

早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
日本大学生産工学部 正会員 永田伸之
国土院大学工学部 正会員 ○金成英夫

1. 結 論 下水汚泥の管路輸送の設計に際して、摩擦損失水頭を知ることは最も大切なことである。清水の場合、摩擦損失係数は $\lambda = f(\nu, D, \rho, \mu, k_s, \epsilon', m)$ の関数で表わされ、滑らかな管の場合、 $k_s = \epsilon' = m = 0$ となり、摩擦損失係数は次のように、 $\lambda = f(D, \nu, \rho, \mu) = f(D\nu\rho/\mu)$ とレイノルズ数のみの関数で表わされる。著者らは、滑らかな管路および相対粗度 $(k_s/D) = 0.0050$ の管路における下水汚泥の摩擦損失係数について、実験的に検討を加え、滑らかな管では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すでに報告している。そこで、本研究は相対粗度の大きい管路を用いて、下水汚泥の摩擦損失係数に及ぼす粗度の影響について、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 実験管路は管径 2.00 cm および長さ 4.0 m の塩化ビニール管で、管壁の粗度は、滑らかな管（滑管）、相対粗度の小さい管（粗小管）および大きい管（粗大管）の3本の管路を用いた。損失水頭はマノメーターで、流速は重量法から求めた。下水汚泥は下水処理場（活性汚泥法）の余剰汚泥（VS/TS = 80~83%）を使用した。

3. 実験結果と考察 下水汚泥の管路輸送の実験の前に、実験管路に清水を流し、乱流領域において、Colebrook-White の式を用いて、粗小管および粗大管の相対粗度 $(k_s/D)_w$ を求めた。その結果、粗小管では 0.0047 および粗大管では 0.024 となった。

下水汚泥は濃度 4000 mg/l 以上では、擬塑性液体として取り扱うことができ、その管内流動は(1)式で表わされる。すなわち、

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

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

さらに、管内流動における広義のレイノルズ数 Re は

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

となる。一方、摩擦損失係数は Darcy-Weisbach の式より、

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

h_L : 管長 L の損失水頭, ρ : 密度.

で求めることができる。

図1、図2および図3はそれぞれ、滑管、粗小管および粗大管の Re と λ との関係を示したものである。いずれの管の場合と

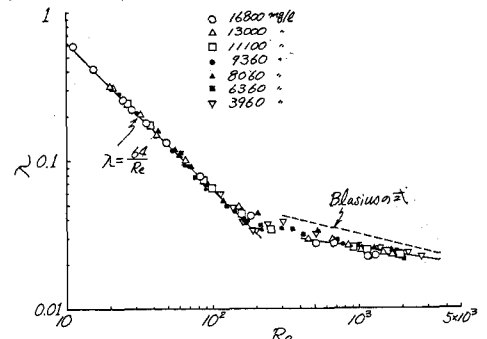


図1. 下水汚泥の Re と λ との関係 (滑管)

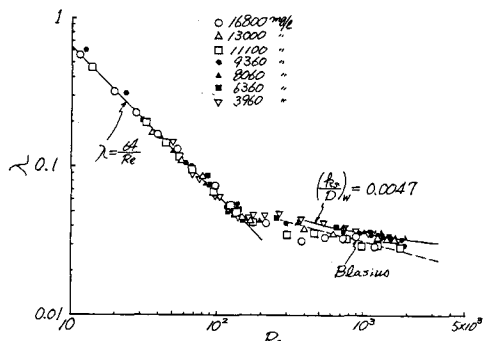


図2. 下水汚泥の Re と λ との関係 (粗小管)

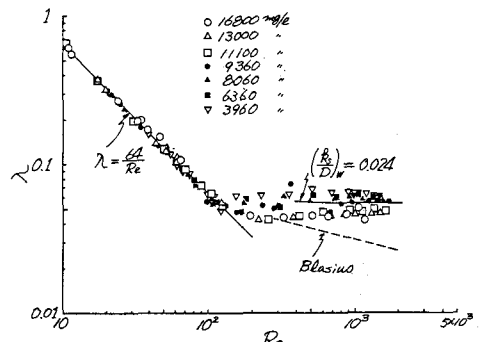


図3. 下水汚泥の Re と λ との関係 (粗大管)

も、層流領域 ($Re \leq 2000$) では、 $\lambda = 64/Re$ の関係で表わせる。一方、乱流領域 ($Re \geq 4000$) では、滑管の場合、 λ は汚泥濃度に関係なく、 Re 数のみの関数で表わせるのに対して、粗管の場合、図2および図3から、汚泥濃度が高くなるにしたがって、 λ は小さくなっていくのが認められる。このような現象はバントナイトスラリー (濃度 55,000 ~ 143,000 mg/l) では見られず、大きく異なっている。バントナイトスラリーの場合、粒子が非常に小さく、水と一体となり、真溶液状態となって流れているため、 Re と λ の関係は Colebrook-White の式に良く一致したものと考えられる。一方、下水汚泥では、粒子が大きくなり、濃度の高い場合、粘度が大きくなり、汚泥中の粒子は壁面の凹凸を覆うような状態で流れるため、 λ は粗度の影響を受けにくくなる。対して、濃度が低い場合、粘度は小さく、汚泥中の粒子が乱れやすくなり、壁面の凸部に粒子が衝突し、エネルギー損失が増えるため、 λ が大きくなったものと考えられる。さらに、粗小管の場合、図2から、汚泥濃度 10,000 mg/l 以上では、 λ は Blasius の式にかなり良く一致しているのが認められる。このことは、相対粗度 0.0047 以下で、汚泥濃度 10,000 mg/l 以上では、 λ は Re 数のみの関数となり、Blasius の式を用いて求めることができることを示している。

したがって、バントナイトのような微粒子のスラリーの場合、 Re 数と相対粗度 $(R_s/D)_w$ から、Colebrook-White の式で直接 λ を求めることができる。しかし、下水汚泥のように、粒子が比較的大きい場合、 λ は Re 数と相対粗度 $(R_s/D)_w$ のみの関数ではなく、汚泥濃度の影響も受ける。そこで、粗小管に下水汚泥を流した場合の相対粗度 $(R_s/D)_s$ と清水の場合の $(R_s/D)_w$ との比

$$K = \frac{(R_s/D)_s}{(R_s/D)_w} \quad (4)$$

を求め、汚泥濃度との関係を図4に示した。この関係は次の式で表わせる。すなわち

$$K = 2.27 \times 10^{-4.15 \times 10^{-5} C} \quad (5)$$

C : 汚泥濃度 (mg/l)

以上の検討結果から、相対粗度を考慮した下水汚泥の λ は次の式で求めることができる。すなわち、

層流領域 ($Re \leq 2000$)

$$\lambda = 64/Re \quad (6)$$

乱流領域 ($Re \geq 4000$)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \lg \left(\frac{(R_s/D)_s}{3.7} + \frac{2.52}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (7)$$

ここで、 $(R_s/D)_s = K \cdot (R_s/D)_w$

4. 結 論 下水汚泥の管路輸送における摩擦損失係数について、実験的に検討した結果、次の結論を得た。すなわち、

(1) 相対粗度 0.0047 以下、汚泥濃度 10,000 mg/l 以上では、摩擦損失係数は Blasius の式で求めることができる。

(2) 乱流領域の摩擦損失係数は汚泥濃度が高くなるにしたがって小さくなる。

(3) 汚泥濃度を加味した摩擦損失係数の計算法を示した。

最後に、早大・大学院生岩崎孝道君の労に感謝します。

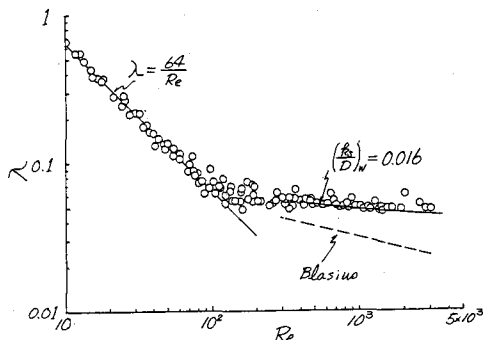


図4. バントナイトの Re と λ の関係 (粗小管)

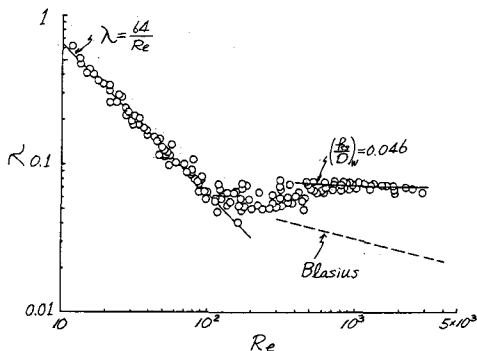


図5. バントナイトの Re と λ の関係 (粗大管)

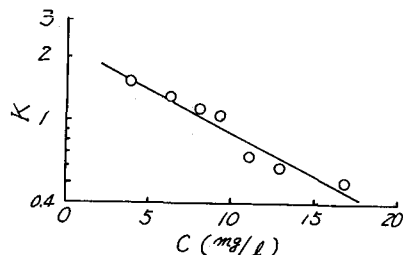


図6. 汚泥濃度と K との関係