

早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
 東京都 正会員 永田伸之
 早稲田大学理工学部 学生員 ○ 岩崎孝道

1. 緒論 シールド工法あるいは泥水加圧型シールド推進工法では、ベントナイトを主成分とするスラリーにより掘削土の排出を行なう。また浄水場から発生する上水汚泥などいずれの場合もスラリーの管路輸送を行なう必要がある。このような場合、管路延長が長くなればなるほど、設計にあたっては従来にもましてより合理的設計手法を確立することが重要である。

本研究は、スラリーとしてベントナイトおよび上水汚泥を用いその流動特性について実験的に解析を行ない、擬塑性流体モデルとして滑管および粗管について種々検討を行なったものである。

2. 実験方法 ベントナイトおよび上水汚泥のスラリーについて滑管および粗管を用いた。滑管は、管径 $D=200\text{mm}$ の塩化ビニール管を用いた。粗管は、 $D=200\text{mm}$ 、相対粗度 $\epsilon/D=0.014$ および $\epsilon/D=0.069$ の2種類の塩化ビニール管である。流速は重量法を採用し、損失水頭はマンオメーターで測定した。またスラリーの流動特性の解析には、同心円筒回転粘度計を用いた。

3. 実験結果と考察 摩擦損失係数 f は、流速 V 、直径 D 、密度 ρ 、粘度 μ 、粗度 ϵ 、粗度間隔 ϵ' 、形状係数 m などに依存し、 $f=f(V, D, \rho, \mu, \epsilon, \epsilon', m)$ という形であらわされる。滑らかな管では、 $\epsilon=\epsilon'=m=0$ であり、 f は無次元であるから、 $f=f(VD/\mu)$ となり、レイノルズ数の関数となる。すなわち層流においては、 $f=64/Re$ となる。乱流においては、Blasiusの $f=0.3164Re^{-1/4}$ が広く用いられている。また粗い管では、 ϵ, ϵ' の項は D でわって無次元化し、一般的に $f=f(VD/\mu, \epsilon/D, \epsilon'/D, m)$ となる。NikuradseおよびCokebrookはそれぞれ(1)式および(2)式を示している。

$$1/f = 1.14 - 0.86 \ln \epsilon/D \quad (1)$$

$$1/f = 1.74 - 2 \log (3\epsilon/D + 18/Re f) \quad (2)$$

本実験の遷移および乱流領域の範囲は、 Re 数 $2000 \sim 20000$ の範囲であった。たまため乱流領域では、粗管の相対粗度 ϵ/D は清水を流して(2)式から計算で求めた。すなわち粗管(A)では $\epsilon/D=0.014$ 、粗管(B)では $\epsilon/D=0.069$ であった。

3.1 流動特性 回転粘度計によってベントナイトおよび上水汚泥のスラリーについて、速度勾配 $G(\text{sec}^{-1})$ とせん断力 τ との関係およびせん断力 τ と見かけ粘度 η との関係についてそれぞれ調べた。それらの関係を表-1および表-2にまとめた。これらの表からベントナイトは 80000ppm 以上で、上水汚泥は 50000ppm 以上でそれぞれ擬塑性流体的特徴を示していることがわかる。このため本研究ではこれらのスラリーを擬塑性流体として取り扱った。

3.2 摩擦損失係数 ベントナイトおよび上水汚泥のスラリーは 擬塑性

表-1 ベントナイトの流動特性

濃度 $C(\text{ppm})$	$G(\text{sec}^{-1})$	$\log G(\text{sec}^{-1})$	$\log \tau$	流動特性
28329	N	N	N	N
46308	N	N	N	N
67346	N	N	N	N
88073	P	P	P	P
100636	P	P	P	P

表-2 上水汚泥の流動特性

濃度 $C(\text{ppm})$	$G(\text{sec}^{-1})$	$\log G(\text{sec}^{-1})$	$\log \tau$	流動特性
28388	N	N	N	N
51880	P	P	P	P
66847	P	P	P	P
84702	P	P	P	P
94556	P	P	P	P

N:ニュートン流体 P:擬塑性流体

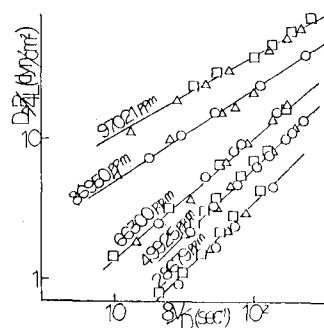


図-1 ベントナイトの ϵ/D と $1/f$ との関係

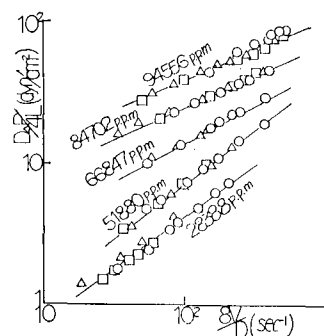


図-2 上水汚泥の ϵ/D と $1/f$ との関係

流体として近似できるものと考えられるから、次式を適用することができる。

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

n : 構造粘度指数 K' : 流体粘度指数

図-1および図-2にそれぞれベントナイトおよび上水汚泥のスラリーの $\frac{8V}{D}$ と $\frac{D \Delta P}{4L}$ の関係を示した。この関係から n および K' を求め、次式の広義のレイノルズ数 Re を求めることができた。

$$Re = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{8^{n-1} K'} = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{K_p} \quad (4)$$

図-3および図-4は濃度 C (ppm) と n および K_p (dyn·sec ^{n} /cm²) との関係を示したもので、それぞれ次の式を得ることができた。

$$\text{ベントナイト} \quad n' = 380855 \cdot C^{-1.1625} \quad (C > 80000 \text{ ppm}) \quad (5)$$

$$K_p = 8.49183 \times 10^{-21} C^{5.64027} \quad (6)$$

$$\text{上水汚泥} \quad n' = 14454 \cdot C^{-0.71273} \quad (C > 50000 \text{ ppm}) \quad (7)$$

$$K_p = 8.39473 \times 10^{-21} C^{4.08064} \quad (8)$$

図-5および図-6にベントナイトおよび上水汚泥のスラリーの Re と f との関係を示した。ここで摩擦損失係数 f は Darcy-Weisbach の式で算定した。

$$f = 2 \cdot 8 \cdot D \cdot \frac{\Delta P}{L \cdot V^2} \quad (9)$$

いずれのスラリーの場合とも、層流領域では $f = \frac{64}{Re}$ の直線に極めてよく一致していることが認められた。また乱流領域では、滑管では Blasius の式に、粗管では Colebrook-White の式で近似できることが認められた。

4. 結論 ベントナイトおよび上水汚泥のスラリーの流動特性について実験的に検討を加えた結果、次の結論が得られた。

1) ベントナイトおよび上水汚泥のスラリーは、それぞれ 80000 ppm および 50000 ppm 以上の濃度では擬塑性流体として取り扱うことができた。

2) n および K_p は管路で求めた場合、回転粘度計で求めた場合両者ともかなりよく一致することが認められた。

3) 以上総括すれば、ベントナイトあるいは上水汚泥のようなスラリーは次のようにして摩擦損失係数を求めることができる。

ベントナイト (a) ニュートン流体 $C = 80000 \text{ ppm}$ 以下

$n' = 1$, K_p は(6)式から求まる。

(b) 擬塑性流体 $C = 80000 \text{ ppm}$ 以上

n' は(5)式, K_p は(6)式から求まる。

上水汚泥 (a) ニュートン流体 $C = 50000 \text{ ppm}$ 以下

$n' = 1$, K_p は(8)式から求まる。

(b) 擬塑性流体 $C = 50000 \text{ ppm}$ 以上

n' は(7)式, K_p は(8)式から求まる。

このように、 n' および K_p が求まれば、ただちに(4)式から広義のレイノルズ数を求めることができる。摩擦損失係数は、層流領域では $f = \frac{64}{Re}$ 、乱流領域では管壁の滑粗に応じて Blasius の式あるいは Colebrook-White の式を用いてただちに求めることができる。

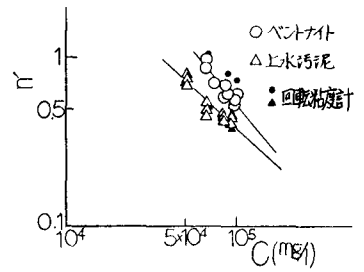


図-3. C と n' との関係

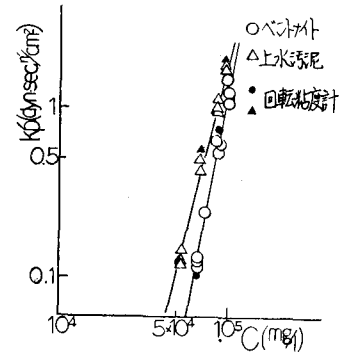


図-4. C と K_p との関係

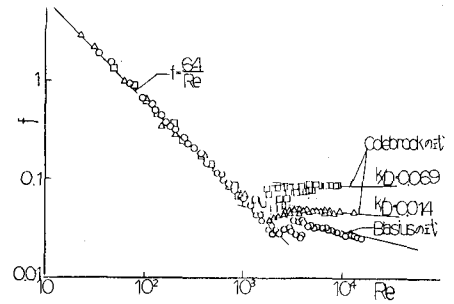


図-5. ベントナイトの Re と f との関係

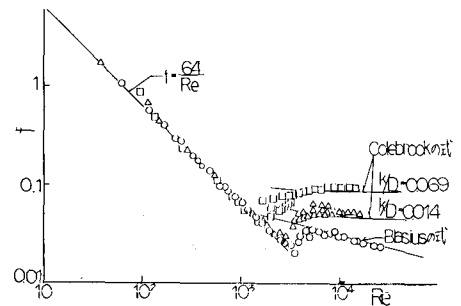


図-6. 上水汚泥の Re と f との関係