

## 論文 重力による材料落下型連続ミキサの練混ぜ機構の可視化

石丸 啓輔<sup>\*1</sup>・橋本 親典<sup>\*2</sup>・山地 功二<sup>\*3</sup>・八藤 辰弥<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究は、新開発の材料落下型連続ミキサ (以下、落下型ミキサ) による練混ぜが従来のバッチ式ミキサと同程度の練混ぜ性能を有することを確認した後、落下型ミキサの練混ぜ機構を可視化的実験手法を用いて混練状況を観察し、主に混練ユニットである箱形容器内の斜面部・落下部における発生速度の相対速度に着目し定量化した。その結果、モデルコンクリートの粘性の影響が相対速度を発生させる原因であり、落下型ミキサの練混ぜ性能に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

**キーワード:** 材料落下型連続ミキサ, 洗い分析試験, 可視化断面, 速度分布, 頻度密度

## 1. はじめに

現在、構造物が大型化したために短時間で大容量のコンクリートを製造する必要がある場合には、練混ぜ時間をできるだけ短くする必要がある。配合設計時において期待したコンクリートの性能を十分に発揮させることが可能な高性能コンクリートミキサの開発が望まれている。

これに対し、最近、前田・山田ら<sup>1)</sup>の研究グループによって、従来の練混ぜ方法と全く異なる重力による材料落下型の連続ミキサが開発され実用化されている。この重力による材料落下型連続ミキサは、複数個で構成する箱形容器内を重力によって材料を落下させることにより、材料の練混ぜが行われるという非常に独創的な練混ぜ方法である。しかしながら、箱形容器の形状や材料投入速度などのミキサの詳細な設計条件については明らかになっていない。

本研究では、可視化実験手法を用いて、この新しい重力による材料落下型連続ミキサの練混ぜ機構の解明を行うものである。落下型ミキサとバッチ式ミキサの練混ぜ性能の差をモデル落下ミキサおよびバッチ式ミキサを模擬した手練りを用いてモデルコンクリートを製造し、洗い

分析試験により検証した。

次に、落下型ミキサ内の投入材料の流動挙動を定量的に評価し、練混ぜに影響を及ぼす要因を解明することを目的とし、その一要因としてミキサ内におけるコンクリートの挙動の異なる部分での速度ベクトルの大きさの分布を調べ、落下型ミキサの練混ぜ機構を実験的に解明した。

## 2. 実験概要

## 2.1 材料落下型連続モデルミキサ

本実験で用いた落下型ミキサを写真-1、図-1に示す。モデルミキサとしては、箱形容器の形状を実機の1/2のスケールでモデル化したものを用いた。材料投入口から4連目までの箱形容器を内部が可視化できるように、無色透明なアクリル樹脂製のものとした。

## 2.2 モデルコンクリートの使用材料

フレッシュコンクリートの可視化モデルとして、モデルモルタルは、スターチポリアクリレートからなる白色粉末状の高吸水性高分子樹脂 (以下、高分子) を水に添加して得られる無色透明な粘性流体 (比重 1.0) を用いた。モデル粗骨材は、人工軽量粗骨材であり、最大粗骨材

\*1 徳島大学技官 工学部建設工学科 (正会員)

\*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*3 日本興業(株)開発部 工修 (正会員)

\*4 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

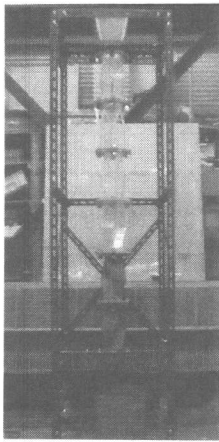


写真-1 落下型連続  
モデルミキサの概観

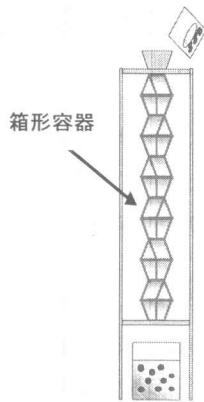


図-1 落下型連続  
モデルミキサ

寸法が15mm(比重1.43,F.M 6.13,実積率62.4%)のものを使用した。人工軽量粗骨材を用いた理由は、モデルモルタルとの密度差を実際のコンクリートの粗骨材とモルタルの密度差と同程度にし、落下型ミキサ内での落下状態のコンクリートの材料分離抵抗性を合わせるためである。なお、本可視化モデルのコンクリートに対する相似性に関しては、参考文献<sup>2)</sup>に詳細に記述されているので、本論文では省略する。

### 2.3 モデルコンクリートの配合選定

モデルモルタルの性状の相違を明らかにするため、実モルタルにおいて適用されているミニスランプコーンによりモデルモルタルの性状の測定を試みた。高分子添加量を水1リットルに対して2.7, 3.0g(以下、高分子/水=2.7g/l, 3.0g/l)の2種類に変化させた場合の各試験結果は、2.7g/lがミニスランプフロー186mm, 3.0g/lがミニスランプフロー176mmとなった。

モデルコンクリートの配合は、モデル粗骨材とモデルモルタルの容積比(以下、 $V_g/V_m$ )およびモデルモルタルの性状の組み合わせによって決定した。 $V_g/V_m$ は実施工において適用されたコンクリートの配合例を基に、0.8, 0.7, 0.6の3種類とし、本実験における落下型ミキサでは合計6種類のパラメータを用いた。

### 2.4 落下型ミキサによる練混ぜ方法

落下型ミキサは、モルタルと粗骨材のような異なった材料を投入するだけで練混ぜが行えるミキサであるが、一気に材料を投入するとミキサ内で閉塞が起こる。

したがって、本実験では投入材料である粗骨材とモルタルを順に2層に重ねて準備し、どの配合においても全量で約3リットルとして、6回に均等に分けてミキサに投入する。

### 2.5 手練りによる練混ぜ方法

実機のバッチ式ミキサを想定し手練りによる練混ぜを行った。各配合とも落下型ミキサでの練混ぜと同量のモデル粗骨材とモデルモルタルを容器に投入し、5分間丹念に投入材料を手で練り混ぜる。手練りにより製造したモデルコンクリートをバッチ式ミキサの練上がり後と模擬し、落下型ミキサの場合と比較する。なお、手練りの練混ぜでは、モルタルの粘性の影響が小さいと考えられるので、モデルモルタルの高分子添加量3.0g/lのみとした。

### 2.6 洗い分析試験方法

- ① 1回の実験において、落下型ミキサにより製造したモデルコンクリートからまんべんなく5箇所に分けてサンプリングしたモデルコンクリートの質量を計量する。
- ② サンプリングしたコンクリートを水で洗うことでモデルモルタルを洗い流し、採取した5箇所のモデル粗骨材を表乾状態となるように表面の水分をウエスで拭き取った後、それぞれの質量を計量する。
- ③ 計量したモデル粗骨材質量をモデル粗骨材比重で除して、モデル粗骨材体積 $V_g$ を求める。
- ④ モデルコンクリート質量とモデル粗骨材質量の差からモデルモルタルの質量を求め、同様にモデルモルタルの比重で除して、モデルモルタル体積 $V_m$ を求める。
- ⑤ ①~④の手順により、5サンプル容器各々の粗骨材濃度( $V_g/V_m$ )を求める。さらに5回の練混ぜを実施し、1配合について合計25回分の洗い分析試験を行う。

## 2.7 実験結果および考察

変動係数と粘性および  $V_g/V_m$  の関係を図-2 に示す。粘性が小さいフロー186mm のとき、ばらつきが大きくなる。モデルモルタルの粘性が大きいほど練混ぜ性能は優れている。一方、 $V_g/V_m$  の違いでは、70% の場合がもっとも練混ぜ性能が良好であり、粗骨材濃度の最適値が存在すると判断される。

バッチ式ミキサの練混ぜを想定した手練と比較すると、落下型ミキサの場合、変動係数がすべての実験値において大きい。しかしながら、その差は10%と小さい。よって、本実験方法は実物大の落下型ミキサの練混ぜを十分再現できるものと判断される。

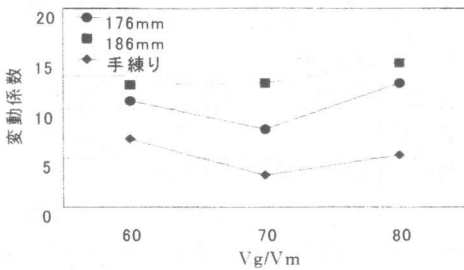


図-2 変動係数と粘性および  $V_g/V_m$  の関係

## 3. 可視化実験概要

### 3.1 試験方法

落下型ミキサ、投入材料および材料の投入方法は2.と同様である。モデルコンクリートの配合は、練混ぜ性能が良好である高分子添加量  $3.0g/l$  で一定とし、 $V_g/V_m$  を  $0.8, 0.7, 0.6$  および比較として粗骨材のみの4種類を用いた。粗骨材のみとは、落下型ミキサ内での自由落下を意味する。

可視化実験装置を図-3に示す。実験は投入材料を順次投入し、ミキサ内の混練材料の移動状況を8mmビデオカメラによって撮影する。

### 3.2 可視化断面

落下型ミキサは、混練ユニットである箱形容器を規則正しく配置しているため、その組み合

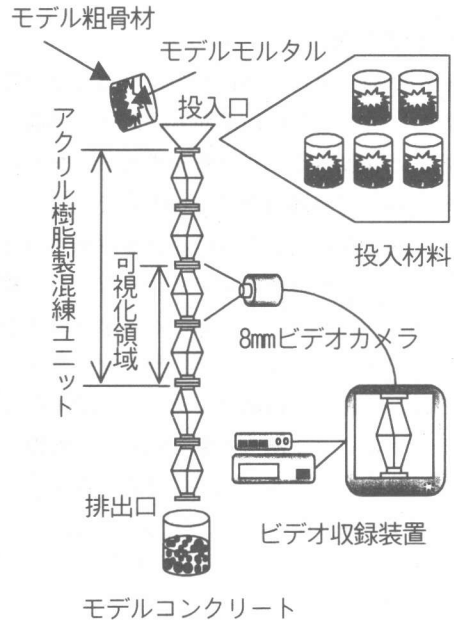


図-3 可視化実験装置

せの最小単位である3-4連目の箱形容器を可視化領域に選定し、図-4に示すように前面からの撮影について3断面選定し、これらを可視化

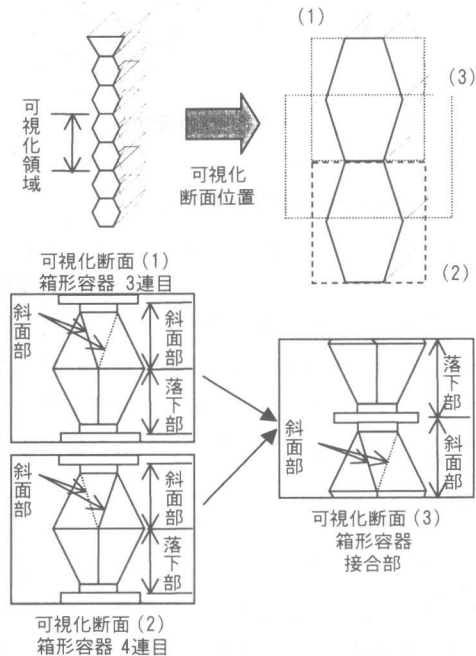


図-4 可視化断面

断面とした。

### 3.3 画像処理方法

可視化断面に出現する任意の粗骨材の単位時間当たりにおける移動距離から、2次元平面上に転換した速度ベクトル分布を求める。なお、各粗骨材の計測時間間隔は0.033秒で一定とし、可視化断面における粗骨材の流れを評価するために、箱形容器の流路の違いによって左・右に粗骨材の挙動の違いにより斜面部・落下部の4つのエリアに区切ることとした。粗骨材の挙動の違いとは、流路の斜面部による滑りと落下部における落下のことである(図-5参照)。取得した粗骨材速度ベクトル(以下、速度ベクトル)の総数は1エリアにつき50個以上とした。

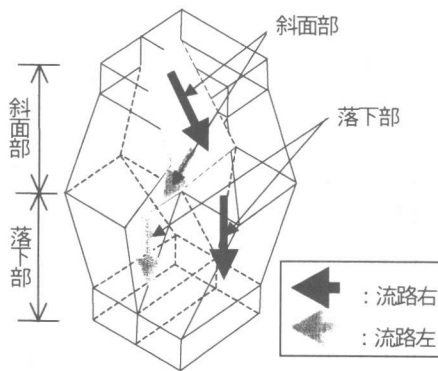


図-5 エリアの選定

### 3.4 速度分布処理方法

画像処理によって求めた速度ベクトルは、各可視化断面および各エリアによってベクトル総数が異なり、単に速度ベクトルの度数分布を比較したのでは正確な傾向を把握することができない。よって、本研究では統計的処理を施すことにより、全データを一樣に比較し評価することとした。

以下に、処理方法の手順を示す。

- (a) 式(1)に示すように、各エリアのデータ区間幅(H)を決定し、各データ区間に属する速度ベクトルの個数を求める。

$$\text{データ区間幅} : (b-a)/k \doteq H \quad (1)$$

$$k = 1 + \log_{10}n / \log_{10}2 = 1 + 3.32 \log_{10}n$$

a : データ中の最小値

b : データ中の最大値

n : 標本数

- (b) (a)で求めた頻度を各エリアのベクトル総数(n)で除することにより、各データ区間での頻度割合を求める。
- (c) 頻度割合をデータ区間幅(H)で除することにより、各頻度が発生する割合、すなわち発生密度を求めた(以下、頻度密度)。
- (d) 頻度密度を縦軸に速度ベクトルの大きさを横軸にプロットし、折れ線グラフを描いて速度分布状況を比較した。なお、折れ線で表されたグラフの面積は一樣に100%である。
- (e) 同一流路での斜面部・落下部における頻度密度と速度ベクトルのグラフ(以下、速度分布)をそれぞれ描き、重ね合わせる。
- (f) 同一エリアにおいて、Vg/Vmを3種類と粗骨材のみの合計4種類に変化させ、速度分布をそれぞれ描き、重ね合わせる。

### 3.5 実験結果および考察

高分子添加量が3.0g/lのモデルモルタルを用いてモデルコンクリートのVg/Vmを60, 70, 80%および粗骨材のみに変化させた場合の影響を、前面からの撮影による右流路の速度分布を比較することで検証した。

落下型ミキサ内の右流路・斜面部における発生速度と頻度密度との関係を、可視化断面ごとに図-6, 7, 8に示す。また、同様に落下部における発生速度と頻度密度との関係を、可視化断面ごとに図-9, 10, 11に示す。

まず、粗骨材のみににおける最頻度密度区間(以下、ピーク速度区間)に着目する。本来、自由落下を考えると、3連目よりも4連目のほうが発生速度は大きくなるはずである。しかしながら、落下型ミキサ内では逆に4連目のほうが3連目よりも発生速度が小さくなっている。これ

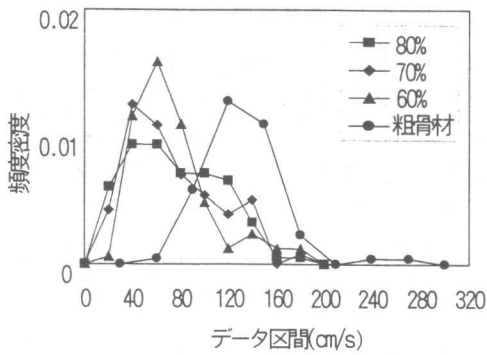


図-6 モデルコンクリートの配合が速度分布に及ぼす影響  
[3連目・右流路・斜面部]

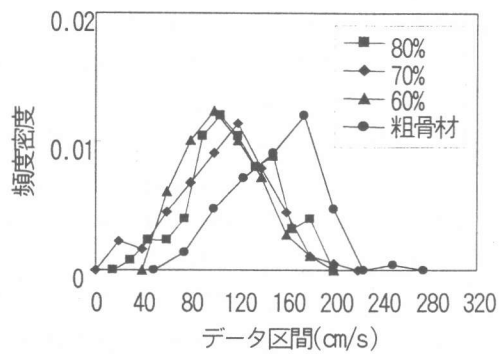


図-9 モデルコンクリートの配合が速度分布に及ぼす影響  
[3連目・右流路・落下部]

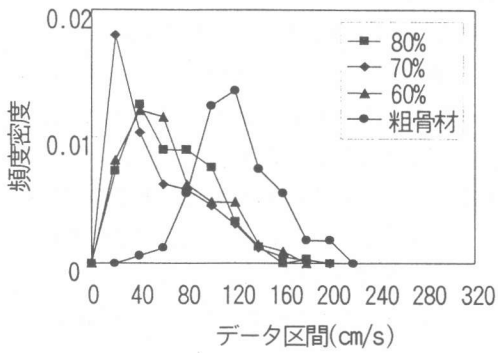


図-7 モデルコンクリートの配合が速度分布に及ぼす影響  
[3-4連目接合部・右流路・斜面部]

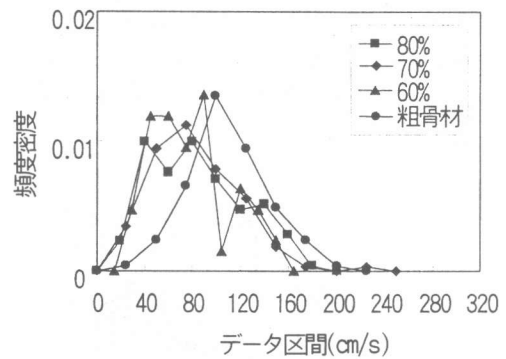


図-10 モデルコンクリートの配合が速度分布に及ぼす影響  
[3-4連目接合部・右流路・落下部]

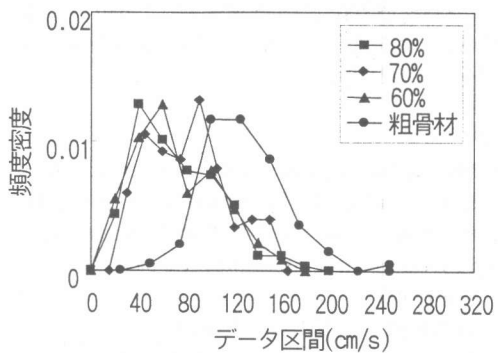


図-8 モデルコンクリートの配合が速度分布に及ぼす影響  
[4連目・右流路・斜面部]

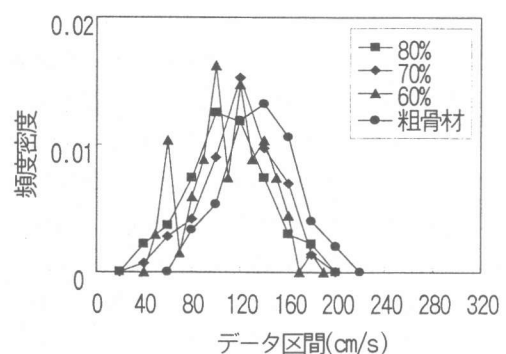


図-11 モデルコンクリートの配合が速度分布に及ぼす影響  
[4連目・右流路・落下部]

は、落下部に比べ斜面部で落下速度が減少するためと思われる。また、ピーク速度区間は斜面部に比べて落下部のほうが大きくなっている。これ以外の  $V_g/V_m$  が 60, 70, 80% においても、同じことがいえる。つまり、斜面部では落下部よりもモデルコンクリートの落下速度が小さくなり、斜面部と落下部とで発生速度に差が生じていることがわかる。特にモルタルが存在することにより、斜面部のピーク速度区間が粗骨材のみの場合に比べて著しく減少している。

次に、3-4 連目接合部では斜面部・落下部に問わず、いずれの配合においても 3, 4 連目に比べ、ピーク速度区間が小さくなっている。これは図-12 に示すように、接合部では流出断面と流入断面とで 90 度回転した内部構造となっており、このねじれによって接合部ではモデルコンクリートの落下速度が小さくなるものと考えられる。

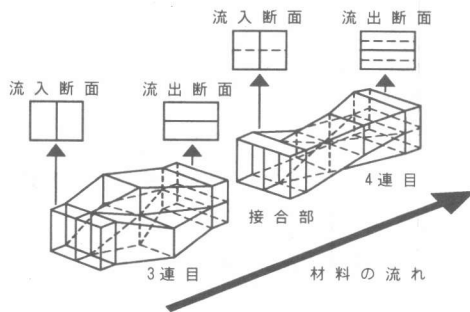


図-12 落下型モデルミキサの基本原理

表-1 は、斜面部と落下部のピーク速度区間から求めたピーク速度と両者の相対速度を示す。粗骨材のみでは、どの可視化断面においてもモデルコンクリートの場合よりもピーク速度が大きい。3 連目では、相対速度が 60cm/s で大きい。接合部と 4 連目では、相対速度が非常に小さい。接合部では、落下部より斜面部の方が大きい。これに対し、モデルコンクリートでは、どの断面においても相対速度が大きい。特に、 $V_g/V_m$  が 70% がもっとも大きい。練混ぜ性能に関する実験で、 $V_g/V_m$  が 70% のときがもっとも

表-1 ピーク速度区間の比較 (cm/s)

$V_g/V_m$	3 連目			接合部			4 連目		
	斜面	落下	相対速度	斜面	落下	相対速度	斜面	落下	相対速度
粗骨材のみ	120	180	60	120	100	-20	120	140	20
60%	60	100	40	40	80	40	70	110	40
70%	40	120	80	20	80	60	70	120	50
80%	50	100	50	40	60	20	40	100	60

変動係数が小さく、練混ぜ性能が良好であった。したがって、落下型ミキサの練混ぜ性能の向上には、斜面部と落下部の相対速度を大きくすることが重要であると判断される。

#### 4. 結論

以下に、本研究で得られた結果を記す。

- (1) 練混ぜ性能に関する実験では、練混ぜ性能を良好にする粗骨材濃度の最適値が存在することが明らかになった。
- (2) 落下型ミキサ内の斜面部と落下部の粗骨材落下速度と接合部における落下速度の低下が、ミキサ内で繰り返し行われることにより、コンクリートの練混ぜが活発になる。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、前田建設工業(株)ならびに同社新規事業部の山田一字博士、内田明博士には、研究費および技術的援助を多大に受けました。ここに記して感謝の意を表します。

また、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金の基盤研究(c)(2) (課題番号: 11650467, 研究代表: 橋本親典) に基づき実施されたものであることを付記致します。

#### 参考文献

- 1) Maeda, M.K., Yamada, K. and Uchida, A. : Evaluation on the Practicability of SCC, The Proceedings of the RTLEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.617-628, Sep.1999.
- 2) 橋本親典, 吉田正宏, 安積淳一, 辻 幸和; フレッシュコンクリートの可視化実験手法に関する相似則の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.89-94, 1991.