

論文 可視化モデルを用いた2軸強制練りミキサの局部交錯部のせん断流の定量化

橋本 親典^{*1}・吉田 元昭^{*2}・渡辺 健^{*3}・石丸 啓輔^{*4}

要旨：2軸強制練りミキサの練混ぜに重要な流動は、異なる粒度の各種粉体材料を均一に混合する“全体循環流動”と、セメント粒子と水の水和反応に必要な固液界面接触を円滑にする“局部交錯流動”の2つに大別される。本研究では、局部交錯部の領域が大きく異なる2種類のモデルミキサを用いて、高粘性と低粘性の可視化モデルが一様な粘性に収束する練混ぜ性能実験を行った。次に、シャフト軸の回転に伴うミキサのブレード表面の圧力変動を計測し、2つの逆向きのらせん流動が交錯する際に発生するブレード周辺のせん断流の定量化を試み、局部交錯部の練混ぜ性能とせん断流の相関性について実験的検討を行った。

キーワード：2軸強制練りミキサ、可視化モデル、練混ぜ性能、圧力センサ、ブレード

1. はじめに

コンクリートミキサは、“練混ぜ性能”という基本性能を有し、コンクリートを製造する工程上、最も重要な施工機械の1つである。ミキサの機種のうち、2軸強制練りタイプが最も練混ぜ性能が高い。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図を示す¹⁾。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“全体循環流動”と、セメントの水和反応を活発にするために、セメント粒子と水の接触頻度を高めるための“局部交錯流動”から成る。“練り”に

寄与する局部交錯流動は、2つのらせん流動が交錯する際に発生するブレード周辺のせん断流の大きさが重要であると考えられている。

本研究では、局部交錯流動の領域が異なる2種類のモデルミキサを対象に、コ

ンクリートを1相系の粘性モデルと仮定し、ミキサ槽内に高粘性と低粘性のモデルコンクリートを別々に詰めておき、シャフトの回転と共に、モデルコンクリートの粘性が均一になる過程を練混ぜ性能曲線として定量化を試みた。

次に、ミキサのブレード表面に取り付けた圧力センサの圧力変動によって、2つのらせん流動が交錯する際に発生するブレード周辺のせん断流の定量化を試み、2種類のモデルミキサに発生するせん断流の大きさと練混ぜ性能曲線の相関について考察した。

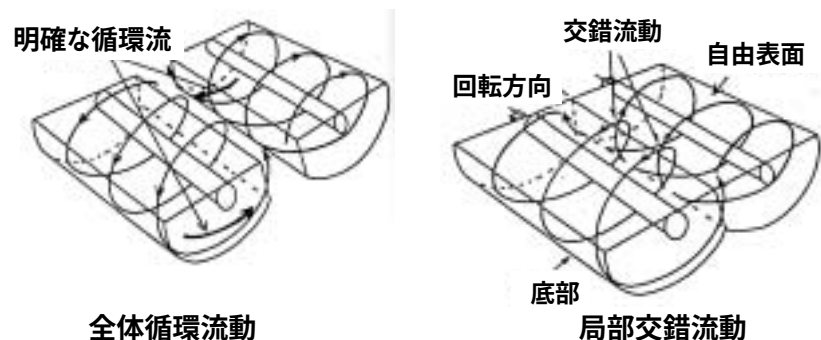


図-1 2軸強制練りミキサの流動機構¹⁾

*1 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン工学専攻教授 工博 (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 博士後期課程2年 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン工学専攻助教 博(工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター技術専門職員 (正会員)

表-1 モデルミキサの容器形状に関する諸元表

種類	練混ぜ容量 (リットル)	軸長さ L(mm)	容器幅W (mm)	軸間距離 C(mm)	ブレード半径 R(mm)	ブレード 枚数(枚)	練混ぜ層 の形状	交錯部 面積A(mm ²)	交錯部 体積V(mm ³)
A型	22.58	424	474	204	135	16	浅底	7995	3.39×10^6
B型	31.00	464	552	256	148	8	深底	4019	1.86×10^6

2. 実験に用いたモデルミキサの容器形状

実験に用いたミキサは、容積を実機の 1/83 の縮小率としてモデル化し、練混ぜ槽内部を目視可能にするため、無色透明なアクリル樹脂製である。モデルミキサの模式図を図-2 に、容器形状に関する諸元表を表-1 に示す。

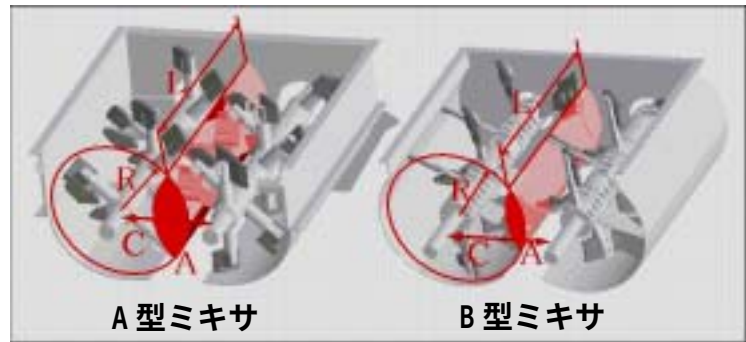


図-2 モデルミキサの模式図

図-2 の記号 C は軸間距離、L は軸長さ、R はブレード回転半径、A は局部交錯部の面積を意味する。軸間距離 C により、局部交錯部の領域 A を変化させた。A 型ミキサの局部交錯領域は B 型ミキサの約 2 倍に設定しており、B 型ミキサは、容器幅が大きく、軸長さが大きく、シャフトと底面までの深さが深い。ただし、両ミキサの軸長さと半径の比 (L/R) は同じであり、練混ぜ時のブレード先端の周速度を一定になるように回転速度を調整した。

3. 練混ぜ性能実験

3.1 局部交錯流動に関する練混ぜ性能の指標

これまでの研究によって、全体循環流動は、モデル骨材粒子をトレーサとして、粗骨材粒子群の混合度を練混ぜ性能の指標として定量的評価を行った。これに対し、局部交錯流動は、セメント粒子と水の接触頻度を高めるための練混ぜ性能に寄与すると考えられ、全体循環流動よりもミクロ的な練混ぜ性能である¹⁾。

本研究では、ミクロ的練混ぜとして、粘性の変化に着目し、モデルコンクリートの粘性の混合度の変化によって局部交錯流動の練混ぜ性能を評価することとした。すなわち、練混ぜ時間とともに、高粘性と低粘性の 2 種類のモデルコンクリートの粘性が混合し、一定の粘性に収束していく過程を練混ぜ性能の指標とした。

3.2 パドル配列角度

既往の研究成果から、全体循環流動と局部交錯流動に影響を与える要因としてミキサのパドル配列角度がある²⁾。パドル配列角度 45 度は、連続性があり全体循環流動が卓越とされ、90 度は、連続性には乏しいが局部交錯流動が卓越とされる。また、パドル配列角度が 60 度では、この両者の中間的位置付けと考えられる。本実験では、パドル配列角度を 45 度、90 度および 60 度の 3 種類に変化させた。

3.3 モデルコンクリート

使用したモデルコンクリートは、1 相系粘性流体と仮定し、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（密度 1.0g/cm^3 ）を用いた。粘性の異なるモデルコンクリートの粘性は、実モルタルに適用されるミニスランプコーン（高さ 150mm, 上端直径 50mm, 下端直径 100mm）を用いたスランプフローにより制御した。低粘性モデルコンクリートの粘性は、樹脂添加量を 3.0g/l でスランプフロー $380 \pm 10\text{mm}$ とした。高粘性モデルコンクリートの粘性は、樹脂添加量を 6.0g/l でスランプフロー $160 \pm 10\text{mm}$ とした。

3.4 実験方法

練混ぜ性能の実験は以下の通りである。

1) 粘性の異なる 2 種のモデルモルタルを 2 層

に分けてミキサ内に配置し、全く練り混ざっていない状態を初期状態（0 回転）として練混ぜを開始する。図-3 は、練混ぜ開始前のミキサ槽内に設置した 2 色のモデルモルタルの配置状況を示す。

2) 所定の回転数のあとシャフトの回転を停止し、モデルコンクリートの流動を静止させる。つぎに、ミキサ槽内の 9 領域から、スランプフロー試験を行うために必要なモデルコンクリートを自由表面付近から採取し、スランプフロー値の計測を行う。図-3 にミキサ槽内の試料採取箇所を示す。

3) 最終回転数は、パドル配列角度 45 度では、20 回転とし、パドル配列角度 60 度と 90 度では、40 回転とし、この最終回転数まで達していない限り、ミキサ槽内に残ったモデルコンクリートをすべて排出し、必要な高・低粘性のモデルコンクリートを計量し、1) へ戻る。なお、練混ぜ回転時のブレード先端の周速度は、0.12m/s で一定とした。

回転数が少ない初期は、ミキサ槽内のモデルコンクリートの粘性は、大きく変動する。高粘性の部位と低粘性の部位が存在するためである。回転数が多くなるにしたがい、槽内のモデルコンクリートの粘性が収束し、どの部位の粘性も平均的な粘性となり変動が小さくなる。写真-1 は、パドル配列角度 45 度におけるモデルミキサの練混ぜ状況の一例である。

3.5 評価方法

練混ぜ性能は、練混ぜ回数に伴い、ミキサ槽内の 9 領域のモデルコンクリートの粘性の変動によって評価した。すなわち、同一練混ぜ回数時に測定した 9 領域のスランプフローの分散を求める。練混ぜ開始時の分散と完了時の分散と任意の回転時の分散を用いて、混合度 M を式(1)により求める。

$$\text{混合度：} M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

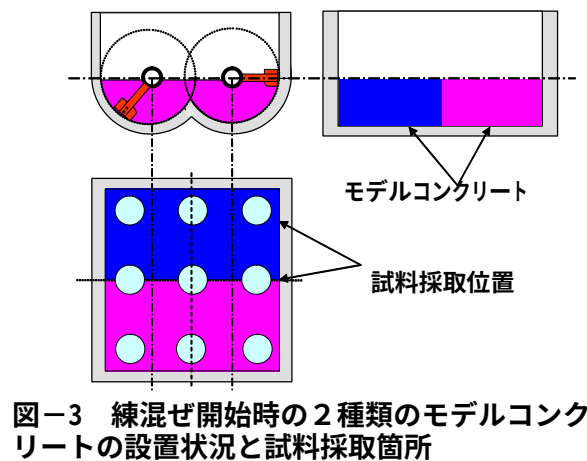


図-3 練混ぜ開始時の 2 種類のモデルコンクリートの設置状況と試料採取箇所

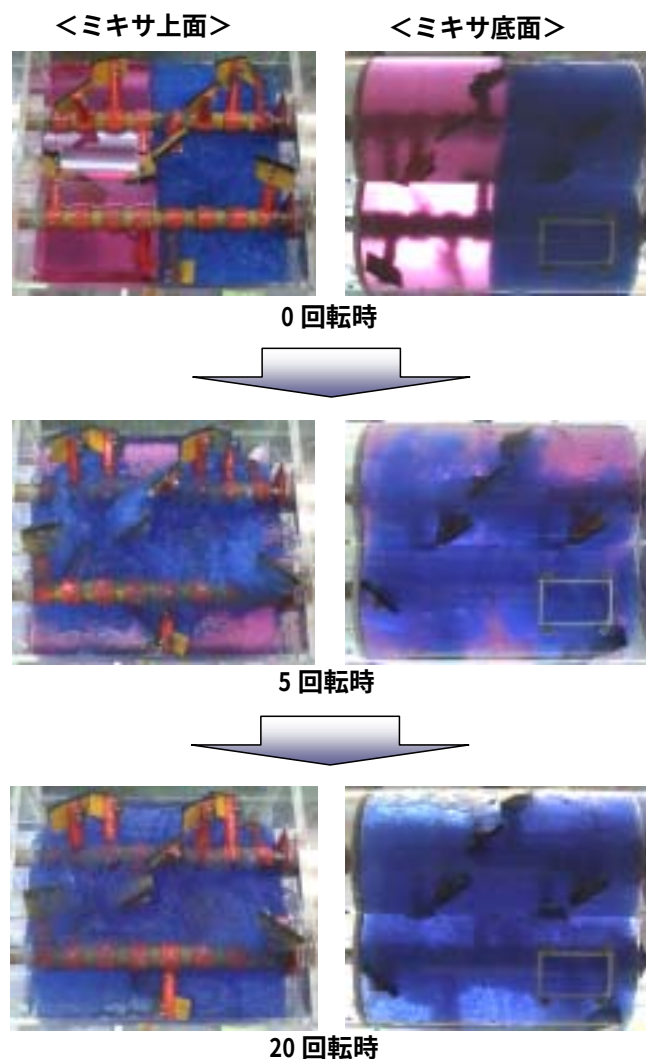


写真-1 ミキサ上面および下面から撮影したモデルミキサの混合状況の一例

ただし、 σ_0^2 = 練混ぜ開始時の分散、 σ_r^2 = 練混ぜ完了時の分散、 σ^2 = 任意の回転数における分散

混合が進行するほど、9 領域のスランプフロー

値は平衡状態となり、混合度 M は 100% に漸近する。この混合度 M が 100% に漸近する度合いによって、練混ぜ性能の優劣を評価する。

3.6 練混ぜ性能曲線

図-4 に、パドル配列角度別に A 型ミキサと B 型ミキサの練混ぜ性能曲線を示す。パドル配列角度 60 度、90 度では、両ミキサ間で練り混ぜの進行度合いに大きな差は見られなかった。一方、パドル配列角度 45 度では、A 型ミキサのほうが B 型ミキサよりも早く 100% に漸近している。

また、同一ミキサでは、パドル配列角度 45 度が最も早く 100% に漸近し、60 度、90 度の順で混合度が 100% に漸近する回転数が増える。ミクロ的な練混ぜ性能が良好なミキサの条件として

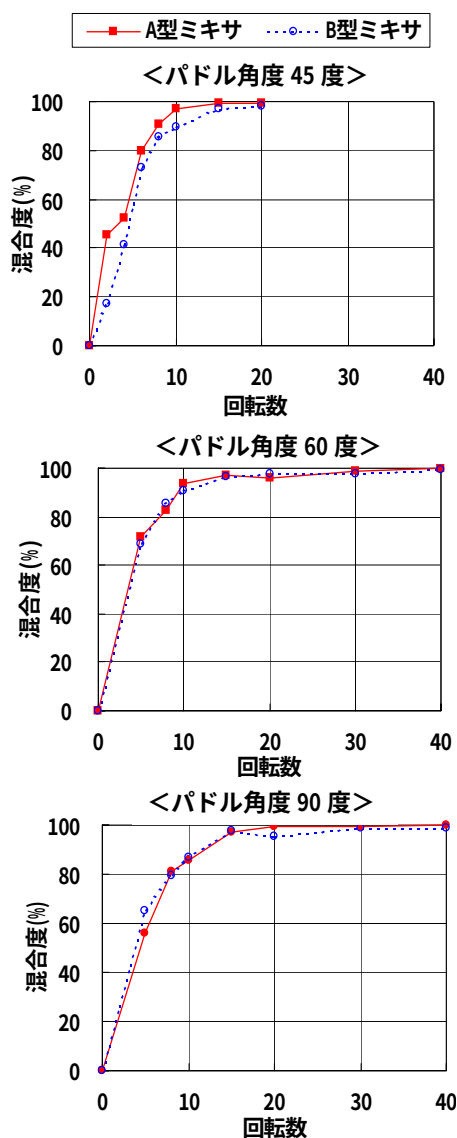


図-4 練混ぜ性能曲線

は、局部交錯部の領域が大きくかつ連続性を持つパドル配列を有するものである。

4. ブレード周辺に発生するせん断流の定量化

4.1 局部交錯部におけるせん断流の存在

前章の練混ぜ性能実験によって、ミクロ的な練混ぜ性能には、局部交錯部の領域が大きくかつ連続性を持つパドル配列角度 45 度のミキサが適していることが明らかになった。これは、パドル配列角度 45 度の軸が回転することによって軸周りに形成されるらせん流動が正反対方向に進行し、2つの軸周りに形成するらせん流動が、軸間中央で衝突し、せん断流が活発に発生するためと考えられる。本章では、このせん断流をブレード表面に取り付けた圧力センサを用いて、圧力の大きさを定量化を試みた。

4.2 実験装置

実験に用いたミキサは、3章と同じ A 型と B 型を用いた。ただし、パドル配列角度は 45 度のみとした。モデルコンクリートの粘性は、樹脂添加量を 4.0 g/l 、スランプフロー $315 \pm 10 \text{ mm}$ で一定とした。

センサの取付け位置は、局部交錯流動の違いによるミキサ内の挙動を比較するため、局部交錯流動が発生する中央部と発生しにくい端部の 2箇所とした。取付け位置を、写真-2 に示す。センサはブレード表面に取り付けているため、ブレード面に垂直な方向の圧力を計測することになる。せん断流は 2つのブレードが交錯する領域に発生すると考えられるが、せん断流の方向とブレードの面が常に一定の方向とは限らな



写真-2 圧力センサの取付け位置

い。ブレード面と平行な方向の圧力も存在する。本研究では、ブレードに垂直な面に発生する圧力に関係するせん断流の大きさを定量化した。

4.3 実験方法

センサをブレード表面に取り付けたそれぞれのミキサについて、ブレード先端の周速度を0.12, 0.17, 0.24 および 0.34m/s の4段階で回転させ、圧力測定を行った。ブレードの回転軸と測定開始位置の関係を

図-5 に示す。

なお、モデルコンクリートより粘性が小さい水の圧力波形を基準とするため、水道水の練混ぜによる圧力波形の計測を行った。

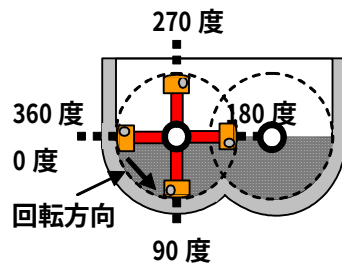


図-5 測定開始位置

4.4 圧力波形データ

図-6 は、ブレード先端周速度 0.12m/s での軸中心のブレードとミキサ側壁のブレードに取り付けた圧力センサの圧力波形データである。

横軸の回転角度は、図-5 に示すミキサ外側水平時を 0 度として反時計回りの回転角度を意味する。【中央】と【端】はセンサの取付け位置を意味する。局部交錯流動発生領域とは、2つの軸のブレードが軸間中央で交錯する回転角度の範囲を意味する。

モデルコンクリートは粘性の影響のため、水の場合と比べて、180 度以上回転しても一定の圧

力が存在する。ブレードをミキサ底部の回転角度 90 度で静止すると、ブレードには静水圧が作用し、最大圧力になるはずである。しかしながら、ブレードは回転しているため、慣性力が作用し、最大圧力に達する回転角度が 90 度より若干大きい。また、自由表面にブレードが出現すると、大気圧になりブレードに作用する圧力は零になるが、ブレードの慣性力によってブレード表面に付着する物体の影響で、180 度以降も圧力が残存する。

水と比較してモデルコンクリートの圧力波形は、最大圧力が大きい。モデルコンクリートの密度は 1.0g/cm^3 であり、水道水とほぼ同じである。したがって、この水とモデルコンクリートの圧力差は、モデルコンクリートの粘性の影響しか考えられない。

局部交錯流動発生領域において、モデルコンクリートの圧力波形は、水の圧力波形よりも、相当地に大きい圧力が発生する。これは、らせん流動が交錯することによって形成するせん断流によるものと考えられる。水の場合は、ほとんど発生していないことから、粘性流体が交錯することによって発生する圧力である。興味深いことは、ブレード先端周速度が同じであるのも関わらず、粘性流体によって発生する圧力が存在するということである。

一方、A 型ミキサは、B 型ミキサと比較して、中央の圧力波形と端部の圧力波形の差異が大きい。これは、局部交錯流動によるせん断流が、

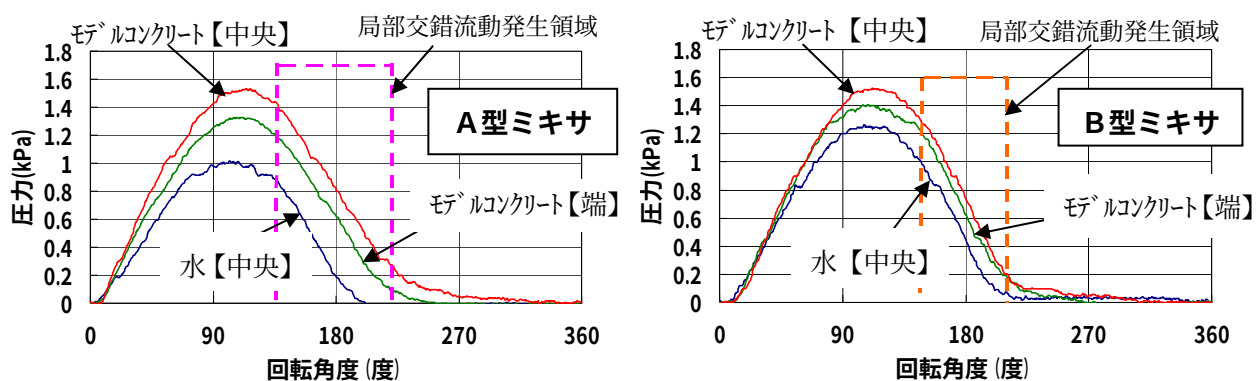


図-6 ブレード先端周速度 0.12m/s 時の圧力波形データ

軸方向にも発生していることを意味し、B 型ミキサより A 型ミキサの方が、局部交錯部の領域が大きいためであると思われる。

さらに、B 型ミキサと比較し、A 型ミキサは回転角度が 225 度を過ぎても一定の圧力があり、緩やかに圧力が零になる。相当高い位置にブレードが上昇しても、ブレードにモデルコンクリートが付着し、その自重による圧力が残存する。A 型ミキサの方が常に圧力の残存する回転角度の範囲が大きい。A 型ミキサの方が、局部交錯部の領域が大きく、ブレードによって自由表面のコンクリートが持ち上げられる容量が大きいためと考えられる。

前章の練混ぜ性能実験において、A 型ミキサの方が練混ぜ性能が良好であった。局部交錯部の領域で発生するせん断流に関する圧力波形データの知見は、ミキサの形状による練混ぜ性能の違いを裏付けるものであると判断できる。

4.5 ブレード先端周速度がせん断流に与える影響

図-7 は、ブレード先端周速度が 0.12m/s と 0.34m/s における A 型および B 型ミキサの中央部の圧力波形データを重ねて示す。実線が A 型ミキサ、破線が B 型ミキサを意味する。A 型ミキサの方が、局部交錯部の領域が大きいので、B 型ミキサよりも交錯する回転角度の範囲が大きい。周速度の大きさに関係なく、局部交錯部の領域以降において、局部交錯部の領域が大きい A 型ミキサの方が、交錯領域の小さい B 型ミキサより同一回転角度での圧力が大きい。この傾向

は、ブレード先端周速度が小さいときの方が顕著であり、ブレード先端周速度が大きくなるとせん断流による圧力が等しくなる。

一方、ブレードが自由表面から空中に出現したあとの残存圧力は、ブレード先端周速度が大きいほど顕著である。A 型ミキサの残存圧力は、最高点以降になっても維持しており、B 型ミキサと比較して A 型ミキサの方が、相当長い時間、ブレードにモデルコンクリートが付着している。これは、ミクロ的な練混ぜ性能に有効である。

5. まとめ

2 軸強制練りミキサの練混ぜ性能のうち、ミクロ的な練混ぜに有効と考えられている局部交錯部の領域において発生するせん断流の大きさを、1 相系粘性流体の可視化モデルによって圧力という物理量によって定量化することができた。また、ミキサの形状によってせん断流の大きさが変化することが明らかになった。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会平成 18 年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)（課題番号 17360205、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し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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

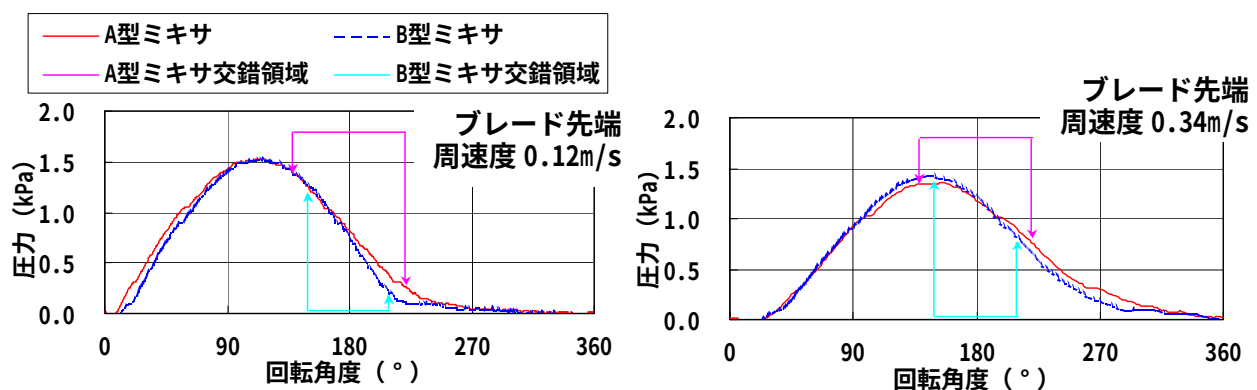


図-7 ブレード先端周速度が圧力波形に与える影響