

# 補流を加えた管内脈動流がモデルコンクリートの 材料分離に及ぼす影響

栖原健太郎<sup>1</sup>・橋本親典<sup>2</sup>・辻幸和<sup>3</sup>・杉山隆文<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特混研究所 (〒949-0393 西頸城郡青海町大字青海 2209)

<sup>2</sup>正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

<sup>3</sup>フェローメンバ 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1)

<sup>4</sup>正会員 Ph.D. 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1)

コンクリートポンプ圧送時の管内脈動の抑制には、脈動による波形状の変動に対してこれを打ち消すための逆位相を有する脈動(補流)を外部より加えて両脈動流を重ね合わせることで可能となる。この考え方に基づき管内脈動流を適切に制御することを目的として、実機コンクリートポンプを模擬した小型ポンプ圧送装置を用い、管内流速に着目し、実験的に検討した。外部より加える脈動流の波形および吐出量は、質量保存に基づき容易に決定できること、2つの脈動流の合流により懸念されるコンクリートの材料分離は、適切な引込み速度および合流角度を与えることで最小限に抑えられることを明らかにした。

**Key Words :** concrete pumping, pulsatile flow, confluent pipe, visualization technique, segregation, the volumetric ratio of coarse aggregate to mortar

## 1. はじめに

昨今、コンクリートの施工不良に伴う鉄道構造物の耐久性が大きな社会問題としてクローズアップされている<sup>1)</sup>。この原因の1つとして、昭和40年代の高度成長期において著しく普及したコンクリートポンプ施工の加水問題が指摘されている。この問題に対して、土木学会では、昭和60年11月に「コンクリートのポンプ施工指針(案)」が制定され<sup>2)</sup>、さらに、平成12年2月に本指針の改訂が行われた<sup>3)</sup>。

この間、昭和40年代当時のポンプ施工技術と比較すると、ポンプの性能もコンクリートに要求されるポンピング率の評価も著しく進歩した<sup>4)</sup>。一方、水中不分離性コンクリート、高流动コンクリートや高強度コンクリートなど、通常のコンクリートと比べてモルタルの粘性が高く、材料分離抵抗性の高いコンクリートが開発され、圧力損失は大きいものの材料分離に起因する管内閉塞を問題にする必要がないコンクリートも出現してきた<sup>5)</sup>。

しかしながら、モルタルの粘性が高くない普通コンクリートのポンピング率のうち、圧力の時間的、

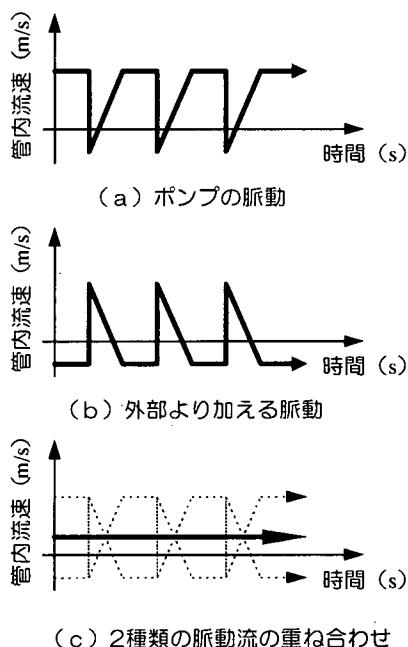


図-1 脈動流の抑制の模式図

位置的変動に耐える材料分離抵抗性については、未だ解明されていないのが現状である<sup>4)</sup>。

本論文は、ポンプ圧送時の管内脈動流の特性、特に材料分離に着目したものである。

ピストン式コンクリートポンプでコンクリートを圧送する場合は、圧送管内を流動するコンクリートの流速および圧力は、ピストンの往復に同期して周期的に変化する脈動流である。脈動流の平滑化は、圧送時におけるコンクリートの材料分離の抑制のみならず、ポンプ車の騒音問題や振動による圧送配管システム自体の疲労抵抗性の向上にも効果的である。この脈動流の平滑化に関する既往の技術的検討としては、吸入弁と吐出弁の開閉時間の調節による平滑化機構は提案・開発されているものの、周期的脈動全体を平滑化させるという技術報告はほとんどない。

脈動の平滑化には、脈動による波形状の変動に対して、これを打ち消す位相を有する脈動(補流)を外部より加え合わせることで可能となる。脈動抑制の模式図を図-1に示す。ポンプからの脈動流の流速変化を(a)に、この脈動の平滑化のために外部より加える脈動流の流速変化を(b)に示す。これら異なる2種類の脈動流を重ね合わせて平滑化を図るものである。平滑化された流れを(c)に示す。

この脈動の平滑化には、異なる2種類の脈動流の波形をバランス良く組み合わせ、2つの流れを合流させる必要がある。2種類の脈動流を合流させる場合には、合流後の脈動を抑制し、かつコンクリートの材料分離を生じさせない合流が要求される。

筆者らは、実験室規模で異なる2種類の脈動流を再現する小型ポンプ圧送装置を試作し、2種類の脈動流の重ね合わせによるピストン式コンクリートポンプの圧送管内における脈動抑制の可能性について、実験的に検討してきた<sup>6,7,8,9,10)</sup>。

本論文は、これらの研究成果をとりまとめ、脈動の平滑化の重要な要素である合流部でのコンクリートの材料分離の程度と補流を加えた管内脈動流の関係について検討したものである。

## 2. 実験概要

### (1) 小型ポンプ圧送装置

異なる2種類の脈動流の合流は、図-2に示す2機のピストン式コンクリートポンプを用いて再現した。ポンプからの流れを主流、外部から主流の脈動を抑制するために加える流れを補流とした。2種類の脈動流の合流部でのコンクリートの流動を観察するために、合流部を透明アクリル樹脂で製作した。圧送管の内径

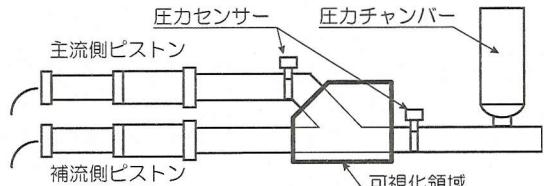


図-2 小型ポンプ圧送装置の模式図

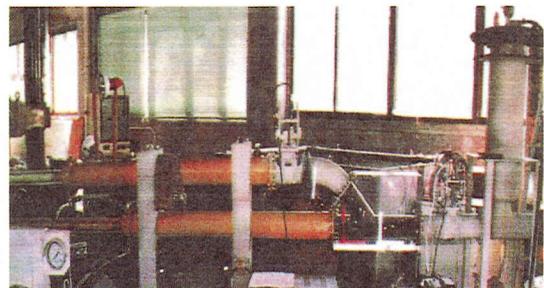


写真-1 小型ポンプ圧送装置

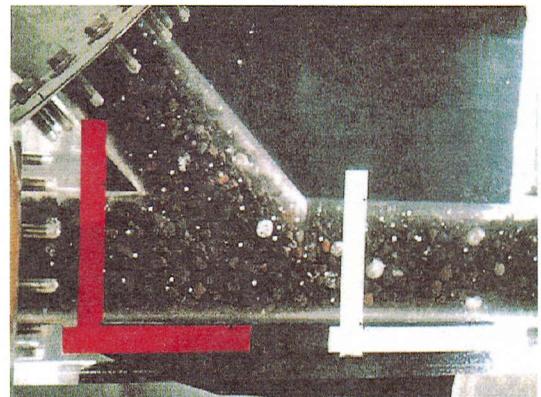


写真-2 可視化領域

は、合流前および合流後ともに10cmとした。なお、実機コンクリートポンプによる圧送を模擬するため、圧送管内に一定の負荷を与える必要があり、コンプレッサーを接続した圧力チャンバーにより0.1MPaの圧力を圧送管内に作用させている。写真-1に小型ポンプ圧送装置を、写真-2に可視化領域をそれぞれ示す。

### (2) モデルコンクリート

圧送管内のコンクリートの流動を視覚的に捉えるためには、実際のコンクリートではなく、可視化を容易に行うことができるモデルコンクリートで代替し、実際の流動を模擬した。

#### a) モデル材料の選定

モデルコンクリートは、フレッシュコンクリートをモルタル相と粗骨材相の固液二相系混合流体にモデル化したものとした。モルタル相には比重が1.0で、デン粉とアクリル酸ソーダの高分子共重合物である高吸水

性高分子樹脂溶液を用いた。粗骨材相には粗骨材の最大寸法が20mm、密度が $1.66\text{g/cm}^3$ 、粗粒率が6.60のメサライト系の人工軽量粗骨材を使用した。以後、モデルモルタルおよびモデル粗骨材と称する。モルタル相にはモデルコンクリートの流動を代表させるために平均粒径が2.5mmで密度が $0.02\text{g/cm}^3$ の発泡スチロール製のトレーサ粒子を少量混入した。モデルモルタルのレオロジー特性を一定とするため、モデルモルタルのP漏斗流下時間を200秒として品質を管理した。

#### b) モルタルの相似性

本可視化実験に用いるモデルコンクリートが満足すべき相似性として、脈動流における粗骨材とモルタルの材料分離の程度である。

本実験で選定した視化モデルコンクリートは、従来著者らが用いてきた可視化モデルコンクリート<sup>11),12)</sup>とは異なり、モデル粗骨材とモデルモルタルの密度差が実際の粗骨材とモルタルの密度差よりも大きい。ポンプ圧送時の変形管内における乱れ特性や閉塞に関する可視化実験とは異なり、本可視化実験では速度や圧力<sup>3</sup>が大きく変動する脈動流を対象とする。圧送速度と管内の圧送するコンクリート全体に作用する慣性力の影響が大きい。しかしながら、ポンプ圧送装置の能力から、最大圧送速度が実際の最大圧送速度の1/5程度（モデル200mm/s程度、実機1000mm/s程度）までしか再現できなく、モデルコンクリートの単位容積質量が、実コンクリートの1/2程度（モデル $1100\text{kg/m}^3$ 程度、実物 $2300\text{kg/m}^3$ 程度）である。したがって、同じ密度差では、脈動流における粗骨材とモルタルの材料分離を再現することが困難と予想される。

したがって、本実験では、モデルコンクリートにおける粗骨材とモルタルの密度差を、実コンクリートの密度差よりも2倍程度大きくし単位容積質量を $1100\text{kg/m}^3$ 程度から $1300\text{kg/m}^3$ 程度まで増加させ、圧送中のコンクリートの材料分離に関する相似性を満足させることとした。なお、2倍程度という値の妥当性については、これまでの可視化実験の経験的判断であり、最適な数値ではない。この問題に関しては、今後の検討課題の1つとしたい。

#### (3) 実験パラメータ

小型ポンプ圧送装置による圧送実験に用いたパラメータは、主流側の脈動流の押出し速度に対する引込み速度、2種類の脈動流の合流角度、そして、モデルコンクリートの粗骨材容積比の3種類とした。

##### a) 主流側の再現脈動流

主流側の脈動流の再現において重要な点は、管内流速の変化であり、減速や逆流といった現象を捉えることである。しかしながら、実機コンクリートポンプと

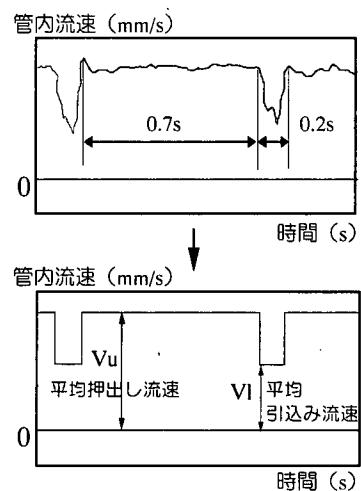


図-3 脈動流の矩形化の模式図

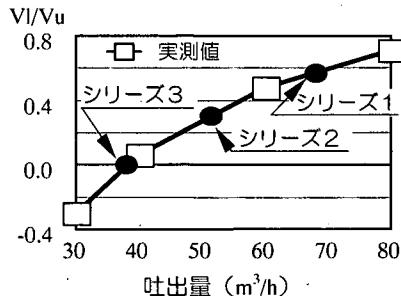


図-4 再現脈動流と吐出量

の間には、吐出量による管内流速や脈動の周期に大きな差があるため、小型ポンプ圧送装置での完全な再現は困難である。さらに、一般に脈動流は、複雑な形状である<sup>7)</sup>。本研究では、脈動流の経時変化を矩形化にモデル化し、脈動流の平均押出し速度に対する平均引込み速度の比( $V_l/V_u$ )に着目し、この比を実機コンクリートポンプと小型ポンプ圧送装置の両者の相似性から決定した<sup>8)</sup>。すなわち、実機の吐出量と脈動流の $V_l/V_u$ には正の相関関係が成立することから、小型ポンプ圧送装置においても同様な関係が成立すると仮定した。

実機コンクリートポンプの圧送実験から得られた脈動流の管内流速の経時変化の代表例を図-3に示す。また、 $V_l/V_u$ と吐出量との関係を図-4に示す。実機コンクリートポンプの吐出量は、本可視化実験で用いたモルタルモデルを実機ポンプに充填し、透明アクリル管を直管部分に設置した閉回路の圧送管内を循環圧送させ、トレーサー粒子の流速分布から断面平均流速を求め、断面平均流速とアクリル管断面積の積から算出した。なお、詳細な実験概要やデータは、参考文献8)に記す。

$V/V_u$  は、1.0 に近いほど脈動のない平滑な流れを意味し、負の値になると逆流現象が現われる。小型ポンプ圧送装置で再現する脈動流は、 $V/V_u$  を 0.5, 0.3, 0 の 3 水準として、それぞれシリーズ 1, 2, 3 とした。したがって、小型ポンプ圧送装置で再現する脈動流の吐出量は、実機コンクリートポンプの吐出量に換算すると、シリーズ 1 では吐出量が  $70\text{m}^3/\text{h}$  程度に、シリーズ 2 および 3 ではそれぞれ  $50\text{m}^3/\text{h}$ ,  $40\text{m}^3/\text{h}$  程度に相当することになる。なお、再現した脈動流は、押し出し速度および周期を一定とし、引込み速度のみを変化させている。脈動の周期は、主流側の押し出し時間で 0.7 秒、引込み時間で 0.2 秒とした。

#### b) 粗骨材容積比

モデルコンクリートのコンステンシーの違いによる脈動の抑制について検討するため、モデルモルタルに対するモデル粗骨材の容積比（以下、粗骨材容積比）を 0.4, 0.6 および 0.8 の 3 水準に変化させた。高流動コンクリートでは 0.5 前後、普通コンクリートでは 0.7 前後である。

#### c) 合流角度

2 種類の脈動流の適切な合流角度を検討するため、合流角度を  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  および  $60^\circ$  の 3 水準に変化させた。

#### (4) 管内流速の定量化

圧送管内を流動するモデルコンクリートの管内流速は、図-2 に示す小型ポンプ圧送装置の可視化領域内を流動するモデルコンクリート内のトレーサ粒子あるいはモデル粗骨材の運動を、ビデオカメラで撮影・記録し、その画像を基に算出した。トレーサ粒子あるいはモデル粗骨材の位置を 1/30 秒毎に座標に置き換え、スプライン関数による補間を行い、それとの移動速度を決定した。その後、得られた移動速度を時間軸に対して重ね合わせることにより、管内流速の経時変化を決定した。

### 3. 脈動流による材料分離

圧送管内をモデルコンクリートが流れるとき、モデル粗骨材とモデルモルタルとが一体となって流動すれば、基本的には材料分離は発生しない。しかしながら、モデル粗骨材とモデルモルタルの密度差から材料分離が発生し、両者の流速が異なる結果になる。ここでは、モデル粗骨材とモデルモルタルの流速差に着目し、脈動による材料分離の発生の過程について考察する。

図-5 は、補流を加えていない主流側の流動のみにおける管内流速の経時変化を、モデルモルタルとモ

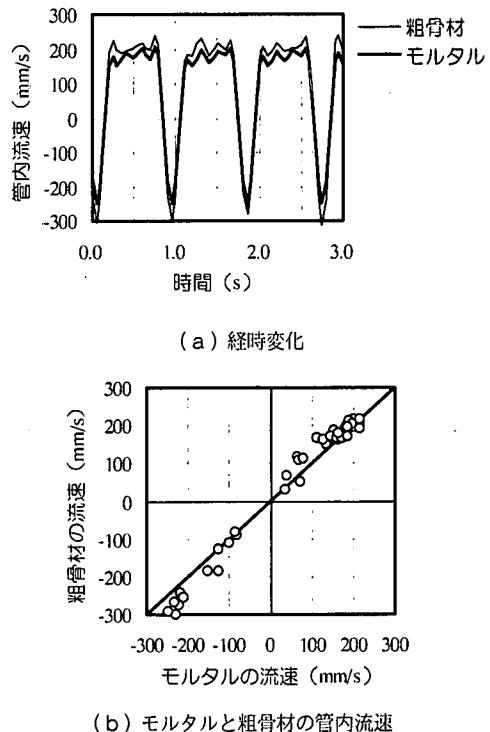


図-5 管内流速と材料分離  
(合流角度  $45^\circ$ , シリーズ 3, 粗骨材容積比 0.8)

ル粗骨材と比較したものである。モデルコンクリートの流量がほぼ一定の部分において、モデル粗骨材の流速は、モデルモルタルよりも速い速度で流動していることが認められる。一方、脈動時、すなわち、主流側の引込み時においては、モデル粗骨材の流速は、モデルモルタルよりも遅い。図-5 の (b) は、逆流のある流動を含めて、モデル粗骨材とモデルモルタルの流速を比較したものである。同一の管内圧力下において、モデル粗骨材の流速はモデルモルタルの流速よりも大きい。これは、モデルモルタルとモデル粗骨材との密度の違いによる両者の応答性を反映した結果である。すなわち、脈動の周期で、流動するモデルコンクリートの加速あるいは減速といった管内流速の急激な変化時に、モデルモルタルとモデル粗骨材との間に速度差が生じ、材料分離を引き起こす要因となる。ただし、本実験では、脈動流に伴う材料分離の存在を明らかにすることを目的としており、脈動の繰り返し回数が 4 回程度であるために、この材料分離によってモデルコンクリートが管内閉塞を誘発させる状態までには至っていない。よって、材料分離の程度と圧送性の良否の関係を定量的に評価することはできない。

脈動による管内流速の加速時や減速時の部分を少な

くすることが、脈動による材料分離を低減させる鍵となる。すなわち、外部より脈動による波形状の変動を打ち消すような逆の位相を有する脈動を加え合わせる手法は、コンクリートの材料分離を低減させるのに効果的である。

#### 4. 補流量の変化による合流後の管内流速

補流を加えることによる管内脈動の抑制を行う場合、外部より加える脈動流の吐出量あるいは合流角度といったパラメータを適切に与える必要がある。本章では、外部より加える脈動流を数十種類に変化させ、補流を加えた管内脈動流の流速が定常となるための、外部より加える脈動流の波形、吐出量および合流角度の条件を実験的に検討した。

##### (1) 脈動流の抑制

図-6には、小型ポンプ圧送装置による圧送実験の結果の一例として、合流角度が $30^\circ$ 、粗骨材容積比が0.6、主流側の引込み速度がシリーズ2の脈動流に対して、補流側から脈動の変動部分を打ち消すような脈動流を順次加えていった場合の合流後の管内流速の経時変化を示す。なお、補流量レベルは、補流側ピストンに接続した油圧ユニットのバルブにより調整され、押し出し速度を50段階に変化させることができる。すなわち、補流量レベルが大きくなるに従い、補流側のピストンの押し出し速度が速くなり、結果として、補流側より加える脈動流の流量が大きくなることを意味する。

図-6(a)は、脈動の抑制の対象となった主流側の脈動流である。なお、シリンダーの引込み時に管内流速が負の値を示しているのは、圧送管内の流れに逆流が生じていることを表している。この脈動を抑制するために補流を加える場合、合流後の管内流速は、(b)、(c)および(d)に示す3パターンに分類することができる。(b)は主流側の脈動流に対して脈動の抑制が不完全な補流量が過少の状態である。逆に(d)は補流量が過多となり、主流側の引込み時に合流後の管内流速が大きく加速している状態である。一方、(c)では管内流速がほぼ $200\text{mm/s}$ 付近に推移し、脈動が最も抑制された平滑になる適切な状態（以後、平滑状態と称す）である。なお、補流量の増加により補流量が過少から平滑状態、そして補流量が過多への一連の変化は、合流角度や粗骨材容積比、主流の脈動流の大きさに関わらず、発生することが確認された。

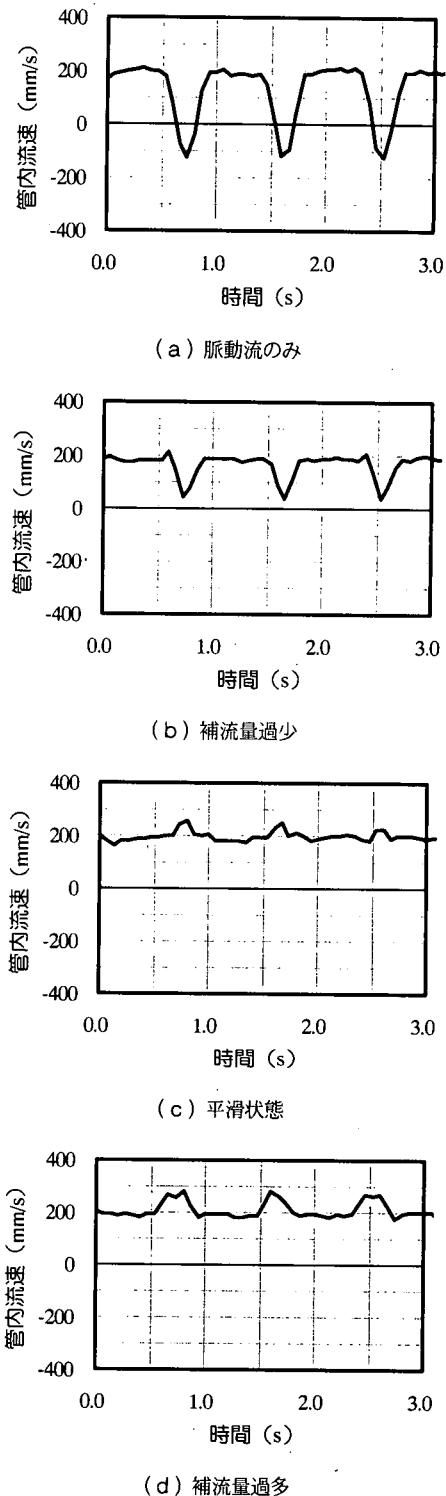


図-6 補流量による合流後の管内流速  
(合流角度 $30^\circ$ 、シリーズ2、粗骨材容積比0.6)

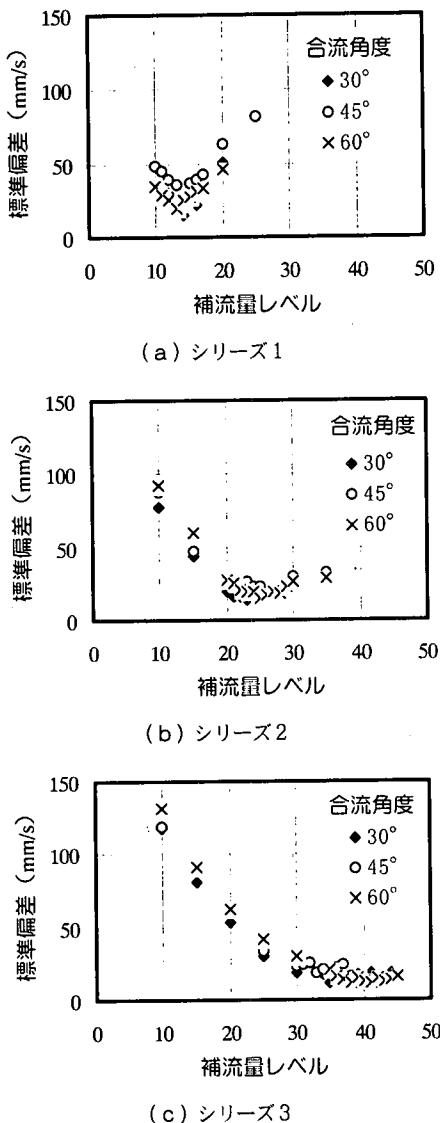


図-7 補流量レベルと標準偏差  
(粗骨材容積比 0.6)

## (2) 合流角度の与える影響

合流角度が異なる場合の脈動の抑制に必要な補流量を明確にするため、一定時間内における管内流速の変化を標準偏差を指標にして比較した。すなわち、標準偏差が零に近いほど、管内を流动しているモデルコンクリートは速度変化の小さい脈動の抑制された流れであることを意味する。

図-7に代表例として、補流量の変化に対する管内流速の標準偏差を合流角度毎に比較したものを示す。すべてのシリーズにおいて、標準偏差が最小となる補流量レベルが存在し、そのときの補流量は各シリーズ、

すなわち、主流側の引込み速度によって異なっている。

また、合流後の流动は、加える補流量に応じて、補流量が過少から平滑状態、そして補流量が過多へと移行していくが、標準偏差との関係は平滑状態において極小値を持つ、凹型の放物線状となり、同一の標準偏差が、補流量が過少と補流量が過多の両状態で存在する。主流側のシリンダーの引込み時に補流量が過少では管内流速が減速しており、一方、補流量が過多では管内流速が加速した流れとなる。

図-7より、主流側の脈動流を変化させても、それ合流角度に関わらずほぼ同程度の補流量で最も小さい標準偏差を示していることから、脈動流の抑制に及ぼす合流角度の影響は小さいものと考えられる。この傾向は、粗骨材容積比を0.4あるいは0.8とした場合においても同様に認められた。

## (3) 質量保存則

合流部前後のモデルコンクリートの流动に対して、質量保存則を適用させると次式が成立する。

$$\rho_c A_c V_c = \rho_p A_p V_p + \rho_s A_s V_s \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ : フレッシュコンクリートの密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、  
 $A$ : 圧送管の断面積 ( $\text{m}^2$ )、 $V$ : 管内流速 ( $\text{m/s}$ ) である。また、添字は、c: 合流後、p: 合流前の主流側、s: 合流前の補流側を表す。

小型ポンプ圧送装置では圧送管の内径を10cmと同一としており、モデルコンクリートを非圧縮性の流体でかつ合流部前後のモデルコンクリートの密度が一定と仮定すると、式(1)は次のように書き換えられる。

$$V_c = V_p + V_s \quad (2)$$

ここでは、適切な補流側の吐出量あるいは補流側の脈動の波形を容易に求める方法の一つとして、式(2)の適用の可否を検討する。

図-8には、合流後の管内流速と、式(2)を適用して主流と補流の管内流速から算出した合流後の計算値とを比較した代表例を示す。合流後の2種類の脈動流は時間変化に対してほぼ一致しており、数値的に重ね合わせることによって合流後の管内流速を与えることが可能である。この数値的な重ね合わせは、他のパラメータにおいても同様にほぼ一致する。したがって、主流側の脈動波形が決定すれば、式(2)を用いて、脈動を抑制あるいは制御するのに適切な補流量を求めることができる。

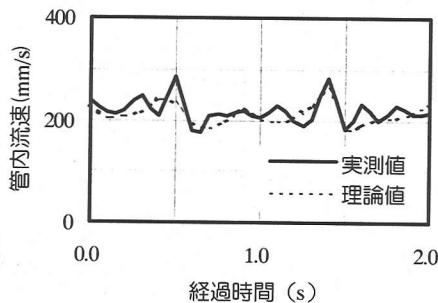
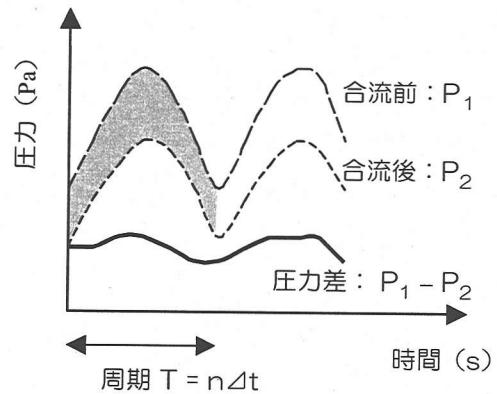


図-8 合流後の管内流速の実測値と計算値  
(合流角度 45°, シリーズ 2, 粗骨材容積比 0.6)



## 5. 合流部での流動現象

主流側の脈動波形および流量が決定すれば、質量保存則に基づいて、脈動波形の補流量を与えることで、主流の脈動を平滑状態にさせること、すなわち合流後の管内流速を経時に一定にすることが可能であることが明らかになった。ところが、合流部の存在が合流後のフレッシュコンクリートの品質に及ぼす影響については、質量保存則のみでは評価しきれないのも事実である。実際、合流部の流動状況を撮影したビデオ画像を詳細に観察した結果から、異なる2種類の脈動流の合流部では、局所的にモルタル相が分布する粗骨材容積比の低下領域と、2種類の脈動流が互いにぶつかり合い、その速度差により生じるせん断面の存在が、それぞれ顕著に認められた。このような合流部の流動現象が、圧送後のフレッシュコンクリートの品質に及ぼす影響について、材料分離現象に着目して、エネルギー損失の観点から、実験的に考察する。

### (1) エネルギー損失と材料分離

式(1)の質量保存則では、モデルコンクリートは、非圧縮性の流体と仮定して、合流部前後のモデルコンクリートの密度は一定として取り扱った。実際の流動は、圧送管の位置および時間により、フレッシュコンクリートの密度は変化する。この密度変化が材料分離を表す指標となる。しかし、圧送管内を流動するモデルコンクリートの密度を定量的に把握するのは、極めて困難である。一方、運動量保存則を用いれば、密度変化、すなわち材料分離の程度をエネルギー損失として間接的に評価することは可能である。式(3)に運動量を用いた運動方程式を示す。

$$d(mv) = Fdt \quad (3)$$

ここに、m: 単位時間あたりの断面通過物体の質量

1周期の平均エネルギー損失：

$$\Delta P = [\sum (P_1 - P_2) \Delta t] / T$$

図-9 圧力の時系列データによるエネルギー損失  
 $\Delta P$ の求め方

(kg/s), v: 速度 (m/s), F: 物体に作用する力 (N), t: 時間 (s) である。式(3)を流体に適用して、両辺を  $dt$  で微分し整理すると式(4)が得られる。

$$\frac{d\rho}{dt} Qv + \frac{dQ}{dt} \rho v + \frac{dv}{dt} \rho Q = \Delta P \cdot A - F_{fr} \quad (4)$$

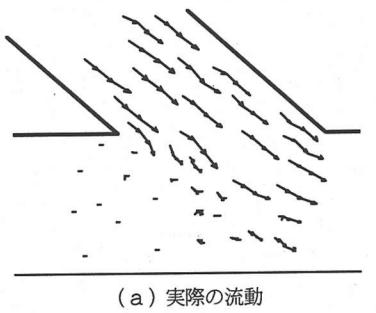
ここに、 $\rho$ : フレッシュコンクリートの密度 ( $\text{kg/m}^3$ ), Q: 単位時間における流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\Delta P$ : 圧力差 (Pa), A: 圧送管断面積 ( $\text{m}^2$ ),  $F_{fr}$ : 圧送管内壁面抵抗等により受ける外力 (N) である。すなわち、式(4)の右辺はエネルギー損失を表す。

主流側の押出し時には左辺の2項目および3項目の変化は零と考えられるため、式(5)が得られる。

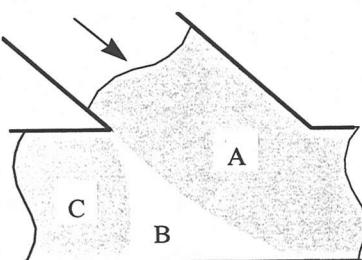
$$\Delta P = \left( \frac{d\rho}{dt} Qv + F_{fr} \right) / A \quad (5)$$

したがって、主流側の脈動1周期で消費される圧力差によるエネルギー損失  $\Delta P$  (Pa) は、圧送管内壁面抵抗等を含めた材料分離を表す一指標となる<sup>[3]</sup>。

本章では、式(5)の考え方に基づき、合流部の流動現象と材料分離との関係をエネルギー損失  $\Delta P$  を用いて考察する。なお、主流側の脈動の圧力の時系列データからエネルギー損失  $\Delta P$  を求める一例を図-9に示す。



(a) 実際の流動



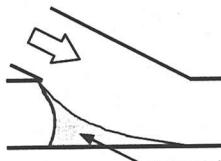
(b) 模式図

図-10 主流側の押出し時における合流部の流動の模式図

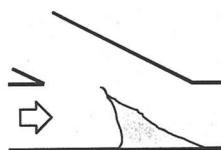
## (2) 粗骨材容積比の低下領域と遷移領域

主流側から押し出された脈動流は、合流部でその進行方向を変えながら圧送管へと流入していき、補流を加えていく場合においては、常に主流側と補流側との流動があるため、この2つの脈動流の合流部での流動は複雑となる。合流部をビデオ撮影した画像を詳細に観察することにより、主流側の押出し時における合流部のコンクリートの流動は、大きく3つの流動領域に分かれることが明らかとなった。実際の流動とその模式図を図-10に示す。主流側の押出しに合わせて勢いよく流動する領域A、わずかな流動しか見られない領域B、そして、全く流動のない領域Cの3つの領域である。補流側の押出しが無いにも関わらず、わずかに流動している領域Bは、領域Aを流動するモデルコンクリートの粘性による巻込みあるいは引きずりが主な原因と思われる。領域B内のモデルコンクリートの流入出量は、領域Aからの流入量に比べて流出量が大きく、領域Bでは局部的な材料分離が発生していると思われる。また、画像解析のために録画した映像においても、領域B内にモデルモルタルが偏って存在していることが目視からも認められた。モデルモルタルが比較的多く存在し材料分離の発生が予想される領域Bを、粗骨材容積比の低下領域と称する。

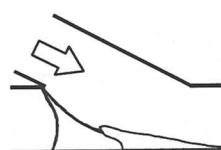
経時変化を伴う粗骨材容積比の低下領域の模式図を図-11に示す。主流側の押出し時に発生する粗骨材



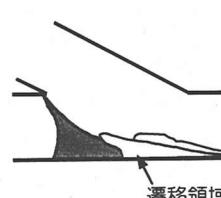
(1) 主流側の押出し時  
主流側の押出しによる粗骨材容積比の低下領域の発生



(2) 補流側の押出し時  
補流側の押出しによって粗骨材容積比の低下領域は変形を伴い移動



(3) 主流側の押出し時  
遷移領域の変形を伴う移動と新たな粗骨材容積比の低下領域の発生

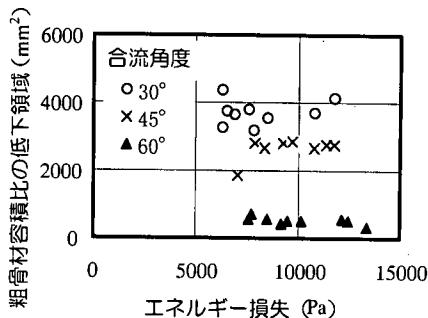


(4) 数周期後  
粗骨材容積比が低下状態から周囲と同じ粗骨材容積比に変化する遷移領域と新たな粗骨材容積比の低下領域が常に存在

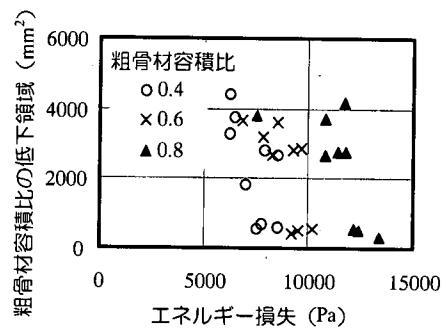
図-11 粗骨材容積比の低下領域と遷移領域

容積比の低下領域は、補流側の押出し時に合流後の圧送管方向へと流動する。補流側の押出しは主流側の引込みと同時に行われることから、粗骨材容積比の低下領域は主流側の流動に引き込まれてその形を変化させながら圧送管方向へと押し出される。押し出された最初の粗骨材容積比の低下領域は、主流側の流れに大きく引き込まれて徐々に周囲のモデルコンクリートの粗骨材容積比と同じ粗骨材容積比へと遷移する遷移領域となる。そして、次の主流側の押出し時には、新たな粗骨材容積比の低下領域が発生する。この一連の流動を繰り返すことにより、形成した粗骨材容積比の低下領域と遷移領域は、常に合流部に存在するが、合流部から離れるに従って粗骨材容積比は圧送前の状態に近づく。

合流角度の変化による材料分離の程度を知るためにには、粗骨材容積比の低下領域と遷移領域とを併せて検討する必要があるが、遷移領域を明確に定量化することは困難である。そのため、粗骨材容積比の低下領域に着目する。



(a) 合流角度による比較



(b) 粗骨材容積比による比較

図-12 周期毎のエネルギー損失と粗骨材容積比の低下領域の発生状況

図-12に、1周期毎に求めた主流側の流動の合流前後におけるエネルギー損失(図-9参照)と形成された粗骨材容積比の低下領域との分布状況を示す。エネルギー損失は、合流前において、主流側の脈動流の持つエネルギーが、粗骨材容積比の低下領域の形成や流動方向を変えることで消費される合流部でのエネルギー損失を意味する。なお、本考察では、エネルギー損失に関係なく粗骨材容積比が低下する程度は一定という条件が成り立つものとする。

図-12(a)より、幾何学的に合流角度が小さくなるに従い、粗骨材容積比の低下領域は増加する。また、エネルギー損失は、合流角度や粗骨材容積比の低下領域の大きさに関わらず6000~14000Paの範囲で一様に分布していることから、合流角度が材料分離の懸念される粗骨材容積比の低下領域の形成に与える影響は少ないものと考えられる。(b)より、モデルコンクリートの粗骨材容積比が大きいほど、合流部において大きなエネルギー損失が発生する。

したがって、主流側の押出し時に消費される合流部のエネルギー損失は、粗骨材容積比に依存し、形成される粗骨材容積比の低下領域の及ぼす影響は少ないと考えられる。

なお、紙面の都合から結果を図示していないが、主流側の引込み速度による違い(シリーズ1, 2および3)が、粗骨材容積比の低下領域に与える影響については、明確な差異が認められなかった。

### (3) せん断面移動領域

異なる2種類の脈動流の合流部では、主流側と補流側との流動が交互に流動する。このとき互いの流れのぶつかり合う面で速度差が生じる。静止したコンクリートにおいても、密度の異なるモルタルと粗骨材の間で材料分離が発生する。圧送時においては、この密度差に速度差の要因が加わり、さらに材料分離を増大さ

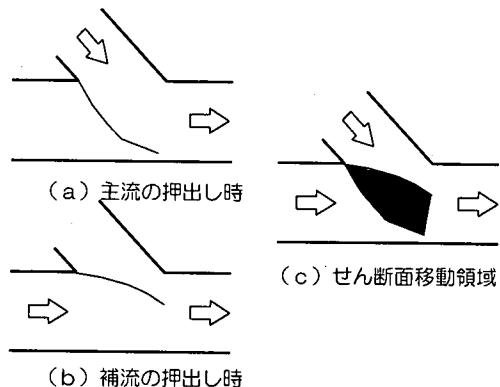


図-13 せん断面移動領域

せる傾向にあると考えられる<sup>11)</sup>。この速度差の発生を図-13の模式図で示す。

主流側が押し出されているときは、補流側は引込みあるいは停止しているため、(a)に示すせん断面を生じさせる。その後、主流の引込みと同時に補流の押出しが始まり、(b)に示すせん断面が発生する。この一連の動作から生じたせん断面を経時的に追うと、(c)に示す領域内で、せん断面が移動することが確認できた。この領域は、合流部に流入する主流と補流との時間的変化を伴って形成されるせん断面の移動可能な領域であり、以後、せん断面移動領域と称する。

瞬間に形成されるせん断面の定量化は、合流角度の変化による材料分離の程度を表す指標となるが、時間とともにその位置を変化させるせん断面を特定することは極めて困難である。せん断面ではなく、せん断面移動領域に着目し、材料分離の一指標とした。図-13(c)に示すように、せん断面移動領域は、主流と補流の流れから形成されるせん断面で囲まれた領域の面積とした。

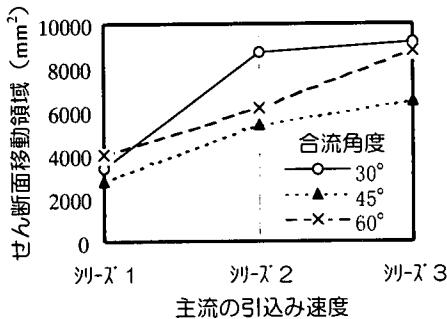


図-14 せん断面移動領域と合流角度  
(粗骨材容積比 0.4)

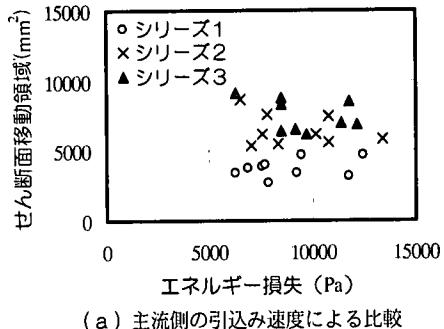
図-14には、主流側の引込み速度とせん断面移動領域との関係を、合流角度で比較したものの代表例を示す。せん断面移動領域は、主流側の引込み速度の小さいシリーズ1が最も小さく、主流側の引込み速度が大きくなるに従い、せん断面移動領域も大きくなる傾向にあった。すなわち、主流側の引込み速度が大きいほど、せん断面の移動する範囲は大きくなり、合流部での流動は複雑になる。また、合流角度による比較では、45°が最もせん断面移動領域が小さくなり、30°および60°では、シリーズ1に比べてシリーズ3のせん断面移動領域面積は約2倍である。

図-15に周期毎に求めた主流側の流動の合流前後のエネルギー損失とせん断面移動領域との発生状況を示す。なお、本考察では、エネルギー損失量に関係なくせん断面に生じているせん断応力は一定という条件が成り立つものとする。

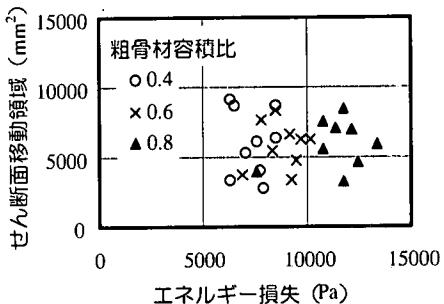
主流側の引込み速度で比較した(a)より、せん断面移動領域は、図-14と同様に、主流側の引込み速度が大きくなるに従って高い値で分布している。せん断面移動領域は、主流側の引込み速度と合流角度に大きく影響されると思われる。

一方、せん断面の形成に消費されるエネルギーは、主流側の引込み速度に関係なく、6000Paから14000Paの範囲で一様に存在する。さらに、(b)に示す粗骨材容積比による比較より、粗骨材容積比が大きくなるほどエネルギーの消費が大きくなることから、せん断面の形成により消費されるエネルギーは、合流角度や主流側の引込み速度の影響よりは、粗骨材容積比に依存する。

したがって、せん断面移動領域を最小限にするには、主流の引込み速度を小さくし、合流角度を45°付近に設定する必要がある。



(a) 主流側の引込み速度による比較



(b) 粗骨材容積比による比較

図-15 周期毎のエネルギー損失とせん断面移動領域の発生状況

## 6. まとめ

コンクリートポンプ圧送時における管内脈動の抑制を目的として、実機コンクリートポンプを模擬した小型ポンプ圧送装置とモデルコンクリートを用いて、補流を加えた管内脈動流がモデルコンクリートの材料分離の及ぼす影響について実験的に検討した。

以下に本研究で得られた結果を記す。

- (1) 外部より脈動を打ち消すために加え合わせる脈動は、数値的な重ね合わせにより、その波形や吐出量を容易に決定することができる。
- (2) 合流部において、粗骨材容積比が低下する領域が認められたが、その領域の形成に消費されるエネルギーは合流角度や主流の引込み速度等にはほとんど影響されない。
- (3) 2種類の脈動流の合流部において、互いの流動がぶつかり合う面に速度差が生じ、コンクリートの材料分離が懸念されるせん断面移動領域が確認された。このせん断面移動領域を最小限に抑えるには、主流側の引込み速度を小さくし、かつ、2種類の脈動流の合流角度を45°程度と適切に与えることで可能となる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、極東開発工業(株)の千々岩伸佐久氏と吉田正敏氏には多大なるご援助を頂きました。論文の執筆に際し、徳島大学工学部水口裕之教授には貴重なご意見を頂きました。また、本研究は、平成5、6年度文部省科学技術研究費補助金（試験研究(B)(2)0555119、研究代表者：橋本親典）の一部を受けて実施したものであります。

ここに付記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 小林一輔、岡村甫：特集 新世紀のコンクリートを考える「1. 対談 新世紀のコンクリートを考える」、土木学会誌、Vol.85, April, pp.6-12, 2000.
- 2) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針（案）、コンクリートライブラリー 第57号、1985.11.
- 3) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針、コンクリートライブラリー 第100号、2000.2.
- 4) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針「2.3.4 壓送条件の検討」、コンクリートライブラリー 第100号、pp.13-24, 2000.2.
- 5) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針「5.4 特殊な考慮を必要とする圧送」、コンクリートライブラリー 第100号、pp.52-62, 2000.2.
- 6) 橋本親典、佐藤良一、杉山隆文、辻幸和：ポンプ圧送時の管内脈動流に関する実験的研究、コンクリート工学年次大会論文報告集、Vol.17, No.1, pp.551-556, 1995.
- 7) 五十嵐数馬、橋本親典、辻幸和、池田正志：ポンプ吐出量が脈動流抑制機構に与える影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.1335-1340, 1996.
- 8) 大西あゆみ、五十嵐数馬、橋本親典、辻幸和：可視化手法によるポンプ圧送時の脈動特性の定量化、フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集、pp.67-72, 1996.
- 9) 栖原健太郎、橋本親典、辻幸和、杉山隆文：2種類の脈動流が合流するコンクリートの流動特性の定量化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.2, pp.421-426, 1997.
- 10) 栖原健太郎、大西あゆみ、橋本親典、辻幸和：ポンプ圧送における合流部でのコンクリート流動の定量化、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 第5部、pp.218-219, 1997.
- 11) 橋本親典、堀口和弘、丸山久一、清水敬二：テーパ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、土木学会論文集、No.402/V-10, pp.61-70, 1989.
- 12) 橋本親典、堀口和弘、丸山久一、清水敬二：変形管を流れるフレッシュコンクリートの変形性能の評価方法、土木学会論文集、No.433/V-15, pp.91-100, 1991.
- 13) 岡川佳史、水口裕之、橋本親典、上田隆雄：水平管内における高流動コンクリートの材料分離抵抗性モデル、第53回セメント技術大会講演要旨、pp.292-293, 1999.

(2000.8.28 受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON SEGREGATION OF MODEL CONCRETE DURING PULSATILE FLOW OF CONCRETE FLOWING IN PIPE

Kentaro SUHARA, Chikanori HASHIMOTO, Yukikazu TSUJI  
and Takafumi SUGIYAMA

This paper has been conducted to develop a novel system for pumping concrete with a minimizing degree of the pulsation in the pipe. A pumping devise designed on a small scale has two hydraulic cylinders: one for a main stream and the other for a supplemental stream, respectively. A visualization technique was employed to determine satisfactory levels of the pulsation of the supplemental stream that resulted in minimizing the pulsatile flow of concrete flowing through the main pipe after being combined with the supplemental stream.

This research concludes that pumping concrete could be operated most smoothly and without causing an adverse pulsation through the pipe by arranging the pulsation levels of the supplemental stream with the main flow of a certain level of the pulsation when the angle of confluent is 45-degree. Also, it was found that there existed was the segregation of model concrete in confluent during pulsatile flow and that the volumetric ratio of coarse aggregate to mortar influenced the segregation of concrete.