

山腹崩壊土の流動機構に関する研究

京都大学防災研究所

正 員 芦田 和男

京都大学防災研究所

正 員 江頭 進治

新日本技術コンサルタント

正 員 ○大槻 英樹

1. まえがき 山腹崩壊土の運動と流動化の機構を究明することは、水工学や防災科学のうんばかりでなく、社会的にみても極めて重要な緊急の課題である。本報においては、山腹崩壊土の挙動が斜面勾配、供給流量、崩壊土の土量・土質などによ、どのように変化するかを理論および実験の両面より検討を行う。

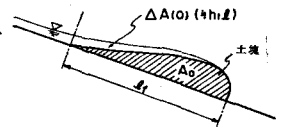
2. 崩壊土の挙動に関する理論的考察 斜面上における土塊の運動を模式的に表すと、図・1 のようである。土塊の移動速度 u_t が供給水の流速 u_1 より小さく、しかも土粒子の侵食・堆積がない場合の質量保存則および運動量保存則はそれぞれ、

$$d(\rho_1 A_1)/dt = \rho(u_1 - u_t)h_1 - \rho(u_2 - u_t)h_2 \quad \text{--- (1)}$$

$$d(\rho_1 A_1 u_1)/dt = \rho_1 A_1 g \sin \theta - \{\rho_1 (1 - \lambda) A_1 g \cos \theta\} \mu_k - \rho_1 f_b u_1^2 + \rho \{ (u_1 - u_t)^2 h_1 - (u_2 - u_t)^2 h_2 \} + \frac{1}{2} \rho g (h_1^2 - h_2^2) \quad \text{--- (2)}$$

となる。ここに、 μ_k は動摩擦係数、 f_b は抵抗係数である。(1)式より、 $h_2 = u_2 = 0$ のときすなわち、図・2 に示す状態のとき土塊は最も滑動しやすく、このとき $d(\rho_1 A_1 u_1)/dt \leq 0$ であれば土塊は停止状態を保つ。

その条件は、(2)式で μ_k を μ_s (静止摩擦係数) で置き換え、 $u_t = 0$ として 図・2 初期状態における土塊の模式図



$$\frac{\alpha_1 (1 - k_2) (1 - \lambda_0) (F_1/F_2)^{1/2}}{2} \mu_s \geq \left\{ \frac{\alpha_1 (1 - \lambda_0 + \lambda_0 k_2) (F_1/F_2)^{1/2}}{2} + \alpha_2 k_2 (F_1/F_2)^{1/2} \right\} \tan \theta + \left\{ k_2 (F_1/F_2)^{1/2} - \alpha_2 k_2 (F_1/F_2)^{1/2} f_{bs} \right\} / \cos \theta \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 $\alpha_1 = \Delta A(0)/h_1 u_1$ 、 $\alpha_2 = 2A_0/h_1^2$ 、 $F_1 = \rho_1^2/g h_1^3$ 、 $F_2 = u_1^2/g h_1$ 、 $k_2 = \rho_1/\rho_2$ 、 $k_1 = h_2/h_1$ 、 $f_{bs} = C_b/\rho_1 g h_1$ であり、 C_b は土塊と斜面の界面における粘着力、 λ_0 は水の供給を受ける以前の土塊の間隙率である。(3)式において、 $f_{bs} = 0$ 、 $\alpha_1 = 1$ 、 $\alpha_2 = 4.18$ 、 $k_2 = 0.38$ 、 $\lambda_0 = 0.25$ としたとき、停止条件の θ は、 $\theta = 20^\circ \sim 23^\circ$ 程度になる。ここで θ の変化幅は、供給水の作用によるものである。

簡単のため、 $u_1 \frac{d}{dt}(\rho_1 A_1) \ll \rho_1 A_1 \frac{du_1}{dt}$ 、 $h_2 = u_2 = 0$ とすると(2)式はつぎのように表される。

$$\frac{du_1}{dt} = a_1 u_1^2 - a_2 u_1 + a_3 \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 $a_1 = \frac{f_b (1 - k_2 f_b)}{k_2 h_1}$ 、 $a_2 = 2 \frac{f_b u_1}{k_2 h_1}$ 、 $a_3 = g(X + \frac{f_b}{k_2} F_1 + \frac{1}{2} \frac{f_b}{k_2})$ 、 $k_2 = \rho_1/\rho_2$ 、 $h_1 = A_1/h_1$ 、 $f_{bs} = \rho_1/\rho_2$ 、 $X = \cos \theta \{ \tan \theta - (1 - \lambda)(k_{ss} - k_s) \mu_k \}$ である。土塊の移動速度 $u_t(t)$ および移動距離 $x_t(t)$ は、(4)式より解析的に求められ、 $D \equiv a_3^2 - 4a_1 a_3 > 0$ のときの解を示すつぎのようである。

$$u_t(t) = A_1 \frac{e^{-\sqrt{D}t} - 1}{e^{-\sqrt{D}t} - A_1/A_2} \quad \text{--- (5)} \quad x_t(t) = \frac{A_2 - A_1}{\sqrt{D}} \ln \left\{ \frac{e^{-\sqrt{D}t} - A_1/A_2}{1 - A_1/A_2} \right\} + A_2 t \quad \text{--- (6)}$$

ここに、 $A_1 = \frac{u_1}{1 - k_2 f_b} \left\{ 1 + \frac{f_b}{F_1} (k_2 f_b - 1) (X + \frac{1}{2} \frac{f_b}{k_2}) + k_2 f_b F_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$ 、 $A_2 = \frac{u_1}{1 - k_2 f_b} \left\{ 1 - \frac{f_b}{F_1} (k_2 f_b - 1) (X + \frac{1}{2} \frac{f_b}{k_2}) + k_2 f_b F_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$ である。また、 $D = 4 \left(\frac{f_b}{k_2} \right)^2 \frac{g}{h_1} \left\{ \frac{f_b}{k_2} (k_2 f_b - 1) (X + \frac{1}{2} \frac{f_b}{k_2}) + k_2 f_b F_1^2 \right\}$ である。一方、 $u_t > u_1$ のときには、供給水と土塊との運動量の授受がなく、(2)式でこのことを考慮すると次式を得る。

$$u_t(t) = \sqrt{B_2} \frac{1 + \frac{u_1 - \sqrt{B_2}}{u_1 + \sqrt{B_2}} e^{-2B_1 \sqrt{B_2} (t - t_1)}}{1 - \frac{u_1 - \sqrt{B_2}}{u_1 + \sqrt{B_2}} e^{-2B_1 \sqrt{B_2} (t - t_1)}} \quad \text{--- (7)} \quad x_t(t) = \frac{\sqrt{B_2}}{B_2} \left\{ B_2 (t - t_1) - \ln \left\{ \frac{1 - \frac{u_1 - \sqrt{B_2}}{u_1 + \sqrt{B_2}} e^{-2B_1 \sqrt{B_2} (t - t_1)}}{1 - \frac{u_1 - \sqrt{B_2}}{u_1 + \sqrt{B_2}}} \right\} \right\} + x_t(t_1) \quad \text{--- (8)}$$

ここに、 $B_1 = \frac{A_1 h_1}{A_2 h_2}$, $B_2 = \frac{A_1 h_1}{A_2 h_2} \cdot X$, $q_1 = \frac{u_1 - \sqrt{B_1}}{u_1 + \sqrt{B_1}} e^{2B_1 \sqrt{B_2} t_1}$, $q_2 = -2B_1 \sqrt{B_2}$ である。 t_1 は、 $u_2 = u_1$ となる時刻である。

つぎに、土塊の流動化条件について考察する。土塊が流動化するためには、①流動化するための十分な水の供給があることおよび②土塊の内部構造が破壊されることも必要と思われる。まず水の供給条件として、土塊の土砂濃度が C_{cd} 以下にな、たとき流動化すると仮定すれば、その条件は次式で与えられる。

$$\{u_1 t - x_f(t)\} h_1 / A_0 \geq \frac{1 - \lambda_0}{C_{cd}} - \left\{1 + \frac{\Delta A(0)}{A_0}\right\} \quad \text{--- (9)}$$

上式の左辺は $t = t_1$ で最大値をとる。このとき、上の条件はつぎのように表される。

$$x_f(t_1) / h_1 \leq \alpha_1 \alpha_2 + \frac{\alpha_1 (\lambda_0 + C_{cd} - 1)}{2} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\alpha_1}{4 h_2} F_2 \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{Z} \ln \left\{ \frac{1 - Z}{1 + Z} \frac{\alpha_1 \alpha_2 (F_1 / F_2)^{\frac{1}{2}} + Z}{\alpha_1 \alpha_2 (F_1 / F_2)^{\frac{1}{2}} - Z} \right\} \quad \text{--- (10)}$$

ここに、 $Z = \frac{1}{F_1} \left(\frac{\alpha_1}{2 h_2} (F_1 / F_2)^{\frac{1}{2}} \{ \alpha_1 \alpha_2 (F_1 / F_2)^{\frac{1}{2}} - 1 \} \{ X + \frac{A_2}{\alpha_2} (F_1 / F_2)^{\frac{1}{2}} \} + \alpha_2 F_2 (F_1 / F_2)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}}$ である。また、土塊内部

の破壊条件については、図3に示すような微小要素を考慮、せん断ひずみ ϵ にな、たとき内部構造が完全に破壊されると仮定し、そのエネルギーは境界摩擦によって供給されるものとする。さらに、このときの水供給率を h_μ とし、若干の演算を行うとつぎのような条件式を得る。

$$\frac{x_f}{h_\mu} \geq \frac{\epsilon}{h_\mu} \left\{ \frac{1}{3} \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + \frac{1}{\mu_A (1 - \lambda_0) (1 - h_\mu)} t_{cs} / \cos \theta \right\} \quad \text{--- (11)}$$

3. 実験およびその結果の考察 実験は、幅10cm、深さ12.5cm、長さ6m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である。砂、粘土、水の混合物を路床上に図4のように整形しておき、上流端より定常流量を給水すると同時に、土塊の移動速度や流動化までの流下距離などが計測された。実験条件は、粘土の含有率 h_μ 、流量 q 、勾配 θ を種々組み合わせで定められている。

図5は、 $x_f(t)$ に関する計算値と実験値を比較したものである。計算値は、(6)、(8)式において $\mu_A = 0.762 (= \mu_s)$, $h_0 = 0.12$ として求められている。図より、土塊が流動化するまでは、両者はかなりよく一致していることがわかる。

図6は、流動化の条件に関し、(13)式と実験値を比較したものである。ここで、図中のデータの水の供給条件は満たされているものとみなしている。また、 ϵ / h_μ は、 $t_{cs} = 0$ の実験より求め、 $\epsilon / h_\mu \div 37.3$ とし、Cについては、 Δ で示すデータが理論式に一致するとして逆算により求められている。図より、理論は実験値の傾向をよく示していることがわかる。

4. あとがき 非侵食性斜面上における崩壊土の挙動について理論的・実験的考察を行い、土塊の滑動・停止条件、運動機構、滑動→流動化の条件などについて興味ある結果を得た。

今後、 h_0 および ϵ / h_μ の一般的な推定法に関する検討や、侵食性斜面上における同様の考察および斜面の崩壊機構について研究を進めるつもりである。

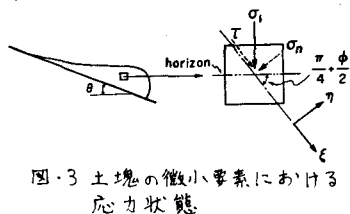
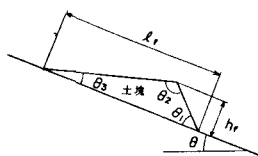


図3 土塊の微小要素における応力状態



$\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$, $\theta_3 = 15^\circ$
 $\theta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$

$l_1 = 19 \sim 25$ (cm)

$h_1 = 4.8 \sim 6.0$ (cm)

図4 整形された土塊の模式図

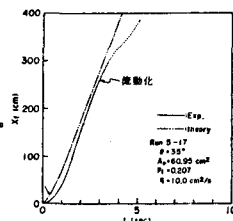


図5 $x_f(t)$ の理論値および実験値

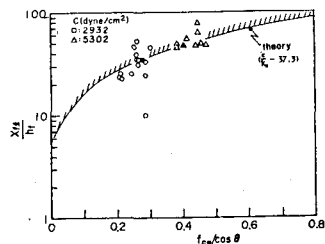


図6 流動化の条件に関する理論値および実験値