

早稲田大学理工学部

正員 遠藤郁夫

学生員 金成英夫

1. 緒論

下水道の普及に伴って、下水処理場で発生する汚泥は莫大なる量となる。汚泥は各処理場で処理するよりも、1ヶ所に集めて一括処理する方が経済的であり、臭気等の観点から也得策であるとされている。このような場合、汚泥の輸送は管路で行うのが最も良いと考えられる。しかし、汚泥を管路で輸送した場合の摩擦損失水頭は従来、実験的検討は若干行われているが、理論的検討はほとんど行われていない。本報では汚泥の流れを理論的に考察し、実際規模の管路で実験的に検討を加えたものにある。

2. 理論的考察

円管内の汚泥の速度勾配とせん断応力との関係は見掛け粘度を μ_a とすると次のように表わせる。すなわち、

$$\tau = \mu_a \left(-\frac{du}{dr} \right) \quad (1)$$

次に、半径 r_0 の円管内の r におけるせん断応力は、

$$\tau = \frac{r}{r_0} \tau_w \quad (2)$$

ここで、 τ :せん断応力, du/dr :速度勾配, τ_w :壁面摩擦強度

(2)式を(1)式へ代入し積分すると

$$\mu_a = \int_0^u du = \frac{\tau_w}{r_0} \int_r^{r_0} \frac{r \cdot dr}{\mu_a} \quad (3)$$

ここで流量 Q は次のようになる。

$$Q = \int_0^{r_0} 2\pi r u dr = \frac{\pi \tau_w}{r_0} \int_0^{r_0} \frac{r^2 dr}{\mu_a} \quad (4)$$

また、(2)式から

$$r = \frac{r_0}{\tau_w} \tau \quad \text{または} \quad dr = \frac{r_0}{\tau_w} d\tau \quad (5)$$

したがって(4)式は次のように表わす。

$$Q = \frac{\pi r_0^3}{\tau_w^2} \int_0^{\tau_w} \frac{\tau^2 d\tau}{\mu_a} \quad (6)$$

ここで、次の式で示される X を導入すると

$$X = \frac{Q}{\pi r_0^3} \quad (7)$$

(6)式は次のようになる。

$$X \tau_w^3 = \int_0^{\tau_w} \frac{\tau^2 d\tau}{\mu_a} \quad (8)$$

微分して、

$$\frac{dX}{d\tau_w} \tau_w^3 + 3X \tau_w^2 = \frac{\tau_w^2}{\mu_a} \quad (9)$$

3. 実験方法

実験は直径33.8mm、長さ10.600mの管路に直接SL型隔膜圧力計を設置して測定を行った。流量は電磁流量計で測定した。汚泥の粘度は回転粘度計で測定し、速度勾配とせん断応力はKriegerとMaronの式から計算した。すなわち

$$G(\tau_0)/\tau_0 = G_0 [1 + A(F)] \quad (10)$$

$$F_0 = M / 2KR_0^2 \quad (11)$$

ここで、管の直径を D とすると、 $Q = \pi r_0^2 V$, および $X = 2V/D$ であり、これを(9)式へ代入すると

$$\frac{d(2V/D)}{d\tau_w} \tau_w^3 + 3 \left(\frac{2V}{D} \right) \tau_w^2 = \frac{\tau_w^2}{\mu_a} \quad (12)$$

$(2V/\mu_a)_w$ は壁面における速度勾配であるので、(12)式は

$$\left(-\frac{du}{dr} \right)_w = \frac{3}{4} \left(\frac{2V}{D} \right) + \frac{1}{4} \frac{d(2V/D)}{d\tau_w} \tau_w \quad (13)$$

MejnerとReedは(13)式を次のように変形している。

$$\left(-\frac{du}{dr} \right)_w = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{2V}{D} \right) \quad (14)$$

$$\text{ここで } n' = \frac{d(\ln 2V/D)}{d(\ln \tau_w)} \quad (15)$$

n' が一定の場合、(13)式を積分すると

$$\tau_w = k' \left(\frac{2V}{D} \right)^{n'} = k' \left(\frac{4n'}{3n'+1} \right)^{n'} \left(-\frac{du}{dr} \right)_w \quad (16)$$

(16)式は擬塑性流体に関するde-Waale-Ostwaldの式 $\tau = k' (du/dr)^n$ に相当しており、 k', n' は定数とすると次の関係がある。

$$n' = n \quad (17)$$

$$k' = k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (18)$$

Hanningの摩擦係数 $f = \tau_w / (\rho V^2/2)$ を(16)式へ代入すると

$$f = \frac{16 \cdot k' \cdot 8^{n'-1}}{D^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho} \quad (19)$$

ここで、 $f = 16/Re$ とすると、右義のレイリス数 Re は次のようになる。

$$Re = \frac{D^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho}{8^{n'-1} \cdot k'} \quad (20)$$

ρ : 汚泥の密度

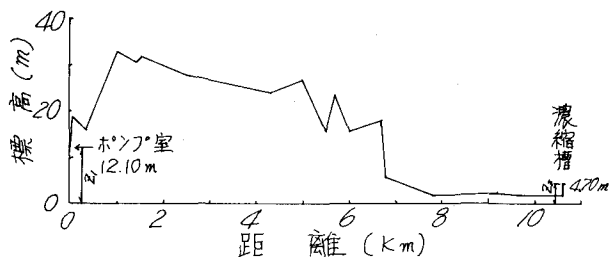


図-1. 管路の縦断面図

ただし, $q_2 = 2R_0/\sqrt{b} (1 - 1/5^2)$

$$\Delta f = f_1 (d \ln q_2 / d \ln R_0) + f_2 (d \ln q_2 / d \ln R_0)$$

$$f_1 = \frac{5^2 - 1}{2.5^2} (1 + \frac{1}{5} \ln 5), f_2 = \frac{5^2 - 1}{2.5^2} \ln 5$$

$G(R_0)$: 速度勾配, R_0 : セン断能力,
 M : トルク, Ω : 角速度, l : 内
 筒の長さ, R_0 : 内筒半径, R_c :
 外筒半径.

4. 実験結果及び考察

実験に使用した送泥管路の縦断

図は図-1に示した。汚泥は口径

200mmのポンプで圧送され、圧力は

ポンプ吐出口で測定した。ポンプ室を

出た所(直径338mmの管路に接

触している。一方、送泥管は汚泥を

直接濃縮槽へ注入している。ポンプ室

と濃縮槽の2段にヘルメットの式を適用する。

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (21)$$

$$h_f = (Z_1 - Z_2) + (P_1 - P_2)/\rho g + (V_1^2 - V_2^2)/2g = 7.40 + 10P + 0.365 V_2^2 \quad (22)$$

ここで、 P は圧力(kg/cm^2), V_2 は直径338mm管内の流速(m/sec)である。さ

らに、摩擦以外の損失は $h_f = 31,600 > 3,000$ であるから無視してもかまわないが、

一応、曲管とポンプ廻りの損失をそれぞれ0.6mおよび0.4mとすると摩擦損失水頭

の算出値は次の式で与えられる。

$$h_f = 6.40 + 10P + 0.365 V_2^2 \quad (23)$$

一方、摩擦損失水頭の計算値は次のように求めることができる。すなわち、図-2は

汚泥の場合の Re と f の関係である。 Re と f の関係は層流領域では $f = 16/Re$ 、乱流

領域では $f = 0.045 Re^{-0.202}$ で表わすことができる(但し、 Re は(18)式で示される)。回

転粘度計で求めた $G(R_0)$ と R_0 の関係から Re と f を求め(図-3)、(45)および(16)

式から h_f を求める。次に(18)式で Re を計算し図-2で f に対応する f を求めDarcy-

Weisbachの式

$$h_f = 4f \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (24)$$

を用いて計算することになる。図-4は上記のようにして計算した摩擦損失水頭の

実測値と計算値を示したものである。ここで、汚泥の流速は

0.9~1.0 m/sec の範囲であり、清水で流速1.0 m/sec の場

合の摩擦損失水頭は21.0mである。図-4に示した計算値と実測

値との差は最大で13%、平均値は5.6%である。ここで、圧力計の読取

誤差を最小値の0.1 kg/cm^2 とすると、これによる実測値の範囲は図-4

に破線で示した。以上を総括すると流速0.9~1.0 m/sec 、濃度8,000~15,000ppmでは計算値と実測値がよく一致することが認められた。

5. 結 論

実際の規模の管路で汚泥濃度8,000~15,000ppm、流速0.9~1.0 m/sec の範囲で実験を行い次のような結論が得られた。

すなわち、回転粘度計から求めた汚泥の摩擦損失水頭の計算値と実測値との差は最大13%、平均値は5.6%であ

り、かなり良く一致することが認められた。

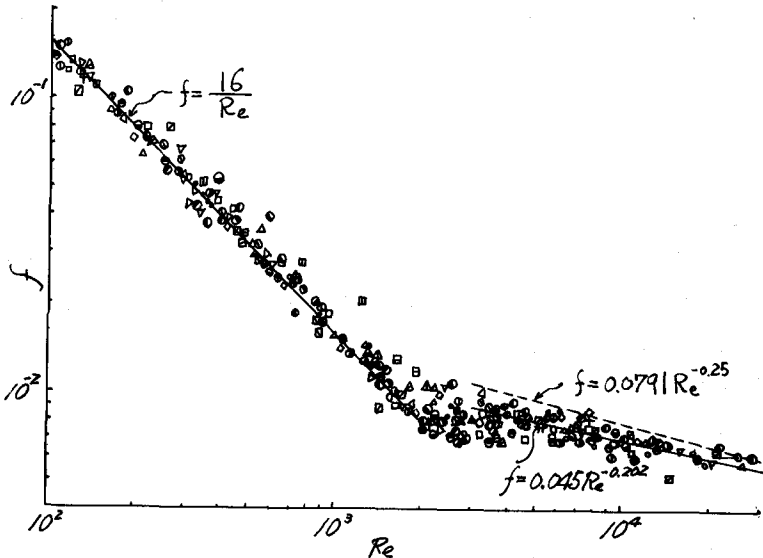


図-2 汚泥の Re と f の関係

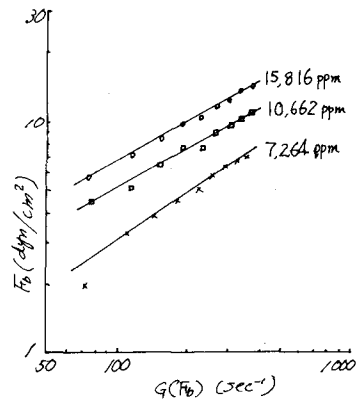


図-3 汚泥の速度勾配とせん断能力

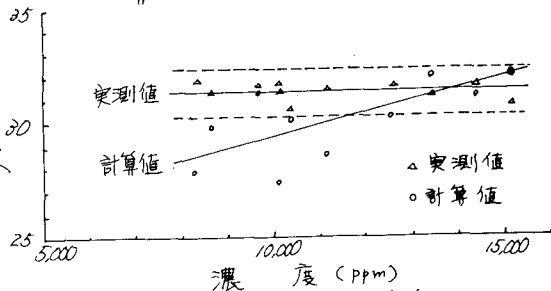


図-4 摩擦損失水頭の実測値と計算値