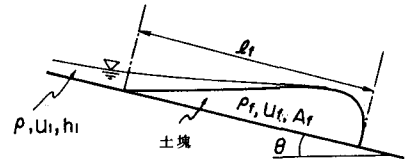


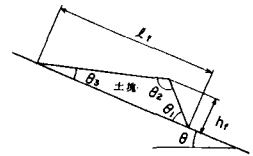
新日本技術コンサルタント 正 員 大槻 英樹
京都大学防災研究所 正 員 戸田 和男
京都大学防災研究所 正 員 江頭 進治

1. まえがき 昨年の長崎災害にもみられるように、山腹崩壊による災害、とりわけ人的被害の顕在化している今日、山腹斜面における崩壊の発生条件およびその流動機構の究明が強く望まれている。本研究はその第一歩として、崩壊によって生産された土塊の運動を考察しようとするものであって、主として土塊の運動と斜面勾配、供給水（表面流）および土塊の幾何学的スケールとの関連性について検討する。

2. 土塊の運動に関する理論 崩壊直後の運動を考える。斜面上における崩壊土の運動は、土塊に働く重力の斜面方向成分、種々の型の摩擦抵抗力および水や土粒子の流入に伴う運動量の収支に支配される。土塊の運動は、二次元的に十分評価できるものとする。摩擦抵抗として速度に依存しない項と速度の2乗に比例するものを考える。さらに、土塊の運動過程における物質収支については、土粒子の侵食・堆積がないものとし、表面流による水の供給のみを考える。傾斜角 θ の斜面における土塊の運動を模式的に示すと図・1のようであり、上述の条件のもとにおける質量および運動量保存則を示すとつぎのようである。



図・1 土塊の運動の模式図



$\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 120^\circ, \theta_3 = 15^\circ$
 $\theta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$
 $l_f = 19 \sim 25 \text{ (cm)}$
 $h_f = 4.8 \sim 6.0 \text{ (cm)}$

図・2 土塊の設定条件

$u_f \leq u_1$ において、

$$d(P_f A_f)/dt = P(u_1 - u_f)h_f \quad \text{--- (1A)}$$

$$d(P_f A_f u_f)/dt = P_f A_f g \sin \theta - \mu(1-\lambda)(P_f - P)A_f g \cos \theta - P f_0 l_f u_f^2 + P(u_1 - u_f)^2 h_f + \frac{1}{2} P g h_f^2 \quad \text{--- (2A)}$$

$u_f > u_1$ において、

$$d(P_f A_f)/dt = 0 \quad \text{--- (1B)}$$

$$d(P_f A_f u_f)/dt = P_f A_f g \sin \theta - \mu(1-\lambda)(P_f - P)A_f g \cos \theta - P f_0 l_f u_f^2 \quad \text{--- (2B)}$$

ここに、 u_f, l_f, A_f : 土塊の滑动速度、長さ、断面積。 u_1, h_1 : 土塊後方の表面流の流速、水深。 P, P_f : 水および土粒子の密度。 μ : 土塊と斜面間の摩擦係数。 f_0 : 抵抗係数。 λ : 土塊の空隙率。 P_f は次式、すなわち、

$$P_f = P_s(1-\lambda_0) + P\lambda_0 - (P_s - P)(1-\lambda_0)\Delta A_f/A_f \quad \text{--- (3)}$$

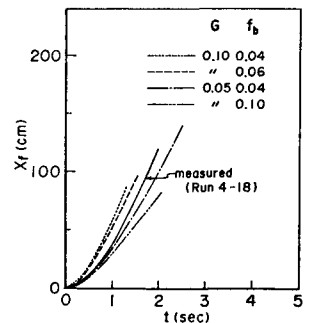
で定義されるもので、土塊背面における表面流（供給水）の水の断面積 ΔA_f も考慮した土塊の平均密度である。(2A)式で $u_f d(P_f A_f)/dt \ll P_f A_f du_f/dt$ とし、土塊の加速、定常、減速運動に関する傾斜角の条件をみると、

$$\tan \theta \geq \frac{P_s - P}{P_f} \mu(1-\lambda) + \frac{P}{P_f A_f g \cos \theta} \left\{ f_0 l_f u_f^2 - (u_1 - u_f)^2 h_f - \frac{1}{2} g h_f^2 \right\} \quad \text{--- (4)}$$

を得る。さらに、上式において $u_f = 0$ とすると、土塊が減速して停止する条件（滑动停止条件）および初速0のときの滑动開始条件が、つぎのように求まる。

$$\tan \theta_c \leq \frac{P_s - P}{P_f} \mu(1-\lambda) - \frac{P}{P_f A_f g \cos \theta} \left\{ u_1^2 h_f + \frac{1}{2} g h_f^2 \right\} \quad \text{--- (5)}$$

3. 土塊の運動に関する理論と実験の比較 (2A, B)式は、 $d^2 x_f/dt^2 = du_f/dt = a_1 u_f^2 + a_2 u_f + a_3$ のように書け、 $D \equiv a_1^2 - 4a_2 a_3$ の正負によってその解の性質は若干異なる。物理的には、 $D > 0$ の解がより一般的であり、 $u_f(t)|_{t=0} = 0$



図・3 土塊の運動に及ぼす G および f_0 の影響

のときの解を示せば、つぎのようである。

$$X_f(t) = \frac{A_2 - A_1}{\sqrt{D}} \ln \left\{ \frac{e^{-\sqrt{D}t} - A_1/A_2}{1 - A_1/A_2} \right\} + A_2 t, (t \leq t_1) \quad \text{---(6A)}$$

$$X_f(t) = \frac{1}{2B_1} \left\{ b_2(t - t_1) - \ln \left(\frac{1 - b_1 e^{b_2 t}}{1 - b_1 e^{b_2 t_1}} \right) \right\} + X_f(t_1), (t > t_1) \quad \text{---(6B)}$$

ここに、 $t_1: u_2 = u_1$ のときの時間である。ほかの係数はつぎのようである。

$$A_1 = \frac{u_1}{1 - k_{ef_0}} \left\{ 1 + \frac{1}{F_1} \left\{ \frac{k_h}{k_f} (k_{ef_0} - 1) \left(G + \frac{1}{2} \frac{k_f}{k_h} \right) + k_{ef_0} F_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}, k_h = A_f/h_1^2$$

$$k_{ef} = l_f/h_1$$

$$A_2 = \frac{u_1}{1 - k_{ef_0}} \left\{ 1 - \frac{1}{F_1} \left\{ \frac{k_h}{k_f} (k_{ef_0} - 1) \left(G + \frac{1}{2} \frac{k_f}{k_h} \right) + k_{ef_0} F_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}, k_f = P/P_f$$

$$k_{ef} = P/P_f$$

$$D = 4 \left(\frac{k_f}{k_h} \right)^2 \frac{g}{h_1} \left\{ \frac{k_h}{k_f} (k_{ef_0} - 1) \left(G + \frac{1}{2} \frac{k_f}{k_h} \right) + k_{ef_0} F_1^2 \right\}, k_{ff} = P_f/P_f$$

$$k_{ff} = P_f/P_f$$

$$B_1 = \frac{k_h k_{ef}}{k_h k_{ef_0}} f_0, B_2 = G/B_1, b_1 = \frac{u_1 - \sqrt{B_2}}{u_1 - \sqrt{B_2}} e^{2B_1 \sqrt{B_2} t_1}, b_2 = -2B_1 \sqrt{B_2},$$

$$G = \cos \theta \left\{ \tan \theta - (1 - \lambda)(k_{ff} - k_f) \mu \right\}, F_1^2 = u_1^2 / g h_1.$$

なお、上式において、土塊の運動を支配する勾配、保水水および土塊の幾何学的スケールの効果は、パラメータ G, F_1, k_h, k_{ef} の中に直接的あるいは間接的に反映されている。

実験は、幅 10 cm、深さ 12.5 cm、長さ 6 m の片面ガラス張りの水路を用いて行われた。路床には、砂がはり付けてある。砂、粘土、水の混合物を路床上に図 2 のように整形した後、上流端より定常流量を給水し、ビデオ装置により、土塊の滑動距離、滑動速度などが計測された。実験条件は、勾配 θ 、単位幅流量 q および材料条件（砂、粘土、水の混合比）を種々組み合わせて設定されている。

図 3 は、勾配の関数である G および抵抗係数 f_0 の変化による (6A, B) 式の解がどのような特性を示すかを示したものである。計算には、 $P=1.0, P_f=2.65, P_f=2.248 \text{ g/cm}^3 (\Delta A_f=0), \lambda=0.25, k_h=1320, k_{ef}=108, F_1=5.9$ が用いられている。また、比較のため $\theta=30^\circ, q=18.3 \text{ cm}^2/\text{s}$ のときの実測値も示されている。この図より、勾配が大きい場合には、初速度が大きく早い段階に定常状態に近づき、同一の勾配では f_0 が大きいほど早く定常運動に移り、その滑動速度も小さくなることわかる。

図 4 (a) ~ (c) は、勾配が $25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ のときの実験値と (6A, B) 式による計算値とを比較したものである。図中の矢印 ($t=t_1$) は、 $u_2=u_1$ となる時点を示したもので、点線の領域は、土塊の内部構造が破壊されて完全に流動化していることを意味している。計算において、 f_0 にはそれぞれ 0.02, 0.07, 0.12 が採用され、摩擦係数 μ には、内部摩擦係数の値 0.762 が採用されている。これらの図より、土塊が塑性的構造を保っている範囲においては、両者は比較的良好に一致しているのがわかる。これは、土塊の運動量保存がほぼ正しく評価されていることを意味するものである。なお、土塊が流動化するようにになると (6A, B) 式は適合しなくなる。これは当然のことである。

4. あとがき 非侵食性斜面上における土塊の運動について、理論および実験の両面より検討し、ここで提案した土塊の運動量方程式はほぼ妥当なものであることがわかった。同式には、抵抗係数 f_0 が含まれており、今後これについても検討を深めたい。最後に、本研究は、一部自然災害特別研究 (1) (代表者：綱千毅教授) の補助を受けたことを記すとともに、京都大学防災研究所吉田義則技官には、実験や種々の面で御協力いただいた。ここに、合わせて感謝の意を表します。

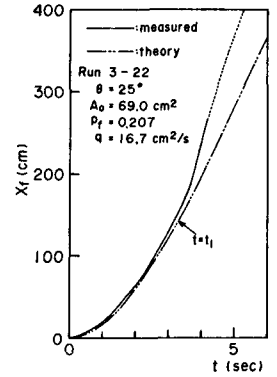


図 4 (a)

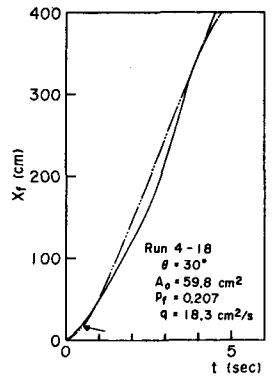


図 4 (b)

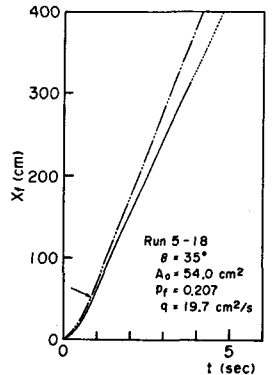


図 4 (c)

図 4 $X_f(t)$ の理論値と実測値