

VII-189

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

早稲田大学理工学部 学生会員 山地 将人

早稲田大学理工学部 正 会 員 遠藤 郁夫

1. はじめに 下水汚泥は広い濃度範囲において擬塑性流体の挙動を示すことが一連の研究によって明らかになっている。下水汚泥は多量のSSおよび夾雑物を含んでいるが、これらを取り除くと実際の汚泥とはかなり違った流動特性を示すようになる。そこで実験管路に直接汚泥を流し、層流領域より管内流動における流体構造粘度指数 n および K_p について検討した。その際、当研究室で従来行っていない、粗い円管を用いることによって、管の形状が下水汚泥の流動特性に及ぼす影響を考察し、摩擦損失水頭を計算した。また、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。

2. 実験方法 実験管路は、全長 5 m、圧力測定区間 3 m のものを用いた。また、管の内径は $D=1.633$ cm、相対粗度は $k/D=0.01809$ である。使用汚泥としては、O 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 18783 mgTS/l までの各濃度で測定を行った。圧力測定は汚泥が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。

3. 実験結果と考察

3.1 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 $K_p (=k' \cdot 8^{n-1})$ との関係は当研究室の従来の実験により、式(1)から(5)が提案されている。図-1、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(5)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。

$$\mu_a = 0.2 \rho U^* \delta \quad (10)$$

ここで、 μ_a 、摩擦速度 U^* はそれぞれ

$$\mu_a = \frac{\rho V D}{Re_G} \quad (11),$$

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = V \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (12)$$

式(11)、(12)を式(10)に代入すると

$$\delta = \frac{14.14 D}{Re_G} \sqrt{\frac{1}{f}} \quad (13)$$

と表せる。そこで、滑管の式(6)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

表-1 摩擦損失係数計算式

下水汚泥の流動特性

(1) 下水汚泥濃度 C と n との関係

$$\text{ニュートン流体: } C \leq 1500 \text{ mgTS/l} \quad n=1 \quad (1)$$

$$\text{非ニュートン流体: } C \geq 1500 \text{ mgTS/l} \quad n=7.15 \times C^{0.270} \quad (2)$$

(2) 下水汚泥濃度 C と K_p との関係

$$C \leq 1500 \text{ mgTS/l} \quad K_p=0.01 \quad (3)$$

$$C=1500 \sim 2500 \text{ mgTS/l, 遷移領域} \quad (4)$$

$$C \geq 2500 \text{ mgTS/l} \quad K_p=2.49 \times 10^{-8} \cdot C^{1.72} \quad (5)$$

D-M 修正式

(1) 滑らかな管

$$1/\sqrt{f}=1.85 \log(Re_G \cdot f^{0.25}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \quad (6)$$

$$3000 \sim 4000 \leq C \leq 15000 \text{ mgTS/l}$$

(2) 粗い管

$$1/\sqrt{f}=1.75 - 1.73 \frac{2k}{D} \quad (7)$$

$$Re_G \geq 30000$$

$$Re_G \geq 30000$$

(3) 粗滑遷移領域

$$1/\sqrt{f}=1.75 - 1.73 \log \left\{ \frac{23.9 \times 0.99979^C}{(Re_G \cdot f^{1-n/2})^{1.07}} + \frac{2k}{D} \right\} \quad (8)$$

$$3000 \sim 4000 \leq C \leq 15000 \text{ mgTS/l}$$

粘性底層の算定式

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

— (9)

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

また、式(14)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

$$(Re_G)_k = 14.14 \frac{D}{k} \left(1.85 \log((Re_G)_k \cdot f^{1-n/2}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \right) \quad - (15)$$

3.3 管の粗滑の判定

実験管路の摩擦損失係数を算定するにあたって、使用管路を粗管として扱うか、滑管として扱うかを判定する。まず、式(14)より粘性底層の相対的厚さが求まる。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。各濃度での粘性底層の曲線から、管の相対粗度との比較をした。例として濃度 $C=5911\text{mgTS/l}$ の場合、実験管路の相対粗度は $k/D=0.0182$ であるから、 $(Re_G)_k=4100$ 以下のレイノルズ数では粘性底層の厚さが相対粗度の大きさを上回っており、管は水理学的に滑である。そして、レイノルズ数が、 $(Re_G)_k=4100$ 以上となると、相対粗度の大きさ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。本研究での実験使用管路について検討すると、 $(Re_G)_k$ は 3800～5800 程度の範囲になっている。摩擦損失係数 f は $Re_G=6000$ 以上では粗滑遷移領域式を適用できるものと考えられた。

3.4 摩擦損失係数の算定

相対粘性底層厚さと相対粗度の比較から、本研究で用いた管路は、すべての濃度で粗滑遷移領域を用いることができると判定できた。式(8)によって計算した f と実測の f の値を図-4に示す。

4. 総括および結論

本研究では下水汚泥濃度 300～20000mgTS/l、レイノルズ数 30000 以下の範囲について実験を行い、摩擦損失係数に関する解析的研究を行った。摩擦損失係数の計算に際して、粘性底層式(14)を誘導した。また、汚泥の輸送管路の粗滑を水理学的に明らかにすることによって摩擦損失係数の計算を合理的に算定できることを示した。

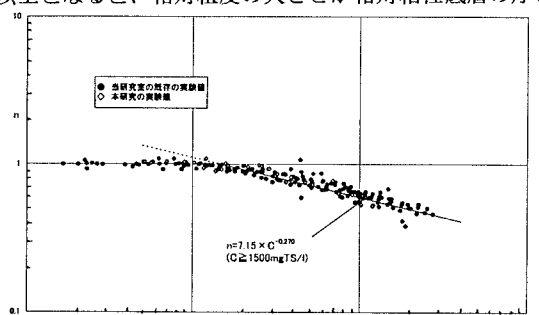


図-1 濃度 C と n の関係

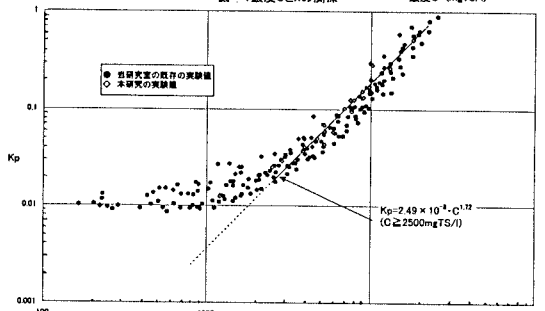


図-2 濃度 C と Kp の関係

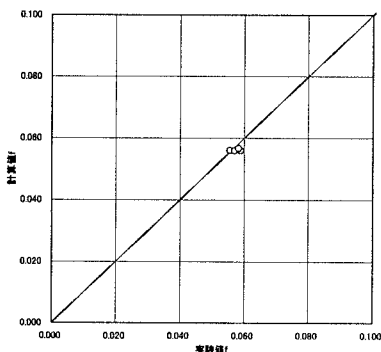


図-4 実測値と計算値 f の比較

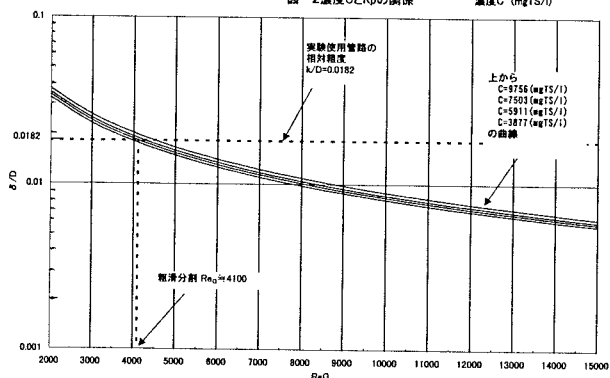


図-5 濃度での Re_G と相対粘性底層の曲線