

II-133

土石流の流動・堆積シミュレーション

ハシヅクコンクリートインターナショナル 正員 矢島 啓
 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 土石流による災害防止・軽減対策には、土木構造物などによるハード的方法だけでなく、各種のソフト対策が重要である。本研究は、これらの対策を有効に推進するための指針を得ることを目的とするものであって、ここでは、芦田・江頭らによって導かれた土石流の支配方程式をもとに数値シミュレーションを行うとともに、土石流の流出範囲の普遍表示について検討する。

2. 支配方程式 土石流の2次元支配方程式を次のように与えられている。¹⁾²⁾

$$\text{混合物の質量保存則: } \partial h / \partial t + \partial u h / \partial x + \partial v h / \partial y = -D / c_s \quad (1)$$

$$\text{砂礫の質量保存則: } \partial c h / \partial t + \partial c u h / \partial x + \partial c v h / \partial y = -D \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{x方向の運動量保存則: } \partial M / \partial t + \partial u M / \partial x + \partial v M / \partial y \\ = g h \sin \theta_x - (1 / \rho_m) \partial P / \partial x - (1 / \rho_m) \tau_b u / \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{y方向の運動量保存則: } \partial N / \partial t + \partial u N / \partial x + \partial v N / \partial y \\ = g h \sin \theta_y - (1 / \rho_m) \partial P / \partial y - (1 / \rho_m) \tau_b v / \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $P = (1/2) \rho_m g h^2 \cos \theta$, $\tau_b = P_s \tan \phi_s + \rho f (u^2 + v^2)$
 ただし、 $P_s = \{1/(1+\alpha)\}(\sigma - \rho) c g h \cos \theta$, $f = (25/4)\{k_f(1-c)^{5/3}/c^2/3 + k_g \sigma / \rho(1-e^2)c^{1/3}\}(h/d)^{-2}$

$\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$, $M = u h$, $N = v h$, u, v ; それぞれ x 方向、y 方向の平均流速

θ_x, θ_y はそれぞれ x, y 方向の河床勾配、 θ は流れの最急勾配であり、次式で与えられる。

$$\theta = \arcsin\{(u \sin \theta_x + v \sin \theta_y) / \sqrt{u^2 + v^2}\}$$

$$\text{河床位方程式: } \partial z_b / \partial t = D / c_s \quad (5)$$

$$\text{堆積速度式: } D / \sqrt{u^2 + v^2} = c_s \tan(\theta_e - \theta) \quad (6)$$

D は堆積速度であり、 $D > 0$ は堆積を $D < 0$ は侵食を表す。

堆積速度式中に含まれる θ_e は堆積も侵食も起こらない平衡勾配であり、次式で与えられる。

$$\theta_e = \arctan[(\sigma - \rho)c\{\tan \phi_s / (1 + \alpha)\} / \rho_m + \rho f (u^2 + v^2) / (\rho_m g h)]$$

以上の式において、 ρ は水の密度、 σ は粒子の密度、 c は粒子体積濃度、 h は流動深、 θ は河床勾配、 ϕ_s は粒子の内部摩擦角、 e は粒子の反発係数である。また、 ϕ_s は砂粒子の場合 $\phi_s = 36.5^\circ$ 、 $e = 0.8$ であり、 $k_f = 0.25$ 、 $k_g = 0.0828$ 、 $\alpha = 0.25$ 程度の値をとる。

式(1)から式(6)を用いて、土石流の流動・堆積現象を追跡することができる。

3. 数値解析 支配方程式を用いた数値シミュレーションによる結果と2次元汜濫堆積実験を行なった結果とを比較・検討する。数値解析は、中川の研究³⁾を参考にして支配方程式をリーブフロッグ法によって差分化して行った。すべての計算において、 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ cm}$ 、 $\Delta t = 0.002 \text{ sec}$ とし、上流端での境界条件としては、実験で測定した給砂量、給水量を用いる。実験では、上流側の水路、下流側の汜濫台からなる実験装置を用い、水路上流より一定量の水と砂礫を約10秒供給することにより土石流を発生させた。なお、水路部の勾配 θ_u は 18° に、汜濫台の勾配 θ_d は 8° に設定されている。最終時間における等堆積厚線の実験結果と計算結果を

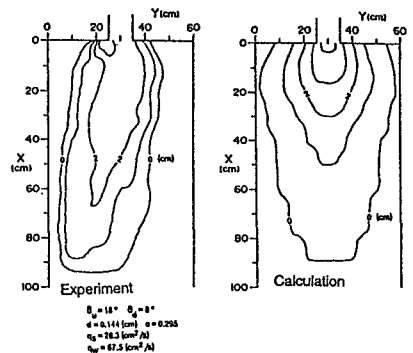


図-1

比較したものを図-1と図-2に示す。それぞれ図の左側は実験結果、右側が計算結果である。条件は図中に示す通りである。いずれのケースも給砂量、給水量はほぼ同じであるが、粒径の条件が異なっており、図-1では、 $d=0.144\text{cm}$ 、図-2では $d=0.265\text{cm}$ のはば一様な砂礫である。どちらのケースも実験結果と計算結果はよく一致しており、粒径の小さい方が土石流の流動性が増し、土石流が遠くまで流出し、堆積することが計算によっても評価されていることが分かる。このことは、土石流の支配方程式の妥当性を示すものである。

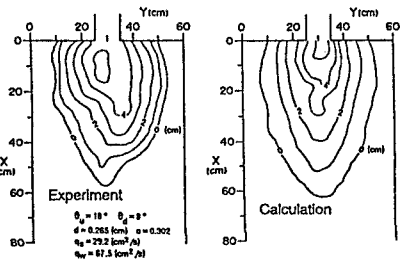


図-2

4. 普遍表示 先に土石流の堆積現象を数値シミュレーションによってほぼ予測できることを示した。しかし、計算結果を利用して与えられた条件のもとにおける土石流の流出範囲を予め把握できるようにしておけば、実務上非常に有効である。そこで、土石流の流出範囲の普遍表示について検討を加える。

土石流の特性値を支配するパラメータとして、 σ 、 ρ 、 ϕ_s 、 e などの固有の量以外に、総流量 V 、代表川幅 B_u 、代表流動深 h_a 、代表粒径 d 、濃度 c 、勾配 θ_u 、 θ_d などがある。従属変数として堆積長 L 、堆積幅 B 、あるいは堆積面積 A （ $\approx LB$ ）をとり、それらの無次元表示を行なう。すると、無次元堆積長 L^* は次のように表わされる。

$$L^* \equiv L/h_0 = f_{NL}(q_0 T/h_0^2, (\sigma/\rho-1)c, h_0/d, \theta_u, \theta_d) \quad (7)$$

無次元堆積幅 B^* （ $=B/h_a$ ）および無次元堆積面積 A^* （ $\approx BL/h_a^2$ ）も同様の関数形である。式(7)において $q_0 T/h_a^2$ （ $=V^*$ ）は土石流の規模に関する無次元量であり、 T は現象の継続時間である。

図-3、図-4は L^* および A^* に対する V^* と h_a/d （流動深・粒径比）の影響である。これらの結果によれば、 V^* と h_a/d が大きくなるに従い、 L^* と A^* も顕著に増加することが分かる。図-5は一次元解析における L^* に対する V^* と θ_d （氾濫域の縦断勾配）の影響をみたものである。容易に予想されるように、 V^* 、 θ_d が大きくなるとともに、 L^* が大きくなる

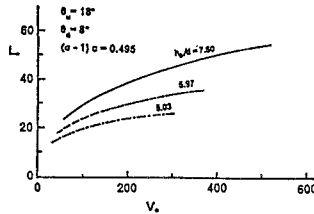


図-3

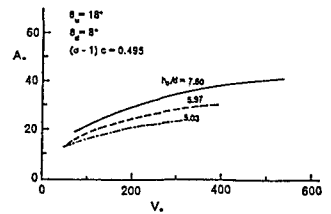


図-4

ことが分かる。これらの結果は、ある限られた条件下におけるものに過ぎないが、現地において考えられる代表的な条件を想定して計算を行い、無次元堆積長や無次元堆積面積などに関して普遍表示を行なっておけば、土石流の危険範囲をあらかじめ予想するのに有効であると思われる。

5. あとがき 本研究によって、土石流の支配方程式を用いた数値シミュレーションの妥当性が示された。また、数値実験に基づいて、土石流の流出範囲の普遍表示について検討した。今後、シミュレーションモデルの基礎となる支配方程式、流動則などの基礎研究をさらに発展させるとともに、数値シミュレーションによる普遍表示法についてさらに検討を進める予定である。

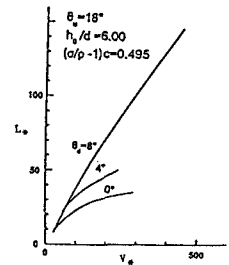


図-5

6. 参考文献

- 1) 江頭・芦田・佐々木：土石流の流動機構、第32回水講、1988
- 2) 芦田・江頭・矢島・高濱：土石流の構成則に関する研究、京大防災年報、第32号B-2、1989
- 3) 中川：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究、1989