3次元画像解析手法を用いた 2軸強制練りミキサの流動解析とその定量化

Flow analysis and quantification of bi-axial forced-mixing type mixer using three-dimensional image analysis method

篭谷 武*1 · 中島 翼*2 · 橋本 親典*3 · 渡邉 健*4

要旨:近年,高強度・高流動コンクリートのような高粉体量の配合が多い。これらは、従来の低スランプコンクリートに比 べ、粗骨材割合が少ないため、コンクリートミキサによる練混ぜ時間は長くなる傾向にある。2軸強制練りミキサの高性能 化にはミキサ内のコンクリート流動を明らかにする必要がある。本研究では、フレッシュコンクリートの可視化実験による3 次元画像解析手法を用い、ミキサのブレード回転方向および、ブレード傾斜角度の違いによるミキサ内モデルコンクリート の流動挙動を解析し、定量化した。

キーワード:2軸強制練りミキサ,可視化実験,3次元,画像解析

1. はじめに

近年,高強度コンクリート,高流動コンクリート,超高強度 モルタル等の数多くの高性能コンクリートが出現している。こ れらは構造物の設計や施工の概念を大きく変化させるだけ でなく,配合設計や練混ぜ等の製造技術に対しても大きな 影響を与える結果となった。これらのコンクリートは、超微粒 子であるシリカフュームや高炉スラグ微粉末、フライアッシュ などの混和材を混合し、従来に比べ粉体量が多い。高粉体 配合の高性能コンクリートは,普通コンクリートに比べ,材料 本来の性能を発揮する状態まで練り混ぜるのに時間を長く とる必要がある。例えば100N/mm²を超える超高強度コン クリートの練混ぜ時間は、通常120秒以上を必要とする。こ のため、レディーミクストコンクリート工場では、供給能力の低 下が問題となっている。この原因は、高強度コンクリート配合 が,高粉体量であり,かつ単位粗骨材量が850kg/m3前後 で極端に粗骨材量が少ないことにより, 粗骨材粒子群の回 転・衝突による練混ぜが期待できないためである。そのた め、高性能コンクリートの練混ぜ時間の短縮を可能とする2 軸強制練りミキサの高性能化が要求されている。

これまで橋本ら1)は、2軸強制練りミキサのコンクリート練混 ぜ機構の解明を目的とし、フレッシュコンクリートの可視化モ デルを用いて,ミキサ内のコンクリートの挙動をビデオ画像で 記録する試験方法を提案した。この手法を用いて,吉田ら2) は、ブレード形状の違いによる混合度を定量的に評価し、練 混ぜ性能への影響を明らかにし、ミキサの性能向上へと役 立てた。

本研究では、粉体量が多い高強度コンクリートに適したコ ンクリートミキサによる新たな練混ぜの可能性を追求すべく、 可視化実験による3次元画像解析手法を用い、ブレードの回 転方向、ブレードの傾斜角度が、モデルコンクリートの流動に 与える影響を解析し、定量化した。

2.2軸強制練りミキサの流動形態

図-1に2軸強制練りミキサの練混ぜに寄与する2つの流 動機構の概念を示す3)。1本のシャフト回りには、"らせん流 動"が形成される。隣り合ったシャフトから逆位相に発生する らせん流動によりミキサ内を循環する"巨視的な練混ぜ"は 「全体循環流動」と呼ばれ、投入された粒度が大きく異なる 各種粉体材料を均一に混合する流れを形成する。2本の シャフト間において逆位相のらせん流動が交互に衝突し合 うことにより形成する"微視的な練混ぜ"は「局部交錯流動」 と呼ばれ、セメント粒子と水の接触頻度を高め、セメントの水 和反応を活発にする作用を与える流れを形成する。



図-1 2軸強制練りミキサの流動形態3)

3.2軸強制練りミキサのブレードの回転方向

2軸強制練りミキサの回転方向を図-2に示すように、外 側から内側へ回転する方向を正回転,内側から外側へ回 転する方向を逆回転と定義する。コンクリート分野での2軸 強制練りミキサのブレード回転方向は、正回転方向である。 その理由の一つにブレードとケーシング間への粗骨材の噛 み込みの影響を緩和することが挙げられる。

- *1 日工(株) 産業機械技術センター(正会員)
- *2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)
- *3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部理工学域 社会基盤デザイン系 教授 工博(正会員)
- *4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部理工学域 社会基盤デザイン系 准教授 博(工)(正会員)

3次元画像解析手法を用いた2軸強制練りミキサの流動解析とその定量化

一般的な練混ぜ量の場合、練混ぜ中の材料高さはミキサ 軸中心より下に位置するため、ブレードがケーシングへ接近 するときの粗骨材を噛み込むスペースを極力少なくできるよ うになっている。これを逆回転方向に回した場合、ブレード が粗骨材を運びながらケーシング中央へ進入するため、粗 骨材を噛み込みやすくなるのである。

一方,化学や食品分野においては、ニーダ4)のように逆 回転方向に回すミキサは存在する。ニーダとは2本の混合 翼が互いに逆方向に回転し, 混合物をせん断・圧縮・引き 伸ばして練り混ぜる装置のことであり、主に粘性材料に使 用される。しかし、噛み込みの懸念のある材料では一般的 に使用されない。冒頭での説明のように近年の高強度コン クリートのように高粉体配合が増えており、これらは高粘性 のモルタルをいかに早く練り混ぜられるかが重要であるた め、ブレードの回転方向による練混ぜへの影響を解明する ことは重要であると考えられる。

4. 実験概要

4.1 使用ミキサ

本実験で用いたモデル2軸強制練りミキサの写真と諸元 を写真-1,表-1に示す。実験に用いたモデル2軸強制練 りミキサの容量は34.5ℓであり、公称2.25m3の実機ミキサ の約1/65の縮尺モデルである。ミキサケーシング部は透明 のアクリル樹脂製であり、ミキサケーシング部を固定している 架台とモータ部に遮られている部分以外は,いずれの方向 からも内部透視が可能である。ブレードは連続らせん形状 で、複数のアームによりシャフトに固定されている。また、ミキ サ軸回転速度はモデルコンクリートが実際のコンクリートの 流動に近くなるように設定し,実験を行った。

4.2 使用材料

実験では、高粘性コンクリートを1相系の粘性流体と仮定 し、モデルコンクリートとして無色透明である高吸水性高分 子樹脂水溶液(密度1.0g/cm3)を用いた。モデルコンク リートの粘性は、高分子樹脂の添加量によって変化させる ことが可能である。モデルフレッシュコンクリートの粘性は、ミ ニスランプフローを用いて評価し, 添加量4.0g/ℓでフロー 値250mmで一定とした。また、流動の挙動を追跡する着目 トレーサー粒子(以降、トレーサー粒子と称する)として、直 径20mmの高弾性樹脂球を用いた。

4.3 実験パラメータ

4.3.1 ブレードの回転方向

モデルミキサブレード構成と回転方向を図-3に示す。 パラメータは正回転、逆回転の2パターンとした。正回転の ブレード構成で逆回転させると、材料が逆方向に送られ、 ケーシング内を循環しないため、逆回転時は、シャフトを左 右入替えて、ブレードが材料を循環させるように変更した。 また、本実験におけるもう一つのパラメータであるブレード の傾斜角度は0度とした。



逆回転 図-2 ブレードの回転方向



写真-1 モデルミキサの容器形状

衣一 しノルミイリに戻する相儿		
練混ぜ容量	(ℓ)	34.5
ケーシング長	さ L (mm)	474
ケーシング幅	W (mm)	536
ケーシング半	径 R (mm)	135
モータ動力]	P (kW)	0.2
軸回転速度	N (min^1)	37.5

エニリンとサル関ナフジー





左:正回転,右:逆回転 図-3 回転方向および形状

4.3.2 ミキサブレード傾斜角度

傾斜ブレード取付図を図-4に示す。ブレードは、アーム 先端に取り付けられる。通常のブレードは図の0度の配置 のものである。本実験では、このブレード前面に傾斜ブレー ドを取付け、傾斜角度を0度(傾斜ブレードなし),15度,35 度で変化させた。また,回転方向は,正回転で行った。



4.4 実験方法

実験および,解析手順を以下に示す。また,写真-2に試 験風景を示す。

- (1) 図-5に示すように、トレーサー粒子の位置座標(x, v, z)の読み取りのため、ケーシングに黒線にて50mm単 位でスリットを描き、10mm単位で読み取れるよう補助 メモリを記した。ケーシング底面の画面中心に原点をと り、x-v平面とした。側面画面にはz軸を縦方向にとり、 x-z平面とした。ケーシングは曲面のため、50mmのス リット間隔はビデオ画面では長さが異なる。y軸とz軸の 位置座標はこの曲面を考慮して修正した。
- (2) 所定の粘性に調整したモデルフレッシュコンクリート 34.50をモデルミキサ内にゆっくりと投入した。
- (3) 5色のトレーサー粒子をミキサ内モデルコンクリート表層 の中央と四隅に計5箇所に投入した。
- (4) 撮影用ビデオカメラをモデルミキサの上面,底面,両側 面の4箇所から撮影する位置に固定した。
- (5) ミキサを所定の回転速度で回転させ、数分の間、トレー サー粒子の挙動をビデオ撮影した。
- (6) 画像処理方法は, 回転開始後に回転速度が一定に なった後,画像に出現する5色の各トレーサー粒子を 適当な時間から10秒間,0.4秒間隔で計25点の(x, y,z)座標を計測した。取得総数は25点×5色=125点 となる。5色の各トレーサー粒子軌道から流動の特性を 確認した。また、座標取得総数を倍の250点に増やし た場合も同じ傾向になった。そのため、取得数125点 は十分な点数と判断した。
- (7) 図-6に示すように、取得したトレーサー粒子の単位時 間あたりの(x, y, z)座標の移動距離から3次元の速 度ベクトル(Vx, Vy, Vz)発生分布を求めた。また, 連 続する2つの速度ベクトルのなす角度6を内積によって 求め、その発生分布を求めた。



写真-2 可視化試験風景









単位:mm

図-7 正回転のトレーサー粒子分布状況









5. 実験結果および考察

5.1 回転方向の違いによる影響

正回転の画像解析から得られた各トレーサー粒子のxy平面, x-z平面, y-z平面の分布状況を図-7に示す。ま た,計測開始点を黒点で示す。

x-y平面の分布状況からは,各トレーサー粒子は時計ま わりに循環していることが確認された。トレーサー粒子は ケーシング外周側を循環する粒子と途中でケーシング中央 の軸間側へ流れていく粒子とに別れた。x-z平面, y-z平 面の分布状況からは、各トレーサー粒子が、z方向に上下 に動きながら画面内を一周していることが確認された。x-y 平面で、ブレードのエネルギーにより発生したケーシング内 を一周する流動は、全体循環流動を表していると考えられ







る。また,ケーシング中央でトレーサー粒子のx軸, y軸, z軸 方向への移動が混在しているのは、軸間のブレードによる エネルギーがこの領域でぶつかりあっているためであり、こ の流動は局部交錯流動を表していると考えられる。

逆回転のトレーサー粒子のx-y平面, x-z平面, y-z平 面の分布状況を図-8に示す。逆回転は、正回転と比較し た場合, x-y平面で, ケーシング中央を通過するトレーサー 粒子が多く確認された。また、ケーシング外周端まで流れる トレーサー粒子は少なく、x軸方向の移動間隔が逆回転で は狭くなっている。つまりx軸方向への流動が減っている。ま た, x-z平面, y-z平面から確認できるように, ケーシング側 面へ材料を持ち上げる流動が強まるため, y軸, z軸方向へ 流れる流動が多くなっていることが確認された。



図-13 傾斜15度(左),傾斜35度(右)の速度Vxyzの分布状況

ブレード傾斜0度、15度、35度から得られた速度ベクトル の速度Vxvzに関する発生率を図-13に示す。傾斜0度 (図-9 正回転(左)参照)に比べて、傾斜15度では、20 ~55mm/sの発生率が増加し、傾斜35度では、40~ 70mm/sの発生率が増加している。このように、0度、15 度,35度の範囲では、ブレードの傾斜角度が大きくなるほ ど、速度ベクトルの発生率は最も高い位置が大きい方にシ フトした。

また,得られた速度ベクトルVxyz, Vx, Vy, Vzの平均値 を図-14に示す。傾斜0度の平均速度が38.9mm/sに対 して、傾斜15度で47.9mm/s、傾斜35度では、52.3mm/s に増加していた。傾斜0度と傾斜35度の(Vx, Vy, Vz)それ ぞれの平均速度の増加率を比較すると、Vxが15.4%に対 し、Vyが45.7%、Vzが50.0%となり、Vx 以上にVy、Vzの上 昇に影響を与えていることが確認された。

以上の結果から、ブレード傾斜15度、35度に変更すること によって,軸回転方向の速度ベクトルVy, Vzが増加し,流動 全体の平均速度が増加したことを確認した。これは羽根を傾 斜させることにより、羽根表面から裏側にかけて流れ込むモ デルコンクリートの影響によるものと考えられるが,詳細な原因 はまだ解明できていない。また、この影響により、ミキサ内全体 での材料の動きが活発になり、練混ぜ性能の向上につなが ることも予見されるが、実際のフレッシュコンクリート練混ぜ時 への影響に関しては、今後の検討課題とする。

6. まとめ

本研究は、コンクリート用2軸強制練りミキサにてブレード 回転方向と傾斜角度の違いが.コンクリートの流動に与え る影響を,可視化実験にて3次元画像解析手法を用い,解 析・定量化を行った。本研究の結果,以下のことが確認で きた。

- 1) 1相系流体を用い、トレーサー粒子を3次元(x, y, z)座 標でとらえ、その分布状況と速度ベクトルの大きさ、角度 を解析することにより、ミキサ内の流動挙動をとらえ、定 量的に評価することができた。
- 2) 正回転と逆回転を比較した場合,トレーサー粒子の分 布状況および,速度ベクトルの大きさ,角度の分布傾向



図-11 ベクトル角度θの分布状況



図-12 傾斜15度(左). 傾斜35度(右)のトレーサー粒子分布状況

次に,正回転と逆回転で得られた速度ベクトルVxvzに関 する発生率を図-9に示す。また、得られた速度ベクトル Vxvz, Vx, Vv, Vzの平均値を図-10に示す。正回転の速 度分布のピークは、10mm/s~25mm/sと85mm/s~ 100mm/sに二極化している。逆回転時は35mm/sに集中 する一極型の正規分布が確認された。また、平均速度は、 正回転が38.9mm/sに対し、逆回転は44.6mm/sと大き かった。これは、逆回転時のVy、Vzが増加したためと考え られる。速度分布がより広範囲に発生している方が、様々な 速度が存在し、コンクリートを効率よく練り混ぜることができ る。よって、逆回転より正回転の方が練混ぜには有効である と考えられる。

また、連続する2つの速度ベクトルのなす角度の正回 転, 逆回転のx-y平面, x-z平面, y-z平面での発生分 布を図-11に示す。すべての平面において,正回転より 逆回転の方がベクトル角度θが大きい値の発生率が大きく なることが確認できた。ベクトル角度θが大きくなるほど、流 動による位置の変化が大きいと考えられる。これは、正回 転より逆回転の方が、2つの軸が回転することによって発 生する回転エネルギーをコンクリートの流れにうまく伝達で きていることを意味する。正回転の効率の良い練混ぜと逆 回転の回転エネルギーの伝達とは、相反していることが明

らかになった。

この理由は以下のように考えられる。

x-y方向は,軸回転方向が異なっても循環方向が逆に なるだけで基本的にエネルギーとしては大きな差がない。一 方、上下方向のエネルギーの伝達は、回転方向により軸間 側になるか外側になるかで、大きな違いになったと考えられ る。

今後,正回転と逆回転との違いは、実際のコンクリートミ キサを用いた種々の配合のコンクリートの練混ぜによって検 討していきたいと考えている。

5.2 ブレード傾斜角度の違いによる影響

ブレード傾斜15度、傾斜35度の画像解析から得られた各 トレーサー粒子のx-y平面の分布状況を図-12に示す。傾 斜35度の分布状況からは、各トレーサー粒子は、傾斜0度の 場合と同様に、時計周りにミキサ内を循環しており、画面端 に沿って進む粒子と、途中でミキサ中心方向へ進む粒子とに 別れた。また、傾斜0度では流動に追従できず、途中その位 置に留りやすかったトレーサー粒子が確認されたのに対し、 傾斜15度、35度では、その現象が確認されなかった。これ は、ミキサ内の流動が強くなり、トレーサー粒子がその流れ に追従しやすくなったためと考えられる。

図-14 傾斜角度ごとの 速度ベクトル平均値

からミキサ内全体で異なる流動特性を発生させることを 確認した。

3) ブレード傾斜角度を0度, 15度, 35度に傾斜させること で、トレーサー粒子の平均速度は増加する傾向にあり、 特にv軸, z軸方向の増加割合が大きくなった。

参考文献

- 1) 橋本 親典, 平井 秀幸, 辻 幸和, 田村 真; 2軸強制練り ミキサ内のコンクリート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, Vol15, No.1, pp.1037-1041, 1993
- 2) 吉田 元昭, 橋本 親典, 渡邉 健, 水口 裕之; 2軸強制 練りミキサのブレード形状が超高強度コンクリートの練 混ぜ時間の短縮化に与える影響,コンクリート工学年次 論文集, Vol.31, No.1, pp.1639-1644, 2009
- 3) 橋本 親典, 辻 幸和, 杉山 隆文: 練混ぜ時間が2軸強 制練りミキサの練混ぜ性能に与える影響,セメント・コン クリート論文集, No.51, pp.582-587, 1997.1
- 4) 日本粉体工業協会編 編集委員長 矢野 武夫: 混合混練技術,日刊工業新聞社発行,6.3.3双腕形 ニーダ, p198, 1980

出典

「篭谷武(日工), 中島翼(徳島大), 橋本親典(徳島大). 渡邊健(徳島大).

『3次元画像解析手法を用いた2軸強制練りミキサの流動 解析とその定量化』,

コンクリート工学年次論文集(CD-ROM), Vol.40. ROMBUNNo.1205.2018/06/15.(公社)日本コンク リート工学会」より許諾を得て転載。

筆者紹介



KAGOTANI Takeshi 篭谷 武 博士(工学) 2004年入社 開発部