

京都大学 防災研究所 正 江頭進治
 京都大学 防災研究所 正 芦田和男
 新日本技術コンサルタント 正 大槻英樹

1. まえがき

山腹斜面の崩壊土がどのような挙動をもつかは、土砂災害の形態や規模も左右する重要な内因である。山腹崩壊土の挙動には、流動化しないまま滑動停止するものと滑動しながら流動化して土石流土形成する場合がある。どちらの運動形態をとるかは、土塊の大きさ、斜面の長さ、勾配、水の供給状態および土質条件などに依存するものと思われる。しかし、従来この方面の研究は殆んど見当たらぬ。本報においては、山腹崩壊土の流動化の機構について水理学、工質力学的側面より検討を行い、流動化に関する条件式を提案する。さらに、これと実験および現地調査結果との比較を行う。

2. 崩壊土の流動化に関する条件

山腹崩壊によって生じた土塊の運動を模式的に示すと図-1のようである。運動機構については、この年次講演会において議論している¹⁾。それによって得られたいくつかの知見のうち、水で飽和した土塊の滑動開始あるいは滑動停止の条件を示すと次のようである。

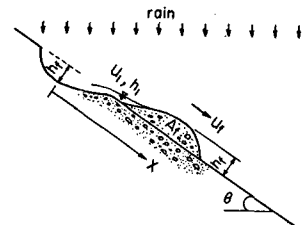


図-1. 土塊の運動の模式図

$$\tan \theta_c \leq \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \mu (1 - \lambda) - \frac{\rho}{\rho_s A_f g \cos \theta} \left\{ u_1^2 h_1 + \frac{1}{2} g h_1^2 \right\} \quad (1)$$

ここに、 θ_c : 滑動停止の斜面傾斜角、 ρ, ρ_s : 水、土粒子の密度、 g : 重力加速度、 A_f, λ : 土塊の断面積、空隙率、 u_1, h_1 : 土塊後方における表面流の流速、水深、 ρ_s は土塊背面上の水の断面積 A_f も含めた土塊の平均密度であって、次式のように定義されている。

$$\rho_s = \rho (1 - \lambda_0) + \rho \lambda_0 - \alpha A_f / A_f \cdot \{ (\rho_s - \rho) (1 - \lambda_0) \}, \quad (\lambda_0: \text{土塊の初期空隙率}) \quad (2)$$

土塊は、斜面勾配が θ_c よりも大きい場合には初速が 0 であっても滑動する。滑動速度 u_f が表面流の流速 u_1 よりも小さいときには水の供給を受けて、土塊の体積は増加する。さらに、界面の摩擦によって変形が進行する。したがって、① 土塊を構成する土粒子の分散に必要な水が供給され、② 土塊の内部構造が破壊される、という二つの条件が満たされたとき、滑動中の土塊は流動化して土石流へ遷移するものと思われる。以下、これらの条件について議論する。ただし、i) 現象は二次元的で、ii) 土粒子の侵食・堆積はなく、iii) 土塊に一旦取込まれた水は流出しないものとする。

条件 ①: 土粒子が分散するために必要な土粒子の最大容積濃度と C_{max} とすると、この条件は形式的に、

$$\frac{(1 - \lambda_0) A_{f0}}{A_{f0} + \alpha A_f(t)} \leq C_{max} \quad (2A) \quad \text{あるいは} \quad \alpha A_f(t) \geq \frac{A_{f0}(1 - \lambda_0 - C_{max})}{C_{max}} \quad (2B)$$

のように書ける。ここに、 A_{f0} : 土塊の初期断面積である。上式の未知量 $\alpha A_f(t)$ は、水の供給に伴う土塊体積の増分であるが、これは、 u_f に関する議論および連続式 $dA_f/dt = d\alpha A_f(t)/dt = (u_1 - u_f) h_1$ も同じで簡単に求められる。なお、 $u_1 = \text{一定}$ 、 $h_1 = \text{一定}$ の場合には、上の条件は次のように示される。

$$\frac{\{u_1 t - x_f(t)\} h_1}{A_{f0}} \geq \frac{1 - \lambda_0}{C_{max}} \quad (3)$$

ここに、 $x_f(t)$ は、崩壊の発生時点より t 時間後の滑動距離である。式(3)の左辺は、 $u_f = dx_f/dt = u_1$ と仮定するときの時間 $t = t_1$ において最大値をとる。したがって、 $t = t_1$ における式(3)の成否を判定すれば十分である。

条件 ②: 土塊の変形による内部構造の破壊も考える。せん断ひずみ(塑性ひずみ)は境界摩擦に起因するもの

のとする。また、境界摩擦においては、一般に滑動速度に依存しないものが卓越するのでこれを対象とする。さて、土塊内部のせん断抵抗力は、クーロン式で評価できるものとするれば、次式のように示される。

$$\tau = \sigma_1 \cos(\pi/4 + \phi_s/2) \tan \phi_s + C \quad (4)$$

ここに、 σ_1 : 主たう、 ϕ_s : 内部摩擦角、 C : 粘着抵抗力である。上式において、 $\pi/4 + \phi_s/2$ は、図-2に示すところの破壊面である。いす、土塊の内部構造が破壊される時のひずみと α とすると、土塊全体の变形エネルギーは次式のように書ける。

$$E_s = \int_{A_f} \alpha \tau dA = \alpha \left[\int_{A_f} \{ \sigma_1 \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_s}{2}) \tan \phi_s + C \} dA \right] \quad (5)$$

上式の σ_1 は、平均的に地重力の向きに一致し、次式で示される有効たうも同いて評価されるはずである。

$$\sigma_1 = (1-\lambda)(P_s - P)g(Z_s - Z) \cos \theta \quad (6)$$

ここに、 Z_s : 土塊表面の座標である(図-2)。土塊の形状も三角形で近似して $A_f = \frac{1}{2} l_f h_f$ (l_f : 土塊の長さ)とおく。この関係も同い、まう、式(6)に(6)も代入して居るの演算を行うと次式を得る。

$$E_s = \alpha \left\{ \frac{1}{3} (1-\lambda)(P_s - P)g h_f A_f \cos \theta \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_s}{2}) \tan \phi_s + C A_f \right\} \quad (7)$$

一方、土塊が x_{fl} だけ滑動したとき、土塊に対して摩擦力の仕事 E_M は、

$$E_M = k_M \mu \{ (1-\lambda)(P_s - P)g A_f \cos \theta \} x_{fl} \quad (8)$$

のように書ける。ここに、 k_M : 摩擦仕事の係数率である。

さて、土塊の内部構造が破壊されるのは、つぎの条件、

$$E_s \leq E_M \quad (9)$$

が満たされたときであると考えられる。そこで、式(7)、(8)も(9)に代入して

x_{fl} について解くと、内部構造の破壊条件が次うに求められる。

$$\frac{x_{fl}}{h_f} \geq \frac{\alpha}{k_M} \left\{ \frac{\cos(\pi/4 + \phi_s/2) \tan \phi_s}{3\mu} + \frac{1}{\mu(1-\lambda)(1-P/P_s) \cos \theta} \cdot \frac{f_{cn}}{\cos \theta} \right\} \quad (10)$$

ここに、 $f_{cn} = C/\rho_s g h_f$ である。上式には未知係数 α/k_M が含まれているが、水路実験にちると、 $\alpha/k_M = 23 \sim 37$ 程度に推定されている。

図-3、4は、それぞれ式(10)と水路実験のうは長崎災害の調査結果とも比較したものである。式(10)において、 $\mu = \tan \phi_s = 0.762$, $\lambda = 0.25$, $P = 1$, $P_s = 2.65 g/cm^3$ が採用されている。図-3の実験値も、式(3)の条件も満たしているの、 x_{fl} には流動化した地点までの滑動距離が採用されている。図-4の x_{fl} には崩壊地点より流動化地点までの滑動距離が、 h_f には崩壊深が用いられている。さて、これらの図よりわかるように、実験値および調査データとも、式(10)によつて流動化の条件が評価されているものと思われる。

る。あとがき

小腹崩壊土の流動化の条件について検討した。細部においては検討可能な問題はあるものの、 θ_c より急ぐ x_{fl} より長い斜面においては、式(3)が満たされるような水が供給されるとき、小腹崩壊土は土石端に遷移すると言えうである。本研究は自然災害科学特別研究(1)(代表者: 網干敬毅)の補助をうけている。また、実験や種々の面でお茶大防災研究所吉田茂樹技官に御協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献: (1) 大槻・菅田・江頭: 斜面における土塊の運動機構に関する研究, 第38回年次講演会, II, 1983。

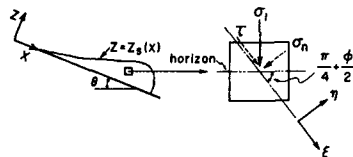


図-2. 土塊の内部たうと破壊面

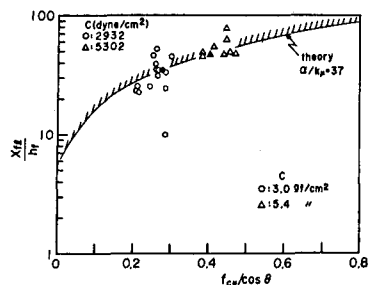


図-3. 式(10)と実験値との比較

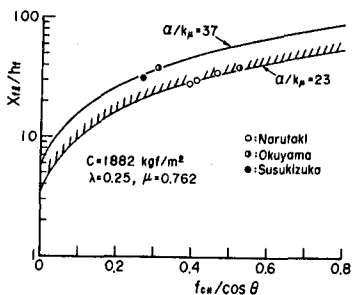


図-4. 式(10)と昭和57年長崎災害のデータとの比較