Ⅱ—35　泥漿のレオロジー的性質について

京都大学防災研究所　正員　矢野勝正
京大工業教員養成所　正員○大同淳之

<u>目　的</u>　泥漿のような非ニュートン流体の流動式は数多くあり，さらにいずれも二つ以上の常数が必要で，たとえば，$\tau=\mu(du/dy)^n$ と表されるベキ法則では，粘性係数μ，構造指数nが必要である。ここに，τはせん断応力，du/dyはずり速度である。しかし，現在では，どの条件にはどの流動式が適切か，これを決定する方法はなく，常数の性格も不明である。この研究は，泥漿の変形を測定して，流動式の適用範囲と常数の決定に役立たせようとするもので，今迄にえられた結果について報告する。

<u>測定方法</u>　図1に示す共軸円筒回転型の粘度計を用いた。器械A，Bともに二重円筒の間に試料を入れ，内筒または外筒を回転させて試料に変形を与え，内筒の表面にはたらく力が測定できる。測定に用いた土の粒径を表1に示す。

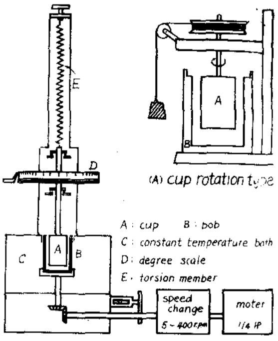

図1　粘度計

<u>測定結果と考察</u>　測定結果を概説すると，(A)の器械で一定荷重を与えると，試料により，一定の速度で回転する場合と，時間とともに回転が減少する場合(図2)，(B)の器械で一定のずり速度を与えたとき，一定の応力を示す場合，時間とともに応力の増してくる場合(図3)，および時間とともに応力の減少する場合(図4)がえられた。試料が擬塑性流動 $\tau=\mu(du/dy)^n$ ……(1)，塑性流動 $\tau-\tau_y=\mu(du/dy)$ ……(2) の場合には，角速度ωと内筒にはたらくトルクTの間には，それぞれ

$$\omega=\frac{1}{2n\mu}\left(\frac{T}{2\pi h}\right)^n\left(\frac{1}{R_i^{2n}}-\frac{1}{R_o^{2n}}\right) \quad \cdots\cdots(3) \qquad \omega=\frac{T}{4\pi h\mu}\left(\frac{1}{R_o^2}-\frac{1}{R_i^2}\right)+\frac{\tau_o}{\mu}\ln\frac{R_i}{R_o} \quad \cdots\cdots(4)$$

の関係があり，$\log\omega$と$\log T$，またはωと$(T/4\pi h)(1/R_o^2-1/R_i^2)$の関係から，$n$，$\mu$および$\tau_y$を知ることができる。ここに$h$は内筒の液に接している深さ，$R_i$，$R_o$は内，外筒の半径である。(1)式または(2)式による流動型式の判定は，粒子の濃度が低いときは有効で，はっきり判定された。図5は試料3の実験結果を(4)式の関係に表したもので，直線の勾配よりμが得られる。ただし，図5において，塑性流動とみなせるのは直線関係の成立している部分で，直線を延長して$\omega=0$の横軸の截点より求まるτ_yを降伏値とする塑性流動である。直線と曲線の交点を上限降伏値とすると，上限降伏値より少ない曲線の部分は，粘弾性の性質をもつ領域である。この領域の変

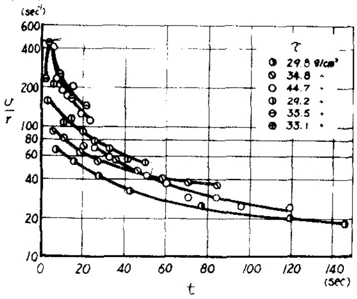

図2　一定荷重によるクリープ

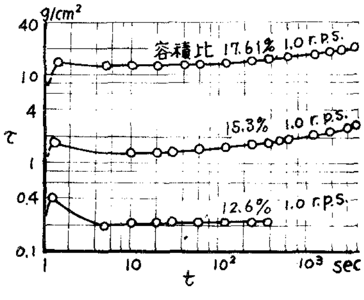

図3　一定歪速度による場合

表1　測定試料の粒径

No.	中央粒径 (mm)	粒径分布	標準偏差	比重	呈色
1	0.0034	対数正規	2.92	2.703	白
2	0.0062	〃　〃	3.04	2.706	〃
3	0.0062	〃　〃	4.70	2.810	黄
4	0.0079			2.53	ベントナイト

形は，線型性がなりたつと考えると，Bolzman の基礎方程式よりある時間zにおける歪みϵとτの関係を，$\epsilon = c\tau^{\alpha}$ ....(5) とすると，クリープの場合，時刻tにおける歪みは $\epsilon = \tau/\gamma + \tau^{\alpha}\int_0^t \frac{dc}{dT}dT$, $T = t - z$ と表せる[1]。$(dc/dT)dT = K\,dt$ とすると，粘弾性，塑性の両域を通じての変形量は，上限降伏値に達した時間をt_uとして

$$\epsilon = \tau/\gamma + \tau^{\alpha}\int_0^t K(t)\,dt + 1/\mu(\tau - \tau_y)(t - t_u) \quad \cdots\cdots (6)$$

で求められる。実験の結果では，上限降伏値ϵ_uまでの変形ϵと時間tの関係は，$\epsilon/\epsilon_u = (t/t_u)^b$ ......(7) と表せるので，（図6），(6)式の右辺第1，第2項を(7)式で表わすと，

$$K(t) = (\epsilon_u/\tau^{\alpha})\cdot b\cdot(t/t_u)^b\, t^{-1} \quad \cdots\cdots (8)$$

となる。bの値は，この実験では試料3，濃度13 %で $b = 0.86$ であった。

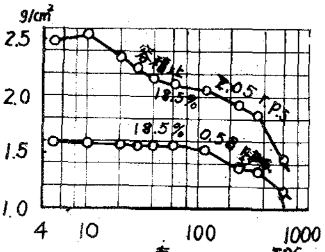

図4

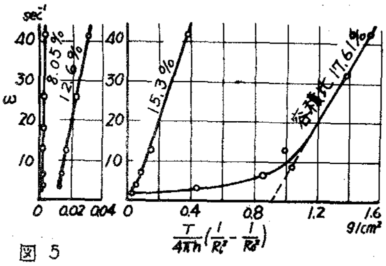

図 5

一方，試料2では，クリープ，一定ずり速度いずれの試験法によっても擬塑性流動を示した。この試料は試料3と同じ粒径であるから，泥漿の性質が，粒子の形状，寸法または比重だけでなく，水分子の水和の状態によって，著しく作用されることを示している。1例として，$\tau_y = 1.7\times10^{-2}\ g/cm^2$，$\mu = 0.42\times10^{-2}\ g\cdot sec/cm^2$の値を示したベントナイト泥漿に，塩化カルシュウムを添加すると，$\tau_y \fallingdotseq 0$ $\mu = 0.25\times10^{-2}\ g\cdot sec/cm^2$の値に変化した。これは水和の変化と考えられる。水和が増すほど粒子間にブリッヂが形成され，沈降速度が減少すると考え，試料2，3の濃度による沈降速度の変化を，

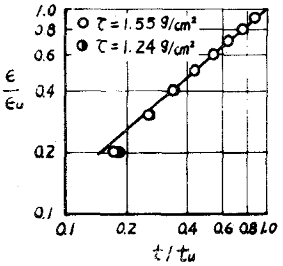

図6 変形と時間の関係

$\{(ds/dp)_{t=t_1} - (ds/dp)_{t=0}\}/t_1 = Z$ ....(9) $Z = a_0 - b_0\{(ds/dp)_{t=0}\}^n$ ......(10) a_0, b_0は定数：dsは粒子重量とその懸濁容積の比，dpは最充填密度，で表わすことにする[2]。試料2，3のnは低濃度で-1.60とほぼ同値であるが，$ds/dp = 0.3$位より試料3は急増した。また$dZ/d\{(ds/dp)_{t=0}\}^n$の値は試料2がずっと大きい。以上の方法で，水和の強さを判定できるのではないかと考えている。

このような水和の影響をうける領域では，粘性係数も急激に大きくなり，例えば図5の試料では，容積濃度12.6 %，17.6 %でそれぞれ $\mu/\mu_0 = 47$，および148となり，いわゆるEinstein流の粘度式では，いかに水和の影響を加えても無理なように思われる。

したがって，水和の影響を受けるときは，図7の力学模型を考え，ただし粘性μ_2はEyringの反応速度過程の考えにしたがうとする。

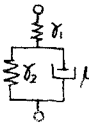

図7 力学模型

$$d\epsilon_1/dt = (1/\gamma_1)(d\tau_1/dt) \quad \cdots\cdots (11) \qquad d\epsilon_2/dt = (1/\gamma_2)(d\tau_2/dt) + A_2\sinh(B_2\tau_2) \quad \cdots\cdots (12) \qquad \epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

ここにA_2，B_2はレオロジー常数で，$d\tau/dt = 0$のとき $\epsilon = a_r + b_r\log t$ ....(13) a_r, b_rは常数の形となり，図3，4の$d\epsilon/dt = const = C_0$のとき

$$\left|\frac{e^{B_2\tau}+\beta}{e^{B_2\tau}-\alpha}\cdot\frac{e^{B_2\tau_0}-\alpha}{e^{B_2\tau_0}+\beta}\right| = e^{-\frac{(\alpha+\beta)}{2}\gamma_2 A_2 B_2 t} \quad \cdots\cdots (14)$$

ここに，$\alpha = C_0 + \sqrt{C_0^2+1}$，$\beta = C_0 - \sqrt{C_0^2+1}$，$\tau_0$は$t = 0$における応力とする。常数の決定に適当な実験結果がないので常数は決定されてないが，粘土のクリープ試験の結果からみて，十分有用と考えている。

この研究の一部に，文部省試験研究費の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献；1) 仲野良紀：農業土木学会講演会講演要旨；昭36．5． P.12
2) 長崎 勲，渡辺 明，材料試験 11巻106号 P.392