

論文 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

吉田 元昭*1・橋本 親典*2・渡邊 健*3・水口 裕之*2

要旨: 超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化を図るためには、練混ぜ初期における粗骨材粒子の分散を高め、粗骨材粒子群の回転・衝突による練混ぜ効果を向上させることが重要である。全体循環流動が卓越するパドル角度45度のブレードに連続性を有する局部交錯流動の重要な要素であるせん断流を活発化させた2軸強制練りミキサを考案し、練混ぜ初期の練混ぜ性能の高性能化を可視化実験により定量的に評価した。さらに、ブレードの連続性による練混ぜ時間の短縮化を実機ミキサによる練混ぜ性能試験により検証した。
キーワード: 超高強度コンクリート, 2軸強制練りミキサ, 練混ぜ時間, 可視化モデル, 練混ぜ性能試験

1. はじめに

コンクリート製造設備において、コンクリートミキサは、コンクリートを「練り混ぜる」作用が必要で、最も重要な要素である。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。

既往の研究^{2,3)}では、1相系の粘性流体モデルにおける練混ぜ性能の違いから「ミクロの練混ぜ性能」が良好なミキサの条件として、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との結果が得られている。また、固液2相系の粘性流体モデルにおけるブレード周辺のせん断流の圧力変動から算出した仕事量により、局部交錯流動により発生するせん断流の定量化を行い、せん断流が活発に発生するミキサ形状、モデルモルタルの粘性、骨材濃度の条件を明らかにしている。これらの研究により、通常の有スランブコンクリートを対象とした2軸強制練りミキサの練混ぜ性能の高性能化を図ってきた。

一方、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。レディーミクストコンクリート工場では、出荷量の低下が問題となっている。この原因は、高粉体量で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る。粗骨材粒子群の回転・衝突により高粘性モルタルの練混ぜが期待できないためである。

本研究では、極端に粉体量が多く骨材量が少ない超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化を図るミキサの開発を目的とし、著者らが開発してきた可視化実験手

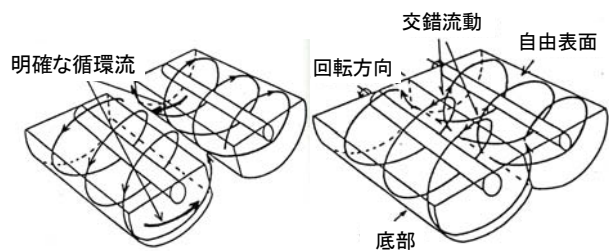


図-1 2軸強制練りミキサの流動構成¹⁾

法を用いて、新たなミキサの可能性を追及した。

2. 超高強度コンクリート対応ミキサに求められる性能

超高強度コンクリートの練混ぜは、「材料投入」→「練混ぜ初期の低粘性モルタルの製造」→「練混ぜ中期の低粘性から高粘性モルタルへの移行」→「練混ぜ終期の安定した高粘性モルタルの製造」→「練上り」の過程をたどる。

超高強度コンクリートの練混ぜ状況を詳細に目視観察した結果、「高粉体量によるモルタルの高粘性化に到達するまでの練混ぜ時間の長期化」と「低粗骨材濃度による粗骨材粒子群の練混ぜエネルギーの低下」があいまって練混ぜの進行が進まないことが明らかになった。特に、材料投入直後の練混ぜ初期の粗骨材粒子群の分散度の低い練混ぜ時間帯でのモルタルの練混ぜの高性能化が必要であるという考えに至った。これを実現するためには、練混ぜ初期における粗骨材粒子の分散を高め、粗骨材粒子群の回転・衝突による練混ぜ効果を向上させることが重要である。

本研究では、超高強度コンクリートの低粗骨材濃度配合における、粗骨材の練混ぜ効果を最大限に発揮すべく「練混ぜ初期領域」即ち5回転程度までの粗骨材粒子群の早期分散による練混ぜ性能の向上に着目した。

*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 博士後期課程3年 (正会員)

*2 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)

*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 博士(工)(正会員)

3. 可視化ミキサによる練混ぜ性能実験

3.1 可視化ミキサの容器形状

既往の研究では、2軸強制練りミキサの練混ぜ性能のうちミクロ的練混ぜに有効と考えられている局部交錯流動により発生するせん断流は、局部交錯部の領域の大きさにより変化する。実験に用いたモデルミキサの容器形状は、市販されている2軸強制練りミキサにおいて、局部交錯部の領域が最も大きい実機ミキサの1/65の縮尺の物を透明アクリルで製作した。モデルミキサの容器形状を図-2、諸元を表-1に示す。

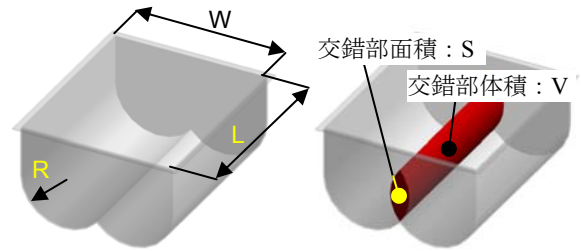


図-2 モデルミキサの容器形状

表-1 モデルミキサの容器形状に関する諸元表

練り混ぜ容量	(リットル)	34.5
容器長さ	L (mm)	536
容器幅	W (mm)	474
容器半径	R (mm)	135
交錯部面積	S (mm ²)	7995
交錯部体積	V (mm ³)	4285320

※交錯部領域とは、2軸ミキサのブレード回転領域における交錯領域を意味する。

3.2 モデルミキサのブレード形状

(1) 従来タイプモデルミキサのブレード形状

従来タイプモデルミキサのブレード形状は、現在市販されている2軸強制練りミキサにおいて、最も練混ぜ性能の高いミキサを忠実に1/65としたモデルを鋼にて製作した。従来タイプモデルミキサのブレード形状を図-3に示す。

(2) 新タイプモデルミキサのブレード形状

既往の研究では、「ミクロ的練混ぜ性能」が良好なミキサの条件として、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。また、局部交錯部の領域が大きい場合、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なり、練混ぜ性能に優れている。更に、同一ミキサ形状では、モデルモルタルの粘性が高く、かつ骨材濃度が大きくなるほど、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ている。よって、新タイプミキサのブレードは、連続性を持つブレード形状が必要条件となる。

そこで、市販されている2軸強制練りミキサにおいて最も練混ぜ性能が高く全体循環流動の発生が活発なパドル角度45度のミキサである従来タイプミキサのブレードに連続性を持たせ不要なパドルを取り除いたブレード、パドル形状を新タイプミキサと定義した。

新タイプミキサのブレード形状を図-3に示す。

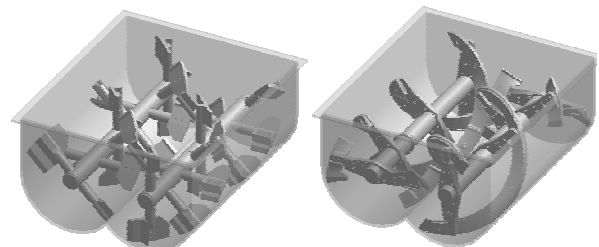


図-3 モデルミキサのブレード形状

表-2 モデル骨材の物性値

色	粒径 (mm)	密度 (g/cm ³)	材料
白	6	1.85	ユリア
緑	10	1.45	樹脂球

表-3 モデルコンクリートの配合

配合名	単位量 (kg/m ³)			
	モルタル	白球骨材	緑球骨材	
Vg/Vm	50%	667	308	252
	65%	606	364	286
	80%	556	411	322

3.3 使用材料

実験では、コンクリートを固液2相系の粘性流体と仮定しモデルモルタル、モデル骨材を用いた。モデル骨材は、樹脂球を使用した。使用した樹脂球の粒径および色を表-2に示す。

モルタルモデルには密度が1.0g/cm³で、でん粉とアクリル酸ソーダの高分子共重合体である高吸水性高分子樹脂溶液を用いた。モデルモルタルは、無色透明な粘性流体である。本モデルモルタル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、本実験では3.0g/lで一定とした。添加量3.0g/lでは、ミニスランブコ

ーン(φ50mm×φ100mm×h150mm)を用いたスランブフロー試験で170~180mm程度のフローとなる。

可視化モデルコンクリートの配合は、骨材とモルタルの容積比のみとした。骨材とモルタルの容積比(Vg/Vm)を、50%、65%および80%の3種類とした。50%は、超高強度コンクリートや高流動コンクリートの骨材濃度を想定し、単位粗骨材量が少ない配合である。一方、80%は、スランブ8cm以下の一般的な土木用コンクリートの骨材濃度に近く、単位粗骨材量の多い配合である。65%は、スランブ12cm程度の一般的な建築用コンクリートの単位粗骨材量の配合を想定した。実験に用いたモデルコンクリートの配合を表-3に示す。

実験及び解析手順を以下に示す。

(1) モデルモルタルの作成

正確に計量した高吸水性高分子樹脂と水をダマが発生しないように注意し均質となるように混合する。

高吸水性高分子樹脂溶液のスランブフローが安定した状態にて規定のスランブフローが得られているかを確認し、必要量を正確に計量する。

(2) 粒径別モデルコンクリートの作製

正確に計量したモデル骨材である白球、緑球 各々とモデルモルタルの半量を均等質となるように混合する。

(3) 容器への充填

白球を用いたモデルコンクリートと緑球を用いたモデルコンクリートを、容器を軸方向に2分割し両モデルコンクリートが混ざらないように慎重に充填する。

モデルコンクリートを充填したモデルミキサを写真-4に示す。

モデルミキサの底面を写真-5に示す。

(4) 混合実験

容器底面が画面一杯となるようにビデオをセットし録画を行うと同時にミキサシャフトを回転させる。この時ミキサシャフトの回転速度を実機ミキサの回転速度と同じ 36min^{-1} とする。実験での回転回数は、一般的なコンクリートを実機ミキサで練り混ぜた場合に練混ぜ性能試験で充分合格可能な20回転までとした。

(5) 混合度の算出

得られた動画より、各回転回数毎に静止画を切出し、各静止画に撮影されたモデルミキサ底面を正確に4つのウインドに分割し、対角の2つのウインドを更に4つのウインドに分割する。

静止画のウインド分割例を写真-6に示す。

各ウインド内に存在する白球、緑球の個数を計数する。

次に、8ウインドの白球の数 $x_i(i=1\sim 8)$ より分散を求め、練混ぜ開始時の分散と完了時の分散と任意の回転数の分散を用いて混合度Mを式(1)にて求める。

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

ここで、 σ_0^2 = 練混ぜ開始時の分散

σ^2 = 任意の回転数における分散

分散 : $\sigma^2 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (x_i - \bar{x})^2$, \bar{x} : 8ウインドの白玉の数の平均値である。

練混ぜが進行するほど、混合度Mが100%に漸近し平衡状態となる。この混合度Mが100%に漸近する度合いによって、練混ぜ性能を評価する。なお、式(1)は、完全混合度を最終時の分散として、完全混合時の分散を零とした。よって、回転数が100回転程度では、完全混合までに達しない。

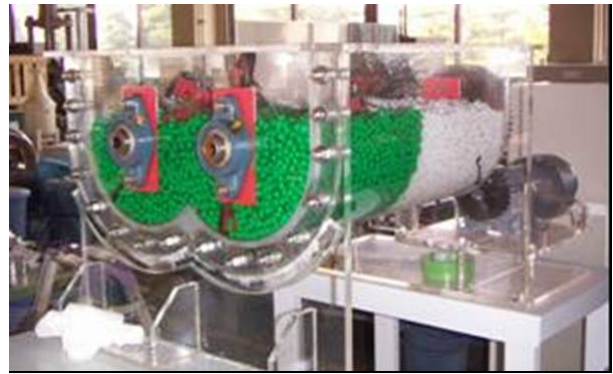


写真-4 モデルコンクリートを充填したモデルミキサ

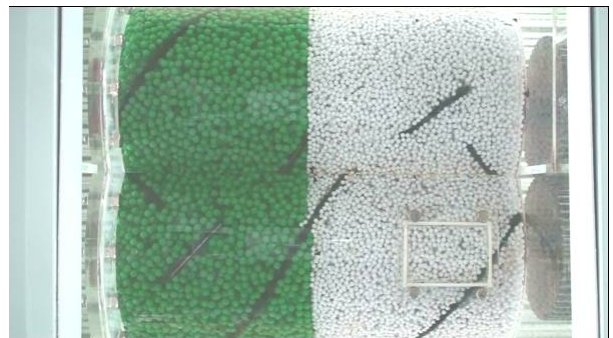


写真-5 モデルミキサ底面



写真-6 ウインドの分割例

3.4 実験結果

(1) 従来タイプミキサの実験結果

従来タイプミキサを用いた練混ぜ性能実験結果を図-7に示す。

全ての骨材濃度において、ミキサ回転開始直後では、混合度が0%であり、3回転目から6回転目までに急激に混合度が上昇し、10回転程度で定常状態となる。骨材濃度(Vg/Vm) 65%が最も早く定常状態に到達し、骨材濃度50%、80%の順で定常状態となる。

従来タイプミキサは、各骨材濃度の実験結果に大差はないが、練混ぜ初期領域に着目すると、骨材濃度65%が最も練混ぜ性能が高く、次いで骨材濃度50%、80%の順である。

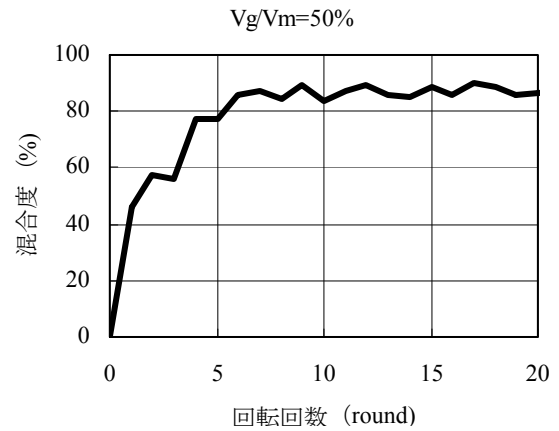
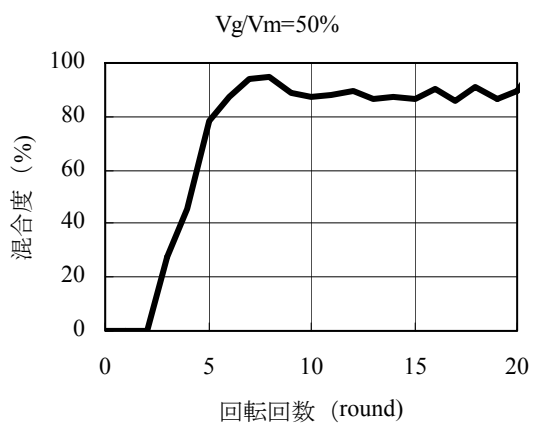
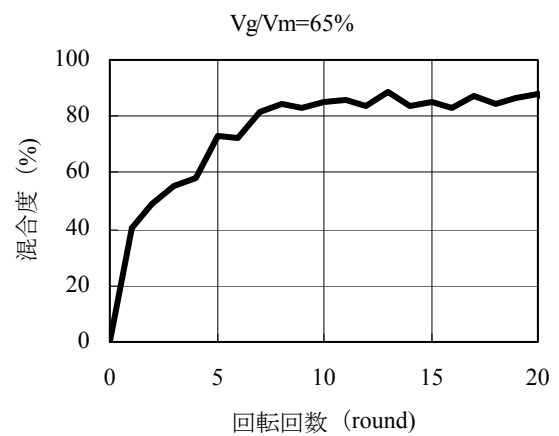
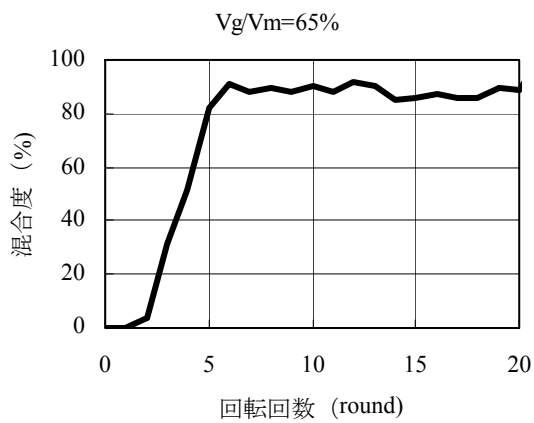
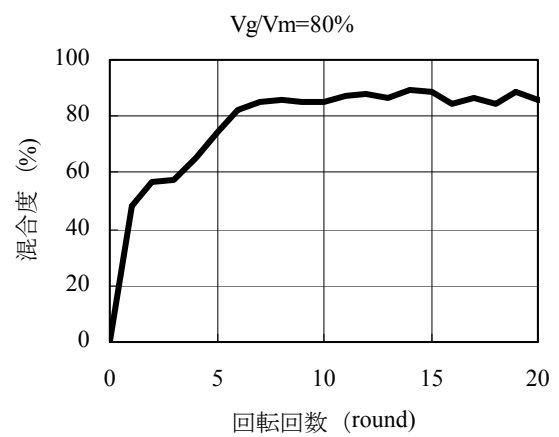
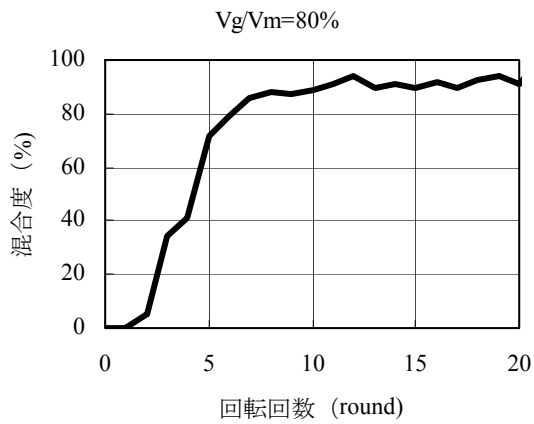


図-7 従来タイプミキサの混合度の推移

図-8 新タイプミキサの混合度の推移

(2) 新タイプミキサの実験結果

新タイプミキサを用いた練混ぜ性能実験結果を図-8に示す。

全ての骨材濃度において、ミキサ回転開始直後より混合度が急激に上昇し、10回転程度で定常状態となる。各骨材濃度により混合度が定常状態となるまでの回転回数に大差は見られないが、骨材濃度 (Vg/Vm) 50%が最も早く定常状態に到達し、骨材濃度80%, 65%の順で定常状態となる。

新タイプミキサは、パドル角度45度の従来タイプミキサのブレードに連続性を持たせた構造である。既往の研究²⁾よりブレードの連続性は、ミクロ的な練混ぜ性能に

寄与する局部交錯流動が活発化し、パドル角度 45 度より全体循環流動も活発化する構造であることが知られている。また、骨材濃度 50%は、骨材の回転による練混ぜが最も弱くミキサによる練混ぜ性能が低下することが知られている。

新タイプミキサは、連続的なブレードを採用していることと、骨材濃度 50%の混合度が最も早く定常状態となること、ミキサ回転開始直後より混合度が急激に上昇していることより、練混ぜ初期での骨材分散効果が高く、ミキサ単体での練混ぜ性能が高いことが明らかとなった。よって、単位粗骨材量が少ない超高強度コンクリート等において練混ぜ性能の向上が期待できる。

表-4 示方配合

配 合	粗骨材の 最大寸法 G max (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント 比 W/B (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ²)					
						水 W	セメント C	混和材 P z	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 S P
W/B20%-60-20	20	60±10	1.5±1.5	20.0	40.7	160	680	120	605	873	12.00

4. 実機ミキサによる高強度コンクリート練混ぜ実験

4.1 練混ぜ実験の目的

局部交錯流動と全体循環流動を高める構造のミキサでは、可視化実験にて高性能な結果が得られたミキサは、実機ミキサの練混ぜ性能でも高性能であることが過去の実験より明らかになっている。

本可視化実験では、超高強度コンクリートに代表される骨材濃度の低い配合の練混ぜ性能実験結果が最も良好であった。そこで、新タイプミキサの実機実験が可能な簡易プラントを製作し骨材濃度の低い呼び強度100N/mm²以上の超高強度コンクリートを対象に、練混ぜ性能実験を実施し、本可視化実験の妥当性を証明することとした。

4.2 練混ぜ実験の概要

新タイプ実機ミキサを写真-9に、簡易プラントを写真-10に示す。

実験は、表-4に示す示方配合にて、表-5の材料を用い練混ぜ容量1.67m³のミキサをもちいて1バッチの練混ぜ容量を1.125m³として実施した。練混ぜ手順は一般的な



写真-9 新タイプ実機ミキサ(練混ぜ容量 1.67m³)



写真-10 簡易テストプラント

表-5 使用材料

材料	種類および産地	密度 g/cm ³	吸水率 %	実積率 %	粗粒率
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	-	-	-
混和材	高強度混和材	1.17	-	-	-
細骨材	福岡県北九州産石灰砕砂	2.68	0.51	54.9	2.48
	兵庫県飾磨郡産砕砂	2.57	1.53	56.7	2.77
粗骨材	兵庫県飾磨郡産砕石	2.60	1.02	58.0	6.69
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤	2.64	-	-	-

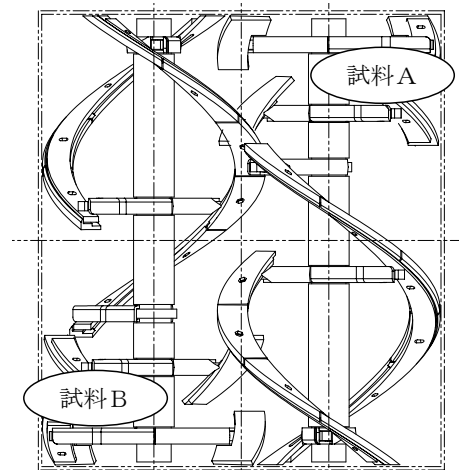


図-11 試料採取位置

普通コンクリートを練混ぜる場合の手順を用いた。すなわち、細骨材・水を投入した後、セメントを投入し直ぐに粗骨材を投入する手順である。実験に用いた試料は、材料投入開始から90秒間練混ぜた後、ミキサを停止しミキサ内対角位置より採取した。試料採取位置を図-11に示す。次に、採取後直ぐにミキサを起動し20秒毎練混ぜた後(合計110秒, 130秒)ミキサを停止し採取した。採取した試料を用いて、「コンクリートミキサ (JIS A 8603 : 1994)」に規定されている試験である「ミキサで練混ぜたコンクリートの中のモルタルの差および粗骨材量の差の試験方法 (JIS A 1119 : 2005)」に従って練混ぜ性能試験を実施した。

4.3 練混ぜ実験結果

練混ぜ性能実験の結果として、モルタルの単位容積質

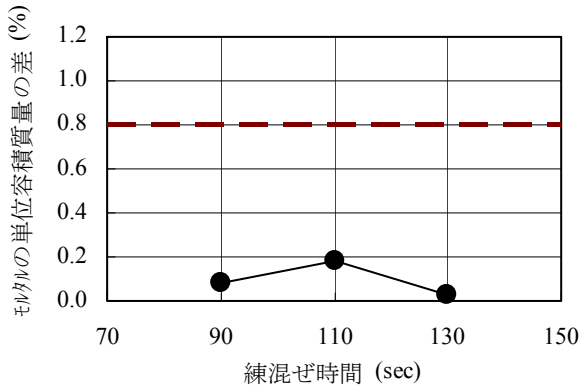


図-12 モルタルの単位容積質量の差

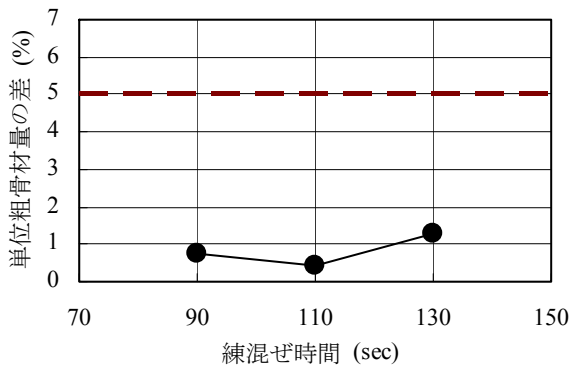


図-13 単位粗骨材量の差

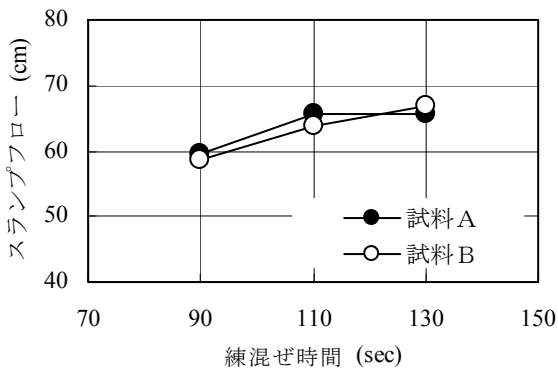


図-14 スランプフロー測定結果

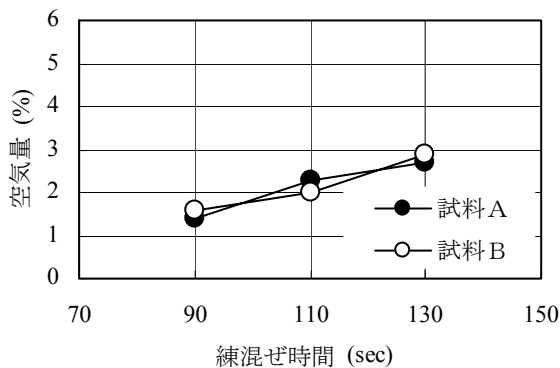


図-15 空気量測定結果

量の差を図-12に、単位粗骨材量の差を図-13に、スランプフロー測定結果を図-14に、空気量測定結果を図-15に、圧縮強度測定結果を図-16に示す。なお、図-14、15、16内試料A、試料Bは採取位置を示す。

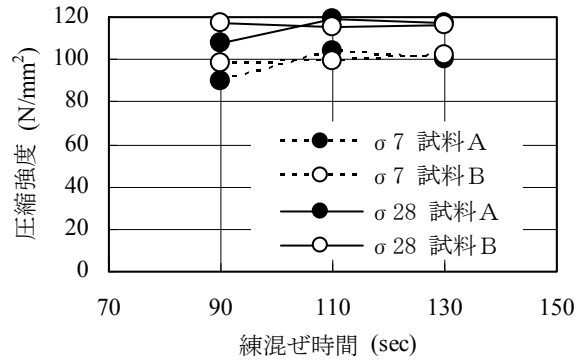


図-16 圧縮強度測定結果

実機ミキサによる練混ぜ性能実験結果では、全ての項目において、「コンクリートミキサ (JIS A 8603-1994)」に規定されている値より充分小さい値で合格した。また、圧縮強度の測定結果より練混ぜ時間 90 秒でも圧縮強度差 4.4%、供試体 6 本 (試料①3 本、試料②3 本の計 6 本) の変動係数が 5.17% と低いことより、練混ぜ時間 90 秒で充分練り混ぜられていることが明らかになり、練混ぜ時間の短縮化が図られた。

これらのことにより、局部交錯部の領域が大きい容器を用い、全体循環流動が卓越するパドル角度 45 度のブレードを繋ぎ連続性を持たせたブレードを採用することにより、練混ぜ初期における骨材分散性能が向上した結果、低骨材濃度配合である高強度コンクリートの練混ぜが短時間で完了することが可能である。

5. まとめ

低骨材濃度配合において、練混ぜ初期における粗骨材粒子群の分散性能に優れたミキサ即ち局部交錯部の領域が大きい容器を採用し、全体循環流動が卓越するアーム角度 45 度のブレードを繋ぎ連続性を持たせた形状とした 2 軸強制練りミキサが有効であることが判明した。

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, pp.49-54, 2007.7
- 3) 福嶋 慎吾, 吉田 元昭, 渡辺 健, 橋本 親典: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp. 199-204, 2008.7