

II-462

粗い管における下水汚泥の摩擦係数に関する実験的研究

国土館大学工学部

正会員 ○金成英夫

群馬工業高等専門学校

正会員 大森 忠

早稲田大学理工学部

正会員 遠藤郁夫

1. 緒 論 下水汚泥の摩擦係数は、滑らかな管の場合については研究されているが、粗い管で汚泥を輸送した場合の摩擦係数についてはほとんど研究されていないのが実情である。そこで、本研究は粗い管における汚泥の摩擦係数について実験的に検討を加えたものである。

2. 実験装置及び実験方法 実験管路には円形管と矩形管とを用いた。円形管は、長さ 4.0m、内径 1.88 cmの塩化ビニール管の内面に粒径 0.297~0.42mm（調和平均径 0.35mm）の珪砂を附着させ、人工的に粗度を付けたものである。一方、矩形管は長さ 4.0mで、断面は一辺が 2cmの正方形の塩化ビニール製である。内面には有効径 0.089mm、均等係数 1.045の砂を附着させた。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。実験には余剰汚泥（VS/T S=83~85%）およびベントナイトスラリーを用いた。

3. 実験結果及び考察 正方形管の場合、管径の代わりに次式の相当直径 D_e を用いると、

$$D_e = 4A/S \quad (1)$$

A：面積，S：潤辺

層流領域のレイノルズ数と摩擦係数との関係は次のようになる。

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

また、Schillerは相当直径を用いた場合、水の乱流領域の摩擦係数を円形管のレイノルズ数と摩擦係数との関係を用いて求めることができるとしている。

このため、実験管路の粗度は、水を流した時の Re 数と摩擦係数 f との関係から求めた。

図-1は水の場合 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、Plandtler-Nikuradsの式あるいは Colebrook-Whiteの式を用いて、相当粗度および相対粗度を求め表-1に示す。

下水汚泥およびベントナイトスラリー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における損失水頭と流速との関係は

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

ΔP ：圧力損失， L ：管長， V ：流速，

n ：構造粘度指数， k' ：流体粘度指数

となる。ここで、流体の密度を ρ とすると、円形管の場合、レイノルズ数は次式の広義のレイノルズ数 Reg で計算できる。

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

ニュートン流体の場合、 $n' = 1$ および $k' = \mu$ （粘性係数）となるため、(3)式の Reg は

$$Reg = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (5)$$

となり、一般的なレイノルズ数の計算式となる。一方、摩擦係数 f は次の式で求まる。

$$f = \frac{2g \cdot D \cdot h_f}{L \cdot V^2} \quad (6)$$

h_f ：摩擦損失水頭， g ：重力加速度

一方、正方形管の場合、層流領域において(2)式が成立するように広義のレイノルズ数を定めると、(2)、(3)式および(6)式から次のようになる。この場

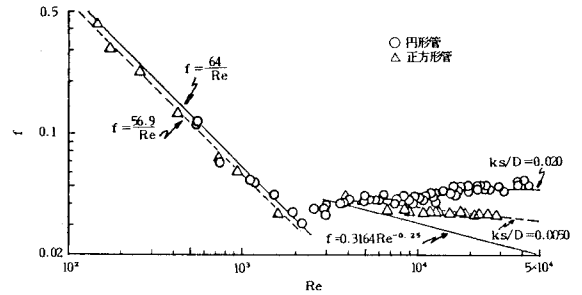
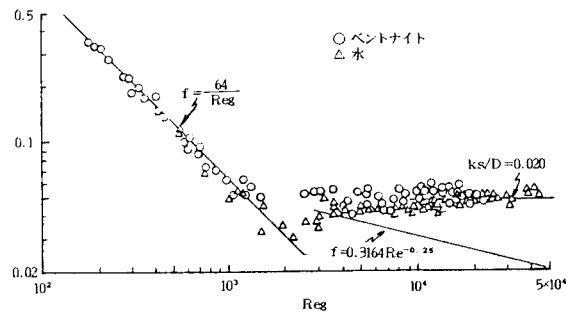


図-1 水のレイノルズ数と摩擦係数との関係

表-1 管路の管径、相当粗度および相対粗度

実験管路	D (cm)	ks (mm)	ks/D
円形管	1.88	0.38	0.020
正方形管	2.00	0.10	0.0050

正方形管のDは相当直径（ $=4A/S$ ）


図-2 ベントナイトの Reg と f との関係（円形管）

合、(3)式および(6)式のDをDeで置き代えている。

$$\text{Reg} = \frac{De^{n'} \cdot V^{2-n'} \cdot \rho}{1.125 \times 8^{n'-1} \cdot k} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図-2および図-3は、それぞれ円形管および正方形管にベントナイトスラリーを流した場合のReg(4)および(7)式とfとの関係を示したものである。これらの図には、水の場合のレイノルズ数(5)式とfとの関係もあわせて示した。ベントナイトスラリーの場合、Regとfとの関係は遷移領域を除けば、水の場合のRegとfとの関係に良く一致していることが認められる。これは、前報でも示したように、ベントナイト粒子は非常に微細なため、水と一体となって運動し、管内の流体の挙動が真溶液と同じ状態となっているためであると考えられる。

図-4および図-5は、それぞれ円形管および正方形管に下水汚泥を流した場合のRegとfとの関係を示したものである。これらの図には、水の場合のレイノルズ数(5)式とfの関係も示してある。下水汚泥は、いずれの実験管路の場合とも、汚泥濃度が高くなるにしたがって、乱流領域のfが水のそれよりも小さくなっている。特に、相対粗度の小さい正方形管で汚泥濃度 12,400mg/lのfは、滑らかな管のそれよりも小さくなっている。この場合、本研究のRegの領域では、乱流状態が十分に発達していないと考え、Regとfとの関係は図-5に示す実線のようになるものと予想し、下水汚泥の場合の見掛け上の相対粗度(k_s/D)と水で求めたそれとの比 α を図-6に示した。この図から汚泥濃度とともに α が減少しているのが認められ、ベントナイトスラリーの場合と大きく異なっている。これは、下水汚泥の場合、管内の速度分布が水と異なっているためであると考えられる。すなわち、下水汚泥中には比較的大きな粒子や繊維状物質が含まれており、これらの物質が水と一体となって運動せず、水の場合と違った速度分布を形成しており、fが減少したものであると考えられる。

したがって、ベントナイトスラリーおよび下水汚泥の摩擦係数は次の Colebrook-Whiteの式で計算できる。ただし、ベントナイトスラリーの場合は $\alpha = 1$ となる。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log \left(\frac{\alpha (k_s/D)_w}{3.71} + \frac{2.52}{\text{Reg}\sqrt{\lambda}} \right) \quad \dots\dots (8)$$

4. 結 論

管壁に粗さを持つ円形管と正方形管に下水汚泥およびベントナイトスラリーを流した場合の摩擦係数について実験的に検討を加えた結果をまとめると次の結論を得ることができた。

- (1) ベントナイトスラリーのような微細な粒子のみを含む汚泥の場合、広義のレイノルズ数を用いることにより、摩擦係数は Colebrook-Whiteの式で計算できる。
- (2) 下水汚泥の摩擦係数は、粗大粒子や繊維状物質を含んでいるため、広義のレイノルズ数を用いて Colebrook-Whiteの式で計算した摩擦係数よりも小さくなる。

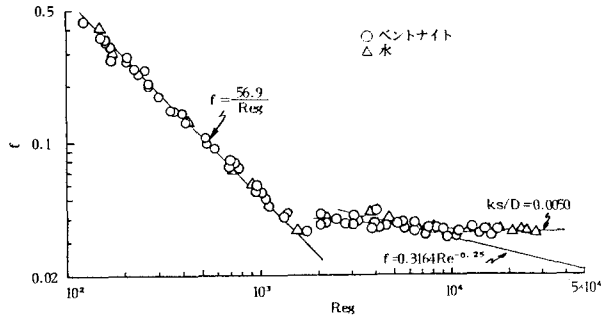


図-3 ベントナイトのRegとfとの関係（正方形管）

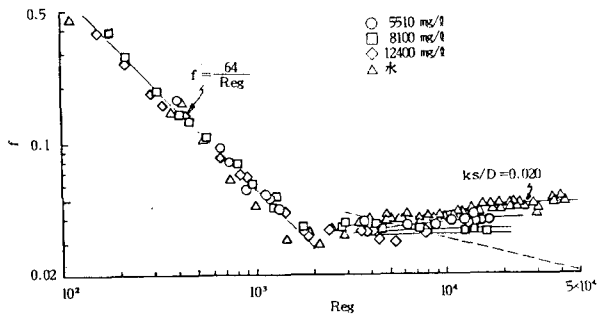


図-4 下水汚泥のRegとfとの関係（円形管）

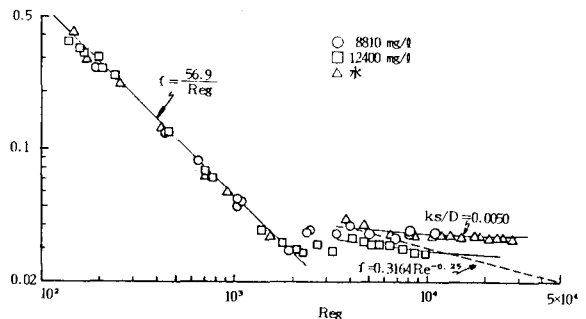


図-5 下水汚泥のRegとfとの関係（正方形管）

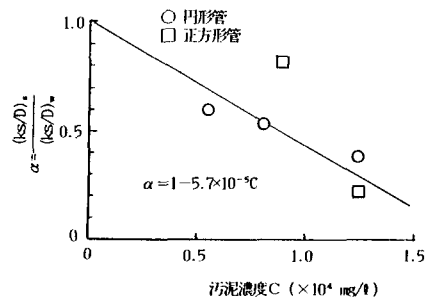


図-6 下水汚泥の濃度と α との関係