

すべりを伴うフレッシュモルタルの管内流動に関する研究

名城大学土木工学科
同 上
名城大学大学院土木工学専攻
名城大学建設システム工学科
東海コンクリート工業（株）

学生員○栗本尚佳
竹花貴宏
学生員 森田篤史
正会員 飯坂武男
稲熊唯史

1. はじめに

フレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定してポンプ圧送性を理論的に検討する際、Buckingham の塑性流動とすべりによる流動を組み合わせる必要があると報告されている。

本研究は、すべりを伴うビンガム流体のポンプ圧送性を定量的に評価することを目的とした。そこでビンガム流体のサンプルとしてフレッシュモルタルを採用してポンプ圧送実験を行い、管内の圧力分布を理論的・実験的に検討した。

2. 理論式

ビンガム流体には降伏値が存在するため管内の流速分布は図-1 のようになり管内のせん断応力が降伏値より小さな部分は、栓流として流動し栓流半径 r_p は、式[1]で表される。よって $r_p \geq R$ においては、全断面において栓流となりすべりのみの流動となる。流量を式[2]に示す。また、管壁に作用するすべり抵抗値は、式[3]で示され、すべり抵抗値 F_s は管壁に接するビンガム流体のせん断応力 τ_R に等しいと考えられるので式[4]とできる。よって式[4]を式[3]に代入し、 v_s を式[2]に代入し、境界条件 $P(0)=0$ として積分すると式[5]が得られる。

したがって、材料物性値として $\eta_{pl} \cdot \tau_y \cdot \alpha \cdot A$ 、施工条件として $R \cdot Q$ を代入することにより、1 次直線の圧力分布が得られる。なお筒先を $x=0$ として x 軸を流動方向に取るため筒先からの距離は負値で表される。

ここに Q :実測流量(m^3/sec), R :管半径(m), η_{pl} :塑性粘度($Pa \cdot sec$), τ_y :降伏値(Pa), v_s :すべり速度(m/sec), dp/dx :圧力損失(Pa/m), F_s :すべり抵抗値(Pa), α :摩擦係数($Pa \cdot sec/m$), A :付着力(Pa), τ_R :管壁に接するせん断応力(Pa)

3. 実験概要

ポンプ圧送は、スクイズ式モルタルポンプ（公称最大吐出圧力：2MPa、管内径：40mm、配管材質：アルミ）を使用し、インバータ電力周波数を変化させることにより平均流量を 4 水準

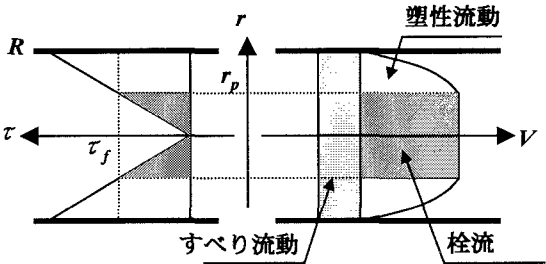


図-1 管内のせん断応力と速度分布

$$r_p = 2\tau_y \frac{1}{\frac{dp}{dx}} \quad [1]$$
$$Q = \begin{cases} \frac{\pi R^4}{8\eta_{pl}} \left(1 - \frac{4r_p}{3R}\right) \frac{dp}{dx} + \pi R^2 v_s & (r_p < R) \\ \pi R^2 v_s & (r_p \geq R) \end{cases} \quad [2]$$
$$F_s = \alpha v_s + A \quad [3]$$
$$F_s = \tau_R = \frac{R}{2} \frac{dp}{dx} \quad [4]$$
$$p(x) = \begin{cases} \frac{8(3A\pi R^2 \eta_{pl} + 3Q\alpha \eta_{pl} + \pi R^3 \alpha \tau_f)}{3\pi R^3 (R\alpha - 4\eta)} x & (r_p < R) \\ \frac{-2(A\pi R^2 + Q\alpha)}{\pi R^3} x & (r_p \geq R) \end{cases} \quad [5]$$

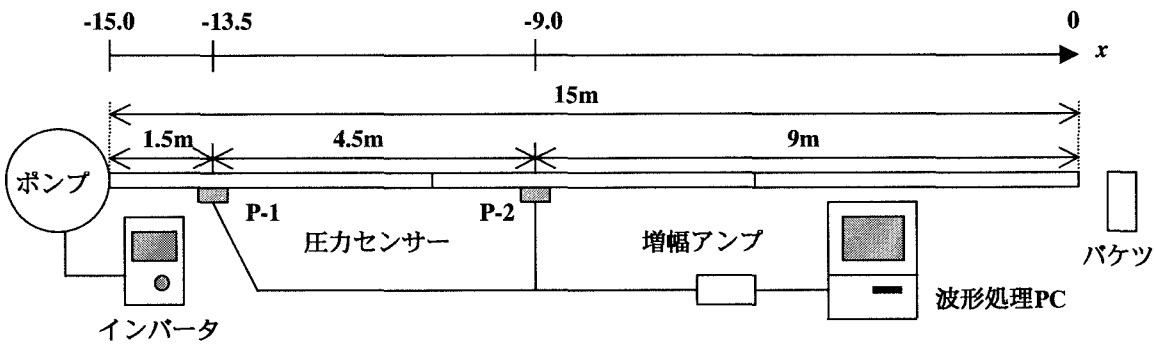


図-2 ポンプ実験装置

変化させ、配管に取り付けた2つの圧力計(P-1,P-2)において圧送圧力を、筒先においては、吐出量の測定を行う。ポンプ実験装置を図-2に示す。また、フレッシュモルタルのレオロジー定数はツーポイントテストにより測定した。レオロジー分布図を図-3に示す。

4. 実験結果および考察

圧力センサによって測定された圧力波形の一例を図-4に示す。いずれのモルタルにおいても圧力波形は、脈動の影響により一定の値ではないが、この波形を平均化して代表値とした。P-1とP-2によって測定された圧力分布を図-5に示す。筒先の圧力を0とすれば圧力は1次直線で近似でき式[5]を表している。

実験により得られた圧力損失を式[1]に代入し栓流半径を求めると、高降伏値領域(約300Pa)のNo.4,5,6においては $r_p \geq R$ となり、すべり流動のみであるが、低降伏値領域(約10~30Pa)においては、 $r_p < R$ でありすべりを伴う塑性流動という結果であった。

管径 R 、実測流量 Q 、レオロジー定数 $\eta_{pl} \cdot \tau_y$ 、圧力損失 dp/dx を式[2]に代入し v_s を、また式[4]に代入し F_s を算出しプロットしたものを図-6に示す。両者は1次の線形関係であり式[3]を表しており、これらの近似直線の傾きが摩擦係数 α であり切片は付着力 A を表している。また、モルタルによってその傾き・切片は異なる値を示しており $\alpha \cdot A$ は、材料特有の物性値であることが確認できた。材料特有の物性値である $\alpha \cdot A$ とレオロジー定数 $\eta_{pl} \cdot \tau_y$ を関連づけるために行った重回帰分析の結果を次式に示す。

$$\alpha = 729.122 \eta_{pl}^{0.2433} \tau_y^{0.0346} \quad [6]$$

$$A = 122.914 \eta_{pl}^{-0.9898} \tau_y^{0.1113} \quad [7]$$

これより、材料特有の物性値である $\alpha \cdot A$ は、レオロジー定数と関係があり、式[6],[7]により算出でき、式[5]に代入することにより圧力分布は Q 、 R 、 η_{pl} 、 τ_y の4つのパラメータによって把握できることが確認できた。

5. 結論

フレッシュモルタルによりポンプ圧送実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) すべり抵抗値は、すべり速度と1次の線形関係にあり、その直線の傾きは摩擦係数、切片は付着力であるが材料によって異なる値となる。
- (2) 摩擦係数と付着力は、レオロジー定数と相関しており式[6],[7]により算出できる。
- (3) ポンプ圧送時における圧力分布は、直線で表せ4つの条件(流量・管径・塑性粘度・降伏値)により予測できる。

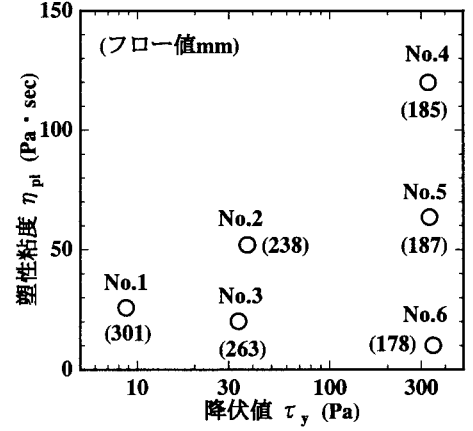


図-3 サンプルのレオロジー特性

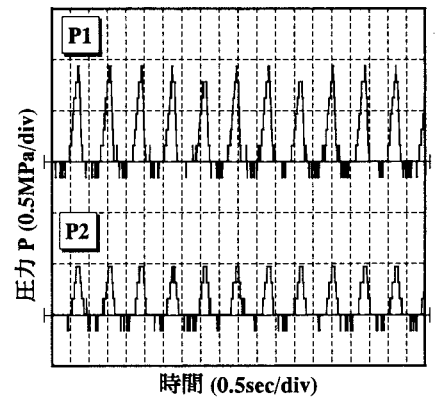


図-4 圧力測定例

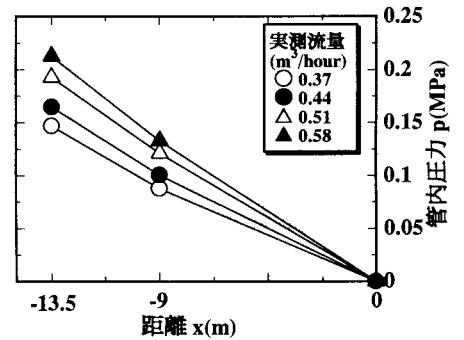


図-5 圧力分布(No.3)

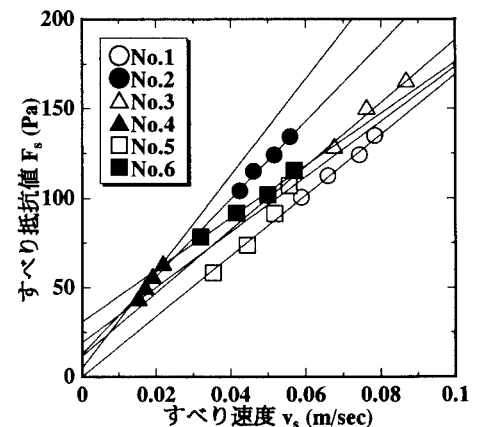


図-6 すべり抵抗値とすべり速度