

論文 固液2相系コンクリートモデルによる2軸強制練りミキサ内のブレード表面に発生するせん断流の定量化

福嶋 慎吾^{*1}・吉田 元昭^{*2}・渡邊 健^{*3}・橋本 親典^{*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”が存在する。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コンクリートの、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た。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, 局部交錯流動, 圧力センサ, せん断流

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、最も重要な施工要素の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本のシャフトに取り付けられた複数本のパドルの先端にあるブレードが回転することによって形成される“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。既往の研究²⁾により、粘性モデルモルタルを用いたパドル配列角度の違いによる練混ぜ性能評価を行い、パドル角度45度での練混ぜ性能に差が現れる結果となった。また、局部交錯部における圧力データの違いから、1相系粘性流体モデルにおいて局部交錯部のせん断流の存在が明らかとなった。

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、骨材とモルタルの容積比の異なるコンクリートを固液2相系の粘性モデルと仮定し、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を、ブレードに平行な方向、垂直な方向およびパドル軸方向に垂直な方向の3方

向別に動圧として測定し、ブレード位置での静圧を考慮して、動圧と静圧の差を圧力差と定義し、せん断流の指標とした。この圧力差に基づき、より大きい局部交錯流動が発生する条件について実験的に検討した。

2. ブレード周辺に発生するせん断流の定量化

2.1 局部交錯部におけるせん断流の存在

既往の研究により、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。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¹⁾。

本研究では、パドル角度45度に設定し、固液2相系のモデルコンクリート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、局部交錯域におけるせん断流の定量化を試みた。

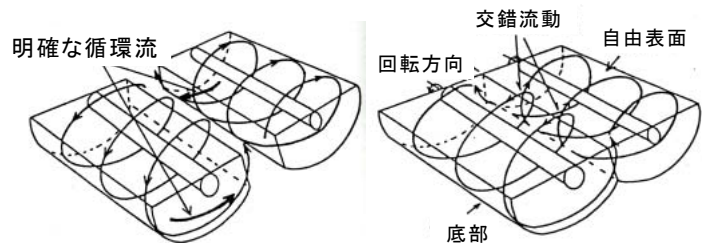


図-1 2軸強制練りミキサの流動構成¹⁾

*1 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1年 (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部門助教 工博(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エコシステムデザイン部門教授 工博(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)	練混ぜ槽の 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

2.2 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の記号Cはシャフト軸間距離、Lは軸長さ、Rはパドル軸長さすなわちブレードの回転半径、Aは局部交錯部の面積を意味する。シャフト軸間距離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、シャフト軸長さとパドル長さが大きく、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0.24m/sで一定となるようA型ミキサでは周速19.6回転/分、B型ミキサでは周速17.9回転/分として回転速度を調整した。²⁾

2.3 圧力センサの取り付け位置

既往の研究成果より、練混ぜに有効なパドル配列角度は45度であることが知られている。本研究では、45度に配列されたミキサの中央付近のブレードに、静圧と動圧を測定する圧力センサを取り付けた。静圧センサは計測面が回転方向に対し垂直方向に設置、動圧センサは各パターンによって計測面の方向を変化させ設置した。動圧センサの計測面は3つのパターンとした。その取り付け状況を写真-1に示す。ブレード面に平行な方向としてブレード表面にセンサ受圧面の穴を設けて直接取り付け

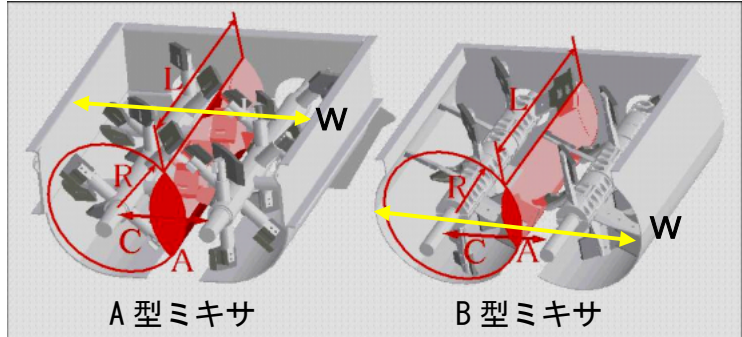


図-2 モデルミキサの模式図

たパターン1、ブレード面に対し受圧面が直角になるようにブレード表面にガイドを設けて圧力センサを取り付けたパターン2、そして、パドル軸方向と垂直な方向に受圧面になるようにブレード表面にガイドを設けて圧力センサを取り付けたパターン3である。

3. モデルコンクリート

3.1 使用材料

使用したモデルコンクリートは、固液2相系粘性流体と仮定し、モデルモルタルには、スターチポリアクリレートからなる白色粉末粒状体の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/cm³）を用いた。モデル骨材には樹脂球を用い、粒径14mm(密度:1.45g/cm³)の赤色球、粒径10mm(密度:1.45g/cm³)の緑色球、粒径6mm(密度:1.85g/cm³)の白色球の3種類とした。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。低粘性モデルモルタル

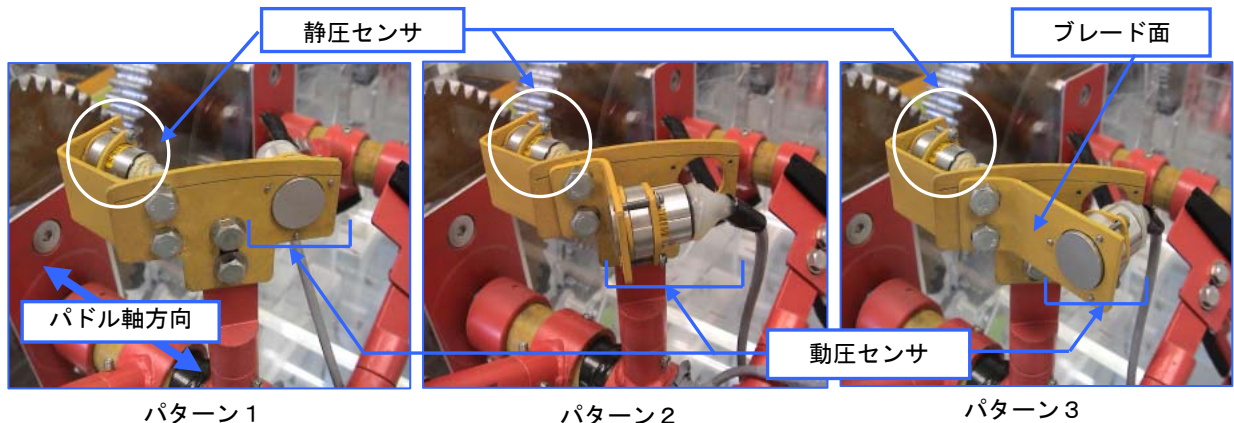


写真-1 圧力センサの取り付け位置

の粘性は、樹脂添加量を 3.0g/l でスランプフロー 380±10mm とした。高粘性モデルモルタルの粘性は、樹脂添加量を 6.0g/l でスランプフロー160±10mm とした。スランプフローは、塑性粘度よりも降伏値に関する物理量と高い相関がある。よって、本来であれば、一定のスランプフローに到達するまでの時間であるフロー到達時間を、粘性の物理的指標にした方が望ましい。しかしながら、本実験で扱う粘性流体は、降伏値と塑性粘度に高い相関があり、降伏値が大きい粘性流体は、塑性粘度も大きい。よって、本実験では、より簡便なスランプフロー試験で粘性を評価することにした。

3.2 モデルコンクリートの配合

実験に用いたモデルコンクリートの配合を表-2 に示す。全容量を 36ℓ とし、樹脂球の配分については赤：緑：白が体積比で 1：1：1 とした。配合は骨材/モルタル比 (Vg/Vm) が 0% (モルタルのみ)、50%、65%、80% の 4 種類とし、それぞれ 50% が高流動コンクリート、65% がスランプ 12cm 程度の普通コンクリート、80% がスランプ 8cm 以下の硬練りコンクリートを想定したものである。また、モルタルの粘性は高粘性と低粘性の 2 種類であり、各々モデルミキサに対して、8 種類の配合のモデルコンクリートを用いて練混ぜ実験を実施した。

3.3 実験方法

練混ぜ性能の実験は以下の通りである。

- 1) モデルコンクリートの各材料を計量する。スムーズに練混ぜが行えるようミキサ投入前にあらかじめバケツにて材料を手で混ぜ、2 回に分けてミキサに投入する。動圧センサと静圧センサをブレード面の所定の位置に取り付ける。
- 2) センサが円軌道の頂点にある状態を初期状態 (0 回転/0 度) であることを確認した後、練混ぜを開始する。なお、センサの測定開始位置および回転角度は図-3 に示す。今回使用したミキサの局部交錯領域の回転角度は、A 型では 229.1~310.9 度、B 型では 239.9~300.1 度に相当する。
- 3) 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表面付近から採取し、スランプフロー値の計測を行う。これは、ミキサによる練混ぜによるモデルコンクリートの粘性の変化を確認するためである。
- 4) 粘性に問題がなければ、動圧センサをブレードからはずし、他のセンサ位置に付け替える。静圧センサに関しては、全パターン共通であるため付け替える必要はない。動圧センサの付け替えが完了し次第、2) に戻る。

表-2 モデルコンクリートの配合表

配合名	容量 (L)	計量値 (kg)			
		モルタル	球		
			赤	緑	白
Vg/Vm	50%	24.0	5.80	5.80	7.40
	65%	21.8	6.85	6.85	8.75
	80%	20.0	7.73	7.73	9.87

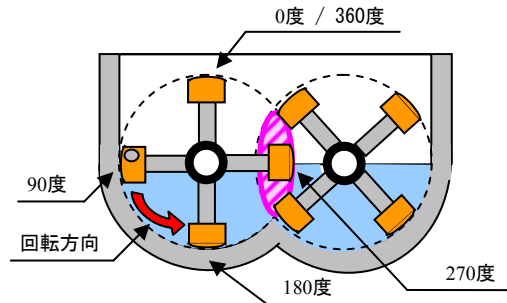


図-3 測定開始位置

- 5) 動圧センサ位置が 3 パターン全て終了したら、ミキサ底部よりモデルコンクリートを排出し、ミキサと樹脂球を洗い、配合を変更して①に戻る。

4. 実験結果

4.1 圧力波形データ

実験で得られた圧力波形データの一例を図-4 に示す。今回の実験において、A 型ミキサでの骨材と高粘性モルタル比を 80% としたモデルコンクリート、B 型ミキサでの骨材と高粘性モルタル比を 65%、80% としたモデルコンクリートについては、粘性が非常に大きくなり均一な練混ぜができなかった。動圧センサや静圧センサの受圧面の周囲にモデルコンクリートが存在しない状態でシャフトが回転する状況になり、圧力データを計測することができなくなった。そのため、本章での考察には取り扱っていない。図中の破線で示した領域は、各ミキサにおける局部交錯流動域である。凡例については、「Vg/Vm 50%、動圧センサによる取得データ」の場合は「50 動圧」と表記した。

既往の研究²⁾により、モデルモルタルでは粘性の影響を受けて、水の場合と比較して 270 度の部分以上回転しても一定の圧力が存在することが知られている。今回骨材を投入した固液 2 相系のモデルコンクリートにおいても、圧力センサの位置に関わらず同様の傾向が確認できた。

本実験結果では、センサ位置のパターンに関わらず、B 型ミキサのほうが A 型ミキサよりも静圧が大きい。これは、構造上 B 型ミキサが A 型ミキサよりも深底であり、水深に伴う静水圧が大きいためである。興味深いことは、静圧センサによる圧力の変化は、モデルコンクリートの Vg/Vm にはほとんど影響しておらず、モデルモルタルの

粘性が同じであれば、回転角度に伴う圧力の変化がほぼ同じ形状である。すなわち、シャフト軸周りで、ブレード周辺ではないコンクリートには、コンクリートの密度による静圧以外の圧力は発生しておらず、層流に近い流れであると考えられる。

ただし、A型ミキサの静圧データは、高粘性モルタルよりも、低粘性モルタルのほうが大きい。これは、高粘性モルタルを用いたモデルコンクリートは、モデルコンクリートとしての粘性が相当に大きくなり、コンシステンシーがスランプで0 cmに近い状態になる。その結果、練混ぜ時にブレードが空気を巻き込んで回転し、静圧センサに接触するコンクリートが減少したためであると考えられる。

一方、局部交錯流動が発生する範囲以外においても、静圧に比べ動圧が大きくなっているのは、骨材の影響である。骨材を投入することによるモデルコンクリート自体の粘性の増加、および練混ぜの際にセンサ計測面に対し接触している骨材の量が増加するためである。この傾向は、モデルミキサの形状に関係なく成り立つ。

また、A型ミキサよりB型ミキサのほうが、全体的に動圧の最大値が大きい。先に述べたように、ミキサの深さが影響していると考えられる。B型ミキサに関しては静圧も大きく、A型ミキサの1.5~2倍の値である。静圧センサの計測面がパドル軸方向であることを考慮すると、ブレード周辺に発生する圧力は、同じパドル位置の静圧の影響を排除し、動圧のみの圧力にした方がよい。本研究では、動圧と静圧の差で、局部交錯流動によるせん断流の大きさを定量的に評価することとした。

次頁に掲載する図-5に、回転角度に伴う動圧と静圧の差を、圧力センサの取付け位置別に示す。

圧力センサの取付け位置に関係なく、B型ミキサよりもA型ミキサのほうが、動圧と静圧の差が大きい。この傾向は、モルタルの粘性が高く、 Vg/Vm が大きいほど、強い。

動圧と静圧の差が最も大きいのは、パターン2の「圧力センサがブレード面と直角」の場合である。B型ミキサでは動圧と静圧の差が顕著ではないが、A型ミキサでは、モルタルの粘性の高低に関係なく、圧力の最大値が大きい。一方、モルタルのみの場合は、圧力センサの取付け位置に関係なく、骨材がある場合よりも小さい。せん断流は、骨材がある方がより活発になり、骨材が局部交錯流動に与える影響は大きい。よって、高流動コンクリートや高強度コンクリートのように、粉体が多くなり、相対的に粗骨材量が少なくなる高価なコンクリートで練混ぜ時間が長くなるのは、この局部交錯流動の発生が劣るためと考えられる。動圧と静圧の差が最大となる回転角度は、圧力センサの取付け位置によって異なる。圧

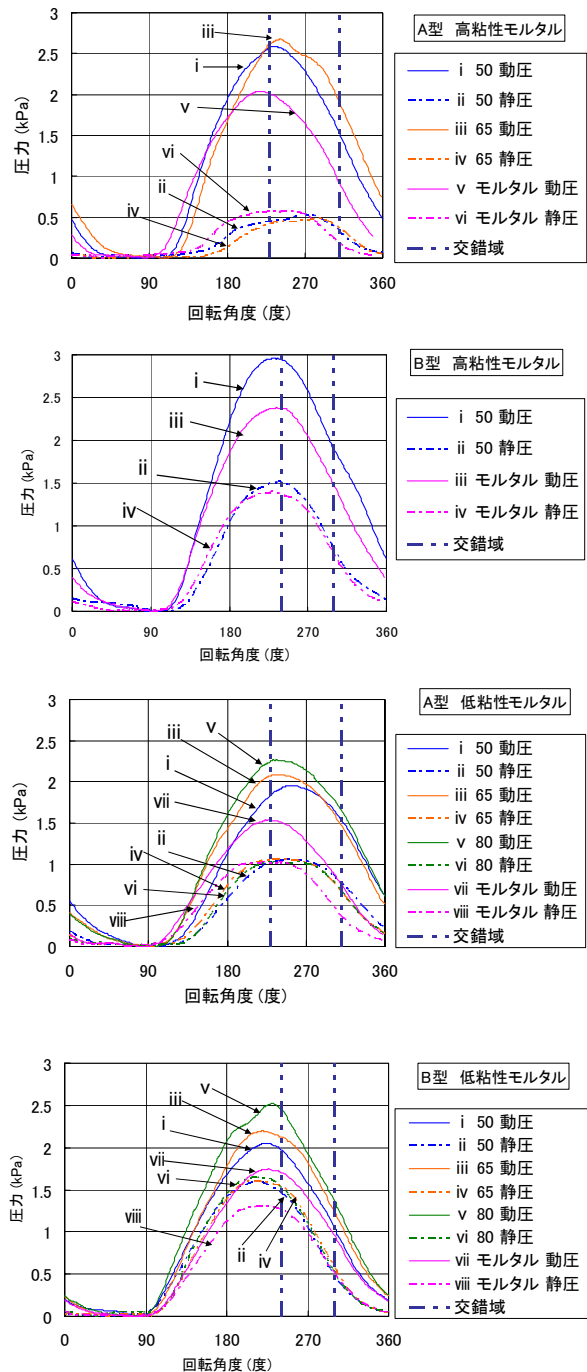
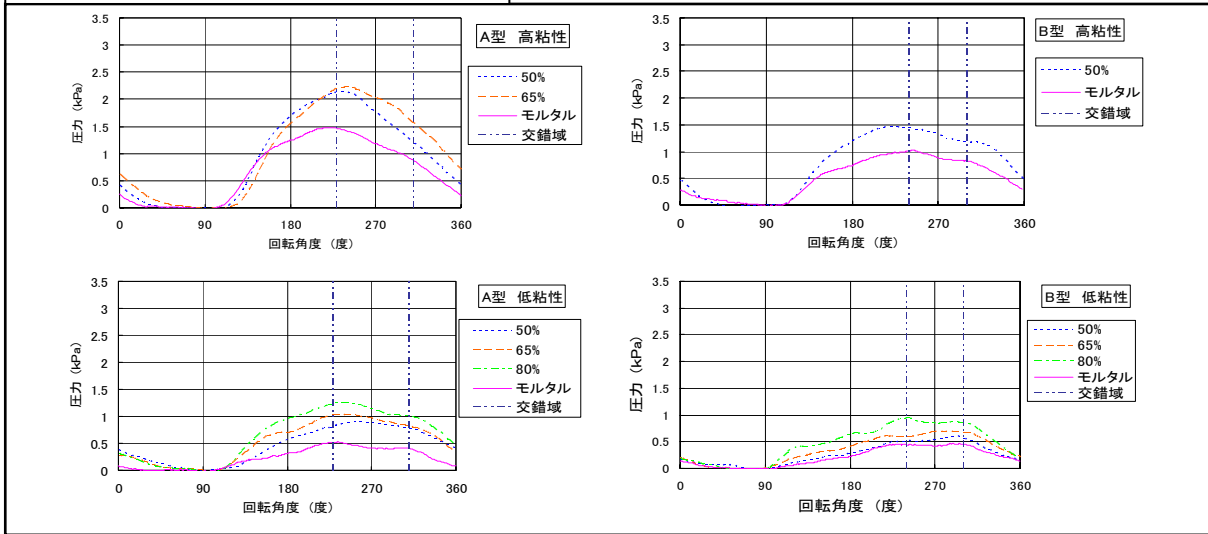


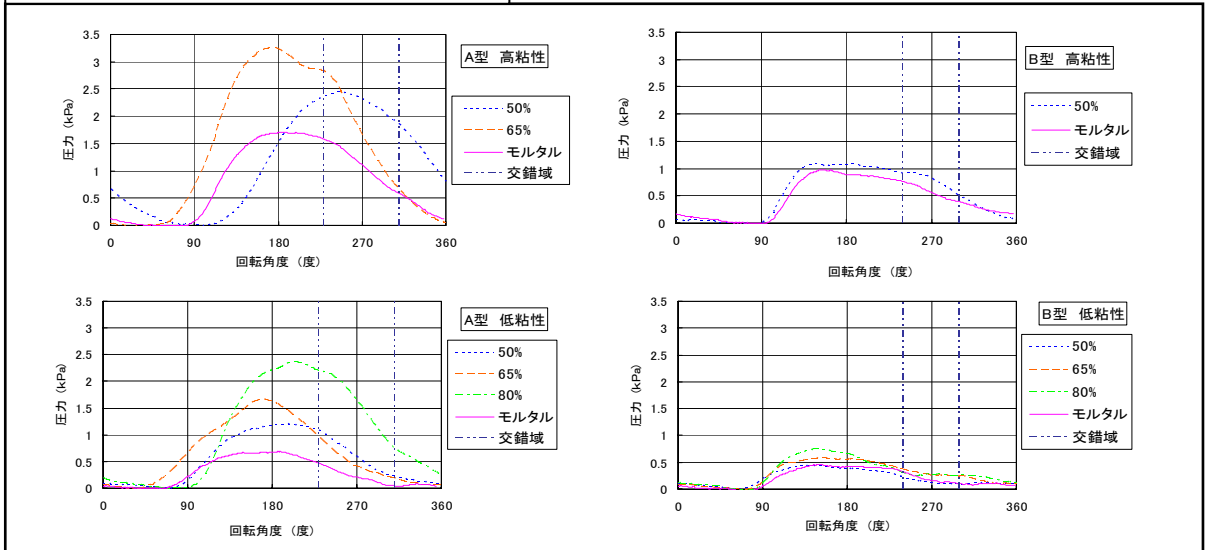
図-4 センサ面がブレード面に平行な場合の圧力の波形データ (パターン1)

力センサがブレード面と平行なパターン1では、局部交錯流動が発生する範囲内で最大値となる。これに対して、圧力センサがブレード面と直角な位置では、ブレードが最も底にある角度、すなわち180度近傍で、動圧と静圧の差が最大となる。圧力センサがパドル軸と直角なパターン3は、パターン1とパターン2の間の回転角度であり、局部交錯流動が始まる回転角度近傍で、動圧と静圧の差が最大になる。

パターン1 センサ面がブレード面に平行



パターン2 センサ面がブレード面に直角



パターン3 センサ面がパドル軸方向に平行

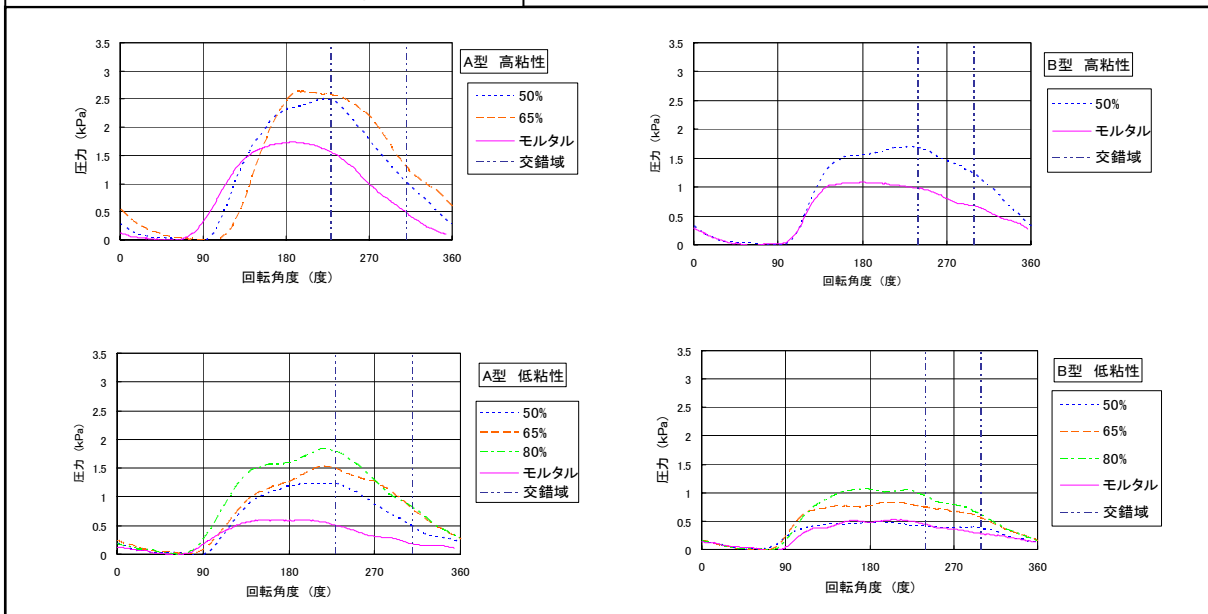


図-5 各センサ位置での動圧値と静圧値の差

4.2 局部交錯流動域の仕事量

圧力センサの取付け位置によって、ブレード面に発生するせん断流の大きさや、発生するときの回転角度は異なることが明らかになった。本節では、各ミキサの局部交錯流動域での練混ぜ性能の差に着目し、図-6 に示す局部交錯流動の発生する範囲内でのブレードがせん断流によってなす仕事量という指標を新たに定義した。図-6 に示す斜線部が、局部交錯域において、ブレード周辺で発生するせん断流によってコンクリートに与えられた仕事量である。ブレードがない場合は、ほぼ層流状態である“らせん流れ”が、ブレード面の存在によって、乱流となり、2本シャフトで発生する“乱流”がぶつかり合うことによって、より大きな乱れになり、これによって、ミクロな練混ぜがより促進されると考えられる。

図-7 は、圧力センサの取付け位置のパターン別に、局部交錯域でのブレードの仕事量と Vg/Vm の関係を示す。仕事量の単位は、局部交錯域で作用する圧力であるため、「kPa・度」と表記する。最もせん断流によってブレードがなす仕事量が大きくなった実験条件は、浅底のA型ミキサで、高粘性モデルモルタルで、 Vg/Vm が65%の場合である。圧力センサがブレードと直角な取付け位置では、 Vg/Vm が50%のときに仕事量が最大となり、 Vg/Vm が65%では仕事量が小さくなっている。これは圧力波形のピーク値が、他の2つの取付け位置に比べて早い段階で現れ、局部交錯流動域に達したときに圧力が減少しているためである。しかし、全体の傾向としては、圧力センサの取付け位置に関係なく、浅底のA型ミキサの高粘性モデルモルタルの練混ぜにおいて、局部交錯流動が最も活発である。

次に、B型ミキサの高粘性モデルコンクリートの場合には、モルタルのみと粗 Vg/Vm が50%の場合しか計測できていないが、A型ミキサの低粘性モデルコンクリートの場合と深底のB型ミキサの高粘性モデルコンクリートの場合の仕事量がほぼ同程度である。これに対し、B型ミキサの低粘性モデルコンクリートの場合には、仕事量が最も小さい。つまり、局部交錯流動によるせん断流が活発でなく、練混ぜのエネルギーが小さいことを意味する。

一方、パターン1、パターン2およびパターン3の圧力センサの取付け位置がこの仕事量に与える影響は、先のパターン1のA型ミキサの高粘性モデルモルタルの場合以外ほとんど影響が見られなかった。これは、局部交錯流動によって発生するせん断流には、指向性はなく、ブレード周辺にランダムな乱れを形成していることを示唆するものである。

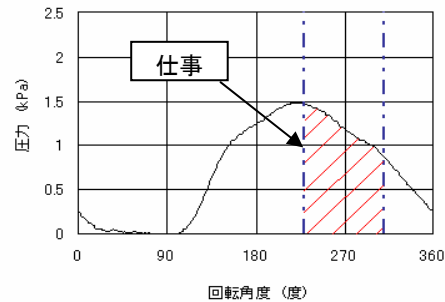


図-6 局部交錯域の仕事量

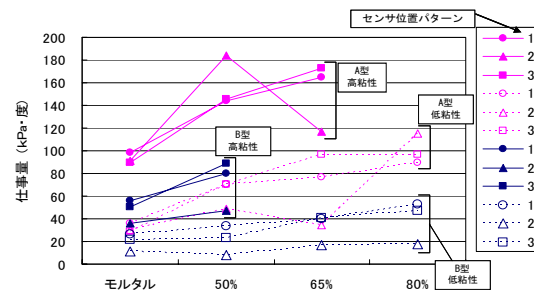


図-7 局部交錯域におけるブレードの仕事量

5. まとめ

本研究では、2軸強制練りミキサの練混ぜ性能のうち、セメント粒子と水の接触頻度を高める練混ぜに寄与する局部交錯流動に着目し、この局部交錯領域において発生するせん断流の大きさを、ブレード面近傍の圧力センサを用いて計測し、シャフトの回転角度に伴う動圧と静圧の差の変化から算定した仕事量を求め、ミキサの形状、モデルモルタルの粘性および Vg/Vm が、せん断流に与える影響を定量化した。

その結果、深底であるB型ミキサより浅底であるA型ミキサの方が、局部交錯流動領域で発生するせん断流によってなされる仕事量が大きく、練混ぜ性能に優れている。同一ミキサ形状では、モデルモルタルの粘性が高くなり、かつ Vg/Vm が大きくなるほど、せん断流によってなされる仕事量が増加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19年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)(課題番号17360205, 研究代表者:橋本親典)に基づき実施されたものであることを付記し、感謝に意を表します。

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
- 2) 橋本 親典, 吉田 元昭, 渡辺 健, 石丸 啓輔: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, 2007