

論文

[1015] 可視化実験手法によるポンプ圧送時のコンクリートの
変形特性に関する研究

正会員 ○ 橋本親典 (長岡技術科学大学工学部)

井上 建 (高知県庁)

正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学工学部)

清水敬二 (長岡技術科学大学工学部)

1. まえがき

フレッシュコンクリートのポンプ圧送性能の評価方法の確立は、ポンプ圧送計画の合理化のみならず、硬化コンクリートの耐久性向上の観点からも、社会的要請として次第に高まっているのが現状である。これまで多くのポンプ圧送性能の評価方法が提案されているが、ポンプ圧送性能の評価方法としては未だ説明されていない部分が多く残されている。特に、閉塞の発生機構や、閉塞を誘発させる各影響因子については明かにされていない。

本研究は、既に提案した可視化モデルによる実験手法¹⁾および計測システムを用いて、ベント管と分岐管における管内閉塞機構の特性について実験的検討を行い、フレッシュコンクリートの変形性能および閉塞機構に対する管形状の影響について考察するものである。

2. 実験概要

2. 1 変形管形状

ベント管としては、実際の現場で使用頻度の高い90°ベント管を対象とすることにした。ただし、曲率半径を有する透明管が市販されていないため本実験では、直管を用いて図-1(a)に示す疑似ベント

管を作成し、ベント管の代替品とした(ベント管と称する)。

分岐管形状としては、現在、完全対称分岐が最適なのが現場の圧送実験²⁾により経験的に解っている。そこで、分岐管内で管内閉塞が発生しやすい形状として図-1(b)に示す非対称分岐とした。

また本研究で用

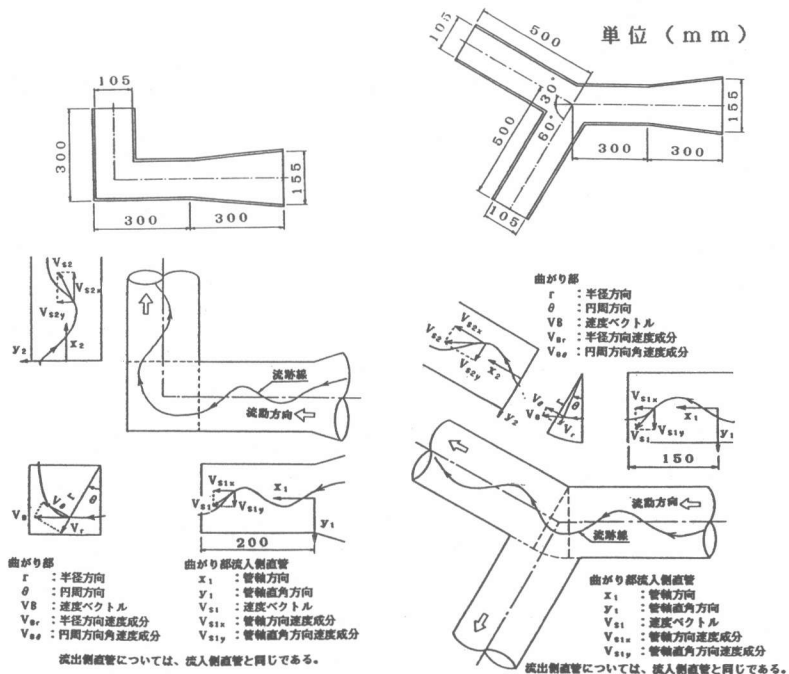


図-1 実験に用いた変形管形状および流動方向と座標系の関係

いた非対称分岐管は、30° ベント管と60° ベント管の組合せと考えることができる。

本研究で着目する管内流動部分は、ベント管では90° に折れ曲がっている箇所、非対称分岐管では管軸に対して30° と60° に分岐している箇所である。なお、図-1に、各変形管の流動経路に沿った座標系を示す。直管部は直交座標系で、曲がり部は極座標系で表すこととした。

2.2 実験シリーズ

本研究での実験パラメータは、圧送性悪化の影響因子と考えられる、粗骨材とモルタルの容積比 (V_g/V_m) と圧送速度とする。実験を行った配合を表-1に示す。Run 1はベント管、Run 2は非対称分岐管の配合である。Run 1-1およびRun 2-1は、粗骨材を混入せずモルタルのみとしたものである。これは、乱れることなく変形管内を流動する1相系粘性流体(可視化モデルモルタル)と可視化モデルコンクリートの流れとを比較することを目的としたものである。また、圧送速度は、3.0cm/sec, 6.0cm/sec の2種類とする。

表-1 配合表

Run 1	V_g/V_m	Run 2	V_g/V_m
1	0.00	1	0.00
2	0.50	2	0.60
3	0.60	3	0.70
4	0.70	4	0.80

2.3 使用材料および実験方法
モルタルモデルは、水に高吸水性高分子樹脂を添加して得られるもので透明な粘性材料である。粗骨材モデルは、最大寸法を25mmとし粒径5~15mmの人工軽量骨材(小砂利モデル、比重1.527)と、粒径15~25mmのコークスをアスファルト被膜したもの(大砂利モデル、比重1.239)からなり、最大寸法は25mmである。

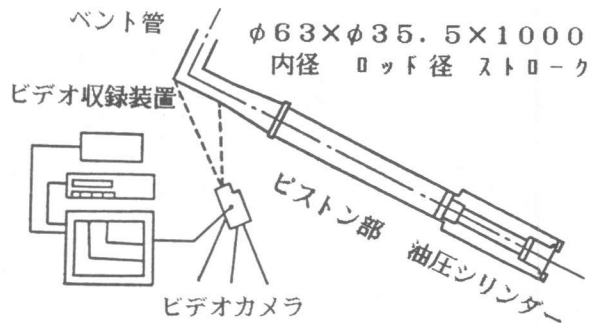


図-2 ポンプ圧送実験装置の概要

粗骨材モデルの粒度分布は、小砂利モデルと大砂利モデルの容積比 V_{g1}/V_{gc} 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にした。

図-2に可視化モデルコンクリートの変形管内の流動状態を再現するポンプ圧送実験装置の概要を示す。変形管内のモデルコンクリートの流動状態をビデオ装置により収録し、実験終了後、収録されたデータを解析してモルタル相および粗骨材粒子群の流動(流跡線、速度ベクトル)を求めた。その際、トレーサー粒子としては、モルタル相は直径3mm程度の発砲スチロール粒子を、粗骨材粒子群は人工軽量骨材を使用した。なお、トレーサー粒子の軌跡を取り込む時間間隔は、圧送速度3.0cm/secで0.5sec、3.0cm/secで0.25secとした。

3. 実験結果および考察

3.1 変形管内を流動する可視化モデルコンクリートの目視観察

写真-1、2に本実験で再現すること

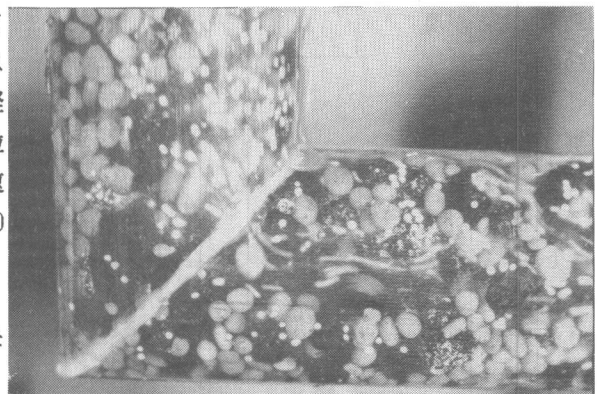


写真-1 ベント管での閉塞過程

ができたベント管および非対称分岐管における閉塞過程の状況を示す。写真から、閉塞に至る直前にモルタル相のトレーサー粒子が白い糸を引いたような状態で写っている。これは、この部分のモルタルが周囲の部分よりも速い速度で移動しているためである。さらに、曲がり部外側に粗骨材が滞留していることが観察される。粗骨材の滞留現象は、テーパ管では認められなく、曲がり部を有する変形管において特徴的で、閉塞の前兆として考えられる。また、目視観察によれば閉塞を発生しない状態でも粗骨材粒子群とモルタル相に微小振動が発生しており、各相のトレーサー粒子の流速に変動が生じていることが確認された。



写真-2 非対象分岐管での閉塞過程

このように、変形管内を流動する可視化モデルコンクリートは、粗骨材粒子群とモルタル相間に乱れ特性を有し、流動状態が閉塞に近づくにつれて、乱れの程度が増大していることより、乱れ特性と閉塞過程は密接な関係があると予想される。この種の現象は、テーパ管における乱れ特性でも認められている。

3.2 モルタル相の乱れ特性に関する検討

図-3にベント管の流動経路に沿った、モルタル相のトレーサー粒子の速度ベクトルの分布状況を示す。

配合Run 1-1のモルタルのみが流動する場合の流速と比較して、管軸方向（曲がり部で

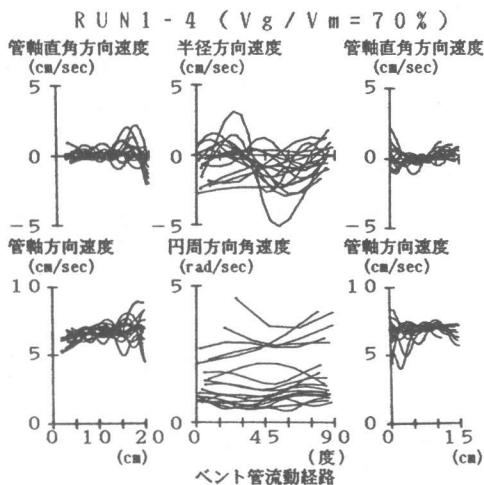
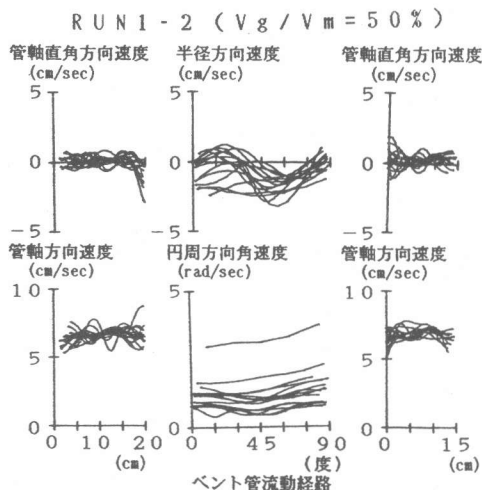
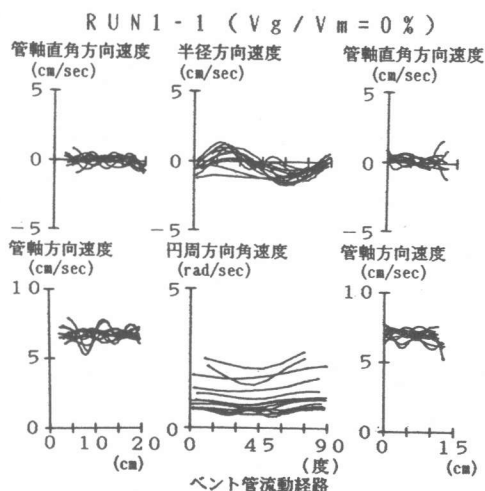


図-3 速度ベクトル分布状況 (Run 1, 圧送速度: 3.0 cm/sec)

は円周方向、以下 θ 方向）成分、管軸直角方向（曲がり部では回転半径方向、以下R方向）成分とも、流跡線から得られた速度成分は常に一定してなく変動していることがわかる。しかし、曲がり部では、 θ 方向の乱れは小さく、遠心力の影響によりR方向に乱れが大きくなっている。また、粗骨材とモルタルの容積比が増加し、変形性能が低下するにしたがって、乱れの程度が大きくなっている。この現象は、非対称分岐管の解析結果においても確認された。

したがって、粗骨材とモルタルの容積比が増加すると、粗骨材粒子群とモルタル相の間には、乱れを生じさせる内部応力が発生していると考えられる。そこで、乱れを定量的に評価する指標としてテーバ管について提案された³⁾、ある区間内のトレーサー粒子の加速度の平均値Fを用いることとする。

Fは次のように表される。

$$F = \frac{1}{n} \sum \frac{|\vec{V}(t_{i+1}) - \vec{V}(t_i)|}{\delta t}$$

ここで、

$\vec{V}(t_i)$: 時刻 t_i におけるトレーサー粒子の速度ベクトル t_i : 圧送開始からの経過時間

n : 区間内の全データ数

δt : 補間時間 ($t_{i+1} - t_i$)

図-4, 5にモルタル相のトレーサー粒子の平均加速度Fの分布を示す。流動経路は、図-3の速度ベクトル分布と同様に直管部については直交座表系（管軸方向）、曲がり部については極座表系（ θ 方向）で表示する（図-1参照）。

ベント管の直管部では、曲がり部前後で平均加速度Fの値が増大している。この傾向は粗骨材とモルタルの容積比が大きい配合のものほど明確である。また、この増加傾向は、曲がり部 30° 付近で最大となる。そして、逆に曲がり部から遠ざかるほど減少しており、乱れが小さくなる。

したがって、ベント管内を流動する可視化モデルコンクリートの乱れ特性は、曲がり部に流入する前と流出した後の乱れの大きさがほぼ同じ値となり、曲がり部で増大するが、その乱れは本の小さい状態に戻る性質（乱れの減衰性状）を有する。

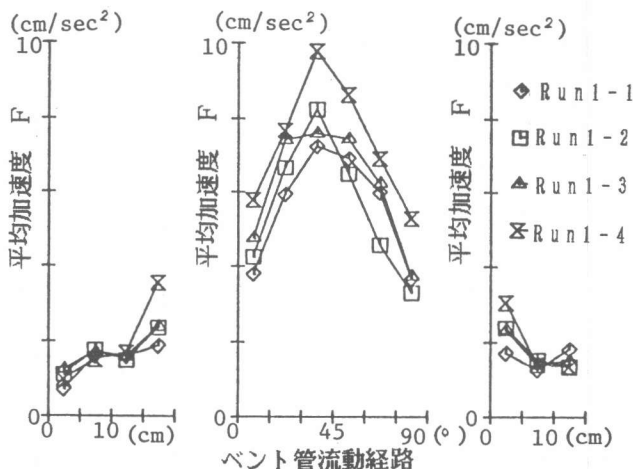


図-4 ベント管の平均加速度F分布(圧送速度:3.0cm/sec)

非対称分岐管についても、ベント管と同様に直管部では、分岐部前後で平均加速度の値が増大している。この傾向は、粗骨材とモルタル容積比が大きいものほど明確である。また、この増加傾向は、 60° 分岐の方では曲がり角 30° 付近で最大となるが、 30° 分岐の方では最大となる区間を持たない。このことより、 30° 分岐はほぼ直管と同じであると考えられる。そして、 60° 、 30° 分岐とも分岐部から遠ざかるほどFが減少している。

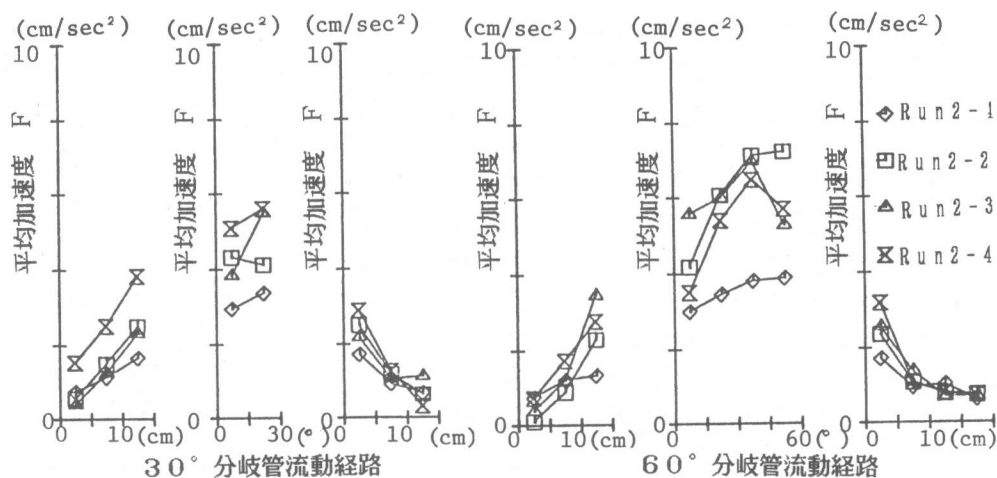


図-5 非対象分岐管の平均加速度F分布(圧送速度:3.0cm/sec)

したがって、非対称分岐管の乱れ特性は、バント管と同様であるといえる。ただし、バント管と異なるのは、分岐部内で、60°分岐はFの値が最大となる区間があるのに対して、30°分岐では最大値となる区間がないことである。

ここでいう乱れの減衰性状とは、変形管内で粗骨材粒子群の微小振動の程度やモルタル相の流速の変動が、次第に減少していく現象である。つまり、乱れの減衰とは、変形管内で増大した乱れエネルギーがモルタル相の粘性によって散逸し、変形管内に流入する以前の状態に戻る現象と言える。

3.3 粗骨材粒子群の乱れ特性

粗骨材粒子群の挙動に関しては、連続体であるモルタル相の評価方法と異なり、粗骨材の流動

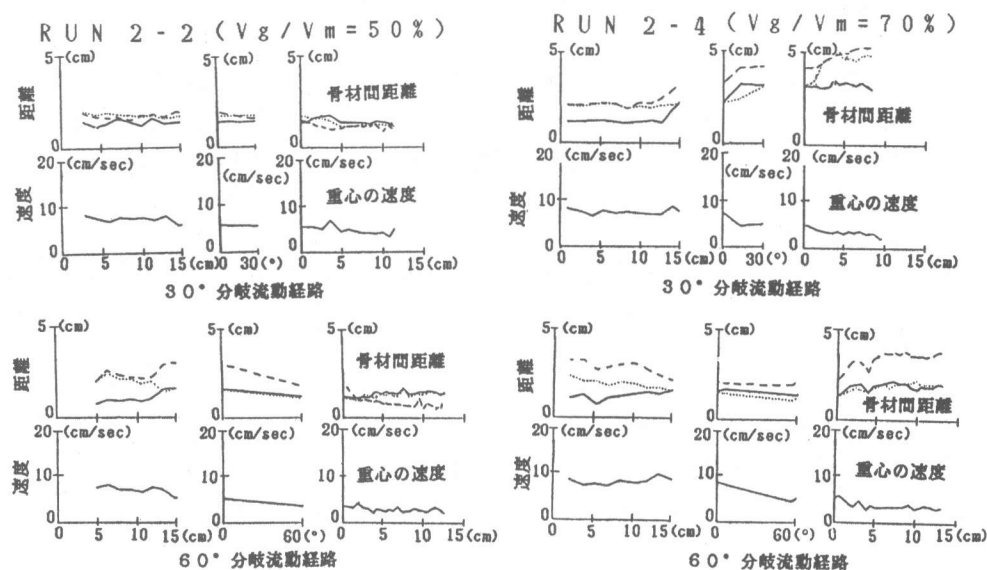


図-6 分岐管を流れる粗骨材粒子距離の変動状況の一例(圧送速度:3.0cm/sec)

速度でなく、粗骨材粒子間距離の変動に着目することにした。すなわち、粗骨材の流動速度にあまり変化がなくても、粗骨材間距離が僅かに変化するだけで、その間のモルタルの流れに大きな影響を与えるからである。

図-6に非対称分岐管の場合の粗骨材粒子間距離の変動を示す。なお、流動経路については、図-5と同様に、管軸方向距離（分岐部は角度 θ ）で表す。

3つの骨材が流入側直管内にあった場合には、骨材間距離はほぼ一定である。しかし、分岐部に入るとそのときの骨材の位置関係により、骨材間距離は様々に変化している。また、分岐部通過後、3つの骨材が直管内に入ってくると分岐前と同様に余り変動しなくなってくる。骨材間距離の変動の程度は、配合上粗骨材の多いほうが大きくなっている。またRun2-2は、分岐前から分岐後の流速へなだらかに変化しているのに対して、Run2-4は、大きく変動しながら変化している。流速の変動は、粗骨材に力が作用することによると考えられる。この結果より、3.2の平均加速度が分岐部内で大きくなるのは、粗骨材粒子間距離の変化によって乱れが増大された結果と言える。

4. まとめ

以上の可視化モデルコンクリートによる実験的検討より次のことが明らかになった。

(1) 写真撮影により、テーバ管では明確でなかった閉塞の前兆をベント管および分岐管において確認できた。

(2) 曲がり分を有する変形管においては、流速分布は、粗骨材とモルタルの容積比 V_g/V_m が大きくなるほど変形管分において生じる乱れが大きくなる。また、この現象はテーバ管における乱れ特性と同じ傾向である。

(3) 乱れの発生原因は、粗骨材粒子群の骨材間距離の変動による。

(4) テーバ管で定義された平均加速度を、曲がり部を有する変形管に適用することにより、今まで測定できなかった乱れによる内部応力を推定できるようになった。

(5) 管内閉塞位置と、平均加速度が大きくなる位置とがほぼ一致しており閉塞現象と乱れの大きさには関連性がある。

5. 今後の課題

本研究において、曲がり部を有する変形管での閉塞の前兆を確認できたが閉塞機構のモデル化までは至らなかったため、モデル化のための検討が必要である。また、閉塞が発生しそうになったときのそれを防ぐ方法についても考える必要がある。

〔謝辞〕本研究は、昭和61年度、62年度文部省科学研究費補助金、試験研究1（No. 61850090）によったものである。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, 1988. 2, pp. 119~127
- 2) 田辺清・高瀬三郎：「分岐配管によるコンクリートのポンプ施工」、コンクリート工学、Vol. 25, No. 6, 1986. 6, pp. 40~50
- 3) 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な材料分離の定量化」、土木学会第42回年次講演概要集第5部, 1987. 9, pp. 560~561