

論文 粉体の拘束水比に及ぼす粒子形状の影響

緑川猛彦*1・丸山久一*2

要旨：本研究は粉体の物理的性質のうち粒子形状と粒度分布に着目し、粒子形状を定量化することによりそれらが拘束水比に及ぼす影響を、単一粉体および混合粉体の場合について検討した。その結果、1) 粒子形状の定量化が可能であること、2) 拘束水比は粉体の空隙率と比例関係にあること、3) 粉体の粒度分布が同じであれば粒子形状が球に近づくほど空隙率が小さくなること等が明らかになった。

キーワード：拘束水比、粒子形状、形状係数、空隙率、粒度分布

1. はじめに

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たものであり、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。一方、高流動コンクリートに用いられる粉体は現在のところ様々であり、水量および混和剤量は粉体の種類を変えるごとに、ペーストならびにモルタルのフロー試験およびVロート試験により求めるのが一般的である[1]。

粉体はコンクリート構成材料中で最も多くの水を拘束するため、粉体の物理的性質と拘束水比との関係を明らかにすることは、高流動コンクリートの配合設計の確立にたいへん重要であると考えられる。そこで本研究は粉体の粒子形状および粒度分布に着目し、形状を定量化することにより拘束水比との関係について検討することとした。

2. 粉体粒子形状の定量化

2.1 使用材料

定量化に用いた粉体は普通ポルトランドセメント (CE、比重3.15、3330cm²/g)、フライアッシュ (FA、比重2.13、3194cm²/g)、石灰石微粉末 (LS、比重2.73、2644cm²/g)、高炉スラグ (BS、比重2.91、2405cm²/g)、花崗岩微粉末 (SS、比重2.94、2918cm²/g) とした。

2.2 測定方法

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。測定方法は、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み、次にこのデータを二値化することで、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。

本方法においては高さ方向に関しては観察することができないため、粉体粒子の座り方によって粒子の特性値が変化すると考えられる。このため試料は粘着テープ上に塗した状態で固定し、粒子がランダムに設置されているようにした。

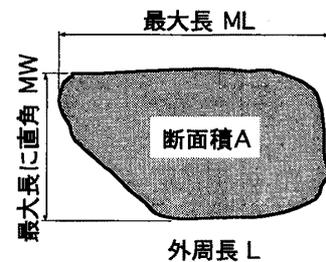


図1 測定項目

*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)

標本個数は1試料台でランダムに15個抽出し、10試料台（150個/紛体）とした。また、写真倍率はフィルム（9cm×10cm）に収まる範囲内で最大倍率とした。

測定項目は図1に示す様に最大長ML、最大長に直角方向の長さMW、断面積A、外周長Lの4項目とした。

2. 3 形状定量化の方法

(1) 長短度

コンクリート用骨材の粒形を評価する時に一般的に用いられる方法で、最大長MLと最大長に直角方向の長さMWとの比を取り、偏平度を評価するものである。円あるいは正方形など縦と横の長さが同じ場合に1.0となり、偏平になるにしたがって大きくなる。 [2]

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

(2) 凸凹係数

粒子表面の凸凹の度合いが増すにしたがって投影断面の外周長lが長くなり断面積aとの比が大きくなることに着目したもので、円の場合との比を取ったものである。いま、断面積と外周長との比を無次元量fで表し、粒子形状が円の場合のfを f_c で表せば、円の半径を R_0 とした時の f_c は以下の式で表される。凸凹係数FUはこれら無次元量の比であり、粒子が円の場合に1.0となり、凸凹の度合いが増すにしたがって小さくなる。 [3]

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

2. 4 結果および考察

(1) 長短度

図2に各紛体の長短度のヒストグラムを示す。分布はいずれの紛体においても平均値を中心としてほぼ正規分布に近い状態であり、偏平度が種類ごとにほぼ同じであると考えられる。特にフライアッシュにおいては1.0から1.1付近で大きな頻度を示しており、紛体形状は最大長とそれに直角方向の長さがほぼ等しい形状であることがわかる。また、表1に各紛体の長短度の平均値および標準偏差を示す。

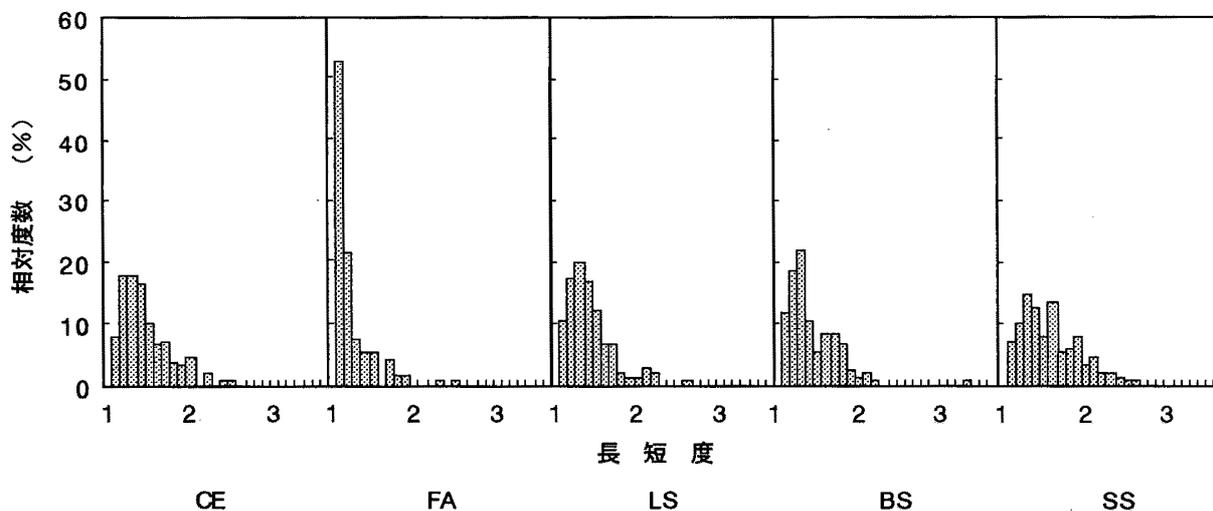


図2 長短度のヒストグラム

(2) 凸凹係数

凸凹係数についてもヒストグラムの分布はほぼ正規分布に近い状態にあり、特にフライアッシュについては0.95から1.0の間に頻度が集中し、かなり凸凹度が小さい傾向を示す。しかし凸凹係数はその定義からわかるように粒子の形状だけを評価するものではなく、粒子表面の粗度の評価をも含んでいるものである。したがって、ほぼ同じ長短度であっても表面の微小な凹凸が大きくなるにしたがって凸凹係数は小さくなる傾向を示す。表2に凸凹係数の平均値と標準偏差を示す。

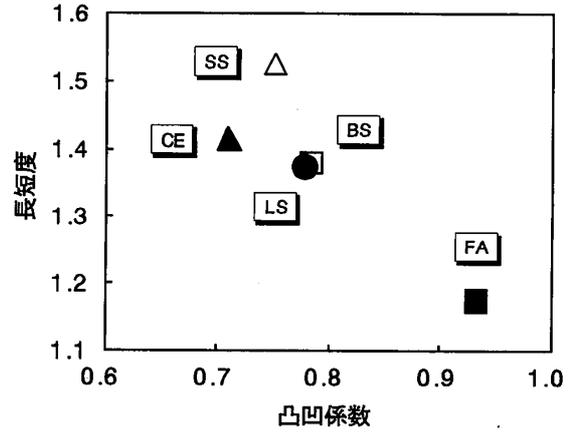


図3 凸凹係数と長短度の関係

(3) 粒子形状の定量化

図3に各粉体の凸凹係数と長短度の関係を示す。どちらの値も1.0に近くなるほど球形に近づくと考えられ、フライアッシュが最も球形に近いと考えられる。また、石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末は粒子形状がほとんど等しい粉体であると思われる。

表1 長短度および凸凹係数と形状係数

材料	長短度		凸凹係数		形状係数
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
CE	1.412	0.288	0.712	0.100	1.408
FA	1.177	0.233	0.932	0.085	1.125
LS	1.374	0.269	0.779	0.065	1.329
BS	1.381	0.304	0.784	0.070	1.329
SS	1.523	0.342	0.753	0.080	1.426

これまでの結果より、長短度は大まかな粒子形状を、凸凹係数は表面の微小な粗度を表すものと考えられ、どちらか一方の指標では全体的な粒子形状を表せないことがわかる。また、拘束水比は扁平度と粒子表面の粗度のどちらにも関係すると考えられるため、本研究において、粒子形状の定量化の方法として次の式により求められる形状係数を提案する。

$$\text{形状係数} = \left(\text{長短度} + \frac{1}{\text{凸凹係数}} \right) / 2 \tag{3}$$

この形状係数は粒子の長短度と凸凹係数の平均値であり、粉体形状が球に近いほど1.0に近づくものである。表2に各粉体の形状係数を示す。

3. 各種粉体の拘束水比

3.1 使用材料

使用した粉体は、前述の方法により粒子形状を定量化した5種類の粉体、粒度分布を変化させた4種類のフライアッシュ、および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（容積混合率CE/(CE+FA)=0.2、0.4、0.6、0.8）の3パターンとした。各粉体の物理的性質を表2に、また粒度分布を図4と図5に示す。

表2 粉体の物理的性質

材料	真比重	比表面積 (cm ² /g)	有効径 (μm)		
			10%径	50%径	90%径
CE	3.15	3330	4.04	18.21	49.66
FA	2.13	3194	5.74	15.30	44.38
LS	2.73	2644	7.24	15.42	45.07
BS	2.91	2405	7.61	16.03	36.01
SS	2.94	2918	6.15	17.55	45.52
FA2	2.13	2000			
FA3	2.13	3000			
FA4	2.13	4120			

粒子形状を定量化した5種類の粉体は、各粉体とも10%、50%、90%有効径をほぼ一定とするように分級を行ったが、石灰石微粉末については10μmと30μmの二箇所にピークが存在するような分布となっている。その他の粉体についてはピークが10μmから20μmの間で、ほぼ一定

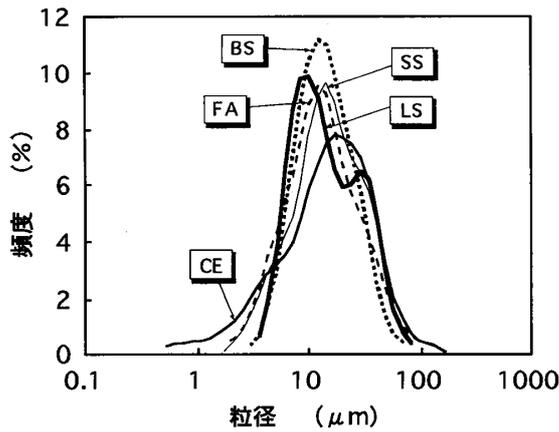


図4 粉体の粒度分布

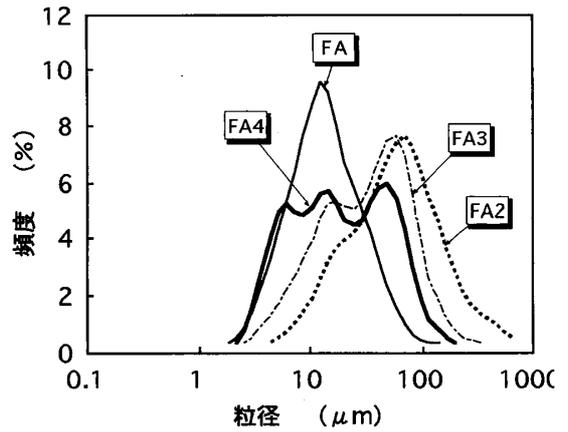


図5 フライアッシュの粒度分布

な粒度分布を持つ粉体と考えることができる。また、粒度分布を変化させたフライアッシュ (FA2、FA3、FA4) は比表面積ごとに炉から直接採取したものである。

3. 2 実験方法

(1) 拘束水比

ペーストのフロー試験は、JIS A 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フロー値とした。また、ペーストのフロー面積比と水粉体容積比との関係より粉体の拘束水比を算出した。[1]

(2) 最密充填時の空隙率

直径7.2cm、高さ4.8cmの円筒容器 (V=195.4cm³) 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最密充填と考え、その時の質量および容積から空隙率を算出した。

3. 3 結果および考察

(1) 単一粉体

図6に形状係数と拘束水比との関係を示す。粒度分布がほぼ一定であるCE、FA、BS、SSの場合、拘束水比は粉体の形状係数が大きくなるにしたがいほぼ直線的に増加する傾向を示し、粉体の粒子形状により拘束水比が変化することが分かる。一方、LS、BSおよびFA、FA2、FA3、FA4は、粉体の形状係数がそれぞれ同じであるが粒度分布が異なるため拘束水比に差が生じていると考えられる。

図7に形状係数と最密充填時の空隙率との関係を示す。粒度分布がほぼ一定であるCE、FA、BS、SSの場合、空隙率は形状係数が増加するにしたがって比例的に増加し、粒子形状が複雑になるほど空隙率が増加することがわかる。また、粒度分布の異なるBSとLS、またはFAとFA2、

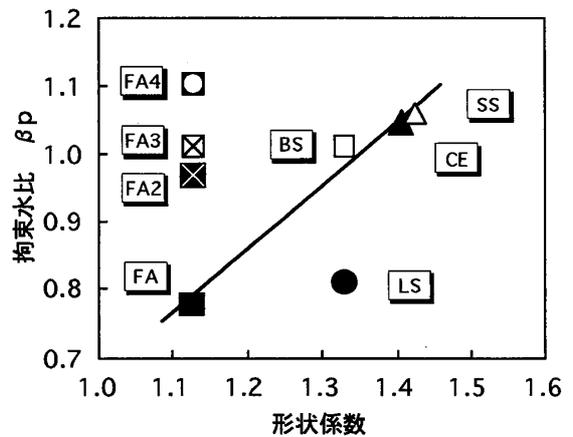


図6 形状係数と拘束水比の関係

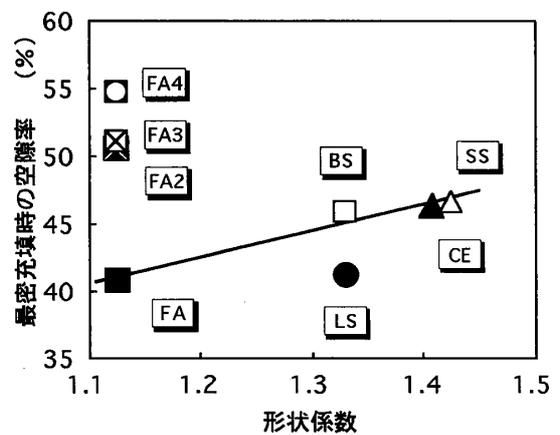


図7 形状係数と空隙率の関係

FA3、FA4と比較すると、空隙率の変化は粒子形状より粒度分布の違いによるものが大きい傾向を示す。これは、粒子形状が粒子の移動および回転の容易さに関係するものであるのに対して、粒度分布は直接充填性に関係することによると考えられる。

以上のことより、拘束水比は粉体の空隙率に関係し、また粒度分布が同じであれば空隙率は粒子形状に左右されるため、粒子形状が複雑になり空隙率が増加することにより、空隙に拘束される水量が増加するものと考えられる。

(2) 混合粉体

図8に混合粉体の容積混合率と拘束水比との関係を示す。混合率を増加するにしたがって拘束水比も増加しており、単一粉体では異なる拘束水比が混合率を増加することによって、もう一方の拘束水比に移行していく様子がわかる。

図9に各容積混合率時の空隙率と見かけの形状係数との関係を示す。ここで、混合粉体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たものである。単一粉体の場合と同じように、見かけの形状係数が増加するにしたがい空隙率も比例的に増加しており、このことが拘束水比の増加に寄与していると考えられる。したがって、異なる形状の粉体を混合した場合の拘束水比も空隙率と比例関係にあり、また空隙率は見かけの形状係数により関係付けられることが明らかになった。

(3) 粒度分布

図10に各粉体の最密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の場合、拘束水比は空隙率に比例し、粒子形状が複雑になるほど空隙率が大きくなり拘束水比も増加する傾向を示している。またLSは、粒子形状がBSと同じで粒度分布が異なる粉体であるにもかかわらず、

粒度分布がほぼ一定な粉体と同様の傾向を示すことがわかる。一方、FA2、FA3、FA4はFAと粒子形状が同じで粒度分布が異なる粉体であるが、最密充填時の空隙率および拘束水比の傾向が他の粉体とは異なり、また、比較的大きな粒子が多くなるほど拘束水比は低下する傾向を示す。

粉体の拘束水比は相対フロー面積比が0となる時の水粉体容積比であるため、式を変形することによりペーストの空隙率（ペースト容積に占める粉体粒子以外の容積率）を求めることが出来る。この拘束水比から求められる空隙率 n_p と最密充填時の空隙率 n との比 n_p/n を空隙率比とし、

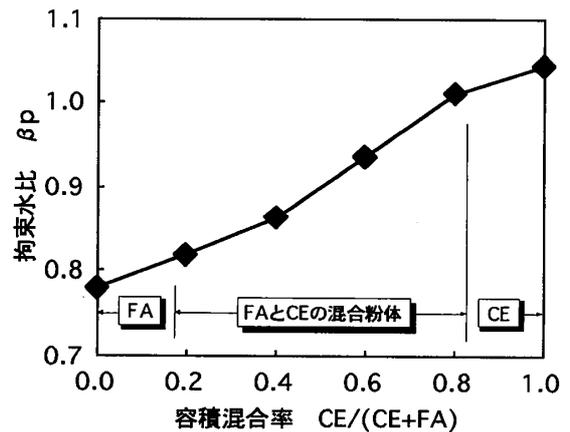


図8 容積混合率と拘束水比の関係

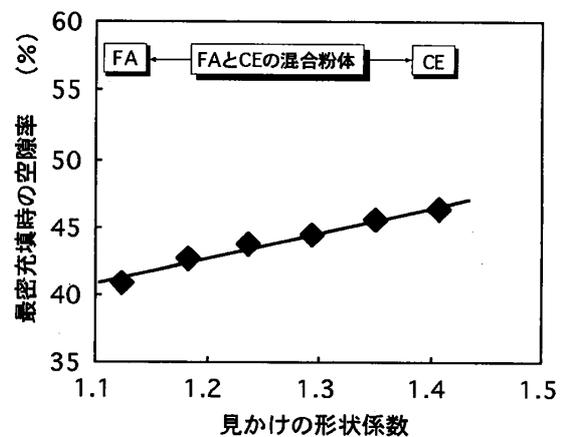


図9 混合粉体の見かけの形状係数と空隙率との関係

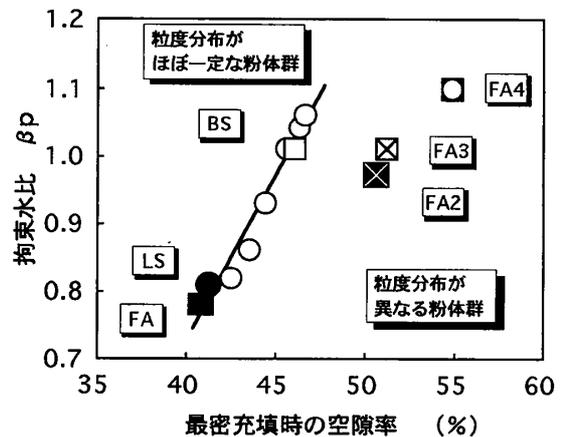


図10 空隙率と拘束水比の関係

図11に最密充填時の空隙率と空隙率比との関係を示す。粒度分布がほぼ一定である粉体群の場合、異なる粉体群に比べて最密充填時の空隙率が低く、また空隙率比は1.0以上の値を示している。これは粉体中の空隙がすべて水で満たされ、かつそれ以上の水量が拘束されていることを表している。一方、粒度分布が異なる粉体群のFA2、FA3、FA4は最密充填時の空隙率が大きく、また空隙率比が1.0より小さいことから、空隙が水で満たされていない状態にあると考えられる。

拘束水量は粒子表面の吸着水量と粒子間保水量との和であると考えられ、粒子表面の吸着力は粉体粒子の粒径に依存することが知られている[4]。また、粒子間保水量は空隙の総量と空隙個々の大きさに関係し、空隙量が同じであっても空隙の大きさが小さければ粒子間保水量は増加すると考えられる。一方、粒子の配列が同じ場合空隙量は粒径に関係せず、空隙の大きさのみが影響を受け、細粒となるほど空隙の大きさが小さくなることが知られている。これらのことを考慮すると、FA2、FA3、FA4となるにしたがって粒度分布が左にシフトし細粒径が多くなること、また、図11において空隙率比がほぼ同じであり水を拘束する比率が同程度であることから、図10に示すように、FA2、FA3、FA4となるにしたがって空隙の総量は大きくなるものの、空隙個々の大きさが小さくなるため拘束水比が増加しているものと考えられる。

4. 結論

各種粉体の粒子形状を定量化し、単一粉体、混合粉体について拘束水比との関係を検討した結果以下のことが明らかになった。

1. 長短度と凸凹係数を用いることによって、粉体の粒子形状を定量化できる。
2. 粒度分布が同じである粉体の拘束水比は粉体の空隙率に比例し、粒子の形状係数が大きくなるほど空隙率が増加するために拘束水比も大きくなる。
3. 混合粉体における見かけの形状係数は、用いる粉体の形状係数を容積換算することにより算定できる。
4. 拘束水比に及ぼす粒度分布の影響は粗粒径によるものが大きく、粗粒径が多くなるほど個々の空隙が大きくなり粒子間保水量の低下を招くため拘束水比が小さくなる。

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-pp.43、1993
- 2) 三輪茂雄：粉粒体工学、朝倉書店、pp.68-pp.69、1972
- 3) 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-pp.103、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

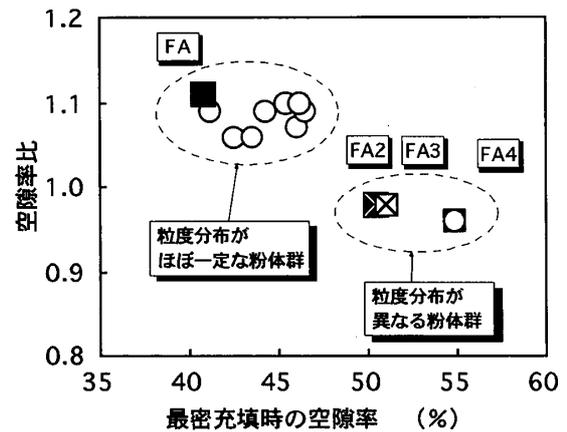


図11 最密充填時の空隙率と空隙率比との関係