

東北大学工学部 学生員 ○陳 鴻毅
 " 正会員 佐藤 敦久
 静岡県庁 " 植松 静夫

1. 未だかつて、汚泥の管路輸送における流動特性に関する研究は最近盛んに行なわれているが、その流動特性中、管路流速分布に関する研究は未だ充分になされておらず、また、流速分布理論式は解析が困難なことから、経験に基づく実験式が多数を占めてきた。本研究は上水汚泥を指数法則流体として取り扱い、また、円管内における断面流速分布をピトー管によって実測し、この実測値と Prandtl の混合距離の理論による推定値とを比較検討したものである。

2. 解析方法：指数法則モデルに従う非ニュートン流体が十分に発達した乱流状態で流れる場合、円管内断面における任意の位置の流速 $u(y)$ は次元解析により、無次元数で表わせば(1)式のようなになる。

$$u(y)/u_m = A_n' \ln[(y/a)^{n'}] + B_n' \text{----- (1)}$$

したがって、指数法則流体における全管断面にわたる速度分布式は(1)式のように与えられる。また、指数法則流体の速度欠損則は(2)式のように与えられる。

$$\frac{u_{max} - u(y)}{u_m} = C_n' (n')^{0.25} \log(\frac{y}{a}) \text{----- (2)}$$

一方、摩擦損失係数 f と一般化されたレイノルズ数 Re_n の関係は(3)式から(3)式のように導くことができる。

$$\frac{1}{f} = D_n' \log [Re_n f^{1/n'}] + E_n' \text{----- (3)}$$

非ニュートン流体が乱流で流れる場合の速度分布の予測方法に Bradke, Lee and Chase らの方法がある。彼らは管内の任意の点におけるせん断応力を(4)式のように考えた。したがって指数法則モデルの場合、 τ_{rz} は(5)式のように示される。ただし、管内の速度分布は(6)式のべき級数と仮定する。境界条件 $y=0$ で、 $u(y)=0$, $\tau_{rz}=0$ を代入すると、(6)式は(7)式となる。また、平均流速 V は(8)式で示される。(7)式の $u(y)$ を(8)式に代入して積分すると(9)式となる。ここで用いられた K, n' は指数法則流体の流動方程式(10)式を用いることにより実験的に求められる。

$$\tau_{rz} = \tau_{r,z} + \tau_{r,z} x \text{----- (4)}$$

$$\tau_{rz}/\rho = K/\rho (-\frac{du}{dy})^{n'} + \frac{1}{\rho} \tau_{r,z} = \frac{a}{\rho} (\frac{\tau_{rz}}{\rho a}) = \frac{a}{\rho} (u_m)^b \text{----- (5)}$$

$$u(y)/u_{max} = 1 + a_1 (\frac{y}{a})^{(n'+1)/n'} + a_2 (y/a)^{2b} \text{----- (6)}$$

$$u(y)/u_{max} = 1 + (\frac{P-b}{b - (n'+1)/2n'}) (\frac{y}{a})^{(n'+1)/n'} + \frac{(n'+1)/2n' - P}{b - (n'+1)/2n'} (\frac{y}{a})^{2b} \text{----- (7)}$$

$$Q = \pi a^2 V = 2\pi \int_0^a u(y) y dy \text{----- (8)}$$

$$\frac{u(y)}{u_{max}} = 1 + 2a_1 n' / (3n'+1) + a_2 / (b+1) \text{----- (9)}$$

$$\tau_w = K (-\frac{du}{dy})^{n'} \text{----- (10)}$$

a : 半径 (cm)。 ρ : 流体密度 (g/cm^3)

y : 壁面からの距離 (cm)

u_m : $\sqrt{\tau_w/\rho}$ 摩擦+1/3速度 (cm/sec)

τ_w : 壁面せん断応力 ($dyne/cm^2$)

n' : 指数法則流体の構造粘度指数 (-)

K : 粘度指数 ($g \cdot cm^{-1} \cdot sec^{n'-2}$)

z : $a^n \rho (u_m)^{2n'}/K$ (-)

A_n', B_n' : 実験定数 (-)。 u_{max} : 最大流速 (cm/sec)

Re_n : $D^n \cdot v^{2-n'} \cdot \rho / K$ (-)

f : $\tau_w / (\rho V^2)$ (-)

C_n', D_n', E_n' : 実験定数 (-)

$\tau_{r,z}$: 分子粘性によるせん断応力 ($dyne/cm^2$)

$\tau_{r,x}$: 乱流運動によるせん断応力 ($dyne/cm^2$)

D : 管径 (cm)

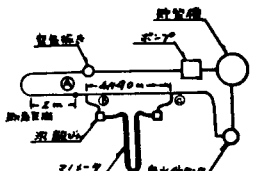
V : 平均流速 (cm/sec)

u_{max} : 最大流速 (cm/sec)

a_1, a_2 : 定数 (-)

$P = [\rho (u_m)^2 / K]^{1/n'} (\frac{1}{2u_{max}}) (-)$

$b = 1.5P$, b は 2 より大なる整数 (-)



実験装置の概略 図 1.

3. 実験装置および方法：実験装置を図 1 に示す。管路摩擦損失の測定区間は BC の直線部とする。実験はポンプによって試料を管路中に流し、流量を測定すると同時に圧力測定用の圧力差をマンメータによって読み取るものである。流速分布の測定はピトー管により図 1 の A 点で行なった。このとき測定区間は 2m を取った。ピトー管は内径 1mm 外径 3mm でこれより動圧を測定し、また、静圧は管壁から枝管を取り付けて測定し、差圧を測ることにより管路断面の流速を求めた。実験は上水汚泥の濃度と平均流速を変化させることにより行なった。供試材料は仙台市国見浄水場の遠心濃縮された上水汚泥を 0.074mm 以下の粗大固形物を取り除いたものである。

4. 実験結果および考察：図 2 に濃度が 3.38% ~ 5.99% の上水汚泥の速度勾配 (ρ) と壁面せん断応力 (τ_w) の関係を示す。速度勾配の小さい層流域の場合には上水汚泥の流動曲線は濃度によらず、すべて擬塑性流体の挙動を示す。

すことがわかる。この図と(10)式により、指数法則流体の構造粘度指数 n' および粘稠度指数 K が得られる。これより、濃度の増加と共に n' は減少し K は増大することがわかる。この n' と K を(9)式に代入して求めた流速分布推定曲線およびピット管による実測の流速分布を図3に示す。ここで平均流速は約3%secである。 n' の大きな薄い濃度においては実測値は推定式とほぼ一致するが、 n' の小さい範囲では、Brookley, Lee and Chaseの推定式は適用できない。それは(9)式による推定値が流体の粘弾性効果を無視しているためと考えられる。上水汚泥の場合には濃度の増加と共に、粘弾性効果が次第に顕著になり、その効果が無視できなくなる

と考えられる。また層 $u(y)$ 流域から乱流域へ移行する距離 y の変化が著しいため(9)式による上水汚泥の流速分布の推定法については今後さらに検討する必要がある

と考える。図4, 5, 6はピット管による実測の流速分布を(1)式(2)式および(10)式によって整理したものである。ただし、粘性底層および遷移域を除いた。乱流中心部の流速分布は各濃度とほぼ直線で表わされ(1)式の対数流速分布式(2)式(3)式(4)式(5)式(6)式(7)式(8)式(9)式(10)式が成立した。このとき、 A_w の値は $7.7 \sim 8.9$ となり、平均値は 8.6 である。 C_w の値は $6.6 \sim 9.4$ となり、平均値は 8.0 である。 E の値は $2.4 \sim 4.7$ となり、平均値は 3.4 である。

5. あとがき: 以上、糊沼条の上水汚泥の流速分布の例として、本実験結果が得られたがピット管による測定技術がまだ十分でないこと、上水汚泥の n' は汚泥性状濃度粒子の相互作用あるいはせん断速度の大きさなどにより変化し、一定値として扱いきれないことなど課題が多い。特に濃度が高くなると糸の流動性は非ニュートン粘性流体としてのみ考えることができない。また、流速分布の推定は粘弾性効果を無視したBrookley-Lee and Chaseの推定式によるが粘弾性効果が乱流にどのように影響するのかさらに検討する必要がある。層流底層および遷移領域についてまだまだ研究を十分行なわれていないため、今後検討を進める予定である。

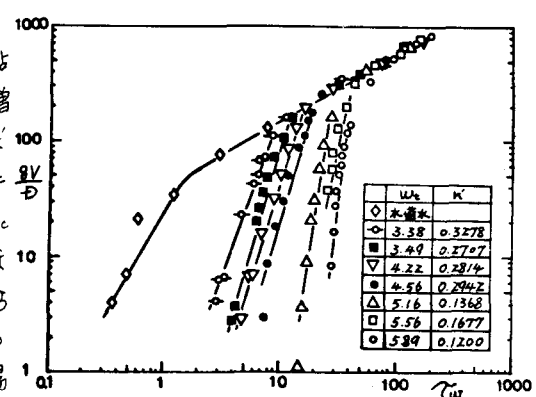


図2. せん断応力 τ_w と速度勾配 $(\frac{dv}{dy})$ の関係

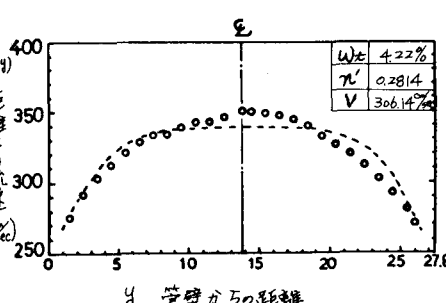


図3. 流速分布の推定値と実測値

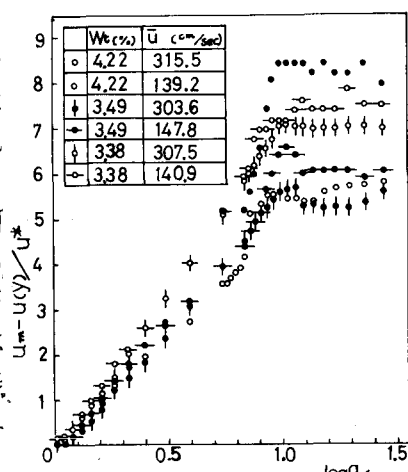


図5. 上水汚泥の速度欠損則

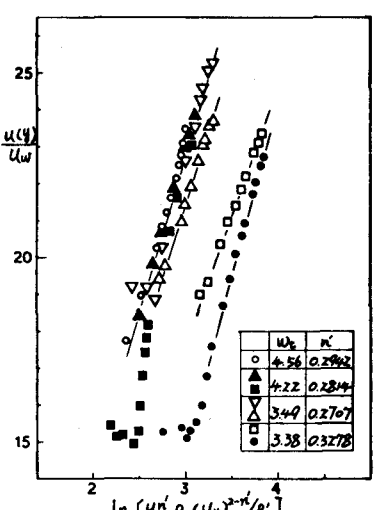


図4. 上水汚泥の対数流速分布式

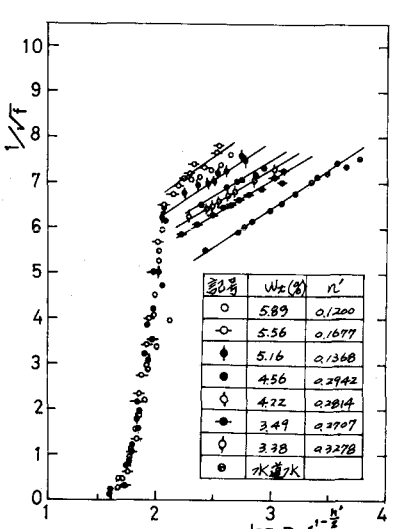


図6. 上水汚泥の乱流摩擦抵抗式