

論文 ポンプ圧送時の管内脈動流に関する実験的研究

橋本親典*1・佐藤良一*2・杉山隆文*3・辻 幸和*4

要旨：ポンプ圧送において発生する脈動流は、圧送後のコンクリートの品質のみならず、圧送現場の環境やポンプ自体に対しても悪影響を及ぼす。本研究は、脈動流を抑制した新しいコンクリートポンプ機構の開発を目的とし、任意の波形の脈動流を設定することができる油圧シリンダー2本（主流と補流）を有する小型ポンプ圧送装置を試作し、主流で再現した脈動流に合流させて管内流動を平滑化させるために必要な補流の条件を、フレッシュコンクリートの可視化実験手法を用いて検討した。管内流速の経時変化から、脈動流の平滑化を実現させる補流の条件が存在することが明らかになった。

キーワード：ポンプ圧送、コンクリートポンプ、脈動流、可視化実験、粗骨材濃度

1. はじめに

土木・建築の分野を問わずあらゆるコンクリート工事で広く用いられているコンクリートポンプの性能・機能は著しく向上してきた。しかしながら、ポンプの形式によって形態は異なるが、圧送中のコンクリートの圧力や流速が数秒の周期で変動する“脈動流”に伴う諸問題に対しては未解決な部分が多い[1]。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変化に悪影響を及ぼすばかりでなく、圧送現場での騒音やポンプ車のブーム・配管の疲労破壊の原因の一つである。

特に、長距離圧送、高所圧送などの高圧化や大容量化が進み、圧力や流速の変動が大きくなるに従い、脈動流がコンクリートポンプ工法に与える問題が顕在化してきた。さらに、高流動コンクリートのポンプ圧送の問題点として、脈動による圧送管内でのせん断変形がコンクリートの粘性の低下に与える影響も指摘されている[2]。

著者らは、この脈動流の問題解決の一つとして、2種類の脈動流を合成させることによって合成後の流動を平滑化させるという脈動流抑制機構を考案した。図-1に脈動流抑制機構の概念図を示す。(A)はポンプの脈動流を示し、(B)は脈動流を抑制するために、(A)の脈動流の縦軸の速度に関して逆向きの脈動流である。(C)は(A)と(B)の脈動流を合成したものである。

提案した脈動流抑制機構の可能性を検証するために、任意の波形の脈動流を設定することができる主流と補流の2本の油圧シリンダーを有する小型ポンプ圧送装置を試作した(図-2参照)。

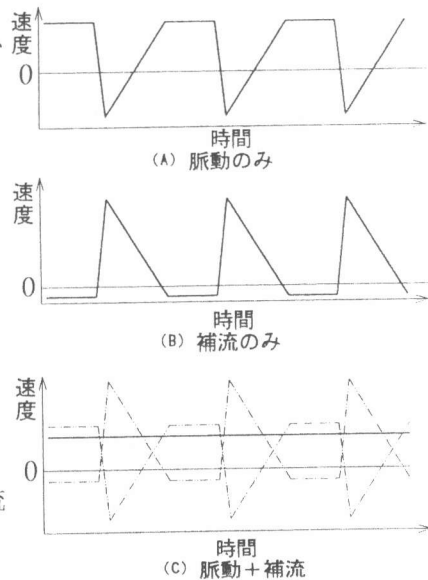


図-1 脈動流抑制機構の概念図

*1 群馬大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）
 *2 鹿島建設(株) 関東支店 土木部、工修（正会員）
 *3 群馬大学 助手 工学部建設工学科、Ph.D（正会員）
 *4 群馬大学 教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

本研究では、フレッシュコンクリートの可視化実験手法を用いて、主流と補流の脈動流が合成された合流部における管内平均流速の経時変化を求め、脈動流の平滑化に与えるコンクリートの粗骨材濃度の影響について検討し、主流の脈動流を抑制するための補流の条件を明らかにする。

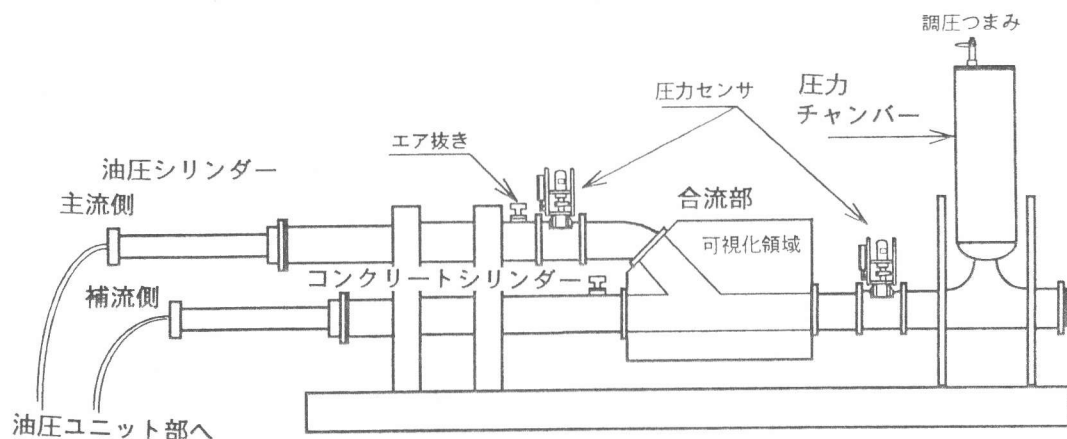


図-2 小型ポンプ圧送装置

2. 実験概要

2.1 小型ポンプ圧送装置

本研究で試作した小型ポンプ圧送装置の概要を図-2に示す。本装置は、油圧ユニット部、油圧シリンダー（内径40mm×長さ1059mm）、コンクリートシリンダー（内径100mm×長さ1103mm）、合流部および圧力チャンバーから構成される。ピストンの寸法は、ピストン前面径100mm×ロッド径30mm×ストローク長1000mmである。油圧シリンダー、コンクリートシリンダーおよびピストンに関しては、主流側と補流側でそれぞれ2本ずつある。主流側シリンダーと補流側シリンダーが合流する部分はアクリル樹脂のブロックを用いて製作し、合流部内部が可視化できる。合流部以外の配管はすべて鋼製である。コンプレッサーと接続した圧力チャンバーは、合流部前後の管内圧力差を実機の管内圧力差と同程度にすることを目的として設置されている。

主流と補流の脈動流の波形は、それぞれの押し出し速度と押し出し時間、引込み速度と引込み時間によって決定される。油圧シリンダーのピストンは、ピストン前面がストロークエンドに到達するまで設定された波形で運動し、コンクリートシリンダー内のコンクリートの管内流動状態が脈動流となる。なお、脈動流の波形は、油圧ユニットの能力の関係から設定値には限界がある。

管内圧力の変化を計測するために、主流側コンクリートシリンダーの先端部と合流後の配管部に圧力センサーを取り付けている。

2.2 可視化実験手法

本研究では、小型ポンプ圧送装置を用いてコンクリートの圧送実験を行うにあたり、実際のフレッシュコンクリートではなく可視化モデルコンクリートを用いる。

実機ポンプによって発生する脈動流は、管内圧力の変動と管内流速の変動の2種類がある。最も一般的なピストン式ポンプの場合、2連式のシリンダーにおいて、吐出が終了となるシリンダー側のピストンがストロークエンドになりピストン速度が零になり、もう一方のホッパーからのコンクリートの吸入過程が終了したシリンダー側のピストンが圧送管へ吐出を開始するために動き始める瞬間、すなわち連動した2つのシリンダーの吸入・吐出の弁が交互に入れ替わる瞬間に圧送管内のコンクリートに脈動が発生する。したがって、脈動の原因は速度に依存しており、結

果として圧力の脈動が起こるものと考えられる。よって、管内流速の変動に着目した脈動流を定量化することが重要であり、実際のコンクリートでは管内流速を計測すること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することとした。

実験に用いた可視化モデルコンクリートは、著者らがこれまで開発してきたものであり[3]、フレッシュコンクリートをモルタル相と粗骨材粒子群からなる固液2相系混相流体にモデル化したものである。モデルモルタルには高吸水性高分子樹脂水溶液（比重1.0）を、モデル粗骨材にはメサライト系の人工軽量粗骨材（粒径5~10mm, 比重1.66）を使用した。モルタル相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, 比重0.98）を少量混入した。モデルコンクリートの配合としては、モデルモルタルの粘性をP漏斗の流下時間200秒で一定とし、モデルモルタルとモデル粗骨材の容積比（以後、 V_g/V_m と称す）を0.4, 0.6, 0.8（粗骨材体積濃度としては28.6%, 37.5%, 44.4%）の3種類とした。

圧送実験は以下の手順で行う。(1)主流側および補流側の油圧シリンダーのピストンを最大に引き込んだ位置にセットする。(2)主流および補流の脈動流の波形を設定する。(3)可視化モデルコンクリートを圧力チャンバー側から、コンクリートシリンダーおよび合流部等の配管内に充填し、圧力チャンバー内の半分程度までモデルコンクリートを充填する。(4)圧力チャンバーのふたを締め、調圧つまみを所定のレベルに調節し、コンプレッサーを稼働させて圧力チャンバー内の圧力を所定の圧力（ 1.0kgf/cm^2 ）まで上昇させる。(5)可視化領域におけるビデオ撮影の準備を行う。(6)圧送実験を開始する。

脈動流に関する実験パラメータとしては、補流の押し出し速度を、零, レベル1, レベル2, レベル3, レベル4, レベル5の6段階で増加させ、その他の脈動流の条件はすべて一定とした。なお、補流の押し出し速度は、油圧ユニットのバルブの開度によって制御しているため、実験条件として数値で表現できない。

2.3 画像処理方法

図-2に示す合流部の可視化領域内における合流後の直管部分でのモデルモルタルのトレーサ粒子の動きを側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秒間隔で、画面に出現してから消失するまで追跡し3次のスプライン関数で0.02秒間隔で補間する。補間データを時間で微分することにより個々のトレーサ粒子の速度ベクトルを求める。単位時間間隔内のある時刻において、着目する領域内に存在する速度ベクトルの断面流動方向速度の平均値を算出し、この値をある時刻における管内平均流速とする。時刻歴に関して重ね合わせを行い、管内流速の経時変化を求める。図-3に個々のトレーサ粒子の速度の経時変化と重ね合わせた速度の経時変化の一例を示す。

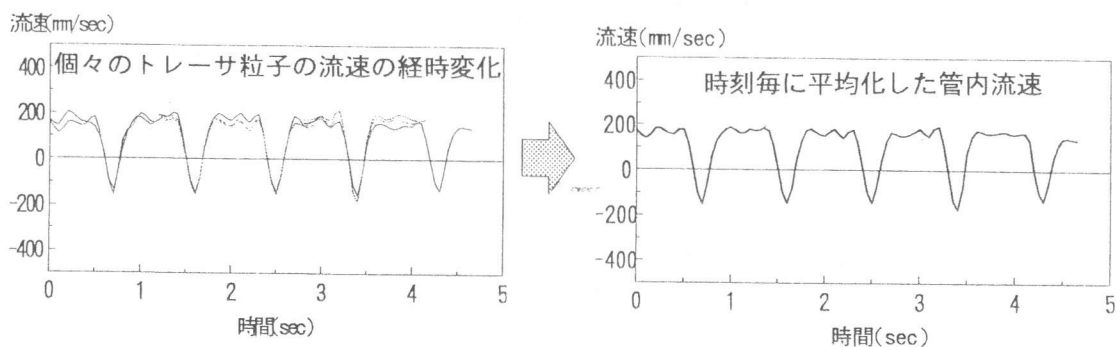


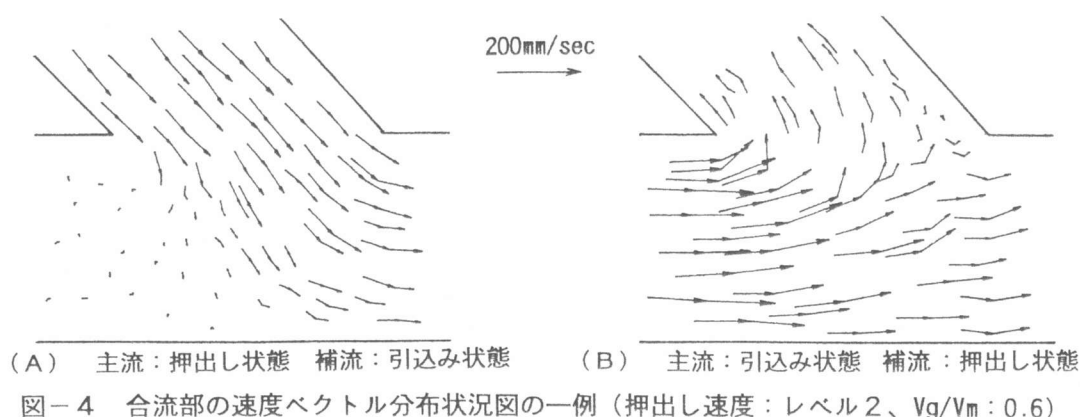
図-3 管内流速と経時変化の関係（押し出し速度：零、 V_g/V_m ：0.4）

3. 実験結果および考察

3. 1 合流部のベクトル分布状況

圧送実験によって求められた合流部のベクトル分布状況のうち、合流後の管内流動が平滑化されたときの一例を図-4に示す。実験条件としては、補流の押し出し速度：レベル2、 V_g/V_m ：0.6である。(A)は、主流側ピストンが押し出し状態で、補流側ピストンが引込み状態にあるとき、(B)はその逆のときである。主流からの流動は、あまり補流側に流入しないのに対し、補流からの流動は主流側に流入する。これは、主流と補流の引込み速度の違いによるためであり、主流の引込み速度が補流の引込み速度よりも大きいためと考えられる。

(A)と(B)の合流後の直管部における速度ベクトルの大きさはほぼ同程度であり、2種類の脈動流が合成されることによって、脈動流の平滑化が行われている。また、脈動流の平滑化は、次頁に掲載されている図-5に示す管内平均流速の経時変化によっても確認できる。



3. 2 管内平均流速の経時変化と補流の押し出し速度の関係

図-5は、補流の押し出し速度が管内平均速度の経時変化に与える影響について、各 V_g/V_m 別に示したものである。補流の押し出し速度が零では、いずれの V_g/V_m においても合流部の流動は脈動流である。補流との合流部が存在しても、主流の脈動流はまったく干渉を受けなくて、流動状態を維持して合流後の下流方向に流動するといえる。

一方、補流からの脈動流が存在し、主流の脈動流と補流の脈動流が合流する場合は、補流の脈動流の押し出し速度のレベルによって、合流後の管内流動状態が異なる。補流の押し出し速度のレベルが小さいときは、合流後の管内流速には主流の脈動流の傾向が存在する。逆に、補流の押し出し速度のレベルが大きいたときは、補流の脈動流による流量過多の状態になる。しかし、いずれの V_g/V_m においても、合流部の管内流動が平滑化される状態が存在する。

V_g/V_m が0.4と0.6では、合流部の流動が平滑化されるための補流の押し出し速度の条件としては、レベル2が最も良好である。これに対し、 V_g/V_m が0.8では、補流の押し出し速度の条件がレベル3のときが最も平滑化が良好である。したがって、主流の脈動流の波形が同一にもかかわらず、モデルコンクリートの粗骨材濃度が増加すると、補流の押し出し速度の条件が異なることが明らかになった。粗骨材濃度が増加するに従い補流の最適な押し出し速度が増加するということは、補流からの押し出し流れが合流部の下流方向への流れに供給される量が増加することを意味する。

この現象は以下のように説明することができる。『粗骨材濃度が増加するに従い、主流の引込み状態において粗骨材の自由度が小さくなり慣性力の影響を受けて粗骨材粒子群はすぐに流動方向を反転することができない。一方、主流のモルタル相は引込み状態において直ちに逆流するこ

とができる。結果として、主流の押し出しと引込みとの瞬間に材料分離が発生し、合流部の下流側では不足したモルタル分を補うために補流から多くの押し出し流れが必要となる。したがって、粗骨材濃度が増加するに従い、脈動流が合成される箇所において流動方向が反転する瞬間にモルタルと粗骨材の材料分離が発生しやすくなり、材料分離の程度が大きくなるに従って、主流の脈動流を平滑化させるために補流から供給する流量が増加する。』

材料分離現象の存在については、次節で説明する。

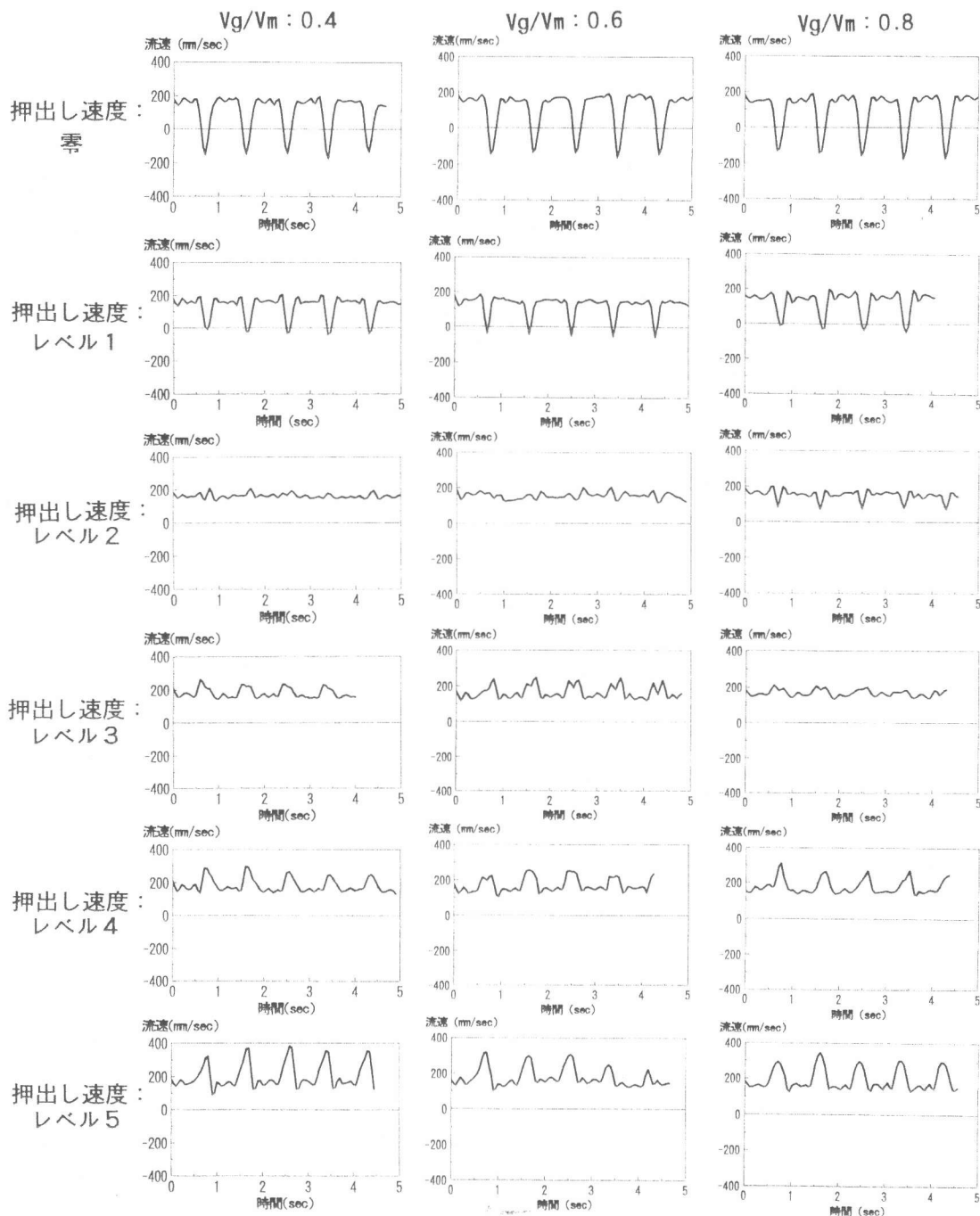


図-5 補流の押し出し速度が管内平均速度の経時変化に与える影響

3. 3 材料分離現象の確認

図-6は、合流部の管内平均流速の全経過時間に対する平均値を、粗骨材濃度別に比較したものである。補流の押し出し速度がレベル3、レベル2、零になるに従い、全体に平均流速が小さく

なるのは、補流から供給される流量が減少するためである。

補流の押し出し速度が零の場合、すなわち主流の脈動流のみの場合は、 V_g/V_m が0.4と0.6では、全経過時間に対する平均流速はほぼ一定である。 V_g/V_m が0.8になると、平均流速が減少する。

一方、補流の押し出し速度がレベル2、3では、粗骨材濃度が大きくなるに従い、平均流速が徐々に減少する。

管内流速を求めるために混入した発泡スチロール粒子がモルタル相のトレーサ粒子であることから、ここで求められる平均流速とは、合流部におけるモルタル相の平均流速を意味する。また、いずれの圧送状態においても

閉塞していないため、常に断面流量は一定である。よって、モルタル相の流速が減少するということは、粗骨材粒子群の速度が増加していることであり、両者の間に材料分離が発生していることを意味する。また、 V_g/V_m が0.8の場合、本圧送実験を数回繰り返し行った後に、主流側のシリンダー内のモデルコンクリートにはモルタル相が多く、下流側の圧力チャンバー内のモデルコンクリートには粗骨材粒子群が多く存在することが確認された。したがって、 V_g/V_m が0.8では、脈動流によって管内のコンクリートにおいて材料分離が発生しているものと推測される。

なお、本実験では可視化部における表面を流れるモルタル相の流速を計測しており、内部流速と表面流速との速度差の影響を考慮する必要がある。そのため、モルタル相の流速の減少がすべて粗骨材粒子群との相対速度とは結論づけることは難しく、上記の脈動流における材料分離の存在を検証するためには、粗骨材粒子群の流速に関する計測が必要である。

4. 結論

本研究では、2本の油圧シリンダーを有する小型ポンプ圧送装置を試作し、フレッシュコンクリートの可視化実験手法を用いて、2種類の脈動流を合成させることによって合成後の流動を平滑化させるという脈動流抑制機構の可能性について検討した。

本実験の範囲内において以下のことが明らかになった。

- (1) 主流の脈動流に対してある波形の脈動流を合流させることにより、合流後の管内流動を平滑化させることが可能である。
- (2) コンクリートの粗骨材濃度を増加させると、主流の脈動流を平滑化させるための補流の脈動流の条件が異なる。
- (3) コンクリートの粗骨材濃度が増加すると、脈動に伴い管内流動方向が反転するとき、モルタル相と粗骨材粒子群に材料分離が発生する。

謝辞 本研究は平成5年度科学研究費補助金(試験研究(B)(2)0555119、研究代表:橋本親典)の一部を受けて行いました。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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工法施工指針・同解説1994改定版、pp.229、1994.1
- 2) 大友健ほか:高流動コンクリートのスランプフローロスに関する実験的研究、第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.33-38、1994.5
- 3) 佐藤良一・橋本親典・辻幸和:フレッシュコンクリートの可視化モデルによるコンシステンシー評価試験の流動特性の定量化、第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.9-16、1994.5

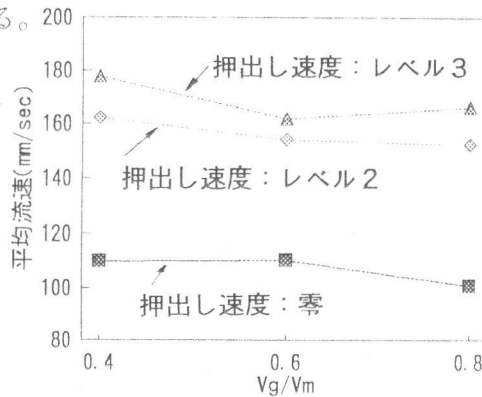


図-6 管内平均流速の全経過時間に対する平均流速