

II-102 土石流の流動・堆積機構

阪神電気鉄道 正員 佐々木 浩
 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

1. はじめに 山腹斜面の崩壊や土石流などによる土砂災害の顕在化に伴い、流動土砂の到達距離の予測問題は、防災対策上重要な課題となっている。本研究においては、砂礫型土石流を対象として、土石流の抵抗則に関する考察を行うとともに、流動・堆積の過程を記述する支配方程式を導く。さらに、土石流の堆積過程に関する数値解析結果と実験値を比較検討する。

2. 抵抗則¹⁾ 図-1に示すような、全層が流動化している土石流において、せん断応力 τ は、粒子間摩擦によるyield stress τ_y と間隙流体のひずみ応力 τ_f との和として表現されるものとする。

$$\tau = \tau_y + \tau_f \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 τ_y および τ_f は次式のように表される。

$$\tau_y = \mu_k (\rho_s - \rho) C (h-z) g \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_f = \rho \varepsilon \frac{du}{dz} = \rho \lambda^2 \left| \frac{du}{dz} \right| \frac{du}{dz} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 μ_k は動摩擦係数で、静摩擦係数の0.7~0.85倍程度、 ρ_s は土粒子密度、 ρ は水の密度、 C は土粒子体積濃度、 h は流動深、 θ は河床勾配、 ε は見かけの粘性係数、 λ は粒子間隙の代表長さに相当する乱れの混合距離である。等流状態では式(1)の τ は、外力のせん断成分とつり合っているはずであるから、これを $\tau = \rho_m g (h-z) \sin \theta$ とおくと、式(1)、式(2)、式(3)より流速分布が、次式のように求まる。

$$\frac{u(z)}{\sqrt{gh}} = \frac{2}{3} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[\cos \theta \left\{ \tan \theta - \frac{(\sigma-1)C\mu_k}{(\sigma-1)C+1} \right\} \{(\sigma-1)+1\} \right]^{1/2} \cdot \left\{ \frac{C}{1-C} \right\}^{1/3} \cdot \frac{h}{d} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z}{h} \right) \right\}^{2/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 d は粒子径、 $(k_v/k_p)^{1/3}$ は土粒子と間隙の形状係数比であり、ここでは、式(4)より得られる平均流速式に、土石流実験のデータを適用することにより、これを調べてみる。図-2は形状係数比と土粒子濃度との関係を見たものである。これによると、 $(k_v/k_p)^{1/3}$ は2~3の値になっている。現段階ではほぼ一定値を取ると考えて、以下の解析では形状係数比を2.0とする。また流体抵抗係数 f は次のように得られる。

$$f = \frac{2.5}{4} \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{2/3} \left(\frac{1-C}{C} \right)^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $f_b = (\tau - \tau_y) / \rho U^2$ (U :平均流速)である。図-3は式(5)と f の実験値との比較である。土粒子濃度は0.3~0.4であったことを考えると、式(5)は流体抵抗係数をかなり適切に評価している。

3. 堆積形状の予測 堆積形状を予測する手法には、オイラー

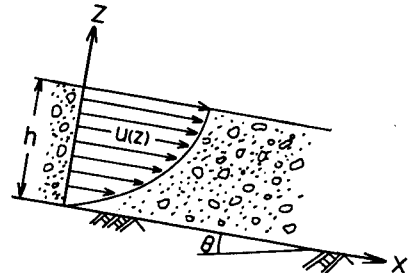


図-1 定常等流状態で移動する土層

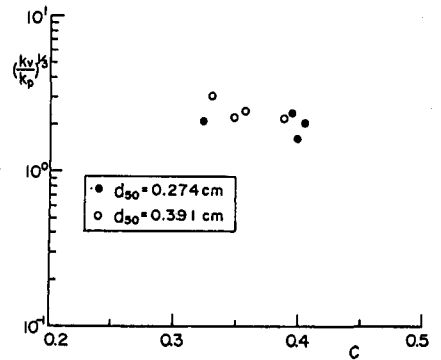


図-2 形状係数比 $(k_v/k_p)^{1/3}$

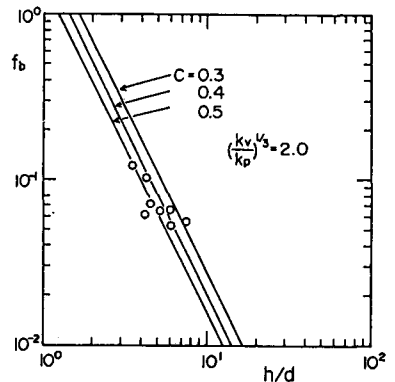


図-3 流体抵抗係数 f_b

の追跡方法とラグランジュ的追跡方法とがある。¹⁾ ここでは、後者による方法を用いることにする。これは、図-4に示すように、土石流を長さ Δx のブロックに分割して、各ブロックに保存則を適用し、堆積形状を追跡するものである。この場合、土石流の堆積過程を支配する方程式は、以下のようである。

$$\text{水の体積保存式: } U \frac{d}{dx} \cdot \{(1-C)h\} = \frac{1-C_*}{C_*} \cdot D \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{砂の体積保存式: } U \frac{d}{dx} (C \cdot h) = -D \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} \text{運動量保存式: } U \frac{d}{dx} [\{ (\sigma-1)C+1 \} Uh] &= \{ (\sigma-1)C+1 \} gh \sin \theta \\ &\quad - \mu_k (\sigma-1) Cgh \cos \theta - f_b U^2 \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\text{河床変動式: } U \frac{dZ_b}{dx} = \frac{-D}{C_*} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 Z_b は河床位、 C_* は河床堆積物の濃度、 D は堆積速度であり、単位時間、単位面積当りの土粒子堆積量の絶対体積を表す。式(6)～式(9)において未知量は、 h, U, D, C, Z_b の五つであり、 D に関する方程式が必要である。土粒子の移動層と堆積層の境界付近では、 τ_f を無視できると考え、式(1)において $\tau_f=0$ ととくと、堆積勾配 r は高橋が²⁾示したものと同様、 $r = \tan^{-1} [\{ (\sigma-1)C\mu_k / \{ (\sigma-1)C+1 \}]$ と表される。また、式(9)において、 $\tan^{-1} \{-dZ_b/dx\} = \alpha$ とすると、幾何学的な関係より $r = \alpha + \theta$ が成立する。これより D の評価式が次のように求められる。

$$D = C_* \cdot \tan(r-\theta) \cdot U \quad \dots\dots\dots (10)$$

上式は、 $(r-\theta)$ の正負により、堆積あるいは侵食を表す。図-5は式(10)と、実験値の比較である。実験における土粒子濃度の範囲を考慮すると、式(10)は堆積速度をよく評価するものであると言える。図-6は、実験で観察された堆積形状と、式(6)～(10)を用いた計算結果の比較である。計算結果において、土石流のブロック数 N と時間 T には、 $T = \Delta x \cdot N / U$ なる関係がある。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、土石流の流動から堆積に至る過程について議論を行った。今後、形状係数比に関するより詳細な議論が必要である。なおラグランジュ的解析法とその適用については講演時に述べる。

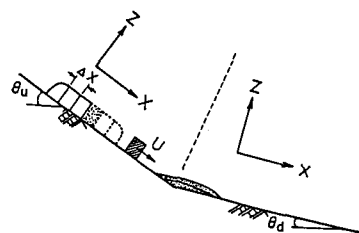


図-4 ラグランジュ的追跡法

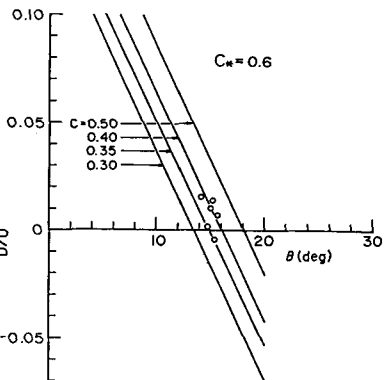


図-5 堆積速度 D

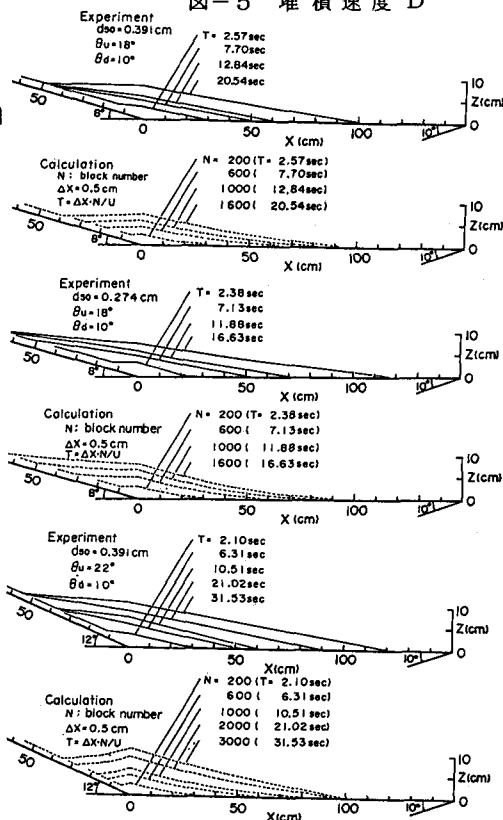


図-6 堆積形状の実験値と計算値の比較

- <参考文献> 1) 芦田・江頭・神矢・佐々木；京大防災研年報、第29号B-2、1986、pp.329-342
2) 高橋・吉田；京大防災研年報、第22号B-2、1979、pp.315-328