

テープ管を流動する可視化モデルコンクリートの 乱れ計測システム

MEASUREMENT SYSTEM FOR FLUCTUATION OF CONCRETE FLOW IN TAPERED PIPE WITH HELP OF VISUALIZATION TECHNIQUE

橋本親典*・堀口和弘**・丸山久一***・清水敬二****

By Chikanori HASHIMOTO, Kazuhiro HORIGUCHI, Kyuichi MARUYAMA and Keiji SHIMIZU

In order to evaluate the deformability of fresh concrete flowing in pipes, a new system was developed in this paper to obtain the information about movements of mortar and coarse aggregates with help of the visualization technique.

For visualizing the concrete flow, concrete was replaced by the model concrete made of transparent mortar and specially designed coarse aggregates, and the pipe was made by the transparent plastic material.

Movements of mortar and coarse aggregates were recorded by the Video System, and were traced and analyzed by the Graphic Analyzer.

It was observed that there existed the fluctuation in concrete flow at the tapered portion of pipe. Since the fluctuation should be concerned with the deformability of fresh concrete, the index for evaluating the degree of fluctuation was proposed.

Keywords : fluctuation, deformability, visualization technique, tapered pipe, model concrete

1. 序論

コンクリートポンプ工法は、現場内小運搬作業として、仮設設備の節減、工期の短縮等を可能とするので、現場においては省力化による経済的波及効果が大きく、土木・建築の分野を問わず広く普及している¹⁾。また、『コンクリートのポンプ施工指針(案)』²⁾が土木学会で作成されており、施工、圧送計画、品質管理などについて、新しい指針制定への第一歩となっている。これらの現状からみて、コンクリートポンプ工法は、今や完全に施工現場のルーチンワークとして定着しているといえる。

しかし、圧送作業の能率に大きな障害となっている管内閉塞事故については、その発生メカニズムや発生条件に関する理論的研究が十分でなく、圧送計画の段階においては管内閉塞事故に対する安全基準を確立するまでに至っていないのが現状である。したがって、管内閉塞事故を避けるあまり、配合のうえでは、単位水量、単位セメント量や s/a を必要以上に増加する傾向があり、そ

の結果、硬化コンクリートの耐久性にも悪影響を及ぼすことになる¹⁾。コンクリートポンプ工法において、コンクリートの品質を変えることなく、かつ十分な施工をしてゆくためには、管内閉塞機構の解明が急務となってきた。

著者らは、これまでに、管内閉塞現象のメカニズムを解明する目的で、まず、フレッシュコンクリートの管内流動状況を可視化し、管内閉塞現象の発生過程における粗骨材粒子群とモルタル相の力学的挙動を詳細に観察・記録するための実験手法を開発した^{3),4)}。次に、実験室規模の小型ポンプモデルを用いて、この可視化実験手法をテープ管圧送実験に適用し、テープ管出口付近で粗骨材粒子群がアーチ構造を形成し、閉塞に至る過程をビデオ撮影および写真撮影することに成功した。

これらの管内閉塞過程に関する情報から、管内流動しているコンクリートが閉塞状態に近づくに従って、コンクリート中の一部の粗骨材粒子群が微小振動を起こしながら、流動していることが観察された。また、その微小振動の影響で、粗骨材粒子群とその周辺のモルタル相の流速が変動していることも確認された。

さらに、可視化モデルコンクリートの粗骨材とモルタルの容積比を増大させたとき、管内閉塞が発生する容積比に近くなると、粗骨材粒子群とその周辺のモルタル相

* 正会員 工修 長岡技術科学大学助手 建設系
(〒940-21 新潟県長岡市上富岡1603-1)

** 正会員 工修 大阪府庁
(〒581 大阪府八尾市庄内町2-1-36)

*** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学助教授 建設系
(〒940-21 新潟県長岡市上富岡1603-1)

**** 正会員 農博 長岡技術科学大学教授 建設系(同上)

の微小振動現象の発生頻度が高くなり、流速の変動は大きくなることが観察された。この一連の粗骨材粒子群とモルタル相に関する挙動は、管内閉塞の前兆現象と考えられ、この前兆現象の定量的評価が、実際のフレッシュコンクリートの閉塞機構解明の手がかりとなると予想される。

本研究は、“可視化モデルコンクリート”という限定つきではあるが、テープ管内を流動するフレッシュコンクリートの変形性能に対する新しい指標の確立を目的とし、粗骨材粒子群とその周辺のモルタル相の流速の変動を定量化する計測システムを開発したものである^{5),6)}。

なお、本研究で用いた可視化実験手法については、参考文献3)において、可視化モデルコンクリートに使用する材料の選定、可視化モデルコンクリートと実際のフレッシュコンクリートとの相違点および可視化モデルコンクリートによる管内閉塞現象に対するシミュレーション実験の妥当性等について詳細に検討してあるので、本論文では省略する。

2. フレッシュコンクリートの乱れ特性と変形性能の関係

これまでの実験的研究から、配合上で粗骨材とモルタルの容積比 (V_g/V_m) が、ある限界値（以後、限界閉塞容積比とする）以上になるとテープ管、ペント管や分歧管等の断面形状が変化している圧送管において管内閉塞現象が発生することが明らかになっている⁷⁾。写真-1は、可視化モデルコンクリートの配合上の粗骨材とモルタルの容積比が、限界閉塞容積比であるとき、テープ管内で粗骨材粒子群とモルタル相の間に相対速度が発生している状態を撮影したものである。テープ管出口付近において、大粒径の粗骨材粒子群の周辺でモルタル相のトレーサー粒子（発泡スチロール粒子）が白い糸をひくように見える。これは、この部分のモルタル相の流速が、他のモルタル相や粗骨材粒子群よりも非常に速く流動していることを示している。なお、写真撮影は、モータードライブ方式による連続速写装置を用いた。連続速写の撮影条件は、レンズ：100 mm, F4, フィルム：モノクロ ASA 400, カメラシャッタースピード：1/125, 絞り：4, モータードライブ速度：6コマ/s, 撮影距離1mである。

これにより、着目している粗骨材粒子群とモルタル相の間には、相対速度が生じていることが確認できる。これは、テープ管内を可視化モデルコンクリートが流動する際、粗骨材粒子が管壁あるいは他の粗骨材粒子と衝突し、回転あるいは滑動することによって粗骨材粒子間の距離が減少し、その間に存在するモルタル相の流速が速くなるためと考えられる。

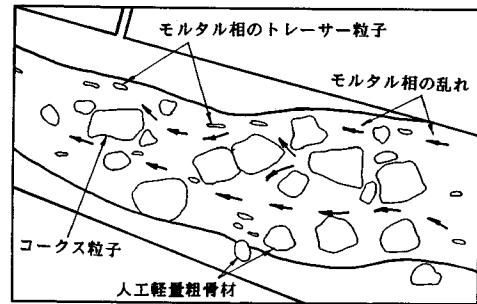
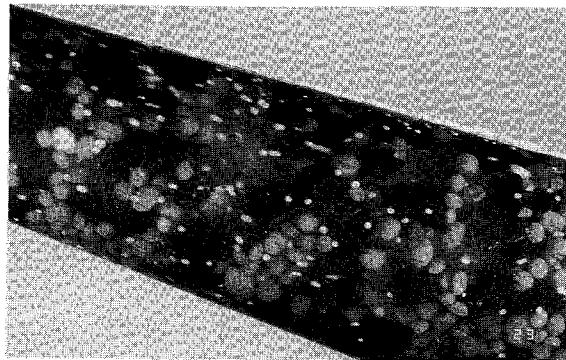


写真-1 テープ管を流動する可視化モデルコンクリート

また、可視化実験のビデオ記録を通常の再生速度より遅く再生し、詳細に観察すると、写真の例とは逆に、粗骨材粒子間の距離が増加し、その間のモルタル相の流速が遅くなる現象も観察されている。さらに、テープ管の出口付近ほど、粗骨材粒子やモルタル相のトレーサー粒子が微小に振動しながら流動していることが認められた。

著者らが提案した可視化実験手法³⁾では、可視化モデルコンクリートと実際のフレッシュコンクリートとの力学的相似条件として、静的材料分離に対する抵抗性を取り上げ、それが等しくなるよう種々の実験条件を決定している。したがって、実際のフレッシュコンクリートがテープ管等の管形状の変化に伴い変形を強いられる際の流動状況は、可視化モデルコンクリートにおける粗骨材粒子群とモルタル相の挙動として、ほぼ表わせるものと考えられる。

そこで、本研究では、圧送管の形状変化に伴って、粗骨材粒子群およびモルタル相の流速に変動が生じる現象を、フレッシュコンクリートの乱れ特性と定義する。乱れの大きさは、粗骨材粒子群とモルタル相が混合し1相系流体として流動するときの断面平均流速からの変動で表わすものとする。

また、管形状の変化に伴うモルタル相中の粗骨材粒子群の動きやすさ、あるいは粗骨材粒子相互の相対移動のしやすさをフレッシュコンクリートの変形性能と定義

し、変形性能はこの乱れの大きさに依存するものとする。

次に、管内流動状態のフレッシュコンクリートに発生する乱れ特性とフレッシュコンクリート自体が有する変形性能の関係について考察する。図-1は、乱れ特性と変形性能の関係、および管内閉塞過程において発生する諸現象について模式的に説明したものである。

フレッシュコンクリートが圧送管内を流動するとき、モルタル相の中を粗骨材粒子群が相対位置を変えながらモルタル相と一緒にして流動するために、ある大きさを有する“乱れ”が発生する。言い換えれば、モルタル相の中で、あるいはモルタル相を間に介して、粗骨材粒子相互である程度の相対移動や回転等の自由度を有していることがスムーズな流動のための必要条件と考えられる。

また、フレッシュコンクリート自体は、その使用材料の特性、配合や配管条件等で決定される、良好なポンプ圧送性能を發揮することができる変形性能、つまり、“乱れ”を許容できる限界値を有すると考えられる。

通常の良好なポンプ圧送現場においては、この配管内で発生する“乱れ”的大きさは、コンクリート固有の“乱れ”的許容限界値に比べ小さいものと考えられる。

これに対して、不安定圧送や閉塞事故が発生するときは、配管内で発生する“乱れ”的大きさは、コンクリート固有の“乱れ”的許容限界値以上となると考えられる。

流動状態において発生するフレッシュコンクリートの“乱れ”的大きさが、そのコンクリート自体が有する“乱れ”的許容限界値以上になると、何らかのきっかけで、粗骨材粒子群の流動速度が零になり、粗骨材粒子群が集積する可能性がわめて大きくなる。ただし、この現象が生じる可能性は、確率論的であって、“乱れ”がある限界値を越すと、確定論的に必ず発生するものではない。

“乱れ”が許容限界値を越えると、この粗骨材粒子群

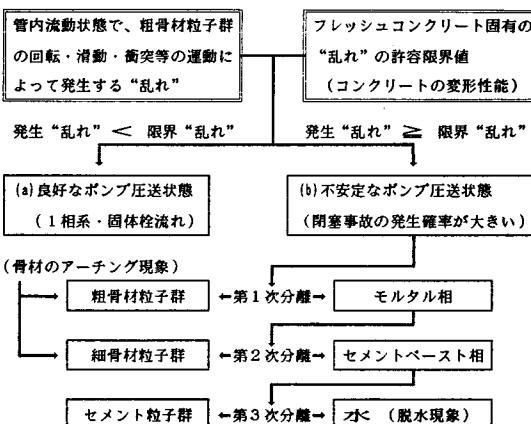


図-1 フレッシュコンクリートの乱れ特性と変形性能の関係

の集積体近傍のモルタル相の流動速度が瞬間に非常に大きくなり、さらに粗骨材粒子群の集積度が増大し、粗骨材粒子とモルタル間の材料分離が発生する（図-1 第1次分離）。その結果、粗骨材粒子群のアーチング構造が形成される。

アーチングが形成された瞬間は、モルタル相の速度が最大になるが、次の瞬間には、モルタル相の通過可能断面積が急激に縮小してくるため、モルタル相において細骨材粒子群のアーチングが形成される。したがって、細骨材粒子とセメントベースト間の材料分離が生じる（図-1 第2次分離）。

同様に、セメントベースト相において、セメント粒子群のアーチングが形成され、セメント粒子と水間の材料分離が生じる（図-1 第3次分離）。

これらの分離現象は、連続的に進行すると考えられ、閉塞事故が発生したポンプ圧送現場では、脱水現象¹⁾という形で観察される。

以上の議論から、フレッシュコンクリートの乱れ特性は、管内閉塞現象の前兆として関連づけられるものであって、閉塞機構を解明するためには、閉塞発生前のフレッシュコンクリートの乱れ特性を把握することが必要となる。

3. 可視化モデルコンクリートにおける粗骨材粒子群とモルタル相の乱れ特性に関する計測システム

(1) 本計測システムの特徴

フレッシュコンクリートのポンプ圧送実験に関する既往の研究では、管内流動を定量的に表わす物理量として、圧送管の管内圧力の時間的、位置的変動を取り扱った研究が多い⁸⁾。一般には、圧送管の側壁に圧力センサーを取り付けたものが多いが、圧力センサー面に直接、粗骨材粒子が接触すると急激に圧力が増大するために、平均的な管壁圧力を測定するには十分とはいえない。ただ、圧力センサーの感度と管壁圧力の大きさおよび圧力損失の程度を考慮すると、現場圧送に近い圧送量を対象とすれば、精度よく圧力損失を測定することができる。しかし、実験室規模の小型ポンプ圧送実験では、圧力損失が小さいために管壁圧力による流動状態の変化を定量的に計測することは不可能である。管壁圧力の代わりに、ピストン全面圧を測定することにより、流動状態の変化を計測しようとする試みもなされている⁹⁾が、この方法では局所的変化を把握することはできない。

これに対して、本研究で開発した計測システムは、可視化実験手法の導入により、可視化モデルコンクリートの管内流動状態において、計測する対象物を明確に目視観察することができる。したがって、可視化モデルコン

クリートの管内流動と実際のフレッシュコンクリートの流動が同程度であると仮定できれば、実際のフレッシュコンクリートの管内流動における粗骨材粒子の速度ベクトルやモルタル相の流速ベクトルを直接二次元的に計測・予測することができるといえる。

フレッシュコンクリートの管内流動状態の変化を示す物理量を考えた場合、各断面位置の管壁圧力やピストン全面圧はコンクリートを構成している各要素の流動状態の変化を平均化し、間接的に表現した物理量といえる。一方、粗骨材粒子やモルタル相のトレーサー粒子の変化を測定し、その結果得られた速度ベクトルは、粗骨材粒子群やモルタル相の流動状態の変化を直接表現する物理量である。つまり、本研究で提案する計測システムは、実際のフレッシュコンクリートを対象とした従来の管内流動計測システムでは測定することが不可能な物理量（粗骨材粒子の速度ベクトルとモルタル相の流速ベクトル）を、モデルコンクリートに置き換えることによって測定可能にした計測システムといえる。

(2) 計測システムの概要

図-2に、本研究で開発した可視化モデルコンクリートにおける粗骨材粒子群とモルタル相の乱れ特性に関する計測システムの概要を示す。乱れは、2.で定義したように、1相系流体とみなしたときの断面平均流速からの変動で表わすものとする。ここで、実際に計測する物理量は、粗骨材粒子群とモルタル相の各トレーサー粒子の各時刻の変位ベクトルである。

本計測システムでは、テーパ管壁面近傍を運動するトレーサー粒子の軌跡を、二次元平面座標系に投影している。このため、乱れ特性の評価を、壁面のトレーサー粒子に対して行い、壁面の情報からテーパ管全体の挙動を推測するものである。可視化実験から壁面を運動するトレーサー粒子が管内部方向で出入りすることがほとんどないことが観察されているので、本計測システムでは、乱れの評価に対して奥行き方向の乱れは無視できるものと考えた。

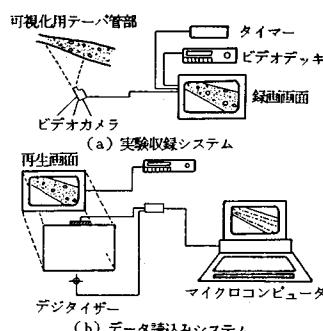


図-2 亂れ特性計測システムの概要

次に、可視化実験で得られた粗骨材粒子群とモルタル相の挙動に関する画像データに基づき、各相のトレーサー粒子の速度ベクトルを算定する方法を説明する。

① 各相の着目トレーサー粒子として、粗骨材粒子群では人工軽量粗骨材粒子を、モルタル相では発泡スチロールの細粒を選んだ。これは、画像データから各相の流動状態を求める際、映像が鮮明でかつ重心位置が簡単に求められることがトレーサー粒子に要求されるからである。

② 透明な圧送管内を流動している可視化モデルコンクリートを、ビデオカメラとビデオデッキによって収録する。このとき、最小時間間隔 $1/100\text{ s}$ のタイマーを用いて、同時に収録画面に圧送経過時刻をスーパーインポーズする。

③ 収録された画像データを再生し、所定の時刻ごとに画像を静止させる。モニター画像面上に透明板タイプのデジタイザを重ね、静止画像面上の着目トレーサー粒子の座標位置を、デジタルデータとして読み取り、接続してあるマイクロコンピュータに入力する。

④ 上記③の操作を、読み込み時間間隔 Δt ピッチで繰り返し行う。この操作は、着目トレーサー粒子が、ビデオ画面上から消去するまで行う。

⑤ 上記④の操作によって得られた着目トレーサー粒子の軌跡を、3次のスプライン関数を用いて¹⁰⁾、連続関数に補間しこれを着目トレーサー粒子の流跡線とする。

⑥ 着目トレーサー粒子の圧送管内における速度ベクトルは、流跡線上の任意の位置において、流跡線を時間 t で数値微分することによって求められる。図-3に、流跡線と速度ベクトルの関係を示す。なお、テーパ管を二次元的に表現するための座標系としては、管軸方向と管軸直角方向からなる直交座標系を用いた。

⑦ 速度ベクトルを管軸方向と管軸直角方向の速度成分に分解する。管軸方向については、1相系として流動するとみなしたときに成り立つ連続式から断面平均流速を求める。管軸方向の速度成分と断面平均流速との差を管軸方向の変動速度とする。

1相系ビンガム流体と仮定したフレッシュコンクリートの流れは固体栓流れをすると考えられる^{11), 12)}ことから、テーパ管内の任意の位置での流線に直交する速度成分は零である。また、本実験で用いたテーパ管は管長

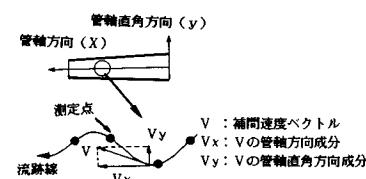


図-3 流跡線と速度ベクトルの関係

50 cm で管径を $\phi 155 \text{ mm}$ から $\phi 100 \text{ mm}$ に絞ったものである。よって、層流状態における流線と管軸のなす角度は、最大で 0.0549 rad (3.15 度) である。そこで、本速度ベクトルの算定方法では、流線と管軸の方向は一致すると仮定する。したがって、管軸直角方向の速度成分が直接、管軸直角方向の変動速度となる。この速度ベクトルと変動速度ベクトルの関係については、5.(1) 変動速度ベクトルの定義で説明する。

⑧ 上記⑥および⑦の操作を行うトレーサー粒子の個数は、粗骨材粒子群およびモルタル相とも各 40 個程度とした。その際、圧送開始から圧送終了までにビデオ画面上に現われるトレーサー粒子を経過時間および画面上の位置において平均的に取り上げるようにした。

読み込み時間間隔 Δt をあまり小さくとると、デジタイザーの分解能の関係から誤差を増大させることになり、逆に Δt を大きくとりすぎると、着目トレーサー粒子の微妙な挙動を取り込むことができなくなる。そこで、本計測システムでは、設定画面上で着目トレーサー粒子の流跡線を求めるのに要する座標位置のデータ数が 20 個となるように読み込み時間間隔 Δt を決定した。

3 次スプライン関数による補間の際に必要な端条件としては、補間関数の 2 階微係数が零であることとした。

実際の圧送管とビデオ画面上の圧送管は、カメラのズームや圧送管のセッティングの関係から実物と同じ大きさにならない場合が起こる。そこで、流速ベクトルを計算するためには、ビデオ画面上の像と実像との寸法比を正確に求めておく必要がある。

4. 可視化モデルコンクリートの乱れ特性に対する本計測システムの適用性に関する実験的検討

(1) 目的

本研究で開発した計測システムが、可視化モデルコンクリートの変形性能を量化するための計測システムと成り得るかどうかを、可視化実験によって得られた画像データをもとに実験的に検討する。

これまで、目視観察で定性的評価しかできなかった粗骨材粒子群の微小振動やモルタル相の流速の乱れ等の挙動を、本計測システムで求められるトレーサー粒子の速度ベクトルによって定量的に評価する。次に、得られた速度ベクトルに基づいて、フレッシュコンクリートの変形性能を定量的に評価できる新しい指標を求め、本計測システムの有効性について検討する。

従来のフレッシュコンクリートのポンプ圧送性能に関する実験的研究^{5),6)}から、コンクリートの配合において粗骨材とモルタルの容積比 (V_g/V_m) が増加するに従って、テープ管での圧力損失が増大し、ポンプ圧送性能が

低下することが知られている。

そこで、本研究では小型ポンプモデルを用いて、テープ管内流動に着目したポンプ圧送実験を行った。可視化モデルコンクリートを作成する際、配合において粗骨材とモルタルの容積比 (V_g/V_m) を変化させることにより、テープ管での流動状況が、乱れ特性の少ない順調圧送状態から、乱れ特性が顕著に観察される閉塞発生に近い限界圧送状態までを再現するようにした。そして、これら一連の画像データについて、本計測システムにより定量的評価を行った。

(2) 実験概要

図-4 に、ポンプ圧送実験に用いた実験装置の概要を示す。着目する管内流動部分は、管長 50 cm で管径が $\phi 155 \text{ mm}$ から $\phi 100 \text{ mm}$ に絞られたポリ塩化ビニール製の透明テープ管部である。

可視化モデルコンクリートの配合は、表-1 に示す 4 種類である。配合 1 は、粗骨材とモルタルの容積比 (V_g/V_m) が 20 % であって、通常のコンクリートの配合と比較すると極端に小さい。テープ管内では、粗骨材粒子群とモデルモルタル相の間に乱れが生じなく、1 相系流体の圧送状態を目標としたものである。配合 2 と 3 は、順調圧送状態を目標とした配合であり、配合 4 は閉塞限界の粗骨材とモルタルの容積比に近い配合で、管内閉塞発生に近い限界圧送状態を目標としたものである。

可視化実験に使用するモデルコンクリートは、先に著者らが提案したもの³⁾と同じである。モデルモルタルに使用する吸水性高分子樹脂の添加量は、水 1 リットルに対して 3 g とし、全配合とも一定とした。この添加量は、可視化モデルコンクリートの静的材料分離の程度が、ス

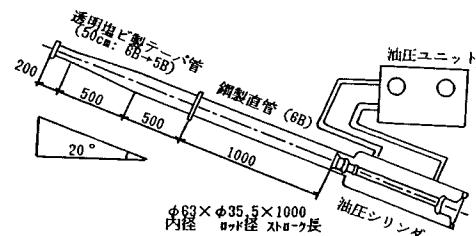


図-4 小型ポンプ圧送試験機

表-1 実験に用いた可視化モデルコンクリートの配合

配合番号	想定スランプ (cm)	高分子樹脂 添加量 (g/1リットル)	V_g/V_m (%)	V_{G1}/V_{Gc} (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	P	G1	Gc
配合 1	2.0 以上	3.0	2.0	5.0	833	2.50	157	69
配合 2	1.4	3.0	6.0	5.0	625	1.88	177	309
配合 3	1.2	3.0	7.5	5.0	571	1.71	202	353
配合 4	1.0	3.0	8.5	5.0	541	1.62	217	378

V_g/V_m : 粗骨材とモルタルの容積比 ($V_g = V_{G1} + V_{Gc}$, $V_m = V_W + V_{P1}$)
 V_{G1}/V_{Gc} : 人工軽量粗骨材とコーカス粒子の容積比
W: 水道水、P: 吸水性高分子樹脂、G1: 人工軽量粗骨材 (比重: 1.416)
Gc: コーカス粒子 (比重: 1.234)

ランプ 12 cm 前後のフレッシュコンクリートと同程度になることを想定したものである³⁾。粗骨材は、粗骨材最大寸法を 25 mm とし、5~15 mm の小砂利モデルは人工軽量粗骨材を、15~25 mm の大砂利モデルは、コークスにアスファルトをコーティングしたものを用いた。粗骨材モデルの粒度分布は、人工軽量粗骨材とコークスの容積比 (V_g/V_m) を 50 % とし、土木学会の RC 示方書に規定されている範囲内に入るようとした。

モルタル相のトレーサー粒子としては、直径 3 mm 程度の発泡スチロール粒子を使用した。発泡スチロール粒子の比重は、0.9 前後であるが、モルタルモデルの粘性が十分高いためモルタルモデルと一緒に流動するものとみなした。粗骨材相のトレーサー粒子としては人工軽量粗骨材のみとした。コークスは、形状が不規則なため、ビデオ画面上で粒子の重心を決定することが困難であり、他のトレーサー粒子と比較して読み取り誤差が非常に大きいと考えられるため採用しなかった。

ピストンの圧送速度は、3, 6 cm/s の 2 種類とし、圧送実験は、同一条件で 3 回行った。各トレーサー粒子の座標位置を取り込む際の取り込み時間間隔は、圧送速度が 3 cm/s で 0.5 s, 6 cm/s で 0.25 s とした。また、トレーサー粒子の流跡線の取り込み数は、1 回の圧送実験で約 40 本とし、3 回の圧送実験のビデオ収録データから、少なくとも 100 本以上は取り込むこととした。

(3) 実験結果および考察

図-5~8 に、各配合別に、テーパ管軸位置に対する各速度成分（管軸直角方向と管軸方向）の分布状況について示す。テーパ管軸方向の速度成分については、流体の質量保存則である連続の式から導かれる断面平均流速と比較して示す。なお、配合 1 では、容積比 (V_g/V_m) が 20 % で、コンクリート中におけるモルタル相の占める割合が大きく、ビデオ画面上においてモルタル相のトレーサー粒子である発泡スチロール粒子の像が明確でなかったために、モルタル相に関する速度ベクトルは計測

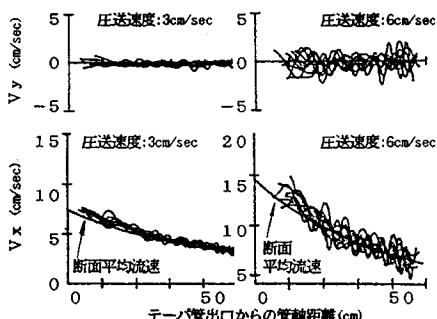
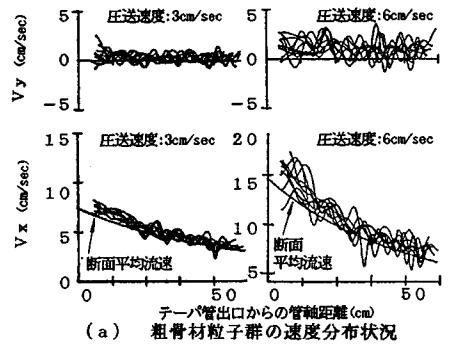
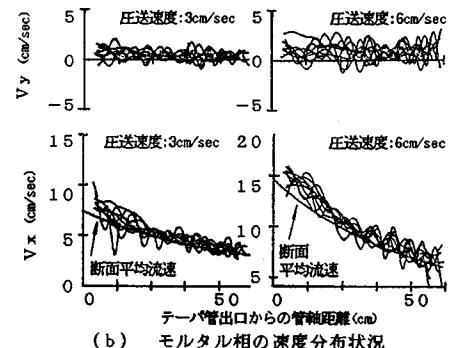


図-5 テーパ管軸位置に対する粗骨材粒子群の各速度成分の分布状況（配合 1： $V_g/V_m=20\%$ ）

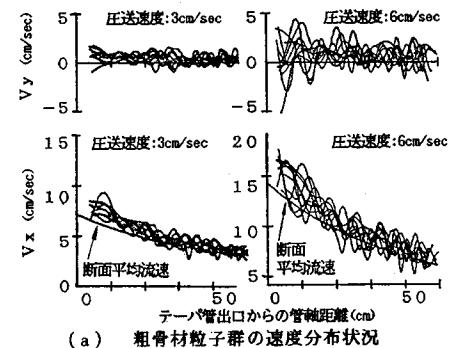


(a) 粗骨材粒子群の速度分布状況



(b) モルタル相の速度分布状況

図-6 テーパ管軸位置に対する各速度成分の分布状況
(配合 2： $V_g/V_m=60\%$ ）



(a) 粗骨材粒子群の速度分布状況

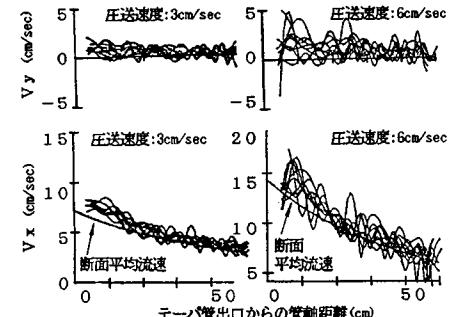


図-7 テーパ管軸位置に対する各速度成分の分布状況
(配合 3： $V_g/V_m=75\%$ ）

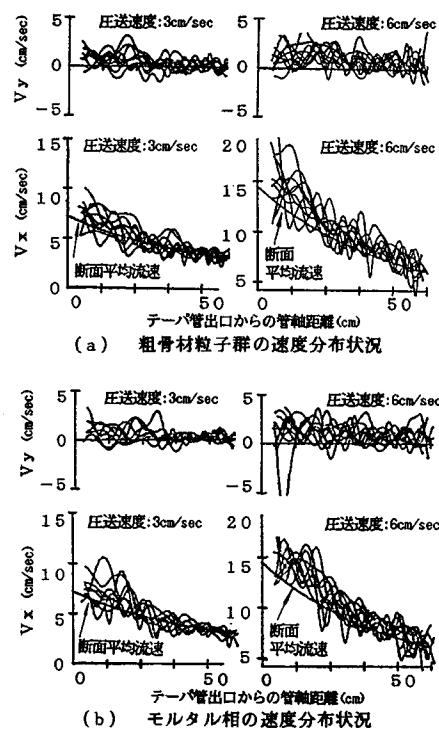


図-8 テーパ管軸位置に対する各速度成分の分布状況
(配合 4 : $V_s/V_m = 85\%$)

していない。

配合 1 では、圧送速度に関係なく、粗骨材粒子群の管軸方向の速度成分は、断面平均流速の上下に分布しているがその変動は小さく、しかも、粗骨材相の流速分布の各管軸位置での平均値と断面平均流速はほぼ一致するといえる。管軸直角方向の速度成分については、原点を中心として上下に分布しており、その平均値は零といえる。また、2 相系流体の連続性から、今回計測できなかったモルタル相の流速分布についても、粗骨材粒子群の速度分布と同様な傾向があると考えられる。

このことより、配合 1 のフレッシュコンクリートのテーパ管内流動状態は、粗骨材相とモルタル相の間に乱れが生じていなく 1 相系流体の流れつまり栓流状態に近いと予想される。

なお、圧送速度について 3 cm/s よりも 6 cm/s の方が、変動が大きくなっているが、これは、圧送速度が大きくなりビデオカメラのシャッター速度 (1/60 秒) の関係から、静止画面における着目トレーサー粒子の画像が不鮮明になってしまふためである。したがって、圧送速度が異なる場合の速度成分の変動に関しては、定量的評価は困難と考えられる。

次に、配合 2 から 4 では圧送速度に関係なく、粗骨材粒子群およびモルタル相の管軸方向の速度成分は断面平

均流速のまわりに先の配合 1 よりも大きい変動幅で分布している。また、管軸直角方向の速度成分についても原点まわりの変動が先の配合 1 よりも増大している。この変動幅は、同一配合で粗骨材粒子群とモルタル相の変動幅とほぼ同じ程度である。これは、可視化モデルコンクリートの乱れ特性が粗骨材粒子群とモルタル相の間で発生している現象であることを裏付けており、目視観察での傾向と一致している。なお、連続の式から導かれる断面平均流速が管軸速度成分の分布より若干下まわる傾向および管軸直角方向の速度成分の平均が原点より少し大きくなる傾向については、テーパ管寸法の製作誤差、計測システムにおけるビデオ画面と実像の寸法比の精度、やデジタイザによるトレーサー粒子の座標位置の測定誤差等の影響によるものと考えられるが、本計測システムのこれから課題の 1 つと思われる。

各トレーサー粒子の管軸速度成分において断面平均流速からの変動が増大する傾向は、テーパ管入口よりも出口付近において顕著である。このことは、管内閉塞現象がテーパ管出口付近に発生しやすいという実験結果と一致しており、乱れ特性と管内閉塞現象が連続した現象であることがわかる。また、各配合で比較すると、粗骨材とモルタルの容積比 (V_s/V_m) が増加するに従って、速度変動が増大する傾向は顕著である。このことは、容積比 (V_s/V_m) が増加するに従って、テーパ管内でのコンクリートの変形性能が低下するという実際のコンクリートを用いたポンプ圧送の実験結果と一致しており、本計測システムの妥当性を示している。

したがって、乱れ特性を解明することによって、フレッシュコンクリートの変形性能と管内閉塞現象の 2 つの挙動を結び付けることが可能であると考えられる。

5. 変形性能を評価する指標の提案

(1) 変動速度ベクトルの定義

4. の実験結果から、配合における粗骨材とモルタルの容積比 (V_s/V_m) が増加するに従って、また、テーパ管入口から出口付近にコンクリートが流動するに従って、各トレーサー粒子の管軸速度成分は断面平均流速からより大きく変動することが明らかになり、この変動量が乱れ特性の程度を示すと考えられる。本圧送実験に用いた小型ポンプモデルでは、テーパ管部に圧送される前の直管部におけるコンクリートの流動状態は固体栓流れと考えられ、粗骨材とモルタルの容積比 (V_s/V_m) がいずれの場合も断面平均流速とほぼ等しい。したがって、テーパ管内で各相のトレーサー粒子の管軸速度成分が断面平均流速から変動する原因としては、テーパ管での断面縮小に伴って、何らかの力がトレーサー粒子に作用するためであると考えられる。この力は、粗骨材粒子間、

モルタル相内部、粗骨材相とモルタル相の境界面、あるいは管壁と粗骨材粒子間や管壁とモルタル相間に発生するせん断力を考えることができる。流体力学の分野における乱流のレイノルズ応力に相当するものと考えられる。

そこで、速度ベクトルの変動の程度と乱れ特性の関係を検討するために、変動速度ベクトルを、図-9に示すように定義する。速度ベクトルの求め方については、3.

(2) 計測システムの概要で述べた。さらに、1相系の流動（層流状態）では、管軸方向の速度成分しか存在せず、管軸直角方向には、速度成分をもたないことも示した。

したがって、計測された流動状態を1相系の流動と比較して、その違いを速度ベクトル上での変動として表わすとすれば、管軸方向および管軸直角方向で各速度成分の変動を求め、それを合成すればよいことになる。その際、1相系の流動でも、テーパ管部のように管断面が変化するところでは、管軸方向の断面平均流速が変化することを考慮するのは当然である。

これらを数式で表示すると

ここに、 $V'(t_i)$:変動速度ベクトル

$V(t_i)$: 計測された速度ベクトル (V_x , V_y)

$\bar{V}(t_i)$: 1相系流動が有する速度ベクトル

($V_{ave,0}$)

t_i : 計測時刻

となる。

これより、変動速度ベクトルが零ベクトルということは、補間速度ベクトルと断面平均流速ベクトルが一致することになり、4. の配合 1 に近い流動状態を意味する。

図-10~12は、4. の実験結果について、各配合別に変動速度ベクトルの分布状況を表わしたものである。ただし、計測したすべての流跡線上の変動速度ベクトルを表わすと図が繁雑になるため、代表的な流跡線5本について得られたものののみを示した。

圧送速度が 3 cm/s の場合は、ベクトルの大きさを、
 0.00~1.33 cm/s, 1.33~2.67 cm/s および 2.7 cm/s 以上
 上の 3 段階にランク分けし二次元的に表現した。同様に、
 圧送速度が 6 cm/s の場合は、ベクトルの大きさを、
 0.00~2.67 cm/s, 2.67~5.33 cm/s および 5.33 cm/s
 以上の 3 段階にランク分けした。

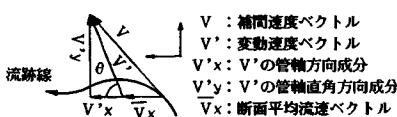


図-9 変動速度ベクトルの定義

配合1と他の配合のものを比較すると、配合1では変動速度ベクトルは非常に小さいものしか存在しない。これは、乱れ特性の程度が小さく、粗骨材粒子群がほぼ断面平均流速と一致して流動していることを示すものである。

配合2と4では、全体として変動速度ベクトルが大きくなっている。しかし、ベクトルの大きさを類別すると、変動速度ベクトルの大きいものほど発生数は少ないが、テーパ管出口付近に集中しているのが認められる。これに対して、変動速度ベクトルの小さいものほど、テーパ管全体にわたって多数発生している。また、粗骨材とモ

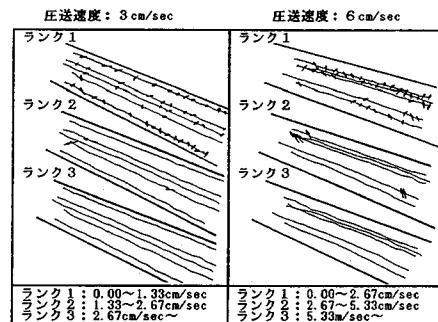
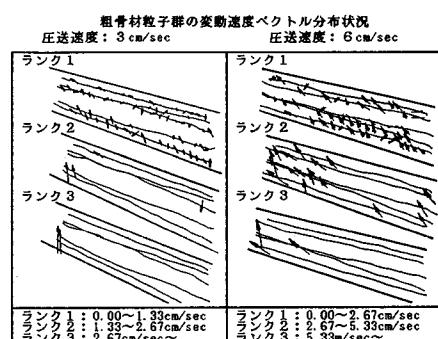


図-10 テーパ管内の変動速度ベクトルの分布状況
(配合 1: $V_s/V_m = 20\%$)



モルタル相の変動速度ベクトル分布状況
圧送速度: 3 cm/sec 圧送速度: 6 cm/sec

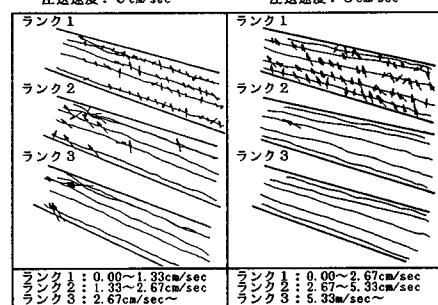


図-11 テーパ管内の変動速度ベクトルの分布状況
(配合 2: $V_g/V_m = 60\%$)

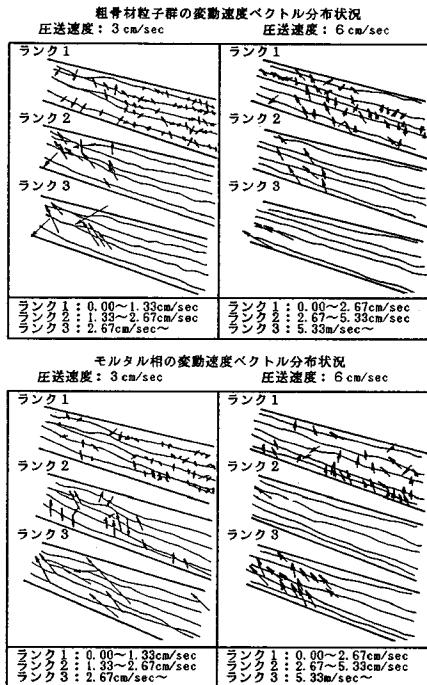


図-12 テーパ管内の変動速度ベクトルの分布状況
(配合4: $V_g/V_m=85\%$)

ルタルの容積比 (V_g/V_m) が増加するに従って、大きい変動速度ベクトルがテーパ管出口付近に多数発生するようになっている。ただし、小さい変動速度ベクトルの分布状況には差がみられない。これから、大きい変動速度ベクトルの発生頻度や発生位置が、管内閉塞現象やフレッシュコンクリートの変形性能に大きな影響を与えているものと考えられる。

以上の考察から、乱れ特性の程度を評価する指標として、大きい変動速度ベクトルの分布状況（発生位置および発生頻度）が有効である。

(2) 平均変動加速度の定義

変動速度ベクトルの分布状況は二次元的であり、そのままでは、乱れの程度を定量的に評価する指標としては必ずしも適当でない。そこで、変動速度ベクトルの分布状況を量化する指標として、次式で定義される物理量 F を導入する。 F の物理的意味は、テーパ管軸方向のある区間中の各相のトレーサー粒子の変動加速度の平均値である。これは、着目トレーサー粒子に作用する力は、乱れ特性によって発生する内部応力に起因していることと、着目トレーサー粒子個々の質量がほぼ一定みなすことが可能という仮定に基づいて導かれている。

$$F = \frac{1}{n} \sum \frac{\|V'(t_{i+1}) - V'(t_i)\|}{\Delta t} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 n : 区間内のデータ数

Δt : 補間時間 ($t_{i+1} - t_i$)

$\|V'\|$: ベクトル V' の長さ、絶対値を表す。

図-13は、テーパ管軸位置に対して、式(2)で求められた平均変動加速度 F の分布状況を示したものである。限界閉塞容積比である配合4になると、急激にテーパ管出口付近で大きくなっている。

また、物理量 F にその区間での平均質量を乗ずると変動を生じさせている力と考えることができる。1相系の流動では、 $F=0$ となり、変動を生じさせる力は存在しないことになる。これを考慮すると、テーパ管出口付近では、粗骨材相とモルタル相に発生する内部応力が大きくなっていることが推測される。

この内部応力が、テーパ管内における可視化モデルコンクリートの乱れ特性による圧力損失であり、この内部応力がある限界を越えると、粗骨材粒子群のアーチング現象を誘発する可能性が大きくなり、閉塞現象に至ると考えられる。

6. 結論

本研究は、これまで明らかにされていなかったフレッシュコンクリートの管内流動状態における変形性能を定量的に評価することを目的として、まず、可視化モデルコンクリートにおける粗骨材粒子群とモルタル相の速度ベクトル分布を計測するシステムを開発した。

次に、可視化実験手法による実験室規模の小型ポンプ圧送実験を行い、開発した計測システムを用いて、フレッシュコンクリートのテーパ管内流動状態における粗骨材相とモルタル相のトレーサー粒子の速度ベクトルを求め、乱れ特性の程度と変形性能の関係について実験的に検討し、変形性能を定量的に評価する指標を提案した。

以下、本研究において明らかになったことを述べる。

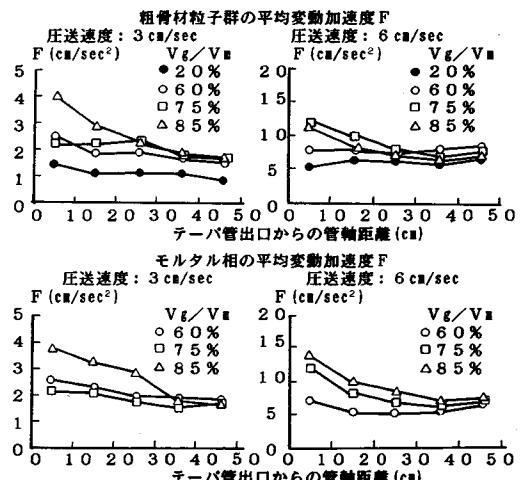


図-13 テーパ管軸位置に対する平均変動加速度 F の分布状況

(1) 可視化モデルコンクリートのポンプ圧送実験における圧送管内部の状況を記録・解析する新しい方法として、市販用ビデオシステムと透明板タイプのデジタイザおよびマイクロコンピュータを組み合わせたシステムを考案した。この結果、従来の管内流動に関する測定システムでは計測不可能であった、粗骨材相とモルタル相の速度ベクトルを計測できるようになった。

(2) テーパ管の管内流動に着目したポンプ圧送実験を行った結果、本研究で開発した計測システムによれば、乱れの小さい一様流れから、管内閉塞現象が発生しやすく乱れ特性が頻繁に生じる限界圧送状態まで、粗骨材相とモルタル相のトレーサー粒子の速度ベクトルを計測することができる。

(3) 可視化モデルコンクリートの乱れ特性を評価する指標として、本計測システムによって求められる速度ベクトルと断面平均流速ベクトルとの差によって定義される変動速度ベクトルおよびその分布状況（発生位置と発生頻度）は有力である。

(4) 乱れ特性によって発生する内部応力に対する指標としては、変動速度ベクトルから求められる断面の平均変動加速度が有効である。

今後の課題としては、本研究で開発された計測システムを用いて、テーパ管以外の変形管（ペント管や分岐管）において可視化モデルコンクリートの管内流動状態を検討する必要がある。また、ポンプ圧送性能の評価方法に最も重要である管内閉塞機構の解明にあたり、管内閉塞に直接関係する乱れ特性が、どのような過程を経て閉塞に至るのかを詳細に検討する必要がある。

本計測システムによって新しく得られた乱れ特性やその評価指標は、可視化実験手法を用いたコンクリートモデルにおいて成立するものである。したがって、これらの知見が実際のフレッシュコンクリートの管内流動状態に適用可能かどうかについては、今後さらに、検討していく必要がある。

謝　　辞：本研究をまとめるにあたり、東京大学工学部　岡村　甫教授、前川宏一助教授には、有益なご援助、

ご指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田沢栄一：ポンプ圧送技術の現状と問題点、コンクリート工学, Vol. 21, No. 11, pp. 13~22, Nov. 1983.
- 2) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針（案）、昭和 60. 11.
- 3) 橋本親典・丸山久一・清水敬二：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化に関する実験手法、コンクリート工学, Vol. 26, No. 2, pp. 119~127, Feb. 1988.
- 4) 堀口和弘・橋本親典・熊崎　稔・中村裕剛：フレッシュコンクリートの管内流動における可視化実験に関する研究、土木学会第 41 回年次学術講演会講演論文集第 5 部, pp. 473~474, 昭和 61. 11.
- 5) 橋本親典・堀口和弘・丸山久一：管内流動中の粗骨材相とモルタル相の流速ベクトル分布計測システムの開発、土木学会第 42 回年次学術講演会講演論文集第 5 部, pp. 562~563, 昭和 62. 9.
- 6) 井上　建・橋本親典・中村裕剛：フレッシュコンクリートの管内流動における動的材料分離の定量化、土木学会第 42 回年次学術講演会講演論文集第 5 部, pp. 560~561, 昭和 62. 9.
- 7) 大西精治・橋本親典・原田健二：ポンプ圧送時のコンクリートの変形性に関する基礎的研究、第 7 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 325~328, 1985. 6.
- 8) 烏田専右・森永　繁ほか：コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究—その 2 実際のポンプを用いた圧送実験一、日本建築学会論文報告集, 第 178 号, pp. 11~16, 1977. 12.
- 9) 橋本親典・二羽淳一郎・原田健二：流動化コンクリートのスランプロスがフレッシュコンクリートの変形性に及ぼす影響、セメント技術年報, No. 39, pp. 186~189, 1982. 5.
- 10) 市田浩三・吉本富士市：シリーズ新しい応用の数学 20 スプライン関数とその応用、教育出版（株），pp. 43~59, 1979. 6.
- 11) 岩崎訓明：コンクリートの特性、共立出版, pp. 18~21, 昭和 57. 6.
- 12) 村田二郎・岡田　清：最新コンクリート技術選書 1 フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ、山海堂, pp. 53~69, 昭和 56. 5.

(1988. 2. 25・受付)