

II-311 汚泥の管路輸送に関する実験的研究

早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 郁夫
国士舘大学工学部 正会員 金 茂 夫

1. 結 論

下水汚泥を管路輸送する場合の摩擦損失水頭の算定には、管路内の汚泥のレイノルズ数を知る必要がある。本研究は管路の汚泥のレイノルズ数の計算方法について吟味を加え、さらに、汚泥の摩擦損失水頭の計算値と実験値とを比較検討したものである。

2. 汚泥のレイノルズ数

汚泥の管内流動における管壁の速度勾配 $(-du/dr)_w$ は次のように与えることができる。すなわち、

$$\left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \left(\frac{3n+1}{4n'}\right) \left(\frac{8V}{D}\right) \quad (1)$$

ただし、 V : 流速、 D : 管径、 L : 管長、

ΔP : 圧力損失、

$$n' = \frac{d(\ln D \Delta P / 4L)}{d(\ln 8V/D)} \quad (2)$$

(2)式は n' が一定値の場合、積分することが出来る。

$$\frac{D \Delta P}{4L} = R' \left(\frac{8V}{D}\right)^{n'} \quad (3)$$

ただし、 R' : 定数

(1)式へ代入すると、壁面摩擦強度 τ_w は

$$\tau_w = \frac{D \Delta P}{4L} = R' \left(\frac{4n'}{3n+1}\right)^{n'} \left(-\frac{du}{dr}\right)_w^{n'} \quad (4)$$

となり、擬塑性流体に関する式

$$\tau_w = R \left(-\frac{du}{dr}\right)_w^n \quad (5)$$

3. 実験結果および考察

図-1は直径1.5 cmの鋼管を用いて汚泥を輸送したときの管路の汚泥のレイノルズ数 Re_p (8)式と摩擦係数 f との関係を示したものである。これらの関係はそれぞれ、次のように表わすことができた。

層流領域 $Re_p \leq 2,000 \quad f = 16/Re$

過渡領域(I) $Re_p = 2,000 \sim 10,000 \quad f = 0.00779$

過渡領域(II) $Re_p = 10,000 \sim 16,000 \quad f = 1.87 \times 10^{-4} Re_p^{0.404}$

乱流領域 $Re_p \geq 16,000 \quad f = 0.388 Re_p^{-0.390}$

従って、汚泥の摩擦損失水頭の算定には、管路の汚泥のレイノルズ数 Re_p を知ることが肝要である。

ただし、 n : 構造粘度指数、

R : 粘稠度指数、

に相当する。(4)および(5)式から、次の関係が存在する。すなわち

$$n' = n \quad (6)$$

$$R' = R \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \quad (7)$$

この場合、管路の広義のレイノルズ数、すなわち、汚泥のレイノルズ数 Re_p は次式で与えることができる。

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

一方、回転粘度計から求めた汚泥のレイノルズ数 Re_R は次式のようになる。

$$Re_R = \frac{D^n \cdot V^{2-n} \cdot \rho}{8^{n-1} \cdot R \cdot \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n} \quad (9)$$

ただし、 ρ : 汚泥の密度

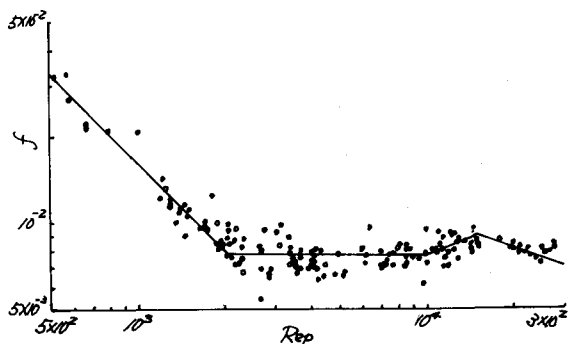


図-1. 汚泥の Re_p と f との関係。

図-2 および図-3 はそれぞれ $TS \leq 12,000 \text{ ppm}$ および $TS > 12,000 \text{ ppm}$ の場合における酸素曝気による余剰汚泥を直径 15 cm の鋼管で輸送したときの管路の汚泥のレイノルズ数 Re_p (8式) と回巻粘度計で求めた汚泥のレイノルズ数 Re_R (9式) との比 α ($= Re_p / Re_R$; レイノルズ数の修正係数) と流速との関係を示したものである。図-4 は標準余剰汚泥 (標準活性汚泥法による余剰汚泥+初次汚泥) の場合の流速と修正係数 α との関係である。修正係数 α は次のように示すことができた。すなわち、

酸素曝気による余剰汚泥 ($VS/TS = 82 \sim 84\%$)

$$TS \leq 12,000 \text{ ppm} \quad \alpha = 0.522 \quad (10)$$

標準偏差 0.0696

$$TS > 12,000 \text{ ppm} \quad \alpha = 0.520 + 1.77 \times 10^{-3} V \quad (11)$$

標準偏差 0.0924, 相関係数 0.685

標準余剰汚泥 ($VS/TS = 60 \sim 70\%$)

$$\alpha = 0.625 + 2.76 \times 10^{-3} V \quad (12)$$

標準偏差 0.0713, 相関係数 0.830

ただし; V (cm/sec)

以上の修正係数を用いることにより, Re_R から Re_p を次式のように求めることが出来る。すなわち、

$$Re_p = \alpha \cdot Re_R \quad (13)$$

〔摩擦損失水頭の計算例〕 $TS: 13,580 \text{ ppm}$ の酸素曝気による余剰汚泥を $D=15 \text{ cm}$ の鋼管で $V=98.7 \text{ cm/sec}$, および $V=153 \text{ cm/sec}$ で輸送するときの摩擦損失水頭を求めよ。ただし, $\eta=0.751$, $k=0.447 \text{ dyn} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$, $\rho=1.00438/\text{cm}^3$ とする。

(1) $V=98.7 \text{ cm/sec}$ の場合, (9)式より

$$Re_R = \frac{15^{0.751} \times 98.7^{2-0.751} \times 1.0043}{8^{0.251-1} \times 0.447 \times \left(\frac{0.751 \times 3 + 1}{4 \times 0.751} \right)^{0.751}} = 8406$$

修正係数は(11)式から

$$\alpha = 0.520 + 1.77 \times 10^{-3} \times 98.7 = 0.695$$

管路の汚泥のレイノルズ数 Re_p は(13)式から

$$Re_p = 0.695 \times 8406 = 5842$$

図-1 から $f=0.00779$ とし, Darcy-Weisbach の式より

$$h_f = 4f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 4 \times 0.00779 \times \frac{100}{0.15} \times \frac{0.987^2}{19.6} = 1.03 \text{ m}$$

(2) $V=153 \text{ cm/sec}$ の場合, 同様にして

$$Re_R = 14523, \quad \alpha = 0.791, \quad Re_p = 11496, \quad f = 0.0087$$

$$h_f = 2.60 \text{ m}/100 \text{ m}$$

これらの場合の実験値はそれぞれ $0.940 \text{ m}/100 \text{ m}$ と $2.80 \text{ m}/100 \text{ m}$ であり, 誤差率 E ($= \{ \text{計算値} - \text{実験値} \} \times 100 / \text{実験値}$) はそれぞれ 9.6% および -2.1% である。

4. 総括および結論

- 1) 汚泥のレイノルズ数の修正係数を明らかにした。
- 2) この計算方法は実験値とかなり良く合うことが認められた。

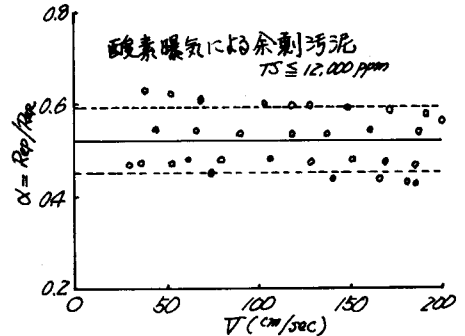


図-2 流速とレイノルズ数の修正係数の関係

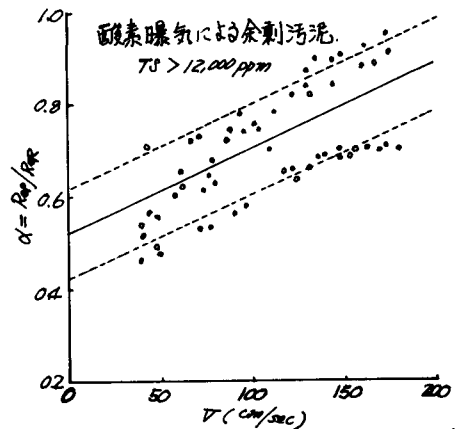


図-3 流速とレイノルズ数の修正係数の関係

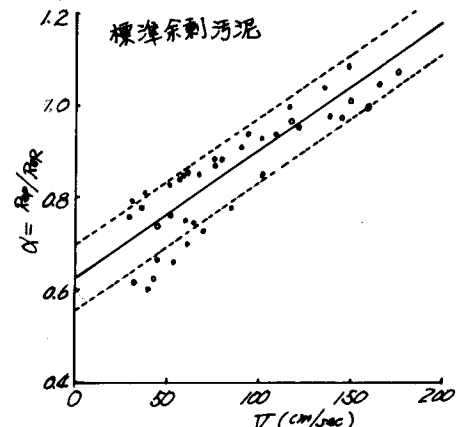


図-4 流速とレイノルズ数の修正係数の関係