

II-190

下水汚泥の摩擦損失係数に関する実験的研究

国士舘大学工学部
早稲田大学理工学部
日本大学生産工学部

正会員 ○金成英夫
正会員 遠藤郁夫
正会員 永田伸之

1. 緒 論

泥漿の摩擦損失係数は、それを構成している粒子が微細な場合は、Colebrook-Whiteの式で広義のレイノルズ数を用いて求めることができるが、下水汚泥のような粗大粒子や繊維状物質を含む泥漿の摩擦損失係数は、微細な粒子のみを含む泥漿の場合と異なることを著者らがすでに明らかにしている。本研究は、滑らかな管と人工的に粗さを付けた粗い管に下水汚泥を流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結果を報告するものである。

2. 実験装置及び実験方法

実験管路は塩化ビニール製で全長が4.0m、助走区間1.5m、圧力測定区間は2.0mである。この実験管路の内面に金剛砂を均一に張り付け人工的に粗度をつけた。実験管路の1辺の長さ、および、相対粗度を表-1に示す。圧力測定区間は2.0mで、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流量から求めた。S下水処理場の混合汚泥を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 滑らかな管

下水汚泥は非ニュートン流体であり、特に擬塑性流体の挙動を示す。擬塑性流体の管内流動における圧力損失 ΔP と流速 V との間には、層流領域では次の関係がある。

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

D ：相当直径、 L ：管長、 n' ：構造粘度指数、 k' ：流体粘度指数

擬塑性流体の乱流領域における摩擦損失係数 f と広義のレイノルズ数 Re_G との関係は、Dodgeらによると、滑らかな円形管の場合は次の関係があるとしている。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A_n \log(Re_G \cdot f^{1-n'/2}) + B_n \quad (2)$$

$$Re_G = \frac{D^{n'} V^{2-n'} \rho}{8^{n'-1} k'} \quad (3)$$

ρ ：密度

図-1は実験管路Aに下水汚泥を流した場合の Re_G との関係である。乱流領域の Re_G と f との関係はBlasiusの関係を平行移動させた関係に良く一致している。本実験では円形管の代わりに正方形管を用いているが、正方形管でも(2)式が成り立つものとして、図-2に下水汚泥の $Re_G \cdot f^{1-n'/2}$ と $1/\sqrt{f}$ との関係を示した。これらの関係は、汚泥濃度にかかわらず傾き2の直線となる。したがって、(2)式は次のように書き替えることができる。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{B}{Re_G \cdot f^{1-n'/2}} \right) \quad (4)$$

表-1 実験管路の相当直径および相対粗度

実験 管路	D (cm)	$\frac{k_s}{D}$	備 考
A	2.45	0	滑らか
B	2.35	5.8×10^{-2}	金剛砂 No. 24
C	2.40	4.1×10^{-2}	金剛砂 No. 36
D	2.42	2.3×10^{-3}	金剛砂 No. 120
E	2.48	2.1×10^{-3}	金剛砂 No. 240
F	2.47	7.9×10^{-4}	金剛砂 No. 500

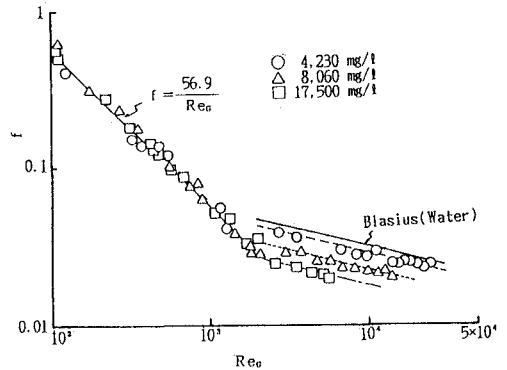


図-1 下水汚泥の広義のレイノルズ数と摩擦損失係数（管路A）

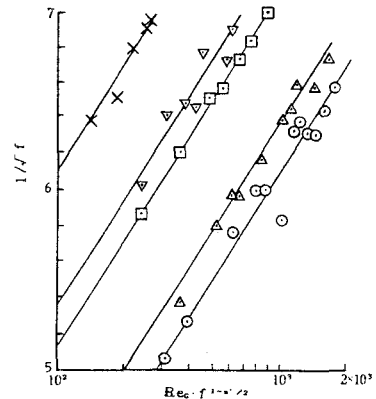
図-2 下水汚泥の $Re_G \cdot f^{1-n'/2}$ と $1/\sqrt{f}$ （管路A）
○ 4,230mg/l, △ 5,910mg/l, □ 8,060mg/l, ▽ 11,550mg/l, × 17,150mg/l

図-3に汚泥濃度と(4)式のBとの関係を示した。これらの関係は次の式となる。

$$B = 2.52 \exp \{-2.2 \times 10^{-4} C\} \quad \text{----- (5)}$$

C : 汚泥濃度 (mg/l)

3.2 粗い管

図-4に実験管路B～Fに下水汚泥を流したときの Re_G と f との関係を示した。管路の相対粗度が小さくなるにつれて、乱流領域の f も小さくなることが認められる。特に、相対粗度の小さい管路EおよびFでは、 Re_G と f との関係はBlasiusの式にはば一致している。

また、これらの関係は、水の場合のレイノルズ数と摩擦損失係数との関係を示すMoody diagramに良く似ている。このため、水の場合に適用しているColebrook-Whiteの式を変形して、汚泥の場合にも適用できると考えることができる。すなわち、下水汚泥の場合は(4)式を考慮して、

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{k_s/D}{A} + \frac{B}{Re_G f^{1-n'/2}} \right) \quad \text{----- (6)}$$

k_s/D : 相対粗度

とする。

図-5は汚泥濃度と(6)式のAとの関係である。これらの関係は、相対粗度によって多少のばらつきはあるが、次の関係で表すことができる。すなわち、

$C \leq 4,000 \text{ mg/l}$ の場合

$$A = 3.71 \exp \{-1.2 \times 10^{-4} C\} \quad \text{----- (7)}$$

$4,000 < C \leq 10,000 \text{ mg/l}$

$$A = 0.23 \quad \text{----- (8)}$$

汚泥濃度 $4,000 \text{ mg/l}$ で、Aが別な関係式となるのは、下水汚泥がこの濃度以上で擬塑性流体の性質が顕著に現れることと関係があるものと考えられる。

結局、粗い管における下水汚泥の摩擦損失係数は、(6)式に(5)および(7)、(8)式の係数A、Bを代入することにより簡単に求めることができる。

4. 結 論

滑らかな管および人工的に粗度を付けた実験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検討し、乱流領域の摩擦損失係数はColebrook-Whiteの式に汚泥濃度の影響を加味し、広義のレイノルズ数 Re_G を用いた式で計算できることを示した。

〔参考文献〕 D. W. Dodge, A. B. Metzner: Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems, A. I. Ch. E. Journal, Vol. 5, No. 2, p. 189, 1959

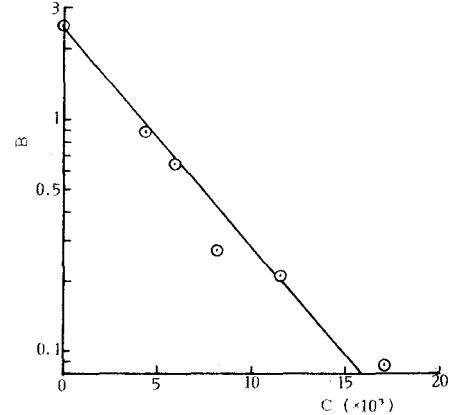


図-3 汚泥濃度とB (管路A)

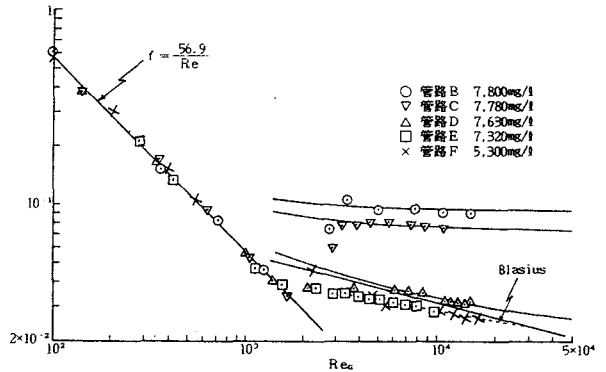


図-4 下水汚泥の広義のレイノルズ数と摩擦損失係数 (粗管)

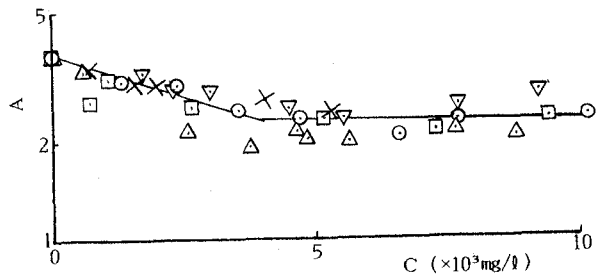


図-5 汚泥濃度とA (粗管)
(記号は図-4と同じ)