

論文 ポンプ圧送時の管内脈動流の力学モデルに関する一考察

五十嵐数馬^{*1}・橋本親典^{*2}・辻 幸和^{*3}・杉山隆文^{*4}

要旨：ポンプ圧送時に発生する管内脈動流を小型ポンプ圧送装置で再現し、フレッシュコンクリートの可視化実験手法を適用し、脈動流の流速変動と圧力変動の定量化を行った。その実験結果を1次元の振動モデルを用いて解析した結果と比較し、振動モデルにおける体積弾性率と粘性係数を求め、脈動流に対するこれらの数値の物理的意味について考察した。その結果、脈動時の管内流動は、体積弾性率に関してほぼ一定であるが、粘性係数は変化することから同じ管内圧力でも管内流速が異なる可能性があることが明らかとなった。

キーワード：1次元解析モデル、脈動流、体積弾性率、粘性係数、可視化実験

1. はじめに

現在、土木・建築の工事現場において工事の大規模化、高層ビルの増加に伴い、コンクリートポンプは大型化・高出力化されている。また、機動性の高いブーム付きポンプ車の普及等により、コンクリートポンプの性能は著しく向上してきた[1]。

コンクリートポンプの圧送に関する研究報告は非常に多くなされているが、ポンプ圧送における管内のコンクリートの流動特性に関する理論的、定量的な報告は比較的少ない。特に、ポンプ圧送中のコンクリートの流速や圧力が周期的に変動する脈動流という問題についても未解決な部分が残されている[2]。ポンプ圧送に伴う脈動流は、圧送中のコンクリートの材料分離や圧送後のコンクリートの品質低下に悪影響を及ぼすだけでなく、圧送現場での騒音・振動あるいはポンプ車のブームの座屈破損事故の原因となっている。

これに対し著者らは、2種類の正負逆対称の脈動流を合成し、合成後の管内流動を平滑化させるという脈動流抑制機構を開発し、フレッシュコンクリートの可視化実験手法を用いた脈動時の管内流動の定量化を行ってきた。その結果、脈動流抑制機構により脈動流の平滑化が可能であるということが明らかになった[3]。しかし、実際のポンプ圧送ではコンクリートの配合や吐出量の違いにより多くのパターンの脈動流が存在し、これらの影響を考慮した脈動流の定量化の必要がある。

本研究では、管内脈動流を小型試験装置で再現し、可視化実験手法による脈動流の流速変動と圧力変動を計測し、その結果を簡単な1次元の振動モデルを用いて解析した結果と比較し、振動モデルにおける体積弾性率(ばね要素の係数)と粘性係数(ダッシュポット要素)を求ることにより、脈動流を定量化するものである。

* 1 電気化学工業株式会社 青海工場 (正会員)

* 2 徳島大学 助教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

* 3 群馬大学 教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

* 4 群馬大学 助教授 工学部建設工学科、Ph. D. (正会員)

2. 実験概要

2. 1 可視化実験手法

本研究では、実際のコンクリートポンプでは管内流速を計測する事が不可能であるため、フレッシュコンクリートの可視化実験手法を適用した。

実験に用いた小型ポンプ圧送装置を図-1に示す。装置は、任意の脈動流を設定することができる主流と補流の2本の油圧シリンダ

を有するものである。図の主流側ピストンにおいてポンプ圧送時の脈動流を再現でき、脈動が発生した瞬間に補流側ピストンでモデルコンクリートの圧送を可能としたものである。管内の流速を計測する目的で主流側と補流側が合流する部分にアクリル樹脂を使用し可視化領域とした。また管内の圧力を計測するために合流後の配管部に圧力センサーを設置している。管内の初期圧力は、コンプレッサーを使用して 0.1N/mm^2 をチャンバー部分にかけることで一定とした。

2. 1 使用材料

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からなる固液2相系にモデル化したもので、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、モデル粗骨材として人工軽量骨材(最大粒径20mm, 比重1.66, 實積率63.9%, メサライト系)を使用した。モルタルの着目トレーサ粒子として発泡スチロール粒子(平均粒径2.5mm)を混入した。モデルコンクリートの配合は、モデルモルタルの粘性をP漏斗流下時間200秒で一定とし、骨材の配合による影響を検討するためモデルモルタルとモデル粗骨材の容積比(V_g/V_m)は、0.4、0.6、0.8の3種類とした。なお、通常のコンクリートは、0.7~0.6、高流動コンクリートは、0.5~0.4程度である。

2. 2 脈動流の設定

実験に用いた主流側の脈動流は、逆流現象の小さい流速波形、中程度のもの、大きなものの脈動流の流速変動幅を想定した3種類とした(以後、変動幅の小さな流速波形を想定した圧送実験から、シリーズ1、2、3と称する)。実験の詳細については、参考文献[3]に記載されているので省略する。

圧送実験は、シリーズ1、2、3の3種類の主流の脈動流について、粗骨材容積比を変化させ、計9通りとした。再現脈動流は主流側の押出し時間が0.7秒、引込み時間が0.2秒の周期を持つ脈動流とした。また、脈動流抑制機構による合成後の管内流動の影響を検討するため、補流側の脈動流についても設定し、押出し・引込み時間は主流側とは逆のそれぞれ0.2、0.7秒とした。補流側の押出引込み速度は油圧ユニットのバルブで調整し、押出速度はAからEになるにつれ線的に増加しA0~E9と50段階に変化させることができる。なお、設定速度は、装置の油圧をバルブによる制御で設定するため、速度を直接数値で表現できない[3]。可視化手法によって得られた速度で表現すると、主流側の押出し速度は、約200mm/sで一定とし、引込み速度は、シリーズ3のとき最大瞬間流速約-250mm/sを発生させている。補流側の押出速度は、バルブB5のとき最大瞬間流速約200mm/s、D0のとき約450mm/sを発生し、引込み速度は、約-20mm/sで一定とする設定である。

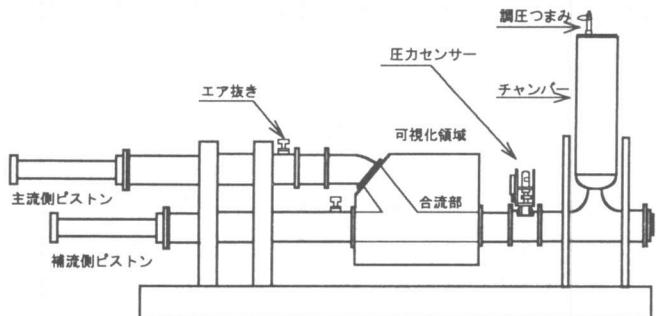


図-1 小型モデルポンプ

2. 3 計測方法

(1) 管内流速の計測

図-1に示すアクリル管の可視化領域を流動するトレーサ粒子を侧面からビデオカメラに収録する。画面中のトレーサ粒子の位置座標を0.1秒ごとに追跡し、3次元スプライン関数を用いて補間する。その補間データを時間で微分し、個々のトレーサ粒子の速度を求める。そして、その速度を同一時間内で平均し、重ね合わせて管内流速の経時変化とする[3]。

(2) 管内圧力の計測

図-1の圧力センサーを動歪み計に接続し、0.1秒ごとにデータを取り込みA/D変換した結果を管内圧力の経時変化とする。

3. 解析手法

3. 1 解析モデル

本解析は、図-2に示すような1次元振動解析であり、式(1)のコンクリートの運動方程式を用いた[4]。なお、解析は、1質点についての解析である。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

ここに、M：質量(kg) C：粘性係数(Pa·s)

K：体積弾性率(N/m²) \ddot{u} ：加速度(m/s²) \dot{u} ：速度(m/s) u：変位(m) F：力(N)

解析モデルは、質点とこれを接続するばね要素とダッシュポット要素からなるものと仮定した。

解析の入力値としては、モデルコンクリートの比重、管径、管内流速および管内圧力の計測値である。

3. 2 解析手法

解析手法は、図-3に示す手順で行った。(A)は、体積弾性率と粘性係数の算出方法、(B)は、管内流速の算出過程の流れ図を示す。

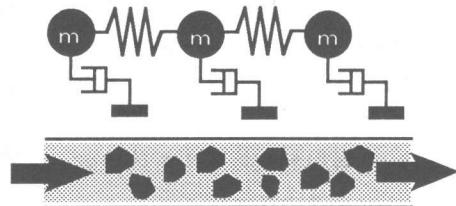


図-2 解析モデル

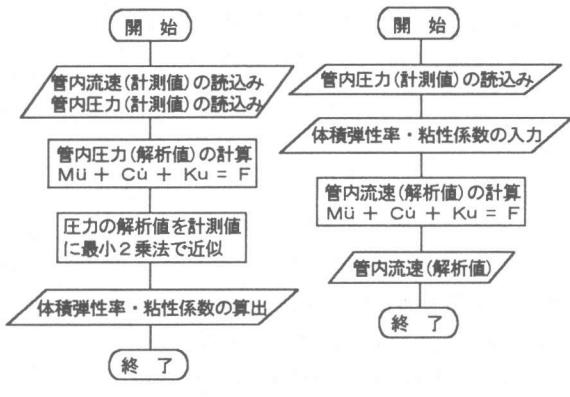


図-3 解析手法

4. 体積弾性率および粘性係数の同定

4. 1 管内流速および管内圧力の計測値と解析値の関係

図-4にモデルコンクリートの粗骨材容積比(V_g/V_m)が0.4の管内流速と管内圧力の計測結果および解析結果の一例を示す。なお、管内圧力については初期圧力を除いた値である。図-4の(A)は、シリーズ1の場合であり、主流側ピストンにより脈動流を再現した流速と圧力の経時変化および補流の流量を徐々に増加させてゆき管内の流動が合流部でほぼ定常流となった補流量B5のときを示し、(B)は、シリーズ3の場合であり、合流部で定常流となった補流量はD4である。(C)は、主流側ピストンを停止させ、補流側のみの脈動流を再現したときのものである。

シリーズ1、シリーズ3とともに解析結果は、流速、圧力とも精度よくほぼ一致している様子が確認できた。また、流速と圧力の位相に関しても計測値、解析値ともにほとんどずれを生じていない。この傾向は、粗骨材容積比(V_g/V_m)0.6、0.8の場合も同様であった。

補流による脈動流も計測値と解析値は、ほぼ一致しており、主流側で発生させている脈動流と正負逆対称の波形を補流側で与えていることが分かる。

4. 2 各脈動流に対する体積弾性率と粘性係数の変化

図-5、図-6は、主流側で脈動流を再現しているときおよび徐々に補流の流量を増加させたときの計測値に解析値を一致させるために求めた体積弾性率と粘性係数の変化を示すものである。図-5の体積弾性率は、すべてのシリーズにおいてほぼ一定の値を示し、 $0.04 N/m^2$ 程度である。このことから、体積弾性率は、粗骨材濃度、流速の変動幅ならびに管内全体の流量の増加に影響を受けない値であると考えられる。しかし、補流側のみの脈動流を再現した場合では、 $0.06 N/m^2$ 程度と若干大きい値を示している。この原因として、主流側で再現している脈動流と補流側で再現している脈動流の波形が、正負逆対称であり、押し出し時間と引込み時間が反対であるためと思われる。

一方、図-6の粘性係数は、各シリーズにおいて、粗骨材容積比の増加にともない大きい値をとる傾向がみられる。これは、モルタル量に対する骨材量の増加により管内壁面との摩擦が大きくなることによるものと考えられる。また主流側のみの脈動流と補流側のみの脈動流で比較すると、やはり粗骨材容積比が高ければ、粘性係数も大きい傾向があるが、あまり違いはみられない。しかし、補流を主流に合成してゆくと粘性係数が大きくなることから、主流と補流の干渉による影響が推測できる。さらに、シリーズ1とシリーズ2、3を比較するとシリーズ1では、合

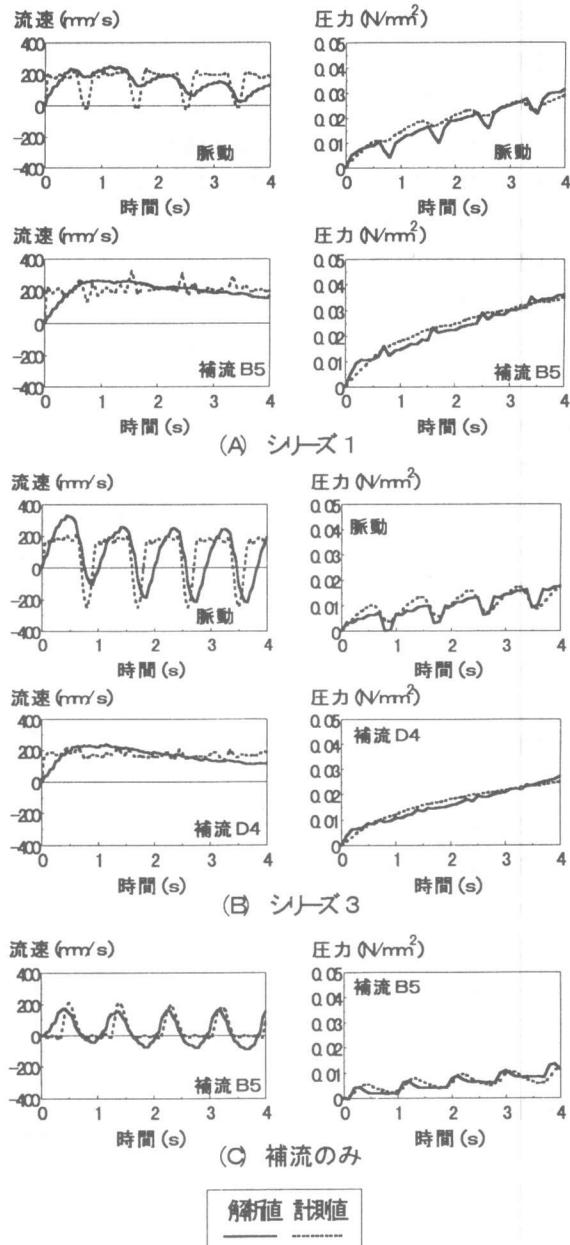


図-4 粗骨材容積比0.4の管内流速・圧力の経時変化

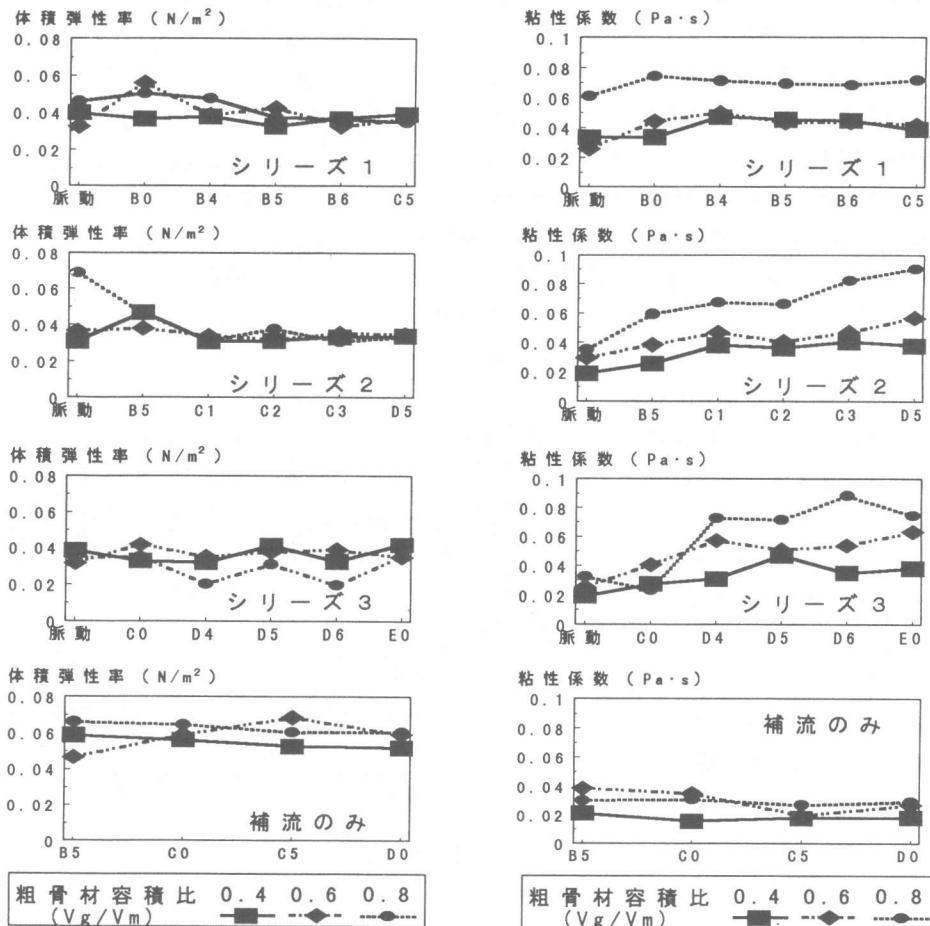


図-5 流量変化と体積弾性率の関係

図-6 流量変化と粘性係数の関係

成する補流量がB4以降、粘性係数が一定に推移しているが、シリーズ2、3では、補流量が増加するに従い増加していることが分かる。特に、粗骨材容積比が増加するほど顕著である。以上のことから、シリーズ2、3と管内流速・圧力の変動幅が大きくなるにつれて、また骨材量の増加につれて管内のモデルコンクリートの性状が変化していることを示唆している。

5. 脈動流のシミュレーション

実際のポンプ圧送中のコンクリートの流動は、管内圧力を計測することが多い。管内圧力と管内流速の関係が定量的に評価できれば、管内圧力の計測によって、コンクリートの材料分離特性や閉塞の危険性について推定できると考えられる。本解析では、式(1)を用いて体積弾性率と粘性係数が管内流動に与える影響について検討を行った。4. 2の結果から体積弾性率は、圧送中のコンクリートの流動特性に対する影響が少ないと考えられるので、本解析においては、0.04N/m²で一定とした。入力した圧力波形は、輸送管の先端付近と吐出口(ポンプ車の根本側)付近の管内圧力を想定し、図-7に示す最大圧力が、0.05、0.1N/mm²の2種類とした。モデルコンクリー

トの配合としては、比重1.189の粗骨材容積比0.4とした。図-8に解析によって得られた結果を示す。(A)、(B)どちらの場合も、管内に一定波形の圧力を与えた場合、粘性係数が大きくなるにつれて管内流速の変動幅が小さくなり、平均流速は、全体に低下する。さらに、粘性係数が小さい場合、流速波形の初期部分に瞬間に大きな流速が発生し、粘性係数が大きくなる程この部分がなくなり一定の矩形波となる。これは、ポンプ圧送時の管内圧力が同程度で同じ圧送管の任意の位置において、コンクリートが材料分離等を発生し、その位置での粘性係数が一時的に変化すると、管内の流速が変動することを示唆するものである。また、 $P_{max}=0.05\text{N/mm}^2$ よりも $P_{max}=0.1\text{N/mm}^2$ では粘性係数の変化による管内流速の変動が顕著である。このことは、大きな負荷がかかる吐出口付近では、粘性係数の変化による管内流速の変動への影響が大きくなると思われる。

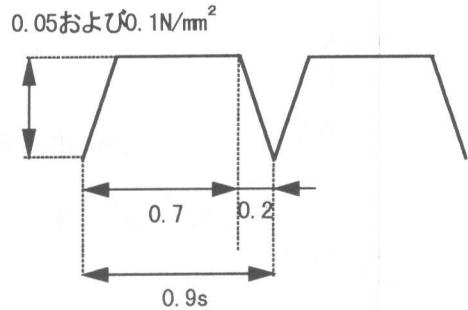


図-7 圧力入力波形

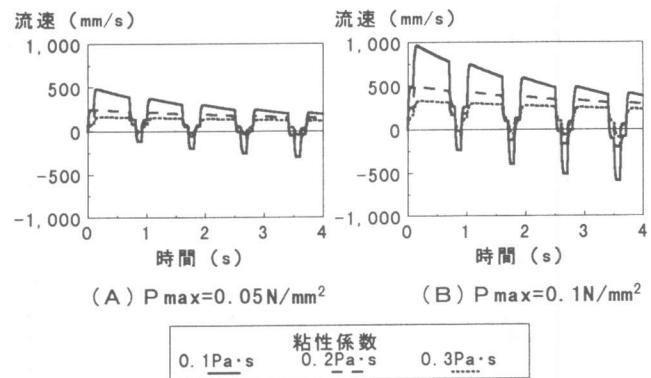


図-8 管内流速の粘性係数による影響

6. 結論

可視化実験により得られた管内脈動流の管内圧力と管内流速の関係に1次元振動モデル適用させることにより、本研究範囲内において、以下のことが明らかになった。

- (1) 体積弾性率は、モデルコンクリートの配合、管内流速の変動幅、流量の変動に影響されずほぼ一定である。
- (2) 粘性係数は、モデルコンクリートの配合、管内流速の変動幅、流量の変動により変化する。
- (3) 提案した本モデルを用いて、体積弾性率と粘性係数を同定することにより、管内圧力の経時変化から管内流速の経時変化を推定することが可能である。
- (4) 管内圧力が同程度であっても、コンクリートの性状が変化することによって、管内流速の経時変化は異なる。

参考文献

- [1] 橋本親典：ポンプ圧送による施工動向、コンクリート工学、Vol. 29、No. 4、pp. 70-75、1991. 4
- [2] 日本建築学会編：付録4. フレッシュコンクリートの流動特性 IV) ポンプ脈動、コンクリートポンプ施工指針・同解説1994改定版、pp. 229、1994. 1
- [3] 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、pp. 1335-1340、1996. 6
- [4] 谷川恭雄、森博嗣、野田豊、渡辺哲巳：フレッシュコンクリートのポンプ圧送に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、pp. 421-426、1992. 5