

II-162 開水路における非ニュートン流体の流れについて

横浜国立大学大学院 学生員 奥野雅量
山梨大学工学部 正会員 荻原能男
山梨大学大学院 学生員 三浦美香

1. はじめに

非ニュートン流体の開水路流れは、土石流やフレッシュコンクリートの流れ等に例を見ることができる。本研究は、非ニュートン流体としてビンガム流体を取りあげ、その流動特性について検討するものである。

幅10cm、長さ2mの長方形断面開水路に、水とベントナイトの混合流体を流し、等流水深を測定する実験を行った結果明らかとなったこの混合流体のビンガム流体としての定性的な特性については、第42回年次学術講演会で発表されている。

今回は前述同様の実験を行いデータを充実させ、さらに内径20mm、長さ約4mの管路をこの混合流体が流れる時の摩擦損失水頭を測定する実験を行い、ビンガム流体の物性値すなわち降伏応力と塑性粘度を管路抵抗則から算出した。そしてここで得られた物性値を用いて各濃度に対する物性値を推定するための式を定め、推定された物性値を用いて開水路におけるこの混合流体の流動特性について考察していく。

2. 物性値の推定式

2-1 降伏応力について

図-1に示すようにデータはプロットされた。近似線は混合流体の物理的な性質を考慮すると、直線 $C=0$ 及び直線 $C=(\text{塑性限界を与える体積濃度})$ のそれぞれに漸近すると考えられる。しかし実験範囲内では、データの分布は直線的な傾向が強く、適応範囲を $0\% < C < 4\%$ 程度に定め、直線近似する。このとき、降伏応力 τ_f の推定式は(1)式のように表される。

$$\log \tau_f = 1.12C - 5.52 \quad (\text{gf/cm}^2) \quad \text{ただし} \quad 0\% < C < 4\% \quad \cdots \cdots (1)$$

2-2 塑性粘度について

図-2に示すようにデータはプロットされ、物理的な意味を考慮したとき、液性限界を与える体積濃度付近において塑性粘度 η_p は非常に大きくなると考えられる。そこで

$$\eta_{p1} = \mu (1 - AC)^{-B}$$

と近似線の形を置いて、 $1/A = (\text{液性限界を与える体積濃度})$ とした。

図は縦軸に相対粘度 $\eta_r = \eta_{p1} / \mu$ (μ は水の粘性係数)をとっている。このとき、相対粘度 η_r の推定式は(2)式のように表される。

$$\eta_r = (1.0 - 15.6C)^{-6.00} \quad \cdots \cdots (2)$$

3. 等流抵抗則

開水路層流域における流れ方向の力の釣り合い式とビンガム流体の構成方程式から、平均流速 U_m を与える(3)式が導かれる

$$U_m = (\tau_0 R / 6 \eta_{p1}) (1 - \tau_f / \tau_0)^2 (2 + \tau_f / \tau_0) \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\frac{6 \mu m \eta_{p1}}{\tau_f} = \frac{\tau_0}{\tau_f} \left(1 - \frac{\tau_f}{\tau_0}\right)^2 \left(2 + \frac{\tau_f}{\tau_0}\right) \quad \cdots \cdots (4)$$

(3)式を(4)式のように無次元化し、縦軸に(4)式の左辺をとり、横軸に τ_0 / τ_f をとって(4)式を表す曲線

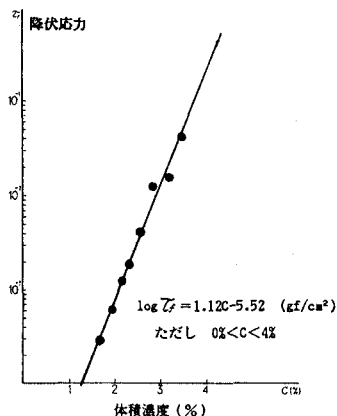


図-1 降伏応力と体積濃度の関係

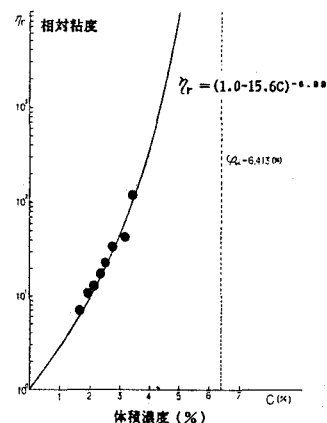


図-2 相対濃度と体積濃度との関係

と実験データを重ねると図-3のようになる。

図-3は理論を表す実線と実験データがほぼ一致することから、理論式及び推定した物性値が妥当なものであったことがわかる。

また、図-3に破線で示した直線は意味上ではニュートン流体の場合である。破線と実線及び実験データは τ_f が大きい範囲すなわち高濃度域においてニュートン流体と異なった特性を顕著に示していることが伺える。

4. 開水路層流域におけるレイノルズ数の拡張

4-1 定義

平均流速 U_m として等流抵抗則を用いると、長方形断面開水路層流域において

$$f = \frac{24}{Re [1-1.5(\tau_f/\tau_0)+0.5(\tau_f/\tau_0)^3]} \quad \cdots (5)$$

が成り立つ。ここに Re はニュートン流体に用いられるレイノルズ数である。ここであらためて開水路層流域におけるビンガム流体のレイノルズ数 ReE を

$$ReE = Re [1-1.5(\tau_f/\tau_0)+0.5(\tau_f/\tau_0)^3] \quad \cdots (6)$$

と定義する。

4-2 抵抗係数 f とレイノルズ数の関係

縦軸に抵抗係数 f 、

横軸にレイノルズ数を

とり、実験データをプ

ロットする。図-4は

横軸にニュートン流体

に用いられるレイノ

ルズ数 Re 、図-5は4-

1で定義された拡張さ

れたレイノルズ数 ReE

をとってある。両方の

図を比較すると図-5

においては層流域に

おいて、高濃度のデー

タが補正され、ニュート

ン流体と同様の特性すな

わち直線 $f = 24/(\text{レイノルズ数})$ 上に載るようになることがわかる。つまり、この拡張されたレイノルズ数を用いると、ビンガム流体も開水路層流域においてニュートン流体と同じムーディ図表を用いることができるようになる。

5. おわりに

本研究により開水路における非ニュートン流体であるビンガム流体の抵抗則が実験結果とよくあい、等流水深・流量と物性値の関係を確認することができた。

今回は、この抵抗則を用いて開水路層流域におけるビンガム流体のレイノルズ数を補正し、ニュートン流体と同様に扱えるようにしたが、今後、本研究の結果を用いて多方面にわたって考察を進め、さらに限界水深と濃度の関係など不等流についても検討し非ニュートン流体の流動特性をさらに究明していきたい。

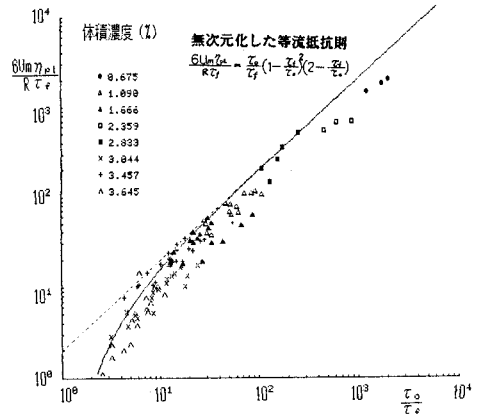


図-3 無次元化した等流抵抗則

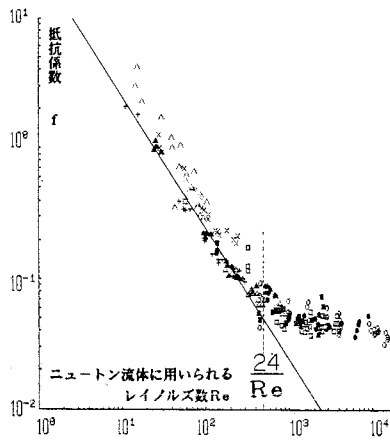


図-4 抵抗係数とニュートン流体に用いるレイノルズ数の関係

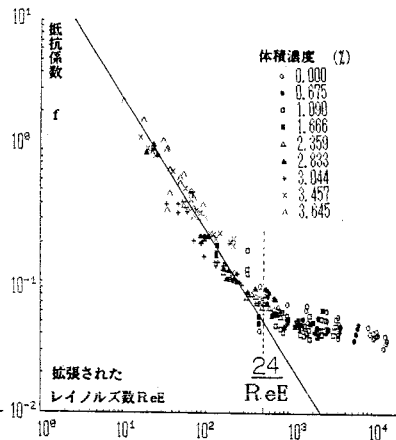


図-5 抵抗係数と拡張されたレイノルズ数の関係