

II-225 斜面における土塊の流動化と抵抗則

京都大学 防災研究所 正 江藤進治
 京都大学 防災研究所 正 菊田和男
 京都大学 大学院 学 神矢弘
 京都大学 大学院 学 佐々木浩

1. 緒言 山腹斜面の崩壊による災害危険範囲の設定は、土砂害防止軽減策の有力な手段の一つになっている。危険範囲をより的確に予測するためには、斜面における土塊の挙動も明らかにする必要がある。斜面と移動する土塊は一般に流動化現象を伴い、土塊の運動はより影響を強く受けることが知られている。そこで、本研究においては、主として流動化を伴う場合の抵抗則について検討する。

2. 移動土塊の抵抗則 著者らは、斜面を移動する土塊も図-1のようにモデル化し、土塊に働く抵抗力として、固体および流体摩擦も考えて次式のような運動量保存則を提案している¹⁾。

$$d(P_s A_f U_f)/dt = P_s A_f g \sin \theta - \mu_k (P_s - P)(1-\lambda) A_f g \cos \theta - P f_b l_f U_f^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 μ_k :動摩擦係数、 f_b :流体抵抗係数、 λ :土塊の空隙率、 P_s :粒子密度、 P :間隙水の密度、 ρ :土塊の平均密度、上式では空隙が水で飽和していると考えており、 $\rho = \lambda P + (1-\lambda)P_s$ 、 A_f :土塊の断面積である。上式によれば、土塊の運動は μ_k および f_b に依存する。これらのパラメータのうち、 μ_k は先の研究において $\mu_k/\mu_s = 0.7 \sim 0.85$ (μ_s :静摩擦係数)になることが明らかにされており、ここでは、 f_b について議論する。いま、図-2のように2次元等流状態を移動する土層のうち、厚さ δ の部分が流動化しているものとするれば、この部分には固体摩擦以外に、間隙水のせん断変形に伴う流体力が発生する。この力は形式的に $\tau_w = E_a du/dz$ (E_a :見かけ粘性)のようによく表わされる。ところが、応力の成分のつり合いは次のように表わされる。

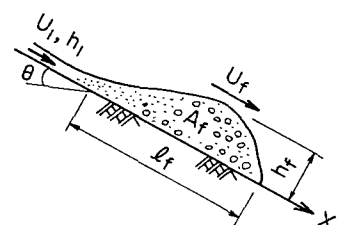


図-1 土塊の運動モデル、記号

$0 \leq z \leq \delta; \rho g(h-z) \sin \theta = \mu_k (P_s - P)(1-\lambda)(h-z)g \cos \theta + P l^2 (du/dz)^2 \quad \dots \dots \dots (2)$
 上式は、広義の意味でビンガム流動モデルに相当する。上式の混合距離 l は、粒子間隙の代表長に依存することが考えられる。そこで、流動層の体積 V に占める粒子体積 V_p 、空隙のそれ V_v 、粒子数 N 、粒子径 d とすれば、 $V = V_p + V_v$ 、 $V_p = (1-\lambda)V = k_p d^3 N$ 、 $V_v = \lambda V = k_v l^3 N$ のようであり、これらの関係より l は、

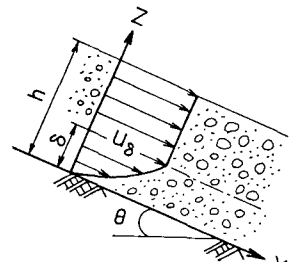


図-2 2次元流動モデル

$$l = \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{1/3} \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right)^{1/3} d = \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{1/3} \left(\frac{1-C}{C} \right)^{1/3} d \quad \dots \dots \dots (3)$$

のように表わされる。ここに、 C :粒子体積濃度である。式(3)と(2)に適用し、 $z=0$ で $u=0$ とすればつぎのような流速分布式を得る。

$$0 \leq z \leq \delta; \frac{u(z)}{\sqrt{g h}} = \frac{2}{3} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[\cos \theta \left\{ \tan \theta - \frac{(\sigma-1)(1-\lambda) \mu_k}{(\sigma-1)(1-\lambda)+1} \right\} \left\{ \frac{(\sigma-1)(1-\lambda)}{(\sigma-1)(1-\lambda)+1} + 1 \right\}^{1/2} \left\{ \frac{1-\lambda}{\lambda} \right\}^{1/3} \frac{h}{d} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z}{h} \right)^{3/2} \right\} \right] \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\delta \leq z; \quad u(z)/\sqrt{g h} = \text{const.}, \quad (\sigma = P_s/P)$$

図-3は、土石流に関する橋・橋本・末次³⁾のデータも式(4)に適用して形状係数比 $(k_v/k_p)^{1/3}$ と調べたものである。これによれば、形状係数比はほぼ1程度の値をとるようである。なお、図には、土石流に関する高橋⁴⁾

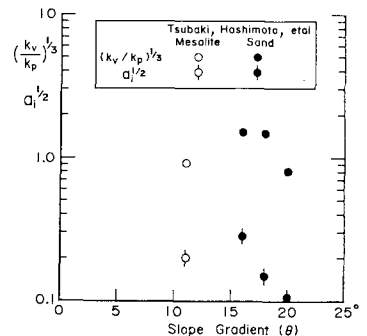


図-3 形状係数比 $(k_v/k_p)^{1/3}$

の Q_0 も示されている。図-4は、 $\delta=h$ となる全層流動の場合の流速分布に関し、式(4)と実験値と比較したものである。これより、同式は流速分布をかなりよく表わすことがわかる。

上述の議論より流動層における流速分布が得られた。そこで、式(4)より平均流速を求め、これを $f_0 = \{ \rho g h \sin \theta - \mu_k (\rho_s - \rho) g (1-\lambda) h \cos \theta \} / \rho U^2$ に代入すれば、流体抵抗係数に関する次式が導かれる。

$$f_0 = \frac{25}{4} \left(\frac{k_p}{h_v} \right)^{2/3} \left\{ \frac{\lambda}{1-\lambda} \right\}^{2/3} \left(\frac{h}{\alpha} \right)^{-2} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\delta}{h} \right)^{5/2} \right\}^{-2}, (\delta \neq 0) \dots (5)$$

上式によれば、 f_0 は λ あるいは C 、 h/α 、 δ/h に依存する。

図-5は、流体抵抗係数に関する式(5)と実験値との比較である。図の直線群は $\lambda=0.4$ ($C=0.6$) とし求められており、矢線が結ばれたデータは、土塊の移動に伴う δ/h の変化に対応するものである。なお、三角および丸印のデータは、土塊の材料として、それぞれ砂および砂と粘土の混合物を用いたもので、四角印は、境界面近傍を除き殆ど変形が進まないよう強度を強くした土塊のデータである。図の比較が示すように、データにはばらつきが見られるものの、式(19)は実験値をかなりよく評価しているものと思われる。なお、データのばらつきは、粒子体積濃度によるものと考えている。

3. 土塊の移動速度 流体抵抗係数がほぼ明らかにされたので、式(1)による土塊の運動に関する議論が可能である。しかし、土塊の移動過程において流動層厚 δ が変化し、 f_0 が x の関数になるため、式(1)を解析的に解くのが困難である。ところが、 f_0 を定数として解を得た後、この条件を開放したものも近似解とみなし、これが厳密解も十分に近似していれば、これを解として採用するのも有効な手段がある。そこで、式(1)において質量変化のない状態を考え、 $dt = dx/U_f$ なる変換を行った後、 $x=0$ で $U_f=0$ のときの近似解を求めると、次式を得る。

$$U_f' = \left\{ -\frac{b}{a(x)} (1 - e^{2a(x)x'}) \right\}^{1/2} \dots (6)$$

ここに、 $x' = x/h_f$ 、 $U_f' = U_f / \sqrt{g h_f}$ 、 $a(x') = -2(\rho/\rho_s) f_0(x')$ 、 $b = \cos \theta \{ \tan \theta - \mu_k (1-\lambda)(\rho_s - \rho) / \rho \}$ である。上式の近似の程度を調べるため、流動層厚を $\delta/h_f = 0.1 + \alpha x'$ と置き、 α を種々変化させて式(6)から U_f' を求めるとともに、式(1)を x 座標で書きなおした後、4次のルンゲ-クッタ法を用いて数値解を求め、これらと比較した。その結果、式(6)は近似解として十分であることが判明した。

図-6は、土塊の移動速度に関する実験値と式(6)との比較である。このように、式(6)は斜面における土塊の運動をかなりよく表現している。なお、計算では移動開始から全層流動化するまでの δ/h_f を直線と与えている。

4. 結語 斜面上における土塊の運動は、流動化現象によって大きく左右されることが知られているが、上述の抵抗則によって、流動化を伴う場合の土塊の運動がほぼ評価されることが明らかにされた。土塊が全層流動を起こすようになると、土塊全体が変形し、質点としての複合的な限界がでてくるものと思われる。今後、この問題とともに、侵食・堆積を伴う場合の土塊の挙動について考察するつもりである。

参考文献 1) 茅田・江頭・神矢: 京大防災研年報, 27号B-2 (1984) 2) 高橋: 京大防災研年報, 25号B-2 (1982) 3) 橋本・橋本・末次: 土木学会論文集, 317 (1982) 4) Takahashi, T.: Proc. ASCE, Vol. 106, Hy 3 (1980)

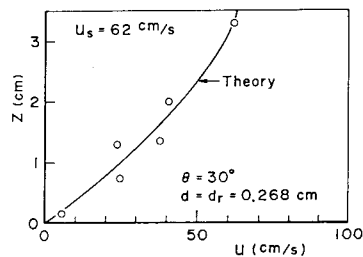


図-4 流速分布に関する式(4)と実験値

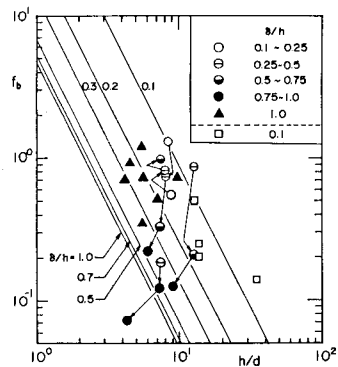


図-5 流体抵抗係数に関する式(5)と実験値

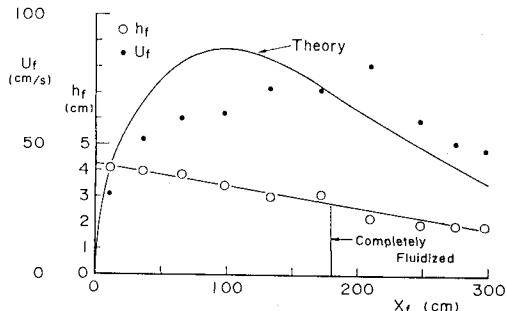


図-6 土塊の移動速度に関する式(6)と実験値