

III-9 土砂の流動に関する実験的研究

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

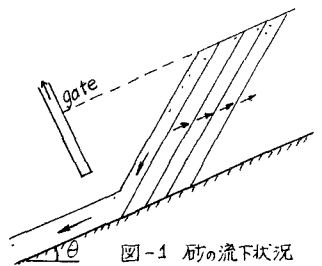
(1) 実験の目的 我々は土石流の流動の特性の究明を目的として、土砂混合流体の実験を行い、実験結果を非ニュートン流体として整理した。その結果は土砂混合流体の流動は構造指数 n 、物質常数 μ 、あるいはせん断降伏値 τ_0 と与えることによって説明できることを認めた。したがって例えば非ニュートン流体で土砂混合流体に比較的広範囲に適用可能なべき法則で表すと、応力と変形の関係は次式で示される。

$$\tau = \mu (du/dy)^n \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここに τ は摩擦応力、 μ はニュートン流体では粘度に相当する物質常数、 du/dy は変形速度、 n は構造指数と呼ばれるものである。上の式からみちびかれる種々の関係は、 $n=1$ とするとニュートン流体であるから、土砂を多量に含む流れから土砂を全然含まない液体だけの場合まで取扱えるものとしてよい。したがって問題は多々あるとしても根本的には各物質の構造指数、物質常数の決定にある。

一方、土砂の濃度が増すにしたがって粘弾性的な性質あるいはべき法則の適用の限界といったものが現れると予想されるが、現在のところこれに対する適切な実験例もないようである。以上の理由から、液体を含まない極限の状態である砂のみの流動の状態を測定して、その特性を究明せんとしたものである。

(2) 実験の方法 実験は幅 0.20 m 、高さ 0.15 m 、長さ 10.0 m の鋼製水路と $34^\circ 30'$ の勾配にすえ、上流端 4 m の区間に高さ 0.15 m 、又は 0.30 m に砂を充填し、砂溜の下端の扉をあけて、砂を自重でもって滑動せしめた。実験に用いた砂の平均粒径は 0.39 mm 、 0.897 mm で、水路勾配は 0.897 mm の砂の安息角よりわずかに大という理由で定めた。流動の概略とすると、砂溜内の砂は図-1に示すように崩れ面に沿ううすい層が流れおち、崩れ面が後退して全量の滑動が終る。全量の滑動し終る時間は 0.39 mm の砂で約 30 秒、 0.897 mm の砂で約 10 sec 程度で、初期および終期を除いてはほぼ定常とみなしてよい状態が得られた。観測は水路末端より 1.5 m の位置で側面よりガラス越しに写真ととって流速分布を測定した。写真のシャッタースピードは $1/1000$ 秒又は $1/500$ 秒である。



(3) 考察 砂のような粉体が斜面を流下する場合、流動の状態は次のように分けられる。

(i) 粒子が個々に滑落する場合、 (ii) 粒子が全体として流動する場合

(i)の状態は流量が少ないときに見られる現象で、砂の粒子は個々に運動し、ごくわずかの量では殆んど全ての粒子が跳躍して空中を飛ばし、量が増すにしたがって飛ばす量は少なくなり流れそのものが躍動する。さらに量が増すと表面の粒子の運動は底に平行であるが、底面近くでは躍動しているのが観察された。この状態附近より粉体の流れは

個々の粒子の運動というよりもいくつかの粒子の集って形成された流体要素の運動とみなせると思う。これと(ii)の状態とする。(ii)の状態においても三つの状態に分れる。オーはいまのべたように乾燥した砂がかなりの厚みを持って流動している場合で、例えばy図-2の観測結果に示されるように砂の局中に相対速度の存在が認められ流体としての仮定がゆるされるであろう状態である。オ二は砂に若干湿度をもたせた場合で、粒子相互間に相対速度はなく滑動は水路との境界面のみで行なわれる。これは粒子に附着した吸着水膜の影響とみることができ。オ三は更に水分が増えて吸着水膜の影響を受けない液体部分が出来る場合でせん断力は液体が受持つことになり、再び流動をみることが出来る。しかしこれら三つの状態はそれぞれ水の状態における構造指数 n 、物質常数 μ が異なるだけで本質的には同じと考えられる。以後(ii)の運動に限定して考察を進める。

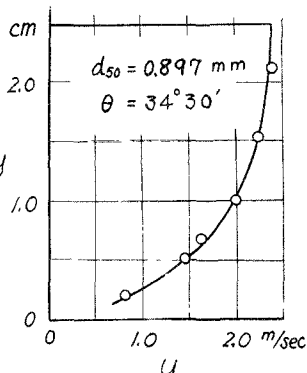


図-2 流速分布

砂は水のような連続体ではないが、対象とする微小要素に数百粒程度以上の砂粒を含むものとすると、流体と同じ式が適用できる。運動方程式として二次元の場合

$$\frac{du}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial y}, \quad \frac{dv}{dt} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial x} \quad (2)$$

が成立する。ここに u は x 方向の速度、 X は x 方向に働く質量力、 p_x は x 軸に垂直な面に働く応力、 τ_x は x 軸に平行な面に働く応力である。垂直応力については次の関係が成立するものと仮定する

$$p_x = p - 2^n \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^n, \quad p_y = p - 2^n \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^n \quad (3)$$

ここに p は平均圧力で、いまの場合砂の深さがある限り大きくないことを考慮して、表面より z の深さにおける圧力は $p = \omega z$ で表されるとする。ここに ω は砂の単位重量である。せん断応力については湿った砂あるいは濃厚泥砂流が擬型性的な性質を示すことから、次の関係が成立するものとする。

$$\tau_x = \tau_y = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^n \quad (4)$$

μ は物質常数である。連続式としては $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0$ (5)

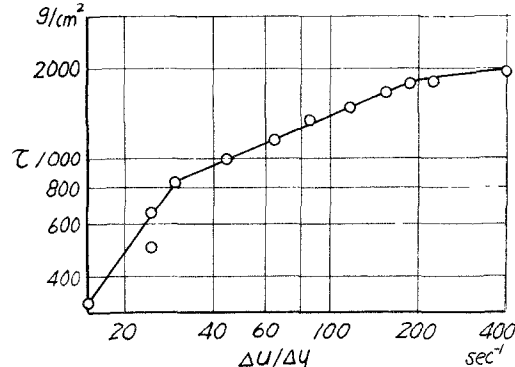
が成立する。 ρ は一定即ち空隙率は一定、 y 軸方向の速度 v は0、定常流と仮定すると

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \right] = -\rho g \quad (6)$$

$y = h$ で $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$, $y = 0$ で $u = u_0$ の条件で積分すると

$$u = u_0 \frac{1}{n} \mu^{\frac{1}{n}} \left[y - \frac{y^{\frac{1}{n}+1}}{(1+\frac{1}{n})h^{\frac{1}{n}}} \right] + u_0 \quad (7)$$

ここに u_0 は境界面における流速である。図の2の資料を用いて $\Delta u / \Delta y$ の関係を示すと図-3のようになり底から0.4cm, 1.6cm付近で勾配が変り1.6cm付近でせん断降伏値の導入、底近くは流速の算定の精度などに問題と提供しているが、更に実験資料を集積して検討したい。



- 3 τ と $\Delta u / \Delta y$ の関係