

II-454

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 ○岩森暁如
早稲田大学理工学部 学生員 安藤明宏
早稲田大学理工学部 正員 遠藤都夫

1. 緒言 下水汚泥は大小様々な有機物、無機物などの固形物、或いは繊維状物質を含む為、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' (以下、構造粘度指数 n') 及び流体粘稠度指数 K' (以下、粘稠度指数 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に上蓋を取り外すことのできる正方形断面管路を用い、人工的に粗度をつけ、下水汚泥の摩擦損失係数について実験的研究を行なったものである。

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である。管路の1辺の長さ、相対粗度、助走区間、及び圧力測定区間について表-1に示す。滑らかな管は円形断面管路、粗い管路は正方形断面管路を用いた。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流量から求めた。汚泥はS処理場の混合汚泥(最初沈殿池汚泥+余剰汚泥)を用いた。

3. 実験結果 及び 考察

3.1 下水汚泥の流動特性 下水汚泥は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式が成り立つ。

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

図-1は汚泥濃度 C と n' との関係であり、ニュートン流体 ($n' = 1$) と非ニュートン流体 ($n' < 1$) の臨界濃度は1296 $\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ 、すなわち1300 $\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ であることが認められた。従ってニュートン流体と非ニュートン流体の C と n' との関係は次のように表せる。

$$\text{ニュートン流体} : C \leq 1300 \text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l} \quad (n' = 1)$$

$$\text{非ニュートン流体} : C \geq 1300 \text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l} \quad (n' \leq 1)$$

$$n' = 6.13C^{-0.253} \quad (2)$$

擬塑性流体の広義のレイノルズ数 Re_G は一般に次式で表される。

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

D : 相当直径, ρ : 密度

図-2は汚泥濃度 C と K_P' との関係であり、 $C=2718 \text{mg}/\text{l}$ 、すなわち $C=3000 \text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ を臨界濃度として以下のように表される。

$$C \leq 3000 \text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$$

$$K_P' = 1.85 \times 10^{-3} \cdot C^{0.313} \quad (4)$$

$$C \geq 3000 \text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$$

$$K_P' = 6.5 \times 10^{-8} \cdot C^{1.61} \quad (5)$$

3.2 滑らかな管 Metzger等によると、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。

表-1 実験管路の相当直径及び相対粗度

実験 管路	D (cm)	試験 K/D	助走区間 (m)	測定区間 (m)	備 考
I	0.90	0	3.0	2.5	滑らか
II	1.30	0	3.0	2.5	滑らか
III	2.42	1.7×10^{-2}	4.0	1.5	金剛砂 No.60
IV	1.95	2.9×10^{-2}	3.0	2.5	金剛砂 No.60
V	2.39	4.1×10^{-2}	4.0	1.5	金剛砂 No.36
VI	1.89	5.4×10^{-2}	3.0	2.5	金剛砂 No.36
VII	2.35	7.1×10^{-2}	4.0	1.5	金剛砂 No.24

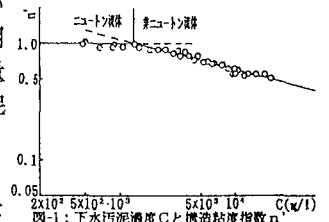
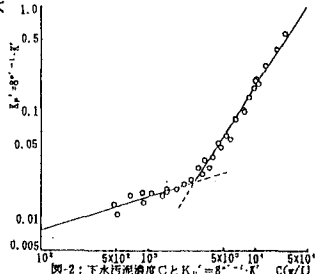
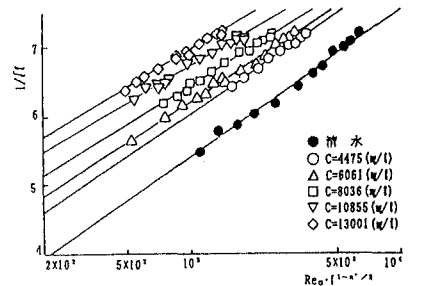
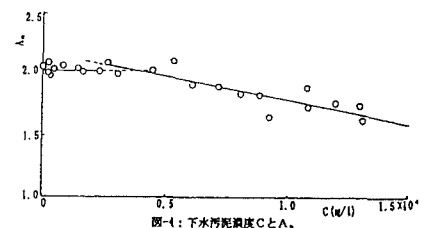
図-1: 下水汚泥濃度 C と構造粘度指数 n' 図-2: 下水汚泥濃度 C と $K_P' = 8^{n'-1} \cdot K'$ 図-3: 水及び下水汚泥の $Re_G (1/n' - 1)$ と f (管路II)図-4: 下水汚泥濃度 C と f

図-3, 4, 5から A_n の臨界濃度は $C \approx 2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$, B_n の臨界濃度は $C \approx 1300 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ であることが判る。従って, 下水汚泥濃度 C と A_n , B_n の関係を表-2のように表すことができた。以上のことから, 滑らかな管における乱流領域の f と Re_G との関係は(7), (8), (9)式で表すことができた。

水 $\leq C \leq 1300 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$

$$1/f = 2.03 \log(Re_G \cdot f^{1-n'} / 2) - 0.80 \quad \text{----- (7)}$$

$1300 \text{ mg} \cdot \text{TS/l} \leq C \leq 2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$

$$1/f = 2.03 \log(Re_G \cdot f^{1-n'} / 2) + 2.20 \times 10^{-4} \cdot C - 1.03 \quad \text{----- (8)}$$

$2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l} \leq C$

$$1/f = (2.18 - 3.82 \times 10^{-5} \cdot C) \log(Re_G \cdot f^{1-n'} / 2) + 2.20 \times 10^{-4} \cdot C - 1.03 \quad \text{---- (9)}$$

図-9から(7), (8), (9)式が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), (8), (9)式の n' の乱流領域における曲線群を示したものである。

3.3 粗い管 表-1に示した5種類の粗い管路について, 完全乱流領域及び遷移乱流領域における f , K/D , Re_G の関係について検討を加えた。

但し, 相対粗度 K/D は Colebrook-White 式を用いて $Re_G \approx 20000$ で算出した。

3.3.1 完全乱流領域 完全乱流領域における C と $1/f$ と

の関係を図-7に, $2K/D$ と $1/f$ との関係を図-8に示した。これらより下水汚泥の完全乱流領域における f と K/D の関係は(10)式で表された。

$$1/f = 1.8 - 1.85 \log \frac{2K}{D} \quad \text{----- (10)}$$

3.3.2 遷移乱流領域 下水汚泥の遷移乱流領域の式は, 水の場合の Colebrook-White 式と同じ誘導方法で導くことが出来ると考えられる。

従って, 滑らかな管の乱流領域を表した(7), (8), (9)式, 完全乱流領域を表した(10)式の内挿式として下水汚泥の遷移乱流領域は(11), (12), (13)式で表された。

水 $\leq C \leq 1300 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$

$$1/f = 1.8 - 1.85 \log \left(\frac{32.2}{(Re_G \cdot f^{1-n'} / 2)^{1.1}} + \frac{2K}{D} \right) \quad \text{----- (11)}$$

$1300 \text{ mg} \cdot \text{TS/l} \leq C \leq 2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$

$$1/f = 1.8 - 1.85 \log \left(\frac{33.9 \times 0.999726^C}{(Re_G \cdot f^{1-n'} / 2)^{1.1}} + \frac{2K}{D} \right) \quad \text{----- (12)}$$

$2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l} \leq C$

$$1/f = 1.8 - 1.85 \log \left(\frac{33.9 \times 0.999726^C}{(Re_G \cdot f^{1-n'} / 2)^{A_n/1.85}} + \frac{2K}{D} \right) \quad \text{---- (13)}$$

図-9から(11), (12), (13)式は遷移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-10は n' について実験管路Ⅲ, VIに関する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見られ, 大きい場合には n' の影響が極めて小さく, 同一曲線に収斂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, 及び乱流領域において, 滑らかな管, 及び粗い管について Re_G と f との関係を明らかにすることができた。

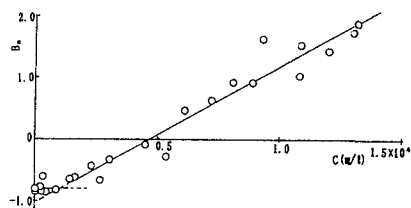


図-5: 下水汚泥濃度 C と B_n 。

表-2 下水汚泥濃度 C ($\text{mg} \cdot \text{TS/l}$) と A_n , B_n 。

	水 $\leq C \leq 1300$	$1300 \leq C \leq 2500$	$2500 \leq C$
A_n	2.03	2.03	$2.18 - 3.82 \times 10^{-5} \cdot C$
B_n	-0.80	$2.20 \times 10^{-4} \cdot C - 1.03$	$2.20 \times 10^{-4} \cdot C - 1.03$

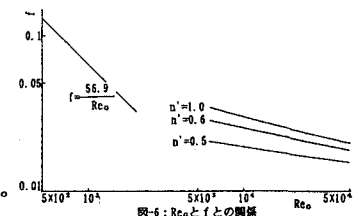


図-6: Re_G と f との関係

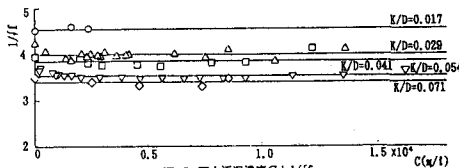


図-7: 下水汚泥濃度 C と $1/f$

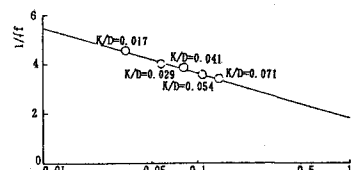


図-8: $2K/D$ と $1/f$ との関係

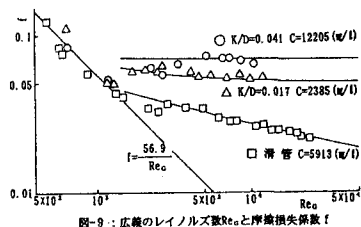


図-9: 広線のレイノルズ数 Re_G と摩擦損失係数 f

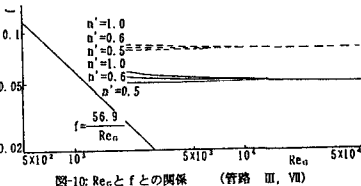


図-10: Re_G と f との関係 (管路Ⅲ, VI)