

非ニュートン流体としての下水汚泥の摩擦損失係数に関する研究

早稲田大学大学院 学生会員 広野 祐司

早稲田大学理工学部 正 会 員 遠藤 郁夫

1. はじめに

従来における下水汚泥の摩擦損失水頭に関する解析は、粗い管として正方形断面管路に金剛砂（No.24,36,60,120,500）をはりつけたものを用いて行ってきた。今回、粗い管として適当な粗度をもった内ぬき鋼管、すなわち円管を用いて実験を行い、当研究室で算出した一連の式を比較検討した。さらに、粘性底層についての解析を行い、管路の粗滑の判定などを試みた。

表 - 1 摩擦損失係数計算式

2. 実験方法

実験管路は全長 5.5m、圧力測定区間 3m、内径 $D=1.633$ である。相対粗度は $k/D=1.435 \times 10^{-2}$ および管路内をブラシで洗浄することによって粗度を変えた $k/D=2.195 \times 10^{-3}$ の 2 種について実験を行った。圧力測定は汚泥の入り込まないようにしたマノメータで、流速は重量法で測定した。汚泥は〇下水処理場の濃縮汚泥を使用し、濃度は清水から最大濃度 19478 mgTS/l までの各濃度で測定を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 下水汚泥の流動特性 非ニュートン流体としての下水汚泥の層流領域より、下水汚泥濃度 C と構造粘度指数 n および擬塑性粘性係数 $K_p (=k' \cdot 8^{n-1})$ との関係は当研究室の今回の実験により、表 - 1 の式 (1) から (4) が提案されている。図 1 および図 2 に上式を示す直線を描いた。また、凡例に示すように当研究室の既存の実験結果と本研究における実験結果を比較した。両図から分かるように、式

(1) から (4) は、管の形状や粗度の大小に関わらず実験値と一致していることが確認できる。

3.2 粘性底層について

擬塑性流体では、見かけの粘性係数 μ_a を導入することが提案される。

$$\mu_a = 0.2 \rho U^* \delta \quad (9)$$

ここで、 μ_a 、摩擦速度 U^* はそれぞれ

$$\mu_a = \frac{\rho V D}{Re_G} \quad (10)$$

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = V \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (11)$$

式 (10)、(11) を式 (9) に代入すると、

$$\delta = \frac{1414 D}{Re_G} \sqrt{\frac{1}{f}} \quad (12)$$

と表せる。そこで、滑管の式 (5) を用いると、

キーワード：汚泥輸送，汚泥管路輸送，汚泥の処理処分

〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1 TEL 03-3209-3211 (内)3517

下水汚泥の流動特性

(1) 下水汚泥濃度 C と n との関係

ニュートン流体： $C = 2500 \text{ mgTS/l}$ $n=1$ ——— (1)

非ニュートン流体： $C = 2500 \text{ mgTS/l}$ $n=34.4 \times C^{-0.449}$ — (2)

(2) 下水汚泥濃度 C と K_p との関係

$C = 3000 \text{ mgTS/l}$ $K_p = 5.20 \times 10^{-4} \cdot C^{0.499}$ ——— (3)

1000 $C = 3000 \text{ mgTS/l}$ 遷移領域

$C = 3000 \text{ mgTS/l}$ $K_p = 3.06 \times 10^{-9} \cdot C^{1.97}$ ——— (4)

D - M修正式

(1) 滑らかな管

$1/\sqrt{f} = 1.85 \log(Re_G \cdot f^{1-n/2}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636$ ——— (5)

3000 ~ 4000 $C = 15000 \text{ mgTS/l}$

(2) 粗い管

$1/\sqrt{f} = 1.75 - 1.73 \frac{2k}{D}$ ——— (6)

$Re_G = 30000$

(3) 粗滑遷移領域

$1/\sqrt{f} = 1.75 - 1.73 \log \left\{ \frac{23.9 \times 0.99979^C}{(Re_G \cdot f^{1-n/2})^{1.07}} + \frac{2k}{D} \right\}$ — (7)

3000 ~ 4000 $C = 15000 \text{ mgTS/l}$

粘性底層の算定式

$\frac{f \hat{A}}{D} = \frac{14.14}{Re_G} (1.85 \log(Re_G \cdot f^{1-n/2}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636)$ — (8)

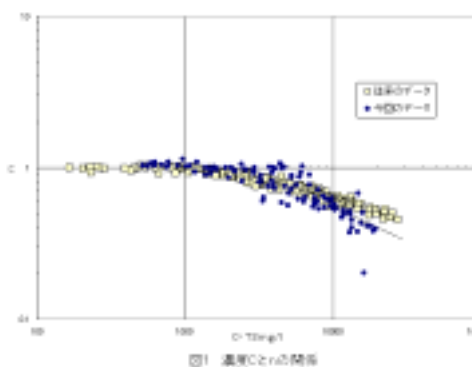


図1 濃度Cとnの関係

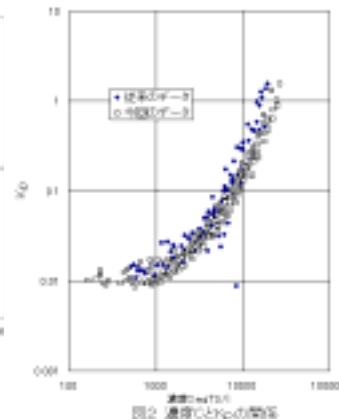


図2 濃度CとKpの関係

$$\frac{\delta}{D} = \frac{14.14}{Re_G} \left(1.85 \log \left(Re_G \cdot f^{1-n/2} \right) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \right) \quad - (13)$$

また、式(13)において、相対粘性底層厚さ δ/D に相対粗度 k/D を代入すると、粗滑領域の限界レイノルズ数 $(Re_G)_k$ を求めることができる。すなわち

$$(Re_G)_k = 14.14 \frac{D}{k} \left(1.85 \log \left((Re_G)_k \cdot f^{1-n/2} \right) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \right) \quad - (14)$$

3.3 摩擦損失係数 f の算定

(1) $k/D=1.435 \times 10^{-2}$ の管について

実験管路の摩擦損失係数を算定するにあたって、管路の粗滑を判定する。まず、式(13)より相対粘性底層の厚さが求まる。この値を管の相対粗度 k/D と大小を比較することによって、水理学的に粗であるか滑であるかが決定できる。図3に濃度 $C=4000, 15000 \text{ TSmg/l}$ における相対粘性底層の曲線と相対粗度 $k/D=1.435 \times 10^{-2}$ を図示した。例として $C=4000 \text{ mgTS/l}$ の場合を考える。このとき、粗滑領域の限界レイノルズ数 $(Re_G)_k = 4900$ である。 $(Re_G)_k = 4900$ では相対粘性底層の厚さが相対粗度を上回っており、管は水理学的に滑である。 $(Re_G)_k = 4900$ では、相対粗度が相対粘性底層の厚さを上回るため、水理学的に粗である。今回、 $(Re_G)_k = 4900 \sim 6500$ となっている。したがって、 $(Re_G)_k = 6500$ では全ての濃度に対して水理学的に粗であり、摩擦損失係数 f を算定するにあたって、粗滑遷移領域式(7)を適用できる、と考えられた。

実測値 f と式(7)による計算値 f の比較を図4に示す。よく一致していることが確かめられる。

(2) $k/D=2.195 \times 10^{-3}$ の管について

図3に濃度 $C=4000, 15000 \text{ TSmg/l}$ における相対粘性底層の厚さと相対粗度 $k/D=2.195 \times 10^{-3}$ を示した。 $(Re_G)_k = 43000 \sim 52000$ となっている。 $(Re_G)_k = 43000$ では全ての濃度に対して、相対粘性底層の厚さが相対粗度を上回り水理学的に滑として扱うことができる。今回の実験におけるレイノルズ数の最大値 $Re_{\max}=40000$ である。したがって、滑管の式(5)を用いて摩擦損失係数 f を算定できる、と考えられた。

実測値と式(5)による計算値 f の比較すると、計算値が実測値を20～40%下回っていることが認められた。そこで、粗滑遷移領域式(7)を適用できるものと仮定して f を計算すると、図4のように一致していることがわかる。

したがって、実際には粘性底層の厚さは図4に示した値より小さいのではないかと考えられた。

4. 総括および結論

濃度 C と n の関係式(1)、(2)および濃度 C と K_p の関係式(3)、(4)を導き出した。

式(1)、(2)、(3)、(4)および既存の式(7)によって計算した f と粗い円管(内ぬき鋼管)において測定した f とがよく一致していることが認められた。が、相対粘性底層の厚さの算定式(8)についての考察が必要と考えられた。

