

II-616

非ニュートン流体としての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 安藤明宏

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 正会員 遠藤郁夫

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ため、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') および流体粘稠度指数 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. 実験方法 実験管路は塩化ビニル製で全長6.0mである。実験管路の相当直径及び相対粗度について表-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ンメータで、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 および 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。 $D=0.9\text{cm}$ 円形断面管路の層流領域により下水汚泥濃度 C と n' との関係および C と K_p' ($=8n'^{-1} \cdot k'$) との関係は図-1, 2のようになり、次の関係式で表された。

・下水汚泥濃度 C と n' との関係

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

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

$$n' = 6.13C^{-0.253} \quad (n' \leq 1) \quad (1)$$

・下水汚泥濃度 C と K_p' との関係

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

$$K_p' = 1.85 \times 10^{-3} \cdot C^{0.313} \quad (2) \quad K_p' = 6.5 \times 10^{-8} \cdot C^{1.61} \quad (3)$$

3.2 滑らかな管 Metzner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 Re_G と f との間には次の関係がある。

$$1/f = A_n \log(Re_G \cdot f^{1-n'/2}) + B_n \quad (4)$$

図-3, 4, 5から A_n および B_n の臨界濃度は $C=1300\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$ であることが認められた。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(5)および(7)式で表すことができた。

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

$$1/f = 2.05 \log(Re_G \cdot f) - 0.80 \quad (5)$$

清水(Prandtl-Karman)の式

$$1/f = 2.03 \log(Re \cdot f) - 0.80 \quad (6)$$

(5)式と(6)式を比較すると、実験誤差の範囲と考えられるが、清水と懸濁水との差異と考えることができた。

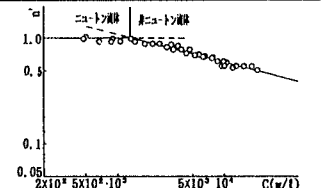
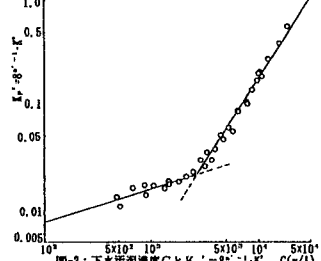
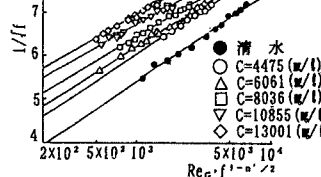
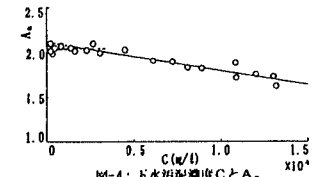
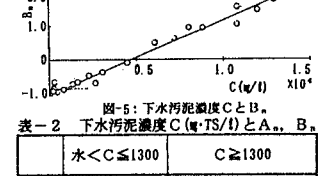
$C \geq 1300\text{mg} \cdot \text{TS}/\text{l}$

$$1/f = (2.11 - 3.10 \times 10^{-5} \cdot C) \log(Re_G \cdot f^{1-n'/2}) + 2.12 \times 10^{-4} \cdot C - 0.979 \quad (7)$$

図-6はO下水処理場の汚泥による実験結果である。(5)式および(7)式がよく一致することが認められた。

表-1 実験管路の相当直径及び相対粗度

実験 管路	相当直径 (cm)	相対粗度 K/D	相当直径 (m)	相対粗度 (m)	備 考
I	0.90	0	3.0	2.5	滑らかな (円管)
II	1.30	0	3.0	2.5	滑らかな (円管)
III	1.96	5.6×10^{-4}	3.0	2.5	金剛砂 N_2500 (円管)
IV	1.93	2.1×10^{-3}	3.0	2.5	金剛砂 N_240 (円管)
V	1.95	2.5×10^{-3}	3.0	2.5	金剛砂 N_260 (円管)
VI	1.88	5.3×10^{-3}	3.0	2.5	金剛砂 $N_2500 + N_236$ (円管)
VII	1.95	5.5×10^{-3}	3.0	2.5	金剛砂 N_236 (円管)
VIII	1.92	5.8×10^{-3}	3.0	2.5	金剛砂 $N_24 + N_236$ (円管)
IX	2.39	1.2×10^{-1}	3.0	2.5	金剛砂 N_24 (円管)

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 $K_p' = 8n'^{-1} \cdot k'$ 図-3: 水及び下水汚泥の $Re_G \cdot f^{1-n'/2}$ と $1/f$ 図-4: 下水汚泥濃度 C と A_n 図-5: 下水汚泥濃度 C と B_n

	水 $< C \leq 1300$	$C \geq 1300$
A_n	2.05	$2.11 - 3.10 \times 10^{-5} \cdot C$
B_n	-0.80	$2.12 \times 10^{-4} \cdot C - 0.979$

3.3 粗い管

3.3.1 完全乱流領域 Moody図表を参照し、ニュートン流体としての清水を用いて完全乱流領域が得られる粗度について実験的検討を加えた。 $Re > 30000$ においてColebrook-White式より求めた $2K/D$ と $1/f$ との関係を図-7に示した。図-7より、水の完全乱流領域における $2K/D$ と $1/f$ との関係式とよく一致していることが認められた。従って、 $K/D = 0.12, 0.058, 0.055, 0.053, 0.025$ の管路では $Re > 30000$ において完全乱流領域であることが判った。そこで、下水汚泥の完全乱流領域も下水汚泥濃度 $C \leq 15000$ の範囲では $Re_0 > 30000$ で認められた。図-8から、 $1/f$ は濃度すなわち粘性の影響を受けていないことが認められた。図-9から $2K/D$ と $1/f$ との関係を求めた。すなわち、下水汚泥の完全乱流領域における f と K/D との関係は(8)式で表すことができた。

$$1/f = 1.75 - 1.73 \log \frac{2K}{D} \quad (8)$$

清水(Prandtl-Karman)の式

$$1/f = 1.74 - 2.03 \log \frac{2K}{D} \quad (9)$$

(8)式と(9)式を比較すると、(5)式と(6)式の場合と同様に、清水と懸濁水との差異と理解した。

3.3.3 粗滑遷移領域 下水汚泥の粗滑遷移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できると考えられる。従って、滑管の乱流領域(5)および(7)式、粗管の完全乱流領域を表した(8)式の内挿式として下水汚泥の粗滑遷移領域は(10)および(12)式で表すことができた。

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

$$1/f = 1.75 - 1.73 \log \left(\frac{29.8}{(Re_0 \cdot \sqrt{f})^{1.18}} + \frac{2K}{D} \right) \quad (10)$$

清水(Colebrook-White)の式

$$1/f = 1.74 - 2.0 \log \left(\frac{18.7}{Re \cdot \sqrt{f}} + \frac{2K}{D} \right) \quad (11)$$

(10)式と(11)式とを比較すると、(5)式と(6)式の場合と同様に、清水と懸濁水との差異と理解した。

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

$$1/f = 1.75 - 1.73 \log \left(\frac{37.8 \times 0.999718^C}{(Re_0 \cdot f^{1-n^*/2})^{An/1.73}} + \frac{2K}{D} \right) \quad (12)$$

実際の汚泥管路輸送では、表-3に示した条件で実施されていることが多い。 k/D と Re_0 を考慮すると、実際の汚泥管路輸送では完全乱流領域状態ではなく、粗滑遷移領域であると考えられた。本実験では実用範囲と考えられる $k/D = 0.00056, 0.0021$ を用いて下水汚泥の粗滑遷移領域について実験的検討を加えた。図-10に(12)式を示したが実験値とよく一致していることが認められた。従って、実際の汚泥管路輸送における k/D と f との関係は(12)式で計算でき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の管路輸送に際し粗滑管に関する、層流領域、粗滑遷移領域、および乱流領域において、 Re_0 と f との関係を明らかにすることができた。また、表-3にあるように実際の管路の条件で、しかも他の下水処理場から採取した汚泥(最初沈殿池汚泥+余剰汚泥)を用いて検証した結果が図-10である。従って、検証例は実験用汚泥と2例ではあるがよく一致していることが認められた。今後は汎用性の検討を進めたいと考えている。

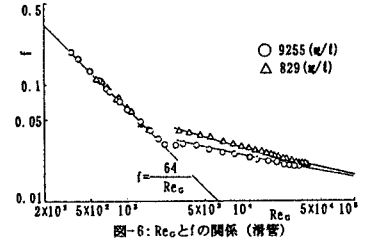


図-6: Re_0 と f の関係(清水)

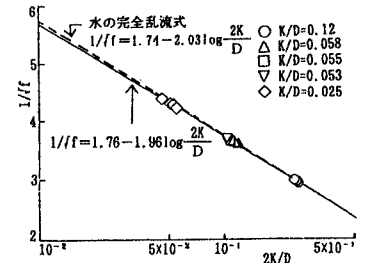


図-7: 水における $2K/D$ と $1/f$ との関係($Re > 30000$)

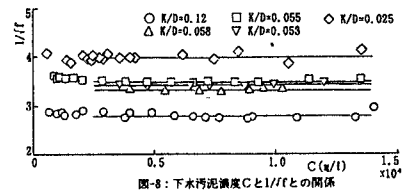


図-8: 下水汚泥濃度 C と $1/f$ との関係

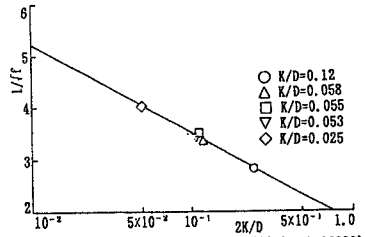


図-9: 下水汚泥における $2K/D$ と $1/f$ との関係($Re_0 > 30000$)

表-3 実際の汚泥管路輸送

内径 ϕ (mm)	絶対粗度 k , (mm)		Re_0 ($C = 7000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$)	
	0.3 mm	1.0 mm	$v = 1.0 \text{ m/sec}$	$v = 1.5 \text{ m/sec}$
300 mm	$K/D = 0.001$	$K/D = 0.003$	45000	78000
350 mm	$K/D = 0.0009$	$K/D = 0.0029$	50000	85000

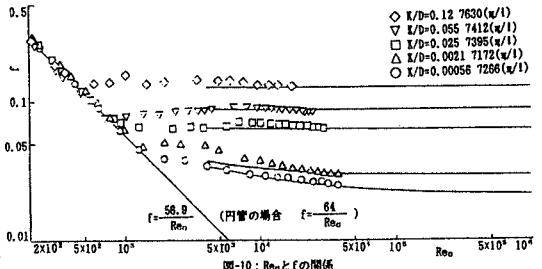


図-10: Re_0 と f の関係