

II-418

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土木工学科 学生員 ○渡辺修治
早稲田大学理工学部土木工学科 正会員 遠藤郁夫
国土館大学工学部土木工学科 正会員 金成英夫
日本大学生産工学部土木工学科 正会員 永田伸之

1. 緒言 下水汚泥は大小さまざまな有機物、無機物等の固形物、或いは繊維状物質を含み、全体として親水性ゲルを形成している。従って、回転粘度計での粘度測定がしばしば困難である。しかし、汚泥中の夾雑物を取り除くと実際の汚泥とはかなり異なった状態となり、流動特性に変化を及ぼすことになる。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・流体構造粘度指数 n' （以下、構造粘度指数 n' ）および管内流動・流体粘度指数 K' （以下、粘度指数 K' ）等を求めた。また、本研究では、粗い管の製作に際して、管路の内面に均一に金剛砂を付着させるため、上蓋を取り外すことのできる正方形断面管路を用い、人工的に粗度を付け、下水汚泥の摩擦損失係数について実験的研究を行ったものである。

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 6.0m、助走区間 1.5mおよび圧力損失測定区間 4.0mである。この管路の内面に金剛砂を均一に張り付け人工的に粗度を付けた。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。汚泥はS下水処理場の混合泥（最初沈殿池汚泥+余剰汚泥）を用いた。

3. 実験結果及び考察 下水汚泥は濃度 1200mg/l以上の広い濃度範囲で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。擬塑性流体の圧力損失 ΔP と流速 V は層流領域において次の関係が成り立つ。すなわち

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

図-1は汚泥濃度 C と n' との関係であり、ニュートン流体と非ニュートン流体の臨界濃度は 1200mg/lであることが認められた。従って、ニュートン流体 ($n'=1$) と非ニュートン流体 ($n'<1$) の C と n' との関係は次のように表せる。

ニュートン流体 : $C \leq 1200 \text{ mg/l}$ ($n'=1$)

非ニュートン流体 : $C \geq 1200 \text{ mg/l}$ ($n' \leq 1$)

$$n' = 9.27 C^{-0.314} \quad (2)$$

3.1 滑らかな管 Metnerらによると、滑らかな管路の場合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 との間には次の関係がある。すなわち

$$1/\sqrt{f} = A_n \log(Re_G \cdot f^{1-n'/2}) + B_n \quad (3)$$

$$Re_G = \frac{D^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho}{8^{n'-1} \cdot K'} \quad (4)$$

D : 相当直径, ρ : 密度

図-2に水および下水汚泥の $Re_G \cdot f^{1-n'/2}$ と $1/\sqrt{f}$ との関係を示す。図-3および図-4から、 $A_n=2.0$ および B_n は(5)および(6)式で表すことができた。

$C \leq 1200 \text{ mg/l}$ ($n'=1$)

$$B_n = -0.80 \quad (5)$$

$C \geq 1200 \text{ mg/l}$ ($n' \leq 1$)

$$B_n = 2.30 \times 10^{-4} \cdot C - 1.08 \quad (6)$$

以上のことから、乱流領域の f と Re_G との関係は次の式で

表-1 実験管路の相当直径及び相対粗度

実験 管路	D (cm)	k/D	備 考
I	2.50	0	滑らか
II	2.48	1.9×10^{-3}	金剛砂No. 240
III	2.48	2.3×10^{-3}	金剛砂No. 120
IV	2.42	1.7×10^{-2}	金剛砂No. 60
V	2.35	7.1×10^{-2}	金剛砂No. 24

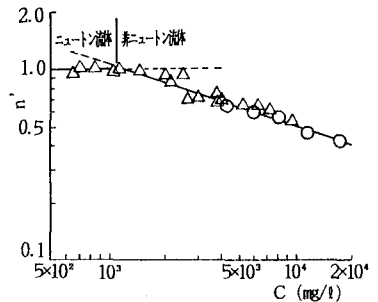


図-1 下水汚泥の濃度と構造粘度指数 n'

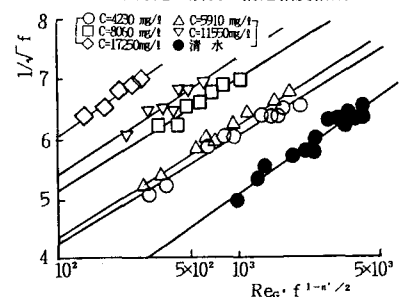


図-2 水及び下水汚泥の $Re_G \cdot f^{1-n'/2}$ と $1/\sqrt{f}$ (管路-1)

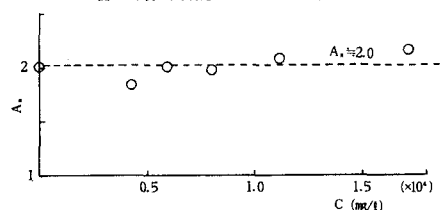


図-3 汚泥濃度 C と A_n

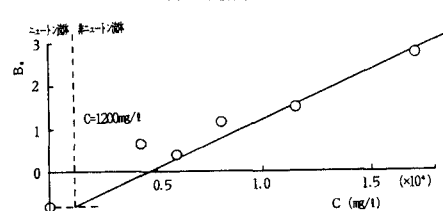


図-4 汚泥濃度 C と B_n

表す事ができた。

$$C \leq 1200 \text{ mg/l } (n' = 1) \\ 1/\sqrt{f} = 2.0 \log(Re_G \cdot \sqrt{f}) - 0.80 \quad \text{--- (7)}$$

$$C \geq 1200 \text{ mg/l } (n' \leq 1) \\ 1/\sqrt{f} = 2.0 \log(Re_G \cdot f^{1-n'/2}) \\ + 2.30 \times 10^{-4} C - 1.08 \quad \text{--- (8)}$$

図-5から、(7)および(8)式は、乱流領域において実験値と一致していることが認められた。図-6は(7)および(8)式の n' の乱流領域における曲線群を示したものである。

3.2 粗い管 粗い管路について、相対粗度 $d/k=0.017, 0.040$ および 0.071 の管路について $Re_G=2 \times 10^4$ の場合の f について検討を加えた。図-7は C と $1/\sqrt{f}$ との関係を示したものである。完全乱流領域では、 C に関係なく水の場合の(9)式による計算値と良く一致した。

$$1/\sqrt{f} = -2.0 \log(2k/D) + 1.74 \quad \text{--- (9)}$$

以上のように、完全乱流領域では、下水汚泥は水の場合と一致することが認められたので、下水汚泥の遷移乱流領域の式は、水の場合のColebrook-White式と同じ誘導手法で導くことができるものと考えられた。すなわち、(8)式は $k/D \rightarrow 0$ の時の極限、(9)式は $k/D \rightarrow \infty, Re_G \rightarrow \infty$ の時の極限と考え、(8)式を(10)式のように変形し、

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2.0 \log \frac{25.7 \times 0.999735^C}{Re_G \cdot f^{1-n'/2}} \quad \text{--- (10)}$$

内挿式として(11)式を得る事ができた。

(11)式は非ニュートン流体としての下水汚泥の遷移乱流領域における広義のレイノルズ数 Re_G と摩擦損失係数 f の関係式と考えることができた。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2.0 \log \left(\frac{25.7 \times 0.999735^C}{Re_G \cdot f^{1-n'/2}} + \frac{2k}{D} \right) \quad \text{--- (11)}$$

図-8は遷移乱流領域における下水汚泥の Re_G と f との関係である。(11)式が実験値と良く一致していることが認められた。図-9は(11)式の n' について2種類の粗度係数 $k/D=0.0023$ および 0.017 について、下水汚泥の遷移乱流領域における Re_G と f との関係を示したものである。粗度係数が小さい場合には、 n' に対して曲線の相違が顕著に表れ、逆に大きいと n' に関係なく同一曲線に収敛することが認められた。

4. 結論 非ニュートン流体としての下水汚泥を用いて、層流領域、遷移乱流領域、および乱流領域において、滑らかな管、および粗い管について Re_G と f との関係を明らかにすることができた。

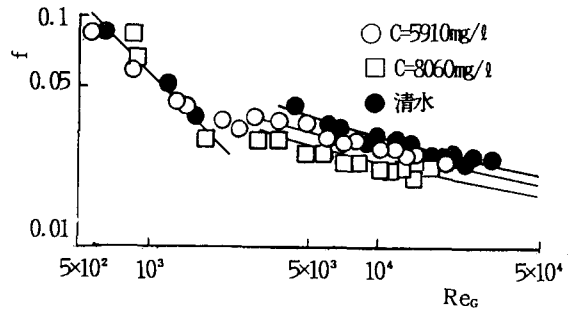


図-5 広義のレイノルズ数 Re_G と摩擦損失係数 f (管路-I)

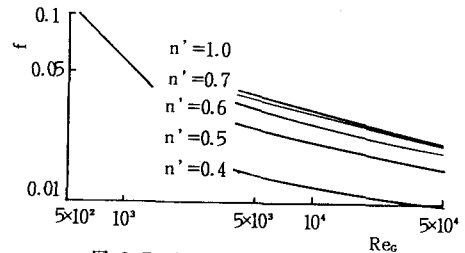


図-6 Re_G と f との関係(管路-I)

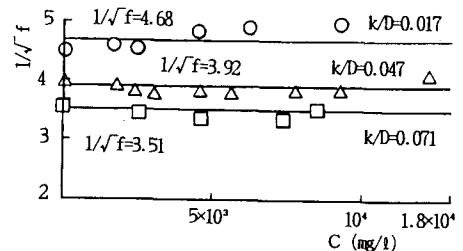


図-7 $Re_G=2 \times 10^4$ における C と $1/\sqrt{f}$

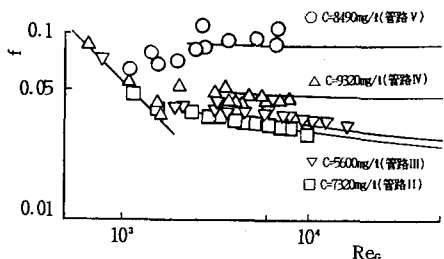


図-8 Re_G と f との関係(管路-II~V)

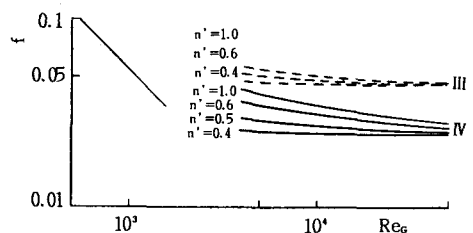


図-9 Re_G と f との関係(管路-III, IV)