

建設省 土木研究所○寺田秀樹

中村良光

藤沢和範

アジア航測株式会社 北原一平

中島達也

1. はじめに

急傾斜地や沿道斜面等での斜面崩壊対策において、危険範囲の予測や対策工事を合理的なものにするためには、斜面崩壊の発生機構を明らかにするだけでなく、崩壊土砂の流動機構を明らかにし、その堆積機構についても検討する必要がある。崩壊土砂の到達範囲の研究事例は数多くあり、大きく分けると次の3種類に区分される。1つは崩壊土砂を有限の長さを持つ物体の運動として質点的な取扱いをしているものである。第2は、災害資料を基に統計処理を行い到達範囲を議論しているものである。第3は固体摩擦に加えて速度の2乗に比例した摩擦を考慮して崩壊土砂の運動を議論しているものである。本研究では平成2年度に発表した乾燥粒子流の抵抗則を用いてシミュレーションモデルを作成し、2次元流路および緩斜面平板の堆積実験を対象にシミュレーションを実施し、抵抗則およびシミュレーションモデルの妥当性を検討した。

2. 崩壊土砂の抵抗モデル

一定勾配の斜面上を運動する崩壊土砂はある距離以上進むと一定速度に達する。この時点では推進力と抵抗力がつり合った状態になっている。この流れの状況を示したのが図1である。いま任意の深さ h における力のつり合いを考えると推進力 R は次のように表わされる。

$$R = \sigma \cdot c \cdot g (H-h) \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 σ ：土粒子の密度、 c ：土粒子の体積濃度、 g ：重力加速度、 H ：崩壊土砂の厚さ、 θ ：斜面勾配である。

抵抗モデルとしては3つの抵抗力を考える。1つは降伏応力であり、 τ_y と表現する。第2は流体相の粘性や乱れにより生じる力であり τ_f と表現する。第3は粒子の非弾性的な衝突により生じる力であり τ_g と表現する¹⁾。すなわち全抵抗力はこれら3つの抵抗の和として

$$\tau = \tau_y + \tau_f + \tau_g \quad (2)$$

と表現できる。これらの抵抗力はそれぞれ次のように表される。²⁾

$$\tau_y = \sigma_m \cdot \mu_k \quad (3)$$

$$\sigma_m = \sigma \cdot c \cdot g (H-h) \cos \theta$$

ここに、 μ_k ：動摩擦係数、 σ_m ：砂礫粒子の有効垂直応力

$$\tau_f = \eta \frac{du}{dy} + \rho l^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{du}{dy} \quad (4)$$

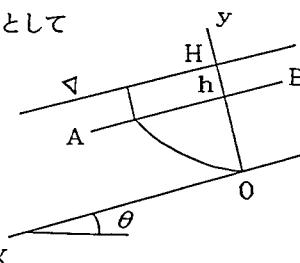


図1 力の釣り合いの概念図

ここに、 η : 間隙水の粘性係数、 ρ : 水の密度、 l : 乱れの混合距離、 du/dy : 速度勾配

$$\tau_s = \left(\frac{\pi}{12} \right) \sin^2 \alpha (1 - e^2) \sigma (1/b) D^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (5)$$

ここに、 e : 粒子の反発係数、 α : 粒子の衝突角、 D : 粒子の直径

これらの抵抗力の内、本研究は乾燥粒子が対象であるため τ_s を除いて、式(1)(2)(3)(5)を用いて鉛直速度分布式、平均流速式を求めるところとなる。

$$u(h) = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{c g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}{(\pi/12) \sin^2 \alpha (1 - e^2) \sigma (1/b) D^2}} \times \{ H^{3/2} - (H - h)^{3/2} \} \quad (6)$$

$$u = \frac{2}{5} \sqrt{\frac{c g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}{(\pi/12) \sin^2 \alpha (1 - e^2) \sigma (1/b) D^2}} \times H^{3/2} \quad (7)$$

3. 崩壊土砂の流動・堆積過程のシミュレーション

3. 1 基礎方程式

崩壊土砂の流動・堆積の過程を追跡するためには、流下過程における侵食・堆積の影響を追跡することが必要となる。

X 方向の運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (M \cdot u)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (M \cdot v)}{\partial y} = -g \cdot h \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{F_x}{T} \quad (8)$$

Y 方向の運動方程式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial (N \cdot u)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (N \cdot v)}{\partial y} = -g \cdot h \cdot \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{F_y}{T} \quad (9)$$

液相の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1 - C_d) \cdot h) + (1 - C) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

砂礫の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_d \cdot h) \cdot C \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

ここに、 h : 崩壊土砂の流動深、 M : x 方向運動量フラックス ($M = u \cdot h$) 、 N : y 方向運動量フラックス ($M = v \cdot h$) 、 u : x 方向流速、 v : y 方向流速、 β : 運動量補正係数 : $\beta = 1.25$ 、 T : 崩壊土砂の密度、 H : 崩壊土砂の流動面の標高、 F_x , F_y : x , y 方向の摩擦抵抗力、 q_x , q_y : x , y 方向の液相のみの単位幅当たりの流量、 q_{bx} , q_{by} : x , y 方向の砂礫のみの単位幅当たり流量

3. 2 抵抗モデル

式(11)中の摩擦抵抗力 F_x, F_y について検討する。崩壊土砂の抵抗は式(2)で示されるが、本研究では乾燥砂を対象としているため、抵抗モデルとしては式(2)中の τ_y と τ_s の2つの力を考える。すなわち、

$$\tau = \tau_y + \tau_s \quad (12)$$

と表現できる。現在のところ土砂濃度の分布モデルは確立されていないが、藤沢らは³⁾便宜的に $C = -\beta y + C_0$ として式(3)から

$$\begin{aligned} \tau_y &= \sigma \cdot g \cdot (-\beta y + C_0) (H - y) \mu_k \cos \theta \\ &= \sigma g \{ \beta y^2 - (\beta H + C_0) y + H C_0 \} \mu_k \cos \theta \end{aligned} \quad (13)$$

断面の τ_y の平均は次式で示される。

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_y &= \frac{\int_0^H \tau_y dy}{H} = \frac{[\sigma \cdot g \cdot \mu_k \cdot \cos \theta \cdot \{ \frac{\beta}{3} y^3 - \frac{(\beta H + C_0)}{2} y^2 + H C_0 y \}]_0^H}{H} \\ &= \sigma \cdot g \cdot \mu_k \cdot \cos \theta \cdot \left(-\frac{\beta}{6} H^2 + \frac{C_0}{2} H \right) \end{aligned} \quad (14)$$

また、藤沢³⁾らによると

$$\frac{du}{dy} = \frac{g \cdot (-\beta y + C_0) \cdot (H - y) \cdot (\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}{(\pi/12) \sin^2 \alpha \cdot (1 - e^2) (1/b) \cdot D^2} \quad (15)$$

式(15)を式(5)に代入すると

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{\pi}{12} \sin^2 \alpha \cdot (1 - e^2) \sigma \frac{1}{b} D^2 \cdot \frac{g \cdot (-\beta y + C_0) (H - y) (\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}{(\pi/12) \sin^2 \alpha \cdot (1 - e^2) (1/b) \cdot D^2} \\ &= \sigma \cdot g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta) \{ \beta y^2 - (\beta H + C_0) y + H C_0 \} \end{aligned} \quad (16)$$

したがって、断面の τ_s は

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_s &= \frac{\int_0^H \tau_s dy}{H} = \frac{(\sigma g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta)) \left(\frac{\beta}{3} y^3 - \frac{1}{2} (\beta H + C_0) y^2 + H C_0 y \right)_0^H}{H} \\ &= \sigma g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta) \left(-\frac{\beta}{6} H^2 + \frac{C_0}{2} H \right) \end{aligned} \quad (17)$$

式(14)、(17)から抵抗力の断面平均は次式で示される。

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= \bar{\tau}_y + \bar{\tau}_s \\ &= \sigma \cdot g \cdot \sin \theta \left(-\frac{\beta}{6} H^2 + \frac{C_0}{2} H \right) \end{aligned} \quad (18)$$

これより F_x, F_y は式(18)の x, y 成分して求められる。

4. 堆積実験

図2の斜面下端に長さ2mの緩斜面を接続して行った。中央粒径2.86mm, 0.93mmの2種類のほぼ均一な資料砂を用い、ホッパーから300～500kg程度流下させ、下流側の緩斜面への堆積状況を高速ビデオにより撮影した。斜面の勾配の組合せは上流側34.1°と下流側21.5°、同じく36.0°と16.5°及び39.5°と10.0°の3種類である。また、実験は下流の緩斜面に側壁を設けた2次元流路実験と下流側の緩斜面を平板にして平面的な堆積状況を調べる実験の2種類を行った。

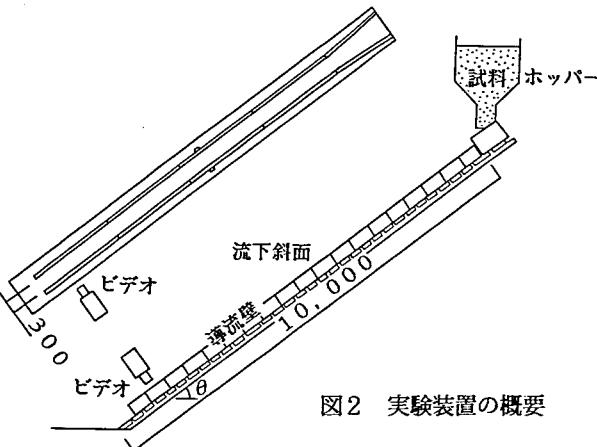


図2 実験装置の概要

5. シミュレーション

2次元流路実験および平板の堆積実験に対してシミュレーションを行った。2次元流路実験に対しては土砂の堆積状況を時系列的に比較した。その結果、各ステップにおける堆積形状は実験と計算出よく一致した。堆積範囲は各ステップで計算結果の方が実験結果よりも若干短くなる傾向があったが、ステップが進むにつれその差は小さくなっている。また、どのステップにおいても、実験の方が計算より長くなる先端部の土砂の堆積厚は非常に薄く、主な堆積範囲はほぼ一致していると見なせる。

平板の堆積実験に対しては最終堆積形状の比較を行った。図3に実験結果と計算結果の比較例を示す。計算条件を表1に示す。図3を見ると実験結果は流路の出口を中心にやや細長い左右対称の扇状地を形成しており、最大の堆積深は約20cmくらいである。一方計算結果もほぼ実験結果と同様の堆積形状を示しており、堆積厚は計算より若干厚くなっているものの堆積範囲はほぼ一致している。

表1 計算条件

項目	計算条件
斜面勾配	
下流部	34.1°
堆積部	21.5°
流度勾配	
$\tan \theta$	35.0°
$\tan \theta$	25.0°
内部摩擦角	30.0°
衝突角	15.0°
粒子密度	2.63 (ton/m^3)
堆積粒子濃度	0.60
粒子直径	3.0 (mm)
運動量補正係数	1.25
エネルギー補正係数	1.7
速度係数	10.0
基準面濃度	0.4
経緯時間	40.0 (秒)
流量	4.05 (t/sec)

参考文献

- 1) 山野邦明、大同淳之、三輪浩、西本直史：Newton流体を含む粒子流の構成方程式のエネルギー的考察、土木学会第39回年講、pp367-368、1984
- 2) 藤沢和範、吉松弘行、工藤賢二：崩土流下時の抵抗則について、平成元年度砂防学会研究発表会 概要集、pp97-100、1989
- 3) 藤沢和範、吉松弘行、工藤賢二：乾燥粒子流の抵抗則、平成2年度砂防学会研究発表会概要集、pp218-221、1990

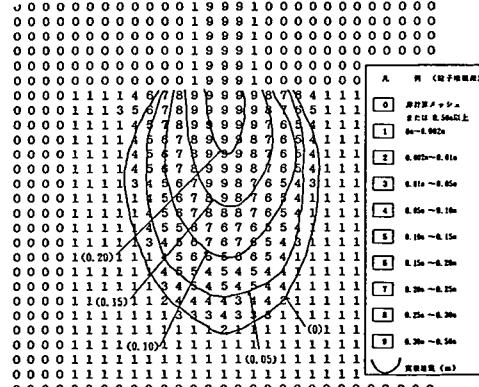


図3 実験と計算結果の比較