

論文 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

栢原健太郎*1・橋本 親典*2・辻 幸和*3・杉山 隆文*4

要旨：ピストン式コンクリートポンプによるフレッシュコンクリートの圧送において、圧送時の管路内流速および管路内圧力は、ピストンの往復に同期して変動する。このため、圧送管路内の流れは脈動流となる。この脈動の平滑化には、脈動の変動部分に対して逆位相を有する脈動を外部より加え合わせることで可能となる。異なる2つの脈動流の合流部を可視化し、流速分布を計測することで、合流部の流動を横流入のある1次元流れとしてのモデル化を行った。その結果、このモデルは合流部の流動をマクロ的に捉えるのに有効であることが明らかとなった。

キーワード：脈動流, 合流部, 可視化モデルコンクリート, 横流入, 1次元モデル

1. はじめに

フレッシュコンクリートを目的とした打設個所まで輸送する手段の一つに、ピストン式コンクリートポンプを用いた管路内圧送がある。圧送時における圧送管路内の流速および圧力は、ポンプの構造上、ピストンの往復に同期して変動する。このため、圧送管路内の流れは脈動流となり、圧送途中における材料分離、騒音、振動による圧送システム自体の耐久性低下の原因となり得る。この脈動流の平滑化には、脈動流の変動部分に対して、逆位相の変動を有する脈動を外部より加える合わせることで可能となる[1, 2, 3]。

この考え方に基づいた脈動流の平滑化には、異なる2種類の脈動流の変動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には、合流後の脈動を抑制するのは勿論のことながら、フレッシュコンクリートの品質を損なうことなく効率良く合流させなくてはならない。この合流部での流動を明らかにするため、モデルコンクリートを用いて流動を可視的に再現した。流動を可視的に捉えることで、圧送管路内での流速の測定が容易となり、流動するコンクリートを流体と見なし取り扱うことが可能となる。合流部でのフレッシュコンクリートの流動を、最も簡単な横流入を伴う流れで表し、1次元によるモデル化を試みた。このモデルの妥当性を検討するため、合流後の管路内流速、管路内流圧力および合流部内部の流動速度に着目し、実測値および実際の流動との比較から考察を行った。

2. 合流部での流動のモデル化

2.1 モデル化の概略

異なる2種類の脈動流の合流を、外部からの横流入のある流れと見なす[4]。外部からの流入速度は均一とし、その流入断面を矩形化して1次元によるモデル化を行う。

-
- *1 栢原健太郎 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 - *2 橋本 親典 徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)
 - *3 辻 幸和 群馬大学教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)
 - *4 杉山 隆文 群馬大学助教授 工学部建設工学科, Ph. D. (正会員)

合流部を幾つかの微少区間に分割し、この微少区間に対して、質量保存則および運動量方程式を適用する。微少区間に流入する流れの流速および圧力を与えることで、流出する流れの流速および圧力の算出が可能となる。算出された結果を次の微少要素に対して流入する流れの流速および圧力とする。順次、流れ方向に沿って計算を進めていくことで、合流部内部での流速および圧力を求めることができる。

2.2 運動量方程式

合流部を図-1に示すように、幾つかの微少区間 Δx に分割し、この微少区間に対して質量保存則を適用する。

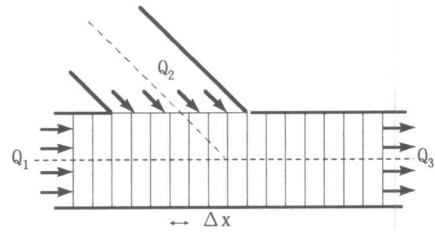


図-1 合流部の分割模式図

$$Q_1 + q\Delta x = Q_1 + \frac{\partial Q_1}{\partial x} \Delta x = Q_3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x} = q \quad (2)$$

ここに、 Q_1 ：水平方向からの流入流量 (m^3/s)、 Q_3 ：流出流量 (m^3/s)、 q ：外部からの単位長さ当たりの流入流量 ($\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$)である。

微少区間 Δx を検査面として運動量方程式を適用する。検査面の模式図を図-2に示す。この検査面に単位時間内に流入出する運動量には、I I'断面からの流入量、II II'断面からの流出量およびI II断面からの流入量の3つがある。また、この検査面に働く力は、I I'、II II'断面に作用する圧力差、圧送管内壁面より受けるせん断力がある。運動量の定理より、単位時間内に検査面から流入出する運動量の変化は検査面の流体部分に対して働く力に等しい。従って、運動量方程式は次式のようなになる。

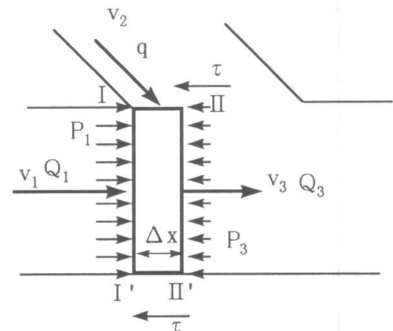


図-2 検査面模式図

$$\rho Q_3 v_3 - \rho Q_1 v_1 - \rho q \Delta x v_2 \cos \theta = a(P_1 - P_2) - \tau S \Delta x \quad (3)$$

ここに、 ρ ：フレッシュコンクリートの密度 (kg/m^3)、 v_1 ：I I'断面から流入する流れの断面平均管路内流速 (m/s)、 v_2 ：II II'断面から流入する流れの断面平均管路内流速 (m/s)、 v_3 ：II II'断面から流出する流れの断面平均管路内流速 (m/s)、 θ ：水平方向に対する外部からの流れの流入角度 ($^\circ$)、 P_1 ：I I'断面に作用する圧力 (Pa)、 P_2 ：II II'断面に作用する圧力 (Pa)、 τ ：壁面から受けるせん断応力 (N/m^2)、 S ：圧送管円周長 (m)、 a ：圧送管断面積 (m^2)である。

式(1)の質量保存則および式(3)の運動量方程式の連立により、検査面に流入する流れの

流速および圧力、検査面に作用するせん断応力を与えることで、検査面より流出する流れの流速および圧力の算出が可能となる。

2.3 セン断応力の算定

合流部において壁面から受けるせん断力は、簡略化のため直線状の円管を流れるときに受ける壁面抵抗とみなす。即ち、外部から流入のある I II 断面を仮想壁面として考える。また、フレッシュコンクリートは非圧縮性流体であり、圧送管断面積を一定とすれば、式 (1) の質量保存則および式 (3) の運動量方程式より、流速を消去することで次式を得る。

$$\tau = \frac{a}{S \Delta x} (P_3 - P_1) \quad (4)$$

即ち、せん断応力は検査面に作用する圧力差に比例する。

一方、エネルギー保存則によれば、圧送管路内の任意の 2 点において次式が成り立つ。

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + P_1 = \rho \frac{v_3^2}{2} + P_3 + Hf \quad (5)$$

ここに、Hf：任意の 2 点間でのエネルギー損失である。非圧縮性流体、一定の圧送管断面積を考慮すれば、エネルギー損失は 2 点間の圧力差であり、式 (4) は次式となる。

$$\tau = \frac{a}{S \Delta x} (P_3 - P_1) = \frac{a}{S \Delta x} (-Hf) \quad (6)$$

以上より、エネルギー損失 Hf を与えてやれば、せん断応力 τ が求まる。

2.4 エネルギー損失 Hf の算定

フレッシュコンクリートをニュートン流体とした場合、一般にエネルギー損失は、流速の 2 乗に比例し、圧送管内直径に反比例する。

$$Hf = \rho \lambda \frac{\Delta x v^2}{D} \quad (7)$$

ここに、 λ ：損失係数(-)、 v ：2 点間の平均流速 (m/s) とする。既往のモデルコンクリートを用いた圧送実験の結果より、式 (5) のエネルギー保存則および式 (7) を用いて、係数 λ を算出した。その値は概ね 5 前後であり、この値を用いる。

3. 合流部前後の流速および圧力の測定

3.1 実験装置およびモデルコンクリート

異なる 2 種類の脈動流の合流には、図-3 に示すようなピストン式コンクリートポンプ

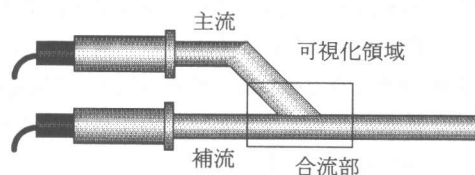


図-3 実験装置概略図

を2機用いて再現する。ポンプからの流れを主流，外部から流入する流れを補流として補流に対する主流の取り付け角度を 45° とした。合流部における流動を可視的に捉えるため，合流部を透明アクリルブロックで製作した。また，圧送するフレッシュコンクリートは，可視化を容易に行うことが可能なモデルコンクリートとした。流動を明確に捉えるため，モデルコンクリート中の着自物として発砲スチロール製の粒子（直径約2 mm，以下，トレーサー粒子）を無数に混入した。

モデルコンクリートは，モルタル相と粗骨材相の二相から成るものとし，モルタル相を形成するモデルモルタルには高吸水性高分子樹脂溶液（比重1.0）を，粗骨材相を形成するモデル粗骨材には人工軽量骨材（最大粒径20mm，比重1.66，メサライト系）を使用した。また，モデルモルタルの粘性を一定とするため，P漏斗流下時間を200秒とした。

主流量を3通り，補流量を4通り，モデルモルタルに対するモデル粗骨材の容積比を3通りとそれぞれ変化させ，合計36パターンについて圧送実験を行った。

3.2 管路内流速

ビデオカメラにより合流部の流動を撮影・記録し，その画像を基に合流前の主流，補流および合流後の流れの各々の断面に対する平均管路内流速を算出する。

各々の断面を通過するトレーサー粒子10個に着目し，1/30秒毎にその軌跡を座標に置き換え，移動した距離から各々の断面における管路内平均流速を算出した。

3.3 管路内圧力

合流前の主流および合流後の2箇所に取り付けた圧力センサーにより，圧送管路内の圧力の時間的変動を計測した。

補流側の圧力は，管路内流速の実測値および主流および合流後の管路内圧力の測定結果から，式(5)のエネルギー保存則および式(7)を適用して求めた。

4. 実測値とモデルの比較

4.1 合流後の管路内流速による比較

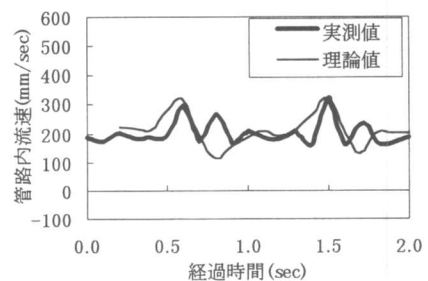
モデルの妥当性を検討するため，合流後の実測値とモデルにより算出した理論値との比較を行った。

合流後の管路内流速および管路内圧力の実測値と理論値との変動を図-4に示す。

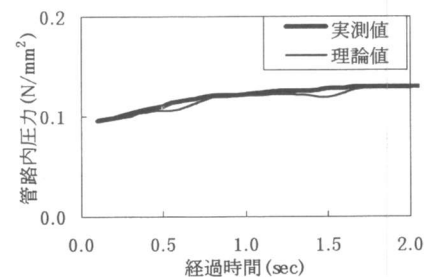
圧送条件は主流の流量を約 $5.0\text{m}^3/\text{hour}$ ，補流の流量を約 $1.6\text{m}^3/\text{hour}$ とし，モデルモルタルに対するモデル粗骨材の容積比を0.8とした場合である。

合流後の管路内流速および管路内圧力の変動は，理論値と比較的一致している。他の圧送条件においても同様の結果を示している。

流速変動の一致は，合流部前後において式(1)の質量保存則が成り立っていることを示してい



(a) 管路内流速の変動



(b) 管路内圧力の変動

図-4 合流後の
流速および圧力の変動

る。また、主流、補流および合流後の圧送管断面積は一定であり、式(6)のエネルギー保存則より、合流部におけるエネルギー損失は、合流部前後の圧力損失に等しい。即ち、圧力変動の一致は、損失係数 λ の値の妥当性を示している。

4.2 内部流動

合流部内部での実際の流動と、モデルによる流動との比較には、それぞれの断面平均管路内流速に着目して行った。

合流部内部での管路内流速の測定は、合流部を8つの区間に分割し、それぞれの区間を通過するトレーサー粒子の軌跡から、断面平均管路内流速を算出した。また、理論値は1次元モデルによる解析であるため、実測値との比較は水平方向の速度成分で行った。

主流の脈動の変動部分に対して、補流が押し出される瞬間から引込みまでのトレーサー粒子の座標を0.1秒間隔で捕捉した。図-4(a)の1.4~1.7秒のときが

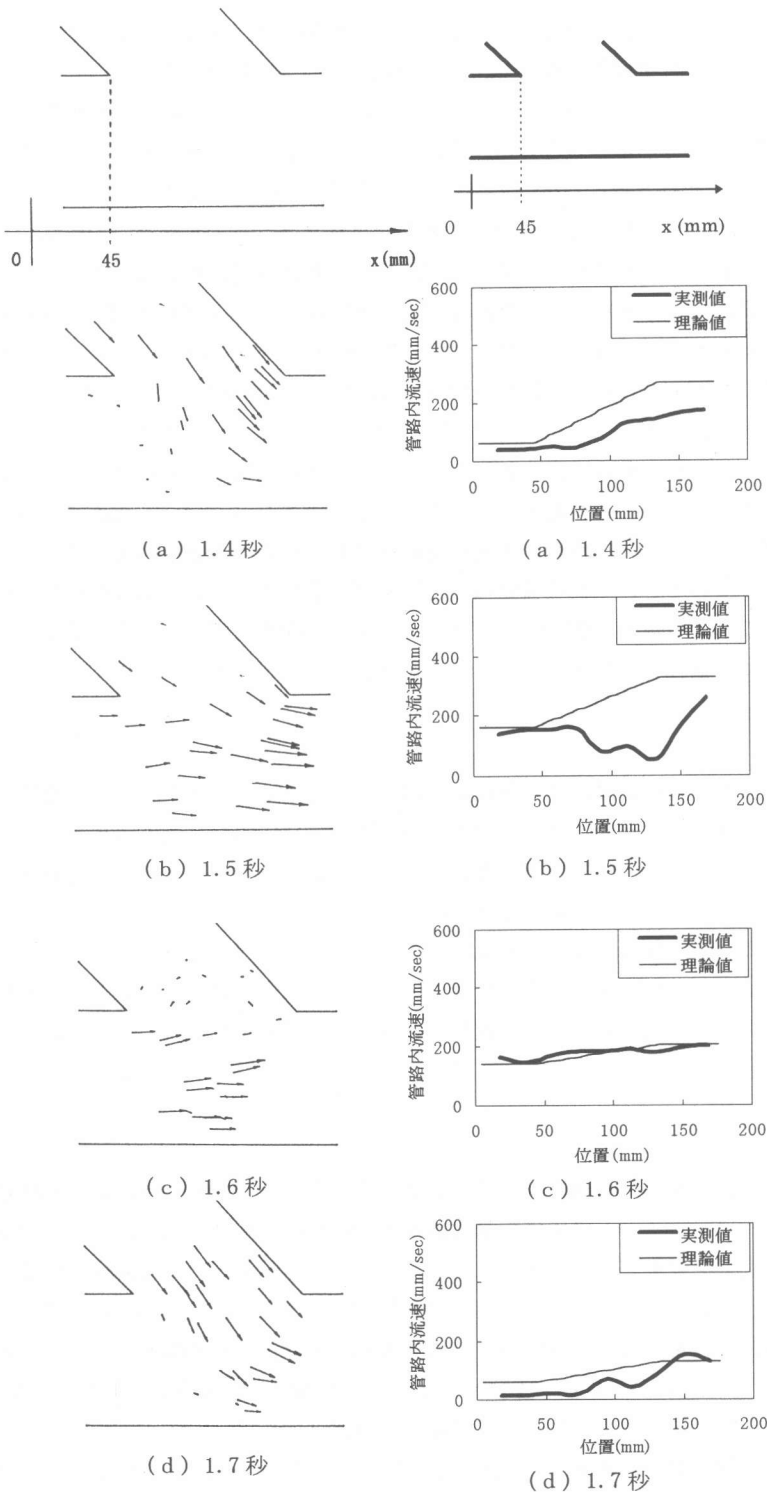
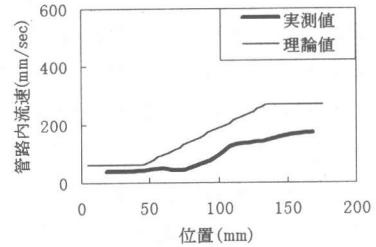
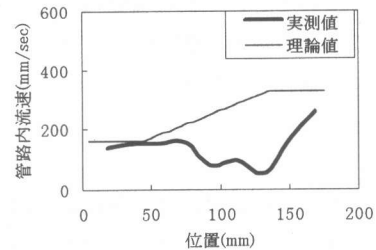


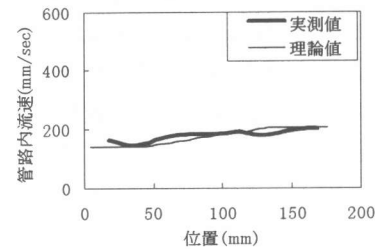
図-5 流動状況模式図



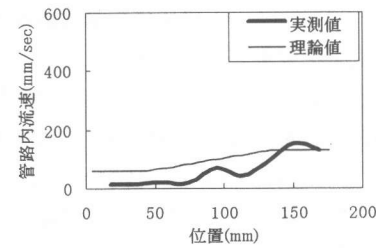
(a) 1.4 秒



(b) 1.5 秒



(c) 1.6 秒



(d) 1.7 秒

図-6 ある時間における位置と断面平均管路内流速

これに当たる。以上より得られた合流部の流動模式図を図-5に示す。尚、実際の解析に用いたトレーサー粒子は相当数あり、全てを記すと非常に煩雑で分かりづらいため、図-5では代表的なトレーサー粒子のみを記すこととした。図-5(a)は、主流が流動しており、補流の流動が始まる寸前である。(b)は、主流および補流が同時に流動しているときであり、主流の引込みが始まる寸前である。(c)は、主流の引込みが始まり、補流の流動のピークを示している。(d)は、補流の流動はなく、主流の流動が始まったところである。この流動を合流部での位置的变化として断面平均流速の実測値とモデルによる理論流速とを比較したものを図-6に示す。(a)、(c)および(d)の流速変動は、概ね理論値と一致しているが、(b)の主流および補流が同時に流動しているときの値は、大幅に理論値を下回っている。(a)、(c)および(d)の流動は、主流および補流の流動のうち何れかの流速が卓越している状態であるのに対し、一方の(b)の流動は、主流および補流がほぼ同等の流速で合流している状態である。即ち、2つの流れが合流する(b)の状態は、内部において2つの流動が複雑に絡み合うため、矩形断面による1次元モデルでは、この流動を十分に捉えることができない。2つの流れが同等の流速をもって合流部へ流入する(b)の場合、主流の流れは必然的にその向きを補流の流れ方向に変えなくてはならない。このとき、主流の流動は圧送管下部へ進むに従って、補流の流動に対する依存性が増す。このため、合流部上部では、下部に比べ水平方向の速度成分が著しく小さい。従って、断面平均流速は1次元モデルによる理論流速を大きく下回ると考えられる。

5. まとめ

異なる2種類の脈動流の合流部における流動の1次元モデルは、合流前の2種類の流れの流速および圧力を与えることで、合流後の流速および圧力を定量的に算定するマクロ的な解析には有効である。また、ポンプ圧送時におけるフレッシュコンクリートの流動を、流体運動として捉えることが十分に可能であると思われる。

一方、合流部内部での流動に関する1次元解析は、主流および補流の何れかの流速が一方を流速を卓越している場合、ある程度の流動を捉えることが可能であるが、主流および補流が複雑に絡み合った瞬間における内部流動の定量化は困難であり、新しく2次元モデルの構築が必要であると思われる。

参考文献

- [1] 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論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 551-556, 1995. 6
- [2] 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. 6
- [3] 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, 日本コンクリート工学協会, 1996. 4
- [4] 荒木正夫, 椿東一郎: 水理学演習下巻, 森北出版, pp. 72-80, 1977. 10