

斜面崩壊の発生と崩壊の流下機構

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

阪神電気鉄道

正員 佐々木 浩

1. はじめに 崩壊土砂の到達距離の予測問題は、防災対策上重要な課題である。そのためには、斜面崩壊土量と崩壊土砂の運動機構に関する知見が不可欠である。ここでは、浸透流による斜面崩壊規模の決定機構を検討するとともに、流動砂礫の流出過程について検討する。

2. 崩壊規模の決定機構 崩壊規模を決定する要因として、表土層厚の変化に着目する。土層を図-1のように模式化し、不透水層を正弦関数で近似してX軸方向の斜面の安定性を検討する。このとき、浸透流水深を飽和浸透流水深 h_s と不飽和浸透流水深 h_{us} に分けて考える。ここで、無限長斜面の安定解析を適用する。図中①②③の点の不安定度UF(駆動力/抵抗力)は次のように評価される。

$$\textcircled{1}, \textcircled{2}: UF = \tan \theta / \tan \phi_s \quad (1)$$

$$\textcircled{3}: UF = \frac{1 + \{ \rho \lambda (h_t + \gamma - z) \} / \{ \rho_s (1 - \lambda) (D + \gamma - z) \}}{1 + \{ \rho \lambda (h_t - h_s) - \rho (1 - \lambda) (h_s + \gamma - z) \} / \{ \rho_s (1 - \lambda) (D + \gamma - z) \}} \quad (2)$$

ここに、 ρ, ρ_s は水、土粒子の密度、 λ は土層の空隙率、 ϕ_s は土の内部摩擦角である。 h_t は、全浸透流を飽和浸透流とみなした場合の水深であり、 h_s と h_t には、次の関係がある。

$$h_s = h_t \cdot (\gamma_t - \gamma_{us}) / \gamma_t, \quad (\gamma_t = \gamma_{us} + \gamma_s) \quad (3)$$

ここに、 γ_t は全浸透流量、 γ_{us}, γ_s は不飽和、飽和浸透流量であり、 γ_{us} は実験より求めるものとする。式(1)、(2)において $UF > 1$ のとき不安定、 $UF < 1$ のとき安定である。上述の計算から求まる不安定領域上の土量 V_s (崩壊可能土量)と、実験での崩壊土量(ビデオ解析より移動が認められた土量)との相関を図-2に示す。図中で、 V は不透水層上方の一波長間の土量である。この図より、崩壊土量は、不安定領域の大きさによって決定される可能性の高いことがわかる。図-3、図-4には、不透水層の波長 L 、波高 a をパラメータとした無次元崩壊可能土量 (V_s/D_0^3) の変化を示す。図中で、 D_0 は不透水層頂部の土層厚、 β_s は飽和透水係数である。図には、無限長斜面に対する解も示しており、曲線はこれに収束する傾向を示す。しかし、崩壊の発生時点と崩壊可能土量との関連性については、議論するに至っておらず、この点を明らかにすることが、今後の課題と考えられる。

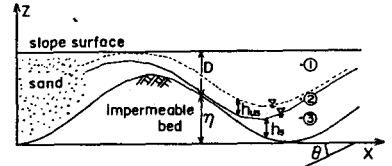


図-1 土層の模式図

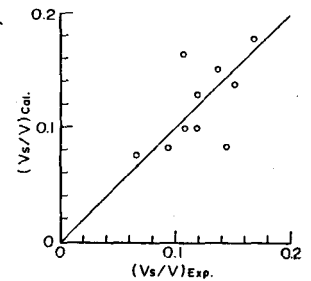


図-2 崩壊可能土量

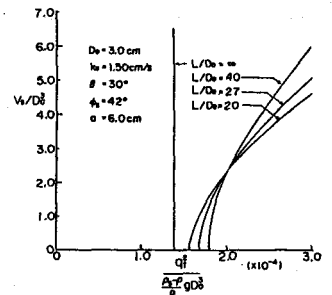


図-3 波長Lと崩壊規模

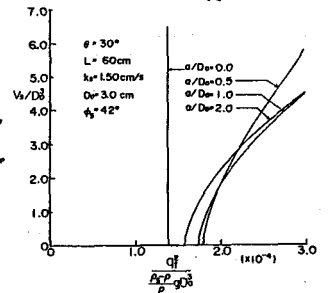


図-4 波高aと崩壊規模

Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, Hiroshi SASAKI

3. 崩土の流出過程

崩土の流出過程において、圧力勾の影響が無視できる場合には、図-5に示すようなラグランジュ的手法による堆積形状の追跡が可能である。この場合、土砂の流出過程を支配する方程式は以下のようである¹⁾。

$$\text{水の連続式: } U \frac{d}{dx} \cdot \{(1-c)h\} = -(1-C^*)/C^* \cdot D \quad (4)$$

$$\text{砂の連続式: } U \frac{d}{dx} \cdot (Ch) = -D \quad (5)$$

$$\text{運動方程式: } U \frac{d}{dx} \cdot (P_m U h) = P_m g h \sin \theta - \mu_k (P_s - P) c g h \cos \theta - P f_b U \quad (6)$$

$$\text{河床変動式: } U \frac{dz_b}{dx} = -D/C^* \quad (7)$$

ここに、 U : 土層の移動速度、 C : 土粒子濃度、 h : 土層厚、 D : 堆積速度、 P : 水の密度、 P_s : 土粒子密度、 P_m : 土粒子と水の混合物の密度で、 $P_m = P_s C + P(1-C)$ 、 μ_k : 動摩擦係数で、運動に依存せず、静摩擦係数の0.7~0.85倍程度、 θ : 河床勾配、 z_b : 河床位、 C^* : 堆積物の濃度である。 f_b は流体抵抗係数で、次式より得られる。

$$f_b = 25/4 \cdot (R_p/R_v)^{3/2} \cdot \{(1-C)/C\}^{3/2} \cdot \{1 - (1-\delta/h)^2\}^{-2} \quad (8)$$

ここに、 d : 粒径、 δ : 流動層厚、 $(R_p/R_v)^{3/2}$: 粒子と間隙の形状係数比であり、実験より2.0程度の値をとることが明らかにされた。式(4)~式(7)において、未知数5に対し、式が1つ不足しており、 D の評価式が必要である。式(6)において、左辺=0と置き、移動層と堆積層の境界付近では、流体せん断抵抗が無視できる。このとき、堆積勾配 τ は、 $\tau = \tan^{-1} \{ \mu_k \cdot C \cdot (P_s - P) / P_m \}$ と表わされる。式(7)において、 $\alpha = \tan^{-1} \{ -dz_b/dx \}$ とすると、 $\tau = \alpha + \theta$ なる幾何学的関係が成立する。これらのことより、 D の評価式が次のように求まる。

$$D = C^* \tan(\tau - \theta) \cdot U \quad (9)$$

上式は $(\tau - \theta)$ の正負により堆積あるいは侵食を表わす。図-6は式(9)と実験値との比較である。実験では、 $C = 0.3 \sim 0.4$ であったことを考慮すると、式

(9)は堆積速度をよく評価するものといえる。図-7は、実験で求められた堆積形状と、式(4)~式(9)を用いた計算結果の比較である。計算結果は実験をほぼ説明するものであり、上述の支配方程式は、かなりの一般性をもつものと考えられる。

4. おわりに 以上、崩壊規模の決定機構と、流動土砂の流出過程について議論した。今後、いかに両者を接続し、崩土の移動開始から、停止・堆積に至るまでの過程を議論していくかが課題である。

<参考文献> 1) 芦田・江頭・神矢・佐々木; 流動土塊の堆積機構に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第29号B-2, 1986, pp.329-342.

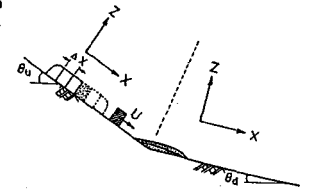


図-5 ラグランジュ的手法の概念図

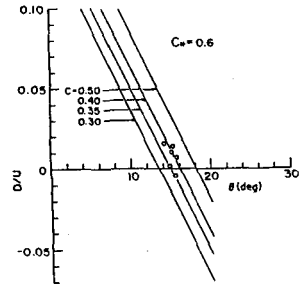


図-6 堆積速度 D

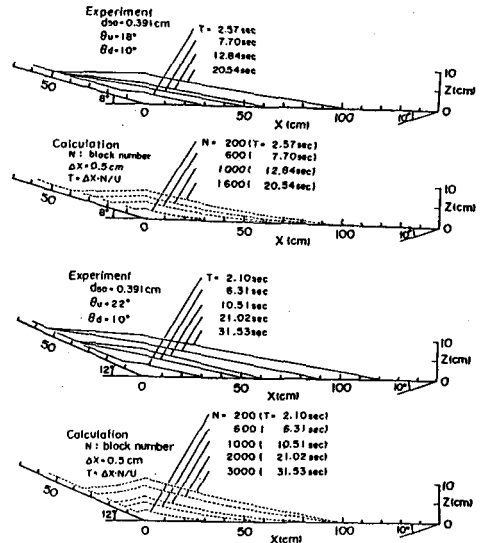


図-7 堆積形状