

# 1 山腹崩壊土の流動化機構

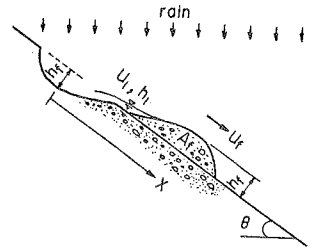
京都大学防災研究所の江頭進治  
京都大学防災研究所 菅田和男

## 1. はじめに

山腹斜面の崩壊土がどのような挙動をもつかは、災害の形態や規模と左右する重要な問題である。山腹崩壊土の挙動には、流動化したまま滑動停止する場合と滑動しながら流動化し、土石流を形成するものがある。どちらの運動形態をとるかは、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。本研究においては、山腹崩壊土の運動特性および流動化の機構の理論的考察を行うとともに、流動化に関する理論と57年長崎災害の調査結果とを比較検討する。

## 2. 崩壊土の運動

崩壊直後の運動を考える。斜面上の土塊の運動をより一般的に記述するには、抵抗の詳細を考慮することになる。運動中の水と土砂の出入を考慮する必要があるが、ここでは土塊背後における水の出入のみを考慮することにし、しかも二次元的な取扱いを行う。傾斜角 $\theta$ の斜面上の運動を模式的に示すと図-1のようである。摩擦抵抗として速度に依存した項とその2乗に比例するものも考慮し、さらに土塊が水で飽和しているものとする。質量および運動量保存則は、 $u_f \leq u_1$  のとき、それぞれ次のように記述される。



$$d(\rho_f A_f) / dt = P(u_1 - u_f) h_1 \quad (1)$$

$$d(\rho_f A_f u_f) / dt = \rho_f A_f g \sin \theta - \mu(1-\lambda)(\rho_f - P) A_f g \cos \theta - P f_0 l_f u_f^2 + P(u_1 - u_f)^2 h_1 + \frac{1}{2} P g h_1^2 \quad (2)$$

ここに、 $u_1, h_1$ : 土塊後方の表面流の流速、水深、 $u_f, l_f, A_f$ : 土塊の滑動速度、長さ、断面積、 $\rho_f$ : 水および土粒の密度、 $\mu$ : 摩擦係数、 $f_0$ : 抵抗係数、 $\lambda$ : 土塊の空隙率、 $P$  は次式、 $\rho$  は土質、

$$\rho_f = \rho_s(1-\lambda_0) + P\lambda_0 - A_f/A_f \cdot \{(\rho_s - P)(1-\lambda_0)\}, \quad (\lambda_0: \text{土塊の初期空隙率}) \quad (3)$$

で定義されるので、背面上の表面流の水の断面積  $A_f$  も考慮した土塊の平均密度である。

式(2)において  $u_f d(\rho_f A_f) / dt \ll \rho_f A_f d u_f / dt$  として、加速・定常・減速に関する傾斜角 $\theta$ の条件を求めると、

$$\tan \theta \geq \frac{\rho_s - P}{\rho_f} \mu(1-\lambda) + \frac{P}{\rho_f A_f g \cos \theta} \left\{ f_0 l_f u_f^2 - (u_1 - u_f)^2 h_1 - \frac{1}{2} g h_1^2 \right\} \quad (4)$$

を得る。また、上式で  $u_f = 0$  とすると、減速停止(滑動停止)の条件が次のように導かれる。

$$\tan \theta_c \leq \frac{\rho_s - P}{\rho_f} \mu(1-\lambda) - \frac{P}{\rho_f A_f g \cos \theta} \left\{ u_1^2 h_1 + \frac{1}{2} g h_1^2 \right\} \quad (5)$$

上式において、 $\rho = 1.0, \rho_s = 2.65, \rho_f = 2.24 \text{ g/cm}^3 (A_f = 0), \mu = \tan \theta_c = 0.762, \lambda = \lambda_0 = 0.25$  とすると、表面流のない場合には  $\theta_c = 22.8^\circ$  と得る。一方、表面流を考慮した場合には、この流量、水深、土塊の大きさに応じて変化可能だが、一般の規模を想定して計算すると  $\theta_c = 20 \sim 22.8^\circ$  程度になる。

## 3. 崩壊土の流動化

土塊が滑動しながら流動化して土石流に遷移するには、①土塊を構成する土粒子の分散に必要な水の供給と、②土塊の内部構造の破壊、という二つの条件が満たされる必要がある。土粒子の分散のた

めの最大容積濃度を  $C_{max}$  とすると、 $\alpha$  の条件は形式的に次のように書ける。

$$(1-\lambda_0)A_{f0}/\{A_{f0}+4A_f(t)\} \leq C_{max}, \text{ あるいは, } 4A_f(t) \leq A_{f0}(1-\lambda_0-C_{max})/C_{max} \quad (6)$$

こゝに、 $A_{f0}+4A_f(t) \equiv A_f(t)$  とする。土塊の断面積  $A_f$  の時間変化は、表面積による木の供給のみに依存するため、この条件は式(1)、(2)に基づき容易に議論できる<sup>1)</sup>。一方、 $\alpha$  の条件については以下のよう<sup>1)</sup>に考へる。せん断変形による内部破壊も考へ、そのひずみ(塑性ひずみ)の因は土塊と境界摩擦によるものとする。境界摩擦では、一般に速度に依存しない項が卓越する。さて、土塊の内部構造が破壊されるときのひずみを  $\alpha$  とし、土塊内部のせん断抵抗力を次式で表示する。

$$\tau = \sigma \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2}\right) \tan \phi_0 + C \quad (7)$$

こゝに、 $\sigma$ : 主応力、 $\phi_0$ : 内部摩擦角、 $C$ : 粘着抵抗力である。このとき、土塊全体の変形エネルギー  $E_s$  は、

$$E_s = \int_{A_f} \alpha \tau dA = \alpha \left\{ \int_{A_f} \left[ \sigma \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2}\right) \tan \phi_0 + C \right] dA \right\} \quad (8)$$

のように書ける。平均的にすると、 $\sigma$  の向きは、重力の方向に一致し、その大きさは、浮力を差し引いた有効応力<sup>1)</sup>で詳細できるはずである。そこで、土塊の形状も三角形で近似して  $A_f = \frac{1}{2} h_f h_f$  とおき、若干の演算を行つて次式を得る。

$$E_s = \alpha \left\{ \frac{1}{2} (1-\lambda) (\beta - \rho) g h_f A_f \cos \theta \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2}\right) \tan \phi_0 + C A_f \right\} \quad (9)$$

この変形破壊エネルギー  $E_s$  は、滑动時の摩擦仕事に<sup>1)</sup>よつて供給される。このときの供給率を  $k_{\mu}$  とすると、崩壊地点より  $x_{fl}$  だけ滑动したときのエネルギー  $E_{\mu}$  は、

$$E_{\mu}(x_{fl}) = k_{\mu} \mu \left\{ (1-\lambda) (\beta - \rho) g A_f \cos \theta \right\} x_{fl} \quad (10)$$

となる。 $E_s \leq E_{\mu}(x_{fl})$  のとき、内部構造が破壊されるものとし、滑动距離  $x_{fl}$  について解くと、

$$\frac{x_{fl}}{h_f} \geq \frac{\alpha}{k_{\mu}} \left\{ \frac{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2}\right) \tan \phi_0}{3\mu} + \frac{f_{c*}}{\mu(1-\lambda)(\beta - \rho) \cos \theta} \right\} \quad (11)$$

を得る。こゝに、 $f_{c*} = C/\beta g h_f$  ( $f_{c*}$ : 無次元粘着力) である。

式(11)は、未知係数  $\alpha/k_{\mu}$  を含むが、斜面実験によつて検討した結果、 $\alpha/k_{\mu} \approx 23$  程度の値を得た<sup>1)</sup>。図-2は、式(11)と昭和57年長崎災害の調査結果とを比較したものである。調査データにおいて、 $x_{fl}$  は崩壊地点より流動化地点までの滑动距離が採用され、 $h_f$  は崩壊深、 $C$  は図中の値が用いられ<sup>1)</sup>ている。さらに、 $\alpha$  の条件は満たされているものとして扱つてゐる。同図より明かのように、データと式(11)とは極めてよく一致しており、本議論の妥当性が伺える。

#### 4. あとがき

山腹崩壊土の運動特性と流動化の機構について検討した。細部においてはまだ検討の余地はあるものの、土粒子の分散に必要な水の供給があつて、式(5)の  $\theta_c$  よりも急で、かつ  $x_{fl}$  よりも長い斜面が崩壊地点下方に存在するとき、崩壊土は流動化して土石流へ遷移する、と言えさうである。なお、流動化に肉する  $\alpha$  の条件や実験については議論時に述べる。

#### 参考文献

1) 芦田・江頭・大槻: 山腹崩壊土の挙動に関する研究, 京大防災研究所年報 26号B-2, 1983.

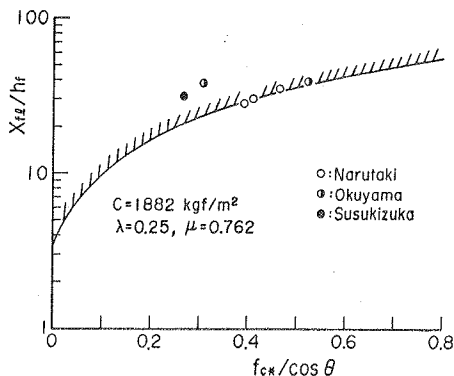


図-2. 山腹崩壊土の流動化の条件と長崎災害におけるデータとの比較