

# 論文 骨材粒度が実積率およびフレッシュ性状に及ぼす影響

竹内 輝典\*<sup>1</sup>・寺西 浩司\*<sup>2</sup>

**要旨：**筆者らは、骨材の実積率およびコンクリート、モルタルのフレッシュ性状に対する骨材粒度の影響を検討した。本研究では、まず、骨材充填のコンピューターシミュレーションおよび実際の実積率試験により、各種粒度の骨材の実積率を調べ、骨材の粒径、粒度の幅、あるいは2種類の骨材を混合した場合の混合比率と実積率の関係を明らかにした。次に、各種粒度の骨材を用いたコンクリートおよびモルタルの流動性および分離抵抗性について検討し、実積率および体積比表面積との関係を明らかにした。

**キーワード：**骨材, 実積率, 粒度分布, シミュレーション, フレッシュコンクリート

## 1. まえがき

コンクリート中の骨材量は、フレッシュコンクリートの流動性や分離抵抗性に大きな影響を及ぼす。そして、骨材量と密接に関連する骨材の材料性質としては実積率が挙げられる。また、フレッシュ性状とより直接的に関連する要因は、細骨材、粗骨材個々の実積率ではなく、それらを混合した場合の実積率であると考えられる。しかし、現状のコンクリートの調合設計法では、粗骨材のみの実積率とかさ容積から骨材量を算出する手法が採られており、骨材全体としての実積率は、直接的には考慮されていない。調合設計をより合理的に行うためには、骨材全体としての粒度分布や寸法などと実積率の関係を明らかにすることが重要と考えられる。

以上のような背景から、本研究では、まず、単純化された理想的な条件下で実積率を調べることを目的として、骨材充填のコンピューターシミュレーションを行った。次に、その妥当性を検証するために各種粒度の骨材に対して、実

際の実積率試験を行い、さらに、その骨材を用いたコンクリートおよびモルタルのフレッシュ性状を評価した。本報では、これらの結果を取りまとめて報告する。

## 2. シミュレーションによる実積率の検討

### 2.1 解析方法

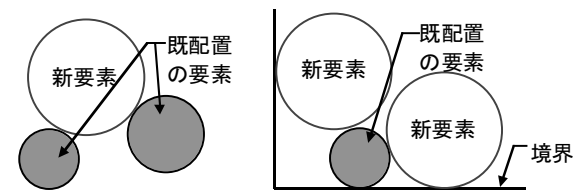
本研究では、骨材を円形と仮定して2次元解析を行った<sup>1)</sup>。

#### (1) 骨材要素の配置パターン

本解析では、骨材要素を容器内に最密充填するために、原則として、図-1(a)または(b)のいずれかのパターンによって新しい骨材要素を配置する。図(a)は、既に配置されている2つの骨材要素の上に新要素を載せるパターンである。また、図(b)は、既配置の骨材要素と境界(容器の底面または内壁面)を足掛かりとして新要素を配置するパターンである。

#### (2) 骨材要素の配置手順

本解析では、まず、予め設定した粒度分布に応じた確率で新要素の直径を無作為に決定する。次に、前項(1)のパターンに従って、新要素を配置する。このとき、新要素は、a)他の要素と重ならない、b)容器からはみ出さない、c)安定した位置にある(転がり落ちない)の3つの条件を満たす範囲で、最も低い位置に配置する。以



(a) 2つの骨材の上に配置  
(b) 骨材と境界に対して配置  
図-1 新要素の配置パターン

\*1 名城大学大学院 理工学研究科 建築学専攻 (正会員)

\*2 名城大学 工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

上の要領で容器が満たされるまで新要素を順次配置していく。

## 2.2 解析条件

解析は、実積率に対する影響要因として、骨材粒径（解析1）、骨材粒度の幅（解析2）、細目と粗目の2種類の骨材を混合した場合の混合比率（解析3）の3つを取り上げて行った。また、容器形状は、高さ100mm×幅100mmとした。解析では、容器面積に対する骨材要素の総面積の比率を実積率と見なし、実際の実積率試験を想定して、容器全体を対象とした場合の実積率（以下、全体実積率という）を計算し、この他に、容器の中央部分（図-2の網掛け部分）のみを対象とした場合の実積率（以下、中央部実積率という）を計算した。

### (1) 骨材粒径の検討（解析1）

骨材粒径の影響を調べるために、粒径が1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10mmの骨材に対して解析を行った（以下、これらを単粒度という）。

### (2) 骨材粒度の幅の検討（解析2）

骨材粒度の幅の影響を調べるために、3mmおよび10mmの骨材に対してそれぞれ、±0, ±5, ±10, ±15, ±20, ±25, ±30, ±40, ±50%の粒度の幅を持たせて解析を行った。

### (3) 混合した粒度の検討（解析3）

単粒度の細目骨材と粗目骨材を、表-1に示

表-1 解析要因とその水準（解析3）

要因	水準
細目の骨材の粒度 (mm)	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9
粗目の骨材の粒度 (mm)	10 (一定)
細粒子率 (%)	0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100

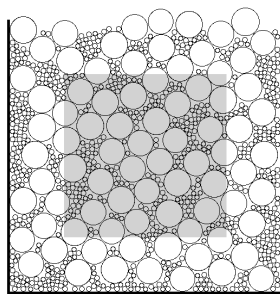


図-2 解析結果の一例

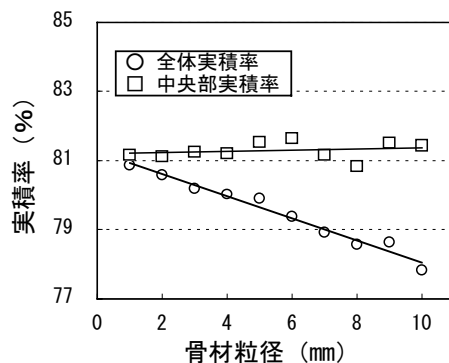


図-3 実積率と骨材粒径の関係

すように混合した場合について解析を行った（以下、2種類の粒度を混合したものを混合粒度という）。ここでは、粗目骨材の粒径は10mm一定とし、細目骨材の粒径を変化させた。また、骨材全体に占める細目骨材の面積比率（以下、細粒子率という）を解析要因とした。

## 2.3 解析結果とその考察

図-2に、解析結果の一例を示す。

### (1) 骨材粒径の影響（解析1）

図-3に、解析1における実積率と骨材粒径の関係を示す。同図によると、全体実積率の場合は、骨材粒径が大きいほど値が小さくなっている。これは、容器に対して骨材粒径が相対的に大きいほど容器内面近傍で骨材が充填されにくいこと（すなわち、壁効果）の影響が顕著に現れたことを示している。一方、中央部実積率の場合は、骨材粒径に関わらずに値はほぼ一定である。すなわち、壁効果を含まない真の実積率が得られている。なお、このような検討が可能な点がシミュレーションの長所であり、以降は、中央部実積率によって実積率を評価する。

### (2) 骨材粒度の幅の影響（解析2）

図-4は、解析2における中央部実積率と骨材粒度の幅の関係を片対数軸において示したものである。ここで、粒度の幅は、最大粒径と最小粒径の比（最大粒径/最小粒径）によって表している。同図によると、実積率は、骨材粒径に関わらず、粒度の幅が大きいほど直線的に大きくなっている。

次に、解析値のばらつきに着目すると、3mm

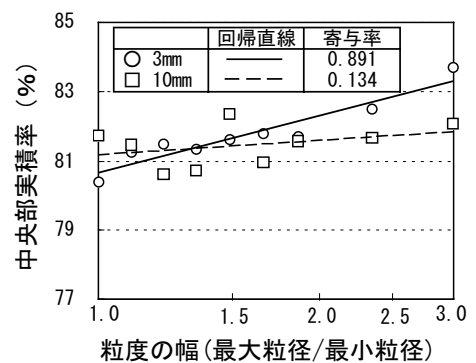


図-4 中央部実積率と粒度の幅の関係

の場合の寄与率は高いが、10mm の場合は寄与率が小さくてばらつきが大きい。これは、容器が10mm の骨材に対して十分大きくなかったため、壁効果の影響範囲が中央部実積率の対象領域まで及んだためと考えられる。

(3) 細粒子率の影響 (解析 3)

図-5 に、解析 3 で得られた中央部実積率と細粒子率の関係を示す。ここで、図中に示した仮想実積率直線とは、粒径比が無限大となるような細目骨材と粗目骨材を混合した場合の理論線であり<sup>2)</sup>、この理論線の頂点をとる細粒子率および実積率、すなわち、理論最密細粒子率および理論最密実積率は、次式により与えられる。

$$f_0 = J_s / (J_s + J_g - J_s J_g) \quad (1)$$

$$J_0 = J_s + J_g - J_s J_g \quad (2)$$

ここに、

$f_0$  : 理論細密細粒子率 (小数点表記)

$J_0$  : 理論細密実積率 (小数点表記)

$J_s, J_g$  : 細目, 粗目骨材の実積率

(小数点表記)

図-5 によると、混合骨材の実積率は上に凸な曲線となっている。また、解析値による実積率曲線は、細目骨材の粒径が小さいほど、すなわち、細目骨材と粗目骨材の粒径比が大きいほど仮想実積率直線に近づいており、このことは

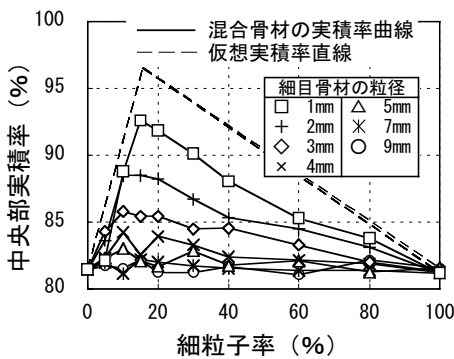


図-5 中央部実積率と細粒子率の関係

表-2 使用骨材

実験名	骨材	仕様
実験 1, 3	細骨材	長良川産川砂 (絶乾密度 2.54g/cm <sup>3</sup> )
実験 3	粗骨材	春日井産碎石 (絶乾密度 2.71g/cm <sup>3</sup> )
実験 2	細骨材	長良川産川砂 (絶乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> )
	粗骨材	春日井産碎石 (絶乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> )

文献<sup>2)</sup> に示された理論を裏づけるものである。

3. 実積率に関する実験的検討

3.1 実験概要

本実験では、実積率に対する影響要因として、骨材粒径 (実験 1)、骨材粒度の幅 (実験 2)、細目と粗目の 2 種類の骨材を混合した場合の細粒子率 (実験 3) の 3 つを取り上げて、それぞれ実積率試験 (JIS A 1104) を行った。

(1) 骨材粒径の検討 (実験 1)

骨材粒径の影響を調べるために、表-2 中に示す細骨材を JIS Z 8801 に規定されたふるいで 0.15~0.3, 0.3~0.6, 0.6~1.2, 1.2~2.5 および 2.5~5mm の各粒度にふるい分け、これらを単粒度の試料とした。

(2) 骨材粒度の幅の検討 (実験 2)

骨材の最小粒径を 0.3mm 一定とし、最大粒径を 0.6, 1.2, 2.5, 5, 10 および 20mm の 6 水準とすることで、骨材粒度の幅を変化させた。これらの試料は、表-2 に示した細骨材および粗骨材を一旦単粒度にふるい分け、各粒度の体積比率が同一となるようにそれらを混合して所定の粒度幅に調整したものである。

(3) 細粒子率の検討 (実験 3)

実験 3 では、現在の一般的な粒度分布である

表-3 骨材粒度 (実験 3)

骨材 粒度名	骨材粒度分布 (%)										
	粒径 (mm)										
	25 ~ 20	20 ~ 15	15 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 2.5	2.5 ~ 1.2	1.2 ~ 0.6	0.6 ~ 0.3	0.3 ~ 0.15	0.15 ~ 0.075	0.075 以下
粒度 1	6.5	15.8	45.8	30.5	1.3						
粒度 2					4.9	28.2	25.5	18.6	16.5	4.9	1.5
粒度 3					68.1	30.5	1.3				
粒度 4							4.9	28.2	25.5	18.6	22.9
粒度 5			100								
粒度 6						52.5	47.5				
粒度 7						100					
粒度 8									100		

表-4 要因と水準 (実験 3)

要 因	水 準			
	不連続粒度		連続粒度	
	大	小	大	小
粗目骨材の粒度	粒度5	粒度7	粒度1	粒度3
細目骨材の粒度	粒度6	粒度8	粒度2	粒度4
細粒子率 (%)	0, 35, 40, 45, 50, 100			

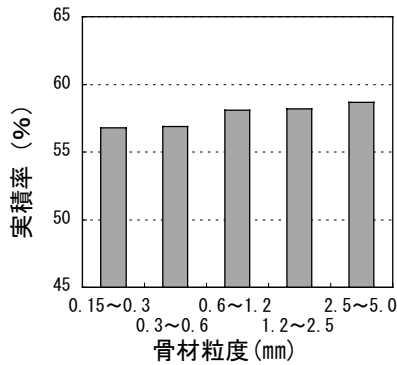


図-6 実積率と骨材粒径の関係

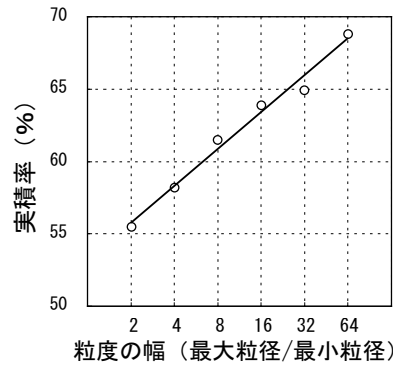


図-7 実積率と粒度の幅の関係

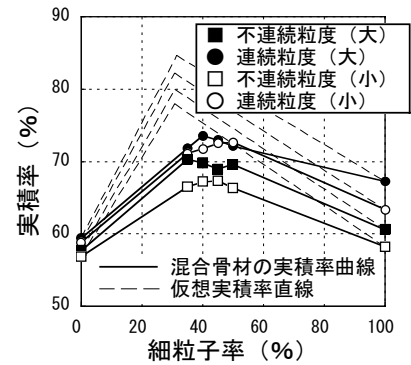


図-8 実積率と細粒子率の関係

連続粒度と、これよりも大きな実積率を得ることを目的として R.Vallette ら<sup>3)</sup>により提案された不連続粒度の2種類の粒度分布について検討した。具体的には、まず、表-2に示した細骨材および粗骨材をそのまま使用するかまたは粒度調整して、表-3に示すような粒度1~8の骨材を用意した。そして、これらの骨材を表-4に示すように組み合わせ、連続粒度、不連続粒度の試料とした。その際、細粒子率(骨材全体に占める細目骨材の体積比率)を実験要因とした。また、各シリーズの試料の最大粒径を大、小の2水準とした。ここで、「小」は、「大」の粒度分布を全体的に1/4の大きさに縮小したものである。

### 3.2 実験結果とその考察

#### (1) 骨材粒径の影響(実験1)

図-6に、実験1で得られた実積率と骨材粒径の関係を示す。同図からわかるように、実積率は、骨材粒径が大きいほどやや大きくなるものの、大きな差はない。このことから、実際の実積率試験では、粒径5mm以下の骨材を試料とした場合、壁効果は十分に小さいものと考えられる。

#### (2) 骨材粒度の幅の影響(実験2)

図-7に、実験2で得られた実積率と骨材粒度の幅(最大粒径/最小粒径)の関係を示す。同図によると、骨材粒度の幅が大きいほど実積率は大きくなっており、両者の関係は片対数軸において線形である。また、このことは解析2の結果と一致している。

#### (3) 細粒子率の影響(実験3)

図-8に、実験3で得られた実積率と細粒子率の関係を示す。同図によると、実積率の測定値は、解析3の結果と同様に、全てのケースにおいて上に凸な曲線となっている。なお、測定した実積率の最大値が理論細密実積率より小さいのは、試料とした細目骨材と粗目骨材の粒径比が小さいためである。

## 4. フレッシュ性状に関する実験的検討

### 4.1 試料

本実験では、表-4に示した骨材の組合せのコンクリートおよびモルタルを練り混ぜた。図-9に、骨材の体積比表面積の計算値を示す。ここで、体積比表面積は、骨材を球形と見なし、次式によって算定したものである。

$$b = 6 \sum V_n / D_n \quad (3)$$

ここに、

$b$  : 体積比表面積(単位体積中の表面積)  
( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )

$V_n$  : 各ふるい間の骨材群の体積割合

$D_n$  : 各ふるい間の骨材群の平均直径(cm)

骨材以外の使用材料を表-5に示す。また、コンクリートおよびモルタルの調合を表-6に示す。この調合では、フレッシュ性状に対する空気の影響を排除するために、空気量の目標値を0%とした。なお、実際は、空気量の最も大きい試料で1.6%であった。

### 4.2 試験項目

試験項目を表-7に示す。本実験では、スラ

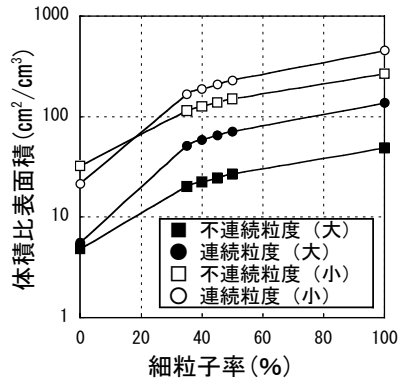


図-9 体積比表面積と細粒子率の関係

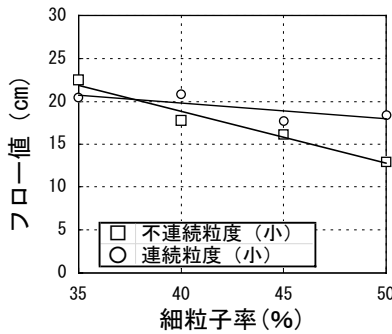


図-10 モルタルのフロー値と細粒子率の関係

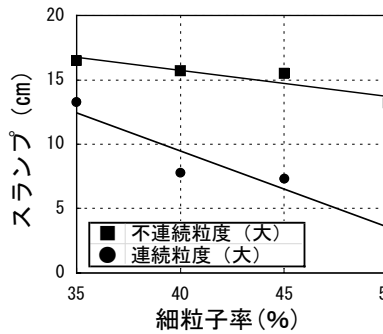


図-11 コンクリートのスランプと細粒子率の関係

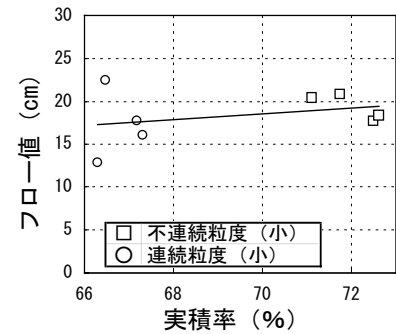


図-12 モルタルのフロー値と実積率の関係

ンプおよびフロー試験を行い、流動性を評価した。また、分離抵抗性を評価するために円筒貫入試験<sup>4)</sup>を行った。

#### 4.3 実験結果

図-10 に、モルタルのフロー値と細粒子率の関係を示す。また、図-11 に、コンクリートのスランプと細粒子率の関係を示す。両図から、モルタル、コンクリートとも細粒子率が高くなるほど流動性が低下することがわかる。ただし、モルタルの場合は、連続粒度の方が不連続粒度より流動性が高いのに対し、コンクリートの場合は逆の結果になっている。

#### 4.4 考察

##### (1) 流動性と実積率の関係

図-12 に、モルタルのフロー値と実積率の関係を示す。また、図-13 に、コンクリートのスランプと実積率の関係を示す。図-12 を全体的にとらえると、フロー値は実積率に関わらずほぼ一定である。一方、図-13 によると、スランプは、実積率の増加に伴って低下する傾向を示している。ただし、いずれの試料の場合も、各

表-5 使用材料

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm <sup>3</sup> )
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物
消泡剤	アルキルエーテル系

表-6 調合

試 料	空気量 (%)	水セメント比 (%)	絶対容積 (ℓ/m <sup>3</sup> )			高性能AE減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
			水	セメント	骨材		
コンクリート	0	40	175	138	687	0.5	0.02
モルタル	0	40	246	194	560	0.5	0.02

表-7 試験項目

試験対象	試験項目	概 要
コンクリート	スランプ	JIS A 1101
モルタル	フロー値	JIS R 5201
コンクリート・モルタル	流入モルタル値	円筒貫入計 <sup>4)</sup> で分離抵抗性を評価

骨材シリーズの範囲内では、流動性と実積率の間に明確な関係は認められない。したがって、実積率だけでは、モルタルやコンクリートの流動性を評価できないものと考えられる。

##### (2) 流動性と体積比表面積の関係

図-14 に、モルタルのフロー値と体積比表面積の関係を示す。また、図-15 に、コンクリートのスランプと体積比表面積の関係を示す。これらの図によると、各骨材シリーズの範囲内では、体積比表面積の大きい試料ほど流動性が低下する傾向にある。しかし、全体としては、流動性と体積比表面積の間に明確な関係は認められない。このことは、骨材の粒度分布の特性が異なる場合には、体積比表面積だけではコンクリートの流動性を評価できないことを意味している。

##### (3) 分離抵抗性と体積比表面積の関係

図-16 に、モルタルおよびコンクリートにおける流入モルタル値と体積比表面積の関係を示す。同図によると、骨材の粒度分布特性や粒径に関わらず、体積比表面積の大きい試料ほど、

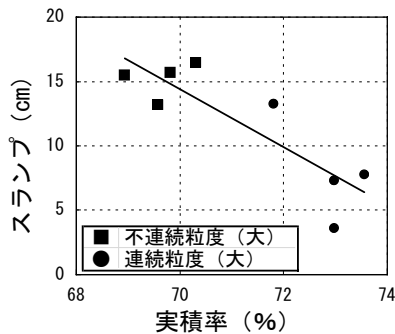


図-13 コンクリートのスランプと実積率の関係

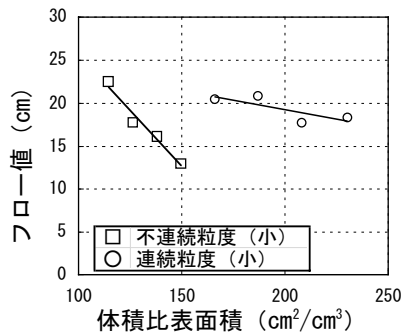


図-14 モルタルのフロー値と体積比表面積の関係

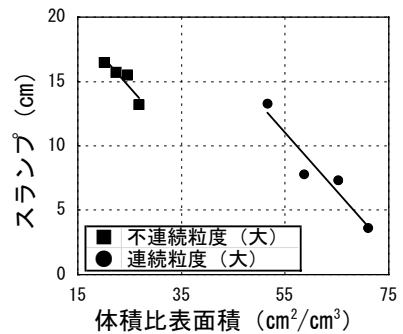


図-15 コンクリートのスランプと体積比表面積の関係

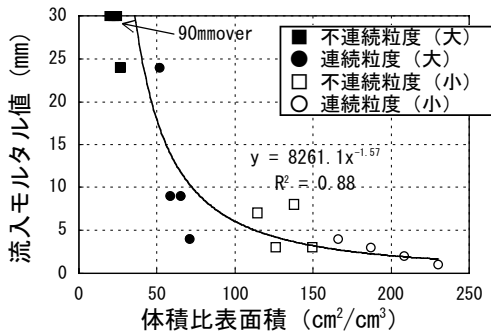


図-16 流入モルタル値と体積比表面積の関係

流入モルタル値が減少し、分離抵抗性が向上している。また、体積比表面積が 80 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> 程度以下になると分離抵抗性は急激に低下する。これは、体積比表面積が小さい試料ほどその変形に寄与するセメントペースト分が増加し、骨材とセメントペーストの一体性が失われることが原因と考えられる。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 容器の壁効果が小さい場合、単粒度骨材の実積率は粒径に関わらずほぼ一定となる。
- (2) 実積率は、骨材粒度の幅が大きいほど大きくなる。また、実積率と骨材粒度の幅の対数は直線関係になる。
- (3) 2種類の骨材を混合した場合、その実積率は、ある混合比率で最大となるような、上に凸な曲線となる。
- (4) 骨材全体に対する実積率だけでは、コンクリートやモルタルの流動性を評価できない。
- (5) 連続粒度・不連続粒度それぞれの範囲内では、骨材の体積比表面積が大きくなるほど流動性が低下する。しかし、粒度分布の特性が

異なる場合にはこのことは成立しない。

- (6) コンクリートおよびモルタルの分離抵抗性は、骨材の粒度分布特性や粒径に関わらず、骨材の体積比表面積によって包括的に評価できる。

なお、本研究の範囲では、上記(4)および(5)に関して明確な結果は得られなかった。これらの点に関しては、今後、レオロジーの立場からより詳細な検討を行っていく予定である。

## 謝辞

本研究の実施に際し、名城大学学生・長尾光君、原英士君の助力を得た。また、本研究の一部は、平成 15 年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C2) によった。ここに付記して謝意を表す。

## 引用文献

- 1) 寺西浩司, 竹内輝典: フレッシュコンクリートの流動性に及ぼす骨材粒度の影響に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演便概集, A-1, pp. 489-492, 2003.9
- 2) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和巳: コンクリートの化学と技術, 山海堂, pp. 78-83, 1996.3
- 3) 白山和久: コンクリート調合設計の発展, コンクリート工学, Vol.35, No.4, pp. 18-24, 1997.4
- 4) 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, pp. 136-140, 1997.1