振動下におけるフレッシュコンクリートの 挙動に関する基礎的研究*

(単純な細粒系中の粗粒子の分離)

西 林 新 蔵** 矢 村 潔**
井 上 正 一** 吉 野 公***

Behaviors of Fresh Concrete under Action of Vibration (Large Particle Segregation in Vibrated Simple Fine Particle System)

by

Shinzo NISHIBAYASHI, Kiyoshi YAMURA, Shoichi INOUE and Akira YOSHINO

(Faculty of Engineering, Tottori University, Tottori)

The mechanisms of segregation in mixtures under action of vibration have not been completely understood in the field of concrete technology.

In the present study, the phenomenon of segregation in a mixture of ideal simple system consisting of the bed of fine particles and a single large sphere particle was investigated experimentally, and the degree of segregation defined by the segregation time was evaluated by the motion of a single large particle through a dry fine particle bed.

The frequency of vibration was selected to be 50 to 150 Hz with the acceleration ranging from 2 to 15 g, and the effect of acceleration at a constant frequency of vibration on the segregation time was measured.

The effects of the size, shape and density of the large particle, the particle size and the grading of fine granular were also studied.

The results obtained provided useful informations to define the fundamental mechanism of segregation in fresh concrete.

(Received Aug. 20, 1979)

キー・ワード：フレッシュコンクリート，レオロジー，ワーカビリティ，材料分離，振動

1 緒 言

良いコンクリートを施工するうえで重要なことは、材料の分離ができるだけ少く、密実でかつ均等質なコンクリートに仕上げることである。フレッシュコンクリートは、比重、形状、寸法などが異なる材料の集合体で、本質的に材料分離を起しやすい性質を有しているといえる。しかも、ミキサーから排出されて、運搬、打込み、表面仕上げまでの全施工工程で、材料分離を起させようとする外力、内力に絶えずさらされている。振動締固めは材料分離を起させる外力の一つと考えられるが、一方においては、適度の振動締固めは密実なコンクリートを造るうえで重要な工程でもある。

一般に、均一な混合物中に寸法や密度の異なる粒子が

存在すると、その粒子は振動によって他の粒子とは異¹²⁾った挙動を示す。したがって、フレッシュコンクリートのように、異なる比重、形状、寸法の粒子が混合した混合物に振動を与えると、それぞれの粒子が任意の挙動を呈するため、全体の混合物の運動は非常に複雑なものになることが当然予想される。

さて、フレッシュコンクリートに振動を与えると、粗骨材が打込み表面に浮き上ってくる現象が観察される。また、砂と砂利が混り合った河床においては、流水によって粗粒の砂利が転ったり浮き上ったりする現象も見られるとされている。

このような現象に着目して、フレッシュコンクリートを構成する細粗骨材の系を単純なモデル、すなわち砂の中に一個の粗粒子が存在するモデルに置きかえ、これらの系に振動が与えられたとき一個の粗粒子がどのように挙動を呈するのかを観察すれば、それが振動

* 原稿受理 昭和54年8月20日

** 正 会 員 鳥取大学工学部 鳥取市湖山町南

*** 鳥取大学工学部 鳥取市湖山町南

下における材料分離の挙動を探る手掛りになるとの発想のもとに、本研究プロジェクトが設定された。さらに、本研究においては、骨材諸性質のうち粒度、粒径、形状等がフレッシュコンクリートの分離に対してどのような役割を果たすかを評価すること、ペーストやモルタル中における粗粒子の挙動を明らかにすることを手始めにして、フレッシュコンクリートの振動下における挙動を理論的に検討し、併せてそれに対する理解を深めることを目的としている。

ここでは、本実験を遂行するために考察した振動試験装置の概要と性質、砂の中に埋込まれた一つの球が種々の振動条件下でどのような挙動を呈するかを実験的に検討した結果について述べる。

2 実験概要

2・1 動電型振動試験装置

Fig.1 のフローチャートに示すとおり、制御部、電力増幅部、振動子部から構成されている。また、その総合仕様を示すと Table I のようになる。

Fig. 1. Block diagram of vibrator equipment.

Table I. General specifications of equipment.

Items	Performance
Max. osculation	2940 N (300 kgf)
Max. acceleration	980 m/sec ² (100 G)
Max. velocity	70 (cm/sec)
Max. amplitude	Total amplitude: 2.5 (cm)
Ranges of frequency	5~4000 Hz
Diameter of vibrator bed	150 (mm)

2・2 実験装置

実験装置の概要を Fig.2 に示す。まず、容器（コンテナ）の傾斜壁部とその上方 5 cm の位置まで粗粒子（ここでは砂）で満して砂のベットを作る。ベットの中央に粗粒子（ここではガラス球または鋼球）を設置し、そのうえにさらに 10cm 厚さの砂層を形成する。つぎにこの砂で満されたコンテナを、2・1 節で述べた動電型振動試験機に取り付け、振動数を所定の値にセットしてから振動加速度を設定値まであげる。球が砂層表面に現れるまでの時間をストップウォッチで計測して、これを分離時間とする。この際振動加速

Fig. 2. Outline of testing apparatus.

Table II. Characteristics of sphere used for large particle.

Kind of sphere	Composition	Diameter(mm)	Density(g/cm ³)
G-1	Glass	29.8	2.59
G-2	"	24.4	2.59
G-3	"	16.6	2.59
G-4	"	12.5	2.59
S-1	Steel	25.5	7.86

度は、時計計測開始から 5 秒間で設定値に達するようにする。一回の試験が終了とコンテナを振動機から取りはずし、中の砂を全部取り出してから、上述の操作を繰返す。

使用した細骨材は、標準砂（比重：2.65, F.M. : 0.97）、天然砂（比重：2.56, F.M. : 2.80）、人工軽量骨材（比重：1.73, F.M. : 2.80）の 3 種類で、後二者の粒度は土木学会標準粒度範囲の中央値になるように調整したものである。また、粗粒子として用いた球の性質（直径、密度等）を Table II に示す。

なお、試験で採用した振動条件、加速度（2~15）g、振動数（40~150）Hz は、プレキャストコンクリート用のテーブル振動機の性能に近くなるよう設定した。

3 実験結果および考察

以下の考察においては、粗粒子（球）が砂層から分離して、表面に浮き上るまでの時間を分離時間と称し、この値が小さければ分離しやすい条件下にあるとみなす。

3・1 振動試験装置の性能および測定値の精度

振動条件を、振動数：100 Hz、加速度：10g と一定に、コンテナ中の砂の種類を 3 種類に、さらに球（G-2）の位置を Fig.3 に示すように容器の中央、中央と壁部との中間部および壁部から 2 cm 離れた位置の 3 か所に選んで、球の位置と砂の種類が分離時間に及ぼす影響を検討した。それぞれの条件に対して測定を

Fig. 3. Container and positions of sphere on the sand bed.

40～50回繰返し、分離時間と頻度との関係をヒストグラムで表し、さらに観測度数が正規分布を示すかどうかは正規確率紙を用いて確認した。つぎに平均値の差の検定を信頼限界95%で行った結果、いずれの試験条件においても、連続して5回の試験を行えば、3%以下の誤差で測定値が得られることが確められた。なお、同一条件における分離時間を砂の種類別に比較すると、標準砂では、平均分離時間($\bar{t}$)=20.0秒、標準偏差(S.D.)=0.76秒、天然砂では、 $\bar{t}$ =35.7秒、S.D.=1.10秒、人工軽量骨材では $\bar{t}$ =43.5秒、S.D.=3.00秒であった。すなわち、標準砂(F.M.が小さい)では分離時間が極めて速く、同一粒度の天然砂と人工軽量骨材では前者の方が分離時間はやや速いことがわかる。また、測定値のばらつきの程度は、標準砂、天然砂ではほぼ同じであるが、人工軽量骨材を用いた場合にはやや大きくなる傾向がみられた。

球の位置と分離時間との関係は、砂の種類にかかわらず、球を中央(A)から端(C)の方に位置を移すにつれて分離時間が遅くなり、とくに(C)の位置では壁面摩擦の影響が現れるためか、分離時間は非常に遅くなった。砂の種類については、密度が大きいかわるいはF.M.の小さい砂ほど球の分離時間は速くなる傾向がみられた。

3・2 分離時間に及ぼす加速度(振動数:一定)の影響

振動数を(50～150)Hz、振動加速度を(2～15)gに選び、振動数と加速度との種々の組合せにおける分離時間を測定した。

Fig. 4に示すように、一定振動数における速度と分離時間との間には指数関係が存在する。すなわち、加速度が小さい場合には、分離時間は遅いがその変化は急激であるのに対し、加速度が大きくなるにつれて分離時間が速く、かつその変化は小さくなる。なお、一定加速度における振動数と分離時間との関係は、振動数が大きくなるに従って分離時間は遅く、その変化は大きくなり、ちょうど一定振動数における加速度と分離時間との関係とは逆の指数関係が得られた。

Fig. 4. Relationship between segregation time and acceleration (constant frequency).

3・3 砂層深さの影響

Fig. 5は、振動数(または加速度)をパラメータにとって、砂層深さと分離時間との関係を表したもので、この図から砂層深さが増えるに従って分離時間が急激に遅くなることがわかる。なお、砂層が20cmになると、本実験の振動条件では、球は砂層の表面まで浮き上らなかった。

Fig. 5. Relationship between segregation time and depth of sand layer on the sand bed.

3・4 粗粒子の密度の影響

Fig. 6は、振動数と球の種類をパラメータにとって、振動加速度と分離時間との関係を表したものである。鋼体とガラス球との密度比は、Table IIから約3であるが、各振動数および各加速度における分離時間にはほとんど差は現れなかった。この結果、粗粒子の密度は、分離時間に影響を与えないものと判断できる。

Fig. 6. Relationship between segregation time and density of sphere.

3・5 粗粒子の寸法および形状の影響

粗粒子(球)の直径によって移動距離が多少異なるため, 移動距離を分離時間で除した平均速度を分離速度とし, この分離速度と加速度あるいは球の直径との関係で, 粗粒子の寸法の影響を評価した. Fig. 7, 8 は分離速度と加速度との関係を, Fig. 9, 10 は分離速度と球の直径との関係を表したものである. これらによると, 振動数が大きくなるに従って球の寸法の影響が著しくなる. すなわち, 振動数 50 Hz においては, 球の直径が異っても分離速度はほぼ等しく, 分離速度に差は認められないが, 振動数が 150 Hz になると, 球の直径が大きいほど分離速度が速くなる傾向が明確に

Fig. 7. Relationship between rate of segregation and acceleration (variable large particle size).

Fig. 8. Relationship between rate of segregation and acceleration (variable large particle size).

Fig. 9. Relationship between rate of segregation and large particle size (variable acceleration).

Fig. 10. Relationship between rate of segregation and large particle size (variable acceleration).

現れてくる。

粗粒子の形状としては、球 (Table I の G-1) と円板 (モルタル製で、 M_1 : 直径 29 mm, 厚さ 12 mm, M_2 : 直径 29 mm, 厚さ 9 mm) を選び、円板の砂ベット上の設置方法は、 H : コンテナ軸方向に直角, V : コンテナ軸方向と一致である。Fig. 11 に粗粒子の形状が異なる場合の、振動加速度と分離時間との関係を示す。球と円板では、全般的に球の方が分離時間は短い、振動加速度が大きくなるとともに両者の分離時間の差は次第に小さくなる。円板の砂ベッド上で

Fig. 11. Effect of particle shape on segregation time.

Fig. 12. Relationship between segregation time and surface area of large particle.

の設置方向による分離時間を比較すると、コンテナの軸方向と一致 (V) させた方が、分離時間はやや短い。なお、Fig. 12 の円板の表面積と分離時間との関係 (設置方向は H の場合) をみると、振動加速度が小さい領域では表面積の大きいものほど分離時間が短いに対して、加速度が大きくなると表面積の違いによる分離時間の差はほとんどなくなる。

3・6 砂の粒径と粒度の影響

砂の粒径を考察する実験においては、5.0~2.5 mm, 2.5~1.2 mm, 1.2~0.6 mm, 0.6~0.3 mm, 0.3 mm 以下の5種類の単一粒径の砂で、砂層を形成した。ここでは、考察の便のため、単一粒径の中央径 (たとえば、5.0~2.5 mm では 3.75 mm) と粗粒 (球) の直径との比をとって粒径比 N とし、この N で分離時間に対する粒径の影響を評価する。Fig. 13 は、粒径比 N と分離時間との関係を示したものである。振動加速度 5 g 以下においては、粒径比が大きいもの、すなわち単一粒径砂の寸法が大きいものほど分離時間が短くなる傾向が見られる。しかし、振動加速度が 6 g 以上になると、各粒径比とも同じ分離時間になる。したがって、砂の粒径の大小は、低加速度においては分離時間に顕著な影響をもたらす、砂と球との直径の差が小さいものほど (N が大きいものほど) 分離時間が短くなる。

つぎに、砂の粒度を評価する実験においては、Fig. 14 に示すように5種類の連続粒度の細骨材を用いた。粒度 A は土木学会標準粒度範囲の上限 (F. M.

Fig. 13. Relationship between segregation time and particle diameter ratio N .

Fig. 14. Grading of fine particle (sand).

Fig. 15. Relationship between segregation time and grading of fine particle (ref. Fig. 14).

=2.25), Cは標準粒度範囲の下限 (F.M.=3.35), Bはその中央を通るもの (F.M.=2.80), Dは細砂, (F.M.=1.4), Eは粗砂 (F.M.=4.1) である。Fig. 15 に分離時間と粒度との関係を示す。この図から, F.M. が極端に大きい粒度 (D) あるいは小さい粒度 (E) の砂をベットのしたときの球の分離時間は短くなり, 各粒径を一樣に含んでいる砂 (粒度 A, B, C) で分離時間が長くなっている。すなわち, 各学会が標準とするような粒度の良い細骨材においては, 粗粒子の分離時間が長く, それだけ材料の分離が起り難いものと考えられる。

4 結 論

本研究は, フレッシュコンクリートの振動下における挙動を解明することを目的に計画した研究プロジェクトの第一段階として行ったものである。ここでは, コンクリートの主要な構成要素である細粗骨材の混合系を, 非常に単純なモデルとして, 細骨材中に存在するただ一個の粗粒子 (ここでは球) の系におきかえ, その球の振動下における挙動を実験的に検討し, 粗細粒が混ざり合った混合物の分離の基本的メカニズムを解明することを試みた。

乾燥状態の細骨材中に埋め込まれた粗粒子は, 振動を受けると上昇し表面に現れる。この現象は次のよう

な仮定で説明できる。

細骨材 (広義に考えると, 粉体あるいは粒状体) に振動を与えると流動現象を起し, 粗粒子は上昇流を受けて浮上する。この現象は, 河床における粗粒子の浮き上りの原因と考えられている。つぎに, 細粒分が粗粒子間のすきまを通してふるい分けられることが考えられる。これは, 粗細粒の混ざり合った混合物を容器に入れて振動を与えると, 粗粒分と細粒分とが分離し, 粗粒分は表面に細粒分は底部に集ることによって確かめられる。さらに, ゆるい状態の細粒分が振動によって締固められ, 粗粒分が沈下できなくなる。この場合, 粗粒分が自由に運動できるのは上方向と横方向であるので, 細粒分の締固め層が増加するに従って, 粗粒分が上方向に押し上げられることになる。

なお, これらの仮定は, あくまでも凝集力のない乾燥状態の粒子の場合にのみ適用できる。すなわち, フレッシュコンクリートやモルタルのように粘性と凝集力のある混合物の場合には, 厳密には適用できない。

また, 細骨材中に存在する一個の球の, 振動状態下での挙動がそのまま骨材間の分離に当てはまるとは言い難い。しかし, これら単純な系の振動下の挙動を究明することによって, 細・粗粒が混り合った混合物の分離に関する基本的なメカニズムを解明する糸口を握むことができるものと考えられる。

ここで報告した実験とは別に, フレッシュコンクリートあるいはモルタル中に球を挿入し, この球に外力を与えて移動させた際に球が受ける抵抗力と粘性との関係からレオロジー方程式を決定し, 粘性と降伏値を特性値として考察することも試みている。これらの結果については稿を改めて報告したいと考えている。

本研究は, 文部省科学研究費による成果の一部であることを付記するとともに, 実験を実施するに当って多大の協力を賜った鳥取大学工学部土木工学科材料研究室の諸氏に対し, ここに感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐納良樹, 宮田清巳, 勝俣春美, 材料, **19**, 570 (1970).
- 2) 林 俊孝, 笹野陸雄, 津々見雄文, 川北公夫, 池田千尋, 材料, **19**, 574 (1970).