

早稲田大学理工学部 正員 遠藤郁夫
早稲田大学理工学部 学生員 ○金成英夫

1 緒論

下水汚泥を管路輸送した場合、濃度にもよるが非ニュートン流体として取扱わなければならない場合が多い。このため、汚泥の損失水頭は水の場合と異なっており汚泥の流動特性を考慮しなければならない。本報告では汚泥の濃度と損失水頭について実験的に検討を加えたものである。

円管内の流体の層流流動は一般的に次の式で表わされる。 $\tau = \mu_a \left(-\frac{du}{dr} \right)$ ----- (1), 半径 r の所の流速を u_i とすると $u_i = \frac{\tau_w}{r_w} \int_r^{r_w} \frac{r}{\mu_a} dr$ ----- (2) となる。管内の流量を Q とすると

$Q = \int_0^{r_w} 2\pi r_i u_i dr_i = \frac{\pi \tau_w}{r_w} \int_0^{r_w} \frac{r^2}{\mu_a} dr$ ----- (3) ここで、変数を r から τ に変換し、 $X = Q/\pi r_w^3$ を導入すると(3)式は次のように変形できる。 $X r_w^3 = \int_0^{\tau_w} \frac{\tau^3}{\mu_a} d\tau$ ----- (4) (4)式の両辺を微分して、 $\frac{dX}{d\tau_w} \tau_w^3 + 3X \tau_w^2 = \frac{\tau_w^3}{\mu_a} = \left(-\frac{du}{dr} \right)_w \tau_w^2$ ----- (5), ここで、 $X = Q/\pi r_w^3 = 2V/D^3$ であるので

(5)式は最終的に次のように表わせる。 $\left(-\frac{du}{dr} \right)_w = \frac{3}{4} \left(\frac{8V}{D} \right) + \frac{1}{4} \cdot d \left(\frac{8V}{D} \right) / d(\tau_w)$ ----- (6)

Metzner と Reed はこの式を変形している。すなわち、

$\left(-\frac{du}{dr} \right)_w = \left(\frac{3n'+1}{4n'} \right) \left(\frac{8V}{D} \right)$ ----- (7) ここで、 $n' = d(\ln \frac{8V}{D}) / d(\ln \tau_w)$ ----- (8), (8)式を積分すると $\tau_w = K' \left(\frac{8V}{D} \right)^{n'} = K' \left(\frac{4n'}{3n'+1} \right)^{n'} \left(-\frac{du}{dr} \right)_w^{n'}$ ----- (9) となり擬塑性流体に関する de Waele-Ostwald の式 $\tau_w = K \left(-\frac{du}{dr} \right)^n$ に相当しており、 n' と K' を定数とした場合、次の関係がある。

$n' = n$ ----- (10), $K' = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n$ ----- (11).

次に、Fanning の摩擦係数 f は次の式で定義される。 $f = \left(\frac{D \Delta P}{4L} \right) / \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$ ----- (12), (9)と(12)式を組合せて、ニュートン流体と同様に $f = 16/Re$ とすると広義のレイノルズ数は次式で表わされる。

$Re = \frac{D n' V^{2-n'} \rho}{K' \cdot 8^{n'-1}}$ ----- (13)

ただし、 μ_a : 見掛け粘度, τ_w : 壁面摩擦強度 $\left(= \frac{D \Delta P}{4L} \right)$, r_w : 管の半径, D : 管の直径, ρ : 密度, ΔP : 圧力損失, L : 管長, V : 平均流速。

2 実験方法

汚泥を管路で輸送する場合、汚泥の粘度および流動特性を知る必要がある。本実験ではこれらの特性を求めるために管路内の流れによる方法と回転粘度計

による方法を用いた。管路の実験装置は水槽の高さ 245cm, 助走区間 3m, 圧力損失測定区間 6m, および管径 2.46cm である。回転粘度計は 2 個の同心円筒間に試料を入れ、

外筒をある一定の角速度で回転させた場合に内筒の受けるトルクを測定し粘度を求める方法である。

表-1 は内、外筒の半径およびクリアランスである。内筒表面における速度勾配とせん断応力はそれぞれ次の式で計算した。

表-1 装置定数

組合せ	外筒半径 (cm)	内筒半径 (cm)	クリアランス (cm)
I	1.500	1.250	0.250

$\left(-\frac{dU}{dr}\right)_0 = \frac{4\pi N}{r_0 - 1/5} \left\{ 1 + k_1 \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) + k_2 \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right)^2 \right\} \dots (14), \quad \tau_0 = \frac{T}{2\pi r_0^2 l} \dots (15),$
 ただし、 N : 回転数 (rpm), T : トルク, r_0 : 内筒半径, r_2 : 外筒半径, l : 内筒の長さ. $k_1 = \frac{5^{2/3}}{2.5^{2/3}} (1 + \frac{2}{3} \ln S)$, $k_2 = \frac{5^{2/3}}{0.5^{2/3}} \ln S$, $S = \frac{r_2}{r_0}$, $\alpha = \frac{d(\log T)}{d(\log N)}$, 汚泥は活性汚泥を用いた。

3. 実験結果及び考察

図-1 は Re と f との関係である。層流領域では $f = 16/Re$, 乱流領域では $f = 0.0149 Re^{-0.0828}$ で表わすことができた。また、臨界レイノルズ数は 2,000 とすることができた。図-2 は汚泥濃度 23,936 ppm の場合、回転粘度計のデータから (14), (15) 式で算定した速度勾配とせん断応力の関係である。汚泥の損失水頭は次のようにして算定することかできる。例えば、汚泥濃度 23,936 ppm,

$\rho = 1.00678 \text{ g/cm}^3$, $D = 2.46 \text{ cm}$, $V = 1.0 \text{ m/sec}$ の場合, $\lambda = 4f = 0.035$ (予想), $\tau_0 = \frac{\rho}{8} \lambda V^2 = \frac{1.0067}{8} \times 0.035 \times 100^2 = 43.7 \text{ dyne/cm}^2$, 図-2 の曲線の接線から $n = 0.600$, $k = 1.38$, $n' = n = 0.600$, $K' = K \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n = 1.38 \times \left(\frac{3 \times 0.6 + 1}{4 \times 0.6}\right)^{0.6} = 1.51$, $Re = \frac{D^{n' + 1} V^{2-n'} \rho}{8^{n' + 1} K'} = \frac{2.46^{0.600} \times 100^{1.400} \times 1.0067}{8^{0.400} \times 1.51} = 1,650$

図-1 から $f = 0.00970$, $\lambda = 4f = 0.0381$

同様にして $\tau_0 = 48.5 \text{ dyne/cm}^2$, $Re = 1,680$

$\lambda = 0.0381$, 従って $\lambda = 0.0381$ とすればよい。

損失水頭は 7.90 m/100 m となる。図-3 は損失水頭の計算値と実測値を示したものである。また、汚泥濃度との関係を見ると、汚泥濃度の増加とともに計算値と実測値の誤差は大きくなる傾向にあった。すなわち、0.5~1%, 1~2%, および 2~2.5% の濃度範囲では、誤差はそれぞれ 4.3~9.0%, 6.26~9.85% および 9.87~21.2% であった。

4. 結 論

汚泥を管路と回転粘度計で測定し比較検討を行なった。限られた範囲の実験があるが現在までに得られた結論は下記の如くである。

- 1) Re と f との関係が得られた。層流領域では $f = 16/Re$, 乱流領域では $f = 0.0149 Re^{-0.0828}$ となった。
- 2) 管路と回転粘度計から求めた損失水頭の比較を行なった。計算値は実測値と比較して小さく汚泥濃度が増えるに従ってその差は大きくなることか認められた。汚泥濃度 1~2.5% の範囲で誤差は 20% 以下であった。

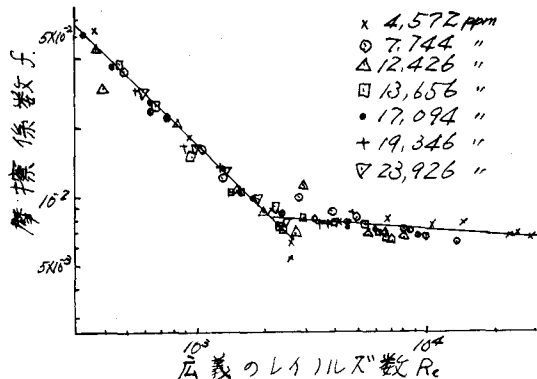


図-1 Re と f との関係

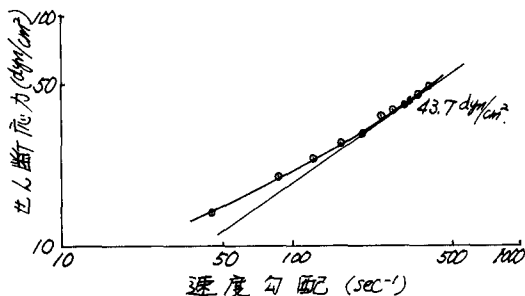


図-2 汚泥の速度勾配とせん断応力との関係

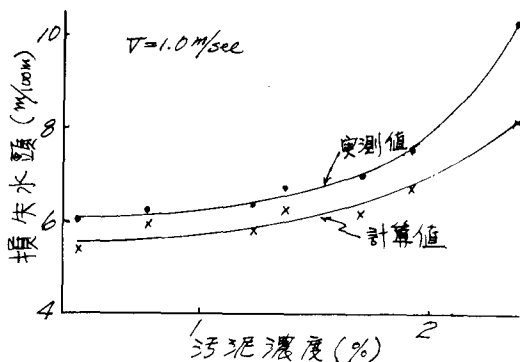


図-3 計算値と実測値の比較