

II-364 非ニュートン流体の構造粘度指数と流体粘度指数の測定に関する実験的研究

早稲田大学理工学部 正会員 遠藤 郁夫
 日本大学大学院 学生員 ○奈良 松範
 早稲田大学理工学部 岩崎 孝道

1. 緒言 非ニュートン流体の流動特性を解析するにあたって、まず第一に構造粘度指数と流体粘度指数(n および k)を知る必要がある。 n と k の測定については一般に回転粘度計が用いられる。一方当研究室では数年来、管路実験より n と k を求める方法を検討してきた。特に管路によつて求める方法は粗大粒子を含む下水汚泥あるいは砂粒子を含む粘度スラリー等、回転粘度計で直接粘度を求めることの困難な流体に極めて優れた方法とも言える。また非ニュートン流体の実際の流動状態のもとで n と k を求めるので、現実の値に極めて近いと考えることが出来る。

しかしながら回転粘度計と管路実験による方法からそれぞれ n と k を求め、その相関性を十分に検討する必要がある。本研究はベントナイトスラリーを用いて回転粘度計と管路実験から n と k を求め、その相関性について実験的研究を行つたものである。

2. 実験方法 スラリーの粘度測定は図-1に示す同心円筒回転粘度計を用いて測定した。この回転粘度計は外筒回転型であり、回転数は0 rpm から450 rpm の範囲で50 rpm ずつ変化させてトルクを測定した。回転粘度計の外筒半径(R_c)、内筒半径(R_b)および内筒の長さ(L)はそれぞれ1.50 cm, 1.25 cm, および7.0 cm である。スラリーの摩擦損失水頭の測定には図-2に示す実験管路を用いた。管路は塩化ビニル製であり、管径は0.92 cm のものを用いた。助走区間および圧力損失測定区間はいずれも200 cm である。流量は重量法で、圧力損失はマンノータで測定した。スラリーにはベントナイトを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 回転粘度計および管路実験で求めた n および k

回転粘度計でスラリーの粘度を測定した場合、測定回数とともにトルクが減少し、ある平衡状態に達する。一方、スラリーの管内流動状態を考えると管路内ではスラリーは十分に攪拌されているので、回転粘度計で平衡状態に達した回転数とトルクとの関係から次式を用いて速度勾配($G(\tau)$)と剪断応力(τ)を求めた。

$$G(\tau) = \frac{4\pi N}{1-\frac{R_b^2}{R_c^2}} \left[1 + k_1 \left(\frac{1}{n''} - 1 \right) + k_2 \left(\frac{1}{n''} - 1 \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b L} \quad (R_b: \text{内筒半径}, R_c: \text{外筒半径}, L: \text{内筒長さ}) \quad (2)$$

$s = R_c/R_b$, $k_1 = \frac{s^2-1}{2s^2} \left(1 + \frac{2}{3} \ln s \right)$, $k_2 = \frac{s^2-1}{6s^2} \ln s$, $n'' = \frac{d(\log M)}{d(\log N)}$ (M : トルク, N : 回転数)
 ベントナイトは擬塑性流体として近似できるため、 $G(\tau)$ と τ との間には次の関係がある。 $\tau = k(G(\tau))^n$ (3)
 また管路実験では、次式で n および k を求め、さらに n と n' および k と k' との間には、次の関係があるとされている。

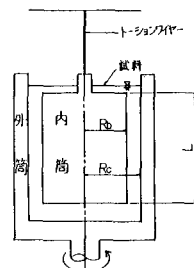


図-1 回転粘度計

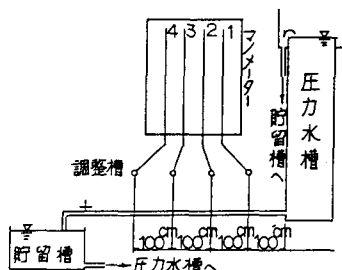


図-2 実験装置の概略

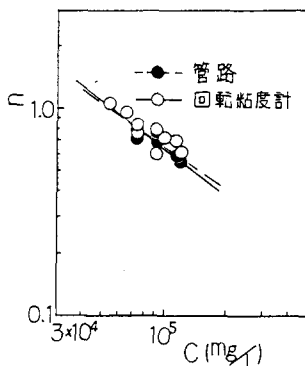


図-3 濃度と構造粘度指数

$$\frac{D \Delta P}{4 L} = k' \left(\frac{8 V}{D} \right)^{n'} \quad \text{--- (4)} \quad (D: \text{管径}, \Delta P: \text{圧力損失}, V: \text{流速})$$

$$n = n' \quad \text{--- (5)} \quad k' = k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad \text{--- (6)} \quad (L: \text{管長})$$

図-3および4はそれぞれ管路実験および回転粘度計で求めた固形物濃度 C と n' および C と k' の関係を示したものである。ここで管路実験および回転粘度計から求めた n' および k' について統計的検定を行った。すなわち、これらの示すデータ分布にも検定を行った結果、有意水準 10% もとで両方の平均値および分散に有意な差がないことが判明した。したがってベントナイトの場合、管路実験と回転粘度計で求めた n と k および n と k の間には、十分に高い相関性があることが認められる。

3.2 摩擦損失水頭の計算値と実験値の比較

管路実験と回転粘度計から求めた n と k は十分な相関性が認められることから、回転粘度計で求めた n と k から摩擦損失水頭の計算値 ($h_{f(c)}$) を求め、管路実験による実験値 ($h_{f(e)}$) と比較検討を加えた。図-5は管路で求めた広義のレイノルズ数 (Re) と摩擦損失係数 (λ) との関係である。これらの関係式は次のとおりである。

$$\text{層流領域} (Re \leq 2000) \quad \lambda = \frac{64}{Re} \quad (7)$$

$$\text{乱流領域} (Re \geq 5000) \quad \lambda = 0.3048 Re^{-0.246} \quad (8)$$

$$\text{ただし} \quad Re = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{8^{n-1} k'} \quad (P: \text{密度}) \quad (9)$$

摩擦損失水頭の計算値 ($h_{f(c)}$) は次のようにして求めた。すなわち回転粘度計から求めた n と k は、

$$n = 4.394 C^{-0.7663} \quad \left(k: \text{dyn} \cdot \text{sec}^2 / \text{cm}^2 \right) \quad (10)$$

$$k = 9.70^{-26} C^{5.045} \quad (C: \text{mg/g}) \quad (11)$$

で表わされるので、(10)より(9)で求めた n および k を用いて(5)および(6)式で Re 数を求め、(7)(8)式で λ を計算した。摩擦損失水頭は次式で求めた。

$$h_{f(c)} = \lambda L V^2 / 2 D g \quad (12)$$

ただし、遷移領域 ($Re = 2000 \sim 5000$) では乱流領域の関係式(8)を用いて λ を求め摩擦損失水頭を計算した。図-6は Re 数と摩擦損失水頭の計算値の誤差率 (E) との関係である。ここで E は次式より算出した。

$$E = (h_{f(c)} - h_{f(e)}) / h_{f(e)} \quad (13)$$

図-6から E は層流領域では $\pm 10\%$ 、遷移および乱流領域では $\pm 20\%$ 以内にあり、回転粘度計から求めた摩擦損失水頭の計算値は実験値に良く一致することが認められる。

4. 結論

ベントナイトスラリーを用いて、管路実験および回転粘度計から求めた構造粘度指数および流体粘度指数についての相関性に検討を加え、さらにこれから求めた摩擦損失水頭の計算値と実験値との適合性を調べた結果、次の結論を得た。

- (1) 管路実験および回転粘度計で求めた構造粘度指数、さらに流体粘度指数は高い相関性がある。
- (2) 回転粘度計から求めた摩擦損失水頭は実験値と良く一致する。

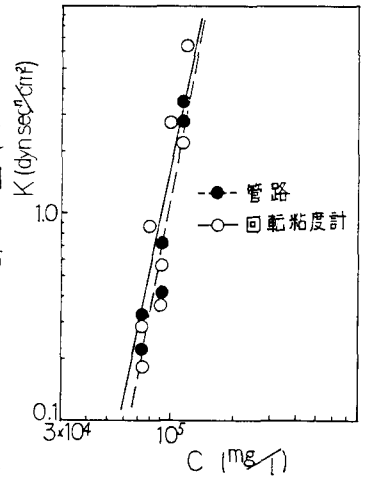


図-4 濃度と流体粘度指数

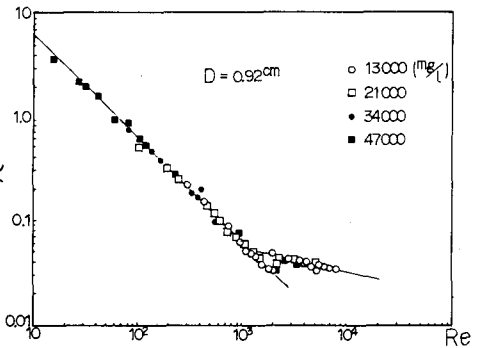


図-5 レイノルズ数と摩擦損失係数の関係

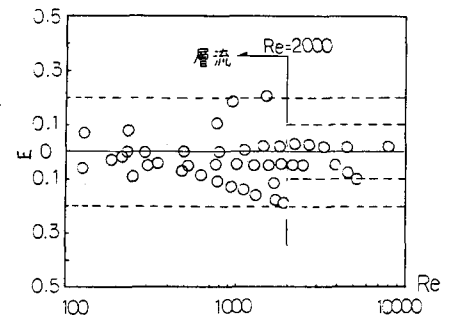


図-6 摩擦損失水頭の誤差率