

II-30 土石流に関する基礎的研究

京都大学防災研究所 正員 工博 矢野勝正

京大工業教育養成所 正員 ○大同淳之

1. はしがき 土石流は谷間に堆積した土石が、水分の滲透によって飽和し、流動性を得て滑動するものである。停滞した土石流を観察すると、巨大な石礫も少なくないが、石礫の間には、常に可塑性と稠密性に富んだ泥土が充填する。そこで我々は土石流の組成を泥土の間に石礫が混合したものである、また断面内では均質であると考えことにする。

2. 土砂と水の混合物の流動 土砂と水の混合物の流動が、非ニュートン的な挙動を示すことは、すでにいくつかの報告があり、我々も開水路あるいは円管における実験の結果からこれを確かめた。これらの流れの応力と変形の関係は次式で表される。

$$\text{Bingham: } \tau - \tau_y = \mu_b (du/dy) \quad \dots (1)$$

$$\text{pseudoplastic: } \tau = \mu_p (du/dy)^n \quad \dots (2)$$

ここに τ は摩擦応力、 τ_y はせん断降伏値、 μ_b 、 μ_p は塑性および擬塑性粘度、 n は構造指数、 du/dy は変形速度である。

さきの実験にひきつづき、我々は、たとえは(2)式を用いてこれらの流動を表わす場合、固体分濃度がどの程度

まで適用できるかどうか検討するために、水分0の状態即ち乾燥した砂を流してその流速分布を調べた。その結果、図-1に示すように、この場合においても(2)式の関係が成立する。以上の結果、たとえは(2)式を $n=1$ とするとニュートン流体であるから、土砂を全然含まない流れから、土砂粒子のみの流れまで、(2)式の関係が適用できることになる。したがって土砂と水の混合物の流速分布および平均流速は(1)または(2)式から次のように表せる。

$$\text{Bingham: } u = \frac{h\tau_y}{\mu_b} \left(\frac{1-2a+2ay-y^2}{2a} \right), \quad a = \frac{y^*}{h} = \frac{\tau_y}{\tau_0}, \quad y^* = \frac{y}{h} = \frac{\tau}{\tau_0} \quad \text{但し } \begin{cases} y^* \text{ は表面からの距離} \\ y^* \text{ は } \tau_y \text{ の生じる表面} \\ n \text{ からの距離} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_m = (h\tau_y/\mu_b) \cdot (a^2 - 3a + 2)/6a \quad \dots (4)$$

$$\text{Pseudoplastic: } u = (\tau_0/\mu_p)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot h \left\{ 1 - \left(1 - \frac{y}{h} \right)^{1+\frac{1}{n}} \right\} \quad \dots (5)$$

$$u_m = (\tau_0/\mu_p)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot h \left(1 - \frac{n(n+1)}{2n^2 + 3n + 1} \right) \quad \dots (6)$$

実際の土石流が上式で説明できるかどうか断定はできないが、流動の役割を果すのは泥土であって、その中に混入された巨大な石は、せん断降伏値 τ_y あるいは粘度 μ_b または μ_p などの物理常数に変化を与えるだけと考えると、土石流の流動に適用可能と考えられる。式(3)~(6)を用いて実際の土石流の流動を予測するには、底面に働くせん断応力 τ_0 、粘度 μ_b または μ_p 、構造指数 n あるいはせん断降伏値 τ_y を与える必要がある。以下それらの値について考察する。

3. 底面に働くせん断応力 τ_0 底面に働くせん断応力 τ_0 は、土石流の含水量が大きいと

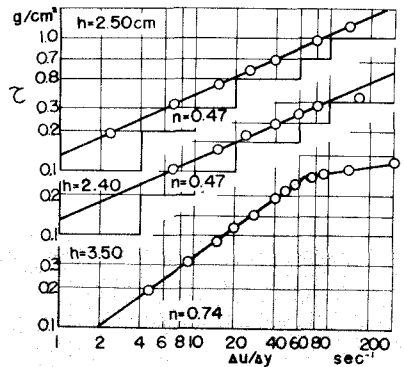


図-1 乾燥砂の流動曲線
($d_0 = 0.897\text{mm}$ $I = 34^\circ 30'$)

きは液体の場合と同じく、 $\tau_0 = \rho g h I_{(7)}$ 、ここに ρ は土石流の密度、 I は流路の勾配、で得られる。しかし土石流の含水量の小さい場合、Bingham 型式で流動する場合は、流路の形状が梯型の場合が多いので、粒子の凝集力あるいはガミ合せによってアーチ作用が働き、底面圧力の軽減が考えられる。図-2 に示すような梯型の流路において、座標を図に示すようにとり、高さ dy の部分の下面 AB に作用する圧力を p 、上面 $A'B'$ に作用する圧力を $p+dp$ 、下面および上面の面積を F および $F+dF$ 、 dy の部分の体積を dV 、土石流の単位体積重量を w_s 、側壁に垂直に働く力を P_n 、側壁の摩擦によるせん断応力 T_n とすると、 dV の部分に働く y 方向の力の釣り合いは、

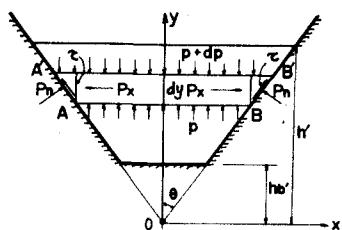


図-2 記号

と、 $(p+dp)(F+dF) + w_s \cdot dV = PF + 2P_n S \sin \theta + 2T_n S \cos \theta$ (8)

ここに S は側壁 BB' の面積、 θ は側壁の傾斜角である。 $F = zy \tan \theta$ 、 $dF = 2dy \tan \theta$ 、 $S = dy / \cos \theta$ 、 $dV = (zy \tan \theta + dy \tan \theta) dy \div 2y \tan \theta dy$ 、を式(8)に代入して整理すると、

$$(P/y) + (dp/dy) + w_s = (P_n/y) + (T_n/y) \cot \theta \quad (9)$$

$P_n = P \sin^2 \theta + P_x \cos^2 \theta$ 、 $P_x = kp$ とすると、 $P_n = P(\sin^2 \theta + k \cos^2 \theta)$

さらに、 $k \neq 1$ 、 $T_n = C'p$ 、 $C' \cot \theta = C$ 、とすると、

$$(dp/dy) + w_s = C(p/y) \quad (10)$$

$y = h'$ で $p = 0$ の条件でとくと

$$C \neq 1 \quad p = \frac{w_s h'}{C-1} \left(\frac{y}{h'} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{y}{h'} \right)^{C-1} \right\} \quad (11)$$

$$C = 1 \quad p = w_s h' \left(\frac{y}{h'} \right) \log_e (h'/y)$$

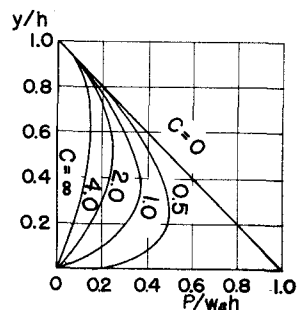


図-3 圧力分布

流路の底部では、 $C \neq 1 \quad p_0 = \frac{w_s h'}{C-1} \left(\frac{h_0}{h'} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{h_0}{h'} \right)^{C-1} \right\}$

$$C = 1 \quad p_0 = w_s h' \left(\frac{h_0}{h'} \right) \log_e \left(\frac{h'}{h_0} \right) \quad (12)$$

図-3 は式(11)を図示したもので、土石流の含水量によって C の値は $0 \sim \infty$ に変化すると考えられ、ほとんど液体に近いときは $C=0$ で p は深さに比例する。実際の土石流の場合に C の値がどれ位であるか不明であるが、今後の研究によって得られるであろう。

4. 粘度 M_0 , M_p 非ニュートン流体の粘度は式(1),(2)

の関係を図示した流動曲線を示すべきであるが、ここではここでは見掛け粘性 M_0 で表すことにする。ここに $M_0 = \tau_y / (du/dy) + M_p$ 、または、 $M_0 = M_p (du/dy)^{n-1}$ である。土石流の粘性は粘土またはセメントに水を加えた程度であろう。せん断は固体粒子のまわりの吸着層が支持すると、森、乙竹氏の式が成立する。 $M_0/M_p = 1 + 3/(x_0' - x_0'')$ 文献3)の粘土の粘性を適用すると良く一致するがモルタルの場合は揺変性のためにせん断時間によって変化する。これらの詳細は、 η 、 τ_y の値などと共に後刻報告する。

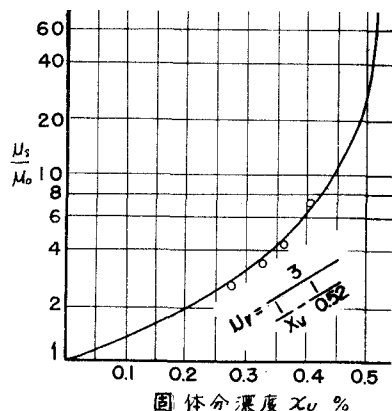


図-4 相対粘度と濃度の関係

参考文献 1) 矢野、大同 土木学会講演会概要 16回、17回、 4) 粉体(丸基)

2) 森、乙竹 化学工学(1955) 20巻 9号 P.488 (1962)

3) レオロジー(模写) (1959) P.179