

# 論文 フレッシュコンクリートの振動下における粗骨材沈下挙動に関する研究

寺西 浩司<sup>\*1</sup>・谷川 恭雄<sup>\*2</sup>・森 博嗣<sup>\*3</sup>・寺田 謙一<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究では、振動下における粗骨材の沈下挙動を力学的に説明することを目的としてレオロジーに基づいた考察を行い、単純化された理想条件下における理論式を誘導した。また、振動下における分離評価試験を実施し、マトリックスモルタルのレオロジー性質および粗骨材体積濃度が粗骨材の沈下挙動に及ぼす影響を調べた。

**キーワード：**フレッシュコンクリート、振動打設、材料分離、粗骨材、レオロジー

## 1. まえがき

フレッシュコンクリートは、材料分離が硬化コンクリートの品質に悪影響を及ぼさない範囲で振動締固めを行う必要があるが、加振による粗骨材の沈降現象は、目視によって観察することができない。振動下の分離に対しては、コンクリートの材料性質に対応した規定が必要であるが、現状では、JASS 5などの仕様書にも曖昧な記述しかなされていない。これは、振動と分離現象を定量的に関連づけた研究が少なく、また、無振動下における分離現象の発生・進行過程でさえ、理論的に解明されていないことが原因である。合理的な振動締固め方法を確立するためには、理論的な基盤の整備が急務である。

本研究では、振動下のフレッシュコンクリートの分離挙動のうち、粗骨材の沈下挙動について、単純化された理想条件下における理論的な考察を行った。また、調合条件を変化させた低水結合材比のコンクリートを試料として、振動下の分離評価試験を実施し、理論結果と比較・検討した。

## 2. 理論的考察

### 2.1 静置時の粗骨材沈下挙動

まず、静置時の粗骨材沈下挙動について力学的な考察を行うために、マトリックスモルタル中を1個の粗骨材が沈下する状況を考える。ここでは、粗骨材の形状を球形に近似し、また、粗骨材とマトリックスモルタルの界面において、すべりが生じないものと仮定する。

モルタルの挙動がビンガムモデルに従うと仮定した場合、粗骨材に作用する外力Fとせん断応力τ、また、粗骨材の移動速度vとひずみ速度̇γの関係には、粗骨材（球体）の半径をrとして、以下に示すAnsleyの式[1]が適用できる。

$$\tau = \frac{F}{12\pi r^2}, \quad \dot{\gamma} = \frac{v}{2r} \quad (1)$$

また、ビンガムモデルの構成則は、以下の式によって表現される。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y \quad \text{ただし、} \tau < \tau_y \text{ のとき } \dot{\gamma} = 0 \quad (2)$$

式(1)および式(2)から、外力Fと移動速度vの関係は、以下のようになる。

\*1 前田建設工業(株) 技術研究所建築材料施工研究室（名古屋大学大学院）、工修（正会員）

\*2 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

\*3 名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

\*4 (株)錢高組 技術研究所（名古屋大学大学院）、工修（正会員）

$$F = 6\pi r \eta v + 12\pi r^2 \tau_y \quad \text{ただし、} F < 12\pi r^2 \tau_y \text{ のとき } v = 0 \quad (3)$$

モルタル中の粗骨材には、図-1に示す外力が働く。外力Fは、下向きを正として、以下の式で示される。

$$F = (\rho_s - \rho_m) V_s g = \frac{4}{3} (\rho_s - \rho_m) \pi r^3 g \quad (4)$$

ここに、 $\rho_s$ 、 $\rho_m$ ：粗骨材およびモルタルの密度、

$V_s$ ：粗骨材の体積( $= 4/3\pi r^3$ )

式(3)および式(4)より、粗骨材の沈下速度vは式(5)に示すようになる。また、式(6)を満たすときには、粗骨材の沈下が生じないことになる。

$$v = \frac{2r}{9\eta} \{ r g (\rho_s - \rho_m) - 9\tau_y \} \quad (5)$$

$$\rho_s - \rho_m < \frac{9\tau_y}{r g} \quad (6)$$

式(6)から明らかなように、粗骨材半径が大きいほど、また、モルタルの降伏値が小さいほど、密度差が小さくても分離が生じるようになる。また、式(5)から明らかなように、粗骨材の沈下速度は、粗骨材半径が大きくなると、相乗的に大きくなり、モルタルの塑性粘度の増加に反比例して小さくなる。

例えば、粗骨材とモルタルの密度差 $0.5\text{g/cm}^3$ 、粗骨材半径 $1.25\text{cm}$ を式(6)に代入すると、沈下限界の降伏値 $\tau_y$ は $6.8\text{Pa}$ となり、この値は、高流動コンクリートの分離限界として報告されている降伏値( $7\text{Pa}$ ) [2]と一致している。

## 2.2 振動下の粗骨材沈下挙動

強制変位による振動を受けるビンガムモデルの構成則は、振動のひずみ速度振幅を $\dot{\gamma}_{vib}$ として、以下のように表される[3]。

$$\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_{vib} \text{ の場合 } \tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y \quad (7a)$$

$$\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{vib} \text{ の場合 } \tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{vib}} \right) \right\} \quad (7b)$$

振動コンシスティンシー曲線の変化部分を表す式(7b)は、一般に、図-2に示すような比較的直線に近い軌跡を描く。したがって、ここでは計算を単純化するために、同図に示したバイリニアの関係に近似し、式(7b)を、原点と点 $(\eta \dot{\gamma}_{vib} + \tau_y, \dot{\gamma}_{vib})$ を通る直線に置換すると、以下の式(8)に示すようになり、加振による流動化効果を、直線の第1勾配 $\eta_{vib}$ によって、一元的に表すことができる。

$$\tau = \left( \eta + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}_{vib}} \right) \dot{\gamma} = \eta_{vib} \dot{\gamma} \quad (8)$$

ここに、 $\eta_{vib}$ ：振動塑性粘度( $= \eta + \tau_y / \dot{\gamma}_{vib}$ )

次に、式(8)に、式(1)を代入して、外力Fと移動速度vの関係を整理すると、以下のようになる。

$$F = 6\pi r \eta_{vib} v \quad (9)$$

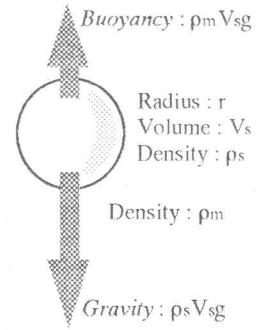


図-1 球体に働く外力

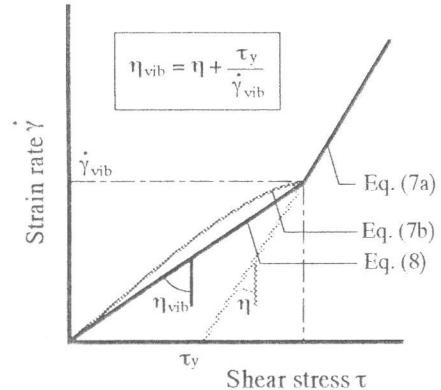


図-2 振動コンシスティンシー曲線

さらに、式(9)に式(4)を導入すると、 $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{vib}$  の振動下における粗骨材沈下速度は、以下のように求められる ( $\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_{vib}$  の沈下速度は、静置時の場合と同様であり、式(5)によって示される)。

$$v = \frac{2r^2 g}{9\eta_{vib}} (\rho_s - \rho_m) \quad (10)$$

振動下では降伏値が消失するため、式(10)から明らかのように、モルタルと粗骨材間に少しでも密度差があれば粗骨材は沈下する。また、振動力が増大すると、振動塑性粘度 $\eta_{vib}$ が減少することは明らかであり、粗骨材沈下速度 $v$ は大きくなる。粗骨材沈下速度は、振動コンシスティンシー曲線の第1勾配に支配されるものと考えられ、同一振動力下では、モルタルの降伏値および塑性粘度が小さいほど沈下速度は大きくなる。

### 3. 実験概要

以上の理論結果について検討するために、ウェットスクリーニングモルタルを試料とした球沈下試験（模擬粗骨材沈下試験）を行った。また、粗骨材どうしの相互作用を調べるために、コンクリートを試料とした2種類の分離評価試験を同時に行った。

#### 3.1 試験方法

(1) 球沈下試験：球沈下試験装置の概要を図-3に示す。振動テーブル（振動数50Hz）上にモルタルを充填した鋼製容器（ $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ）を固定し、加振された試料中を自重によって沈下する測定球（直径30mm）の平均沈下速度 $v_{st}$ を測定した。測定球としては、表面が滑らかで、比重が通常の粗骨材とほぼ等しいアルミ製の球体（比重2.67）を用いた。

(2) 分離評価試験I（硬化供試体の断面測定）： $15 \times 15 \times 54\text{cm}$ の鋼製型枠を振動テーブル上に設置し、充填したフレッシュコンクリートを30秒間加振した。硬化後のコンクリート供試体を垂直方向に4分割し、切断面に現れた粗骨材から、以下の式によって沈下度 $D_{cut}$ を求めた[4]。

$$D_{cut} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i}{A} - \frac{H - 2L_i}{H} \right) \quad (11)$$

ここに、 $n$ ：全粗骨材個数、 $A$ ：切断面に現れた粗骨材面積の総和( $\text{cm}^2$ )、

$A_i$ ：切断面に現れた粗骨材*i*の面積( $\text{cm}^2$ )、 $H$ ：容器の高さ( $=15\text{cm}$ )、

$L_i$ ：粗骨材*i*の下面からの距離( $\text{cm}$ )

(3) 分離評価試験II（2層容器試験）：本試験方法は、上記(2)よりも簡便な試験方法によって、振動下の分離特性を評価するために考案したものである。図-4に示すような、上下2層に分けられる容器中にフレッシュコンクリートを充填し、振動テーブルによって30秒間加振した。5mmふるいを用いて洗い出した粗骨材の重量を測定し、上層および下層の粗骨材重量 $A_{up}$ および $A_{low}$ より、以下の式によって分離度 $D_{str}$ を算出した。

$$D_{str} = \frac{A_{low} - A_{up}}{A_{up} + A_{low}} \quad (12)$$

#### 3.2 試料

実験に用いた試料の調合条件および使用材料を表-1およ

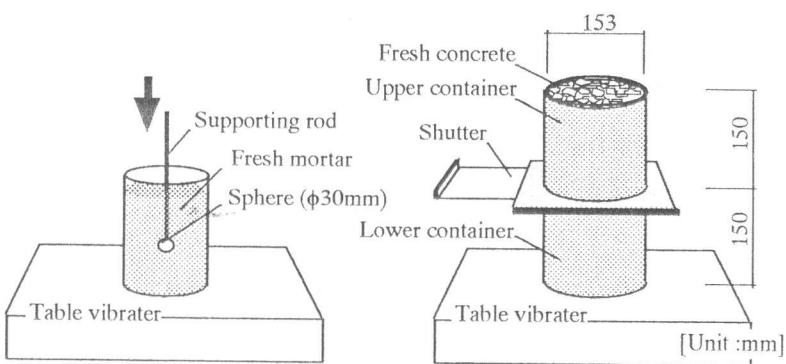


図-3 球沈下試験装置

図-4 2層容器方式の分離評価試験装置

表一 調合条件

W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)
35	0,10	32,37,42,47
30	0	30,35,40,45
	5,10,15	28,34,40,46
25	5,10,15	26,33,40,47
19	5,10,15	26,33,40,47

[Notes] W/B: Water binder ratio, SF/B: Silica fume binder ratio, s/a: Sand aggregate ratio

び表一に示す。実験要因としては、水結合材比、細骨材率およびシリカフューム置換率をそれぞれ4水準に変化させた。すべてのコンクリートは、スランプフロー値が約55cmとなるように、高性能AE減水剤の添加量で調整した。

#### 4. 実験結果とその考察

##### 4.1 マトリックスモルタルのレオロジー性質の影響

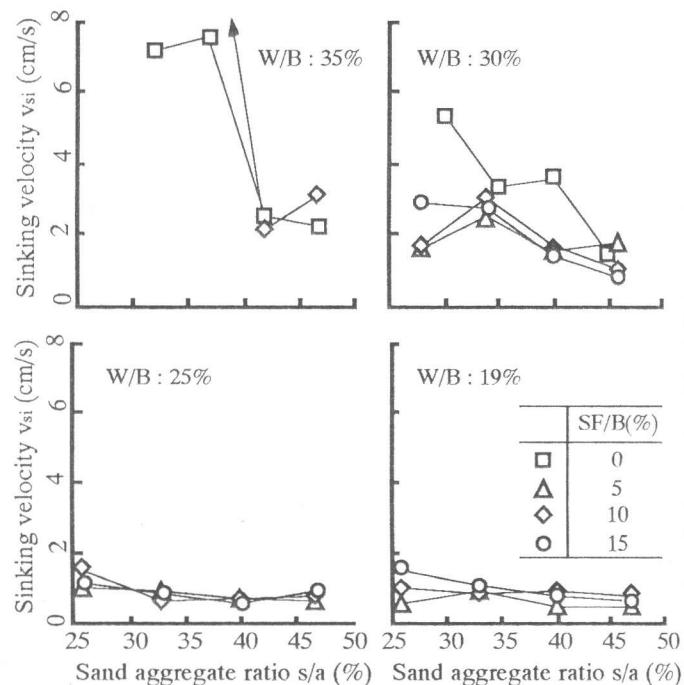
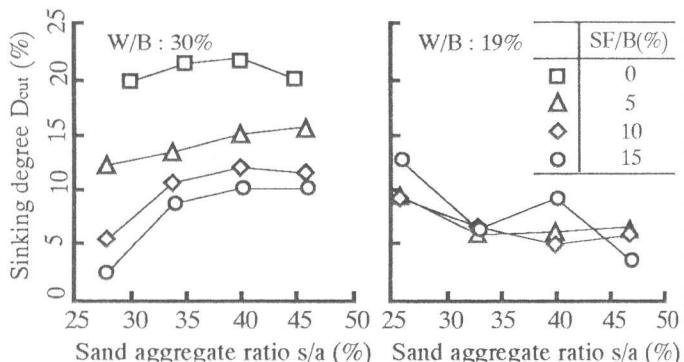
図一5は、振動下球沈下試験の結果を示したものである。細骨材量が大きくなるにつれて、球（模擬粗骨材）の沈下速度は小さくなり、その減少割合は、水結合材比の増加とともに増大している。これは、細骨材量の減少によってモルタルの塑性粘度が小さくなり、振動コンシスティンシー曲線（図二参照）の第1直線において、同一せん断応力に対するひずみ速度が増加するためであると考えられる。

図一6に、分離評価試験Iより得られた沈下度D<sub>cut</sub>と細骨材率の関係を示し、また、図一7に、分離評価試験IIより得られた分離度D<sub>str</sub>と細骨材率の関係を示す。水結合材比30%の試料における沈下度D<sub>cut</sub>は、細骨材率が大きくなるにつれて増大し、その増加傾向はシリカフューム置換率が大きいほど大きい。また、分離度D<sub>str</sub>に関しては、明確な傾向は認められないが、細骨材率が及ぼす影響は小さい。一方、水結合材比19%の試料では、両分離評価値が同様な傾向を示し、細骨材率の増加とともに、分離度の値が減少している。

以上の測定結果は、球沈下試験の結果と傾向的に異なり、モルタルに関する条件が同一であることから、粗骨材量が、その沈下挙動に大きな影響を及ぼしているものと思われる。図一8は、

表二 使用材料

	Cement	Fine aggregate	Silica fume	Matrix mortar	Coarse aggregate
Kind	Ordinary Portland cement	River sand	Powder type	—	Crushed gravel (maximum size: 20mm)
	—	—	—	—	—
Specific gravity	3.16	2.55	2.20	2.05~2.34	2.71

図一5 沈下速度v<sub>si</sub>と細骨材率s/aの関係図一6 沈下度D<sub>cut</sub>と細骨材率s/aの関係

以上の測定結果は、球沈下試験の結果と傾向的に異なり、モルタルに関する条件が同一であることから、粗骨材量が、その沈下挙動に大きな影響を及ぼしているものと思われる。図一8は、

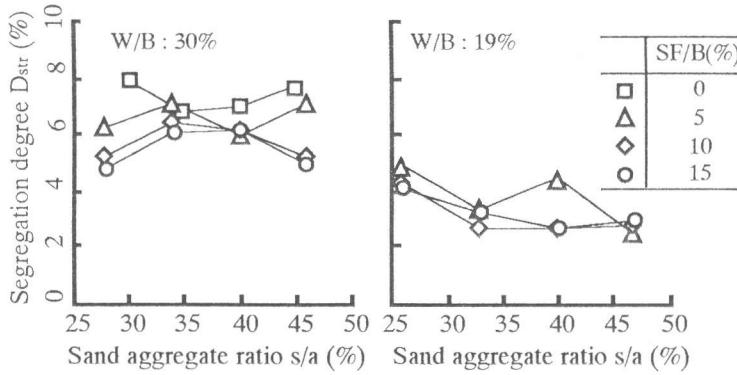


図-7 分離度D<sub>str</sub>と細骨材率s/aの関係

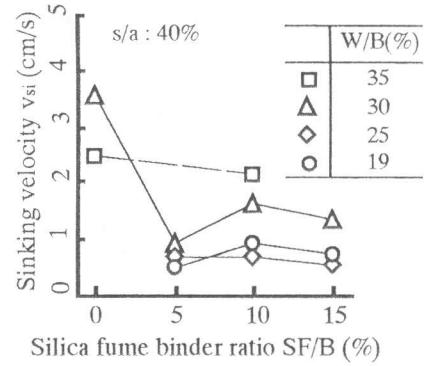


図-8 沈下速度vs<sub>i</sub>とシリカフューム置換率SF/Bの関係

細骨材率40%の試料に対して、球沈下速度vs<sub>i</sub>とシリカフューム置換率の関係を示したものである。シリカフュームの混入によって沈下速度vs<sub>i</sub>が減少しているが、シリカフューム置換率の大きい範囲では、vs<sub>i</sub>に対する影響は小さい。

#### 4.2 粗骨材量の影響

粗骨材量が沈下挙動に及ぼす影響を検討するために、2種類の分離評価試験によって得られた評価値から沈下速度を逆算し、球沈下試験によって得られた1個の粗骨材が沈下するときの速度と比較した。

まず、分離評価試験Iの初期状態において、粗骨材体積濃度G<sub>mix</sub>で均等に分布していた粗骨材が、加振によって一定速度v<sub>cut</sub>で一様に沈下し、t=30秒後の粗骨材分布状況が図-9に示すようであったと仮定する。沈下した粗骨材は、底部付近に達すると沈積し、この部分の密度は実績率G<sub>ab</sub>に等しくなるものとする。この粗骨材が沈積する領域の高さh<sub>y</sub>は式(13)となり、このときの沈下度D<sub>cut</sub>は、式(14)のように求められる。したがって、粗骨材沈下速度v<sub>cut</sub>は、式(15)のようになる。

$$h_y = \sum_{n=1}^{\infty} t v_{\text{cut}} \left( \frac{G_{\text{mix}}}{G_{\text{ab}}} \right) = \frac{t v_{\text{cut}} G_{\text{mix}}}{G_{\text{ab}} - G_{\text{mix}}} \quad (13)$$

$$D_{\text{cut}} = \frac{2 t v_{\text{cut}}}{H} - \frac{G_{\text{ab}} t^2 v_{\text{cut}}^2}{(G_{\text{ab}} - G_{\text{mix}}) H^2} \quad (14)$$

$$v_{\text{cut}} = \frac{H}{G_{\text{ab}} t} \left\{ (G_{\text{ab}} - G_{\text{mix}}) - \sqrt{(G_{\text{ab}} - G_{\text{mix}})(G_{\text{ab}} - G_{\text{ab}} D_{\text{cut}} - G_{\text{mix}})} \right\} \quad (15)$$

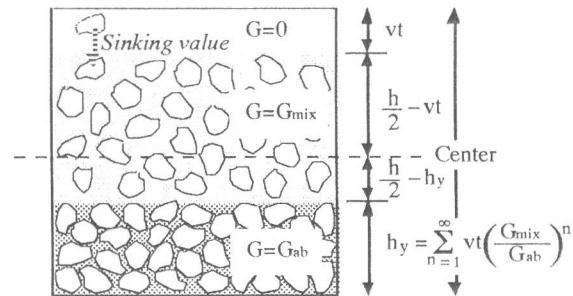


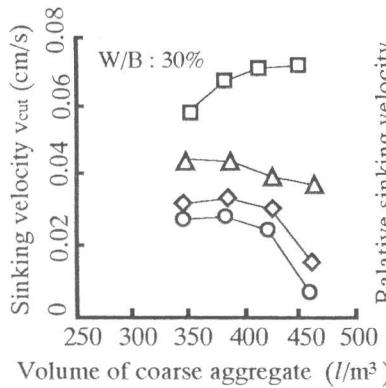
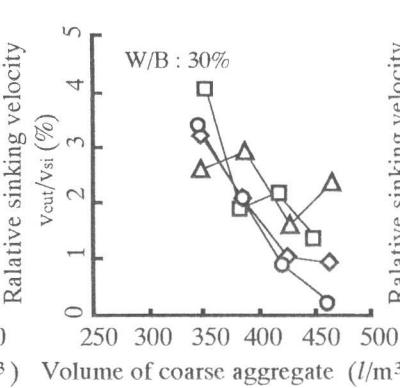
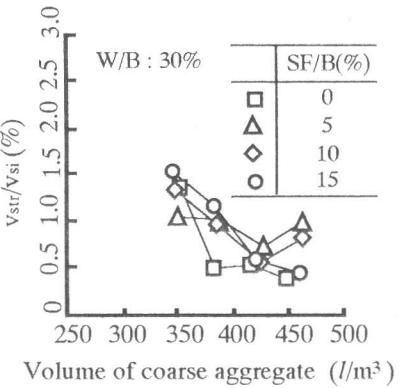
図-9 仮定した粗骨材分離状況

図-10は、式(15)による沈下速度v<sub>cut</sub>と粗骨材量の関係を示したものである。また、v<sub>cut</sub>と球沈下試験によって得られた沈下速度vs<sub>i</sub>の比(v<sub>cut</sub>/vs<sub>i</sub>)を図-11に示す。v<sub>cut</sub>/vs<sub>i</sub>は、粗骨材形状の影響を無視すれば、沈下速度に与える粗骨材の混入効果を表しているものと考えられ、同図によると、同一粗骨材量に対してほぼ一定になっている。通常の粗骨材量の場合の沈下速度は、1個の粗骨材が沈下する場合と比較して、最大でも4%以下と極めて小さい。

次に、分離評価試験IIについても、同様の方法で、以下の式によって平均沈下速度v<sub>str</sub>を求めた。

$$v_{\text{str}} = \frac{D_{\text{str}} h}{2 t} \quad (16)$$

図-12は、式(16)によって求めた沈下速度v<sub>str</sub>と、球沈下試験による沈下速度vs<sub>i</sub>の比(v<sub>str</sub>/vs<sub>i</sub>)を示したものである。沈下速度の比v<sub>str</sub>/vs<sub>i</sub>は、分離評価試験Iから算出した値よりもさらに小さ

図-10 沈下速度 $V_{cut}$ の計算値図-11 沈下速度の比 $V_{cut}/V_{si}$ と粗骨材量の関係図-12 沈下速度の比 $V_{str}/V_{si}$ と粗骨材量の関係

く、最大でも1.5%程度となっているが、全体的な傾向は図-11の場合と同様である。

これらの結果は、振動下の粗骨材沈下挙動は、マトリックスモルタルのレオロジー性質によって基本的に決定できるが、粗骨材どうしの相互作用の影響が極めて大きく、粗骨材量の増加によって、その沈下抵抗性が飛躍的に改善されることを示唆している。

## 5.まとめ

本研究では、振動下における粗骨材の沈下挙動を力学的に説明するために、レオロジー的な考察を行った。また、球沈下試験と2種類の分離評価試験を振動下において試行し、マトリックスモルタルの性質および粗骨材量が沈下挙動に与える影響を検討した。本研究によって新たに得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 静置時に粗骨材が沈下する限界は、粗骨材とマトリックスモルタルの密度差、降伏値および粗骨材寸法によって決定される。
- 2) フレッシュコンクリートに振動を加えた場合、粗骨材の沈下は必ず生じる。1個の粗骨材がマトリックス中を沈下すると仮定したときの沈下速度は、粗骨材寸法の2乗および密度差に比例し、振動下のみかけの粘度に反比例する。
- 3) 粗骨材量は、振動下の粗骨材沈下挙動に対して支配的な影響を及ぼす。粗骨材量の増加とともに沈下速度は減少し、通常量の粗骨材が混入されたフレッシュコンクリートにおける沈下速度は、粗骨材1個が沈下する場合の4%以下となる。

## 【謝辞】

本研究費の一部は、平成6年度文部省科学研究費補助金・試験研究(A)（研究代表者：岡村甫東大教授）によった。付記して謝意を表する。

## 【参考文献】

- 1) Ansley,R.W : AICHE Jour., Vol.13, pp.1193-1196, 1967.
- 2) 山川勉・寺田謙一・松田敏：高流動コンクリートの各種コンシステンシー評価試験方法に関する研究（その10），日本建築学会大会学術講演梗概集，A, pp.497-498, 1994.9
- 3) 寺西浩司・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：振動下のビンガム流体の力学モデルに関する考察，日本建築学会構造系論文集，No.467, pp.1-8, 1995.1
- 4) 谷川恭雄・森博嗣・渡辺健治：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートのコンシステンシーに関する研究，第46回セメント技術大会講演集, pp.382-387, 1992.4