

2次元流速計測によるアジテータ内の コンクリートの流動機構の解明

林 善弘¹・橋本親典²・辻 幸和³

¹正会員 工博 新明和工業株式会社 開発技術本部 (〒663 西宮市田近野町6-107)
(元 群馬大学大学院 工学研究科)

²正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科

³正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科

アジテータのコンクリートのかくはん性能を検討することを目的として、モデルアジテータとモデルコンクリートからなる可視化実験で得られた画像データを2次元流速計測装置によって画像処理し、粗骨材粒子やモルタル相のトレーサ粒子の2次元流速分布を求め、コンクリートの流速や流動方向の定量化を試みた。その結果、表層流、越流および押込み流れの3種類で構成されるコンクリートの流動のうち、コンクリートのかくはんに寄与する流動は主としてアジテータの後方で形成される越流のみであること、積載量が多い場合に生じるコンクリートの材料分離はアジテータの側面でモルタルだけがドラムの内壁に付着してアジテータの前方に流動することにより発生することが明らかになった。

Key Words : truck agitator, visualization technique, agitating efficiency, segregation distribution of velocity vector, model concrete

1. 緒 言

フレッシュコンクリートを運搬する車両として、アジテータ車が一般に用いられている。アジテータ車のかくはん性能や排出性能が低いと、運搬中におけるコンクリートの品質保持や建設現場での施工効率に悪影響を及ぼす。しかし、アジテータ車の性能に関して体系的な研究がなされていなかった。

そこで、著者らは、モデルアジテータとモデルコンクリートを用いた可視化実験手法を開発し、アジテータ内のコンクリートの流動状態を解明するとともに、アジテータの排出性能とかくはん性能に関する研究を行っている^{1), 2)}。これまでに、アジテータ内のコンクリートは、表層流、越流、押込み流れの3種類の流れによってかくはんされること、積載量が多い場合は、アジテータの奥側で表層流がブレードによって阻害するためにかくはん性能が低いこと、排出性能が最適になるブレードの形状が存在することなどを明らかにしてきた¹⁾。さらに、かくはん性能は、アジテータ内でのコンクリートの流動特性に支配されることを示した²⁾。

本研究では、かくはん性能に対して適正なブレー

ドの形状を提案するための基礎データを得ることを目的として、モデルアジテータ内各部でのコンクリートの流速と流動方向を計測し、アジテータ内でのコンクリートの流動特性をより詳細に検討した。さらに、アジテータ前方の粗骨材とモルタルの流動に着目して、かくはん中のコンクリートの材料分離についても検討した。

2. 実験方法

アジテータ内でのコンクリートの流動を計測するために、可視化実験装置を用いてモデルアジテータ内のかくはん中のモデルコンクリートの流れをビデオに収録した。さらに、2次元の流速計測装置でビデオを再生し、画像上に一边が75mmの計測領域を設定して、計測領域内でのコンクリートの流速と流動方向を2次元の流速計測装置で計測した。アジテータの透視図を図-1に、計測領域を図-2に示す。計測領域は、モデルコンクリートの表層面に7ヶ所、右側面、左側面にそれぞれ4ヶ所、下面に3ヶ所設定した。

越流時のコンクリートの流動を計測したときには、

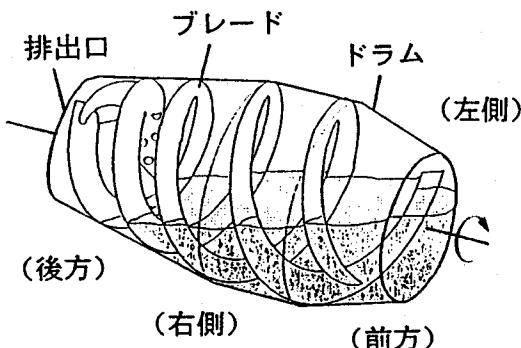


図-1 アジテータの透視図

3次元の流速計測装置を用いた³⁾。しかし、3次元の流速計測装置を用いるには無色透明のモデルコンクリートを用いる必要があるのでコンクリートを1相系の粘性流体と仮定しなければならないこと、1相系のモデルコンクリートによる3次元の流速計測においてもアジテータ内部のコンクリートの挙動は計測することができなく、本研究ではアジテータと接している表面のコンクリートの流動を計測する流速計測装置で十分であること、計測領域の一辺が75mmであるので実際のトレーサ粒子の流速とそれを平面に投影した流速は最大で3%の違いしかないと理由に、実施のコンクリートに近い2相系のモデルコンクリートを使用することが可能であり、かつ計測の容易な2次元の流速計測装置を採用した。

以下に、可視化実験装置、流速計測装置の構成と実験方法について述べる。

(1) 可視化実験装置

アジテータ内でのコンクリートの流動を計測するために可視化実験装置を製作した。これは、モデルアジテータ、モデルコンクリート、撮影装置などで構成される。

モデルアジテータは10トンアジテータ車に架装するアジテータを1/5に縮小した模型であり、ドラム、駆動モーター、架台で構成している。ドラムは内部のモデルコンクリートの流動を観察できるように無色透明のアクリル樹脂で製作した。駆動モーターは出力100Wで正回転、逆回転することができる。そして、回転速度は0~24rpmの範囲で無段階調整できる。

モデルコンクリートは、実際のコンクリートを粗骨材相とモルタル相の2相系材料と仮定し、モデル骨材とモデルモルタルで構成される。モデル骨材として人工軽量骨材（粒径5~15mm、比重1.45）を、モデルモルタルとして無色透明の吸水性高分子樹脂溶液を用いた。モデルコンクリートの流動性と変形

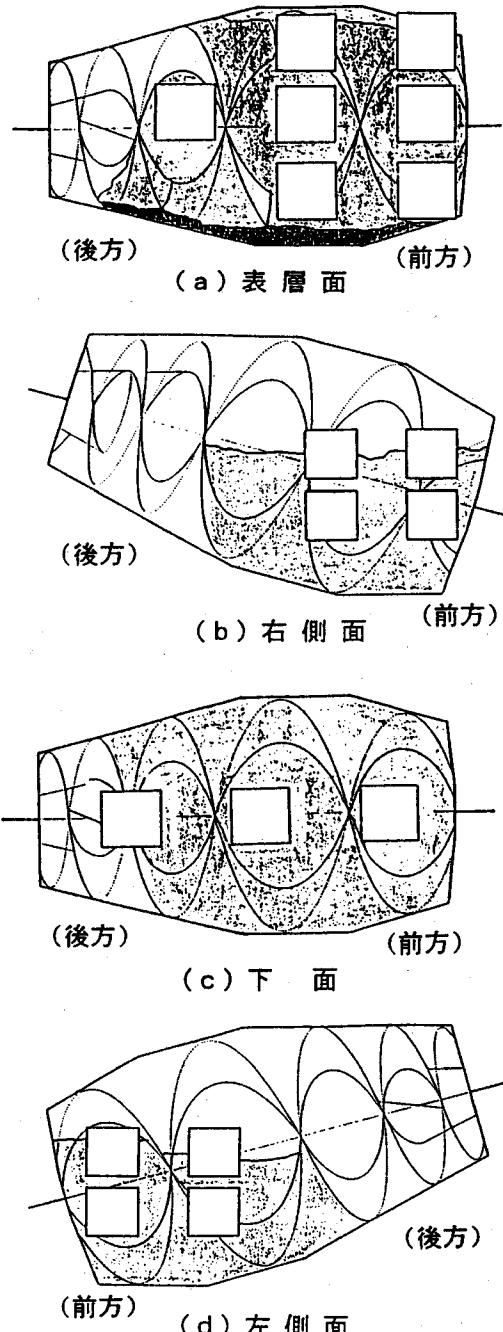


図-2 コンクリートの流動の計測領域

性に関するコンシスティンシーは、モデルモルタルの粘性とモデルモルタルに対するモデル骨材の体積比を調整することにより変更が可能である。体積比はモデルモルタルの体積に対するモデル骨材の体積で示す。モデルモルタルの粘性は吸水性高分子樹脂に添加する水の量を調整することにより制御でき、P

漏斗からの流下時間（土木学会規準 JSCE-1986「ブレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法」）を用いて評価する。なお、モデルモルタルの流動を計測するために、モデルモルタルには発泡スチロール粒子をトレーサ粒子として添加している。

モデルコンクリートと実際のコンクリートとのコンシスティンシーに関する相似性については、アジテータでコンクリートをかくはんし、このときのコンクリートの表層面の傾斜角度を用いて検討した。すなわち、モデルアジテータを用いたモデルコンクリートのかくはんと実機によるかくはんにおいて、両者の表層面の傾斜角度が同程度になるように、モデルコンクリートの配合条件であるP漏斗からの流下時間とモデル骨材の体積比を決定した⁴⁾。

本実験では、流下時間100 s、体積比0.8のモデルコンクリートを用いた。これはスランプ値8 cmのコンクリートに相当する。また、積載量は40tとした。40tは実機ではほぼ満載の5.0 m³に相当する。

撮影装置は、アジテータ内のモデルコンクリートの流動状況を撮影するためのCCDカメラ、その画像を収録するためのビデオ装置で構成している。

(2) 流速計測装置

可視化実験装置で撮影した画像を解析して、コンクリートの流動を計測する流速計測装置は、画像処理装置、移動計測ソフト、パソコン、ビデオ装置で構成されている。移動計測ソフトは、ビデオ画像から計測対象物の位置座標を計算するものであり、ある時間ごとの対象物の変位から速度や加速度を算出することができる。さらに、同種の対象物を多数計測すれば、これらの対象物の移動の乱れを評価することができる。

(3) コンクリートの流動に関する実験方法

モデル骨材をモデルコンクリートのトレーサ粒子として、モデルコンクリートの流動を計測する。かくはん中のモデルコンクリートの流速と流動方向を計測する手順を以下に示す。

- ① モルタルアジテータと撮影装置を設置する。モルタルアジテータの右側、左側、下面のモデルコンクリートの流動はそれぞれ右側、左側、下面から撮影し、表層面での流動はモルタルアジテータの投入口あるいは上方から撮影する。撮影している様子を図-3に示す。
- ② モルタルアジテータにモデルコンクリートを40t投入する。
- ③ モルタルアジテータを1.5 rpmで回転させる。回転

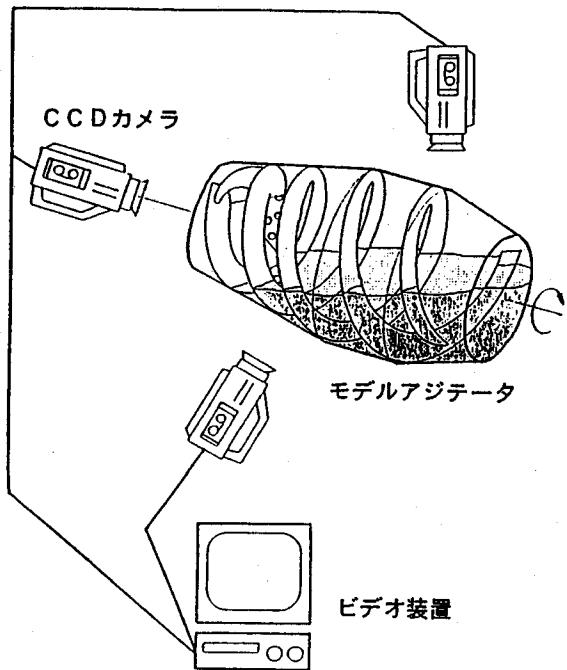


図-3 コンクリートの流動の撮影

速度1.5 rpmは、実機アジテータと同じである。

- ④ モルタルコンクリートがかくはんされる様子をビデオに収録する。
- ⑤ 流速計測装置でビデオを再生し、以下の手順でトレーサ粒子の計測を行う。
- ⑥ 計測領域内にある任意のモデル骨材を50個選び、これを計測の対象とする。
- ⑦ 50個のモデル骨材について0.2秒毎に位置座標を計測する。
- ⑧ これを10回繰返す。つまり、一つの計測領域で500個のデータが得られる（後の実験結果の図においては、見やすくするために数十個のデータのみを図示する）。
- ⑨ 計測した位置座標から、個々のモデル骨材の流速と流動方向を算出し、図示する。

(4) モルタルの流動に関する実験方法

参考文献2)に記述しているように、モルタルと粗骨材の分離はアジテータの前方部で生じるため、本実験ではアジテータの前方のモルタルとモデル骨材の流動を計測する。計測の手順は(3)項と同じであるが、ここでは、アジテータ前方の計測領域についてのみ計測し、モデル骨材とモルタルのトレーサ粒子の計測を行う。

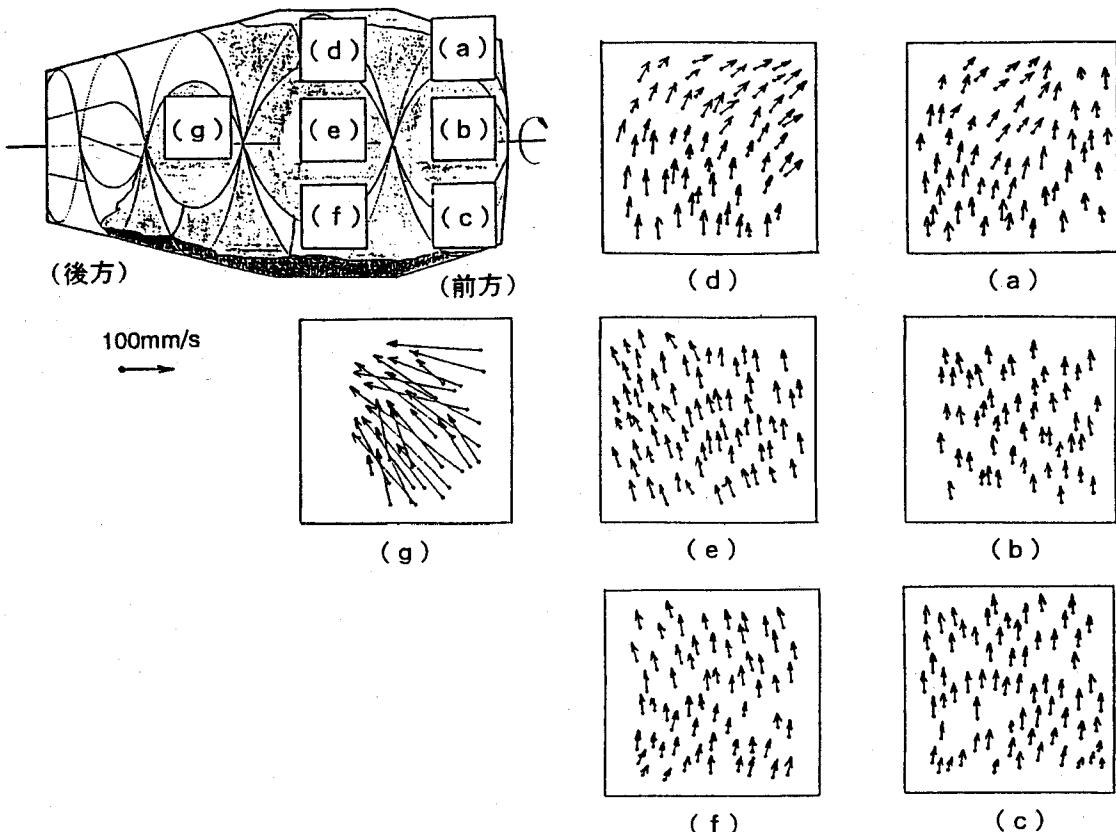


図-4 表層面のコンクリートの2次元流動分布

3. コンクリートの流動の計測結果

(1) 表層面でのコンクリートの流動

表層面でのモデルコンクリートの流動を計測した結果を図-4に示す。同図において、計測領域内の矢印はモデル骨材の0.2秒間の変位を表している。

アジテータの前方（同図(a)～(c)）では、モデル骨材は右側から左側へアジテータの回転軸と垂直な方向へ流動しており、その流速は全て約30mm/sとほぼ一定である。そのうち、アジテータの左側（同図(a)）では、モデル骨材はわずかに前方に向って流れている。つまり、アジテータの前方では、ブレードの移動によって左側にあるコンクリートがわずかに前方に移動するものの、全体的に見ると一様な流れである。アジテータの中央部（同図(d)～(f)）においても、流速はほぼ一定である。しかし、流動方向は全体的に見て右側から左側であるが、アジテータの右側（同図(f)）と中央部（同図(e)）のコンクリートはわずかに後方へ向っており、左側（同図(d)）では逆に前方に向っている。わずかに後方へ流動するのは、表層面が後ろ下がりに傾斜している

ためであり、左側で前方へ流れているのはブレードが後方へ移動しているためである。したがって、アジテータの前方と中央部では、それぞれの骨材間の位置関係はあまり変化せず、コンクリートはあまりかくはんされない。

アジテータの後方（同図(g)）では、越流（コンクリートがブレードを乗越えて落下する現象）が生じているために、コンクリートの流速は前方あるいは中央部と比べてかなり大きい。中には250mm/s以上のものもあるが、かなりばらついている。流動方向は全体的に見ると右前方から左後方であるが、個々のモデル骨材を見るとばらついている。ここは、それぞれの骨材間の相対的な位置関係が激しく変化する領域であり、コンクリートが活発にかくはんされる。

以上のことから、表層面においてコンクリートがかくはんされるのは越流が生じているアジテータの後方のみであり、前方と中央部においては大半のコンクリートはアジテータの回転に伴って右側から左側に流動しており、少量のコンクリートが後方へ流動することが確認された。

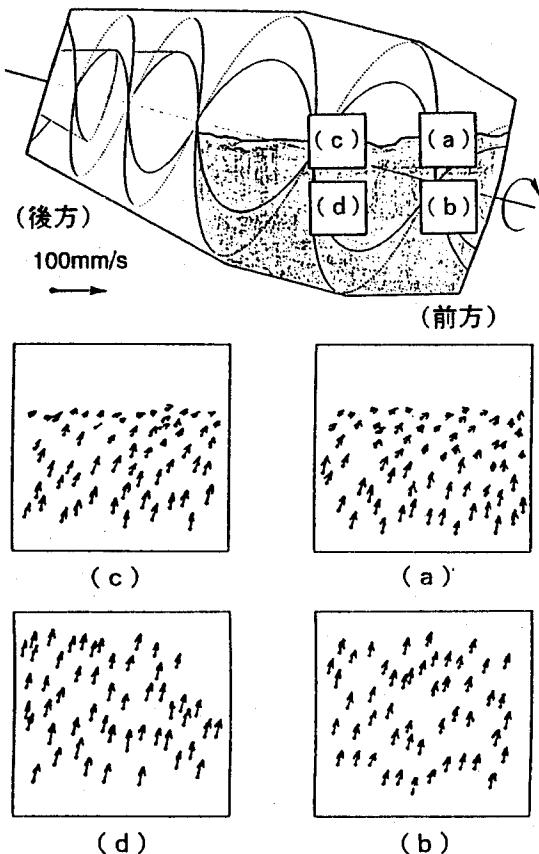


図-5 右側面のコンクリートの2次元流動分布

(2) 側面と下面でのコンクリートの流動

左右の側面および下面でのモデルコンクリートの流動を計測した結果を、図-5、図-6、図-7に示す。

右側面、左側面、下面のいずれの計測領域内においても、モデル骨材は、同方向、同速度で流動している。流動方向は、アジテータの回転軸と垂直な方向であり、流速は、アジテータのドラムの速度と同じ28mm/sである。つまり、表層面付近以外のコンクリートは身動きがとれないために、アジテータのドラムに付随した流動をし、個々の骨材間の相対的な動きはない。したがって、アジテータの側面や下面では、コンクリートはかくはんされない。

右側面、左側面の表層面の付近（図-5 (a), (c), 図-6 (a), (c)）では、流速が小さくなってしまっており、アジテータの後方へ流動している。右側面（図-5 (a), (c)）では、下面から上昇（下から上への流れ）してきたコンクリートが表層面に流れる（右側から左側への流れ）ために上向きの流速が小さく、表層面に到達したモデル骨材がわずかではあるが後方に

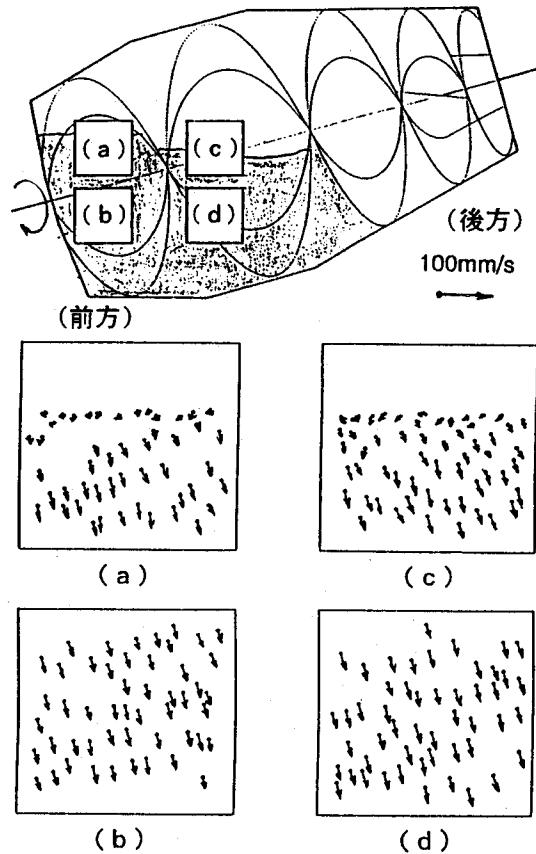


図-6 左側面のコンクリートの2次元流動分布

移動するのは、ブレードに押されるためである。左側面（図-6 (a), (c)）では、表層面を流れてきた（左側から右側への流れ）コンクリートが下面の方向（上から下への流れ）に流れているために、表層面付近では下向きの流れが小さく、この付近においても、モデル骨材がわずかではあるが後方に移動する。これはブレードに押されるためである。

下面の前方と中央部（図-7 (a), (b)）では、コンクリートの流動は極めて安定している。つまり、コンクリートはアジテータの回転に付随して移動しているだけであり、この領域ではコンクリートはかくはんされていない。一方、前方（図-7 (c)）では計測したモデル骨材の流速と流動方向は大きくばらついている。この領域はブレードを越流したコンクリートが落下する場所であり、かくはんが活発に行われていることがわかる。

以上のことから、越流の生じている後方を除いて側面と下面のコンクリートは、アジテータの回転に付随して移動しているだけであり、この領域ではコンクリートはかくはんされないことが確認された。

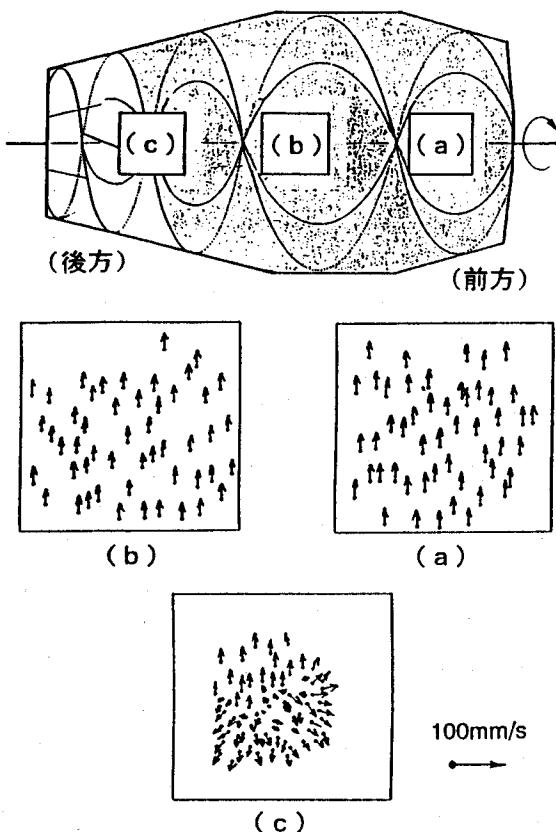


図-7 下面のコンクリートの2次元流動分布

(3) アジテータ内のコンクリートの流動

アジテータ内のコンクリートの流動を計測した結果に基づいて、全体の流れを示したものが図-8である。

アジテータの中央部と前方では、コンクリートはアジテータの回転軸を中心とした回転運動、つまりアジテータの回転に付随して表層面、左側面、下面、右側面、表層面の順に流動している。しかし、表層面では表層面がアジテータの後方に傾斜しているために、コンクリートの一部は後方へと流れしていく。

アジテータの後方では、中央部の表層面から流れてきたコンクリートがブレードを越流する。このときに、個々の骨材の流速と流動方向が大きく乱れ、コンクリートは活発にかくはんされる。

アジテータの中央部では後方へ流れるコンクリートの量が多いが、前方では少ない。したがって、アジテータの前方のコンクリートは、その大半がアジテータの前方を回転運動しているだけであるので、あまりかくはんされない。このことは、2色のモルタル骨材を用いてアジテータのかくはん性能を評価し

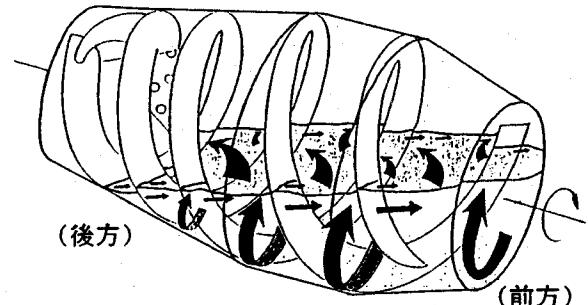


図-8 アジテータ内でのコンクリートの流動

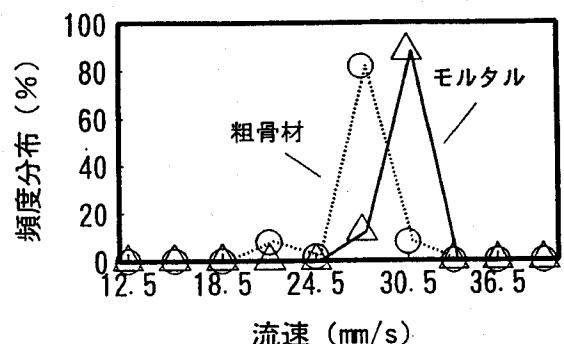


図-9 下面でのトレーサ粒子の流速

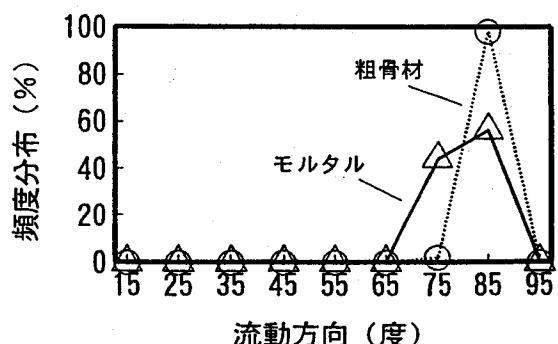


図-10 下面でのトレーサ粒子の流動方向

た結果⁵⁾とも一致している。

4. アジテータ前方でのモルタルの流動

図-9、図-10に、コンクリートを40t投入した場合の下面でのトレーサ粒子の流速と流動方向（アジテータの回転軸とのなす角度）の頻度分布を示す。最大頻度を示す流速と流動方向の値は、モデルモルタル、モデル骨材ともにほぼ同じであり、両者は同じ流動をしていることがわかる。つまり、アジテー

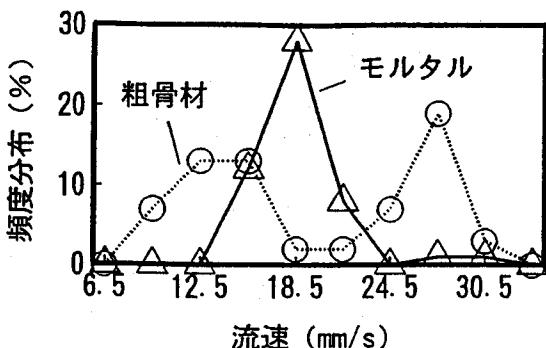


図-11 右側面でのトレーサ粒子の流速

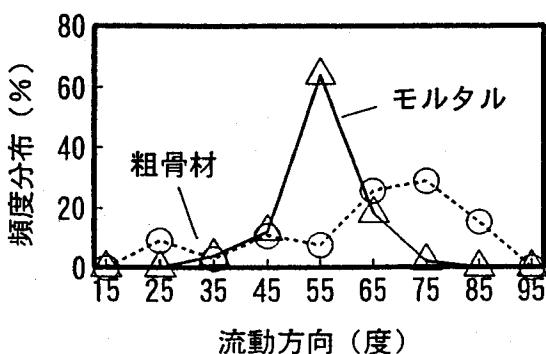


図-12 右側面でのトレーサ粒子の流動方向

タの下面では、材料分離は発生せず、コンクリートはアジテータの回転に付随して流動している。

図-11、図-12に、表層面付近でのトレーサ粒子の速度と流動方向の頻度分布を示す。モデルモルタルにおいては、流速は18.5mm/sを、流動方向は55°を中心とした狭い範囲に分布しており、これらのはらつきが小さいことがわかる。一方、モデル骨材の流速と流動方向は、大きくばらついている。これは、側面から上昇してきたモデル骨材は表層面に流動していくが、モデルモルタルはドラムの内壁に付着するために表層面に流動せず、付着したままアジテータの前方に流動するためである。ここで付着力の差による流動方向の違いによって、材料分離が生じる。分離したモルタルは、ブレードの移動に伴ってアジテータの前方に運ばれる。アジテータ前方の表層面において、後方へ流動するコンクリートの量が多いと、前方に運ばれてきたモルタルは後方へ流動するので、モルタルは堆積しないが、積載量が多いとコンクリートは後方に流動しにくいために、前方にモルタルが堆積する。

これらの結果から、積載量が多い場合であっても後方へのコンクリートの流動を活発にすることがで

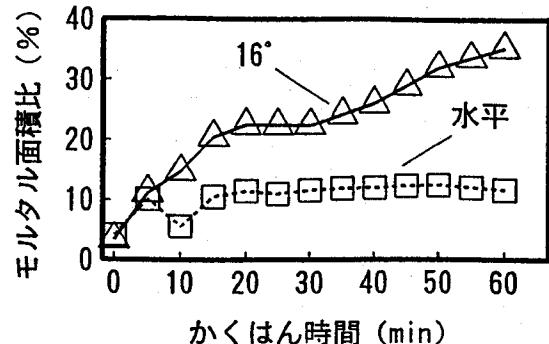


図-13 モルタル面積比の経時変化

きれば、前方におけるモルタルの堆積は解消できると推察される。そこで、後方への流動を活発にするために、アジテータの取付け角度を水平にして材料分離試験²⁾を行った。図-13に、アジテータの取付け角度を変化させた場合のモルタル面積比の経時変化を示す。ここで、モルタル面積比とはアジテータの前方に設定した解析領域の面積に対するモルタルのトレーサ粒子である発泡スチロール粒子の占める面積の比であり、この値が大きいことはアジテータの前方においてモルタルが堆積していることを表す。従来の取付け角度(16°)では時間の経過に伴いモルタル面積比が増加していることから、モルタルが前方に堆積しているが、水平な取付角度では、モルタル面積比が低いことからモルタルの堆積が抑制されていることがわかる。以上のことから、積載量が多い場合であっても前方から後方への流動を活発にすることができるれば、モルタルの堆積は解消でき、コンクリートのかくはん中における材料分離が防止できることが確認された。

5. 結 言

モデルアジテータを用いてアジテータのかくはん中のモデルコンクリートの流動を2次元の流速計測装置により計測した結果、以下の知見を得た。

- (1) 表層面においてコンクリートがかくはんされるのは越流の起るアジテータの後方であり、前方と中央部においては大半のコンクリートはアジテータの回転に伴って右側から左側に流動しており、少量のコンクリートが後方へ流動する。
- (2) 越流の生じているアジテータの後方を除いて側面と下面のコンクリートは、アジテータの回転に付随して移動しているだけであり、この領域ではコンクリートはかくはんされない。また、アジテータ前方のモデル骨材とモデルモルタル

タルの流動状況を計測した結果、材料分離に関して以下の知見を得た。

- (1) 材料分離の原因は、アジテータの側面から上昇してきた骨材は表層面に流動していくが、モルタルはドラムの内壁に付着するために表層面に流動せず、付着したままアジテータの前方に流動するためである。
- (2) 積載量が多い場合であっても前方から後方への流動を活発にすれば、アジテータの前方でのモルタルの堆積は解消できる。

参考文献

- 1) 林 善弘, 橋本親典, 辻 幸和: アジテータ車のコンクリートの排出性能に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 5, No. 2, pp. 87-94, 1994年7月.
- 2) 林 善弘, 橋本親典, 辻 幸和: アジテータ車のか

くはん中のフレッシュコンクリートの流動に関する研究, 土木学会論文集, No. 502/V-25, pp. 123-130, 1994年11月.

- 3) 橋本親典ほか: 可視化実験手法を用いたトラックアジテータ車のコンクリートの攪拌性能に関する基礎的研究, コンクリートの製造システムに関するシンポジウム, pp. 15-22, 1992年5月.
- 4) 橋本親典ほか: フレッシュコンクリートの可視化モデルの再現性に関する研究, 第19回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 310-311, 1991年3月.
- 5) 橋本親典ほか: コンクリートアジテータ内でのフレッシュコンクリートの流動の可視化, 可視化情報, Vol. 10, No. 2, pp. 259-262, 1990年11月.

(1994. 9. 28 受付)

ELUCIDATION OF CONCRETE FLOW MECHANISM IN THE TRUCK AGITATOR BY DISTRIBUTION OF VELOCITY VECTOR

Yoshihiro HAYASHI, Chikanori HASHIMOTO and Yukikazu TSUJI

We are studying the agitating efficiency of the truck agitator by visualization technique using model agitator and model concrete. We tried to quantify the velocity and the direction of concrete flow in agitating. In this study, we cleared distribution of velocity vector of coarse aggregates and mortar by analyzing the image data obtained by visualization experiment. In the result, it was cleared that the concrete flow contributing agitating was only the overflow among three types of flow, and that the segregation of the mortar occurred when the large amount of concrete was agitated because only the mortar stuck to the inner surface of drum on the right side of the agitator and the mortar flowed forward.