

京都大学防災研究所 正 江頭進治
 京都大学防災研究所 正 菅田和男
 京都大学 大学院 学 神矢弘

1. 緒言 山腹崩壊や土石流による土砂災害の顕在化に伴い、災害のより有効な防止・軽減策が望まれている。著者らは、この問題に対する科学的な指針を得ることを目的として山腹崩壊によって生産される土塊の挙動について検討を進めている¹⁾。ここでは、その一つとして、土塊が塑性的な構造を保持したまま滑動する場合の運動則について理論と実験の両面より検討する。

2. 土塊の運動則 土塊の運動については、これまでエネルギー保存則²⁾や運動量保存則^{3),4)}に基づいて検討された例が二、三あるが、完成の域にはほど遠い處がある。著者らは先に、斜面に滑動する土塊を図-1のようにモデル化し、土塊に働く駆動力として重力および表面流に与える力と考えるとともに、抵抗力として固体摩擦と流体抵抗も考慮して次式のような運動量保存則も提示した¹⁾。ここで、土塊の空隙は水で飽和していると見做している。

$$\frac{d}{dt}(\rho_f A_f U_f) = \underbrace{\rho_f A_f g \sin \theta}_{\text{①}} - \underbrace{\mu_k (1-\lambda)(\rho_s - \rho) A_f g \cos \theta}_{\text{②}} - \underbrace{\rho_f f_b L_f U_f^2}_{\text{③}} + \underbrace{\rho(U_f - U_f') h_f}_{\text{④}} + \underbrace{\frac{1}{2} \rho g h_f^2}_{\text{⑤}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ρ, ρ_s, ρ_f : 水、土粒子および土塊の密度で、 $\rho_f = (1-\lambda)\rho_s + \lambda\rho$, L_f, A_f : 土塊の長さおよび断面面積、 λ : 土塊の空隙率、 h_f, U_f : 表面流の水深および流速、 U_f' : 土塊の滑動速度、 μ_k : 動摩擦係数、 f_b : 流体抵抗係数である。上式において、土塊が滑動を開始すれば③および⑤項は無視できることが判明している。そこでこれらの項を省略し、さらに $U_f d(\rho_f A_f)/dt \ll \rho_f A_f dU_f/dt$ とし、土塊の厚さ h_f および重力加速度 g を用いて式(1)を無次元化すれば、次式を得る。

$$dU_f'/dt' = aU_f'^2 + b \dots \dots (2) \quad \text{ここに、} U_f' = U_f / \sqrt{g h_f}, \quad t' = t \sqrt{g / h_f} \quad \text{で、} a, b \text{ は次のようである。}$$

$a = -2(\rho/\rho_f)f_b$, $b = \cos \theta \{ \tan \theta - \mu_k(1-\lambda)(\rho_s - \rho)/\rho_f \}$ 。式(2)から推察されるように、斜面上における土塊の運動は μ_k と f_b に依存することが判る。なお流体抵抗係数は、斜面に接触している間隙水が土塊の滑動に伴ってせん断されることに起因するものと考えている。

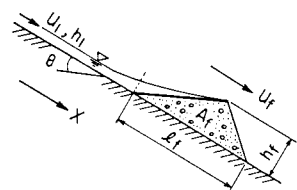


図-1 滑動土塊のモデル

3. 摩擦係数と抵抗係数 式(2)において $a=0$, $b = \cos \theta \{ \tan \theta - \mu_k(1-\lambda) \}$ とするような条件のもとで土塊の挙動を調べれば、 μ_k を独立に取り出すことが可能である。そこで、一様な砂、粘土および水も混合して土塊を作り、種々の粗度をも有する斜面においてその挙動を調べて μ_k を抽出した。その結果を図-2に示す。図において d_r は斜面粗度径、 $d_r=0$ は粗度なしのアクリル板、 d_{50} は土塊材料の砂の中央粒径、 μ_s は土塊と斜面間の静摩擦係数である。これによれば、 μ_k/μ_s は $0.6 \sim 0.85$ の範囲にあり、中でも粗度も有する斜面では μ_k/μ_s は $0.7 \sim 0.85$ の範囲にあると、滑動速度によらずほぼ一定値になるようである。

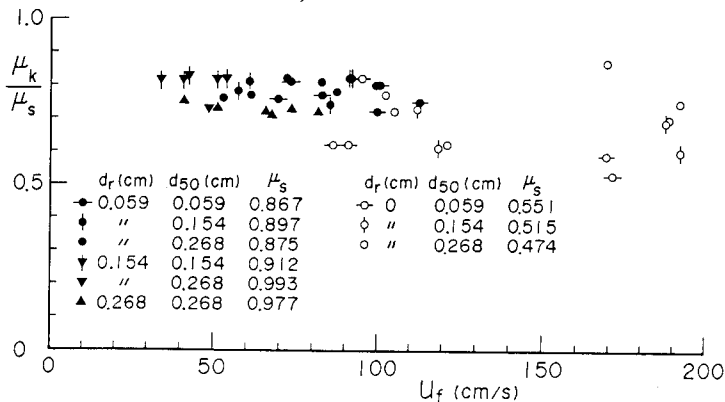


図-2 動摩擦係数に関する実験結果

f_b については、間隙水のせん断に起因するものと考えられ、まず、つぎのような議論をしこおく。いま、粘性底層厚に相当するせん断層厚を E とし、これも $E = K\eta/U_*$ によって指定できるものとする。さらに、 $\tau = \mu du/dz|_{z=0} = \mu U_* / E$ 、 $\tau = \rho f_b \cdot U_*^2$ と置いて、これらの連立解を求めると次式を得る。

$$f_b = 1/K^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 K は斜面と土塊の材料から定まる係数と考えこおく。

一方、実験においては前述の方法で作成した土塊を水路に流し流道傍に置き、これも水で飽和させた後、一定量の水を供給して土塊の滑動を調べた。さらに、 $du/dz=0$ のときの滑動速度 $U_*' = \sqrt{-b/a}$ に対して先に求めた μ_k も適用して f_b も算出した。その結果を図-3に示す。これによれば、 f_b は土塊の材料による違いはなく、斜面粗度の有無による違いが顕著に現われている。すなわち、粗度がない場合には $f_b = 0.03 \sim 0.075$ ($K = 3.7 \sim 5.8$)、粗度斜面において $f_b = 0.15 \sim 0.6$ ($K = 1.3 \sim 2.6$) 程度の範囲になっている。このようにデータはかなり点散しているものの、式(3)で示されるように、斜面の特性ごとに f_b は一定値をとる可能性もある。なお、図-3の横軸の $Re_* = \frac{U_*' d_{50}}{\nu}$ については講演時に述べる。

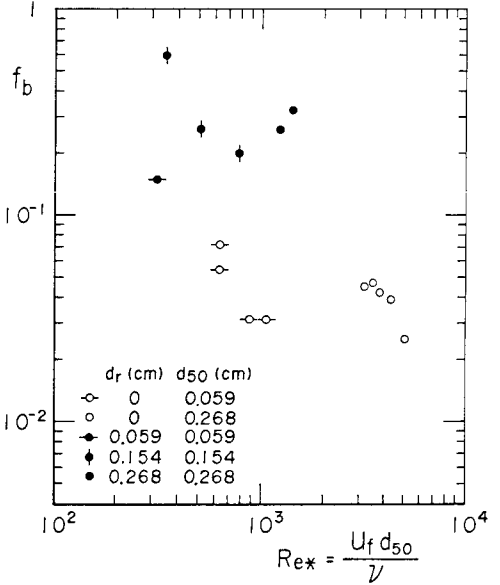


図-3 清体抵抗係数に関する実験値

4. 運動則の適用例 清体抵抗係数 f_b も一定とすれば、式(2)より無次元滑動速度および滑動距離は次のように求められる。

$$U_*' = \left\{ (e^{2\sqrt{-ab}t'} - 1) / (e^{2\sqrt{-ab}t'} + 1) \right\} \sqrt{-b/a} \quad \dots\dots (4)$$

$$X_*' = \frac{\gamma}{a} \left\{ \ln \left(\frac{e^{2\sqrt{-ab}t'} + 1}{2} \right) - \sqrt{-ab} t' \right\} \quad \dots\dots (5)$$

図-4は、 f_b の違いによる U_*' 、 X_*' の解性も示したものである。これによれば、 f_b が大きいほど定常滑動速度 $U_*' = \sqrt{-b/a}$ は小さくなるが、定常状態が速やかに達成されるのがわかる。

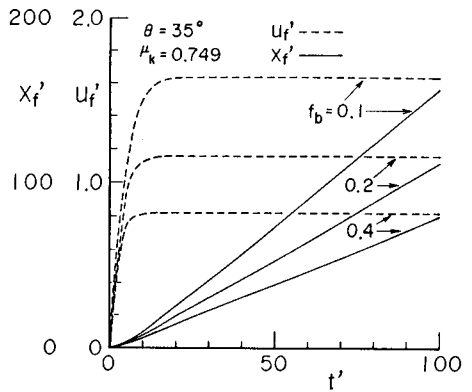


図-4 無次元滑動速度・滑動距離の一例

図-5は、実験値と式(4)、(5)を比較したものである。定常状態への遷移は、計算値の方が少し早いようであるが、図の結果にみられるように、両者はかなりよく一致している。

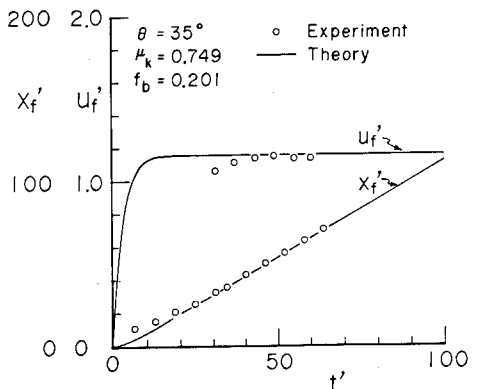


図-5 U_*' 、 X_*' に関する計算値と実験値

5. 結語 土塊の運動を規定する μ_k および f_b について考察することにも運動量則の適用例を示し、以下の様な知見を得た。 μ_k は滑動速度によらずほぼ一定値になることが判明した。 f_b についても、斜面の条件ごとに一定値になることを推察したが、データが少なく、これを十分検証するまでには至っていない。ついで、 μ_k および f_b 一定の条件における運動量則の解と実験値との比較を行い、良好な結果を得た。このことから f_b は一定値をとるものと考えられるが、これについては今後十分の検討が必要である。

参考文献：1) 菅田・江頭・大槻：京大防災研年報，26B-2，1983。2) Scheidegger：Rock Mech. 16/5，1973。
3) 奥田：京大防災研年報，16A，1973。4) 吉川・福岡：昭和46年台風25号における集束下の実験調査，1972。