水比および変形係数との関係を明らかにするものである。なお、本研究で取り扱う粉体は、シリカフェーム等の超微粒粉体を除く、一般的な粉体である。

## 2. 粉体の特性

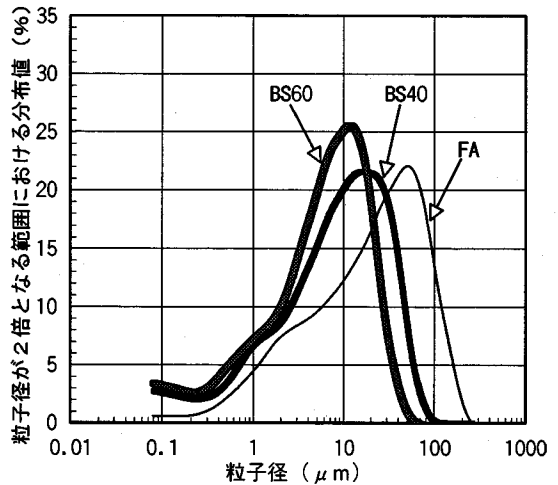
使用した粉体は、銘柄および生産ロットの異なる5種類の中庸熟ポルトランドセメント、粒度分布の異なる4種類の石灰石微粉末、2種類の高炉スラグ微粉末およびフライアッシュである。これらの粉体は、自己充填コンクリートの製造に用いられているものである。各粉体の粒度分布および粒子形状を以下に示す。

### (1) 粒度分布

レーザー回折・散乱型粒度分布測定装置(シーラス社製Cilas 1064を使用。分散媒にはメタノールを使用し、測定前に試料の超音波分散を60秒間行った。)により測定した各粉体の粒度分布(容積割合)を図-1~図-3に示す。これらは、測定によ



図一 中庸熱ポルトランドセメントの粒度分布



図二 高炉スラグ微粉末とフライアッシュの粒度分布

り得られた粒度分布の累積値を、以下に示す方法により処理したものである。

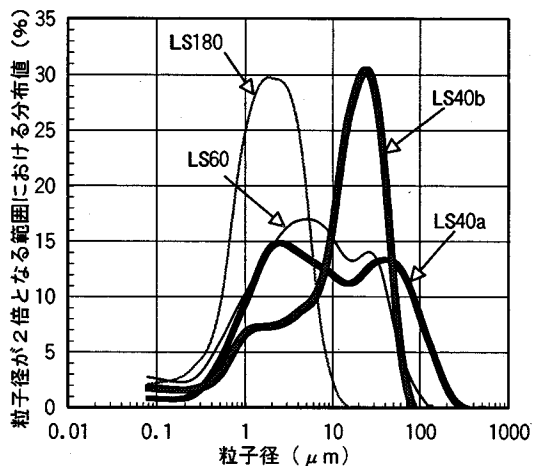
- ①対数値で等間隔となるように粒径を定める。  
(ここでは、粒径は $0.17\mu\text{m}$ から対数値で2倍間隔とした。)
- ②各粒径における累積値を測定値から求める。  
ここで、測定値における粒径の隣り合う2点間の累積値は、2点間を直線近似し計算で求める。
- ③各粒径間の分布値を累積値から求める。
- ④粒径を対数として分布値をグラフにプロットする。ここで、分布値に対応する粒径の値は、各粒径間の中心値となる。
- ⑤隣り合う2点間をスプライン関数<sup>4)</sup>を用い、曲線で結ぶ。

各粉体の粒度分布の特徴を以下に示す。

中庸熱ポルトランドセメントは、その銘柄や生産ロットの異なるものであるが、これら5種類の粒度分布形に相違は認められない。粒度分布のピークは約 $30\mu\text{m}$ にあり、ピークより小さい側はなだらかな分布をしており、大きい側は急な分布をしている。また、 $100\mu\text{m}$ 以上の粗粉粒子および $0.1\mu\text{m}$ 以下の微粒粒子は殆ど存在しない。

高炉スラグ微粉末の粒度分布形は、粒度分布のピークが1つであり、中庸熱ポルトランドセメントと類似している。2種類の高炉スラグ微粉末における相違は、これらのブレン値が異なることによるものである(B S 60:6010 $\text{cm}^2/\text{g}$ , B S 40:4370 $\text{cm}^2/\text{g}$ )。また、 $100\mu\text{m}$ 以上の粗粉粒子は存在しないが、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の微粒粒子を中庸熱ポルトランドセメントよりも多く含んでいる。

フライアッシュの粒度分布形も中庸熱ポルトラン



図三 石灰石微粉末の粒度分布

ドセメントと類似であるが、粒度分布のピークは中庸熱ポルトランドセメントより大きく約 $55\mu\text{m}$ にある。また、 $100\mu\text{m}$ 以上の粗粉粒子を多く含んでいる。

石灰石微粉末の粒度分布形は、中庸熱ポルトランドセメントと類似しているもの(粒度分布のピークが1つ)と、粒度分布のピークが2つ存在する全く異なる分布をしているものに分けられる。これらの相違は、銘柄が異なることによる製造方法の相違が、粒度分布に表れていると考えられる。石灰石微粉末の場合には、ブレン値が同じような値を示した場合にも、著しく粒度分布が異なることがある。粒度分布形が類似でピークの位置が異なるのは、両者のブレン値が異なるためである(L S 40a:4660 $\text{cm}^2/\text{g}$ , L S 40b:4700 $\text{cm}^2/\text{g}$ , L S 60:6440 $\text{cm}^2/\text{g}$ , L S 180:18700 $\text{cm}^2/\text{g}$ )。また、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の微粒粒子を中庸熱ポルトランドセメントよりも多く含み、



写真-1 中庸熟ポルトランドセメントの粒子形状

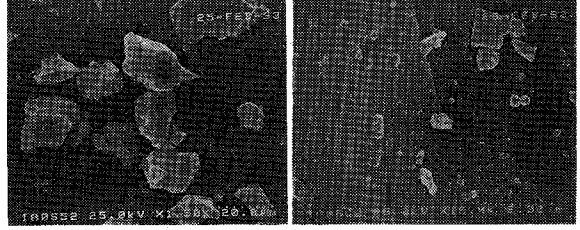


写真-3 高炉スラグ微粉末の粒子形状

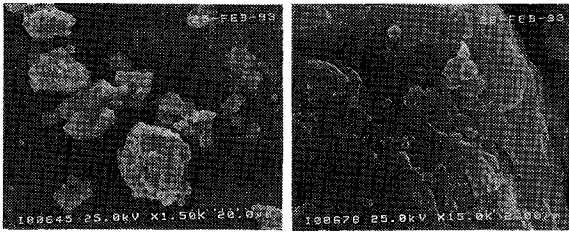


写真-2 石灰石微粉末の粒子形状

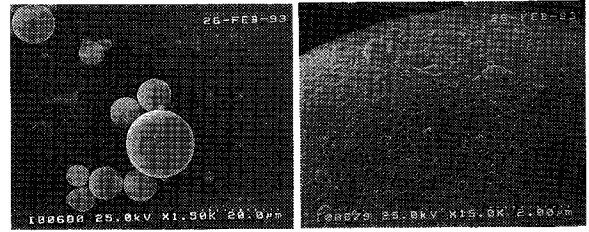


写真-4 フライアッシュの粒子形状

L S 40aには100 $\mu$ m以上の粗粉粒子が多く存在する。

### (2) 粒子形状

走査型電子顕微鏡により撮影した粉体の粒子形状を写真-1～写真-4に示す。

中庸熟ポルトランドセメントと石灰石微粉末の粒子形状および表面の状態は、表面に角張りのとれた凹凸が多い多面体である。高炉スラグ微粉末はこれらと比較して角張りが多くシャープな形状であり、表面には凹凸が少なく滑らかなものである。フライアッシュの粒子には、球形のものが多く認められる。

### 3. ペーストフロー値の基本式

ペーストのフロー値から得られる相対フロー面積比(式(1))と水粉体容積比とが、粉体の種類に係らず線形な関係にあることが既に明らかにされている<sup>2),3)</sup>。ペーストのフロー値は、式(2)に示すような基本式で表され、粉体の特性値である変形係数と拘束水比および水粉体容積比とにより定まるのである(図-4)。

$$\Gamma_p = \left( \frac{F_p}{100} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \quad (2)$$

ここに、 $\Gamma_p$ はペーストの相対フロー面積比(ペーストの変形量を変形時におけるペーストの

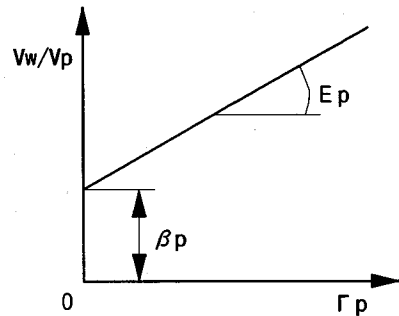


図-4 ペーストフロー値の基本モデル

フロー面積(フローコーンの底面積)に対する面積比で表したもの)、 $F_p$ は振動を与えない場合におけるペーストのフロー値(mm)、 $V_w$ はペースト中に占める水容積比、 $V_p$ はペースト中に占める粉体容積比、 $E_p$ は粉体の変形係数、 $\beta_p$ は粉体の拘束水比を表す。

変形係数はペーストが変形する際のペーストの変形し易さの程度を表わすものである。拘束水比はペーストが変形し始めるときの水粉体容積比である。これらの値が小さいほど、所定の相対フロー面積比を得るための水量は少なくなり、粉体の特性が良好であることを意味している。

### 4. 拘束水比

ペーストのフロー試験において、ペーストが変形し始めるときの水粉体容積比を示す拘束水比は、粉

表-1 粉体の材料特性値

粉体種類		粒径指数 (PF)	粒度分布の 最高値 (h)	分布形指数 (HF)	形状係数 (SF)	拘束水比	
						計算値(式(6))	実験値
中庸熱 ポルトランドセメント	MC 1	1.10	0.32	1.03	0.88	1.00	1.00
	MC 2	1.11	0.31	1.01	0.86	0.96	0.96
	MC 3	1.09	0.31	1.01	0.85	0.94	0.94
	MC 4	1.09	0.30	0.99	0.92	0.99	0.99
	MC 5	1.09	0.31	1.01	0.90	0.98	0.98
高炉スラグ 微粉末	BS 40	1.24	0.22	0.85	0.91	0.95	0.97
	BS 60	1.32	0.26	0.92		1.10	1.08
	混合 1	1.30	0.25	0.91		1.07	1.07
	混合 2	1.25	0.22	0.86		0.98	0.99
石灰石 微粉末	LS 40a	1.20	0.15	0.70	0.84	0.71	0.67
	LS 40b	1.31	0.31	1.01		0.99	0.87
	LS 60	1.17	0.17	0.75		0.83	0.83
	LS 180	1.54	0.30	0.99		1.29	1.49
	混合 3	1.47	0.27	0.94		1.17	1.23
	混合 4	1.27	0.18	0.77		0.82	0.78
フライアッシュ		1.05	0.22	0.86	0.61	0.54	0.54

混合 1, 混合 2 は, 高炉スラグ微粉末 BS 40 と BS 60 を混合した粉体であり, 混合割合は容積割合でそれぞれ BS 40 : BS 60 = 20 : 80, 80 : 20 である。

混合 3, 混合 4 は, 石灰石微粉末 LS 40a と LS 180 を混合した粉体であり, 混合割合は容積割合でそれぞれ LS 40a : LS 40b = 20 : 80, 80 : 20 である。

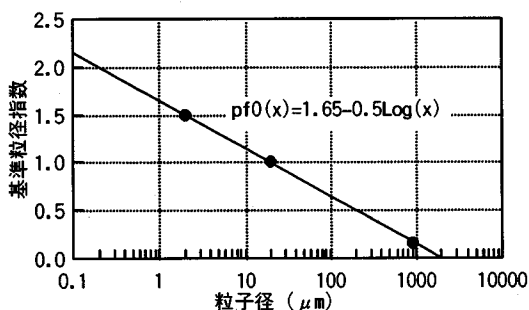


図-5 粒子径と基準粒径指数との関係

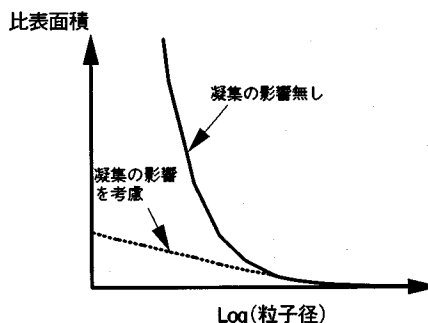


図-6 粒子径と比表面積との関係

体のペースト流動に対する特性値であり, 粉体によって異なるものである(表-1)。そこで, このような拘束水比の粉体による相違を, 粉体の特性から考察する。

粉体の粒度分布特性がペーストの流動性に影響を及ぼすことは, よく知られている。同種の粉体で粉末度が等しい場合, ペーストの流動性は粒度分布の形に支配され, また逆に, 粒度分布の形が等しい場合, 流動性は粉末度に支配される。すなわち, 種類が同じ粉体のペーストの流動性は, その平均粒子径と粒度分布の形に支配されるのである<sup>5)</sup>。そこで, 粒度分布特性を数値化し, 拘束水比との関係を明らかにする。

粒度分布特性を表すための粒度分布関数が幾つか

提案されているが, 本研究では, 簡単のため, 式(3)に示す粒径指数を用いた。

$$PF = \int p(x) \cdot pf_0(x) dx \quad (3)$$

$$pf_0(x) = 1.65 - 0.5 \text{Log}(x) \quad (pf_0(x) \geq 0) \quad (4)$$

ここに, PF は粒径指数,  $pf_0(x)$  は基準粒径指数,  $p(x)$  は粒度分布関数,  $x$  は粒子径 ( $\mu\text{m}$ ) を表す。

粒径指数は, 基準粒径指数(式(4), 図-5)を, 「2. 粉体の特性」に示す粒度分布曲線で積分することにより導出できる。これは, 粉体の比表面積に等価なものである。各粉体の粒径指数を表-1に示す。粒径指数は, 粒子径の小さい粉体ほど大きくなる。

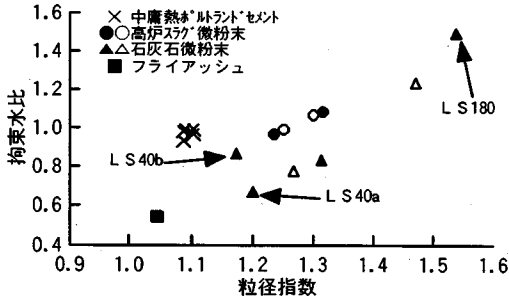


図-7 粉体の粒径指数と拘束水比との関係

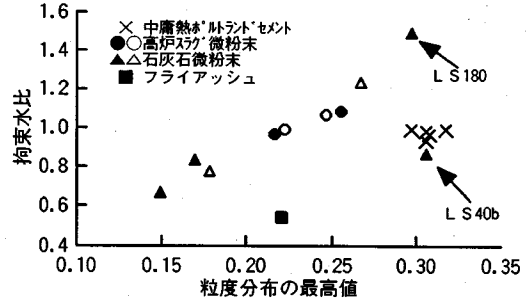


図-9 粉体の粒度分布の最高値と拘束水比との関係

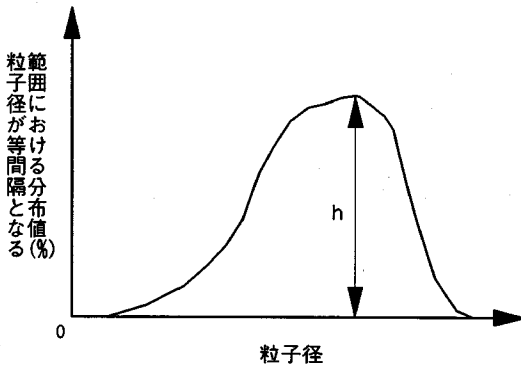


図-8 粒度分布曲線における分布の最高値 h

基準粒径指数は、以下のようにして設定した。拘束水は、粉体や細骨材の表面に拘束される水であるため、比表面積と密接な関係にあると考えられる。図-6に示す実線のように、比表面積は粒子径に反比例する。しかし、粒子径が小さくなると、凝集によって見かけ上粒子径が大きくなるため<sup>6)</sup>、粒子径と比表面積との関係は、図-6に示す点線のようになると考えられる。そこで、一次近似として、粒子径の対数値と比表面積との関係を直線関係に設定した。なお、式(4)における比例定数と定数項の値は、この直線が図-5に示す点を通るように設定したものである。これらの点は、粒度分布が相似形である中庸熟ポルトランドセメント、石灰石微粉末(L S 180)、富士川産川砂のそれぞれの平均粒子径の位置に、これらの拘束水比を基準粒径指数としてプロットしたものである。粉体から細骨材に至る粒子の比表面積を、プレーン値で統一的に表現することは、非常に困難であるため、比例定数と定数項の値を求めるために、比表面積と密接な関係がある拘束水比を代用したのである。なお、粒子径が2000  $\mu\text{m}$ 以上の場合において、基準粒径指数を0と設定しているのは、このような大きさの粒子では、粒子同士の噛み合いによる変形抵抗が大きく、粒子表面に拘束される水量より、変形抵抗による見かけの拘

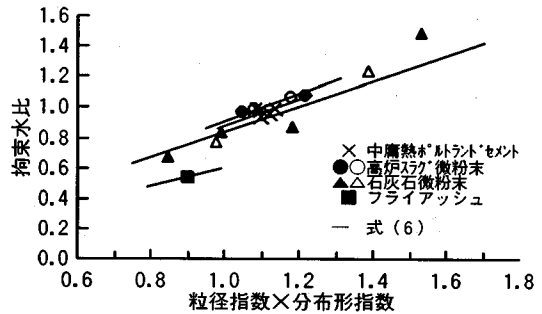


図-10 粉体の粒度分布特性と拘束水比との関係

束水のほうが大きいと考えられることからである。

図-7は、粒径指数と拘束水比との関係を示したものである。拘束水比は、粉体の粒径指数が大きくなるほど、すなわち粒子が細くなるほど大きくなる傾向にあることがわかる。しかし、石灰石微粉末のL S 40aとL S 40bの粒径指数は、ほぼ等しいにも係わらず、これらの拘束水比は大きく異なっている。これは図-3に示すように、両者の粒度分布の形が異なるためと考えられる。なお、図中の白抜き記号は、高炉スラグ微粉末B S 40とB S 60を混合した粉体と、石灰石微粉末L S 40aとL S 180を混合した粉体を示すものである(混合割合は表-1の注釈参照)。以降の図についても同様である。

粒度分布の形を表すものとして、粒度分布曲線における分布の最高値を用いた(図-8)。各粉体の粒度分布の最高値を表-1に示す。粒度分布の最高値は粒度分布の幅広い粉体ほど小さくなる。

図-9は、粒度分布の最高値と拘束水比との関係を示したものである。拘束水比は、分布の最高値が大きくなるほど、すなわち分布の形がシャープになるほど大きくなる傾向にあることがわかる。しかし、石灰石微粉末のL S 40bとL S 180の最高値は、ほぼ等しいにも係わらず、これらの拘束水比は大きく異なっている。これは、図-7に示すように、両者の粒径指数が大きく異なるためと考えられる。

表一 2 混合粉体の材料特性値

粉体種類	混合材固体 粒子容積比	粒径指数 (PF)	粒度分布 の最高値 (h)	分布形 指数 (HF)	形状係数 (SF)	拘束水比		
						計算値(式(8))	実験値	実験値/計算値
高炉スラグ 微粉末	0.2	1.13	0.28	0.97	0.87	0.96	0.96	1.00
	0.6	1.18	0.24	0.90	0.92	0.97	0.99	1.02
	0.8	1.21	0.23	0.87	0.97	0.97	1.02	1.05
	1.0	1.24	0.22	0.85	0.92	0.97	0.97	1.00
石灰石 微粉末	0.2	1.12	0.27	0.95	0.86	0.91	0.92	1.02
	0.6	1.16	0.20	0.82	0.86	0.79	0.81	1.03
	0.8	1.18	0.17	0.74	0.88	0.73	0.78	1.06
	1.0	1.20	0.15	0.70	0.79	0.67	0.67	1.00
フライアッシュ	0.2	1.09	0.28	0.97	0.82	0.88	0.88	1.00
	0.6	1.07	0.24	0.89	0.75	0.71	0.72	1.01
	0.8	1.06	0.22	0.86	0.70	0.63	0.64	1.02
	1.0	1.05	0.22	0.86	0.61	0.54	0.54	1.00
中庸熟ポルトランドセメント(MC2)		1.11	0.31	1.01	0.86	0.96	0.96	1.00

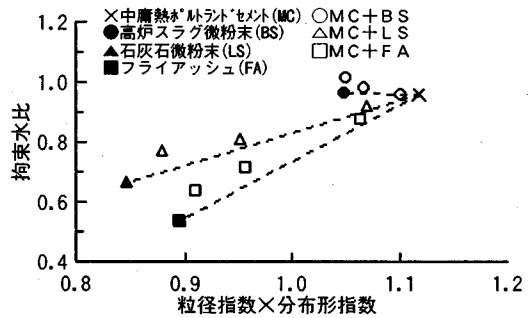
このように、拘束水比は平均粒径と粒度分布の形の両者の影響を受けるものである。そこで、これらを合わせたものとして、粒径指数に分布形指数(各粉体の粒度分布の最高値を、中庸熟ポルトランドセメントの最高値である0.3で除し、その平方根をとったもの(式(5)、表一1))を乗じたものを粒度分布の特性値とすると、これは同じ材料では、拘束水比と比例関係になる(図一10)。分布形指数は、中庸熟ポルトランドセメントの粒度分布を基準として、粉体の粒度分布を相対比較するための指標である。粒度分布の特性値と拘束水比との比例関係を式(6)で表し、各粉体の比例定数を求めた(表一1)。

$$HF = \sqrt{\frac{h}{0.3}} \quad (5)$$

$$\beta_p = SF \cdot PF \cdot HF \quad (6)$$

ここに、HFは分布形指数、hは粒度分布の最高値、 $\beta_p$ は粉体の拘束水比、PFは粒径指数、SFは形状係数を表す。

比例定数は、粉体の種類によって異なり、粉体の粒子形状や活性度を表しているものと考えられることから、これを粉体の形状係数と定義する。粒子形状の丸いフライアッシュの形状係数は小さく、角張った形状をしている高炉スラグ微粉末の形状係数は大きいのである。また、中庸熟ポルトランドセメントは石灰石微粉末と類似した粒子形状や表面状態であるにもかかわらず、その形状係数が石灰石微粉末の形状係数より大きいのは、エトリンガイトの生成による表面積の増加や、その生成によって水が消費されるためである。しかし、その程度は、中庸熟ポルトランドセメント中に含まれる $C_3A$ 量や石膏量



図一11 粉体の粒度分布特性と拘束水比との関係(2種類の粉体を混合した場合)

およびその形態によって異なるため、中庸熟ポルトランドセメントの形状係数は各々について定まるものである。

図一11は、中庸熟ポルトランドセメントに、混合材として高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末またはフライアッシュを、混合材固体粒子容積比(式(7))で0.2、0.6、0.8の割合で混合した粉体の、粒度分布の特性値と拘束水比との関係を示したものである(表一2)。

$$\gamma_{ad} = \frac{V_{ad}}{V_{ad} + V_c} \quad (7)$$

ここに、 $\gamma_{ad}$ は混合材固体粒子容積比、 $V_c$ は中庸熟ポルトランドセメントの容積比、 $V_{ad}$ は中庸熟ポルトランドセメントに混合する粉体の容積比を表す。

混合材固体粒子容積比と混合粉体の粒径指数との関係は線形関係にあるが、分布形指数との関係においては、混合する両者の粉体を結ぶ線上よりも小さくなっている(図一12)。このことは、混合するこ

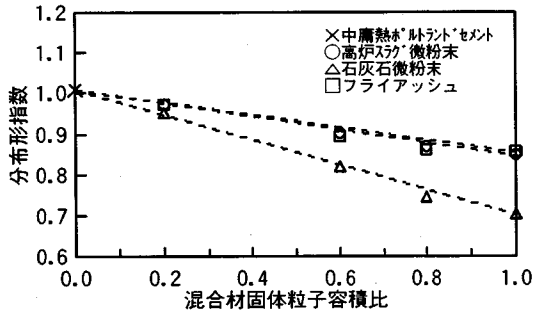


図-12 混合材固体粒子容積比と分布形指数との関係

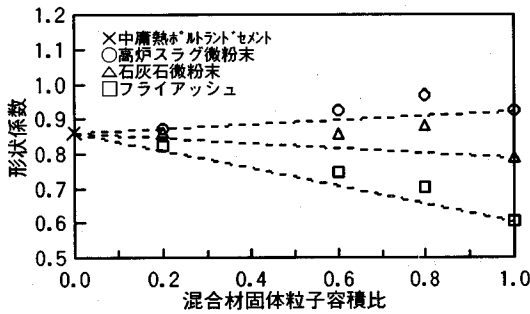


図-13 混合材固体粒子容積比と形状係数との関係

とによって粒度分布が改善されることを意味する。ここで、混合材固体粒子容積比が0となる点は、中熟熱ポルトランドセメント単体を意味し、1となる点は混合材単体を意味している。従って、図-11に示す粒度分布特性値と拘束水比との関係において、混合粉体の拘束水比は、中熟熱ポルトランドセメントと混合材を結ぶ線（図-11の点線）よりも下方に位置するはずであるが、混合材の容積比が大きくなるにしたがって、拘束水比はその線上より大きくなっているのが認められる。これは、混合材の容積比が大きくなるほど、中熟熱ポルトランドセメントの水和速度が速くなるためと考えられる。一般に、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末、フライアッシュあるいは石灰石微粉末を混合すると、セメントの水和反応が遅くなると考えられているが、注水から数分の混練時間内に生じるセメントの間隙質の水和反応は逆に促進される<sup>7), 8)</sup>。従って、式(6)から算出される混合粉体の形状係数は、図-13に示すように、何れの混合粉体においても、混合する両者の形状係数を結ぶ線上より大きな値となり、混合材固体粒子容積比が大きくなるほど、中熟熱ポルトランドセメントの水和が促進されるため、その差は広がると考えられる。このようなことから、混合材として高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末またはフライアッシュを用いた場合の拘束水比を、式

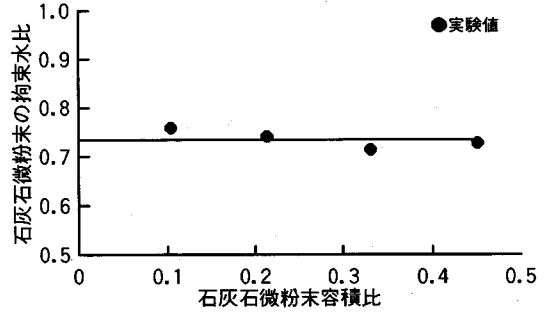


図-14 石灰石微粉末容積比と石灰石微粉末の拘束水比との関係（中熟熱ポルトランドセメントに石灰石微粉末を混合した粉体のペースト試験から得られる）

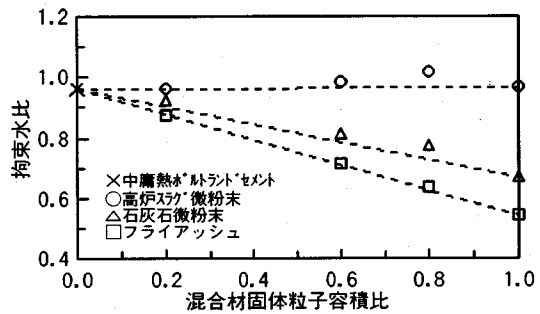


図-15 混合材固体粒子容積比と拘束水比との関係

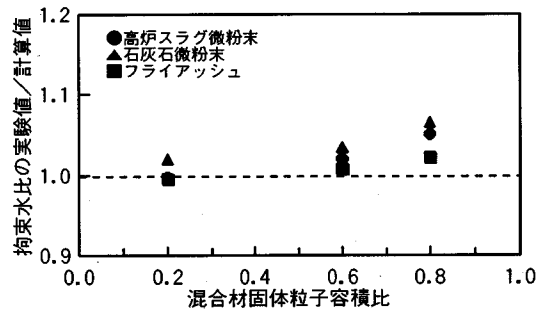
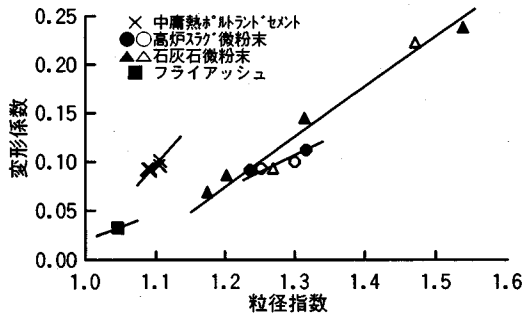


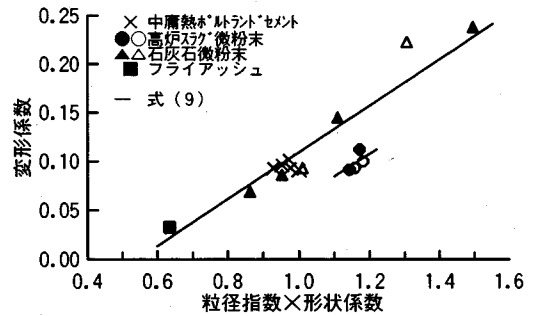
図-16 拘束水比の実験値と式(8)による計算値の比較

(6)から求めるためには、混合材の容積比に応じて中熟熱ポルトランドセメントの形状係数を適切に設定する必要がある。

中熟熱ポルトランドセメントに他の粉体を混合した場合、図-14に示すように、混合材の拘束水比はその容積比にかかわらず一定値となる。従って、混合材固体粒子容積比と水固体粒子容積比、すなわち混合粉体の拘束水比との関係は、線形関係になるはずである。しかし、図-15に示すように、拘束水比は混合する両者の拘束水比を結ぶ線上より大きく



図一七 粉体の粒径指数と変形係数との関係



図一八 粉体の粒径指数と形状係数の積と変形係数との関係

なっている。これは、前述したように、混合材が中庸熟ポルトランドセメントの水和を促進させるためである。フライアッシュを混合材とした場合は、その影響は小さいようであり、混合材固体粒子容積比と拘束水比との関係は、ほぼ線形関係にある。また、高炉スラグ微粉末と石灰石微粉末の場合においても、混合材固体粒子容積比が小さい範囲 ( $\gamma_{ad}=0.6$ 以下) では、混合材固体粒子容積比と拘束水比との関係は、ほぼ線形関係とみなせると考えられる。従って、図一六に示すように、混合粉体の拘束水比は、混合材固体粒子容積比が小さい範囲では、混合する両者の拘束水比とそれらの混合割合から、式(8)によって算定することができると考えられる。

$$\beta_p = \beta_c + (\beta_{ad} - \beta_c) \cdot \gamma_{ad} \quad (8)$$

ここに、 $\beta_p$ は混合粉体の拘束水比、 $\beta_c$ は中庸熟ポルトランドセメントの拘束水比、 $\beta_{ad}$ は中庸熟ポルトランドセメントに混合する粉体の拘束水比、 $\gamma_{ad}$ は混合材固体粒子容積比を表す。

## 5. 変形係数

ペーストのフロー試験において、ペーストの変形し易さの程度を表している変形係数は、粉体のペースト流動に対する特性値であり、粉体によって異なる(表一三)。そこで、このような変形係数の粉体による相違を、粉体の特性から考察する。

変形係数は、粉体粒子同士の接触確率や、接触摩擦の程度により定まると考えられる。粒子同士が接触する確率は、単位容積のペースト中に存在する粒子数によって定まり、粒子径の小さい粉体ほど、その確率は高くなると考えられる。また、粒子同士が接触した場合の、接触摩擦の程度は、粒子の形状や粒子表面の状態により定まると考えられる。そこで、粒子同士の接触確率を表していると考えられる粉体の粒径指数と変形係数との関係を図一七に示す。変形係数は、粒径指数が大きくなるほど増加している。同じ材料では、粒子径が小さいほど、変形係数は大

表一三 粉体の材料特性値

粉体種類	粒径指数 (PF)	形状係数 (SF)	変形係数		
			計算値 (式(9))	実験値	
中庸熟ポルトランドセメント	MC 1	1.10	0.88	0.10	0.10
	MC 2	1.11	0.86	0.10	0.10
	MC 3	1.09	0.85	0.09	0.09
	MC 4	1.09	0.92	0.11	0.09
	MC 5	1.09	0.90	0.10	0.09
高炉スラグ微粉末	BS 40	1.24	0.91	0.09	0.09
	BS 60	1.32		0.10	0.11
	混合 1	1.30		0.10	0.10
	混合 2	1.25		0.10	0.09
石灰石微粉末	LS 40a	1.20	0.84	0.10	0.09
	LS 40b	1.31		0.08	0.07
	LS 60	1.17		0.14	0.15
	LS 180	1.54		0.23	0.24
	混合 3	1.47		0.18	0.22
	混合 4	1.27		0.11	0.09
フライアッシュ	1.05	0.61	0.02	0.03	

きくなるのである。また、粉体の種類によって、変形係数の増加傾向に相違が見られるのは、それらの粒子の形状や表面の状態が異なるためと考えられる。そこで、変形係数を式(6)より算出された粉体の形状係数と粒径指数の積との関係で表した(図一八)。高炉スラグ微粉末を除いて、変形係数は、粉体の形状係数と粒径指数の積とほぼ線形な関係にあることが認められる。高炉スラグ微粉末が他の粉体と異なるのは、粒子表面が滑らかなガラス質であるためと考えられる。また、中庸熟ポルトランドセメントは、水和によってその表面にエトリンガイトの針状結晶が生成され、接触摩擦が大きくなると考えられるが、水和反応の影響はその形状係数に取り入れられている。このような粉体の変形係数と形状係数と粒径指数の積との関係を式(9)で表した。式(9)における比例定数Aは、本研究の場合0.24の



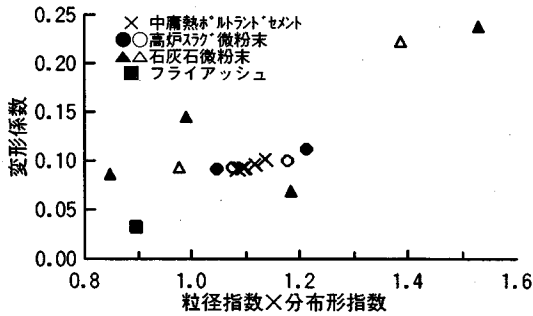


図-19 粉体の粒度分布特性と変形係数との関係

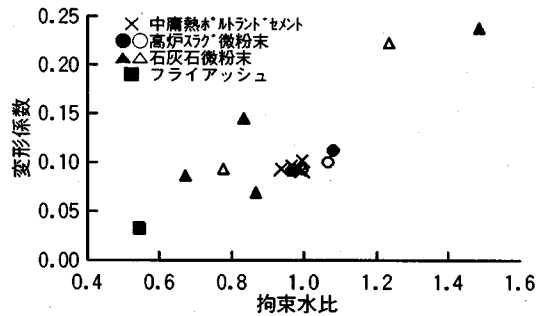


図-21 粉体の変形係数と拘束水比との関係

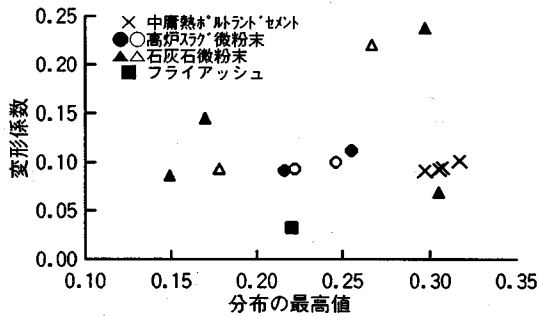


図-20 粉体の粒度分布の最高値と変形係数との関係

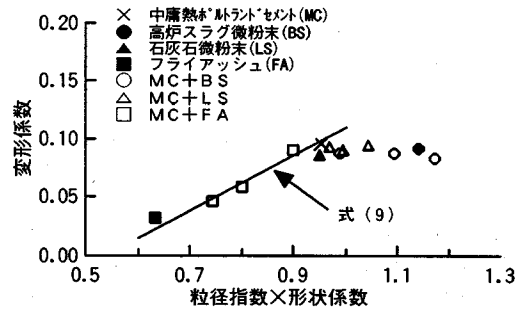


図-22 粉体の粒径指数と形状係数の積と変形係数との関係 (2種類の粉体を混合した場合)

一定値とした。定数Bは、粒子表面の状態を表す指標であり、この値が小さいほど粒子表面が滑らかなことを示すものである。高炉スラグ微粉末の場合、定数Bは-0.18であり、他の粉体の場合は-0.13である。定数Aおよび定数Bは、実験値と式(9)が最も一致するように設定したものである。

$$E_p = A \cdot PF \cdot SF + B \quad (9)$$

ここに、PFは粒径指数、SFは形状係数、Aは定数(本研究の場合0.24の一定値)、Bは粒子表面の状態を表す指標(小さいほど粒子の表面は滑らかである)を表す。

変形係数を拘束水比の場合と同様に、粒度分布の特性値で表したのが図-19である。石灰石微粉末の変形係数と粒度分布の特性値との関係には、相関性は認められない。これは、図-20に示すように、石灰石微粉末の変形係数と粒度分布の最高値との関係に、相関性がないためである。変形係数は、平均粒子径と粒子形状および粒子の表面状態によって定まるものと思われる。従って、図-21に示すように、変形係数と拘束水比との関係の相関性は、あまり高くないと考えられる。

図-22は、中庸熟ポルトランドセメントに、混合材として高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末またはフライアッシュを、混合材固体粒子容積比で0.2、0.6、0.8の割合で混合した粉体の粒径指数と形状係数の

表-4 混合粉体の材料特性値

粉体種類	混合材 固体粒子 容積比	変形係数		
		計算値 (式(10))	実験値	実験値/計算値
高炉スラグ 微粉末	0.2	0.10	0.09	0.90
	0.6	0.09	0.09	1.00
	0.8	0.09	0.08	0.89
	1.0	0.09	0.09	1.00
石灰石 微粉末	0.2	0.09	0.09	1.00
	0.6	0.09	0.09	1.00
	0.8	0.09	0.09	1.00
フライアッシュ	0.2	0.08	0.09	1.13
	0.6	0.06	0.06	1.00
	0.8	0.05	0.05	1.00
	1.0	0.03	0.03	1.00
中庸熟ポルトランドセメント		0.10	0.10	1.00

積と、変形係数との関係を示したものである(表-4)。中庸熟ポルトランドセメントに石灰石微粉末またはフライアッシュを混合した粉体の変形係数は、これらを単体で使用した場合と同様に、定数Bを-0.13とした式(9)で表すことができる。高炉スラグ微粉末を混合した粉体の変形係数も式(9)で表すことができると考えられるが、この場合定数B

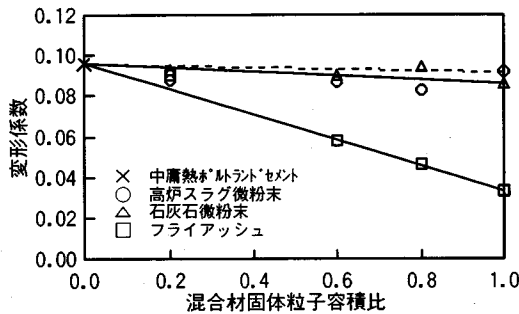


図-23 混合材固体粒子容積比と変形係数との関係

は高炉スラグ微粉末の混合率に応じて設定する必要がある。

図-23に示すように、中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュあるいは石灰石微粉末を混合した粉体において、混合材固体粒子容積比と変形係数の関係は線形関係となっている。これは、図-24に示す石灰石微粉末あるいはフライアッシュを混合した粉体の、混合材固体粒子容積比と粒径指数と形状係数の積との関係が、混合材固体粒子容積比と変形係数との関係に相似しているためと考えられる。従って、中庸熱ポルトランドセメントと石灰石微粉末あるいはフライアッシュの混合粉体の変形係数は、混合する両者の変形係数とそれらの混合割合によって定まるのである(式(10)、表-4)。

$$E_p = E_c + (E_{ad} - E_c) \cdot \gamma_{ad} \quad (10)$$

ここに、 $E_p$ は混合粉体の変形係数、 $E_c$ は中庸熱ポルトランドセメントの変形係数、 $E_{ad}$ は中庸熱ポルトランドセメントに混合する粉体の変形係数、 $\gamma_{ad}$ は混合材固体粒子容積比を表す。

## 6. まとめ

本研究は、粉体の拘束水比と変形係数を、粉体の粒度分布特性、粒子形状および活性度から予測する方法を提案したものである。本研究をまとめると以下の通りである。

- (1) 粉体の粒度分布特性値を、粒径指数と分布形指数を乗じた値とすると、同一種類の粉体の拘束水比は、粒度分布特性値に比例する。
- (2) 粉体の拘束水比と粒度分布特性値との比例関係における比例定数を、形状係数と定義すると、形状係数は粉体の種類によって異なり、粉体の粒子形状や活性度により定まる。
- (3) 粉体の変形係数は、粒径指数と形状係数の積に比例して増加し、その比例関係における比例定数を一定値と仮定すると、定数項は粒子表面の状態を表す指標になる。

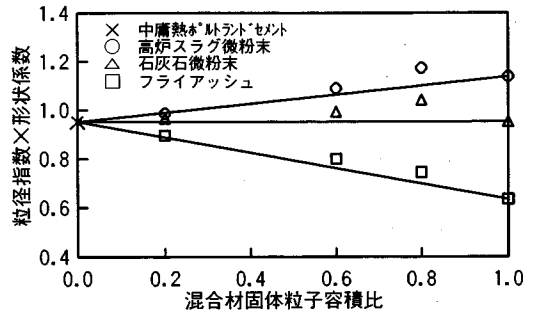


図-24 混合材固体粒子容積比と粒径指数と形状係数の積との関係

(4) 中庸熱ポルトランドセメントに、高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末またはフライアッシュを混合した粉体の拘束水比は、混合材の容積比に応じて、中庸熱ポルトランドセメントの形状係数を設定することにより、粒度分布特性値から算定できる。なお、混合材固体粒子容積比が0.6以下ならば、混合粉体の拘束水比は、混合する両者の拘束水比とそれらの混合割合によって近似できる。

(5) 中庸熱ポルトランドセメントに、石灰石微粉末またはフライアッシュを混合した粉体の変形係数は、それらを単体で用いた場合と同様に、粒径指数と形状係数より算定でき、混合する両者の変形係数とそれらの混合割合によって算定できる。また、高炉スラグ微粉末を混合した粉体の場合は、変形係数と粒径指数と形状係数の積との比例関係における定数項を、その混合割合に応じて設定することにより算定できる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、東京大学工学部小澤一雅助教授から、終始有益な御助言を頂きました。また、日本セメント(株)遠藤秀紀氏には、実験および顕微鏡写真撮影を行うに当たり、御協力を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 岡村, 前川, 小澤: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9.
- 2) 廣瀬, 豊田, 竹林, 上阪: 最適骨材評価コンクリートの展望と今後の課題, ダム技術, No. 50, 1990.11.
- 3) 大内, 小澤: フレッシュモルタルの変形性に及ぼす粉体特性の影響, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第5部, 1991.9.
- 4) 市田, 吉本: シリーズ新しい応用の数学20 スプライン関数とその応用, 1979.
- 5) 内川, 宇智田, 岡村: まだ固まらないセメントペースト, モルタル及びコンクリートの流動性に及ぼす

- セメントの粉末度及び粒子組成の影響, セメント・コンクリート論文集, No. 43, 1989.
- 6) 久保, 水渡, 中川, 早川: 粉体 理論と応用, 丸善, 1962.
- 7) 内川: 混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混合材の効果, セメント・コンクリート, No. 484, 1987. 6.
- 8) 小菅, 高木, 村井, 坂井: 微粉末炭酸カルシウムを添加したセメントの水和反応, 第66回日本セラミックス協会年次講演集, 1991.

(1995. 6. 5受付)

## EFFECT OF POWDER CHARACTER ON PASTE FLOW

Yoshinobu EDAMATSU, Kouji SHIMOKAWA and Hajime OKAMURA

The objective of this research is to propose the method for estimating the water retaining factor and the flowing factor, which are properties of powder concerning paste flow, with particle size distribution, particle shape and property of hydration of cement. The results obtained are as follows: The water retaining factor is proportional to the product of the index represent particle size and the index represent form of particle size distribution, and its proportionality constant represent particle shape and property of hydration. The flowing factor is proportional to the product of the index represent particle size and the index represent particle shape and property of hydration, and the constant term represent surface condition of powder supposing its proportionality constant is fixed.