

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

緑川猛彦¹・丸山久一²

¹正会員 工修 福島工業高等専門学校助手 建設環境工学科 (〒970いわき市平上荒川字長尾30)

²正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学教授 工学部 (〒940-21長岡市上富岡町1603-1)

本研究は、粉体系高流動コンクリートの配合設計において重要である粉体の保水能力に着目し、粉体の粒子形状や粒度分布が保水能力に及ぼす影響について検討したものである。特に、粒子形状は形状係数により、また、粒度分布は標準偏差により定量化し、それらが保水能力に及ぼす影響を粉体の充填性と関連づけて検討した。その結果、長短比と凸凹係数を用いた形状係数は粒子形状を表わす有効な手段となること、粉体の充填性は粒子形状と粒度分布に関係し、粒子形状が球に近いほど、かつ、粒子全体にわたり粒子間の隙間を埋める別な粒子が存在するような粒度分布ほど充填性が良いこと、粉体の保水性能のうち粒子形状は粒子表面への吸着水に、粒度分布は粒子間保有水に関係すること等が明らかになった。

Key Words : water retention , shape factor , particle size distribution , packing ability , void volume

1. 序論

高流動コンクリートはコンクリートの粘性と降伏値をバランス良く両立させることによって得られるものであり、配合設計においては用いる粉体の特性に見合う水量と混和剤量の設定が必要である。高流動コンクリートの配合設計において、水量と混和剤量は、セメントペーストのフロー試験から求められる拘束水比をもとに、モルタルのフロー試験、Vロート試験により粘性と降伏値の両方を満足するように決定することが良いと報告されている¹⁾。このため、粉体の保水能力は配合設計の基本となり、その算定は大変重要なものである。

高流動コンクリートに用いられる粉体は、現在の所種々であり、比重・比表面積・粒子形状・粒度分布等の物理的性質や、初期水和特性といった化学的性質もそれにより大きく変化している。山崎²⁾はフレッシュコンクリートのワーカビリティに及ぼす鉱物質微粉末の影響を粒子形状や粒子表面状態の観点から検討し、粒子表面に保持されて動かずペーストの流動性に関係しない水が、コンクリートのコンシステンシーに影響を与えることを明らかにした。筆者らは粉体の粒子形状を球と仮定し、比表面積球相当径がペーストのフロー

値やロート流下時間に影響を及ぼすこと³⁾、および、粉体の粒子形状を定量化することにより、拘束水比が粒子形状によって変化すること⁴⁾を明らかにしている。

大内⁵⁾の報告によれば、粉体の種類によってペーストの変形性が異なることが明らかにされており、また枝松⁶⁾は、粉体の粒度分布等の差違がモルタルの流動性に大きく関係することを明らかにしている。

一方、コンクリートの流動性はペーストあるいはモルタルの粘性や降伏値に影響されるため、これらについても数多くの研究がなされている。内川⁷⁾はセメントの初期水和特性が同じであれば、粉体の充填率が高いほどペーストの降伏値が小さくなることを明らかにしており、充填率を高めるためにセメント粒子を球状化する試みも田中⁸⁾によって行われている。

これらの報告に見られるように、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、その主な要因は粉体と水との相互関係によると考えられる。したがって、まず初めに粒子表面への吸着水や粒子間保有水等の保水能力について検討することは、これらの挙動を解明する上で大変重要であると考えられる。

これらの背景を踏まえ本研究は、粉体の特性のうち

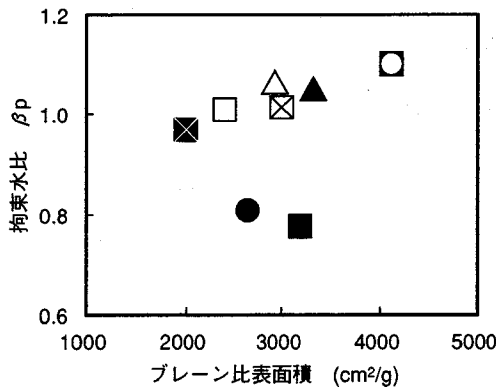


図-1 比表面積と拘束水比との関係

特に粒子形状と粒度分布を取り上げ、それらが保水性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、粉体の充填性と関連づけて検討したものである。

微粒粉体には液体中で二次凝集する特性を持つものもあるが、今回対象とした比表面積2000cm²/gから4000cm²/gの粉体についてはその傾向が小さいと考え、本研究においては特に考慮しないこととした。

2. 粒子形状の定量化手法

高流動コンクリートに用いられる粉体においては、その物性を表す指標としてブレン比表面積が用いられることが多い。図-1に、本研究で用いた粉体についてのブレン比表面積と拘束水比との関係を示す。拘束水比は粉体表面に水が吸着されることに関係すると考えられるが、比表面積が同程度であっても、拘束水比は粉体の種類により異なることがわかる。このことから粉体の物性をブレン比表面積のみで表現することは困難であり、別の指標により表すことが必要である。本研究ではこの指標を求める手がかりとして粒子形状に着目した。

粉体工学の分野においては粒子群の基礎的現象を検討する見地から、かなり古くより粒子形状の定量化が行なわれている。しかしながらその方法は目的によって異なり、すべての目的に適する粒子形状の指標は無いのが現状である。

本研究においては、粒子の外形と表面粗度にて粒子形状を評価する観点から長短比および凸凹係数を用いて粒子形状の定量化を行うこととした。

(1) 長短比⁹⁾

粒子内に直交する三軸を考え、その長軸 a 、短軸 b 、厚さ c を計測し、それらの比 a/b 、 b/c から粒子の形状を評価するものである。本研究による場合、厚さ方向の測定は不可能であり粒子の投影断面のみを対象としてい

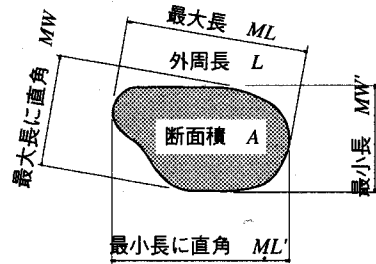


図-2 測定項目

ることから、図-2に示すように、長軸と短軸の比を長短比とした。また、長軸を先に計測するか、あるいは短軸を先に計測するかによって値が異なるため、以下に示すように2種類の方法により評価を行った。

$$\text{長短比} = \frac{\text{最大長 } ML}{\text{最大長に直角方向の長さ } MW} \quad (1)$$

$$\text{長短比}' = \frac{\text{最小長に直角方向の長さ } ML'}{\text{最小長 } MW'} \quad (2)$$

長短比は粒子の扁平度を評価するものと考えられ、円あるいは正方形などの縦と横の長さが等しい場合に1.0となり、扁平になるにしたがって大きくなる。

(2) 凸凹係数¹⁰⁾

長軸と短軸を含む平面に粒子を投影した断面について、粒子周囲の凸凹の度合いが増すにしたがって、断面積 A の投影断面の外周長 L に対する比が大きくなる。このに着目し、外周長に対する断面積の比を無次元量 f で表せば、 f は次式で表される。

$$f = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

f は粒子断面が円の時に最大となり、円の半径を R_0 とすれば次式のようなになる。

$$f_c = \frac{\pi R_0^2}{(2\pi R_0)^2} = \frac{1}{4\pi} \quad (4)$$

この f と f_c との比をもって凸凹係数 FU としたものである。

$$FU = \frac{f}{f_c} = \frac{L^2}{4\pi A} \quad (5)$$

凸凹係数は粒子表面の粗度だけでなく粒子外形の影響

表-1 粉体の物理的性質

| 材 料 | 記号 | 真比重 | 比表面積 (cm ² /g) | 有効径 (μm) | | | |
|---------------------------------------|------|----------------------|------------------------------|----------|-------|-------|--------|
| | | | | 平均 | 10%径 | 50%径 | 90%径 |
| 普通ポルトランドセメント | CE▲ | 3.15 | 3330 | 24.12 | 4.04 | 18.21 | 49.66 |
| フライアッシュ | FA■ | 2.13 | 3194 | 21.61 | 5.74 | 15.30 | 44.38 |
| 石灰石微粉末 | LS● | 2.73 | 2644 | 21.68 | 7.24 | 15.42 | 45.07 |
| 高炉スラグ微粉末 | BS□ | 2.91 | 2405 | 19.47 | 7.61 | 16.03 | 36.01 |
| 花崗岩微粉末 | SS△ | 2.94 | 2918 | 22.34 | 6.15 | 17.55 | 45.52 |
| フライアッシュ | FA2⊗ | 2.13 | 2000 | 88.81 | 14.39 | 57.79 | 194.30 |
| | FA3⊗ | 2.13 | 3000 | 45.30 | 7.89 | 33.21 | 94.32 |
| | FA4● | 2.13 | 4120 | 29.26 | 4.69 | 17.63 | 67.43 |
| 普通ポルトランドセメント と フライアッシュ の混合粉体 | CF2■ | CE/(CE+FA)=0.2 (容積比) | | | | | |
| | CF4■ | CE/(CE+FA)=0.4 | | | | | |
| フライアッシュ の混合粉体 | CF6■ | CE/(CE+FA)=0.6 | | | | | |
| | CF8■ | CE/(CE+FA)=0.8 | | | | | |

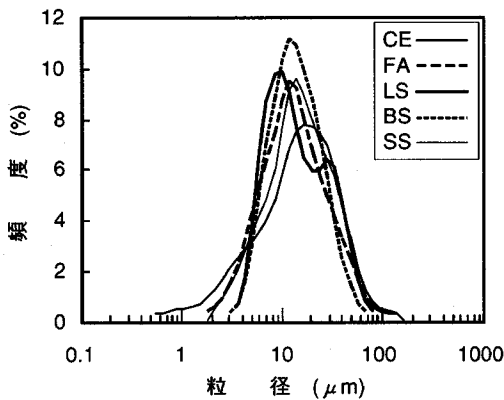


図-3 粉体の粒度分布

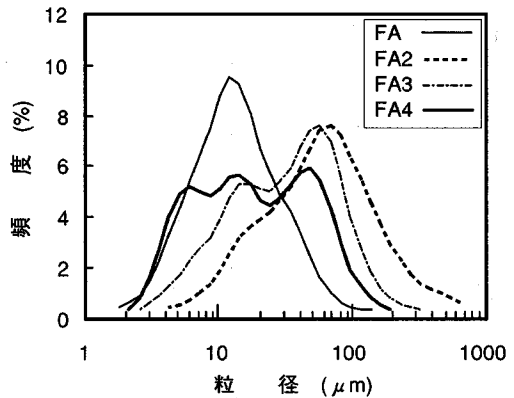


図-4 フライアッシュの粒度分布

をも含むものであるが、長短比と併用することにより表面粗度を評価できると考えられる。また、凸凹係数は粒子が円の場合に1.0となり、表面粗度が大きくなるにしたがい増加するものである。

3. 各種粉体の特性

(1) 使用材料

本研究に用いた粉体の物理的性質を表-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、平均粒径は粒径と頻度を加味した長さ平均径である。ブレン空気透過装置による比表面積の測定は、この装置自体がセメント用に設計されているため、一般の粉体の測定には不向きである。しかしながら、本研究で使用している粉体がセメント用混和材がほとんどであること、混合セメントについてはブレン法によること、セメントとの比較が容易であること等の理由により、本研究においてはこれを採用することとした。また、測定時のポロシチーが標準セメントと異なるものもあるが、算定式における補正を行うことにより比表面積を算出した。

普通ポルトランドセメント (CE)、フライアッシュ (FA)、石灰石微粉末 (LS)、高炉スラグ微粉末 (BS)、花崗岩微粉末 (SS) については、10%、50%、90%有効径を等しくするよう分級を行ったが、原料粉体の粒度分布が大きく異なることや、分級によって分布を正確に一致させることが技術的に難しいこと等の理由により、図-3に示すように、粒度分布が若干異なる傾向を示す。しかしながら、10μmと30μmの二箇所にピークが存在するような分布を示すLSを除き、その他のものについてはピークが10μmから20μmの間にあり、また、平均粒径がほぼ等しいことからマクロ的にはほぼ同じ粒度分布を持つ粉体であると考えることが出来る。また、粒度分布の測定は分散媒としてメタノールを用い、超音波分散を60秒行なった後レーザー回折・散乱式粒度分布測定装置により測定した。測定に際しては各粉体ともレーザーの透過率を一定とするようにサンプル量を調整し、3回の測定値が一定となった粒度分布を採用した。

FA2, FA3, FA4はフライアッシュについて粒度分布を変化させた粉体であり、比表面積毎に炉から直接採取

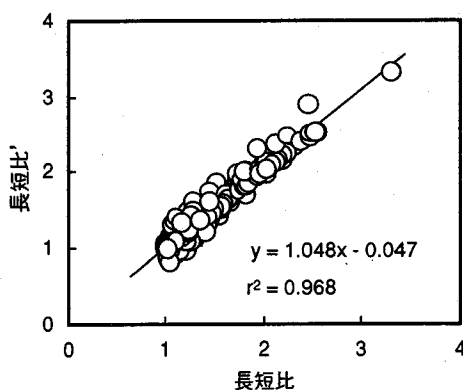


図-5 長短比と長短比' との関係

したものである。図-4にそれぞれの粒度分布を示す。FA2, FA3, FA4となるにしたがい分布は細粒径の方にシフトしており、それにともなって平均粒径も小さくなる。また、FAとFA4は粒度分布は異なるが平均粒子径はほぼ等しい値を示している。

CF2, CF4, CF6, CF8は普通ポルトランドセメントとフライアッシュを混合した粉体であり、容積混合率CE/(CE+FA)をそれぞれ0.2, 0.4, 0.6, 0.8と変化させたものである。

(2) 実験方法

定量化に用いた粉体はCE, FA, LS, BS, SS, FA2, FA3, FA4の8種類の粉体とした。

本研究は、非常に細かい粉体粒子の形状を直接観察する方法として走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を用いた。まず、SEM写真より粒子部分の輪郭をトレースし、画像入力装置によりパソコン内にデータを読み込む。次に、このデータを白と黒の2色化をすることで、境界画素の長さおよび粒子部分の画素の面積を計測し各測定値を求めた。

測定項目は図-2に示すように最大長 ML 、最大長に直角方向の長さ MW 、最小長 MW' 、最小長に直角方向の長さ ML' 、断面積 A 、外周長 L の6項目とした。

本方法においては高さ方向に関しては観察することが出来ないため、粉体粒子の座り方によって測定値が変化すると考えられる。しかしながら、試料は7mm×7mmの粘着テープ上にまぶした状態で固定しており、一定条件下で測定しているため粒子の座り方による影響は少ないと考えられる。

標本個数は1試料台で無作為に15個抽出し、10試料台(150個/粉体)とした。また、画像入力装置の画素が一定であるため、試料の拡大倍率によって測定精度が異なる予想されるが、今回は、写真倍率をフィルム(9cm×10cm)に収まる範囲内で最大倍率(1000倍:40 μ m程度×50個, 3000倍:20 μ m程度×50個, 5000倍:10 μ m程度×50個)として測定した。

(3) 粉体の特性

a) 粒子の概形

図-5にすべての粉体における長短比と長短比' との

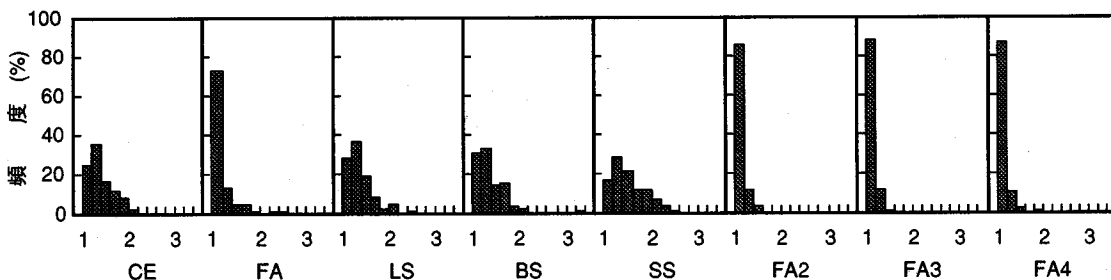


図-6 長短比のヒストグラム

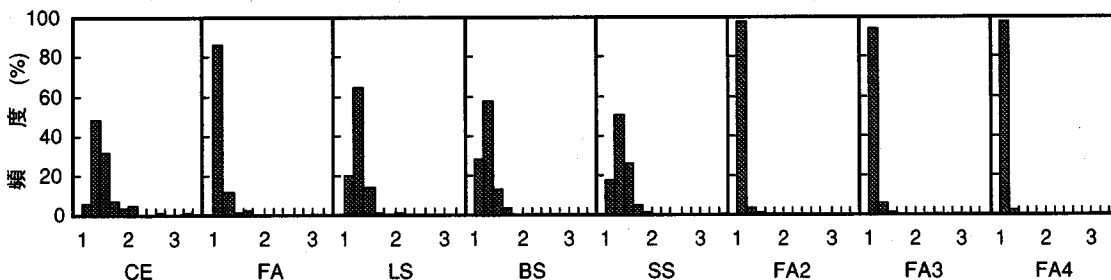


図-7 凸凹係数のヒストグラム

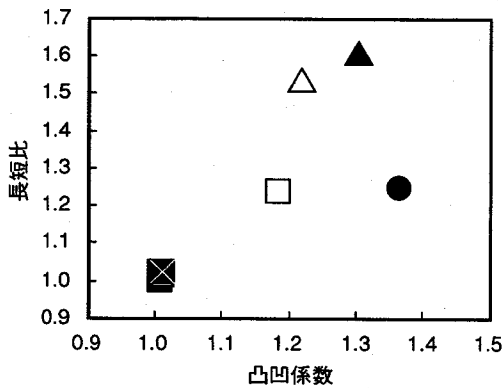


図-8 凸凹係数と長短比との関係

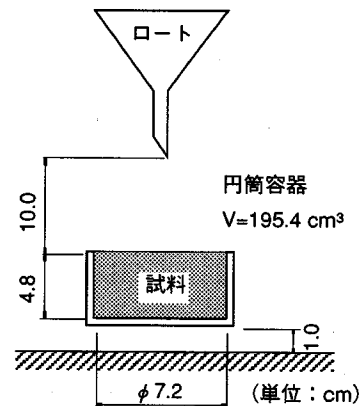


図-9 基本充填時の空隙率の測定

関係を示す。長短比と長短比'の分布は1.0~2.5の間に集中しており、粉体の全体的な形状は楕円あるいは長方形に近い形状であることがわかる。

一般的に粒子形状は不規則であり、最大長と最小長が直角であるとは限らない。しかしながら、本研究における試料については長短比が増加するにしたがい長短比'も比例的に増加しており、最小2乗法により長短比と長短比'との関係を求めたところその傾きがほぼ1.0(相関係数 $r=0.968$)であることから、最大長と最小長が直角に交わり不規則な粒子が少ないことがわかる。ここで不規則な粒子とは、例えば長方形粒子の角が欠損しているような粒子を示している。

したがって、本研究においては長短比と長短比'は等しいと考え、長短比をもって扁平度を表すこととする。

b) 長短比

図-6に長短比のヒストグラムを示す。粉体の種類により分布の形状は異なるが、いずれの粉体においても長短比はある値に集中しており、粒子の扁平度が種類ごとに同じであることがわかる。特にフライアッシュ(FA, FA2, FA3, FA4)については1.0~1.2付近に頻度が集中しており、粒子形状は最大長と最小長がほぼ同じ形状であることがわかる。

c) 凸凹係数

図-7に凸凹係数のヒストグラムを示す。このヒストグラムについても分布の形状は粉体ごとに異なるが、各粉体とも特徴的な値を示すことがわかる。ここにおいてもフライアッシュは1.0~1.2の間に集中しており、粒子表面の凹凸が小さく表面が滑らかであることがわかる。しかし、凸凹係数はその定義からもわかるように粒子表面の粗さだけを評価するものではなく、粒子の外形の評価をも含んでいるものである。したがって、ほぼ同じ凸凹係数であっても長短比が大きくなるにつれて、表面の微小な凹凸は少なくなる傾向を示す。

d) 粒子形状

長短比と凸凹係数のヒストグラムより各粉体についてのモードを求め、凸凹係数と長短比との関係を示したものを図-8に示す。どちらの値とも1.0に近くなるほど粒子形状は球形になると考えられ、フライアッシュはいずれの種類においても最も球形に近い結果となった。

粉体の物性に関しては様々な方面から電子顕微鏡写真撮影が行われており¹¹⁾、特にフライアッシュに関しては粒子形状が球形であることが確認されている。こうした観点からも、長短比と凸凹係数を用いることにより粒子形状をほぼ把握することが出来る可能性は高いと考えている。

4. 各種粉体の統一的评价方法

粉体の保水性能は、粒子間の保水能力や粒子表面への吸着能力に関係し、このため粒子間距離や粒子の大きさなどが重要な要因であると考えられる。一方、骨材の実積率に代表されるように、粒子形状や粒度分布は充填性能に大きく関係することが明らかになっている。したがって、粒子間距離や粒子の大きさなど粒子相互の関係は、充填性能を測定すればマクロ的に表すことが出来る。これらのことから、本研究においては粒子形状と保水性能との関連をつける統一的评价指標として粉体の空隙率を用いることとした。

(1) 基本充填時の空隙率

図-9に示すように、直径7.2cm、高さ4.8cmの円筒容器($V=195.4\text{cm}^3$)に10cmの高さからロートを用いて静かに粉体を充填させた。その後約1cmの高さより容器を繰り返し落下させ、容器中にそれ以上粉体が充填できなくなった状態を基本充填と考え、その時の質量および容積から空隙率を算出した。

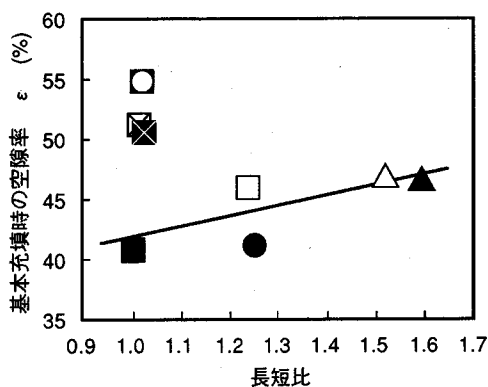


図-10 長短比と基本充填時の空隙率との関係

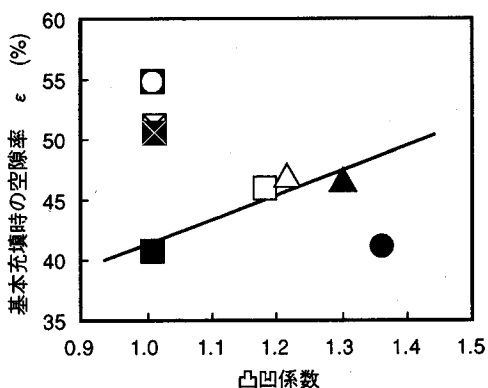


図-11 凸凹係数と基本充填時の空隙率との関係

(2) 粒子形状と空隙率との関係

図-10と図-11に長短比および凸凹係数と基本充填時の空隙率との関係を示す。粒度分布がほぼ同じであるCE, FA, BS, SSについては長短比および凸凹係数が大きくなるにしたがい基本充填時の空隙率が増加することがわかる。これは、粒度分布がほぼ同じであれば粒子形状が複雑であるほど充填しにくくなることを示しており、このことは粉体粒子の充填過程における粒子の隙間への移動や回転が困難になることに起因すると思われる。

また、粒子形状がほぼ同じであるFA, FA2, FA3, FA4においては、長短比と凸凹係数のいずれの関係においても基本充填時の空隙率が異なっており、粒度分布の影響が生じていると考えられる。

(3) 形状係数の提案

長短比と凸凹係数が空隙率に及ぼす影響の大小は、本研究範囲内においては明らかではない。しかしながら、充填性能は粒子の外形と表面粗度が相互に関係しあっていると考えられることや、図-10と図-11から、長短

表-2 長短度および凸凹係数と形状係数

| 材料 | 長短比 | | 凸凹係数 | | 形状係数 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 最頻値 | 標準偏差 | 最頻値 | 標準偏差 | |
| CE | 1.593 | 0.289 | 1.302 | 0.277 | 1.448 |
| FA | 1.004 | 0.234 | 1.007 | 0.125 | 1.006 |
| LS | 1.250 | 0.270 | 1.362 | 0.120 | 1.306 |
| BS | 1.236 | 0.306 | 1.182 | 0.124 | 1.209 |
| SS | 1.517 | 0.343 | 1.218 | 0.154 | 1.368 |
| FA2 | 1.025 | 0.109 | 1.010 | 0.073 | 1.018 |
| FA3 | 1.017 | 0.097 | 1.012 | 0.075 | 1.015 |
| FA4 | 1.020 | 0.130 | 1.007 | 0.063 | 1.014 |

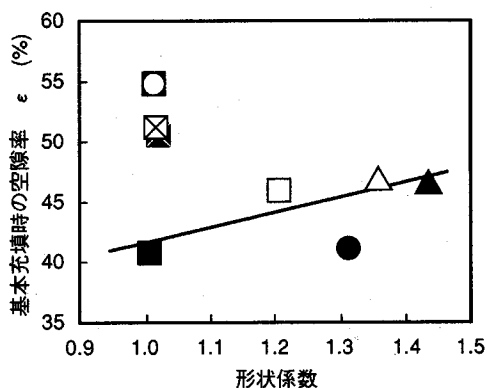


図-12 形状係数と基本充填時の空隙率との関係

比と凸凹係数は基本充填時の空隙率に大きくかかわっていることなどから、本研究においては粒子形状を長短比と凸凹係数との加算平均をもって表わすこととし、以下に示す方法にて形状係数を算出した。

$$\text{形状係数} = \frac{\text{長短比} + \text{凸凹係数}}{2} \quad (6)$$

また、上記の式により算出した形状係数を表-2に示す。

(4) 形状係数と空隙率の関係

図-12に上記方法にて算出した形状係数と基本充填時の空隙率との関係を示す。形状係数が1.0に近づくほど粒子形状が球に近かつ表面が滑らかな粉体であると考えられ、粒度分布がほぼ同じ粉体については形状係数と空隙率がほぼ比例し、粒子形状が複雑になるにしたがって空隙率が大きくなることが表わされた。

一方、粒子形状がほぼ同じで粒度分布が異なるFA, FA2, FA3, FA4については基本充填時の空隙率が大きく異なる傾向を示し、また、LSはFAやBSよりも形状係

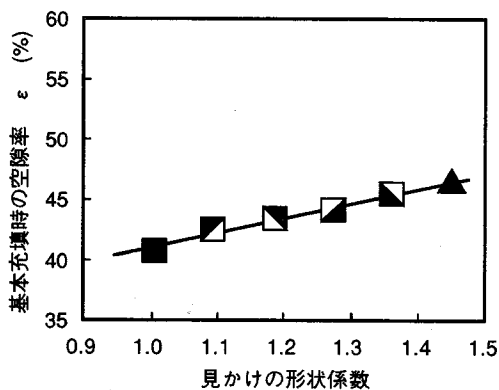


図-13 混合粉体の見かけの形状係数と基本充填時の空隙率との関係

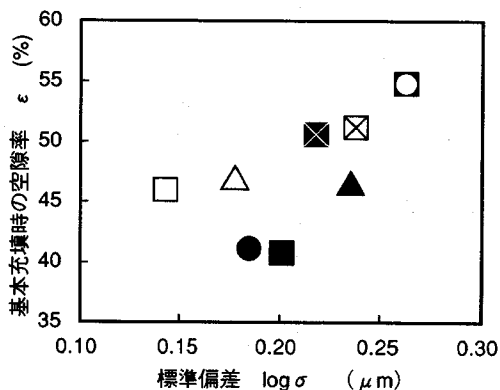


図-14 粒度分布の広がり空隙率との関係

数が大きいにもかかわらず空隙率は相対的に低い値を示した。FA2, FA3, FA4は図-4からも明らかなようにFAに比較して粗粉が多い分布となっている。一方、LSの粒度分布はピークが2箇所に存在する形となっており、FAやBSに比べ中間粒径が少なく粗粉量に比べて微粉量が多くなっている。

これらのことを考慮すると、粒子形状だけでなく微粉・粗粉の割合も粉体の充填性に大きく関わっていると考えられ、粒子が同一形状であっても粒度分布が異なることにより充填性は様々に変化することが確認された。

図-13に混合粉体の見かけの形状係数と基本充填時の空隙率との関係を示す。ここで、混合粉体の見かけの形状係数とは、混合する粉体固有の形状係数を容積割合にて換算したものである。また、粒度分布はCEとFAがほぼ同じであることから、混合後のいずれの粉体においてもほぼ同じ分布と考えられる。

フライアッシュに混合するセメントの量を増加するにつれて空隙率も直線的に増加しており、フライアッシュ単体およびセメント単体では異なる空隙率が、混合率を増加することによりフライアッシュの空隙率からセメントの空隙率に移行して行く様子が分かる。また、見かけの形状係数と空隙率が比例関係にあることから、単一粉体の場合と同様に混合粉体においても粒子の形状が空隙率に影響を及ぼしていることがわかる。

これらのことから、異なる形状の粉体を混合した場合の見かけの形状係数は、混合される粉体固有の形状係数を容積割合により換算して求めることができ、また、見かけの粒子形状と空隙率は比例関係にあることが明らかになった。

(5) 粒度分布と空隙率の関係

図-12より、粒子形状が同じであっても粒度分布が異なるFAとFA2, FA3, FA4の空隙率が異なること、お

よび粒子形状が複雑であってもLSのように空隙率が小さくなる粉体があることが確認された。このためここでは、粒度分布が空隙率に及ぼす影響についての検討を行う。

通常粉体の粒度分布は、微粉の方にピークが偏り粗粉側に尾をひいた非対称分布となることが多い。このため、このような分布を表わす方法として対数正規分布の標準偏差やRosin-Rammler分布の傾き等が用いられることがある¹²⁾。しかしながら、いずれの方法においても分布の広がりのみを表わすものであり、頻度の少ない微粉や粗粉により分布の表わされ方が大きく左右される。このようなことから、本研究においては粒度分布における頻度の高い部分に着目し、対数正規分布の粒度分布から求められる平均値 m と標準偏差 σ_1 を用い、 $m \pm \sigma_1$ の範囲について新たに標準偏差 σ を求め、これをもって粒度分布の広がりを表わすこととした。

図-14に各粉体の標準偏差と基本充填時の空隙率との関係を示す。標準偏差のみでは粒度分布の形状を正確に表わすことはできないが、分布の目安としては有効であると考えられ、標準偏差が大きいほど分布の広がり大きく各粉体の分布形状を大まかに表わしていると考えられる。特に粒子形状が同じであるFA, FA2, FA3, FA4については図-4の粒度分布と比較すると、最もシャープであるFAの標準偏差が小さく、分布がブロードであるFA4において大きくなっている。

粉体全体について標準偏差が小さくなるにしたがい空隙率は小さくなる傾向を示し、特にフライアッシュについてはその傾向が顕著である。しかしながら、BSについては粒子形状がCEやSSに比べて球形に近かつ粒度分布がシャープであるにもかかわらず空隙率は大きい値を示しており、単分散粒子であっても空隙率は増加する傾向があることがわかる。これらのことから粉体の充填性に関しては、粗粉の間隙に微粉が入り込み空隙率が減少するような粒度分布が存在することがうかがえ、それ

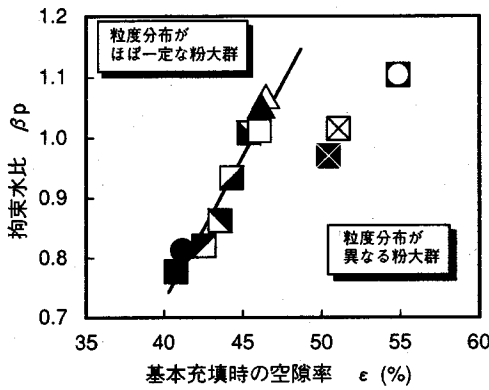


図-15 基本充填時の空隙率と拘束水比との関係

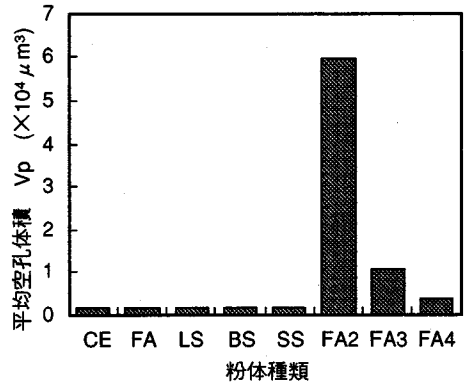


図-16 各粉体の平均空孔体積

よりも粒度分布がシャープであってもブロードであっても充填性は低下すると考えられる。

5. 粉体の保水能力の評価

(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」に定めるモルタルのフロー試験を準用し、フローテーブルの代わりに水平に設置したガラス板上で行ない、振動を与えないペーストの広がり方をフロー値とした。ペーストは、水粉体容積比を1.1, 1.2, 1.3, 1.4と変化させた配合とし、練り混ぜについては粒子の分散状態をほぼ同様とすることから、投入水を1次水と2次水に分けて行った。

まず、セメントと1次水をかき落としを挟んで低速と高速で各60秒間練り混ぜる。次に2次水を投入し、再びかき落としを挟んで低速で各60秒間練り混ぜた。1次水の量は粉体ペーストの標準粘度の1.1倍とした。

ペーストのフロー値を2方向について計測し平均した後、次式により相対フロー面積比を算出した。

$$\Gamma_p = \frac{\pi (F_p/2)^2 - \pi (F_0/2)^2}{\pi (F_0/2)^2} = (F_p/F_0)^2 - 1 \quad (7)$$

ここで、 Γ_p : 相対フロー面積比
 F_p : ペーストのフロー値(mm)
 F_0 : フローコーン底面の直径(100mm)

この相対フロー面積比と水粉体容積比が線形関係であることから相対フロー面積比が0となる水粉体容積比をもって拘束水比とした¹⁾。

セメントのような初期水和反応のある粉体においては実験時間により拘束水比が変化することが予想される。したがって、本研究においては実験時間を10分/バッチとし、反応の影響がないように配慮した。

(2) 拘束水比と空隙率の関係

図-15に基本充填時の空隙率と拘束水比との関係を示す。粒度分布がほぼ一定である粉体群の場合、単一粉体、混合粉体にかかわらず、拘束水比は基本充填時の空隙率に比例し、空隙率が大きくなるほど拘束水比は増加する傾向を示す。またLSは、粒度分布が異なる粉体であるにもかかわらず、基本充填時の空隙率が低く、粒度分布がほぼ一定な粉体と同様の傾向を示している。しかし、FA2, FA3, FA4はFAと粒子形状がほぼ同じで粒度分布が異なる粉体であるが、基本充填時の空隙率が大きく、拘束水比の傾向は他の粉体と異なる傾向を示し、空隙率に対する拘束水比は小さくなっている。

粉体の比表面積、平均粒径および空隙率が明らかな場合、粉体中の1個の平均空孔体積は次式により求めることが出来る¹³⁾。ここで、平均空孔体積とは粉体粒子1個が占める平均の空隙体積を表わしている。

$$V_p = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \cdot \frac{\pi D_p^2}{S_w} \quad (8)$$

ここで、 V_p : 1個の平均空孔体積
 ε : 空隙率
 S_w : 比表面積
 D_p : 平均粒径
 ρ_p : 比重

図-16に基本充填時における各粉体の平均空孔体積を示す。粒度分布がほぼ同じであるCE, FA, BS, SSについては、基本充填時の空隙率が異なるにもかかわらず平均空孔体積はほぼ同じ値となり、粒子形状の違いは空隙率にのみ影響し、空孔体積には無関係であることがわかる。またLSは、粒度分布が異なるにもかかわらず他の粉体とほぼ同じ空孔体積を示している。しかしながら、粒度分布が異なるFA2, FA3, FA4は空孔体積が粉体ごとに大きく異なり、粒度分布の違いは空隙率だけでなく空孔体積をも大きく変化させることがわかる。

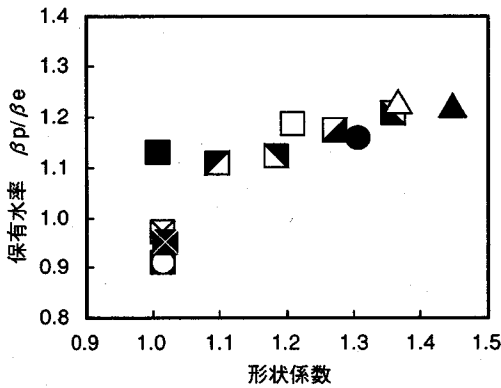


図-17 形状係数と保有水率との関係

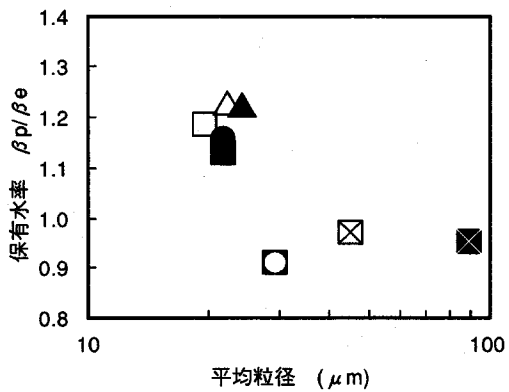


図-19 平均粒径と保有水率との関係

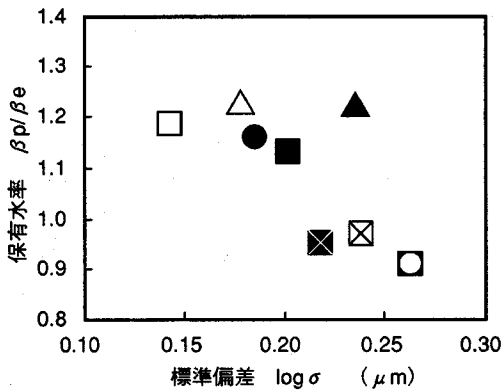


図-18 粒度分布の広がり と保有水率との関係

次に、粒子形状や粒度分布が保水能力に及ぼす影響を考察するために、基本充填時の空隙率から算出される空隙比を β_e とし、これと実験により求められる拘束水比 β_p との比較を試みた。ここで、 β_p は以下の式により求め、また、 β_p と β_e との比を保有水率とした。

$$\beta_e = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \quad (9)$$

$$\text{保有水率} = \frac{\beta_p}{\beta_e} \quad (10)$$

ここで、 ε ：基本充填時の空隙率

(3) 粒子形状と保水能力

図-17に粒子の形状係数と保有水率との関係を示す。粒度分布がほぼ同じと考えられる粉体については保有水率は1.0以上であり、基本充填時の空隙量に比べてより多くの水量が拘束されている。また、形状係数（見かけの形状係数）が増加するにしたがって直線的に保有水率が増加する傾向を示しており、平均空孔体積が同じであることから、形状が複雑であるほど多くの水を拘束することがわかる。これは、粒子形状が複雑になるほど粒

子表面の凹凸に吸着する水量が増加するためであると考えられ、粒子形状が吸着水に影響を及ぼすことが明らかになった。

一方、粒度分布が異なるFA2、FA3、FA4は保有水率が1.0未満であり、粒子形状が同じであっても粒度分布が異なることにより保有水率が低下しているものと思われる。

(4) 粒度分布と保水能力

図-18に粒度分布の標準偏差と保有水率との関係を示す。全体的に標準偏差が大きくなるにしたがい保有水率は減少する傾向を示し、粒度分布がブロードになることにより保有水が減少することがわかる。これは、図-16からもわかるように、粒度分布がブロードになることにより粉体の平均空孔体積が増加するため、粒子間水を保っておくことが困難になり保有水率が低下するものと考えられ、粒度分布は粒子間保水量に関係することが明らかになった。

また、図-19に平均粒径と保有水率との関係を示す。平均粒径と保有水率との間で相関は認められず、本研究に用いた範囲においては粉体の粒径は保水量には影響していないと考えられる。

以上のことから、粉体の保水性能は平均空孔体積中に確保できる粒子間保水と全体の空隙量とのバランスにより決定されることが明らかになった。充填性に優れる粉体は平均空孔体積が小さく、空隙中に十分な水量を確保することができるため、トータルとしての保水性能は空隙率に依存することとなる。一方、充填性の悪い粉体は、全体の空隙量は多いが平均空孔体積も大きく粒子間保水量が低下するため、保水性能は粒子間保水量に依存する。

また、粒子形状は充填性と粒子表面への吸着水に関係し、球形に近い粒子は吸着水量が小さく、かつ充填性を良くし空隙率を小さくするため、全体の保水性能を低くするように作用する。

4. 結論

高流動コンクリートの配合設計の確立において、最も水を拘束する粉体の保水能力を検討することは重要である。このような観点から現在高流動コンクリートに用いられている粉体を対象に、粒子形状や粒度分布が保水能力に及ぼす影響を各種定量化を行って検討した。その結果、本研究範囲内で以下のことが明らかになった。

(1) 粉体の充填性は粒子の大まかな外形と表面粗度により影響され、外形が丸く表面が滑らかな粒子ほど充填性がよい。また、粒子形状の定量化により充填性との関係を明らかにするために、粒子の大まかな外形を長短度により、表面粗度を凸凹係数により表すことを試みた結果、有効な手段となる可能性を得た。

(2) 混合粉体の充填性は単一粉体の充填性を混合割合にて換算することで求めることが出来る。また、単一粉体の形状係数を混合割合で換算した見かけの形状係数を用いることにより、粒子形状と充填性との関係を求めることが出来る。

(3) 粉体の充填性は粒子形状や粒度分布により影響を受ける。粉体の空隙率を小さくするためには粒子間の隙間を別な粒子で埋める必要があり、これを粒子全体にわたって満足するような粒度分布が最も充填性が良いといえる。また、隙間を埋めるためには粒子の回転や移動が必要であるため、この抵抗の少ない球形粒子を持つ粉体が有利である。

(4) 粉体の保水能力は平均粒径や比表面積だけでは評価できず、粒子形状と粒度分布の影響を加味する必要がある。この場合、粒子形状は粒子表面への吸着水に、粒度分布は粒子間保水に関係していると考えられ、粒子形状が球に近いほどまた充填性が良い粒度分布ほど保水能力は低くなる。

参考文献

- 1) 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年9月.

- 2) 山崎寛司: 鉱物質微粉末がコンクリートのウォーカビリティにおよぼす効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第84号, pp.98~120, 1962年.
- 3) 緑川猛彦, 丸山久一: ベーストの流動性に及ぼす微粉末物性の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.71~76, 1994年6月.
- 4) 緑川猛彦, 丸山久一: 粉体の拘束水比に及ぼす粒子形状の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.123~128, 1995年7月.
- 5) 大内雅博, 小澤一雅: 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, V-289, pp.594~595, 1991年9月.
- 6) 枝松良展, 下川浩児, 岡村甫: モルタルフロー値に及ぼす粉体特性の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.77~82, 1994年6月.
- 7) 内川浩, 宇智田俊一郎, 岡村隆吉: まだ固まらないセメントペースト, モルタル, 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, pp.42~47, 1989年6月.
- 8) 田中勲, 武高男, 鈴木信男, 山本英夫, 佐竹神也, 一家樵俊: 球状化セメントの流動特性, 第46回セメント技術大会講演集, pp.206~211, 1992年5月.
- 9) 三輪茂雄: 粉粒体工学, 朝倉書店, pp.68~69, 1972年6月.
- 10) 吉村優治, 小川正二: 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.95~103, 1993年3月.
- 11) 粉体工学会・(社)日本粉体工業技術協会編: 改訂増補粉体物性図説, 日経技術図書株式会社, pp.541~547, 1985年12月.
- 12) 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.33~38, 1992年12月.
- 13) 三輪茂雄: 粉体工学通論, 日刊工業新聞社, pp.52~56, 1993年2月.

(1995.7.17受付)

EVALUATION OF PARTICLE SHAPE AND SIZE DISTRIBUTION OF POWDER ON WATER RETENTION

Takehiko MIDORIKAWA and Kyuichi MARUYAMA

Characterization of powder is essential for proportioning the self-compacting concrete. In particular, the capability of water retention is the most basic parameter for the characterization. This paper deals with what properties of powder affect the water retention capacity mostly and how they do. Out of several factors, particle shape and distribution of particle size are selected as key factors, and they are characterized by introducing a shape factor and a statistic measure. It is concluded that those factors are effective to make a quantitative representation of how particles are packed in a unit volume, and then, to construct a model how water is retained on the surface of particles.