

論文

[1174] 連続ミキサ内におけるフレッシュコンクリートの練混ぜ過程の可視化

浦野真次^{*1}・橋本親典^{*2}・辻 幸和^{*3}・内田美生^{*4}

1. はじめに

連続的に材料の供給を行い、高速回転で練り混ぜるという機構を有する連続ミキサは、材料の計量精度の優れた機種が開発されて以来、主としてNATM用吹付コンクリートやコンクリートミキサ船による港湾コンクリート等に用いられている。連続ミキサの練混ぜ性能は、土木学会規準「連続ミキサの練りませ性能試験(案)」[1]によって評価されているが、練混ぜ時間が非常に短いため、排出後のコンクリートの状態が安定しないこと等の問題点が指摘されている。

連続ミキサは、複数の、しかも異なる種類の羽根が回転軸に取り付けられているため、ミキサ内でのコンクリートの流動性状は非常に複雑になり、直接把握することは困難である。そのため、ミキサ内部のコンクリートの練混ぜ機構が不明なまま、経験的な試行錯誤によって、コンクリートのミキサ内の滞留時間を長くするための対応策等が図られてきたのが現状である。

また、コンクリートを製造するに際し、ミキサ内部での材料の練混ぜ機構は、ミキサの種類、練混ぜ時間およびミキサ消費電力量などの間接的な指標を用いて、定量的に把握することが試みられている[2]。しかしながら、それらの研究においても、コンクリートミキサの大半を占めるバッチ式ミキサを対象としており、練混ぜ時間の非常に短い連続ミキサに関しては、これまで検討されていない。

そこで、本研究は、連続ミキサ内のコンクリートの練混ぜ機構に関する基礎的研究としての観点から、フレッシュコンクリートの可視化実験手法による流動機構の定量化を試み、ミキサ羽根の組合せ、ミキサの仰角および回転数の違いがコンクリートの流動性状に及ぼす影響について実験的に検討する。なお、本可視化実験では、フレッシュコンクリートの流動を1相系粘性流体の流動と仮定し、高吸水性高分子樹脂水溶液をフレッシュコンクリートの可視化モデルとして用いた。

2. 実験概要

(1) モデル連続ミキサ

図-1に、本実験で用いたモデル連続ミキサの可視化実験の概要を示す。一般には材料の供給装置も含めて連続ミキサと呼ばれているが、モデルミキサとしては、実機の材料投入口から排出口までの部分である。モデルのスケールは、実機の1/3である。実機ミキサ底部である硬質ゴム製の半円の周壁部は、透明なアクリル樹脂製のパイプを用いて、ミキサ下部より内部を透視できるようにした。着脱可能な鋼製のミキサ羽根は、同一断面に3枚の羽根を有するせん断用のパドル羽根と、送り用のスクリー羽根の2種類である。

*1 清水建設(株)技術研究所構造技術研究部土木構造グループ、工修(正会員)

*2 群馬大学助教授 工学部建設工学科、工博(正会員)

*3 群馬大学教授 工学部建設工学科、工博(正会員)

*4 住友セメント(株)中央研究所コンクリート研究室、工博(正会員)

(2) フレッシュコンクリートの可視化モデル

フレッシュコンクリートの可視化モデルとして、高吸水性高分子樹脂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。粘性は、Pロートで測定し、粘性が高すぎて流動が途切れてしまわない最大流下時間で200sec程度とした。着目トレーサ粒子として比重0.98の発泡スチロール粒子（粒径2.0mm程度）を適量混入し用いた。

本実験では、ミキサ内のコンクリートの練混ぜ機構に関する基礎的研究として、まずミキサ内をコンクリートがどのように動いているかを定量化

することを試みた。そのため、トレーサ粒子群の挙動を明確に追跡することが必要であり、フレッシュコンクリートの可視化モデルとしては、最も簡単な1相系粘性流体を採用した。

(3) 試験方法

実験パラメータは、ミキサ羽根の組合せ、ミキサの仰角および回転数である。まず、図-2に、ミキサ羽根の組合せの概要を示す。ミキサ羽根の組合せは、撮影領域内においてスクリー羽根のみ(①)、パドル羽根1枚挿入(②)および2枚挿入(③)と変化させ、3種類の組合せとした。ミキサの仰角は10度、15度、20度の3種類、回転軸の回転数を60rpmと120rpmに変化させた。

撮影箇所は、材料投入やコンクリート排出による流動の乱れが少ないミキサ下面の中央20cm付近とし、図-1にその概要を示す。画像処理方法は、画面に出現する任意のトレーサ粒子の単位時間当たりの移動距離から、2次元平面内の速度ベクトル分布を求める。なお、各トレーサ粒子の計測時間間隔は、回転数が60rpmのとき0.25秒、120rpmのとき0.2秒で一定とした。取得した速度ベクトル総数は、領域内で220個以上とした。また、撮影領域外は、すべてスクリー羽根とした。

3. 実験結果

3.1 速度ベクトル分布状況

図-3と図-4に、本実験で得られた着目トレーサ粒子群の速度ベクトル分布状況の1例を示す。図-3は①の羽根の組合せ、図-4は③の羽根の組合せである。図-3、図-4ともにミキサの仰角は10度・20度、回転数は60rpm・120rpmの場合の速度ベクトル分布状況を示す。

スクリー羽根のみの場合では、回転数に関わらず、回転軸付近の中央部分において、斜めの一様な流動が発生し、連続的に排出口の方向へ流動している。この回転軸付近の速度ベクトルは、羽根と羽根との間で移動するコンクリートの流動であると考えられる。上下の端では羽根と周壁とのクリアランスが存在し、あまり大きな速度ベクトルは発生していない。また、ミキサの仰角

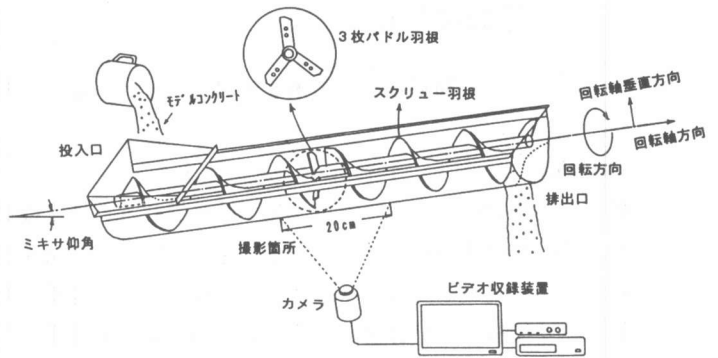


図-1 モデル連続ミキサ実験装置

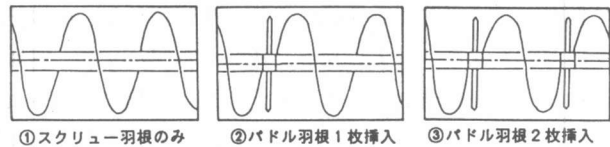


図-2 撮影領域内のミキサ羽根組合せ

が10度から20度へと大きくなると、重力の影響が加わり、速度ベクトルの発生する方向が、回転軸方向から回転軸垂直方向に移行する。

パドル羽根を2枚挿入した場合には、パドル羽根を挿入した位置付近において、パドル羽根によって直接巻き上げられることにより、垂直方向の流動が発生している。また、スクリー羽根の位置において発生する速度ベクトルの方向は、スクリー羽根のみの場合より、さらに垂直方向となっている。

また、回転数が120rpmになると、いずれの羽根の組合せにおいても速度ベクトルは大きくなるが、ベクトルの分布状況は、羽根の組合せおよびミキサ仰角が同じであれば、概ね同程度である。

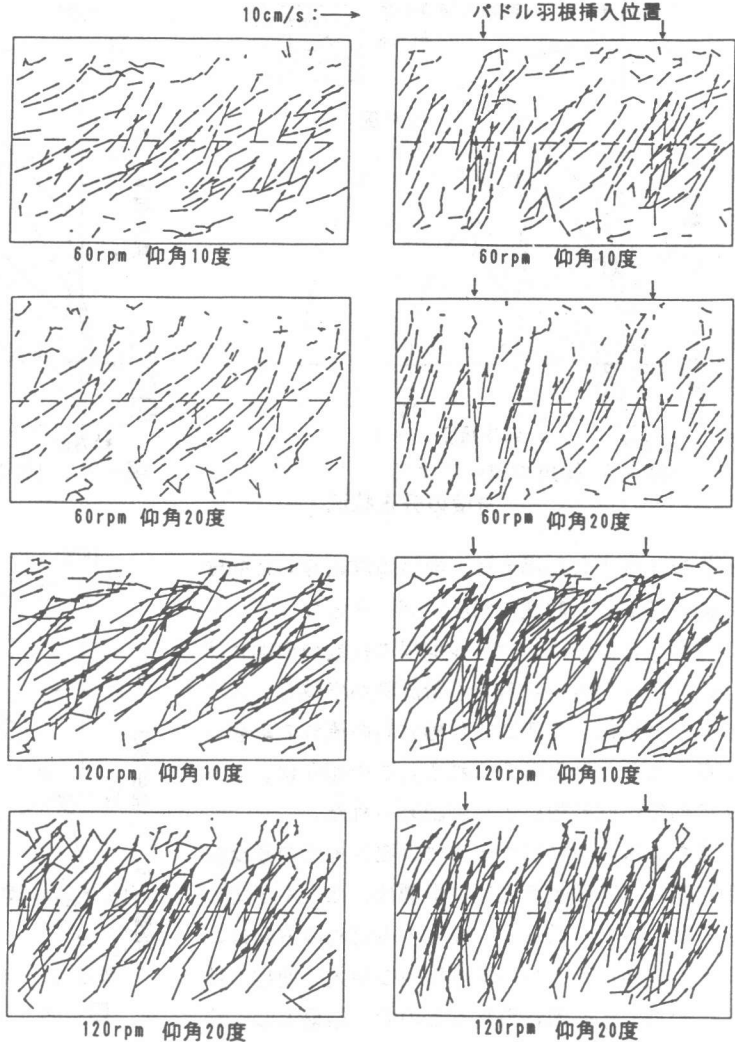


図-3 速度ベクトル分布状況図 (羽根の組合せ①) 図-4 速度ベクトル分布状況図 (羽根の組合せ③)

4. 考察

4.1 速度ベクトルの角度に関する分布状況

本実験で得られた速度ベクトル分布状況図に基づいて、ミキサ内のモデルコンクリートの流動状況を定量化するために、発生した速度ベクトルについて、回転軸方向を0度、回転軸垂直方向を90度として、角度を15度ピッチで分割して集計し、頻度分布を求めた。

図-5は、ミキサ羽根の組合せが③、回転数が60rpmの場合の、発生角度の頻度分布を示す。ミキサの仰角が大きくなるに従い、重力の影響によって、ピーク値が90度方向に増加する傾向が確認された。この傾向は、ミキサ羽根の組合せおよび回転数に関係なく同様であった。

図-6は、ミキサの仰角を15度、回転数を60rpmの場合の、発生角度の頻度分布を示す。スクリー羽根のみでは、15度~30度および30度~45度方向の間で頻度が最も多い。パドル羽根を1枚入れることにより、15度~45度の頻度は減少し、60度~75度の発生頻度が増加している。パドル

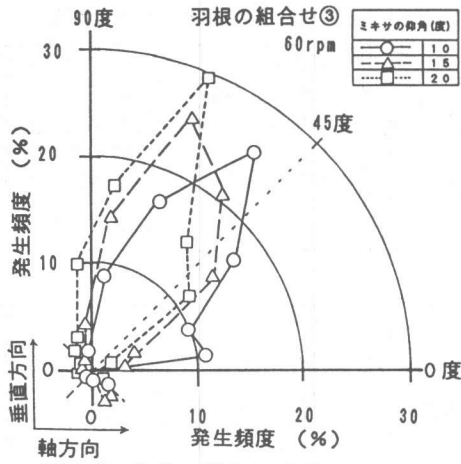


図-5 仰角の違いによる角度の分布状況

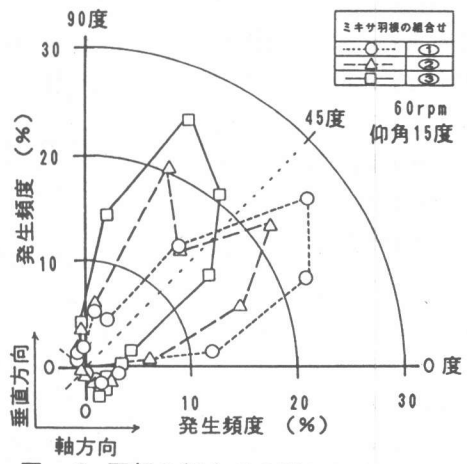


図-6 羽根の組合せの違いによる角度の分布状況

羽根を2枚入れた場合は、発生角度はさらに90度方向に増加し、60度～75度でピークとなっている。この理由としては、パドル羽根の枚数の増加に伴い、パドル羽根によるせん断流動が卓越し、スクリュウ羽根による連続的な軸方向の流れの影響が少なくなるためと考えられる。この傾向は、ミキサの仰角、回転数によらず認められた。

また、図-7に示すように、発生角度の頻度分布に対する回転数の違いの影響は、ほとんど認められなかった。従って、発生する流れの方向は、ミキサの仰角およびパドル羽根の挿入の増加に伴い、それぞれ原因は異なるものの、結果として垂直方向が卓越する。

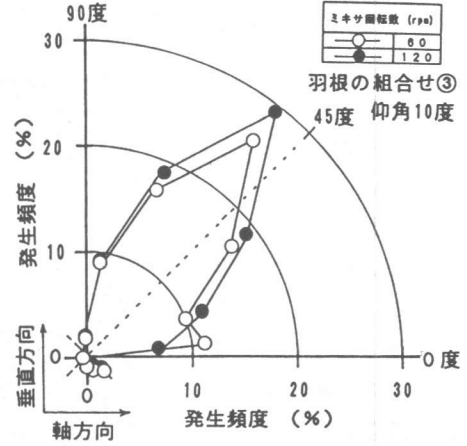


図-7 回転数の違いによる角度の分布状況

4.2 連続ミキサの流動機構と速度ベクトル成分の関係

本研究では、連続ミキサの流動機構を定量的に評価する指標として、計測したトレーサ粒子の速度ベクトル成分が示す流動特性を以下のように定義した。

- ・全速度ベクトル：回転数が一定の場合、伝達される流動エネルギーの大きさを意味する。
- ・回転軸方向成分：練混ぜ能力(m³/h)に関連する排出性能の大きさを意味する。
- ・回転軸垂直方向成分：ミキサ羽根の回転エネルギーに起因する速度成分と考えられ、ミキサの練混ぜ性能の大きさを意味する。

4.3 速度ベクトルの発生頻度分布状況

発生した速度ベクトルについて、その大きさを2.0cm/secピッチで分割して集計し、速度ベクトルの方向別および全速度ベクトルの発生頻度分布を求め、以下に図示する。また、図中には、凡例とともにそれぞれの平均値を記す。

図-8に、ミキサ羽根の組合せが③、回転数が60rpmの場合の、発生頻度分布状況をそれぞれ示す。軸方向ベクトルでは、発生頻度はほぼ-2.0~5.0cm/secに集中しておりばらつきが小さいが、角度が増加するに従って、ピーク値は小さくなる傾向にある。その平均値もこれに対応し、仰角が20度の場合、1.0cm/sec程度減少している。軸方向ベクトルの減少は、排出される方向に移動するコンクリートの流量が減少することを意味する。

一方、垂直方向ベクトルでは、発生頻度の最大値が、軸方向ベクトルのそれに比べ小さく、分布状況はあまり変化がない。平均値においては、仰角20度で1.0cm/sec程度増加している。

全速度ベクトルでは、特にミキサ仰角による明確な影響は認められず、平均値においてもほとんど変化がない。すなわち、仰角を大きくしても、速度ベクトルの方向を変化させるだけであり、伝達される流動エネルギーの増加はなく、一定である。

図-9に、ミキサ仰角を20度、回転数を60rpmの場合の、発生頻度分布状況をそれぞれ示す。軸方向ベクトルでは、パドル羽根の挿入枚数が増加するに従って、ピーク値は小さくなっており、パドル羽根2枚で0.6cm/sec程度減少している。

垂直方向ベクトルでは、パドル羽根の挿入により、回転軸垂直断面内においてせん断流動が形成され、様々な速度が発生し流れが不規則になる。その結果、速度ベクトル5.0cm/sec以上の発生頻度が増加する。これとともに平均値も増加し、パドル羽根2枚で2.0cm/sec程度増加しており、垂直方向ベクトルに対する影響は、ミキサの仰角よりもパドル羽根の挿入の方が大きい。これは、パドル羽根を挿入した位置において、羽根に直接巻き上げられるコンクリートの速度ベクトルが大きいためである。

全速度ベクトルでは、様々な大きさの速度ベクトルが存在するが、パドル羽根を2枚挿入すると、ピーク値付近の頻度が減少して速度の大きいものが増加する傾向がある。平均値も増加して

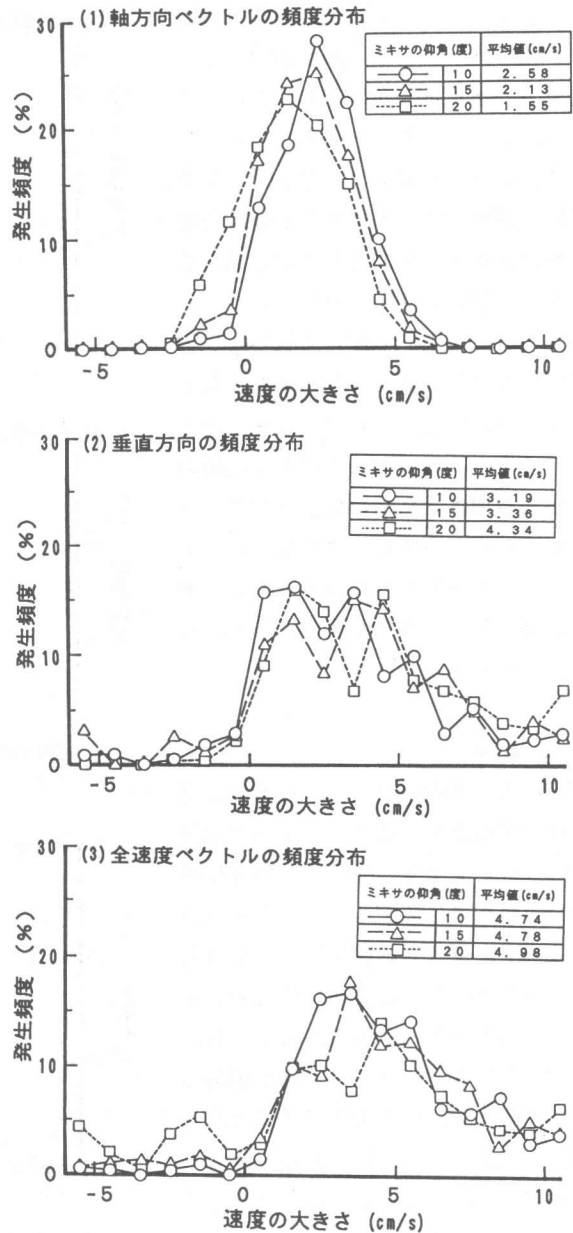


図-8 仰角の違いによる速度ベクトル分布状況 (羽根組合せ③, 60rpm)

おり、これは、パドル羽根を挿入しても、軸方向ベクトルの減少が少なく、垂直方向ベクトルが増加したため、その影響を受けたものと考えられる。

また、回転数が大きくなると、各方向別の速度ベクトルにおける速度の平均値の大きさも大きくなるが、頻度分布状況は同様な傾向を示した。

従って、ミキサの仰角の違いは、排出性能を低下させ、練混ぜ性能を向上させるが、伝達されるエネルギーは一定である。これに対し、パドル羽根の枚数を増加させた場合は、コンクリートが領域内に留まるだけでなく、ミキサ羽根による流動エネルギーがより多く伝達され、練混ぜ性能が良好となると考えられる。

5. 結論

連続ミキサ内のコンクリートの流動機構の定量化を目的とし、ミキサ羽根の組合せ、ミキサの仰角および回転数の違いが可視化モデルコンクリートの流動状況に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、本実験内において、以下のことが明らかとなった。

(1) モデルコンクリートを1相系の粘性流体とした可視化実験手法により計測されたトレーサ粒子群の速度ベクトル分布を用いることによって、連続ミキサの下面の流動性状を定量化することができた。

(2) パドル羽根の挿入に伴い、排出性能は低下するが、ミキサ羽根による流動エネルギーをより多く伝達し、練混ぜ性能を良好にする。その効果は、ミキサの仰角の増加による効果よりも大きい。

参考文献

- 1) 土木学会：連続ミキサによる現場練りコンクリート施工指針（案）、pp. 31～32、1986. 6
- 2) 魚本健人ほか：配合条件とミキサ消費電力量がコンクリートの品質に及ぼす影響、土木学会論文集、No. 442/v-16、pp. 109～118、1992. 2

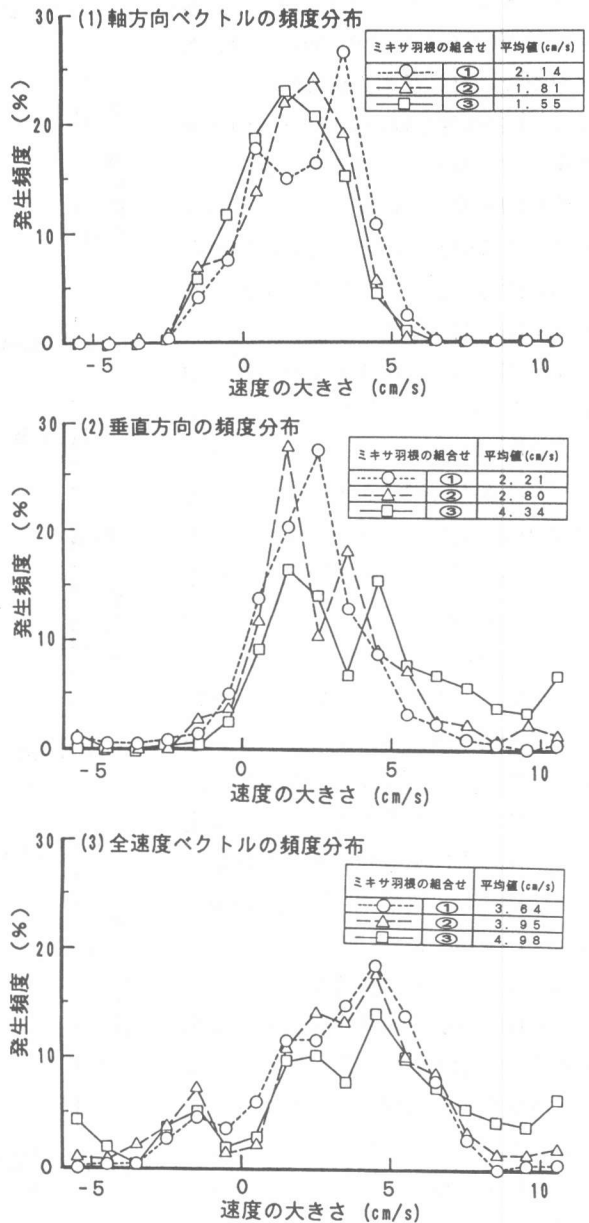


図-9 羽根の組合せの違いによる速度ベクトル分布状況 (ミキサ仰角 20° , 60rpm)