

山梨大学工学部 正 員 萩原 能男
○ 山梨大学工学部 学生員 久泉 英俊
日立サ-ビスエンジニアリング(株) 中村 豊

1. はじめに

近年、輸送手段の一つとして注目を浴びて来たものに固液混合流体のパイプ輸送がある。これは、材料の継続的供給などの利点があり、作業能率、経済面でも流体輸送としては効果的手段である。土木工学の分野でもコンクリートのポンプ圧送などにみられるように、パイプ輸送が行なわれている。しかし、数々の問題があり、ビンガム流体の管内流動に関する研究が必要とされている。

本研究では、水平管を用いて流量とその損失水頭を測定し、ビンガム流体の抵抗則に基づく理論式より物性値を求め、また固液混合比によつての物性値の変化、管内流動などを検討した。

2. 実験装置と方法

実験装置は、長さ2.00m、内径15mmのアクリライト製のパイプを用い、水とバントナイトを混合して試験流体を作成した。実験方法は、水-バントナイト比(水とバントナイトの重量比%) 9, 11, 13, 15の4種について各々流量を15回変えて、それぞれに対して摩擦損失水頭を測定した。また、同じ水-バントナイト比で混合後、3日後、5日後の2種類について測定した。

3. ビンガム流体理論

ビンガム流体とは、せん断力(τ)とひずみ速度($\frac{\partial u}{\partial y}$)で表わした時、

$$\tau = \eta_m \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_f \quad (1)$$

(η_m : 塑性粘度, τ_f : 降伏応力)

となる。また、円管内を流動するビンガム流体では、流量は、

$$Q = \frac{\pi R^3 \tau_f}{8 \eta_m} F\left(\frac{\tau_f}{\tau_0}\right) \quad (2)$$
$$F\left(\frac{\tau_f}{\tau_0}\right) = 1 - \frac{4}{3}\left(\frac{\tau_f}{\tau_0}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{\tau_f}{\tau_0}\right)^4$$

(R : 管の半径, τ_0 : 檢流半径)

と表わされる。式(1),(2)をもとにして管内流動を検討した。また、物性値(塑性粘度と降伏値)は、実験値より最小自乗法により求めた。

4. 実験結果及び考察

(1) 塑性粘度と降伏値

水-バントナイト比(%)と塑性粘度との関係は、図2に示すように%11ではほとんど変化しないが、%9に至って急激に大きくなる。これに対し降伏値は、%の減少にともないほとんど同じ割合で大きくなっている。また、混合後3日後と5日後を比較してみると%13と%11とで塑性粘度と降伏値の動きに違いがある。%11では、塑性粘度、降伏値とも5日後が大きくなっているが、%13では、塑性粘度は5日後、降伏値は3日後が大きくなっている。

(2) 損失水頭(h_L)と平均流速(U_m)

図3に示すように、水-バントナイト比(%)15までのにおいて、流速が増加するとニュートン流体としての理論線に近づいてくる。また、

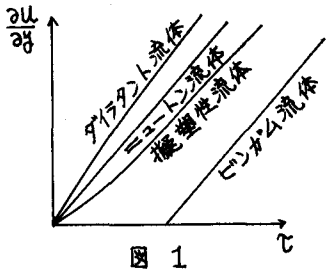


図 1

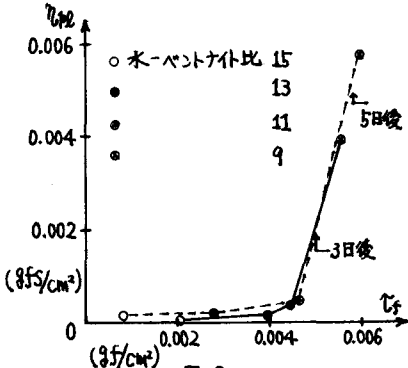


図 2

記 号 表			
δ	壁からの距離	π	3.14
ρ	密度	g	重力加速度
l	マノメータ間長	d	管内径, $d=2R$
U^*	摩擦速度	ν	動粘性係数
τ_0	壁面でのせん断力	I	エネルギー勾配

表 1

流速が増加すると理論線の下側に実験値がある。これは、ビンガム流体の場合、

$$\ell_2 = \frac{8 \tau_0}{\rho g \beta F(\frac{\tau_0}{\alpha})} \cdot \ell \cdot U_m \quad (3)$$

の関係があり、 $0 \leq F(\frac{\tau_0}{\alpha}) \leq 1$ である。これより理論線より下側になることはないが、実験値が下側にあるのは、物性値が多少変化しているためであると考えられる。

(3) 抵抗係数とレイノルズ数

$\eta/\nu = 13$ を用いて、ニュートン流体と考えた時のムーディ図表が、図4である。図5は、ビンガム流体と考えた時のムーディ図表である。図4より、レイノルズ数 Re の大きい所では、理論線にほぼ一致しているが、 Re が小さくなるほど理論線より離れてくる。

ビンガム流体の流れにおける慣性力と抵抗力の比として定義した拡張されたレイノルズ数 Rey は、

$$Rey = \frac{U_m \cdot d}{\eta_m / \rho + \ell_2 \cdot \tau_0 \cdot d / \rho \cdot U_m} \quad (4)$$

で表わされ、一般に ℓ_2 (無次元係数)が未定のため Rey を求めることができない。本研究では、Darcy-Weisbachの式

$$\ell_2 = f \frac{\ell}{\alpha} \frac{U_m^2}{2g} \quad (5)$$

において、層流の場合に

$$f = \frac{64}{Rey} \quad (6)$$

となることを考慮して、式(3)より

$$Rey = \frac{U_m \cdot d}{\eta_m / \rho} F(\frac{\tau_0}{\alpha}) = Re \cdot F(\frac{\tau_0}{\alpha}) \quad (7)$$

を導びいた。これを用いてムーディ図表を作成したものが、図5である。図4と比較すると Rey が小さくても理論線に近づいている。他の η/ν でも同様の結果になり、拡張されたレイノルズ数 Rey を用いる方が良い。

(4) U/U^* と U^*/ν

層流時のニュートン流体とビンガム流体の無次元量 U/U^* と U^*/ν を比較したのが、図6である。ニュートン流体では、

$$\frac{U}{U^*} = \frac{U^* y}{\nu} \quad (8)$$

であるが、ビンガム流体では、式(1)を用いて

$$\frac{U}{U^*} = \frac{U^* y}{\eta_m / \rho} (1 - \frac{\tau_0}{\alpha}) \quad (9)$$

となり、ニュートン流体の場合は $\tau_0 = 0$ であるが、ビンガム流体の場合は $\tau_0 \neq 0$ であるからニュートン流体より U/U^* が小さな値となる。図6は、この特徴をよく表わしている。また、栓流の部分もよくわかる。

4. 結 論

- 1) ビンガム流体の実験として水平管を用いると、塑性粘度、降伏値を同時に求めることができ、精度も高まる。
- 2) これまで拡張されたレイノルズ数は、未定係数の為求めることができなかったが、栓流半径を知ることで求めることができる。その結果、ムーディ図表を用いることが可能になった。
- 3) 層流時のビンガム流体の流速分布は、降伏値があるためにニュートン流体のそれとは異なり、流速は小さくなり、図6に示すように栓流を供う。

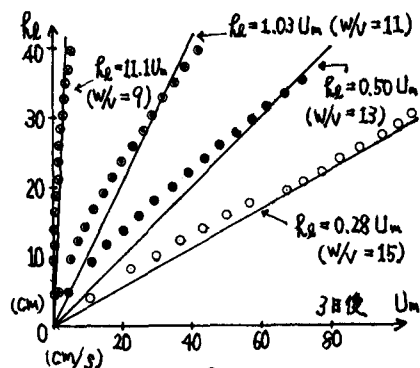


図3

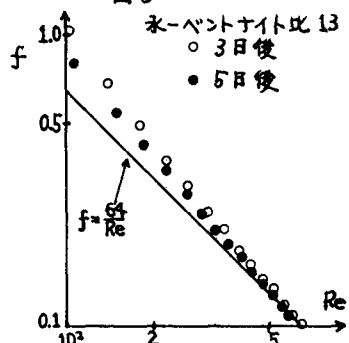


図4

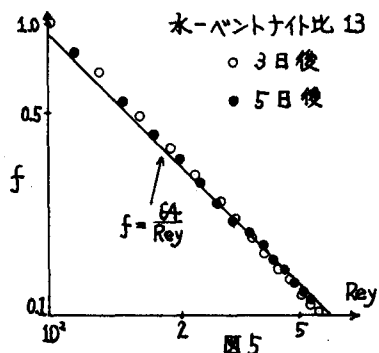


図5

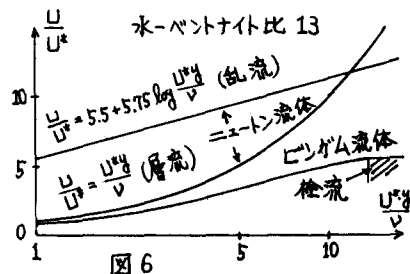


図6