

1. まえがき:

懸濁液の管内流動に関する研究において、下水汚泥については盛んに行われているが、上水汚泥についてはまだ端についたばかりである。そこで、本研究は上水汚泥を対象に、その管路輸送における流動特性についての実験的検討を行ない、流動特性を示す因子として、降伏値、塑性粘度、管路の摩擦損失水頭、レイノルズ数、およびヘッドストレーン数を用いて検討を加え、管路輸送における汚泥の流体としての特性の把握を試みたものである。

2. 解析方法:

図1に示すように、流体の流動曲線はそのせん断応力 τ_w と速度勾配 (dv/dy) との関係で表わすことができ、その流動方程式は一般に(1)式で表現できる。

$$\tau_w = \tau_y + k' \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n'} \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 τ_y は降伏値、 k' は流体の粘稠度指数、 n' は流体の構造粘度指数。

塑性流体($n'=1$)は降伏値を有し、 τ_y を過ぎたところから流動を始め、ABの曲線部を経て、直線BCに移る。ビンガム流体は理想的な塑性流体で、その流動方程式は(2)式で表わされる。

$$\frac{\tau_w}{\mu_0} = \left[1 - \frac{\tau_y}{\tau_w} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^2 \right] \quad \text{----- (2)}$$

τ_y/τ_w は常に1より小さい値をとるため、 $\frac{1}{2} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^2$ は十分小さいと考え、省略すると、(3)式となる。

$$\frac{\tau_w}{\mu_0} = \left[1 - \frac{\tau_y}{\tau_w} \right] \quad \text{----- (3)}$$

これより、塑性流体の降伏値および塑性粘度が得られる。また、指数法則流体は降伏値がなく、 n' が1より大きい場合はダイラタント流体、1より小さい場合は擬塑性流体である。ただし

$$n' = \frac{d \log \tau_w}{d \log (\tau_w / \mu_0)} \quad \text{である。}$$

ビンガム流体のレイノルズ数については、図1のB点から考えるビンガムの粘度 μ_0 を用い、真のビンガム流体のレイノルズ数 Re を(4)式で定義する。

$$Re' = \rho D V / \mu_0 \quad \text{----- (4)} \quad \text{ここに、}\rho\text{は汚泥の見掛け密度、}D\text{は管径、}V\text{は流速。}$$

また、ファンニングの摩擦損失係数 f は(5)式で表わされることが出来る。

$$f = \left(\frac{\Delta P \cdot D}{4 L \rho V^2} \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) = \frac{\tau_w}{\left(\frac{\rho V^2}{2} \right)} \quad \text{----- (5)}$$

ここに、 L は測定区間長、 ΔP は圧力損失

3. 実験装置および方法:

図2に示すように、貯留槽内の汚泥はポンプによって管路に入り、流量測定用定水位タンクを越流し、ほとんどの貯留槽に戻される。輸送管路は内径28mmの透明塩化ビニル製で、4.49mの直線部分の摩擦損失水頭をマノメーターにより測定する。試料は仙台市国見浄水場の遠心濃縮された上水汚泥を用いた。

4. 実験結果および考察:

図3は上水汚泥の速度勾配と壁面せん断応力の関係を示しているものである。すべての濃度について、上水汚泥の流動曲線は同じような型となり、立ち上がり部分は擬塑性流体、直線部分はビンガム流体としての挙動を示し、降伏値 τ_y と塑性粘度 μ_0 が得られる。しかし、速度勾配が大きくなると、図4の直線部分の傾き $1/n'$ が1より小さくなり、ダイラタント流体の挙動を示す。図5は降伏値、塑性粘度と乾燥重量濃度との関係を示したものである。これより、両者と濃度の増加につれて小さくなることがわかる。

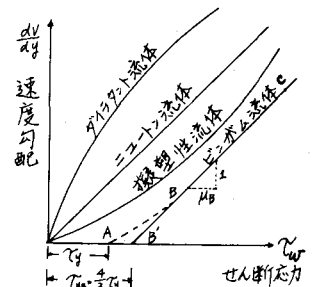


図1. 流体の流動方程式

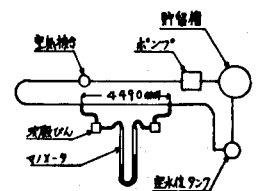


図2. 実験装置略図

図6は流速と摩擦損失水頭の関係を示したものである。摩擦損失水頭は流速の小さい層流域では、濃度の増加に伴って、水道水のそれより大きく、乱流域では、全て、ほぼ同じ値となる。これは乱流域においては粘性が無視できるが、層流域においては、粘性の影響が大きくなり、濃度の高いほど、塑性粘度も大きくなり、したがって、摩擦損失水頭も大きくなるものと思われる。つまり、濃度が摩擦損失水頭に与える影響は流速が小さいときには著しく、流速が大きくなると、ほとんどないと言える。

図7は摩擦損失係数と変のビンガムレイノルズ数 Re の関係を示したものである。レイノルズ数が大きい乱流域では、 f はレイノルズ数によらず、ほぼ一定値をとるが、レイノルズ数の小さい層流域は、 f と Re は直線関係となりこの直線関係は水道水の場合より上になり、しかも濃度の増加につれて、この距離は離れる傾向になる。しかし、より濃度の高い6.6%では、逆に、水道水に近づく傾向が見受けられる。この現象は降伏値と粘度の関数で表わされる Hedström 数($P.D.T_g/\mu_0$)で整理すると、より明確になり、 f は Hedström 数の増加につれて、大きくなると思われる。

図8は乱流域の場合について、指数法則流体の乱流摩擦抵抗式で整理したものである。本実験の濃度範囲内では、乱流域において、ダイラタント流体の挙動をし、したがって、(6)式のニュートン流体の乱流抵抗式の補正式が適用できる。

$$\frac{1}{f} = A \log [Re^* f^{-1/4}] + B \quad \text{----- (6)}$$

ここで、

$$Re^* = D^N V^{2-N} \rho / \mu_0^{N-1} g^{N-1} \quad \text{----- (7)}$$

$$f = 16 g^{N-1} V^{N-2} / \rho D^N \quad \text{----- (8)}$$

この式において、 $N=1$ のとき、ニュートン流体の乱流摩擦抵抗式となる。図4より、 $\log(\%)$ と $\log \tau_w$ のデータから、各濃度の N 、 g が算出できる。さらに、この N を用い、(6)式の型に整理した。図8から、明らかなように、各濃度はほぼ平行な直線となり、かつ、 N の大きくなるにつれて、直線はだんだん右方に移ることがわかる。

5. あとがき：

上水汚泥の管路輸送に関する流動実験より、上水汚泥の流動曲線は塑性流体の挙動を示し、また濃度の大きくなるにつれて、降伏値と塑性粘度は大きくなることわかる。さらに、層流域において、摩擦損失係数は Hedström 数の増加に伴ない増大し、乱流域においては、指数法則流体の乱流摩擦抵抗式が適用できる。しかし、本実験で用いた汚泥の濃度が3%~7%の範囲であるので、以上述べた現象に対する普遍性の検討は今後の課題である。

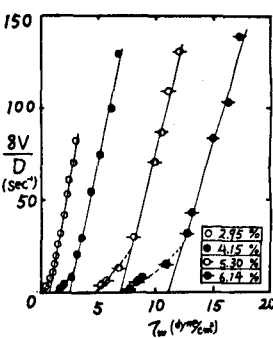


図3. 速度勾配(%)と壁面せん断応力(τ_w)

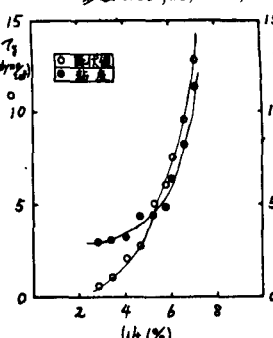


図5. 濃度(wt%)と降伏値(T_g)、塑性粘度(μ_0)

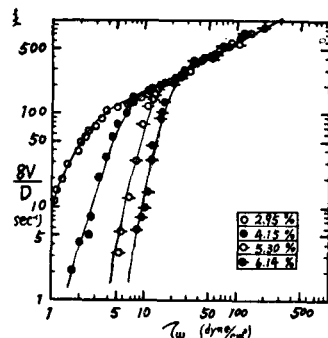


図4. 速度勾配(%)と壁面せん断応力(τ_w)

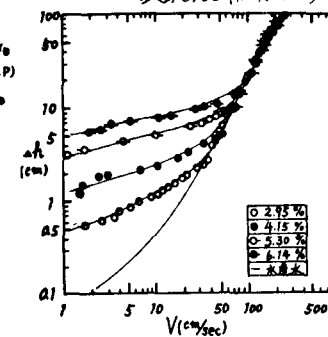


図6. 摩擦損失水頭(h)と流速(V)

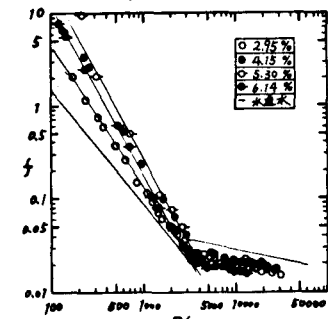


図7. 摩擦損失係数(f)と変のビンガムレイノルズ数(Re)

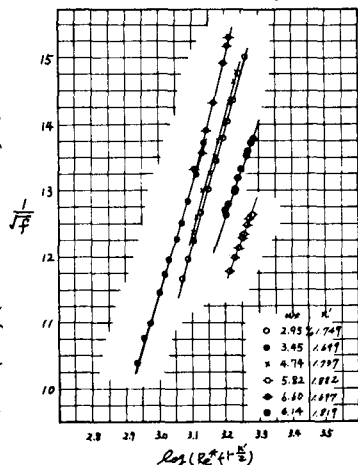


図8. 指数法則流体の乱流摩擦抵抗式