

論文 材料落下型連続ミキサの形状がモデルコンクリートの練混ぜ性能に及ぼす影響

松本 純一^{*1}・橋本 親典^{*2}・水口 裕之^{*2}・上田 隆雄^{*3}

要旨: 材料落下型連続ミキサでは、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。本研究では、可視化モデルコンクリートを用いて、傾斜角が 60 度と 45 度の箱形容器の形状が練混ぜ性能に及ぼす影響について検討した。その結果、傾斜角 45 度の方が練混ぜ性能が良好であること、60 度の場合斜面部と落下部での骨材粒子群の落下速度の速度差による練混ぜ機構に対し、45 度の場合斜面部、落下部での骨材粒子群の速度と相対角度の集中と分散による練混ぜ機構であり、2 種類の容器形状は異なる練混ぜ機構であることが明らかになった。

キーワード: 落下型連続ミキサ, 練混ぜ性能, 可視化モデル, 速度分布, 相対角度分布

1. はじめに

現在、構造物の大型化にともない短時間で大容量のコンクリートを製造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¹⁾の研究グループによって、従来のバッチ式ミキサによる練混ぜと全く異なる重力による材料落下型の連続ミキサ（以下、落下型ミキサと称す）が開発され実用化²⁾されている。この重力による材料落下型連続ミキサは、**図-1**に示す箱形容器を複数個で構成し、この連結した容器内を重力によって材料が、並列に分割された入口と出口の間を落下することにより、材料の練混ぜが行われるものである。なお、分割された入口と出口の壁は直角に交差する位置にある。

著者らは、落下型ミキサの練混ぜ機構を解明することを目的として、1/2 スケールの 6 連の亚克力樹脂製で製作した箱形容器による落下型ミキサを用いて、可視化モデルコンクリートによる可視化実験を行った。その結果、**図-1**に示す箱形容器の斜面部と落下部を材料が落下するときに計測される落下速度の頻度分布から、斜面部と落下部で落下する速度差（相対速度）の繰り返しが、モルタルと粗骨材の練混ぜを活

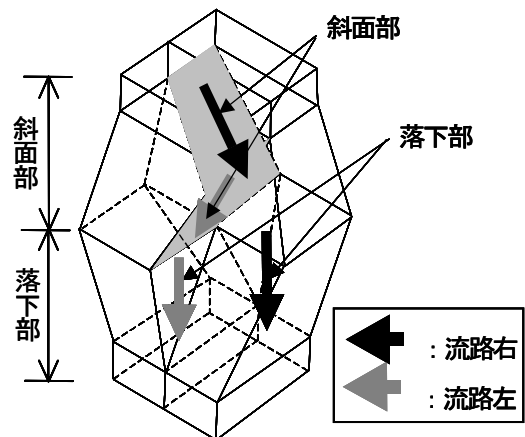


図-1 箱形容器の概観と落下経路

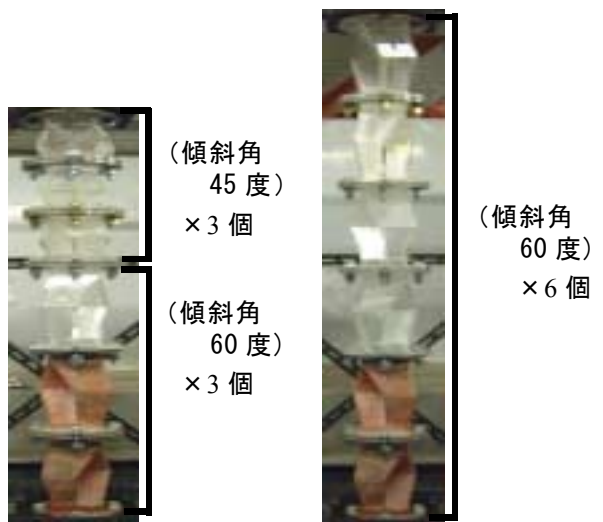
発にすることを明らかにした³⁾。

本研究では、傾斜角が 45 度と 60 度の箱形容器（以下、傾斜角 45 度及び 60 度）に着目し、箱形容器の形状が落下型ミキサの練混ぜ性能に及ぼす影響について検討するものである。まず、洗い分析試験により傾斜角 60 度と 45 度の練り混ぜ性能比を検証する。次に、落下型ミキサ内を落下する粗骨材粒子群の落下速度及び落下角度の発生頻度分布を求め、練混ぜ性能と頻度分布の関係から、練混ぜ機構の相違点を実験的に解明した。

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博（正会員）

*3 徳島大学助教授 工学部建設工学科 工博（正会員）



傾斜角 45 度のミキサ 傾斜角 60 度のミキサ

写真-1 実験に用いた 2 種類の落下型ミキサ

2. 練混ぜ性能実験

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モデルミキサを写真-1 に示す。落下型ミキサは箱形容器 6 連からなる。モデルミキサとしては、箱形容器の形状を実機の 1/2 スケールでモデル化したものである。材料投入口から 3 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とした。4 連目以降は鋼製である。

傾斜角 45 度の落下型ミキサは、閉塞の可能性を考慮して、材料投入口から 3 連目までを傾斜角度 45 度の箱型容器とし、4 連目から 6 連目までを傾斜角 60 度の鋼製箱形容器をした。傾斜角 60 度の落下型ミキサは、6 連すべて傾斜角 60 度の箱形容器である。

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（密度 1.0）を用いた。モデル粗骨材は、人工軽量粗骨材であり、最大粗骨材寸法が 15mm（密度 1.28）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。

2.3 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 で一定として製造した。粘性は、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を用いたミニスランプフローにより制御し、ミニスランプフローの目標値は 180 ±2 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ルの容積比（以下、 V_g/V_m ）を 40, 50, 70 および 90% の 4 種類とした。

2.4 落下型ミキサによる練混ぜ方法

落下型ミキサは、モルタルと粗骨材を投入するだけで練混ぜが行えるミキサであるが、一度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 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 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ェスで拭き取った後、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 3 回の

練混ぜを実施し、1配合について合計15回分の洗い分析試験を行う。

⑥ 粗骨材質量とモルタル質量を計量し各密度で除して容積に換算し、 Vg/Vm を求め、平均値と標準偏差を算出し、変動係数を求める。

2.6 実験結果および考察

傾斜角60度に対する傾斜角45度の変動係数比の関係を図-2に示す。傾斜角の違いによる練混ぜ性能を比較すると、傾斜角45度の落下型ミキサは、傾斜角60度のものより変動係数が等しいか小さい。よって、傾斜角45度の落下型ミ

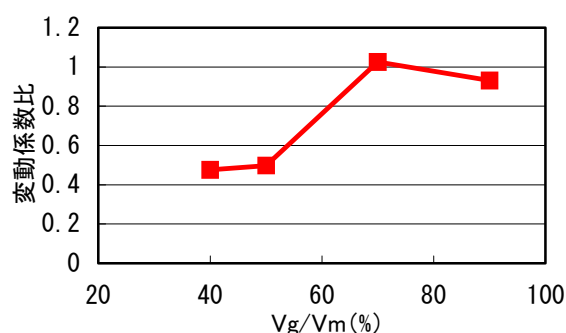


図-2 練混ぜ性能実験結果

キサは、60度よりも練混ぜ性能が高い。

3. 可視化実験

前章で検討した容器形状と骨材濃度が落下型ミキサの練混ぜ性能に与える影響を、可視化実験によって検討し、ミキサ形状が練混ぜ機構に与える影響について明らかにする。

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、 Vg/Vm を40, 50, 70%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適量の粗骨材粒子のみを自由落下させることを意味する。

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、その組み合わせ

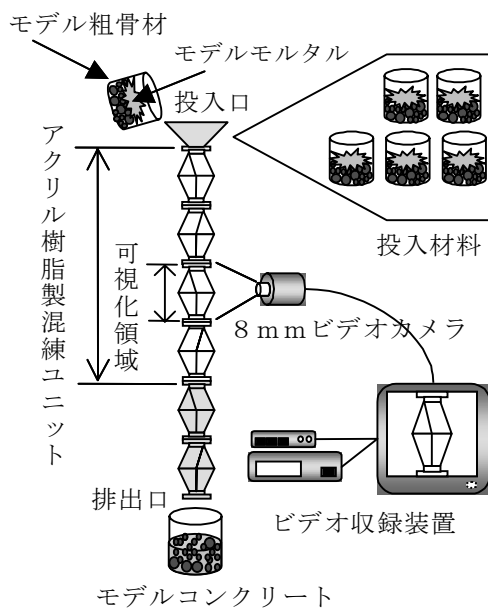


図-3 可視化実験装置

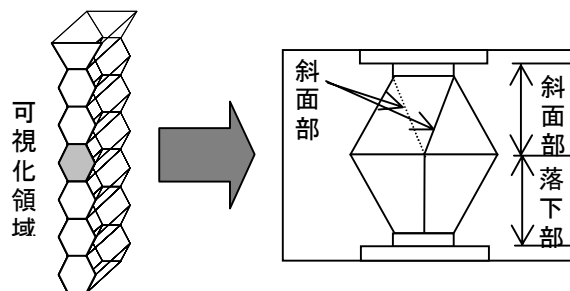


図-4 可視化断面

わせの最小単位である3連目の箱形容器を可視化領域に選定し、図-4に示す前面からの撮影を行い、可視化実験を行った。

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速度ベクトルから、2次元平面上に転換した速度分布及び相対角度分布を求める。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、箱形容器内の粗骨材の挙動の違いにより斜面部・落下部の二つのエリアに区切ることにした。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-1参照)。取得した粗骨材速度及び角度の総数は1エリアにつき100個以上とした。また、角度については、各傾斜角から相対的に測った角度(以下、相対角度)を用

いた。

3.4 速度分布処理方法

画像処理によって求めた速度及び角度は、可視化断面および斜面部と落下部によって総数が異なり、単に速度及び角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。

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

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

a ; データ中の最小値, b ; データ中の最大値,
n ; 標本数

- (a) 式(1)に示すように、斜面部と落下部のデータ区間幅(H)を決定し、各データ区間に属する速度及び角度の個数を求める。
- (b) (a)で求めた頻度を各エリアの速度あるいは相対速度の総数(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及び角度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。

3.5 実験結果および考察

(1) 粗骨材のみの自由落下

図-5, 6に、粗骨材粒子のみを落下型ミキサ内に投入し自由に落下させたときの斜面部と落下部で計測された速度及び相対角度の頻度密度分布を示す。速度においては、傾斜角45度と60度共に、斜面部と落下部でほぼ同様の速度分布が得られた。また、平均速度が傾斜角によって異なるのは、投入位置から可視化断面までの距離(落下高さ)が、傾斜角45度の場合は51.5~56.0cm、傾斜角60度の場合は76.0~84.0cmであり、傾斜角45度の方が距離が短いためであ

る。投入口での粗骨材粒子の初速度を零として、可視化断面までの距離の間を自由落下すると仮定した場合、可視化断面高さ中間位置で傾斜角45度では325cm/s、傾斜角60度では396cm/sとなる。この値は、計測された最大頻度密度の速度区間より相当大きい。粗骨材粒子群および粒子と斜面の衝突による落下速度の減衰が大きく、傾斜角度に関係なく投入口から3連目程度ですでに落下速度は一定の終末速度に近い値になると考えられる。

角度においては、傾斜角60度では、斜面部、落下部共に相対角10~20度で、集中した頻度密度分布を示すのに対し、傾斜角45度では全体的に分散している。粗骨材粒子1個の理想的な完全弾性衝突を考えた場合、傾斜角45度の場合、鉛直下向きに落下する粗骨材が45度の斜面に衝突すると水平方向に反発する。一方、傾斜角60

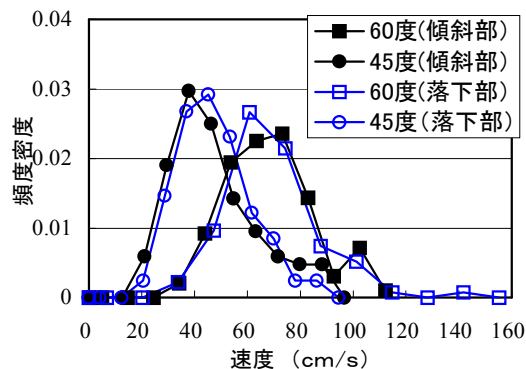


図-5 粗骨材のみの斜面部と落下部の速度ベクトルの頻度密度分布

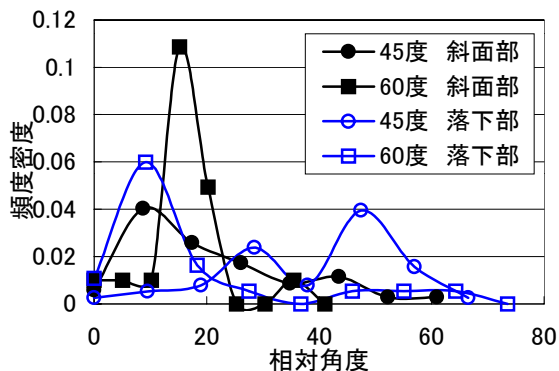


図-6 粗骨材のみの斜面部と落下部の相対角度の頻度密度分布

度では、完全衝突であっても鉛直下向き方向である。つまり、傾斜角 60 度では、鉛直下向きの方向に集中する。したがって、傾斜角 45 度の方が、相対角度が広く分散する。この差異が、両者の練混ぜ機構に大きな影響するものと考えられる。

(2) 練混ぜ機構の解明

図-7, 8 に、傾斜角 60 度と 45 度における斜面部と落下部での速度の頻度密度分布の比較を図-9, 10 に、傾斜角 60 度と 45 度における斜面部と落下部での相対角度の頻度密度分布の比較 (Vg/Vm50%) を示す。なお、この傾向は Vg/Vm40, 70% においても同様である。

速度分布における傾斜角 60 度では、斜面部から落下部にかけてグラフの分布形状が右側にほぼ平行に移行しているのに対し、傾斜角 45 度では、斜面部から落下部にかけて頻度密度が右側に広がりながら移行している。

相対角度分布における傾斜角 60 度では、多少のばらつきはあるものの斜面部、落下部を通して頻度密度は分散している。これに対して傾斜角 45 度では、斜面部から落下部にかけて頻度密度が集中している。

粗骨材のみの落下において、傾斜角 45 度では理論上衝突後水平方向に跳ね返りやすい。これに対し、傾斜角度 60 度では、衝突後も鉛直下向き方向に跳ね返るため、相対角度の頻度分布では、30 度付近に集中する。一方、傾斜角 45 度のモデルコンクリート中の骨材粒子の落下速度は非常に小さくなり、骨材が周辺のモデルモルタルの拘束を受けやすくなる。モルタルが付着した骨材と壁面の衝突では、衝突によるエネルギーロスが大きくほとんど斜面方向に近い角度でしか跳ね返らないものと思われる。傾斜角度 60 度では、モデルコンクリート中であっても骨材の落下速度はある程度大きいいため、骨材の

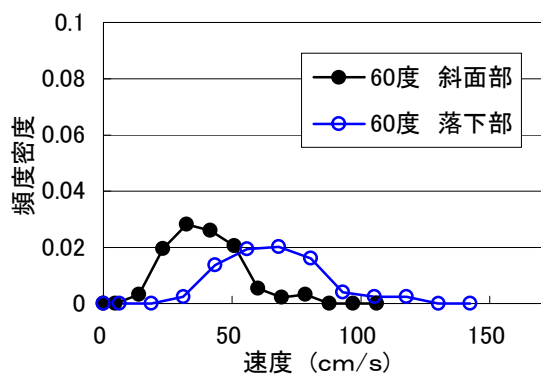


図-7 傾斜角 60 度の斜面部と落下部の速度分布比較 (Vg/Vm50%)

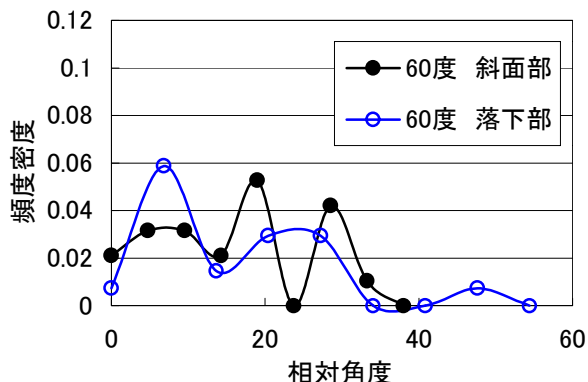


図-9 傾斜角 60 度の斜面部と落下部の相対角度比較 (Vg/Vm50%)

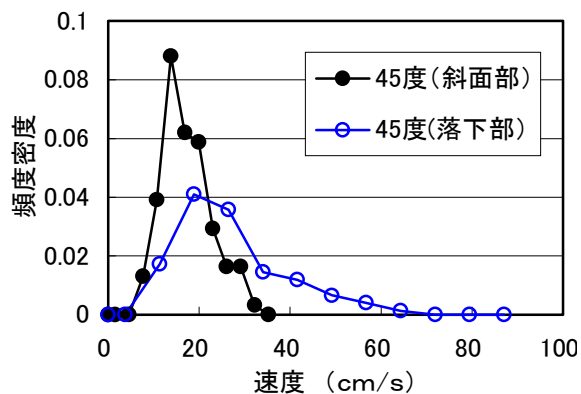


図-8 傾斜角 45 度の斜面部と落下部の速度分布比較 (Vg/Vm50%)

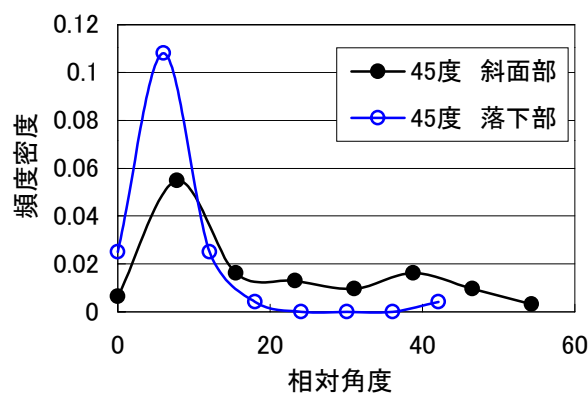


図-10 傾斜角 45 度の斜面部と落下部の相対角度分布比較 (Vg/Vm50%)

みの落下の場合と同様な方向に跳ね返る。その結果、粗骨材のみの落下とコンクリート中の骨材の落下で、傾斜角度に対する影響が逆になったものと考えられる。

既往の知見²⁾より、傾斜角 60 度の練混ぜ機構が斜面部と落下部での粗骨材粒子の速度差により、その値が大きいほど良好な練混ぜが行われるということが明らかにされており、この速度差は図中の斜面部から落下部への移行量にあたる。2. より、傾斜角 45 度の方が 60 度の方よりも良好な練り混ぜが行われているが、速度差は、60 度の方が大きくなっている。以上のことから傾斜角 45 度と 60 度では、練混ぜ機構が異なっていると推測される。

傾斜角 45 度の斜面部では、速度が低い値で

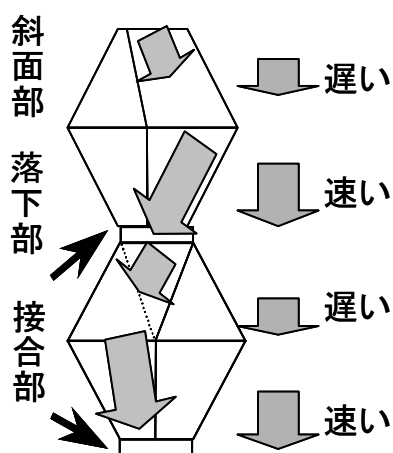


図-11 傾斜角 60 度の練混ぜ機構

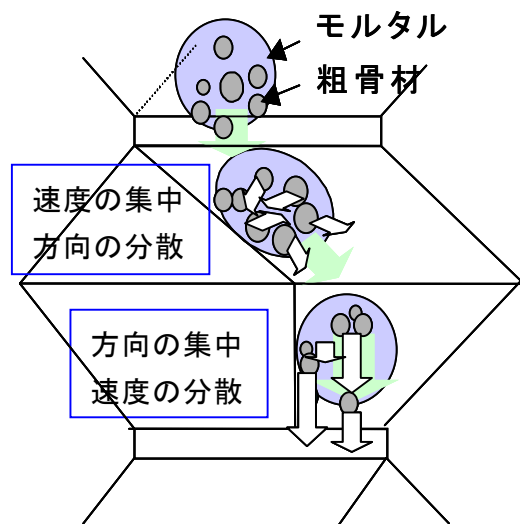


図-12 傾斜角 45 度の練混ぜ機構

集中し、移動方向が分散する。落下部では、速度が分散し移動方向が集中する。このことが傾斜角 45 度における練混ぜ機構に影響を与えているものと考えられる。

図-11, 12 に傾斜角 60 度と 45 度における練混ぜ機構の違いを示す。

4. 結論

以下に、本実験の範囲内で得られた結果を示す。

- (1) 傾斜角 45 度の方が傾斜角 60 度の方よりも練混ぜ性能が良好である。
- (2) 傾斜角 60 度の練混ぜ機構と 45 度の練混ぜ機構は異なっており、60 度の場合の練混ぜは、斜面部と落下部での材料の落下速度の速度差によるのに対し、45 度の場合は、斜面部での骨材粒子群の速度の集中と移動方向の分散、落下部での速度の分散と移動方向の集中による練混ぜ機構である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、前田建設工業㈱ならびに同社新規事業部の山田一宇博士、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) 田中哲治, 和田一範; 宮ノ川ダムにおける JIOCE 式高速連続ミキサの適用, ダム技術 No.171, pp.47-57, 2000. 12
- 3) 石丸啓輔, 橋本親典, 山地功二, 八藤辰弥; 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.1303-1308, 2000.