論文 材料落下型連続ミキサの練混ぜのモデル化

藤戸 幹大*1·渡辺 健*2·橋本 親典*3·石丸 啓輔*4

要旨:材料落下型連続ミキサでは,鉛直方向に複数連結された箱型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,材料の落下を進入位置と進入角度で表現し,材料が容器内壁を衝突しながら落下する過程を非完全弾性衝突としてモデル化し,箱型容器の傾斜角によるミキサ内のコンクリートの落下状態を相対経路長さの頻度分布で定量的に表現した。箱形容器内での練混ぜ過程を可視化し,画像解析によって求めた実測相対経路長さの頻度分布と比較した結果, 箱形容器の傾斜角による練混ぜ性能の違いをモデル化することができた。

キーワード:材料落下型連続ミキサ,非完全弾性衝突,可視化実験,相対経路

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(以後,落下型ミキサと称す)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,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,2 つの落下経路に従って,入口と 出口の間を 90 度回転しながら落下することに より,材料の練混ぜが行われるものである。

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 アクリル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



図-1 箱型容器の概観と落下経路

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 ぜを活発にすることを明らかにした²⁾。また, 写真-1に示す箱形容器の傾斜角45度と60度 の練混ぜ性能の違いについても検討し,傾斜角 45度の方が練混ぜ性能が良好であるメカニズ ムを明らかにした³⁾。

本研究では、ミキサ内での材料の滞留時間が 落下経路に依存すると仮定し、落下型ミキサの 材料の落下経路を進入位置と進入角度でモデ

- *1 徳島大学 工学研究科建設工学専攻(正会員)
- *2 徳島大学助手 工学部建設工学科 博士 (工学) (正会員)
- *3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)
- *4 徳島大学技官 工学部建設工学科(正会員)



ル化し,落下する骨材が箱形容器の壁に衝突す る現象を非完全弾性衝突と仮定し,相対経路長 さの頻度分布で,練混ぜ性能を評価した。

次に、図-2に示す傾斜角 45 度と 60 度の箱 形容器の練混ぜ性能の違いを相対経路長さの 頻度分布で定量的に評価することを目的とし て、樹脂球、人工軽量粗骨材粒子単体の落下お よびモデルモルタルと人工軽量粗骨材粒子の 練混ぜに関する可視化実験を行い、実測相対経 路長さを求め、モデル化の妥当性の検証を試み た。

2. 材料落下経路のモデル化

落下型ミキサは,混練ユニットである箱型容 器を規則正しく配置しているため,その最小の 単位である一つの箱型容器の経路を考えるこ とにした。

2.1 骨材粒子と壁の衝突に関するモデル化

材料の落下経路を考える上で,粗骨材と壁と の衝突の影響を図-3 に示す入射角と反射角が 非対称となる力学モデルにより表した。この仮 定は,はね返り係数が,壁に対して鉛直方向の みとし,衝突の前後で速度ベクトルの長さは同 じで,速度ベクトルの鉛直成分の長さが減少す ることで入射角と反射角が非対称となる仮定 である。はね返り係数は,1.0~0.1 の範囲で変 化させた。

2.2 骨材粒子群の落下のモデル化



図-4 粗骨材の進入位置と進入角度

骨材粒子群の落下のシミュレーションとし て、箱形容器内に進入する位置と角度で表現し た。進入位置は、箱型容器の入口(上部)に水 平方向に 5mm 間隔に 13 箇所とし、進入角度は 垂直と垂直方向から左右に 5 度, 10 度, 15 度, とし合計 91 経路を仮定した。図-4 に進入位置 および進入角度を示す。

2.3 経路の求め方

まず,経路を計算する上で,箱型容器を座標 上に示して計算を進める。図-5に示す点Oを (0,0)座標とした。

以下の手順で計算を進めた。

- (a) 点 A は骨材の進入位置を示し,進入角度を λとする。
- (b) 角度λで進入してきた骨材は点 B ではね 返る。ここで経路 AB は点 A を通る傾き tan(λ+90)の直線で表すことができる。
- (c) 点 B での跳ね返り角度 θ は 2.1 で示した仮 定により求める。ここで経路 BC は点 B を 通る傾き tan(90- $\alpha - \theta$)の直線で表せる。
- (d) この繰り返しにより経路を直線の式で表し、跳ね返る点の座標を求め、落下経路の距離を求める。



図-5 落下経路の求め方

上述の手順により求めた落下経路の一般的 なものを図-6 に示す。箱形容器の傾斜角と想 定した落下粒子の進入位置と進入角度はすべ て同じである。はね返り係数の違いによる落下 経路の違いを示す。はね返り係数が 1.0 から小 さくになるに従い,箱形容器内での骨材の経路 長さが短くなる。これは,骨材の滞留時間が短 くなることを意味する。

2.4 仮定した経路での評価方法

求められた落下経路で練混ぜ機構を評価す る上で,まず,箱型容器内の粗骨材の挙動の違 いにより斜面部・落下部の2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-1参照)。斜面部と落下部で比 較することで粗骨材の動きを評価するためで ある。 以下に,評価方法の手順を示す。

- (a) 仮定した経路それぞれの距離を斜面部・落 下部それぞれで計算する。
- (b) (a)で求めた距離を最小落下距離つまり鉛 直に落下した場合の距離で除し相対経路 長さを求める。
- (c) 相対経路長さのデータ区間幅を 0.2 とし、 各データ区間に属する相対経路長さのデ ータの個数を求める。
- (d) (c)で求めた個数をデータの総数で除する ことで相対頻度を求める。

3. 可視化実験

3.1 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は写真-1 に示す2種類である。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。

3.2 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、細骨材とセメントペー ストを一相流体と仮定して、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/cm³)を用い た。モデル粗骨材は、樹脂球と人工軽量粗骨材 であり、樹脂球(密度 1.41g/cm³)は粒形 14mm



はね返り係数1



はね返り係数0.9 はね返り係数0.5 図-6 解析により求められた落下経路



はね返り係数 0.25

の赤色球と粒形 10mm の緑色球の 2 種類の混合 球である。人工軽量粗骨材は最大粗骨材寸法が 15mm(密度 1.28g/cm³)のものを使用した。樹 脂球を用いた理由は、形状が球の粗骨材を使用 して完全にモデル化することで、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。

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。モデル粗骨材 とモデルモルタルの容積比を 50%とした。

材料の投入方法は参考文献²⁾に詳細に記述し ているので本論文では省略する。

3.3 試験方法

可視化実験装置を図-7 に示す。2 種類の粗 骨材粒子のみの自由落下と、人工軽量骨材とモ ルタルの練混ぜの計3種類の可視化実験を行っ た。ミキサ内の材料の移動状況を 8mm ビデオ カメラによって撮影した。

3.4 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を求める。なお,2. と同様に可視化断面における粗骨材の動きを 評価するために,箱型容器内の粗骨材の挙動の 違いにより斜面部・落下部の2つのエリアに区 切ることとした。取得した粗骨材移動ベクトル の総数は1エリアにつき100個以上とした。

画像処理により求めた移動距離をその移動 距離の鉛直成分の距離で除し単位時間あたり の相対経路長さを求める。相対頻度の求め方は 2.4 と同様とし,データ区間幅 0.2 における相 対頻度を求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 粗骨材のみの落下

図-8, 図-9 は樹脂球および人工軽量粗骨材 粒子群単位の落下の可視化実験から求めた実 測相対経路長さの頻度分布を示す。一方, 図-10 は, はね返り係数 0.9 での落下経路のシミュ



図-7 可視化実験装置

レーションによって得られた相対経路長さの 頻度分布を示す。

粒子群の自由落下では、粒子と壁との衝突が 活発であり、傾斜角 60 度の方は斜面部で相対 距離 1.2 以下の頻度が高く、落下部では均等な 頻度分布になっている。また、傾斜角 45 度の 方は斜面部で相対距離 1.6, 1.8 の頻度が高く、 落下部で相対距離 1.2 の頻度が高くなっている。 ここで、相対距離が大きい値だと容器内を骨材 がよく移動しているということなので、骨材は よく滞留していることになる。これより、傾斜 角 60 度の場合、落下部でよく滞留する傾向を 示し。45 度の場合、斜面部でよく滞留する傾向を 示している。また、図-10 の落下シミュレー ションによって得られた頻度分布と比較した 場合、同様の傾向を示している。

人工軽量粗骨材の落下では、傾斜角が相対経 路長さの頻度分布に及ぼす影響は小さい。表面 が不均一な人工軽量骨材の落下経路は、はね返 り係数 0.9 として求めた落下シミュレーション とは異なるものと考えられる。

落下経路のシミュレーションによる相対経











図-10 粗骨材のみの落下経路をモデル化したもの(はね返り係数0.9)

路長さの頻度分布は,人工軽量粗骨材粒子群の 落下よりも樹脂球の落下の実測相対経路長さ の頻度分布に近似している。

これより,はね返り係数を用いることによっ て,粒子形状による落下経路の違いを表現する ことができると考えられる。箱形容器の傾斜角 による粒子の滞留時間の違いについても,はね 返り係数でモデル化できる。

4.2 コンクリート材料の落下

図-11 はモデルモルタルと人工軽量粗骨材

粒子群の練混ぜ過程の可視化実験から求めた 実測相対経路長さの頻度分布を示す。図-12は はね返り係数 0.25 での落下経路のシミュレー ションによって得られた相対経路長さの頻度 分布を示す。

斜面部と落下部の2つのエリアでの挙動の違いに関しては,傾斜角 60 度の方は,実測相対経路長さの頻度分布と落下シミュレーションによって求めた相対経路長さの頻度分布は斜面部・落下部とも同じ傾向を示す。しかしなが



図-11 コンクリート材料の可視化実験(人工軽量骨材)



図-12 コンクリート材料の落下経路をモデル化したもの(はね返り係数0.25)

ら, 傾斜角 45 度では, 落下部での両頻度分布 が一致していない。

したがって、モデルモルタルと人工軽量粗骨 材粒子群の練混ぜ過程では、容器形状が傾斜角 60 度の練混ぜは本落下シミュレーションでモ デル化可能であるが、容器形状が傾斜角 45 度 の落下部での練混ぜのモデル化が難しい。これ は傾斜角度 45 度において、落下部で内壁に付 着したモデルモルタルの粘性の影響が相当に 強く、粗骨材粒子を強制的に鉛直方向に落下さ せており、このモデル化が簡単な衝突モデルで は再現できないためと考えられる。

4. 結論

材料落下型連続ミキサの練混ぜ機構を解明 するために、材料の落下を進入位置と進入角度 で表現し、材料が容器内壁を衝突しながら落下 する過程を非弾性衝突としてはね返り係数を パラメータとすることにより、傾斜角 60 度の 箱形容器においては材料落下シミュレーショ ンモデルを提案することができたが、傾斜角 45 度においては、このモデルでは再現できなかった。この点について、箱型容器の傾斜角の小さい時はモルタル付着骨材の容器内部との吸着の影響及び骨材同士の衝突の影響が大きいように思われる。これは今後の検討課題である。 参考文献

- 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) 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
- 3) 松本純一,橋本親典,水口裕之,上田隆雄; 材料落下型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,コンクリ ート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1023-1028,2002.