

(Ⅱ-31) 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 三木陽介
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫

1. 緒言 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。擬塑性流体の流動特性を測定するのに、度々、回転粘度計が用いられるが、下水汚泥は大小様々な有機物、無機物などの固形物あるいは繊維状物質を含むため、測定が困難である。そこで、実験管路に直接汚泥を流し、層流領域より流体構造粘度指数 n' および流体粘稠度指数 k' 等を求めた。また、これらの n' および k' を考慮して粗滑管の乱流領域における広義の Reynolds 数 Re_0 と摩擦損失係数 f との関係式を求め、さらに粗滑遷移領域式を誘導した。

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	材料	長さ (m)	備考
I	0.90	0	滑らか	2.5	(円管)
II	1.30	0	滑らか	2.5	(円管)
III	1.96	5.8×10^{-4}	金剛砂 No.500	2.5	(円管)
IV	1.93	2.1×10^{-3}	金剛砂 No.240	2.5	(円管)
V	1.95	2.5×10^{-3}	金剛砂 No.60	2.5	(円管)
VI	1.88	5.3×10^{-3}	金剛砂 No.500+No.36	2.5	(円管)
VII	1.95	5.8×10^{-3}	金剛砂 No.36	2.5	(円管)
VIII	1.82	5.8×10^{-3}	金剛砂 No.24+No.36	2.5	(円管)
IX	2.30	1.2×10^{-3}	金剛砂 No.24	2.5	(円管)

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およ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、粗い管は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、人工的に粗度を作った。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 $D=0.9\text{cm}$ 円形断面管路の層流領域より、下水汚泥濃度 C と n' および Kp' ($=8n'^{-1} \cdot k'$) との関係は、各々図-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: $C \leq 1500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ $n' = 1$

非ニュートン流体: $C \geq 1500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ $n' = 7.15 \times C^{-0.270} \dots (1)$

・下水汚泥濃度 C と Kp' との関係

$C \geq 4000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ $Kp' = 2.49 \times 10^{-8} \cdot C^{1.72} \dots (2)$

$1500 \leq C \leq 4000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ では、 Kp' はニュートン流体と非ニュートン流体との遷移領域と考えることができた。図-1, 2 から、(1)式および(2)式は異なる管径 ($D=1.3\text{m}$) および汚泥を用いてもよく一致することが実験的に認められた。

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 Re_0 と f との間には次の関係がある。

$$1/ff = A_n \log(Re_0 \cdot f^{1-n'/2}) + B_n \dots (3)$$

$D=1.3\text{cm}$ 円形断面管路の乱流領域より、下水汚泥濃度 C と A_n および B_n との関係は図-3, 4 のようになった。図-3 から、 $4000 \leq C \leq 15000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ の範囲では、 A_n は下水汚泥濃度すなわち粘性の影響を受けずに一定であることが認められた。図-4 から、 B_n は濃度の影響を受けることが認められた。従って、下水汚泥濃度 C と A_n および B_n との関係は各々(4)式と(5)式で表すことができた。

$4000 \leq C \leq 15000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$

$$A_n = 1.85 \dots (4) \quad B_n = 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \dots (5)$$

以上のことから、滑らかな管における乱流領域の Re_0 と f との関係は(6)式で表すことができた。

$4000 \leq C \leq 15000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$

$$1/ff = 1.85 \log(Re_0 \cdot f^{1-n'/2}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \dots (6)$$

図-5 は(6)式を適用して、異なる汚泥による実証性を検討したものである。また、実測値 f と(6)式の計算値 f とを比較して図-6 に示したが、すべての濃度及び Re_0 において約 10% 以内の相対誤差であることが認められた。

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

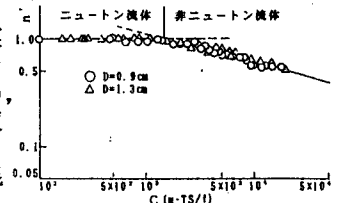


図-1: 下水汚泥濃度 C と構造粘度指数 n' との関係

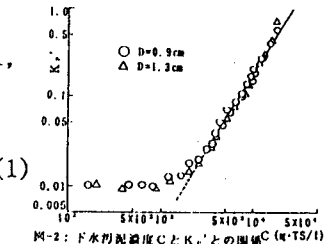


図-2: 下水汚泥濃度 C と Kp' との関係 ($n \cdot \text{TS/l}$)

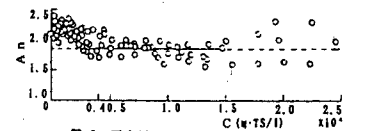


図-3: 下水汚泥濃度 C と A_n との関係

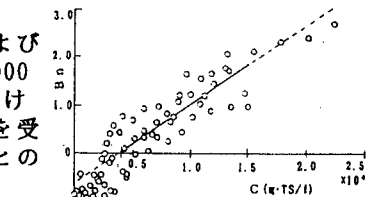


図-4: 下水汚泥濃度 C と B_n との関係

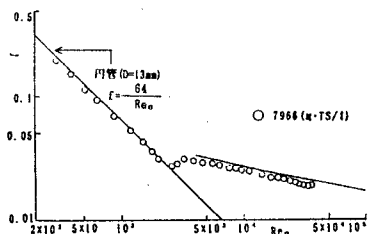


図-5: Re_0 と f の関係 (滑管)

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(7式)。従って、 $K/D=0.12, 0.058, 0.055, 0.053$ および 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。下水汚泥では、図-8に見られるように、 $Re_0 > 30000$ では、 $1/f$ すなわち f は汚泥濃度(粘性)の影響を受けていないことが認められた。従って、図-9から $2K/D$ と $1/f$ との関係を求めることができた。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。

・清水(Prandtl-Karman)の式： $1/f = 1.74 - 2.03 \log \frac{2K}{D} \quad \text{---(7)}$

・下水汚泥 $4000 \leq C \leq 15000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ $Re_0 > 30000$

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

(7)式と(8)式を比較すると、清水と懸濁水との差異と理解した。

3.3.2 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(6)式と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(9)式で表すことができた。

$4000 \leq C \leq 15000 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$

$$1/f = 1.75 - 1.73 \log \left(\frac{10^{(1.75 - n')/1.73}}{(Re_0 \cdot f^{1-n'})^{1/2}} + \frac{2K}{D} \right) \\ = 1.75 - 1.73 \log \left(\frac{23.9 \times 0.999779^C}{(Re_0 \cdot f^{1-n'})^{1/2}} + \frac{2K}{D} \right) \quad \text{---(9)}$$

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 とを考慮すると、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異なる汚泥を用いて実証的検討を加えた。図-10に実験結果を示し、図-11に $Re_0=30000$ における実測値 f と(9)式の計算値 f との比較を行なった。図-11より(9)式は実験値とよく一致していることが認められた。表-3および図-10に示したように実際の汚泥輸送 Re_0 は36300~69600であるので(9)式はよく一致しているおり、実際の汚泥管路輸送における k/D と f との関係は(9)式で計算できることが認められた。

4. 総括及び結論 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 との関係式について異なる汚泥を用いて実験的検証を行ない、次のような結論を得ることができた。

(1) 擬塑性流体のレオロジー定数 n'

および Kp' について内径0.9cmおよび1.3cmの塩化ビニール管を用いて層流領域より汚泥濃度との関係を明らかにした。

(2) 滑管の場合、乱流領域における Re_0 と f との関係は(6)式で表すことができた。

(3) 粗管の場合、完全乱流領域における Re_0 と f との関係は(8)式で表すことができた。

(4) 粗滑遷移領域における Re_0 と f との関係は(9)式で表すことができた。また、実際の汚泥管路輸送における k/D と f との関係は(9)式で計算できることが認められた。

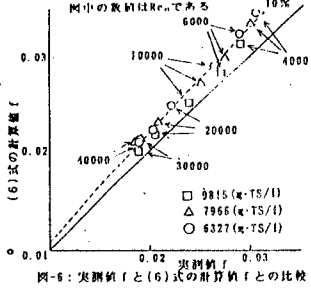


図-6: 実験値 f と(6)式の計算値 f との比較

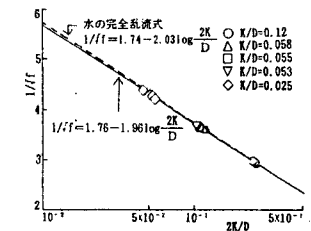


図-7: 水における $2K/D$ と $1/f$ との関係 ($Re > 30000$)

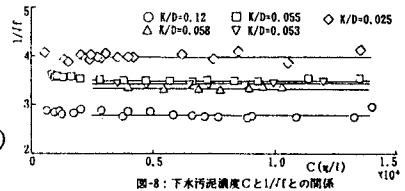


図-8: 下水汚泥濃度 C と $1/f$ との関係

表-2 汚泥濃度 C と n'

$C \text{ (mg-TS/l)}$	n'
4000	0.762
6000	0.683
8000	0.632
10000	0.595

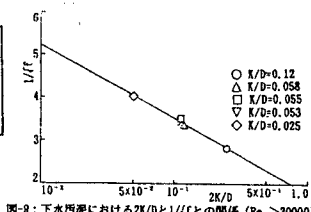


図-9: 下水汚泥における $2K/D$ と $1/f$ との関係 ($Re_0 > 30000$)

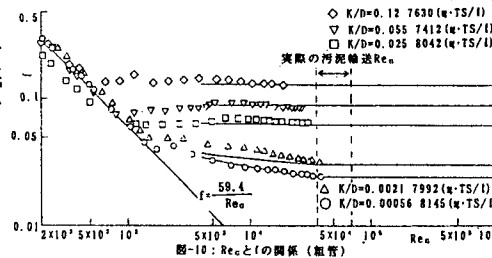


図-10: Re_0 と f の関係 (粗管)

表-3 実際の汚泥管路輸送

内径 $D \text{ (mm)}$	絶対粗度		相対粗度		$Re_0 \text{ (} C=7000 \text{ mgTS/l)}$	
	$k \text{ (mm)}$	k/D	k/D	k/D	$V=1.0 \text{ m/s}$	$V=1.5 \text{ m/s}$
300	0.3	0.001	0.001	0.001	36300	63200
	1.0	0.003	0.003	0.003		
350	0.3	0.0009	0.0009	0.0009	40000	69600
	1.0	0.0029	0.0029	0.0029		

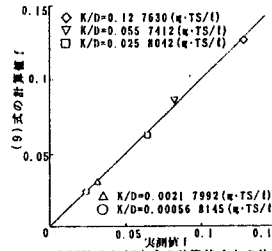


図-11: 実験値 f と(9)式の計算値 f との比較