

# 論文 2軸強制練りミキサの流動機構と練混ぜ性能に関する実験的研究

池田修\*1・橋本親典\*2・杉山隆文\*3・辻幸和\*4

要旨：2軸強制練りミキサの可視化実験により得られたミキサ内のモデルコンクリートの流動機構が、実際のコンクリートの練混ぜ性能に及ぼす影響について検討することを目的とし、シリカフェーム混入コンクリートを用いた実機ミキサによる練混ぜ性能試験を行った。測定項目は、シリカフェームの分散率と圧縮強度、単位粗骨材量の変動係数とした。その結果、2軸強制練りミキサの練混ぜ性能は全体を循環させる流動を卓越させることで向上することが明らかになった。

キーワード：2軸強制練りミキサ、流動機構、練混ぜ性能、シリカフェーム

## 1. はじめに

コンクリートの製造過程の中心を占めているコンクリートミキサの練混ぜ性能に関しては、排出されたコンクリートでしか判定されておられず、ミキサ内での練混ぜ機構を直接取り扱った研究はこれまで殆どなされていない。特に、ブレード周辺のコンクリートの挙動が非常に複雑であり、練混ぜ性能の定量的評価を行うことが、従来の研究手法では困難であった。

これに対し著者らは、2軸強制練りミキサのコンクリートの練混ぜ機構の解明を目的として、フレッシュコンクリートの可視化モデルを用いて、ミキサ内におけるコンクリートの流動状況の可視化を行ってきた[1]。しかし、可視化実験によって得られた結果は、ミキサ内でのモデルコンクリートの流動機構に関する情報である。したがって、可視化実験で得られた流動機構と実際のコンクリートの練混ぜ性能との関連性を検証するために、可視化実験では再現できない練混ぜ性能の実験を、実際のコンクリートで行う必要がある。

本研究では、2軸強制練りミキサの流動機構が練混ぜ性能に及ぼす影響について検討することを目的とし、シリカフェーム混入コンクリートを用いた実機ミキサによる練混ぜ性能試験を行う。

## 2. 2軸強制練りミキサ内の流動機構

図-1に可視化実験手法による2軸強制練りミキサ内の流動機構を示す。“らせん流動”がミキサ中央で接触する局部交錯流動と逆方向に進行する“らせん流動”が相互に繰返すことにより形成される全体循環流動がある。可視化実験に用いたモデルミキサの容量は50リットルであり、公称1.5m<sup>3</sup>の実機ミキサの1/3モデル(長さで1/3、容量で1/27)である。図-2に実験装置の概要を

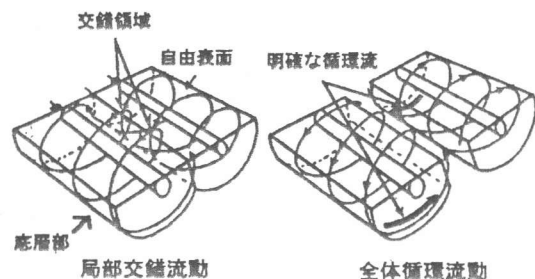


図-1 2軸強制練りミキサ内の流動機構

- \*1 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (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 群馬大学助手 工学部建設工学科、Ph. D. (正会員)
- \*4 群馬大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

示す。ミキサ容器部は内部透視が可能な透明アクリル樹脂製である。可視化モデルコンクリートはモルタル相と粗骨材粒子群からなる固液2相系混相流体とした。パドル配列角度を

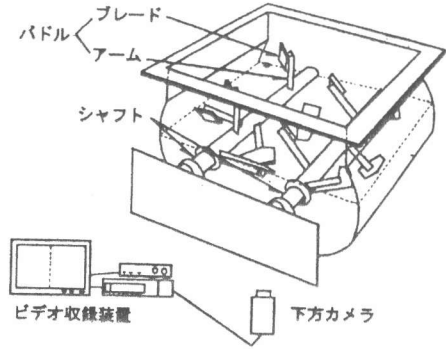


図-2 可視化実験装置の概要

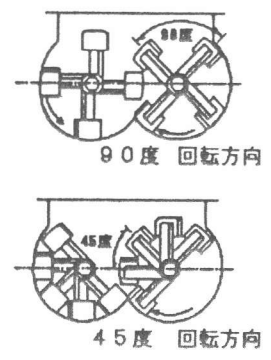


図-3 パドル配列角度

図-3に示す。練混ぜ性能の評価は、計測画面内の中心を原点と設定し、各計測時での個々のトレーサ粒子群の重心位置と原点からの距離を用いた。画面全体にトレーサ粒子が出現するに伴い、重心距離はゼロに漸近する。パドル配列角度45度は全体循環流動が卓越し、90度は局部交錯流動が卓越していることが明らかになっている。図-4に示すトレーサ粒子群の重心距離の時系列変化において、パドル配列角度45

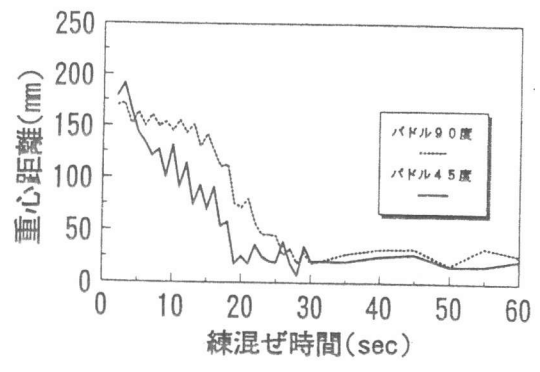


図-4 トレーサ粒子群の重心位置と原点からの距離の時系列変化

度の場合、90度と比較して収束状態に達する時間が短く、早くトレーサ粒子が画面全体に拡散する。これは、2種類の流動機構の違いにより練混ぜ性能に差が生ずることを示唆する。すなわち2種類の流動機構が練混ぜ性能に及ぼす影響は異なるものと考えられる。

### 3. コンクリートに要求される練混ぜ性能

一般にコンクリートは、セメント粒子、細骨材粒子、粗骨材粒子など数 $\mu\text{m}$ ~数 $\text{cm}$ という広範囲な粒径分布を有する粒子群である固体相と水である液相から構成された複合材料である。この固液2相系材料であるコンクリートの練混ぜには、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行うための「微視的な練混ぜ」と、細骨材や粗骨材などの粒子群を均一に混合しその粒子空隙間にセメントペーストを密実に充填させる「巨視的な練混ぜ」が要求されると考えられる。

可視化実験でのトレーサ粒子群の重心距離の時系列変化は、粗骨材粒子群の分散性に着目しており、「巨視的な練混ぜ」性能を評価する指標である。「巨視的な練混ぜ」では、図-4の結果から局部交錯流動より全体循環流動が、2軸強制練りミキサの練混ぜ性能に寄与している。一方、可視化実験手法では「微視的な練混ぜ」を評価できないため、「微視的な練混ぜ」が、どの流動機構の影響を受けるのかが分からない。そのため、実際のコンクリートを用いて「微視的な練混ぜ」を評価する必要がある。

本研究では、「微視的な練混ぜ」性能を評価する指標として、超微粒子であるシリカフューム

をトレーサ粒子として用いることとした。また、「巨視的な練混ぜ」性能を評価する指標として、作製したコンクリートの数か所より抽出した試料の圧縮強度と単位粗骨材量の変動係数を用い、可視化実験で得られた知見の検証を行う。

#### 4. 硬化コンクリート中の未反応なシリカフェームの存在状態

シリカフェームのポゾラン反応速度と反応率は必ずしも一致せず、水固体比23%で置換率10%のシリカフェーム—普通ポルトランドセメントの反応系において、各材齢毎のシリカフェームの反応率は、材齢1日で33%、材齢3日で40%、材齢28日で60%程度ある[2]。即ち、材齢3日において60%は未反応なシリカフェームが存在することを意味する。従って、未反応なシリカフェームをも対象にして硬化コンクリートをSEM観察すれば、シリカフェーム粒子単体がほぼ完全な球状であることから[3]、シリカフェームを観察することは可能であると考えられる。一般的に、シリカフェーム粒子は超微粒子であるために、コンクリートの混和材としては凝集した状態で用いられており、ミキサの練混ぜによってシリカフェームの凝集体がすべて分解されることはなく、硬化コンクリート中においても未反応なシリカフェームが凝集状態で存在するものも多くあると予想される。よって、硬化コンクリート中に存在する未反応なシリカフェーム粒子群が凝集状態あるいは分散状態であるかを、SEM観察により識別することは可能であると考えられる。写真-

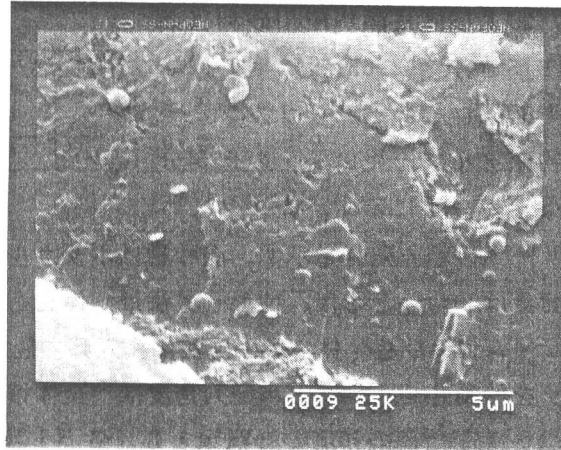


写真-1 分散状態のシリカフェーム

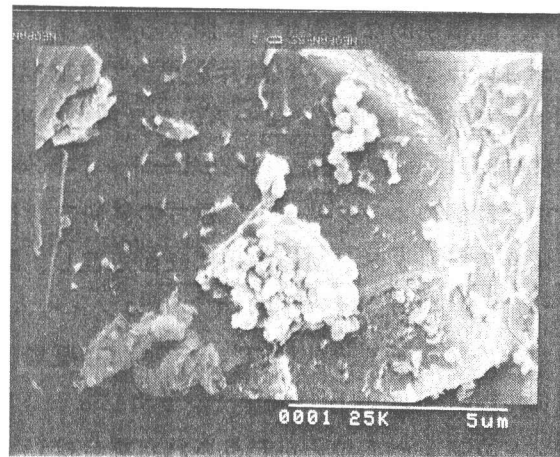


写真-2 凝集状態のシリカフェーム

1と写真-2は材齢28日における硬化コンクリートをSEM観察し、未反応なシリカフェーム粒子の分散状態及び凝集状態を撮影したものである。以上の理由によって、本研究ではシリカフェームの分散率を用いることによってミキサの「微視的な練混ぜ」を評価することができると考えた。

#### 5. 実験概要

##### 5.1 実験方法

実験に用いた2軸強制練りミキサは、容量50リットルでパドル配列角度および回転速度を変えられ、可視化実験手法で用いた透明アクリル樹脂製の2軸強制練りミキサと同じスケールである。シャフト一本あたりのパドル数7枚はモデルミキサと同数である。実験に用いたセメント、細骨材および粗骨材は、それぞれ普通ポルトランドセメント(比重3.16、比表面積3340cm<sup>2</sup>/g)、渡良瀬川産

表-1 実験に用いたシリカフェームの化学的 성분

形態	(単位:wt%)									
	Ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C
粉末	2.59	95.13	0.19	0.05	0.20	0.26	0.11	0.20	0.81	1.36

川砂 (比重2.60、吸水率2.22%、粗粒率2.63) および渡良瀬川産川砂利 (最大寸法15mm、比重2.65、吸水率1.12%、粗粒率6.59) である。シリカフェームは粉末タイプを用い、その化学分析結果を表-1に示す。表-2にコ

表-2 コンクリートの示方配合

SF	W/(C+SF)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C+SF) x%
		C	SF	W	S	G	
%	%						
10	40	387	43	172	768	931	2

ンクリートの示方配合を示す。混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。1回の練混ぜ量は50リットルとした。練混ぜ方法は、停止したミキサ内に底部から細骨材、セメント、シリカフェームおよび粗骨材の順に層状に投入し、最後に水と混和剤をその上から均一に投入した後、ミキサを始動させた。パドル配列角度は、全体循環流動を卓越させるための45度、局部交錯流動を卓越させるための90度の2種類とし、各パドル配列角度毎に回転速度を45rpmで一定とし、練混ぜ時間を60、250、1000秒と変化させた。

## 5.2 測定項目

### 5.2.1 「微視的な練混ぜ」に関する測定項目

材齢3日のコンクリート試験片を用いてSEM観察によるシリカフェームの分散率を求めた。

下記の手順でシリカフェームの分散率を求めることとした。

- (1) 材齢3日に達した硬化コンクリートの供試体をハンマーで約2mm角に小さく粉砕し、その中から25個のコンクリート試験片の試料を無作為に抽出する。
- (2) 個々の試料をSEM観察用に表面処理し、試料の任意の場所を10,000倍の倍率で観察する。
- (3) (2)で設定した場所においてシリカフェーム粒子が発見された場合は、そのシリカフェーム粒子の状態を“分散状態”あるいは“凝集状態”のどちらに属するかを判断する。
- (4) (2)で設定した場所においてシリカフェーム粒子が発見されない場合は、その周囲を検索し、シリカフェーム粒子が発見された場合は(3)の作業を行う。
- (5) (2)で設定した場所ならびにその周辺を検索してもシリカフェーム粒子が発見されない場合は、“なし”と判断する。
- (6) (2)~(5)のSEM観察を25個の試料について4回以上行い、1つの供試体について合計100のSEM観察を行い、シリカフェーム粒子の発見回数を40回以上となるまで繰り返す。
- (7) SEM観察による未反応シリカフェーム粒子の分散率を、次式で求める。

$$\text{分散率(\%)} = \frac{\text{シリカフェームの分散状態を発見した回数}}{\text{シリカフェームを発見した全回数}} \times 100$$

### 5.2.2 「巨視的な練混ぜ」に関する測定方法

フレッシュコンクリートの測定項目は、排出されたコンクリートを4分割し洗い試験を行い単

位粗骨材量を測定し、その変動係数を求める。硬化コンクリートの測定項目は、4分割したコンクリートから3本ずつφ10×20cmの円柱供試体を作製し、材齢28日に圧縮強度試験を行い、変動係数を求める。

## 6. 実験結果および考察

### 6.1 シリカフェームの分散率と練混ぜ時間の関係

練混ぜ時間とシリカフェームの分散率との関係を図-5に示す。どの練混ぜ時間においてもパドル配列角度によるシリカフェームの分散率の差は顕著ではない。またパドル配列角度に関係なく、練混ぜ時間が長くなるに従い、シリカフェームの分散率は増大している。これは、「微視的な練混ぜ」では全体循環流動と局部交錯流動のどちらの流動機構でも超微粒子であるシリカフェームを分散させる能力に違いがなく、練混ぜ性能に差がないことを示唆するものである。

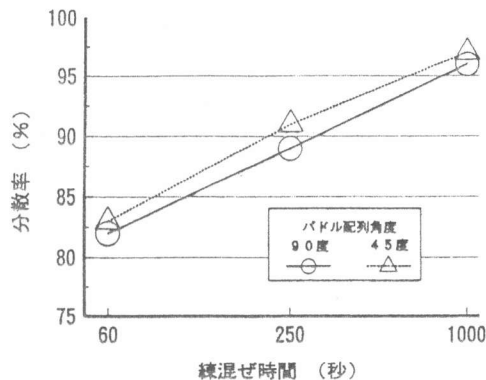


図-5 シリカフェームの分散率と練混ぜ時間の関係

### 6.2 コンクリートの圧縮強度と練混ぜ時間の関係

図-6に圧縮強度と練混ぜ時間の影響を示し、また圧縮強度の変動係数と練混ぜ時間の関係を図-7に示す。圧縮強度は、どの練混ぜ時間でもパドル配列角度に関係なくあまり大きな差はない。パドル配列角度に関係なく1000秒において圧縮強度が下がるのは、練混ぜ時における空気の巻き混みによる空隙の影響と考えられる。変動係数に関して、どちらのパドル配列角度においても60、250秒ではあまり大きな差は示してしないが、1000秒で90度の方が非常に大きい値となる。これは、空気の巻き混みによる空隙が局部交錯流動により、一定のところに集中し全体に分散しなかったためと考えられる。逆に45度の方は、全体循環流動により空隙を全体に分散させたために変動係数は変わらなかったものと思われる。

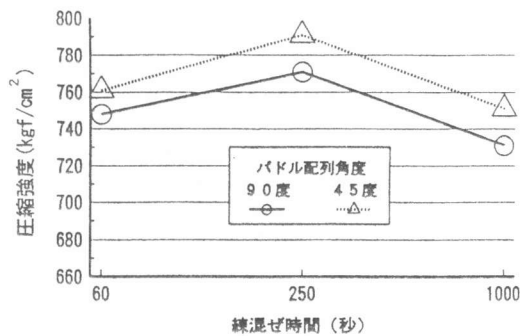


図-6 圧縮強度と練混ぜ時間の関係

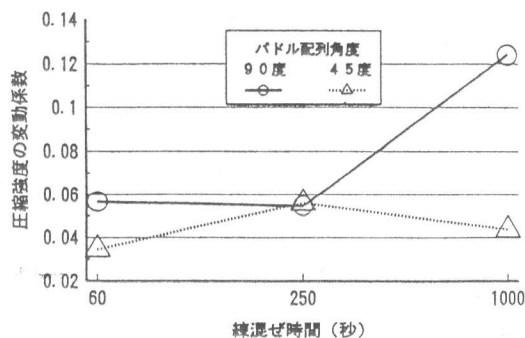


図-7 圧縮強度の変動係数と練混ぜ時間の関係

### 6.3 単位粗骨材量の変動係数と練混ぜ時間の関係

単位粗骨材量の変動係数と練り混ぜ時間の関係を図-8に示す。パドル配列角度90度は、練混ぜ時間が短い場合、単位粗骨材量の変動係数が大きくなる。45度の方は、どの練混ぜ時間においてもほぼ同様の値を示し、90度と比較して小さい。45度は全体循環流動が卓越しているために練混ぜ時間60秒の間に粗骨材を全体に分散させるためと思われる。90度は全体循環流動が活発でないため粗骨材の分散に時間がかかる。

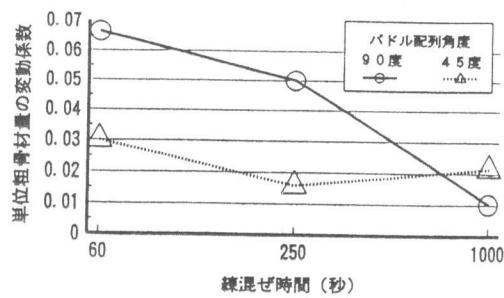


図-8 単位粗骨材量の変動係数と練混ぜ時間の関係

これは、可視化実験で得られた知見と同様であり、発泡スチロール粒子の分散性による練混ぜ性能の評価は、実機ミキサの「巨視的な練混ぜ」を十分評価できるものとする。

#### 6.4 流動機構と練混ぜ性能の関係

「微視的な練混ぜ」性能に関しては、全体循環流動、局部交錯流動とも有効であり、その貢献度は同程度である。一方、「巨視的な練混ぜ」に関しては全体循環流動の方が局部交錯流動よりも有効である。

#### 7. 結論

2軸強制練りミキサにおいては、局部交錯流動と全体循環流動のどちらも「微視的な練混ぜ」性能に貢献するが、「巨視的な練混ぜ」性能は、全体循環流動を卓越させることによって向上する。

<謝辞> 本研究は、第7回セメント協会研究奨励金の一部を受けて行いました。ここに付記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 橋本親典・島崎篤・辻幸和・田村真：フレッシュコンクリートの固液2相系モデルによる2軸強制練りミキサの練混ぜ機構の定量化に関する基礎的研究、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp. 39-46、1993. 5
- 2) 小菅啓一・坂井悦朗・大門正機・浅賀寄与志：シリカフェームのポズラン反応と反応率測定方法、「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告書、土木学会コンクリート技術シリーズ4、pp. 1-6、1993. 11
- 3) 大即信明・久田真：シリカフェームの物性について、月刊生コンクリート、Vol. 12、No. 4、pp. 17-26、1993. 4