

論文 水平棒材の配列が落下型連続ミキサの練混ぜ性能に与える影響

藤戸 幹大^{*1}・橋本 親典^{*2}・渡辺 健^{*3}・上田 隆雄^{*4}

要旨：最近，種々の形状の材料落下型連続ミキサが開発されている。本研究では，複数の水平棒材のみで構成した円筒形鋼管の落下型連続ミキサの練混ぜ性能に着目し，水平棒材の配列パターンが練混ぜに与える影響について，可視化実験手法を適用して実験的に検討した。その結果，らせん状の配列よりも十字型に配列した水平棒材を有する落下型連続ミキサの方が，粗骨材濃度が大きい配合になるに従い，練混ぜ性能が良好になる。水平棒材を十字型に配列した落下型連続ミキサは，粗骨材粒子群が鉛直下向きの落下より水平奥行き方向の移動が多くなり滞留時間が長くなり，練混ぜ性能が向上す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，練混ぜ性能，洗い分析試験，可視化実験，粗骨材濃度

1. はじめに

前田ら¹⁾によって，バッチ式コンクリートミキサとは全く異なり，ベルトコンベアでミキサの投入口頂上まで搬送された先練りモルタルと粗骨材を重力のみの位置エネルギーによって自由落下させて，コンクリートを製造する材料落下型連続ミキサが開発されて以来，種々の容器形状の落下型連続ミキサが提案されてきた。

この種のミキサは，先練りモルタルの製造が必要であるため，通常のレディーミクストコンクリートプラントで製造される有スランプコンクリートには不向きである。単位水量が少ないゼロスランプの超硬練りコンクリートであるRCDダム用のコンクリートや，砂防ダムに最近用いられている現場の掘削土砂とセメント，水を混合するCSG (Cemented Sand and Gravel) 材の製造など，短時間で大容量かつ連続的に製造するセメント系固化体に適している。

本研究では，鉛直に設置された円筒形鋼管に複数の水平棒材を組み合わせて構成された空間を有する材料落下型連続ミキサを研究対象とした。

著者らはこれまでに，斜面部と落下部から構成する箱型容器を数個組み合わせた構造の落下型連続ミキサの練混ぜ機構を解明することを目的として，材料が落下する状況をモデルコンクリートによって可視化し，斜面の角度やモルタルの粘性や粗骨材濃度が練混ぜ性能に与える影響を検討してきた²⁾。その結果，落下過程を衝突問題でモデル化し相対経路長さの頻度分布形状によってモデルの検証を行い，容器の傾斜角が練混ぜ性能に与える影響を解明した。

本研究では，上述した落下型連続ミキサの可視化手法を，より簡単な構造である複数の水平棒材のみで構成した円筒形鋼管の落下型連続ミキサに適用し，その練混ぜ機構の解明を試みた。すなわち，水平棒材の配列パターンが異なる落下型連続ミキサにより製造されたモデルコンクリートの洗い分析試験を行い，練混ぜ性能を評価した。次に，落下型連続ミキサ内の投入材料の練混ぜ挙動をビデオ撮影し，撮影した画像から粗骨材粒子群の2次元座標データから，粗骨材粒子群の落下速度分布を求め，本落下型連続ミキサの練混ぜ性能に与える水平棒材の配列パ

*1 日工(株) 修士 (工学) (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学助手 工学部建設工学科 博士 (工学) (正会員)

*4 徳島大学助教授 工学部建設工学科 博士 (工学) (正会員)

ターンの影響を実験的に解明した。

2. 練混ぜ性能評価試験

2.1 実験概要

モデルコンクリートを用いた洗い分析試験を行うことで練混ぜ性能の評価を行う。実験対象にした落下型連続ミキサは、円筒形アクリル管に異なる配列パターンの水平棒材を配置した 3 種類である。

2.2 材料落下型連続モデルミキサ

本実験で用いたモデルミキサの概観を写真-1 に示す。モデルミキサは、実機の 1/64 (容積比) でモデル化したものを用いた。素材は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。

円筒形アクリル管内に取り付けた水平棒材の配列パターンは、図-1 に示す 3 種類を用意した。配列 I は、現在、実際の現場で使用されている水平棒材の配列パターンであり、12 本の水平棒材が落下方向に従って 45 度の回転角度で、らせん状に配置されている。配列 II は、落下直後は水平棒材を配置しないで材料が自由落下するようにし、円筒管の後半部分で、6 本の水平棒材が落下方向に従って 45 度の回転角度で、らせん状に配置されている。配列 III は、12 本の水平棒材をらせん状に配列しないで、上下の 2 本の水平棒材を十字に配置し、さらに、連続する 2 本毎の水平棒材を 45 度の回転角度で配置したものである。なお、練混ぜ性能実験は、この 3 種類の配列パターンの他に、水平棒材が 1 本もない円筒形アクリル管を材料が落下する場合を実施した。

2.3 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 (密度 1.0g/cm^3) を用いた。モデル粗骨材は、人工軽量粗骨材であり、最大粗骨材寸法が 15mm (密度 1.43g/cm^3 , F.M. 6.13, 実

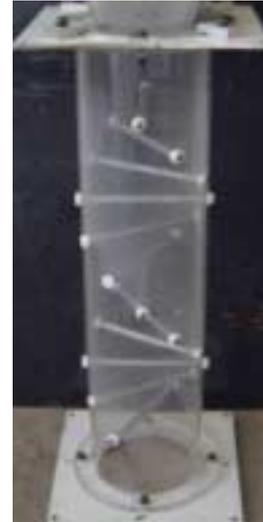


写真-1 モデルミキサ

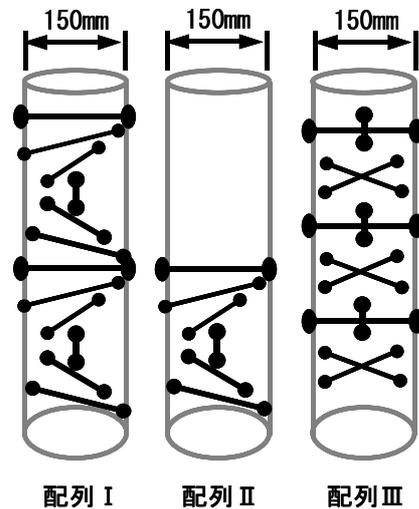


図-1 配列パターン

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³⁾に詳細に記述されているので、本論文では省略する。

2.4 モデルコンクリートの配合選定

モデルモルタルは、高分子添加量を水 1 リットルに対して 3.0g で一定とした。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

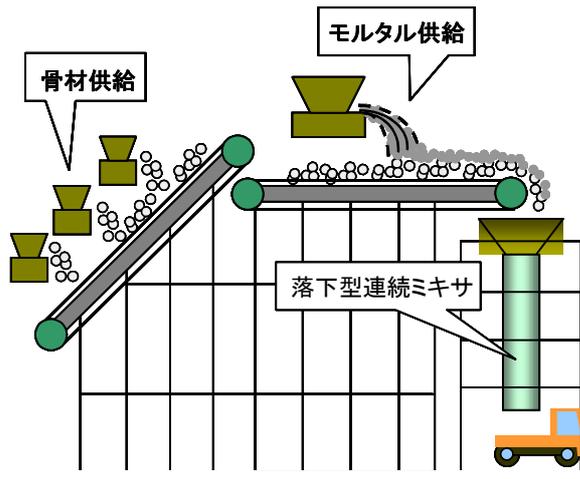


図-2 実機材料投入図



写真-2 材料投入の様子

ルの容積比（以下、 V_g/V_m ）で決定した。 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、50%、70%、90%の3種類とした。

2.5 落下型連続ミキサへの材料投入方法

実機の落下型連続ミキサでの材料投入を、図-2に示す。円筒形鋼管の頂上位置までの材料の搬送は、ベルトコンベアによって行う。本実験における材料投入は、実機のと再現性を考慮して、写真-2に示す模擬ベルトコンベアを試作した。

模擬ベルトコンベアによる材料投入速度と投入量は、実機の供給能力 $100\text{m}^3/\text{h}$ を $1/64$ （容積比）でモデル化し、8秒間に4リットルの材料を投入することとした。ベルトコンベア上の材料は実機と同様に骨材とモルタルを2層で配置し下層に骨材、上層にモルタルとした。

2.6 洗い分析試験方法

洗い分析試験は以下の手順で行った。

- 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15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15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、15サンプル容器各々の粗骨材濃度(V_g/V_m)を求める。

2.7 実験結果および考察

図-3に各容積比 (V_g/V_m) で行った洗い分析試験より求めた粗骨材濃度 (V_g/V_m) の変動係数を示す。

配列Ⅰ，配列Ⅱ，棒材なしの落下型連続ミキサでは、 V_g/V_m が大きくなるに従い、変動係数が大きくなる。一方、配列Ⅲの落下型連続ミキサ

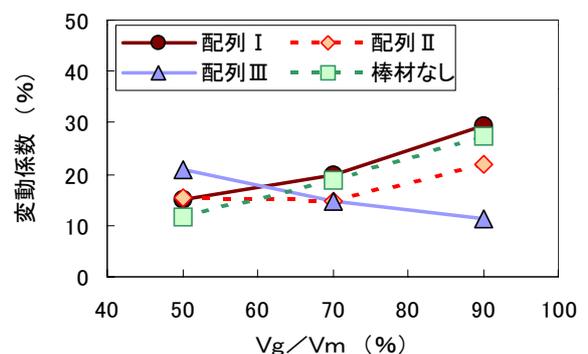


図-3 洗い分析試験結果

さは、 Vg/Vm が大きくなるに従い、変動係数が小さい。配列Ⅰと棒材なしはほぼ同じ傾向である。配列Ⅰの練混ぜ性能が材料を自由落下させたときの練混ぜ性能と同程度であることを示し、水平棒材を配置した効果があまりない。

配列Ⅰと配列Ⅱを比較すると、配列Ⅱの方が粗骨材濃度に関係なく変動係数が小さい。12本の水平棒材を配置するよりも、むしろ、自由落下の領域を与えた方が練混ぜ性能が良好なることを意味する。らせん状の水平棒材の配列距離には、最適値が存在する。

当然のことながら、先練りモルタルと粗骨材粒子群を均等に練り混ぜるため、粗骨材濃度が高くなるほど、練混ぜが難しい。配列Ⅰ、Ⅱおよび水平棒材なしは、この傾向である。しかしながら、配列Ⅲの練混ぜは逆の傾向であり、粗骨材濃度の高い配合の方が、練混ぜ性能が良好である。したがって、水平棒材なしの場合を含めて、4種類の配列パターンのうち、最も良好な練混ぜ性能は、配列Ⅲの落下型連続ミキサである。

3. 可視化実験

3.1 実験概要

可視化モデルコンクリートを用いた落下型ミキサによる練混ぜを行い、ミキサ内の練混ぜ状

況をビデオカメラで撮影し、ビデオ画像の画像解析による定量的評価を行った。

3.2 実験方法

落下型連続ミキサおよび配列パターン、材料の投入方法は、「2. 練混ぜ性能評価試験」と同様である。使用材料としてモデルコンクリートは、「2.3 モデルコンクリートの使用材料」と同じものを用いた。モデル粗骨材は、樹脂球（密度 $1.41g/cm^3$ ）を使用した。樹脂球は粒形 14mm の赤色球と粒形 10mm の緑色球の2種類の混合球である。モデルコンクリートの配合は、配列パターン間で練混ぜ性能に最も顕著な差が現れた $Vg/Vm90\%$ のみとした。実験ではミキサ内の材料の移動状況をビデオカメラによって撮影した。実験状況を図-4に示す。

3.3 可視化フレーム

ビデオカメラによる撮影は前面からのみの撮影であるが、各モデルミキサの可視化フレームは均等となるように設定した。詳細は、図-4に示す。

3.4 画像処理方法

撮影したビデオ画像から 0.033 秒間隔（ビデオ画像をコマ送りすると1コマは0.033秒間隔となる）の静止画像をパソコン上に取り込み、その静止画像の可視化フレーム前面に出現するすべての粗骨材の 0.033 秒（1コマ）ごとの粗骨材位

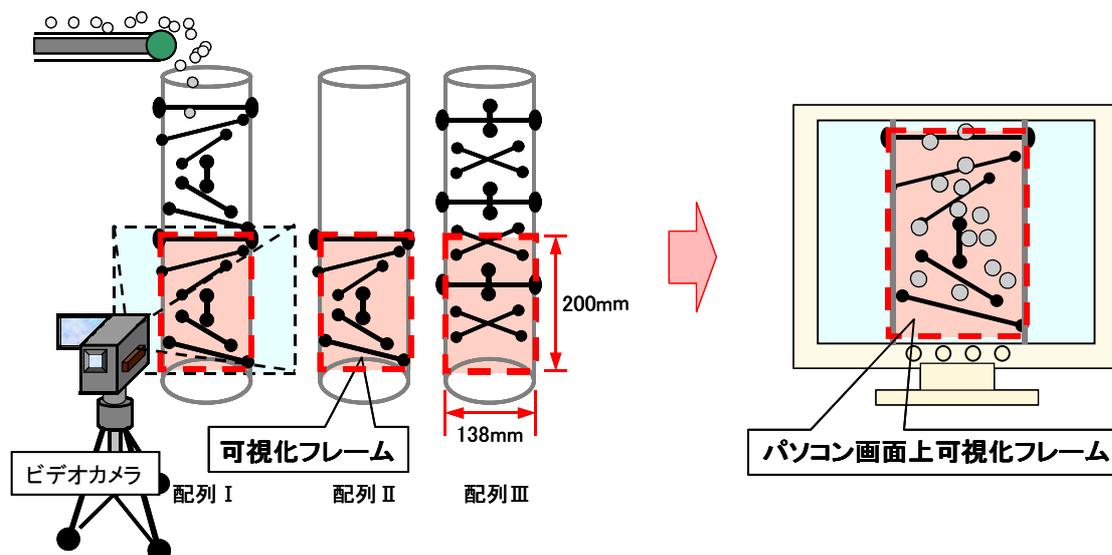


図-4 可視化フレーム

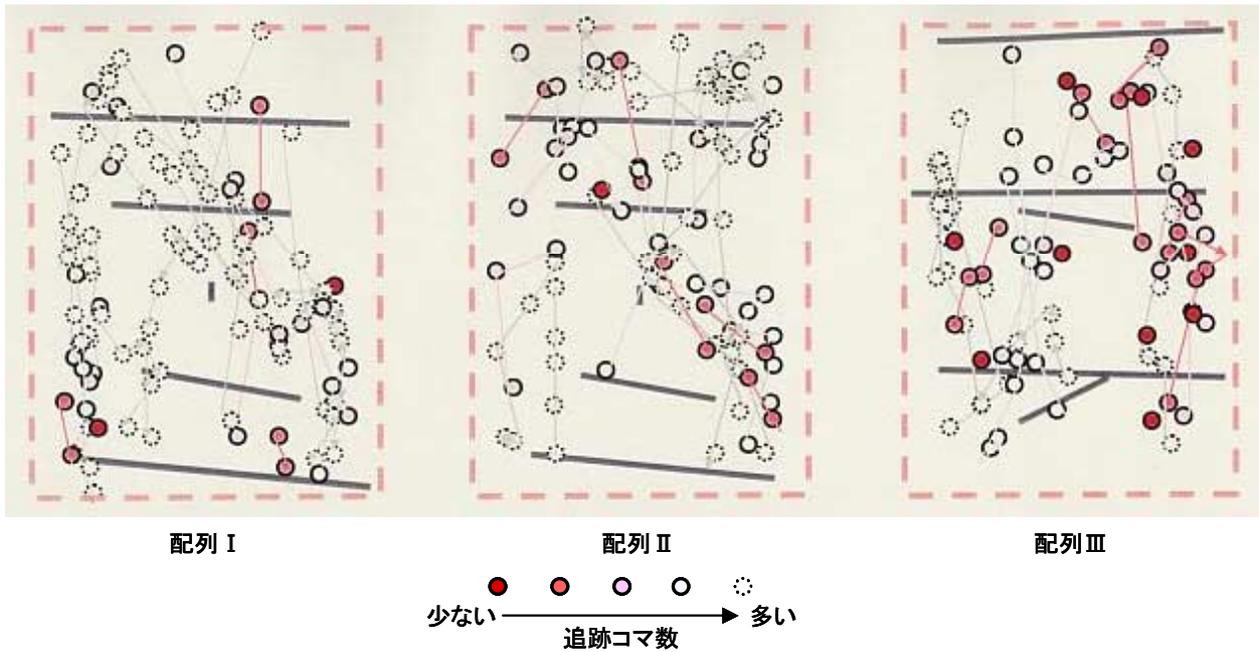


図-5 画像処理による追跡経路分布

置を追跡し、可視化フレームから黙認できなくなるまで追跡する。その追跡経路を 2 次元平面上に転換した追跡経路分布を求める。次に可視化フレームにおける粗骨材の滞留時間を評価するために、画像処理により求めた追跡経路の鉛直成分の距離を求め、追跡時間で除することで粗骨材落下速度を求める。画像処理した例を図-5 に示す。

3.5 画像処理方法

画像処理によって求めた粗骨材落下速度は、各可視化フレームによってデータ総数が異なり、単に粗骨材落下速度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、データ区間幅(H)を決定し、各データ区間に属する粗骨材落下速度の個数を求める。

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

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

a : データ中の最小値

b : データ中の最大値

n : 標本数

- (b) (a)で求めた頻度をデータ総数(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) 頻度密度を縦軸に粗骨材落下速度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。

3.6 実験結果および考察

図-6 に可視化フレーム内の粗骨材落下速度と頻度密度との関係を示す。一方、図-7 は追跡コマ数とデータ数の関係を示す。

最頻度密度区間 (以下、ピーク速度区間) に着目する。まず、棒材なしのピーク速度は 3.4m/s 程度となっている。ここで棒材なしは粗骨材の自由落下であるため、この可視化フレーム位置の自由落下速度を計算すると 3.63m/s であり、棒材なしの粗骨材落下速度は自由落下速度と同程度となる。次に、配列 I、配列 II、配列 III のピ

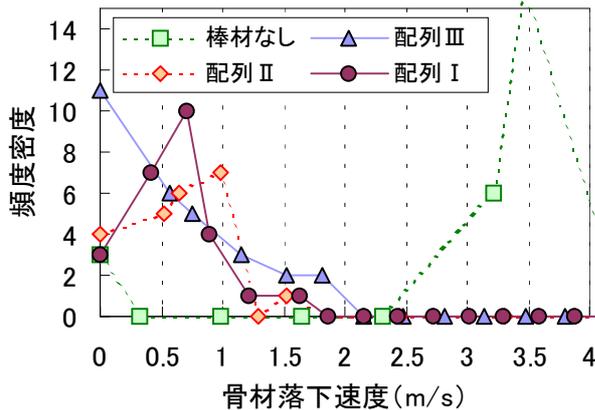


図-6 骨材落下速度分布

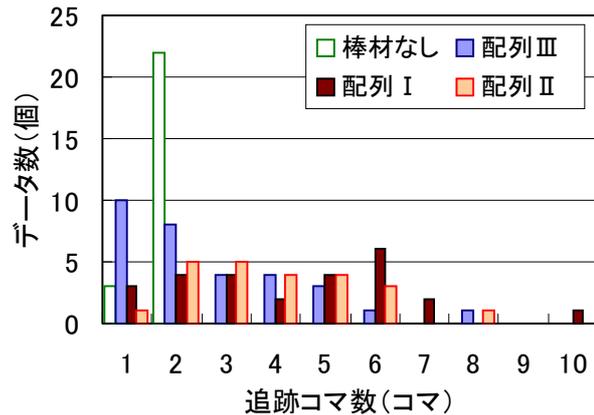


図-7 追跡コマ数分布

ーク速度は 0.71m/s, 0.99m/s, 0m/s となっている。

粗骨材落下速度は、配列Ⅲ、配列Ⅰ、配列Ⅱの順番で遅くなる。すなわち、粗骨材の滞留時間が長くなる配列パターンは、配列Ⅲ、配列Ⅰ、配列Ⅱの順番であることを意味する。

追跡コマ数のデータ数の分布においては、追跡コマ数が少ないことは、粗骨材の奥行き方向の移動を意味している。初めに、水平棒材なしでは、追跡コマ数 2 コマのデータ数が最も多い。落下速度が 3.4m/s 程度で非常に速いため、可視化フレームの枠内で追跡できるコマ数が 2 コマしかないという意味である。次に、配列Ⅰ、Ⅱ、Ⅲを比較すると、配列Ⅲは追跡コマ数が少ないデータ数が多い分布である。配列Ⅲは、配列ⅠおよびⅡに比較して、粗骨材粒子の奥行き方向の移動が多く、そのために追跡コマ数の少ない結果になったと考えられる。

配列ⅠとⅡは、追跡コマ数の少ないデータ数は同様の分布であるが、追跡コマ数の多いデータ数は、配列Ⅰの方が多い。配列Ⅰの方が、若干奥行き方向の移動が少ない配列である。

4. 結論

複数の水平棒材を有する円筒管形状の材料落下型連続ミキサの練混ぜ性能に関する可視化実験を行った結果、本実験の範囲内で得られた結果を以下に記す。

(1) らせん状の水平棒材の配列距離には、最適値

が存在する。

- (2) らせん状の配列よりも十字型に配列した水平棒材の方が、練混ぜ性能が良好である。
- (3) 水平棒材を十字型に配列した落下型連続ミキサは、粗骨材粒子群が、鉛直下向きの落下より水平奥行き方向の移動が多くなり、滞留時間が長くなる。この傾向は、粗骨材濃度が大きい配合になるほど顕著に現れる。

参考文献

- 1) Maeda,M.K., Yamada,K. and Uchida,A.: Evaluation on the Practicability of SCC, The Proceedings of The RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.617-628, Sep. 1999.
- 2) 藤戸幹大ほか: 材料落下型連続ミキサの練混ぜのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1109-1114, 2003.7
- 3) 橋本親典ほか: 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報告集, Vol.13, No.1, pp.89-94, 1991.6

【謝辞】本研究の一部は、(株)セイア（研究代表者：牛尾仁氏）との共同研究により実施しました。付記し深く感謝の意を表します。