

論文

[1070] 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

正会員 谷川恭雄 (名古屋大学建築学科)
 正会員 森 博嗣 (名古屋大学建築学科)
 正会員 ○野田 豊 (三重大学大学院)
 渡部哲巳 (名古屋大学大学院)

1. まえがき

日本建築学会の「コンクリートポンプ工法施工指針案」[1]は1979年に改定されて以来、12年が経過している。この間、欧米をはじめ日本でも、大規模工事への対応から、コンクリートポンプは大型化・高出力化し、一般工事では、ブーム付きポンプ車の普及・大型化が進んでいる[2,3]。

コンクリートポンプ工法に関連する実験的な研究報告は非常に多く、コンクリート施工の標準的な技術となっているが、ポンプ圧送のメカニズムを理論的に究明したものは比較的少ない。筆者らは既に、フレッシュコンクリートのレオロジー物性およびすべり抵抗性を入力とする管内流動の基礎理論を提案したが、この理論の特徴は、フレッシュコンクリートのせん断変形とすべり挙動の双方を考慮し、特に、圧力に依存したすべり抵抗モデルを用いている点にある[4]。また、この理論によって、ポンプ圧送時の圧力損失が、筒元から筒先へ変化することが明らかとなり、現行の圧力損失算定法の適用に限界があることを示した。しかし、実際のポンプの圧力は、時間により急激に変動（脈動）しており、長距離・高所圧送時にこの脈動の影響が顕在化する可能性がある。既往のポンプ圧送の理論解析においては、時間によって変化するポンプ圧力を考慮した非定常解析を行った研究はほとんどなく、多くの研究ではポンプ圧力を一定とし、等速度運動を仮定した静的解析を行っている[5]。

本研究は、簡単な動的解析によってポンプの脈動を考慮したフレッシュコンクリートの管内流動について検討したものである。

2. 解析手法

本解析は、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基本とする。

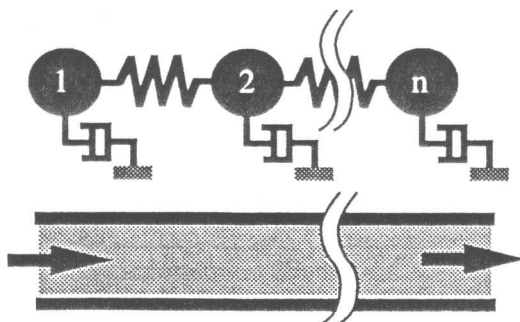


図-1 本解析のモデル

表-1 本解析の入力値

Radius of Pipe (cm)	Distance of Pumping (m)	Elasticity of Concrete (kgf/cm ²)	Viscosity of Concrete (gf/cm ² ·sec)
6.25(5B)	100	200-800	0.005-0.5

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

ここに、 M：質量 C：粘性 K：剛性
 \ddot{u} ：加速度 \dot{u} ：速度 u：変位 f：力

式(1)の数値解法として、本解析では線形加速度法を用いた。離散化手法は式(2)に示す通常的手法であり、 u_{new} に関する方程式を解く直接法を用いた。

$$\left(M + \frac{\Delta t}{2}C + \frac{\Delta t^2}{6}K\right)\ddot{u}_{new} = f - C\left(\dot{u} + \frac{\Delta t}{2}\ddot{u}\right) - K\left(u + \Delta t\dot{u} + \frac{\Delta t^2}{3}\ddot{u}\right) \quad (2)$$

解析モデルは、図-1に示すように圧送管を軸方向にn個に分割し、質点とこれを接続するバネ要素およびダッシュポット要素よりなる。解析の入力値としては、圧送管の分割数、バネ要素の剛性 (Kマトリックス)、ダッシュポット要素の粘性 (Cマトリックス)、コンクリートの比

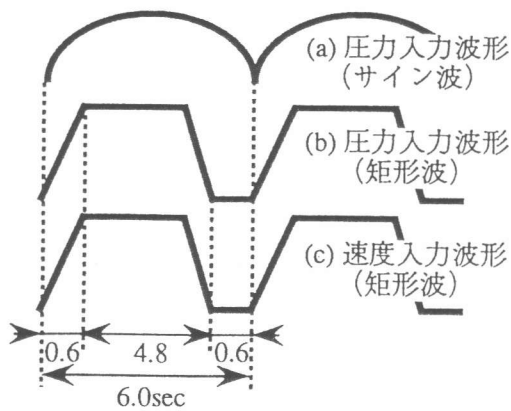


図-2 圧力波の入力値

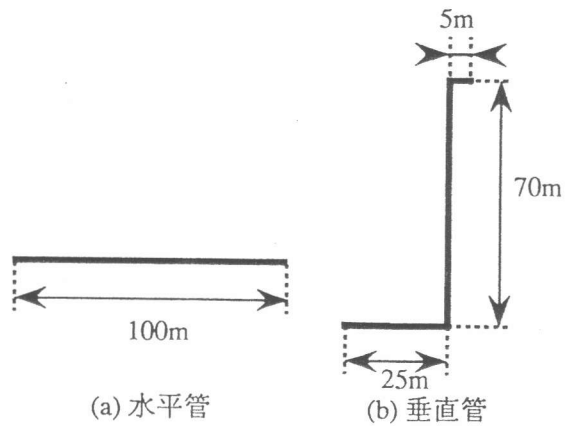


図-3 管の配置

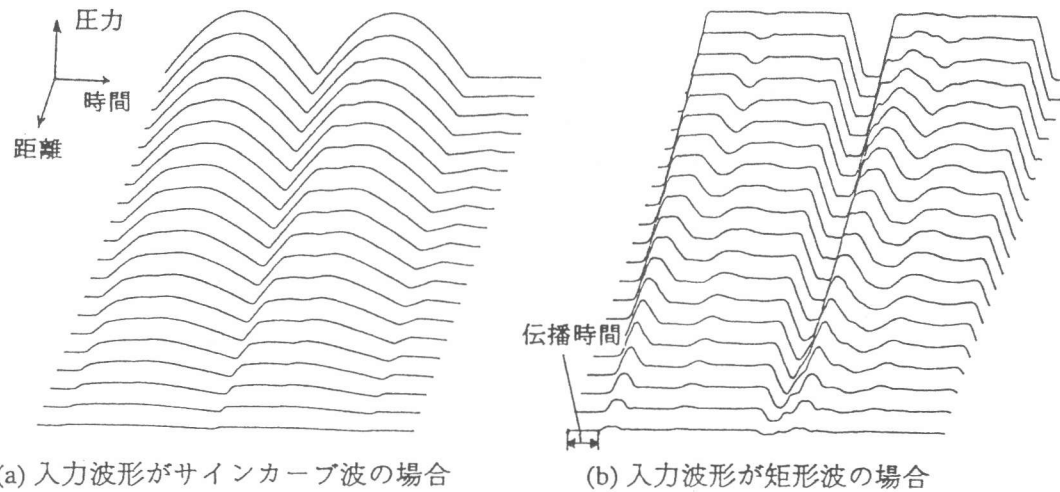


図-4 各位置における圧力の変化状況

重、節点外力（要素ごとに設定でき、水平および垂直配管を表現することができる）、筒元に加わる節点荷重、管の径と管の長さである。バネ要素の剛性は、鋼管に充填したフレッシュコンクリートに関するものであり、空気量や鋼管の剛性を含んだパラメータである。また、ダッシュポット要素の粘性は、フレッシュコンクリートのレオロジー定数と管内壁面におけるすべり定数を含んだパラメータであり、本来は降伏値をもつはずであるが、通常の軟練りコンクリートでは、この影響は比較的小さい[5]ので、今回は単純化のため無視した。

解析では、筒元におけるポンプ圧力を設定し、微小時間刻みの時間前進で解き、各節点の変位を求める。得られた変位から、バネ要素のひずみを求め、各要素の圧力を算出した。なお、計算は荷重制御および変位（速度）制御の両方について行った。

解析の入力値を表-1に示す。荷重制御および変位制御の解析に用いた筒元の圧力および速度の入力波形を図-2に示す。図-2(a)はスクイズ式ポンプを想定したサインカーブの絶対値、図-2(b)、(c)はピストン式ポンプを想定した矩形波である。配管は図-3に示すように水平管および水平管と垂直管を接続した場合の2種類について行った。

3. 解析結果と考察

解析結果の一例として、図-4に各節点における圧力の変化状況を示す。ポンプの圧力は各節点（位置）によって異なった変化状況を示している。

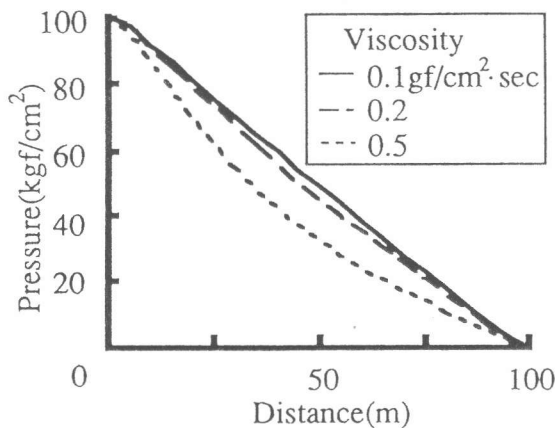


図-5 圧力分布の粘性による影響

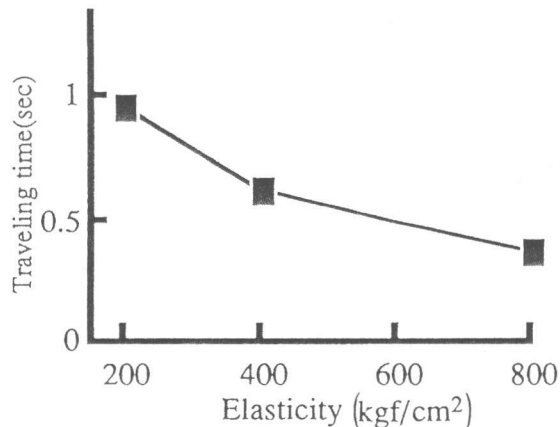
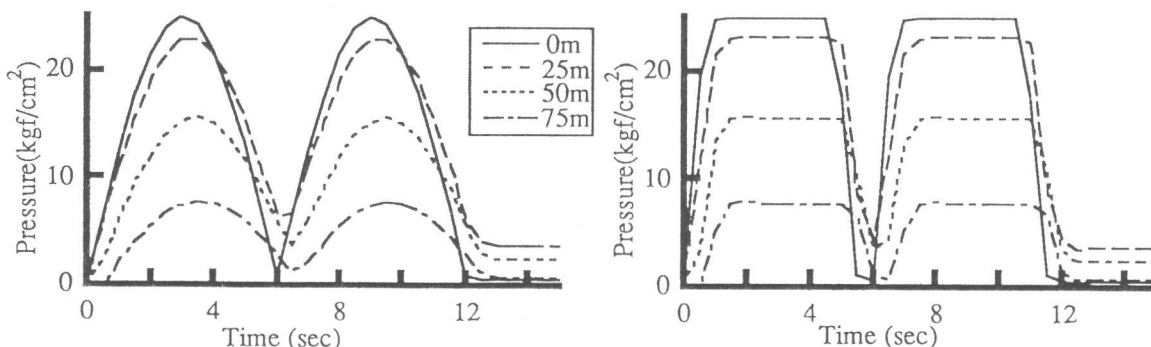


図-6 伝播時間の剛性による影響



(a) 入力波形がサインカーブ波の場合

(b) 入力波形が矩形波の場合

図-7 各位置における圧力の時間変化（入力波形の形状の影響）

図-5は、各位置における最大圧力を粘性別に示したものであり、粘性が大きくなるほど筒元での傾きが大きく、この部分の圧力損失が大きくなっている。図には示していないが、圧力分布は、水平部分および垂直部分にかかわらず、バネ要素の剛性の影響を受けない。

図-6は、バネ要素の剛性と100mの距離における伝播時間の関係を示したものである。ここに伝播時間とは、図-4に併示したように、ポンプの動作がある地点まで伝わるまでの時間である。距離と伝播時間は線形関係にあり、剛性が小さくなるほど、伝播時間が大きく、圧力の伝播の遅れが大きくなる。水平配管と垂直配管では、同一の入力圧における圧送速度（流量）が異なるが、伝播時間は変わらない。

図-7および図-8は、入力波形の形状の違いによる圧力および流量の変化を比較したものである。図-7は、入力波形がサインカーブ（絶対値）と矩形波の場合の比較を図-3(b)の垂直配管について行ったものである。入力波形の違いに拘らず、水平配管の0~25m区間においては圧力損失が少なく、垂直配管の25~75m区間においては圧力損失が大きくなっているが、伝播時間は同じである。図-8は、コンクリートの性状による流量の変化を示したものである。設定した矩形波の1ストローク分のエネルギー（波形の積分値）は、サイン波のエネルギーの1.33倍であり、矩形波およびサイン波における流量の差に関して、どのシリーズもこれと一致する。

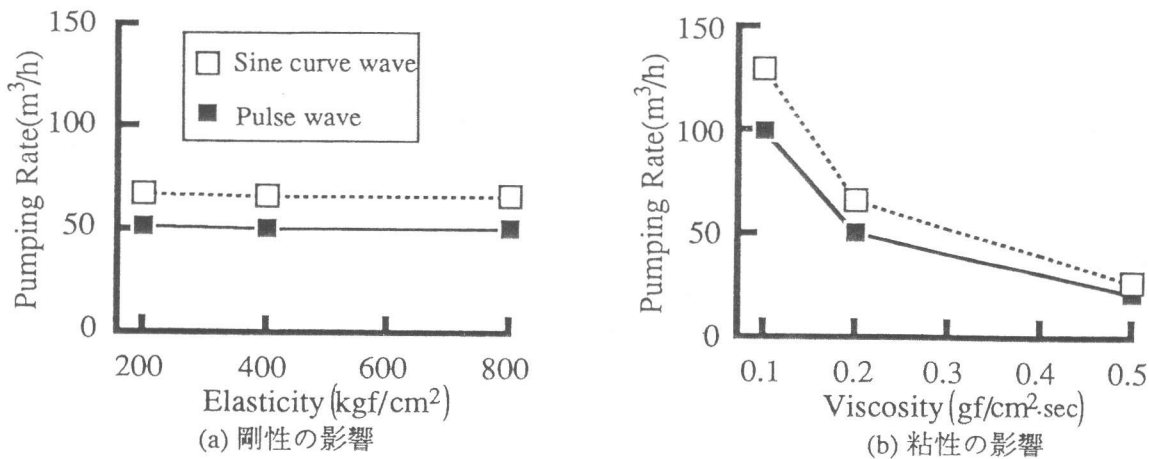


図-8 コンクリートの性状による流量の変化

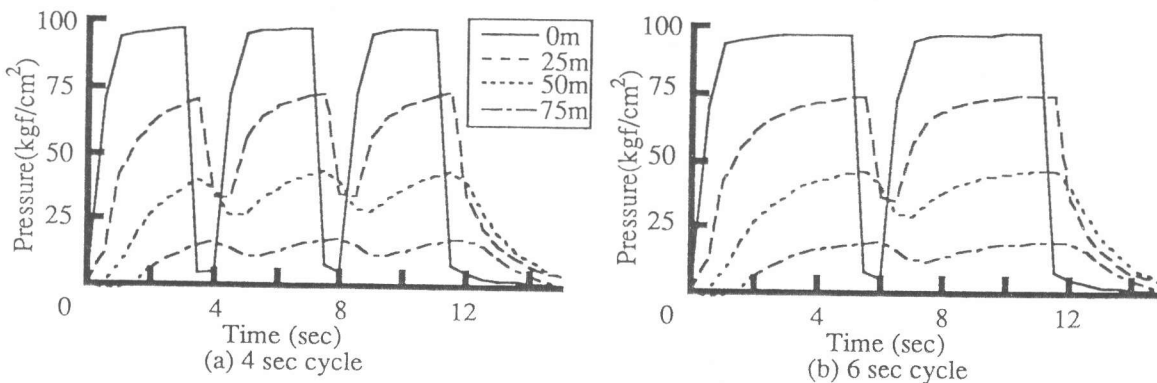


図-9 各位置における圧力の時間変化（入力波形の周期の影響）

本解析の入力値であるバネ要素の剛性については、測定されたデータが現在までに報告されていないが、以上の解析結果より、この値が他の要因の影響を受けないことから、上記の伝播時間を既往のポンプ圧送試験結果と比較して、値を設定することができる。筆者らが入手したデータの範囲では、100mの圧送の場合、伝播時間は約0.3~0.6秒程度であり、本解析におけるバネ剛性は、 $400\sim 800\text{kgf/cm}^2$ 程度に相当する。

図-9は、入力波形の周期を変えた場合の解析結果の一例である。波形の周期が小さくなるほど矩形波のエネルギー減衰量が大きくなる。実験データ[6]によると、同一のコンクリートを圧送する場合、流量を大きくするためには、ポンプ車のヘッド圧力を大きくすると同時に、波形の周期を小さくする必要があるが、この場合、ポンプの効率が落ちることが予測される。

以上の荷重制御の解析では圧送速度を設定することはできず、全体の負荷によって圧送速度が決定されるが、実際の圧送では、圧送速度とコンクリートの性質によって圧力波および最大圧力が決定される。そこで、筒元の変位（速度）を制御して計算を行い、圧送流量を入力として、圧力を求める解析を行った。筒元の変位はピストンの運動を考慮して、図-2(c)に示すように速度が台形波形となるように設定している。解析により得られた圧力の時間変化の一例を図-10に示す。

粘性が小さい場合、ポンプ波形の初期部分に瞬間的に大きなピーク圧力が現れる。また、粘性が大きくなる（つまりコンクリートが高強度・高粘性化する）ほど、この部分がなくなり、最終的には、波形が上に凸のなめらかな曲線となる。この結果は、既往の報告[7]の測定データなどと同じ傾向を示しており、圧送実験時に測定された圧力分布データの整理方法を再考する必要がある。

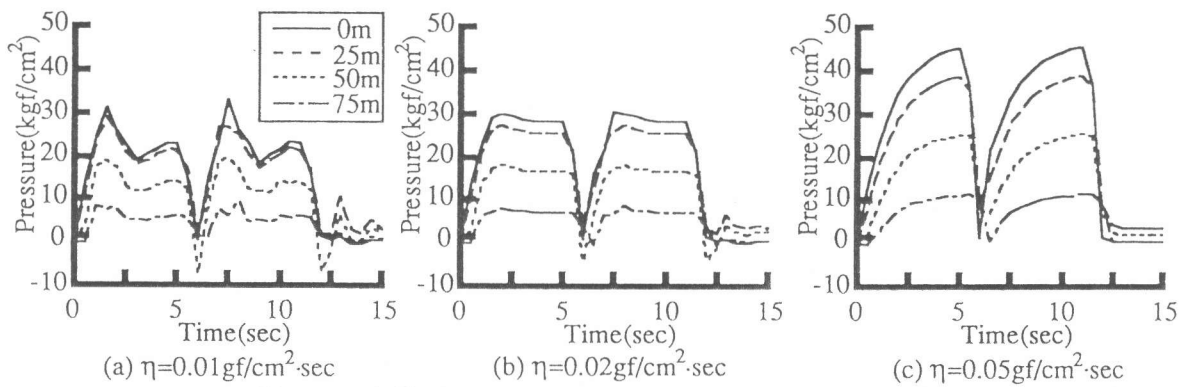


図-10 各位置における圧力の時間変化（粘性の影響）

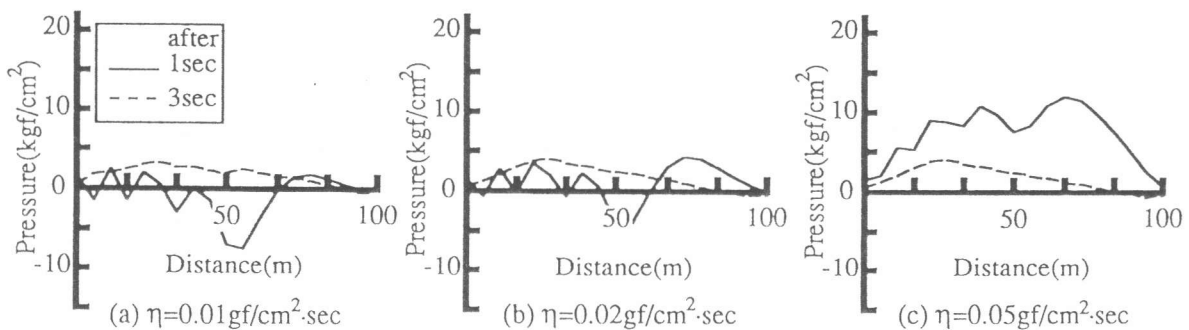


図-11 ポンプ停止後の圧力分布

あることを示唆している。

最後に、図-11は、図-3(b)に示した垂直配管において、圧送中にポンプを停止した直後の圧力分布を示したものである。粘性が大きくなるほど圧力が残留しやすく、逆に粘性が小さい場合は、一時的に管内に負圧がかかる部分が見られる。ポンプ停止直後の残留応力については、これまで全く検討されていないが、施工管理上の一要因としてさらに考察を行う必要があるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートのポンプ圧送を単純なモデルによる動的解析によってシミュレートした。本研究で新たに得た知見は、以下のように要約できる。

- 1) コンクリートの粘性が大きくなるほど筒元部での圧力損失が大きくなる。
- 2) 入力波形が異なっても圧力分布性状には影響を及ぼさない。
- 3) ポンプの波形の周期が小さいほど打設効率が低下する。
- 4) 本解析手法によって、圧力波形のピーク圧の現象を表現することができ、コンクリートの粘性が低いものほどピーク圧は顕著となる。
- 5) 垂直配管の場合、コンクリートの粘性が小さいとき、ポンプ停止直後に一時的に負圧がかかる場所がある。

[謝辞]

本研究費の一部は、平成3年度科研費・奨励研究(A)、同・一般研究(B)、セメント協会研究奨励金および竹中育英会建築研究助成金によった。また、本解析を行うに当たり、黒川善幸氏(名古屋大学助手)および小村理恵さん(名古屋大学大学院生)の助力を得た。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- 1) 日本建築学会編：コンクリートポンプ工法施工指針案，1979.
- 2) 橋本親典：ポンプ圧送による施工の動向，コンクリート工学，Vol.29，No.4，pp.70-75，1991.
- 3) 岸谷孝一・鈴木健夫・渡辺暉生・三原晃一・石井貴和・桑原隆司：地上243mへのコンクリートの圧送，コンクリート工学，Vol.29，No.12，pp.51-61，1991.
- 4) 谷川恭雄・森博嗣・野田豊：フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.203-208，1991.
- 5) 烏田専右・高木隼二・森永繁・高田博尾・成田一徳：コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究，日本建築学会論文報告集，No.177，pp.1-5，1980.
- 6) 高山俊一・出光隆・村田佳斎：高強度コンクリートのポンパピリチーに関する基礎的研究，セメント技術年報，Vol.36，pp.382-385，1982.
- 7) 庄川選男・鈴木忠彦：プラント添加による高強度流動化コンクリートの検討，日本建築学会学術講演梗概集，A，pp.51-52，1986.