

II-449 下水汚泥の摩擦損失係数に関する実験的研究

早稲田大学理工学部 ○ 学生員 小林 啓二
 早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 郁夫
 国土館大学工学部 正会員 金成 英夫

1. 緒論 下水汚泥の輸送管路の設計に際して、摩擦損失を知るの重要なことである。管路が滑らかな場合、清水の摩擦損失係数はレイノルズ数のみの関数で表わせる。著者は、下水汚泥および上水汚泥の場合についても、実験的な検討結果をもとに滑らかな管の摩擦損失係数は広義のレイノルズ数のみの関数で表わされることを示した。しかし、管壁に粗さをもつ管路で下水汚泥を輸送した場合の摩擦損失係数については、ほとんど検討されていないのが現状である。そこで、本研究は管壁に粗さをもつ管路で下水汚泥を輸送した場合の摩擦損失係数について実験的に検討を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法 汚泥の摩擦損失水頭の測定に用いた管路は、管径2.00cmおよび長さ4.0mの塩化ビニール管で、圧力損失水頭測定区間は2.0mである。管壁の粗度は、滑らかな管、相対粗度の小さな管(粗小管)中程度の管(粗中管)および大きな管(粗大管)の4種類とした。損失水頭はマンメーターで、流速は重量法で求めた。実験に使用した汚泥は、下水処理場(活性汚泥法)の余剰汚泥($VSS = 80 \sim 85\%$)を使用した。

3. 実験結果と考察 実験管路の相対粗度は乱流領域($Re \geq 4000$)における Re 数と λ との関係からColebrook-Whiteの式で求めた。その結果管路の相対粗度($\%/D$) λ は0.0055(粗小管)、0.018(粗中管)および0.039(粗大管)となった。

下水汚泥は濃度の高い場合、擬塑性流体として取り扱う必要がある。層流領域における擬塑性流体の管内流動は(1)式で表わせる。すなわち、

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4L} = k' \left(\frac{8V}{D} \right)^{n'} \quad (1)$$

D : 管径, ΔP : 圧力損失, L : 管長, V : 流速, n' : 構造粘度指数, k' : 流体粘度指数

この場合、管内流動における広義のレイノルズ数 Re_g は(2)式となる。

$$Re_g = \frac{D^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho}{k'} \quad (2)$$

$k' = 8^{n'-1} \cdot \mu'$, ρ : 密度

また、摩擦損失係数 λ はDarcy-Weisbachの式を変形した(3)式で求めることができる。

$$\lambda = \frac{2g \cdot D \cdot h_L}{L \cdot V^2} \quad (3)$$

h_L : 損失水頭, g : 重力加速度

図-1、図-2および図-3はそれぞれ粗小管、粗中管および粗大管に下水汚泥を流した場合の Re_g と λ との関係を示したものである。いずれの相対粗度の場合とも、 $Re_g \leq 2000$ の層流領域では Re_g と λ との関係は $\lambda = 64/Re_g$ で表わせる。一方、 $Re_g \geq 4000$ の乱流領域では λ は清水の場合と同様に、相対粗度($\%/D$) λ とともに大きくなっているのが認められる。粗小管($\%/D$) $\lambda = 0.0055$ では、図-1に示すように、汚泥濃度が10,000mg/l程度以上では、 Re_g と λ との関係は、ほぼ

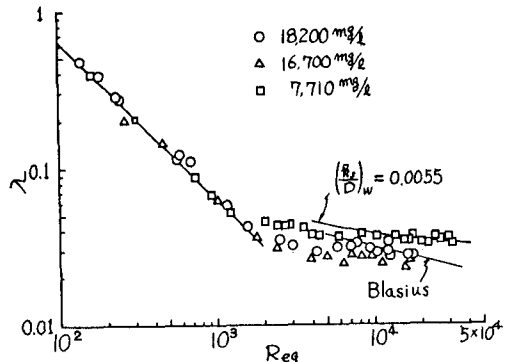


図-1 下水汚泥の Re_g と λ との関係(粗小管)

Blasiusの式で表わすこともできる。しかし、 Re_{eq} 数がかなり大きくなれば、 Re_{eq} と λ との関係は Colebrook-White の式に一致するものとも考えられる。一方、汚泥濃度 $10,000 \text{ mg/l}$ 以下では、Colebrook-White の式で相対粗度 0.0055 として求めた Re_{eq} と λ との関係と良く一致している。したがって、相対粗度 0.0055 以下では、下水汚泥の摩擦損失係数は、汚泥濃度 $10,000 \text{ mg/l}$ 以下の場合、Colebrook-White の式で、一方、 $10,000 \text{ mg/l}$ 以上では Blasius の式で求めることができる。粗中管 ($(R_s/D)_w = 0.018$) の場合、図-2 に示すように、汚泥濃度 7700 mg/l 以下では、 λ は Colebrook-White の式より大きくなり、濃度 16000 mg/l 以上では、 Re_{eq} が大きくなると λ は相対粗度 0.018 とした曲線に良く合うことが認められる。そこで、下水汚泥の場合の相対粗度 $(R_s/D)_s$ と清水のそれ $(R_s/D)_w$ との比 α を求め、図-3 に示した。 $(R_s/D)_w = 0.024$ の場合、汚泥濃度とともに α は小さくなり、濃度 $10,000 \text{ mg/l}$ 程度以上では $\alpha = 1$ となっている。また $(R_s/D)_w = 0.018$ においても同様の傾向が見られることから、汚泥濃度が低い場合には、汚泥粒子と水とが管壁の凹凸の影響を受け、乱流状態の中で別々の運動をするため、 λ が大きくなるものと考えられる。一方、濃度が高くなるにしたがって汚泥粒子と水とが一体となり、乱流状態を形成するため、 λ は Colebrook-White の式に良く合うものと考えられる。このことは、図-4 に示したベントナイトの Re_{eq} と λ との関係からも推察できる。すなわち、ベントナイトは粒径が小さいため、濃度にかかわらず水と粒子は一体となり、乱流状態を形成していることから、 λ は Colebrook-White の式に良く一致したものと考えられる。したがって、粗中管程度の管路の λ は次の式で求めることができる。

$$\frac{1}{\lambda} = -2.0 \log \left(\frac{\alpha (R_s/D)_w}{3.7} + \frac{2.52}{Re_{eq}/\lambda} \right) \quad (4)$$

適用範囲: $0.0055 < (R_s/D)_w < 0.039$ 汚泥濃度 $10,000 \text{ mg/l}$ 以下

図-5は粗大管 ($(R_s/D)_w = 0.039$) の場合の Re_{eq} と λ との関係を示したものである。 Re_{eq} と λ との関係は相対粗度 0.039 とした場合の曲線に良く合うことが認められる。これは、汚泥粒子が管壁の大きな凹凸の影響を受け、水と一体となり、乱流状態を形成しているためであると考えられる。

4. 結論

- (1) 相対粗度が 0.0055 以下および 0.039 以上の管路では、摩擦損失係数は、Colebrook-White の式で求めることができる。
- (2) 相対粗度が 0.0055 から 0.039 の範囲では、汚泥濃度を加味して Colebrook-White の式で求めることができる。

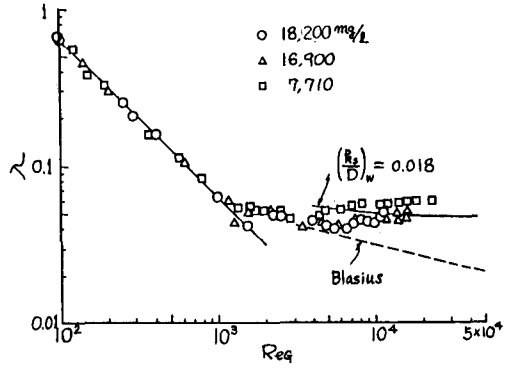


図-2. 下水汚泥の Re_{eq} と λ との関係 (粗中管)

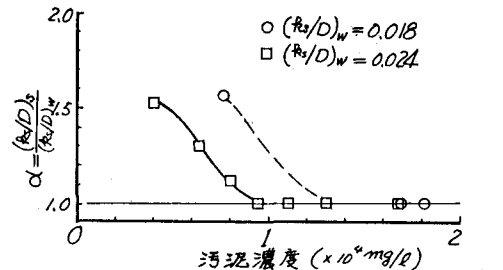


図-3. 下水汚泥の濃度と α との関係 (粗中管)

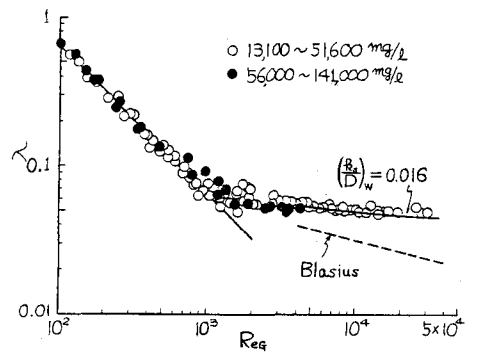


図-4. ベントナイトの Re_{eq} と λ との関係 ($(R_s/D)_w = 0.016$)

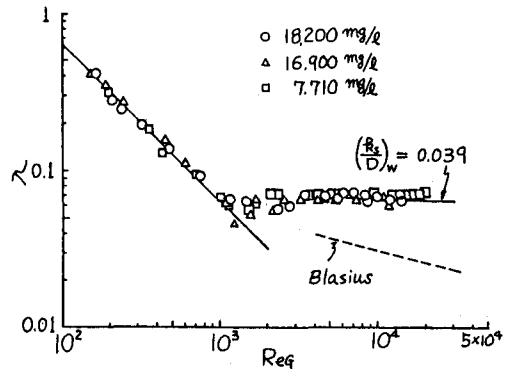


図-5. 下水汚泥の Re_{eq} と λ との関係 (粗大管)