

(Ⅱ - 60) 下水汚泥濃度と相対粗度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 正会員 遠藤郁夫

1. 緒言 摩擦損失係数はレイノルズ数と相対粗度との関係として表される。しかも、粗度の小さい場合には粗度の影響より粘性の影響が卓越する傾向がある。そこで本研究は、下水汚泥の管路輸送における摩擦損失係数についてレイノルズ数と相対粗度との関係を実験的に検討を加えたものである。粗度は、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、人工的に粗度を付けた。

2. 実験方法 実験管路は塩化ビニール製で全長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ノメータで、流速は重量法で測定した。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。層流領域における擬塑性流体の圧力損失 ΔP と流速 V 、および擬塑性流体のレイノルズ数 Re_G はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4L} = k' \left(\frac{8V}{D} \right)^{n'} \quad (1) \quad Re_G = \frac{D^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho}{8^{n'-1} \cdot k'} = \frac{D^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho}{K_P'} \quad (2)$$

ここで n' : 構造粘度指数, $K_P' = 8^{n'-1} \cdot k'$ (k' : 流体粘稠度指数)

3.2 下水汚泥の粗滑遷移領域における摩擦損失係数

下水汚泥の粗滑遷移領域では、管路V~IXのような粗い管の場合、 Re_G と f との関係は次の式で示すことができる。すなわち

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

$$1/f = 1.8 - 1.85 \log \left(\frac{32.2}{(Re_G \cdot f^{1-n'}/2)^{1.1}} + \frac{2K}{D} \right) \quad (3)$$

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

$$1/f = 1.8 - 1.85 \log \left(\frac{33.9 \times 0.999726^C}{(Re_G \cdot f^{1-n'}/2)^{1.1}} + \frac{2K}{D} \right) \quad (4)$$

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

$$1/f = 1.8 - 1.85 \log \left(\frac{33.9 \times 0.999726^C}{(Re_G \cdot f^{1-n'}/2)^{A_n/1.85}} + \frac{2K}{D} \right) \quad (5)$$

ここで $A_n = 2.18 - 3.82 \times 10^{-5} \cdot C$

図-1に管路Ⅲ($K/D=0.0015$)および管路Ⅳ($K/D=0.0069$)の実験値と(3)~(5)式との整合性について示した。 $C=786.7 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ では、濃度が低いため粘性が小さく、粗度の影響を受けるので(3)式によく一致した。 $C=8711 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ では、(5)式と大きな差異が生じた。これは下水汚泥の粘性底層が非常に厚く、粗度が粘性底層内に埋没し、粗度の影響より粘性の影響が卓越していると考えられる。したがって、下水汚泥濃度 $C \geq 2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ について管路Ⅲ、Ⅳを滑らかな管と同様な方式で検討を加えた。

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	圧力測定位置 (m)	流速測定 (m)	備 考
I	0.90	0	3.0	2.5	滑らか (円管)
II	1.30	0	3.0	2.5	滑らか (円管)
III	1.93	1.5×10^{-3}	3.0	2.5	金剛砂No.240 (正方形断面)
IV	1.88	6.9×10^{-3}	3.0	2.5	金剛砂No.120 (正方形断面)
V	2.42	1.7×10^{-2}	4.0	1.5	金剛砂No.60 (正方形断面)
VI	1.95	2.9×10^{-2}	3.0	2.5	金剛砂No.60 (正方形断面)
VII	2.39	4.1×10^{-2}	4.0	1.5	金剛砂No.36 (正方形断面)
VIII	1.89	5.4×10^{-2}	3.0	2.5	金剛砂No.36 (正方形断面)
IX	2.35	7.1×10^{-2}	4.0	1.5	金剛砂No.24 (正方形断面)

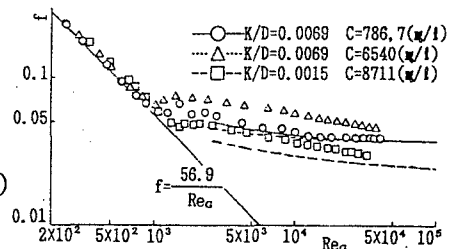


図-1: Re_G と f の関係 (粗管の理論線との整合性)

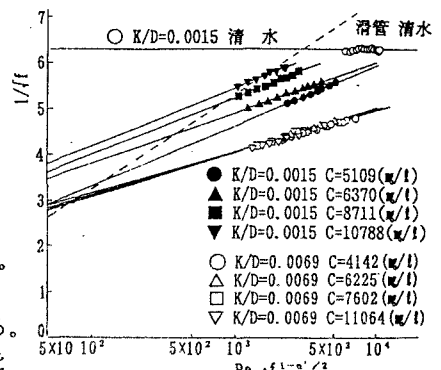


図-2: $Re_G \cdot f^{1-n'}/2$ と $1/f$ の関係

3.3 滑らかな管による検討

Metzer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。

$$1/f = A_n \log(Re_0 \cdot f^{1-n'/2}) + B_n \quad \text{----- (6)}$$

図-2に管路Ⅲ、Ⅳについて $Re_0 \cdot f^{1-n'/2}$ と $1/f$ との関係を示した。

・水について

滑らかな管の水の Re と f との関係は次式で表される。

$$1/f = 2.03 \log(Re_0 \cdot f) - 0.80 \quad \text{----- (7)}$$

これを破線で図-2に示した。また、管路Ⅲの水の実験結果も図-2に示した。水は粘性の影響よりも粗度の影響が卓越するため Re によって f がほとんど変化せず、勾配を持たない水平な直線になることがわかる。

・下水汚泥について

$K/D=0.0015$ (管路Ⅲ)の場合は下水汚泥濃度によって勾配が変化し、滑らかな管に近い状態であることを示している。 $K/D=0.0069$ (管路Ⅳ)の場合はある一定の勾配を持つ直線になり、粘性の影響を受けていることを表している。しかし、下水汚泥濃度によって勾配が変化する状態にまでは至っておらず、粗度の影響も受けていることを示している。

図-2より A_n および B_n を求め、それぞれ図-3、4に示した。

・管路Ⅲ($K/D=0.0015$)

A_n 、 B_n ともに下水汚泥濃度によって変化している。これは粘性の変化に伴い粘性底層も変化する滑らかな管の状態に近いことを示している。 A_n 、 B_n に関して $2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ 以上で最小2乗法を適用し、下水汚泥濃度との関係をそれぞれ算出した。

$$A_n = 1.31 - 1.49 \times 10^{-5} \cdot C \quad \text{----- (8)}$$

$$B_n = 0.311 - 1.53 \times 10^{-4} \cdot C \quad \text{----- (9)}$$

・管路Ⅳ($K/D=0.0069$)

A_n 、 B_n に関して $2500 \text{ mg} \cdot \text{TS/l}$ 以上で最小2乗法を適用し、破線で示した。また平均値を実線で示した。図-3、4から

A_n 、 B_n ともに下水汚泥濃度にかかわらず一定値を示すとしてよいことがわかる。これは強い粘性によって粘性底層は形成されるが、下水汚泥濃度が高くなっても粗度の影響によって粘性底層が発達せず、低い濃度の場合と大きな変化が無いことを示している。管路Ⅳの場合、乱流領域は次式で表される。

$$1/f = 0.902 \log(Re_0 \cdot f^{1-n'/2}) + 1.38 \quad \text{----- (10)}$$

各管について以上のような検討を加え、乱流領域における Re_0 と f との関係を導いた。実験値と誘導式との整合性について図-5に示した。管路Ⅲ、Ⅳともに非常に高い整合性が得られ、したがって管路Ⅲ、Ⅳに関する実験結果の検討手法が妥当であることが確認できた。

4. 結論

相対粗度 $K/D=0.0069$ 以下では粗滑遷移領域式は(3)式のみ適合するが、(4)および(5)式は粘性の影響が粗度よりも卓越して、図-1に示したように不整合性があらわれた。一方、 $K/D=0.0069$ は(6)式の A_n 、 B_n が一定であり、粗管の特性を示すことが認められた。 $K/D \leq 0.0069$ の粗度では、下水汚泥濃度によって粘性底層が変化すると考えられ、 A_n 、 B_n が変化する。従って、(7)式の A_n および B_n に対して濃度の変化式を適用することによって精度の高い f を計算することができた。

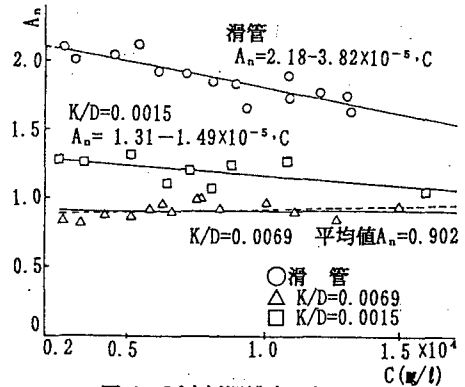


図-3：下水汚泥濃度 C と A_n

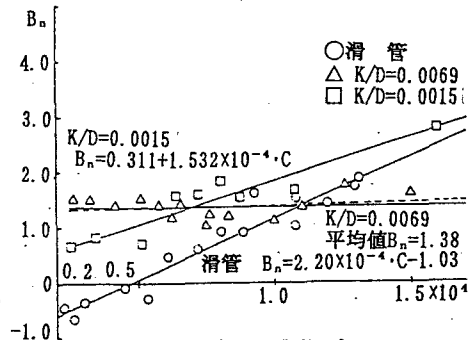


図-4：下水汚泥濃度 C と B_n

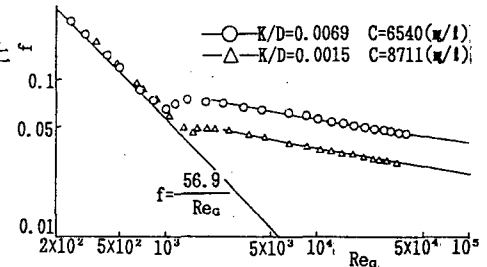


図-5： Re_0 と f の関係（滑管方式の理論線との整合性）