

斜面における土塊の運動機構

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
 京都大学大学院 学生員 神矢 弘
 京都大学大学院 学生員 佐々木 浩

1. まえがき 山腹崩壊等による土砂災害が顕在化している今日、斜面上における土塊の運動機構の解明は、緊急を要する課題となっている。本報においては、山腹崩壊に伴う崩土の挙動、特に変形、流動化を伴う場合の運動則を理論と実験の両面より検討する。

2. 土塊の流動と抵抗則 斜面上を運動する土塊を模式的に示すと図-1のようである。土塊内部の空隙は水で飽和しているとし、土塊に働く抵抗抗として、固体摩擦と流体摩擦を考えると、土塊の運動量保存則は次式のように近似できる。

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

ここに、 μ_k は動摩擦係数、 f_b は流体抵抗係数、 λ は土塊の空隙率、 P 、 P_s はそれぞれ、水、土粒子の密度、 P_f は土塊の密度であって $P_f = (1-\lambda)P_s + \lambda P$ 、 A_f は土塊の断面積である。

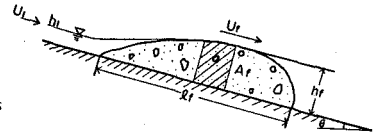


図-1 斜面上を運動する土塊の模式図

式(1)より明らかなように、土塊の運動は μ_k と f_b に規定されるが、これらのうち μ_k については、先の研究¹⁾においてすでに明らかにされており、ここでは f_b について考察する。図-2に示すように、2次元等流状態で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れば、この部分において固体摩擦抵抗以外に間隙水のせん断変形に伴う流体抵抗が発生する。この抵抗力は乱れに起因するものと考えられるため、 $P l^2 (\frac{du}{dz})^2$ のように表示できる。したがって、力のつり合いは次式のように書ける。

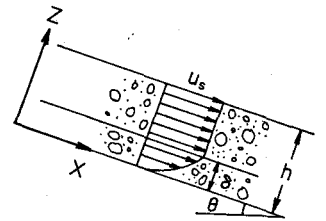


図-2 2次元等流状態で移動する土層

$$0 \leq z \leq \delta \quad P_f g(h-z) \sin \theta = (P_s - P) g(1-\lambda)(h-z) \cos \theta \mu_k + P l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (2)$$

ここに l は混合距離である。いま l を推定するため、流動層の体積 V に占める、土粒子の体積を V_s 、空隙のそれを V_m 、土粒子の数を N 、土粒子径を d 、とすると、これらの間には、

$$V = V_s + V_m, \quad (1-\lambda)V = V_s = R_a d^3 N, \quad \lambda V = V_m = R_m l^3 N$$

なる関係が成立する。これらのことより、 l は次式のように表示される。

$$l = \left(\frac{R_a d}{R_m} \right)^{1/3} \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right)^{1/3} d = \left(\frac{R_a d}{R_m} \right)^{1/3} \left(\frac{1-c}{c} \right)^{1/3} d \quad (3)$$

ここに c は土粒子の体積濃度である。式(3)を(2)に適用し、 $z=0$ で $U=0$ とすれば、次のような流速分布式を得る。

$$0 \leq z \leq \delta, \quad \frac{U(z)}{\sqrt{g h}} = \frac{2}{3} \left\{ \frac{R_m}{R_a} \right\}^{1/3} \cos^{1/2} \theta \left[\tan \theta - \frac{(1-c)c}{(1-c)c+1} \mu_k \right]^{1/2} \{ (1-c)c+1 \}^{1/2} \left\{ \frac{c}{1-c} \right\}^{1/3} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{h} \right)^{3/2} \right] \frac{h}{d} \quad (4)$$

$$\delta < z \leq h, \quad \frac{U(z)}{\sqrt{g h}} = \frac{U(\delta)}{\sqrt{g h}} = \text{const.}$$

式(4)より平均流速 $\bar{U}$ を求め、これを等流状態の力のつり合い式に代入することにより、流体抵抗係数が次のように導かれる。

$$0 < \delta \leq h, \quad f_b = \frac{5}{4} \left(\frac{R_a d}{R_m} \right)^{1/3} \{ (1-c)/c \}^{1/3} \left(\frac{d}{h} \right)^{1/3} \{ 1 - (1-\delta/h)^{3/2} \}^2 \quad (5)$$

これによれば流体抵抗係数は、 c 、 d/h 、および δ/h に依存する。

Kazuo ASHIDA Shinji EGASHIRA Hiroshi KAMIYA Hiroshi SASAKI

式(5)により f_b を求めるには形状係数 $(R_m/R_d)^{1/3}$ を決定する必要がある。そこで、積¹⁾の土石流に関する流速分布の実験データを用いてこれを調べると、図-3のようになる。これによれば、 $(R_m/R_d)^{1/3}$ はほぼ一定値をとり、しかも1.0程度の値になっている。しかしながら、これが一般的に定まるものかどうかは、今後検討しなければならない。

f_b に対する δ/h 、 δ/h の影響を見るため、 f_b の推定式の妥当性を検討するため、土塊の挙動に関する水路実験を行なった。土塊の材料は、砂と粘土の配合および粒径を変えて作成されており、土塊の挙動に対する δ/h の変化および δ/h の影響が検討できるように考慮されている。

図-4は $\delta/h=1$ 、すなわち完全に流動化している土塊について、ビデオ解析により求めた流速分布と式(4)による計算値との比較である。これより理論は土塊の内部構造をよく説明していることがわかる。図-5は f_b に関する実験値と、 $c=0.6$ とした式(5)を比較したものである。図中の矢印はそれぞれの土塊の移動に伴う δ/h の変化に応じた f_b の値を示している。左図には、変形が殆ど進まない($\delta/h \approx 0.1$)土塊についての実験結果¹⁾も示されている。図-5の比較より明らかなように、式(5)は実験値をかなりよく説明している。

3. 運動方程式の解とその適用 f_b がほぼ明かにされたので、式(1)に基づく土塊の運動の議論が可能である。ところが、土塊の移動に伴って f_b が変化するため、厳密な解を導くことができない。しかし、 $f_b = \text{const.}$ として解を求めた後、 $f_b = \text{const.}$ の条件を開放したものを近似解として採用することも一つの方法である。このような方法で求められる式(1)の近似解を示せば、次式のようにある。

$$U_f'(x_f) = \left\{ -\frac{2(1 - e^{2\alpha(x_f)x_f})}{\alpha(x_f)} \right\} \quad (6)$$

ここに、 $x_f = x/h_f$ 、 $\alpha(x_f) = -2(P/P_f)f_b(x_f)$ 、 $Q = \sin\theta - \{(1/2)(P_f - P)g \cos\theta\} / \mu_f / P_f$
図-6は、近似の程度を調べるため、ルンゲクッタ法による数値解と式(6)を比較したものである。ここで、流動層厚は移動距離に比例して増加すると仮定されている。図の比較より運動方程式の解は近似解で十分であるといえる。

図-7は土塊の移動速度に関し、実験値と近似解を比較したものである。実験精度等の問題を考慮すれば、式(6)は土塊の運動をかなり適切に評価しているものと思われる。

4. あとがき 変形、流動化を伴う土塊について、その抵抗則の解明を中心に、理論と実験の両面より検討し興味ある知見を得た。今後、形状係数に関する問題や、減速停止過程における質量変化を考慮した土塊の挙動について検討を行う必要がある。

<参考文献>

- 1) 芦田・江頭・神矢 京大防災研年報 27号B-2, 1981, pp. 331-340
- 2) 橋本・橋本・末次 土木学会論文報告集第317号

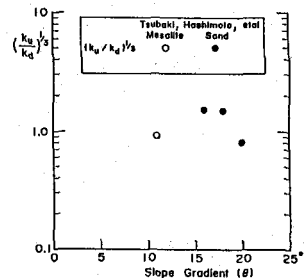


図-3 形状係数 $(R_m/R_d)^{1/3}$

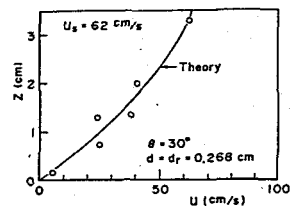


図-4 流速分布

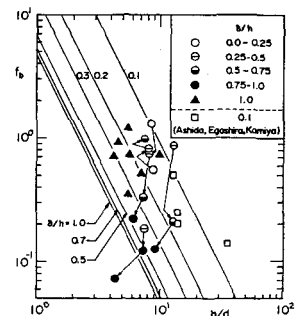


図-5 流体抵抗係数 f_b の変化

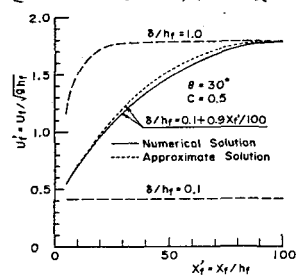


図-6 近似解と数値解

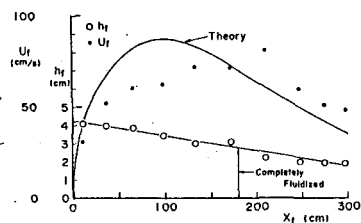


図-7 土塊の移動速度