

# 論文 骨材粒形がフレッシュモルタルおよびコンクリートの性質に及ぼす影響

渡会 正典<sup>\*1</sup>・寺西 浩司<sup>\*2</sup>・野中 寛之<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、まず、細骨材の粒形がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響を把握するための実験を行った。そして、次に、細骨材と粗骨材の粒形の組合せがフレッシュコンクリートの流動性、レオロジー性質および分離抵抗性に及ぼす影響を把握するための実験を行った。その結果、1) 細粗混合骨材の粒形が丸みを帯びるほど、コンクリートの流動性は高くなり、分離抵抗性は低くなる、2) 細粗混合骨材の粒度分布が一定の条件下では、骨材粒形がコンクリートの流動性に及ぼす影響は、余剰ペースト膜厚理論に基づく骨材分散距離により、骨材量などの影響と合わせて評価できる、などの知見を得た。

**キーワード**：調合設計, 実積率, 球形度, 円形度, 流動性, 骨材分散距離

## 1. はじめに

フレッシュコンクリートのワーカビリティに対して骨材の粒形が大きな影響を及ぼすことは周知の事実であるが、現時点で、その影響が十分に定量的に把握されているとはいえない。また、過去には、余剰ペースト膜厚理論<sup>1)</sup>を用いて、骨材の影響の理論的な説明を試みた研究が筆者らの研究を含めて多数報告されている。そして、これらの研究では、総じて、コンクリートの流動性に対する骨材量や骨材の粒度分布の影響は、この理論に基づく骨材分散距離（コンクリート中における骨材間の平均的な距離）や余剰ペースト膜厚（骨材分散距離の1/2の値）により包括的に表されると報告されている<sup>2)</sup>。しかし、一方で、いくつかの研究<sup>3), 4)</sup>の中では、骨材の粒形が変化した場合に、その影響を骨材分散距離などの指標で単純には評価できないことも示されている。

このような背景を踏まえ、本研究では、コンクリートのフレッシュ性状に対する骨材粒形の影響を明らかにすることを目的とした検討を行った。具体的には、まず、粒子形状を表示するための一般的な指標を用いて骨材粒形を評価し、また、骨材の転がり易さを測定するための新たな試験方法について検討した。次に、それらの評価値や測定値とモルタルやコンクリートのフレッシュ性状の関係について調べた。そして、得られた実験結果に対する余剰ペースト膜厚理論の適用性について検討した。

なお、検討にあたっては、まず、コンクリートの構成要素であるモルタルレベルでの骨材粒形の影響を明らかにするために、細骨材の粒形がモルタルの流動性に及ぼす影響を調べるための実験（実験1）を行った。そして、次に、その結果を踏まえ、細骨材と粗骨材の粒形の組合

せがコンクリートの流動性、レオロジー性質および分離抵抗性に及ぼす影響を調べるための実験（実験2）を行った。本報では、これらの結果を取りまとめて示す。

## 2. 細骨材の粒形に関する実験（実験1）

実験1では、まず、細骨材のみに着目し、その粒形や転がり易さなどの評価指標について検討した。そして、それらの指標とモルタルの流動性の関係を調べた。

表-1 試料とした細骨材

記号	銘柄	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
RS	長良川産川砂	2.62	1.40
IS	員弁産陸砂	2.58	2.00
MS	多度産山砂	2.54	2.58
BS	高炉スラグ細骨材	2.70	0.75
SS	豊田産珪砂	2.59	0.27
HS	春日井産硬質砂岩砕砂	2.68	0.92
LS	伊吹産石灰岩砕砂	2.69	0.61
PS	菅島産かんらん岩砕砂	2.91	1.70

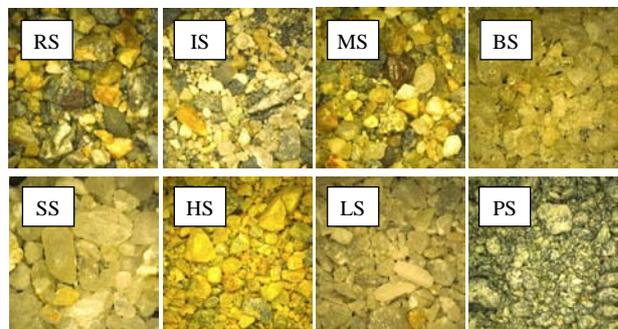


写真-1 細骨材の外観

\*1 名城大学大学院 理工学研究科建築学専攻（学生会員）  
 \*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）  
 \*3 名城大学大学院 理工学研究科建築学専攻（非会員）

## 2.1 実験概要

### (1) 試料とした細骨材

試料とした細骨材を表-1 に示す。また、それらの外観を写真-1 に示す。本実験では、細骨材の粒度分布の影響を排除し、粒形のみの影響を調べるために、細骨材を図-1 に示すような同一の粒度分布に調整した。

### (2) 試験項目

#### (a) 骨材試験

1) 実積率試験：JIS A 1104 に準拠して実施した。

2) 粒形の評価：まず、試料とした細骨材を JIS ふるいで 2.5~1.2, 1.2~0.6, 0.6~0.3 および 0.3~0.15mm の粒群に分級し、その粒群ごとに 10 個ずつの骨材を無作為に抽出した。ここで、サンプル数に関しては、40 個 (10 個×4 粒群) 程度あれば、経験的に、細骨材間の差異を把握できると考えて、このような個数とした。次に、デジタルマイクロスコープを用いて、無作為に置いた個々の骨材粒子の上半面を、写真-2 に示すように 3D 撮影し、その表面積および体積を測定した。また、平面的な撮影画像を基に、投影周長および投影面積を測定した。そして、これらの測定値から次式により Wadell の球形度  $\phi$  および円形度  $\phi_c$  を求め、さらに、これらの値の粒群ごとの平均値の分布、細骨材ごとの平均値を順次計算した。

$$\phi = \frac{\text{粒子と体積の等しい球の表面積}}{\text{粒子の表面積}} \quad (1)$$

$$\phi_c = \frac{\text{粒子の投影面積と面積の等しい円の周長}}{\text{粒子の投影周長}} \quad (2)$$

3) 粒子の転がり易さの評価試験：絶乾状態とした細骨材に対して JIS A 1109 によるフロー試験を適用し、フロー後の試料の直径 (以下、細骨材フロー値という) を測定した。また、筆者らが独自に考案したボックスフロー試験を実施した。この試験の装置は図-2 に示すような形状とし、その底面には、細骨材の滑り防止を目的として #400 のサンドペーパーを貼り付けた。試験にあたっては、この装置の仕切り板の内側に絶乾状態とした細骨材を上端まで充填した後に (3 層に分けて充填し、各層を突棒で 20 回ずつ突いた)、仕切り板を引き上げて細骨材をフローさせ、その安息角を測定した。なお、以上の 2 つの試験は一つの試料に対してそれぞれ 2 回ずつ行い、その平均値を試験値とした。

#### (b) モルタル試験

試料とした細骨材を用いて調合一定のモルタルを練り混ぜ、JIS R 5201 に準拠してフロー試験を行った。表-2 にモルタルの調合を示す。モルタルには、普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm<sup>3</sup>) および高性能 AE 減水剤

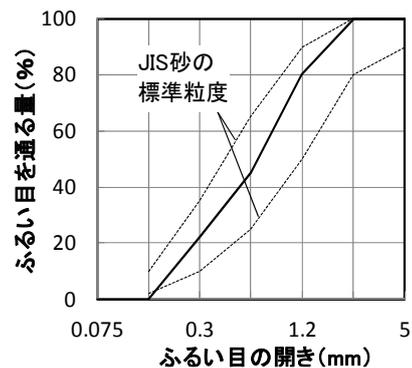
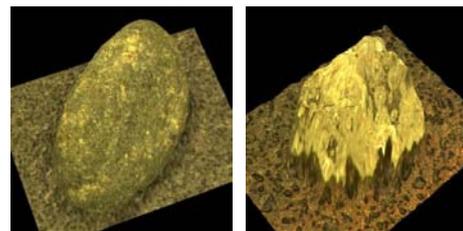


図-1 細骨材の粒度分布



(a) 丸みを帯びた骨材 (b) 角張った骨材

写真-2 細骨材の 3D 写真

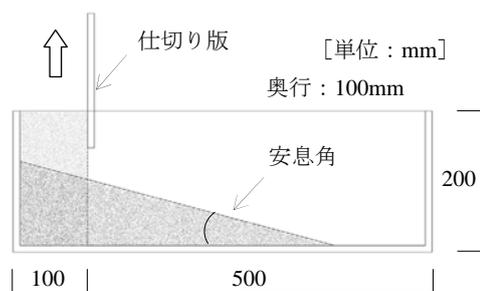


図-2 ボックスフロー試験の概要

表-2 調合

水セメント比 (%)	砂セメント比	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )			高性能 AE 減水剤 (g/m <sup>3</sup> )
		水	セメント	細骨材	
40	2.8	249	198	553	3745

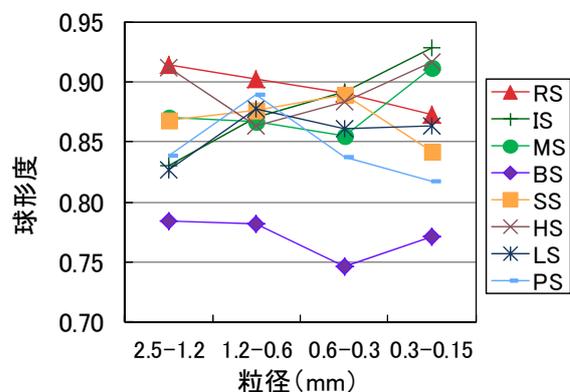


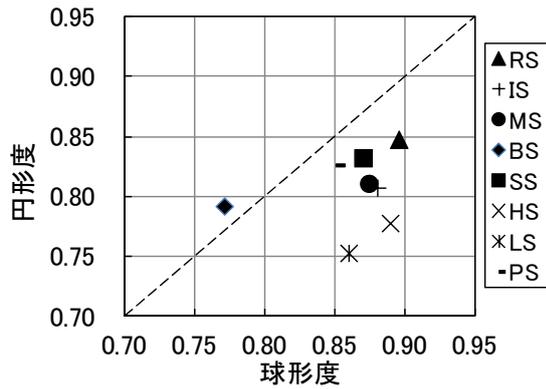
図-3 球形度と粒径の関係

(ポリカルボン酸系) を使用した。

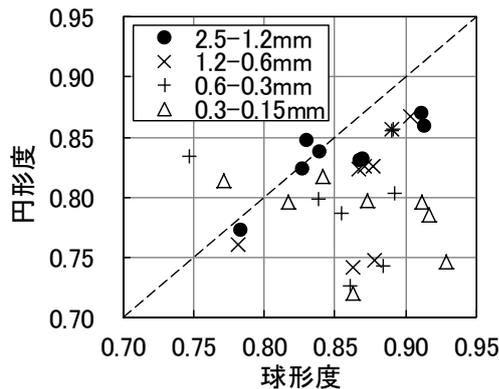
## 2.2 実験結果とその考察

### (1) 粒形の評価指標およびそれら同士の関係

図-3 に、細骨材の球形度と粒径の関係を示す。本実験



(a) 細骨材ごとの平均値



(b) 粒径ごとの平均値

図-4 円形度と球形度の関係

の試料の中では、BSの球形度が際立って低く、角張った形状であった。また、球形度と粒径の関係に明確な傾向は見られなかった。

図-4に、細骨材の円形度と球形度の関係を示す。図(a)からわかるように、両者の細骨材ごとの平均値の相関は必ずしも高くない。ただし、図(b)に示した粒径ごとの平均値に着目すると、円形度と球形度の値は、粒径が大きい場合にはある程度一致し、粒径が小さい場合には一致していない。なお、このような傾向となった理由は、本実験の範囲では定かにならなかった。

### (2) 粒形と転がり易さの評価指標の関係

図-5に、ボックスフロー試験で得られた安息角と球形度の関係を示す。同図によると、BSを除けば、両者の間に相関が見られる。また、球形度が1に近く、細骨材の粒径が球に近いほど、安息角が小さくなっている。すなわち、細骨材が大きくフローしている。

図-6に、細骨材フロー値と安息角の関係を示す。同図によると、安息角が小さいほど細骨材フロー値が大きくなっており、このことから、いずれの試験によっても細骨材の転がり易さのある程度評価できることがわかる。

### (3) 実積率と粒形の関係

図-7に、細骨材の実積率と球形度の関係を示す。本実験では、BSを除く細骨材の実積率と球形度は比較的狭い領域に分布しており、その範囲内では、両者の間に明

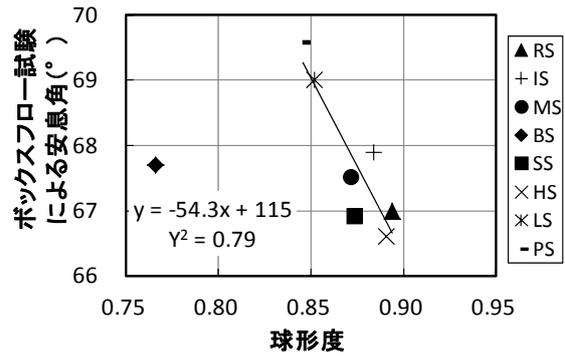


図-5 安息角と球形度の関係

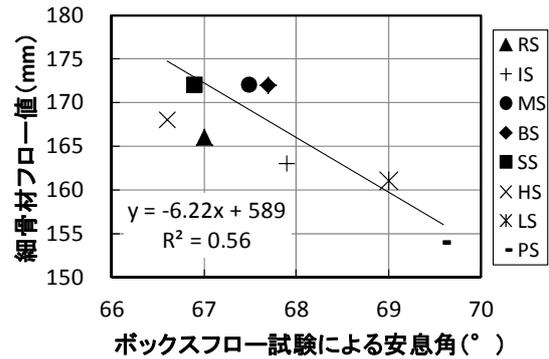


図-6 細骨材フロー値と安息角の関係

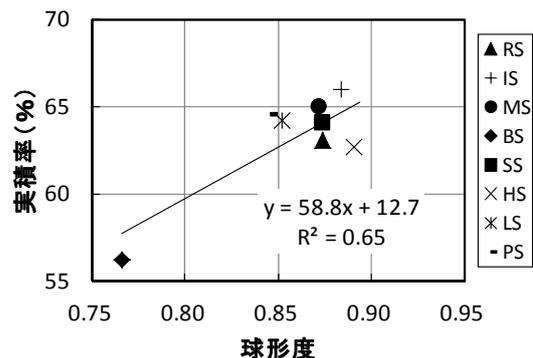


図-7 実積率と球形度の関係

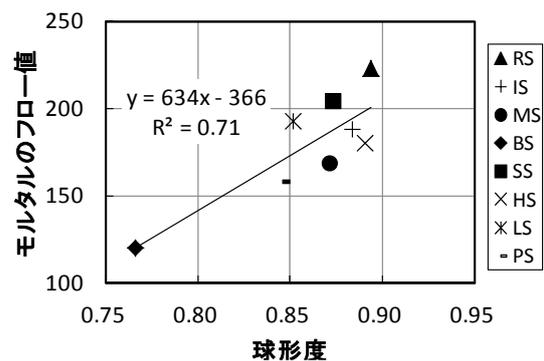


図-8 モルタルのフロー値と球形度の関係

確な相関は見られなかった。ただし、BSも含めて眺めると、球形度が高く丸みを帯びた細骨材ほど、実積率が大きいという傾向になっている。

### (4) モルタルの流動性と骨材の粒形の関係

図-8に、モルタルのフロー値と細骨材の球形度の関係を示す。同図によると、細骨材の球形度が高いほど、

全体として、モルタルのフロー値が大きく、流動性が高くなっている。

### 3. 細粗混合骨材の粒形に関する実験（実験2）

実験2では、骨材の粒形がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響の定量的把握を目的とし、検討対象を拡大して、細・粗骨材が混合した状態の骨材（以下、細粗混合骨材という）の粒形を評価した。そして、その結果とフレッシュコンクリートの流動性やレオロジー性質、分離抵抗性との関係を調べた。

#### 3.1 実験概要

##### (1) 実験要因とその水準

表-3 に実験要因とその水準を示す。本実験では、粒形の異なる細骨材および粗骨材をそれぞれ3種類ずつ用意した。また、このほかに、コンクリート中の骨材量を変化させるために単位水量を要因とし、これらを組み合わせた計18ケースに対して実験を行った。

##### (2) 試料とした骨材

細骨材には、実験1で球形度が最大・最小であったRSおよびBSと、中間的であったSSを使用した。また、試料とした粗骨材とその外観を表-4 および写真-3 に示す。本実験では、細・粗骨材をそれぞれ図-9 に示すような同一の粒度分布に調整して使用した。

##### (3) 試験項目

##### (a) 骨材試験

1) 実積率試験：JIS A 1104 に準拠して、試料とした細・粗骨材の実積率試験を行った。また、これらの細・粗骨材を、後述のコンクリート試料における細骨材率（＝40%）の割合で混合した細粗混合骨材に対しても実積率試験を行った。その際、容器の容量は10lとした。

2) 粒形の評価：実験1と同様の方法により粗骨材の円形度を測定した。また、その結果と細骨材に対する円形度の測定結果を基に、細粗混合骨材（細骨材率40%の場合）の円形度を、体積比の重み付き平均値として計算した。なお、デジタルマイクロスコープでは、粗骨材のような大きな物体に対する3D撮影を行うことができなかったため、粗骨材に対する球形度の測定は行わなかった。

##### (b) コンクリート試験

表-5 に示す調合のコンクリートを練り混ぜて、スランプ試験を行った。また、回転翼型粘度計<sup>5)</sup>を用いて見掛けの降伏値および塑性粘度を測定し、円筒貫入試験<sup>6)</sup>により分離抵抗性を評価した。なお、コンクリートには、普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm<sup>3</sup>）および高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）を使用した。

### 3.2 実験結果とその考察

##### (1) 実積率に対する骨材粒形の影響

図-10 に、細粗混合骨材の円形度を示す。また、図-

表-3 実験要因とその水準

要因	水準
細骨材	長良川産川砂 (RS), 豊田産珪砂 (SS), 高炉スラグ細骨材 (BS)
粗骨材	木曾川産川砂利 (RG), 春日井産砕石 (CG), 高炉スラグ粗骨材 (BG)
単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	180, 190

表-4 試料とした粗骨材

記号	銘柄	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
RG	木曾川産川砂利	2.68	0.71
CG	春日井産砕石	2.48	0.52
BG	高炉スラグ粗骨材	2.47	2.52



写真-3 粗骨材の外観

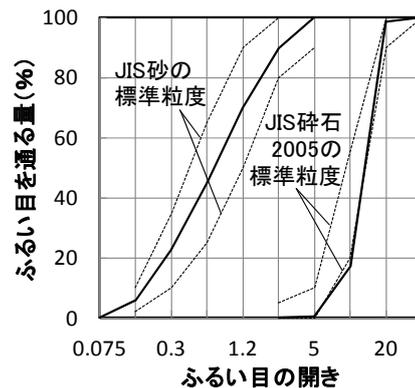


図-9 細・粗骨材の粒度分布

表-5 コンクリートの調合

単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	水セメント比 (%)	空気量 (%)	骨材体積比 (%)	細骨材率 (%)	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )			高性能 AE 減水剤 (C×%)
					セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
180	40	4.5 ± 1.5	63.3	40	142	253	380	0.4
190					150	246	369	

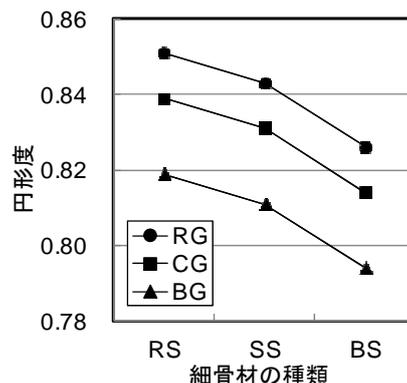


図-10 細粗混合骨材の円形度

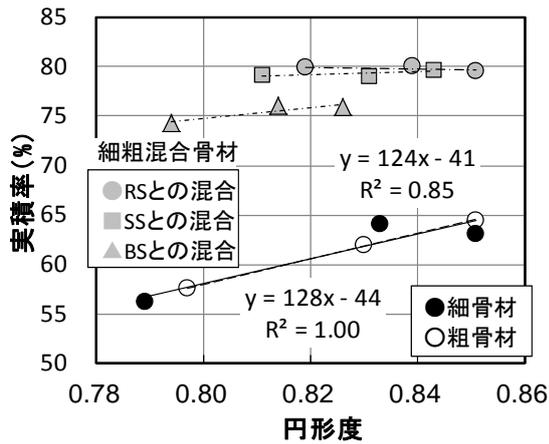


図-11 実積率と円形度の関係

11に、単体の細・粗骨材および細粗混合骨材に対する実積率と円形度の関係を示す。本実験のように、円形度がある程度広範に分布している場合には、図-11からわかるように、細骨材、粗骨材ともに、実積率と円形度の間に明確な相関が見られ、丸みを帯びた骨材ほど実積率が高くなっている。一方、細粗混合骨材の実積率は、本実験の細・粗骨材の混合比率が一定の条件下では、円形度にかかわらず、混合した細骨材の種類ごとに近い値となっている。これは、最密充填状態において、粗骨材間の間隙は細骨材で満たされるため実積率への寄与が小さいと考えられることから、細骨材間の間隙が実積率に支配的な影響を与えるためであろうと推察される。

(2) フレッシュコンクリートの性質に対する骨材粒形の影響

図-12に、スランプと細粗混合骨材の円形度の関係を示す。同図によると、両者の間には、単位水量ごとに相関が見られ、骨材の円形度が高いほどスランプが大きくなっている。すなわち、丸みを帯びた粒形の骨材を用いるほどコンクリートの流動性が高くなっている。また、コンクリートの流動性に関わるレオロジー性質である、見掛けの降伏値を見ても、図-13からわかるように、これと同様なことがいえる。

図-14に、見掛けの塑性粘度と細粗混合骨材の円形度の関係を示す。コンクリートの粘性に対しては、骨材の粒度分布は大きな影響を及ぼさないが<sup>2)</sup>、同図から、骨材の粒形の影響も小さいことがわかる。また、図-15に、流入モルタル値(円筒貫入試験の結果)と細粗混合骨材の円形度の関係を示す。同図から、骨材の円形度が高くなり、粒形が丸みを帯びるほど、流入モルタル値が大きくなり、分離抵抗性が低下することがわかる。

(3) 骨材分散距離による考察

Kennedy<sup>1)</sup>による余剰ペースト膜厚理論では、コンクリートを骨材とマトリックスセメントペーストから成る2相材料とみなす。そして、図-16に示すように、最密充

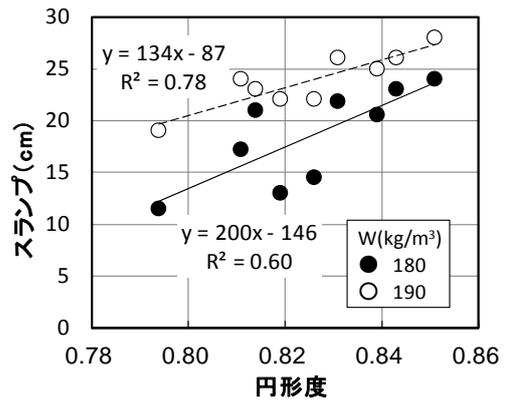


図-12 スランプと円形度の関係

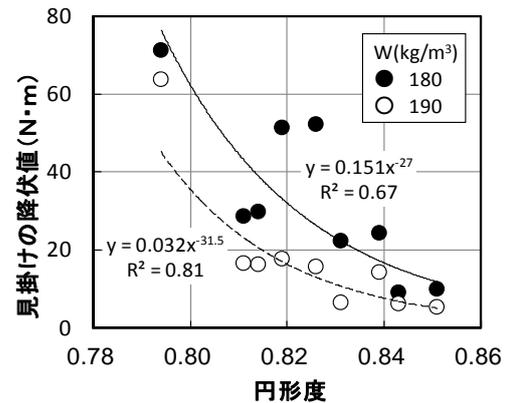


図-13 見掛けの降伏値と円形度の関係

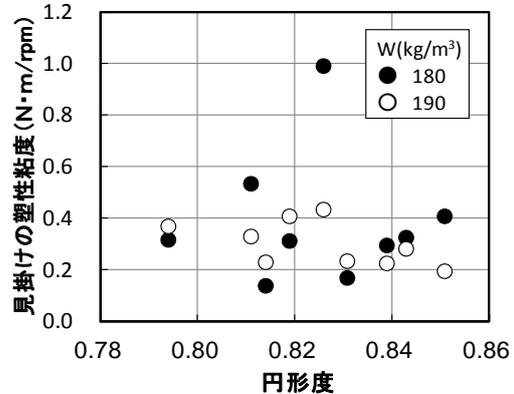


図-14 見掛けの塑性粘度と円形度の関係

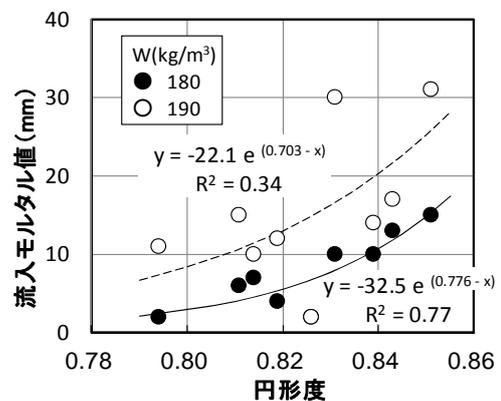


図-15 流入モルタル値と円形度の関係

填状態の骨材間隙が満たされたうえで、さらに余剰のペーストが存在することによりコンクリートが流動すると考える。また、この理論では、余剰ペーストが骨材を一樣な厚みで覆っている状態を想定し、そのときのペースト膜の厚さの2倍、すなわち骨材間の距離（骨材分散距離）がコンクリートの流動性を決定すると考える<sup>7)</sup>。

図-17に、見掛けの降伏値と細粗混合骨材の骨材分散距離の関係を示す。ここで、骨材分散距離は式(3)<sup>7)</sup>により計算し、同式中の骨材平均寸法は式(4)<sup>8)</sup>により求めた。

$$D_{ep} = \left( \sqrt[3]{\frac{C_a}{V_a}} - 1 \right) D_a \quad (3)$$

$$D_a = \frac{1}{\sum_{n=1} (\ln D_{n+1} - \ln D_n) V_n} \quad (4)$$

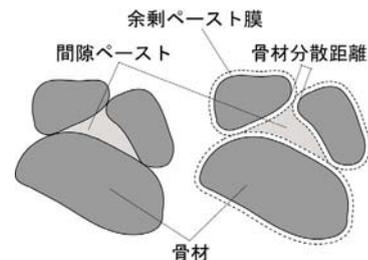
ここに、 $D_{ep}$ ：骨材分散距離（ $\times 10^3 \mu\text{m}$ ）、 $C_a$ ：骨材の実積率（%）、 $V_a$ ：骨材体積比（%）、 $D_a$ ：骨材平均寸法（mm）、 $n$ ：呼び寸法が小さい方から数えたふるいの順番、 $D_n$ ： $n$ 番目のふるいの呼び寸法（mm）、 $V_n$ ： $n$ 番目のふるいに留まる骨材の体積割合。

図-17によると、両者の関係は概ね一つの曲線で表されている。すなわち、骨材の粒形や単位水量（すなわち、骨材量）がコンクリートの流動性に及ぼす影響は、本実験の条件下では、骨材分散距離によって包括的に表されるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、骨材粒形の評価・測定方法について検討したうえで、細骨材の粒形がモルタルの流動性に及ぼす影響を調べた。また、その結果を踏まえ、細骨材および粗骨材の粒形がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を検討した。本研究によって得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 広い範囲で見ると、細骨材の粒形が丸みを帯びているほど、実積率は高くなり、それを用いたモルタルの流動性は高くなる。また、細骨材の粒形は、粒子の転がり易さの測定によってもある程度評価できる可能性がある。
- (2) 細粗混合骨材の粒形が丸みを帯びるほど、コンクリートの流動性は高くなり、分離抵抗性は低くなる。
- (3) 細粗混合骨材の粒度分布が一定の条件下では、粒形がコンクリートの流動性に及ぼす影響は、骨材分散距離により、骨材量などの影響と合わせて包括的に評価できる。



(a) 最密充填状態 (b) 分散状態  
図-16 骨材分散距離

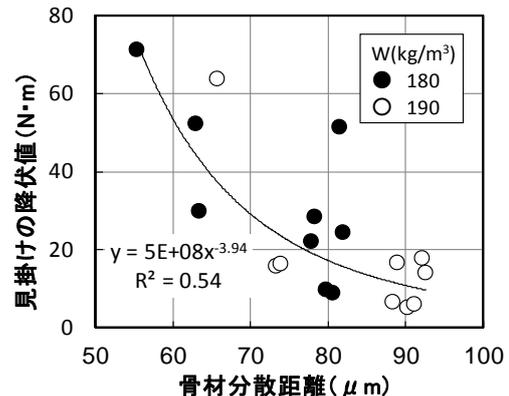


図-17 見掛けの降伏値と骨材分散距離の関係

#### 参考文献

- 1) C.T.Kennedy : The Design of Concrete Mixes , Proceedings of the American Concrete Institute, Vol.36, pp.373-400, 1940.
- 2) 寺西浩司, 谷川恭雄 : 骨材の粒度分布の変動がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.664, pp.1043-1050, 2011.6
- 3) 近田孝夫, 前田悦高, 松下博通 : 細骨材の物性がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.387-392, 1992.5
- 4) 橋爪進, 谷川恭雄, 森博嗣 : 細骨材の寸法・形状および混入率がフレッシュモルタルの降伏値に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.23-29, 2002.8
- 5) G.H.Tattersall and P.F.G.Banfill : The Rheology of Fresh Concrete , Pitman Advanced Publishing Program , pp.97-100, 1983.
- 6) 日本建築学会 : 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針 (案)・同解説, p.140, 1997.1
- 7) T.C.Powers : The Properties of Fresh Concrete, John Wiley&Sons Inc., 1968.
- 8) 徳光善治 : 粉体のつめこみについて, 粉体工学, pp.29-34, 1965.