

II-469

粗い管における下水汚泥の摩擦損失係数に関する実験的研究

国土館大学工学部
早稲田大学理工学部
早稲田大学理工学部

正会員 ○金成英夫
学生員 和崎宏一
正会員 遠藤郁夫

1. 緒 論

汚泥の摩擦損失係数は、汚泥を構成している粒子が微細な場合は、Colebrook-Whiteの式で広義のレイノルズ数を用いて求めることができるが、下水汚泥のような粗大粒子や繊維状物質を含む泥漿の摩擦損失係数は、微細な粒子のみを含む泥漿の場合と異なることを、著者らがすでに明らかにしている。本研究は、管壁に人工的に粗さを付けた粗管に下水汚泥を流した場合の摩擦損失係数について、実験的に検討を加えた結果を報告するものである。

2. 実験装置及び実験方法

実験管路は塩化ビニール製で、全長が4.0m、助走区間1.5m、圧力測定区間は2.0mである。この実験管路の内面に金剛砂を均一に張り付け人工的に粗度をつけた。実験管路の1辺の長さ、および、相対粗度を表-1に示す。実験管路の内面に人工的に付着させた金剛砂の均等係数(U C)は1.2~1.6の範囲である。圧力測定区間は2.0mで、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。S下水処理場の混合汚泥を用いた。

3. 実験結果及び考察

正方形管の場合、レイノルズ数と摩擦損失係数との関係は、円管の場合の関係式をそのまま用いることはできない。正方形管では、円管の管径の代わりに、管の潤辺Sと断面積Aから、次式の相当直径D

$$D = \frac{4A}{S} \quad (1)$$

を用いると、レイノルズ数Reと摩擦損失係数fとの関係は、層流領域では次のようになる。

$$f = 56.9 / Re \quad (2)$$

一方、乱流領域では、Schillerは相当直径を用いると、乱流領域の摩擦損失係数を円形管のレイノルズ数と摩擦損失係数との関係を用いて求めることができるとしている。

図-1は水の場合のRe数とfとの関係を示したものである。これらの関係から、Colebrook-Whiteの式を用いて、相対粗度を求め表-1に示した。

下水汚泥の流動特性は非ニュートン流体であり、特に、擬塑性流体として取り扱う必要がある。擬塑性流体の層流領域の損失水頭と流速との関係は次のようになる。

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4L} = k' \left(\frac{8V}{D} \right)^n \quad (3)$$

ΔP : 圧力損失, L : 管長, V : 流速,

n : 構造粘度指数, k' : 流体粘度度指数

ここで、流体の密度を ρ とすると、正方形管の場合、レイノルズ数は次式の広義のレイノ

表-1 実験管路の相当直径および相対粗度

実験 管路	D (cm)	金剛砂の 有効径 (mm)	$\frac{k}{D}$	備 考
A	2.35	0.72	0.058	金剛砂 No. 24
B	2.40	0.46	0.041	金剛砂 No. 36
C	2.42	0.10	0.021	金剛砂 No. 120
D	2.42	0.22	0.013	金剛砂 No. 60

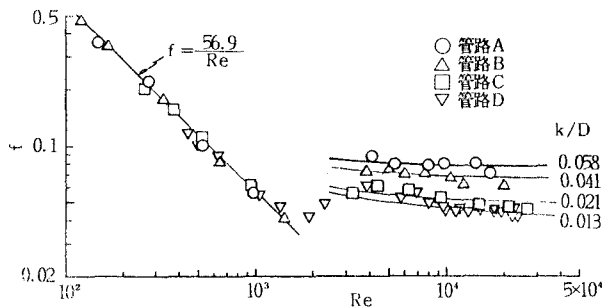


図-1 水の場合のレイノルズ数と摩擦損失係数

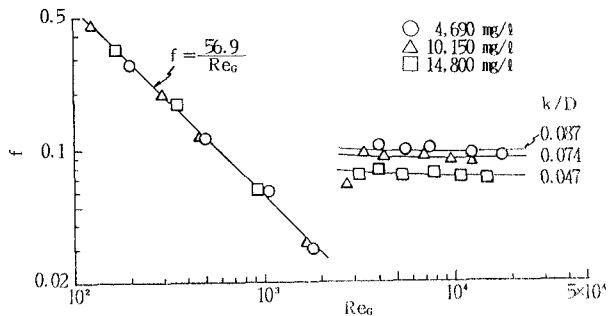


図-2 下水汚泥の広義のレイノルズ数と摩擦損失係数 (管路A)

ルズ数 Re_G で計算できる。

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

一方、摩擦損失係数 f は次の Darcy-Weisbach の式から求めることができる。すなわち、

$$f = \frac{2g \cdot D \cdot h_f}{L \cdot V^2} \quad (5)$$

h_f : 摩擦損失水頭 g : 重力加速度

図-2、図-3および図-4はそれぞれ管路A、BおよびCに下水汚泥を流した場合の広義のレイノルズ数 Re_G と摩擦損失係数 f との関係を示したものである。いずれの管路の場合とも $Re_G \leq 2,000$ の層流領域では、

$$f = 56.9 / Re_G \quad (6)$$

に良く一致している。一方、乱流領域では、広義のレイノルズ数 Re_G と摩擦損失係数 f との関係が汚泥の濃度によって異なっている。しかし、これらの関係は、図-1に示した水の場合の乱流領域のレイノルズ数 Re と摩擦損失係数 f との関係に良く似ている。このことは、粗管における下水汚泥の広義のレイノルズ数 Re_G と摩擦損失係数 f とは、Colebrook-White の式で Re を Re_G に置き替えた関係式で表すことができることを示しているものと考えることができる。さらに、下水汚泥の場合は、上記の式で水の場合の相対粗度 $(k/D)_w$ を α_R 倍した関係で表すことができることを示している。すなわち、

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\alpha_R (k/D)_w}{3.71} + \frac{2.52}{Re_G \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

図-5は下水汚泥の濃度と α_R との関係を示したものである。この図から、汚泥濃度と α_R と

の関係は相対粗度によって大きく異なることが認められる。すなわち、相対粗度が0.02以下では、汚泥濃度2,500mg/l付近で α_R は最大値を示し、5,000mg/l付近で1となった後、汚泥濃度の増加と共に漸減している。一方、相対粗度0.02以上では、 α_R は汚泥濃度5,000mg/lから7,000mg/lで最大値となり、その後、減少している。これは、汚泥濃度が低い場合は、下水汚泥中の粗大粒子や繊維状物質が管壁の粗度要素に衝突し、流れが乱れることにより、エネルギー損失が起るためと考えられる。これに対して、汚泥濃度が高い場合には、粘度が急激に大きくなるため、管壁付近の粘性底層が厚くなり、粗度要素がこの粘性底層中に隠れてしまい、見かけ上の相対粗度が減少するためと考えられる。

4. 結論

人工的に粗度を付けた管路で下水汚泥を輸送した場合の摩擦損失係数について検討し、乱流領域の摩擦損失係数はColebrook-Whiteの式でレイノルズ数に広義のレイノルズ数 Re_G を用いた式で計算できることを示した。また、相対粗度は汚泥濃度によって大きく変動することも示した。

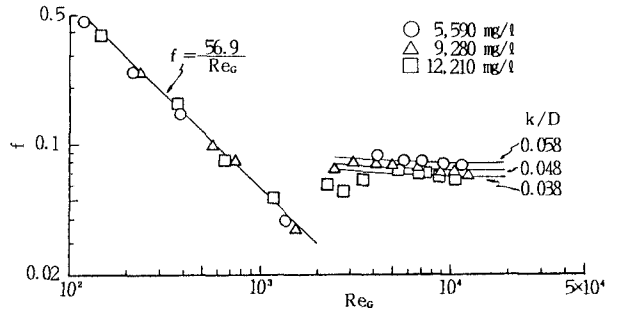


図-3 下水汚泥の広義のレイノルズ数と摩擦損失係数 (管路B)

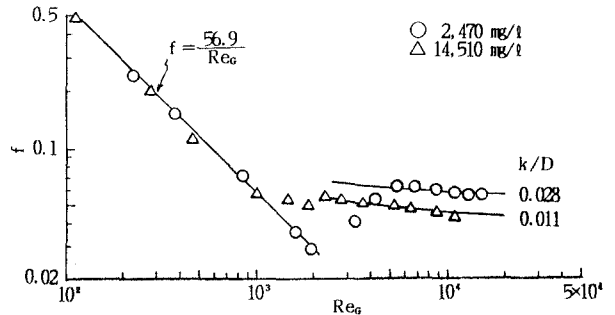


図-4 下水汚泥の広義のレイノルズ数と摩擦損失係数 (管路C)

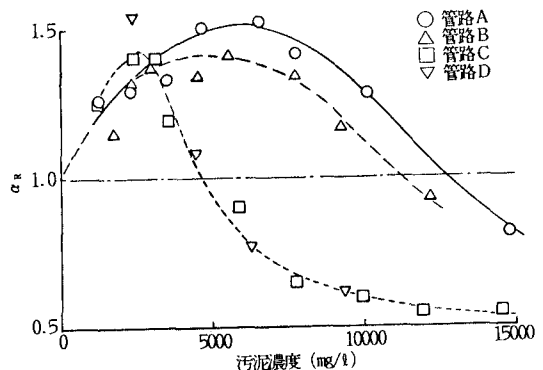


図-5 下水汚泥の濃度と α_R