

流動土塊の堆積機構

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
 水資源開発公団 正員 〇神矢 弘
 京都大学大学院 学生員 佐々木 浩

1. まえがき 山腹斜面崩壊による土砂災害を防止・軽減するためには、その流出範囲を的確に予測することが重要である。そこで本研究においては、崩壊によって発生した土塊がどの程度の範囲にまで到達するのかを知るため、斜面上を变形しながら移動する流動土塊の堆積機構について検討する。

2. 流動機構 著者らは、図-1に模式化したような斜面上を移動する土塊の運動量保存則を、次式のように提案している¹⁾。

$$d(\rho_f A_f U_f)/dt = \rho_f A_f g \sin \theta - \mu_k (\rho_s - \rho)(1-\lambda) A_f g \cos \theta - f_b f_f U_f^2 \quad (1)$$

ここに、 ρ_f : 平均土塊密度、 A_f : 土塊断面積、 U_f : 土塊移動速度、 θ : 斜面勾配、 μ_k : 動摩擦係数、 ρ_s : 粒子密度、 ρ : 水密度、 λ : 土塊空隙率、 f_b : 流体抵抗係数、 f_f : 土塊長さである。なお、土塊が完全飽和状態のときには、 $\rho_f = (1-\lambda)\rho_s + \lambda\rho$ の関係がある。式(1)より、土塊の運動は μ_k と f_b とに規定される。これらのうち μ_k は静止摩擦係数 μ_s のみに依存し、 $\mu_k = (0.7 \sim 0.85)\mu_s$ の関係にあることがわかっている。また、図-2に示すような2次元等流状態で移動する土層において、底面から厚さ δ だけが流動化している場合の応力のつりあいと流速分布とを議論することによって、 f_b は次式のように与えられている。

$$f_b = \frac{25}{\pi} \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1-C}{C} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\delta}{h} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここに、 k_p/k_v : 形状係数比でほぼ1の値、 C : 粒子体積濃度で $C=1-\lambda$ 、 h : 土層厚、 d : 粒径である。

図-2 等流状態で移動する土層

3. 堆積機構 流動化した土塊が、侵食や堆積を伴って变形しながら斜面上を移動する場合の運動則を導くには、土塊の運動をオイラー的にとらえて土塊の微小要素に着目し、その連続式、運動方程式、河床変動式および堆積量を表わす式を考える必要がある。運動方程式は式(1)を土塊の微小要素に適用したものを全体積にわたって積分して得られる。また、堆積量は、実際の土砂濃度とその局所勾配における土砂の輸送能力との差に依存すると考えられる。これらは以下のように定式化される。これをオイラー的モデルと呼ぶ。

$$\text{土塊全体の連続式: } \frac{\partial h_f}{\partial t} + \frac{\partial (U_f h_f)}{\partial x} + eD = 0 \quad (3)$$

$$\text{土塊中の砂の連続式: } \frac{\partial (Ch_f)}{\partial t} + \frac{\partial (CU_f h_f)}{\partial x} + D = 0 \quad (4)$$

$$\text{運動方程式: } \left\{ (\rho_s - \rho)C + \rho \right\} h_f \left(2 \frac{\partial U_f}{\partial t} + U_f \frac{\partial U_f}{\partial x} \right) - \left\{ \rho_s + (e-1)\rho \right\} U_f D = G - P - S \quad (5)$$

$$\text{ここに、} \left\{ \begin{array}{l} G = \{ (\rho_s - \rho)C + \rho \} h_f g \sin \theta \\ P = \{ (\rho_s - \rho)C + \rho \} h_f g \cos \theta \mu_k \\ S = \{ (\rho_s - \rho)C + \rho \} h_f g \cos \theta \mu_s \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} P &= \mu_s g h_f \left[\frac{1}{2} (R-P) h_f \frac{\partial C}{\partial x} + \left\{ (R-P) C + P \right\} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (h_f + z_b) \right\} \right] \\ S &= \mu_s (R-P) g C h_f \cos \theta + P f_b U_f^2 \end{aligned} \right.$$

河床変動式: $\frac{\partial z_b}{\partial t} - \frac{1+e}{e} D = 0 \quad \cdots (6)$

堆積量の式: $D = \beta (U_f C - U_m C_m) \quad \cdots (7)$

ここに、 D : 単位時間単位面積当たり土塊から斜面への絶対堆積土量で、 $D < 0$ のときには侵食量を表わす。 e : 堆積層の間隙比、 z_b : 河床位、 β : 係数であり、 U_m 、 C_m はそれぞれ次式で表わされる量である。

$$U_m = \left(g h_f \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \cdots (8) \quad C_m = \frac{\tan \theta}{(\sigma - 1)(\mu_s - \tan \theta)} \quad \cdots (9)$$

ここに、 $a = -f_b / \{(\sigma - 1)C + 1\}$ 、 $b = \cos \theta [\tan \theta - \mu_s (\sigma - 1)C / \{(\sigma - 1)C + 1\}]$ 、 σ : 粒子比重である。 U_m 、 C_m はそれぞれ、その勾配が無限に続くと仮定したときに土塊が達成する速度および濃度と考えられる。一方、土塊内部での圧力勾配などの影響が無視できるとすると、図-3 に示すようなラグランジュ的追跡法が可能であり、以下のようにより定式化される。これをラグランジュ的モデルと呼ぶ。

$$\text{土塊中の水の連続式: } U_f \frac{d}{dx} \{P(1-C)h_f\} = -PeD \quad \cdots (10)$$

$$\text{土塊中の砂の連続式: } U_f \frac{d}{dx} (R C h_f) = -\beta D \quad \cdots (11)$$

$$\text{運動方程式: } U_f \frac{d}{dx} (P U_f h_f) = \beta g h_f \sin \theta - \mu_s (R-P) g C h_f \cos \theta - P f_b U_f^2 \quad \cdots (12)$$

$$\text{河床変動式: } U_f \frac{dz_b}{dx} = \frac{1+e}{e} D \quad \cdots (13)$$

$$\text{堆積量の式: } D = \beta (U_f C - U_m C_m) \quad \cdots (14)$$

以上2つのモデルは、どちらも理論解析的に解くことができないので、前進差分法による数値計算を行って解を求める。図-4 および図-5 は、それぞれのモデルによる堆積形状の計算結果と実験結果とを比較したものである。いずれの場合も実験結果を適切に表現できることがわかる。

4. あとがき 斜面上を移動する流動土塊の堆積機構が、オイラー的およびラグランジュ的両モデルによって適切に表現できることが明らかとなった。今後、堆積量 D を決める式(7) (式(14))中の係数 β の正しい評価法を検討する必要がある。

(参考文献) 1) 芦田・江頭・神矢・佐々木: 斜面上における土塊の抵抗則と移動速度, 京都大学防災研究所年報第28号B-2, 1985, pp. 297-307. 2) Takahashi: Debris Flow, Ann. Rev. Fluid Mech. 13, 1981, pp. 57-77.

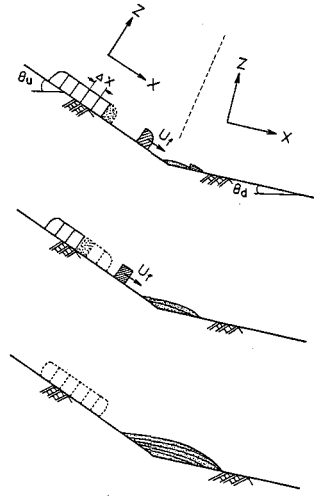


図-3 ラグランジュ的追跡法の概念図

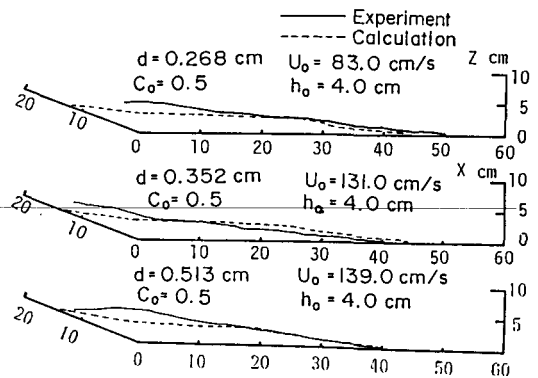


図-4 堆積形状の比較(オイラー的モデルによる計算結果と実験結果)

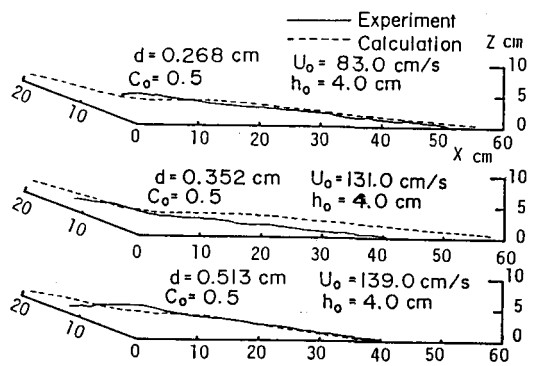


図-5 堆積形状の比較(ラグランジュ的モデルによる計算結果と実験結果)