

P15 岩屑流のシミュレーション手法の検討

建設省 土木研究所 寺田秀樹 工藤賢二 下村博之 中村良光

○北原一平 中島達也 山口直樹

1. はじめに

土石流のシミュレーション手法については、これまで多くの検討がなされてきたが、岩盤崩壊により生じた岩屑流のシミュレーション手法については、あまり検討がなされていないと思われる。これは対象とする現象の発生頻度が低いことがその理由とも考えられる。しかし、地震等による大規模な崩壊の発生を考えると、検討しておく価値は十分にあると考えられる。そこで、岩盤崩壊に伴って発生した岩屑流について、①連続体モデルと②離散ボールモデルを用いた再現計算を行い、その適用性について検討を行った。なお、①連続体モデルについては2次元、②離散ボールモデルについては1次元の再現計算を行っている。

2. 連続体モデル

2. 1 計算手法

岩屑流の流動・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。基礎方程式としては運動方程式、土砂・空気連続式、常態方程式およびエネルギー保存則を用いる。運動方程式および土砂・空気連続式は平成3年度の発表¹⁾と同じであるので、割愛する。

(1) 抵抗則

運動方程式中の抵抗則としては乾燥粒子流の抵抗則を用いる。

$$\tau = \tau_y + \tau_g \quad (1)$$

ここに、 τ_y : 降伏応力、 τ_g : 非弾性的な衝突により生ずる応力である。これらの抵抗力はそれぞれ次のように表される。

$$\tau_y = \sigma_m \cdot \mu_k \quad (2) \quad \sigma_m = \sigma \cdot c \cdot g (h - z) \cos \theta$$

ここに、 μ_k : 動摩擦係数、 σ_m : 砂礫粒子の有効垂直応力

$$\tau_g = \left(\frac{\pi}{12} \right) \sin^2 \alpha (1 - e^2) \sigma (1/b) D^2 \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (3)$$

ここに、 e : 粒子の反発係数、 α : 粒子の衝突角、 D : 粒子の直径、 du/dz : 速度勾配
これより、運動方程式中の抵抗力は次式で示される。ここではx方向のみ示す。

$$\tau_{ox} = - (1 - e^2) \frac{25}{48} \pi \sin^2 \alpha \left(\frac{c}{c_y} \right)^{1/3} D^2 \cdot \sigma \frac{U \times \sqrt{U_x^2 + U_y^2}}{H^2} + \sigma g H c \mu_k \cos \theta \quad (4)$$

(2) 常態方程式

$$c = \frac{\tau_o - P_o \tan \phi_s}{\sigma g H \mu_k \cos \theta} = \frac{\tau_o - P_o \tan \phi_s}{\sigma g H \cos \theta \cdot \mu_k} \quad (5)$$

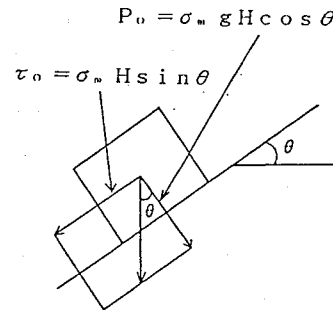


図1 P_o , τ_o の定義

(3) エネルギー保存則

粒子の衝突により生じる圧力 P のもつエネルギーの保存則が次式により与えられる。

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon h)}{\partial t} = \frac{\partial (\rho \varepsilon U_x h)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \varepsilon U_y h)}{\partial y} + \beta P \cdot \left(\frac{\partial (U_x h)}{\partial x} + \frac{\partial (U_y h)}{\partial y} \right) \quad (6)$$

2. 2 次元堆積実験の再現

乾燥砂を用いた2次元堆積実験によると、流下した崩土は、堆積当初の段階ですでに最終的な堆積範囲まで広がり、その後供給された土砂はその全面を覆うように広がって堆積範囲を徐々に広げる。これに対し、シミュレーション計算でも、図2に示すようにほぼ同様の傾向を示している。しかし、流下時間については計算の方が若干遅くなる傾向にある。また、最終的な堆積形状は、図3に示すように、実験結果に対し、やや細長い結果となっている。この原因として、実験では一度堆積した上に堆積する場合は、動摩擦係数も固定床とは異なるはずであり、計算においても動摩擦係数を変化させていく必要があるのに対し、今回は一定値を用いているためであると考えられる。次に、岩盤崩壊に伴って発生した岩屑流に適用を試みた。

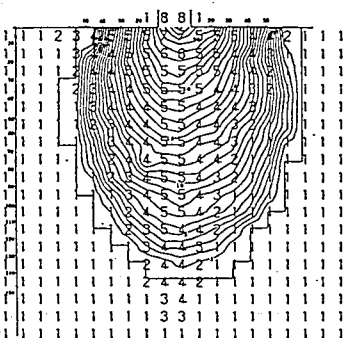


図3 最終堆積形状の比較

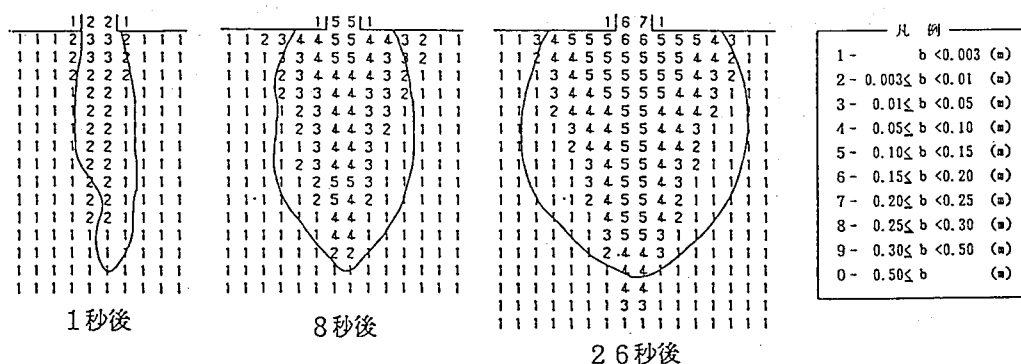


図2 堆積過程の比較

2. 3 岩屑流の再現計算

対象としたのは、10万 m^3 規模の岩盤崩壊により発生した岩屑流で、約1,100m流下したもので、堆積末端と崩壊源の平均勾配（等価摩擦係数）は約26°であった。堆積した岩屑の粒径は、堆積表面で行った線格子法の結果では、個数、重量は百分率の50% 粒径でそれぞれ20cm、100cm 程度であった。発生前の1か月間の雨量は、118mm 程度であるが、前1週間では雨量は記録されていない。したがって、少なくとも土石流のような水が飽和した流れではなく、間隙流体を考慮しない今回の方法の適用は可能と考えられる。

シミュレーション計算の結果を図4に示す。計算では実績の到達距離と合うように、動摩擦係数をパラメータとして調節した。その結果、同摩擦係数を15°とした。崩壊規模が大きくなると動摩擦係数は小さくする必要がある。図4を見ると、堆積範囲は、ほぼ再現しているように見える。しかしシ

ミュレーション計算では先端部に向かって薄くなっていくのに対し、実際には先端部での堆積厚が約10~20mあり、深さの分布は再現されていない。これは実際の現象では粒径の大きなものが先端部に集まり、粒径が分級されるのに対し、計算では再現されないことなどが原因ではないかと推察される。

3. 離散ボールモデル

3. 1 計算手法

崩土の堆積範囲をシミュレートするため、2次元離ボールモデルによる解析を実施した。これは運動材料を多数のボールの集合体とみなすもので、離散化した個々のボールについて同様の運動方程式をたて、それらを時間に関して数値積分をして各ボールの運動を求める。解析に用いたパラメータを表1に示す。解析に大きく影響するパラメータとしてバネ定数、動摩擦係数がある。今回実施した解析では砂粒子の形状の破砕等に伴う非線形弾性の影響を考慮するため各ボールを図5に示すような弾性体として計算した。バネ定数は既往の研究成果を参考にした。動摩擦係数については静止摩擦係数に 0.7~ 0.85 を乗じた値と言われており、現地調査で計測した流下土砂先端部の堆積傾斜角の正接 (tan) を静止摩擦係数と仮定した。

解析では平面図から流下経路に沿って縦断面を作成した。斜面上には流下するボールと同じ材質のボールを張り付けた条件で計算を試みた。現地で簡易的に計測した粒度分布では50% 粒径で直径2mであったが電子計算機の計算時間が膨大となるためここでは半径2mとした。よって斜面上に固定されたボール (約 300個) と斜面を流下するボール (約 140個) となる。

3. 2 計算結果

以上によって計算した結果を図6に示す。堆積状況については比較的良好に実際の堆積状況を再現しているものと思われる。ただし、実際の堆積土砂の先端部に到達したボールは数個であり、ボール個数の少なさが影響したものと考えられる。

流下した土砂 (ボール) の平均流下速度と最大流下速度を図7に示す。実際の崩壊土砂の流下時間は50sec 程度であり、計算結果もほぼ同じであったことから流下速度もほぼ妥当な計算結果が得られているものと考えられる。今回行った2次元ボールモデルによる解析は岩盤崩壊による土砂の流下・堆積過程および堆積域の予測の可能性を示唆するものである。

凡 例
1 $0 \leq b \leq 0.2$
2 $0.2 \leq b \leq 0.5$
3 $0.5 \leq b \leq 1.0$
4 $1.0 \leq b \leq 2.0$
5 $2.0 \leq b \leq 5.0$
6 $5.0 \leq b \leq 10.0$
7 $10.0 \leq b \leq 15.0$
8 $15.0 \leq b \leq 20.0$
9 $20.0 \leq b \leq 100.0$

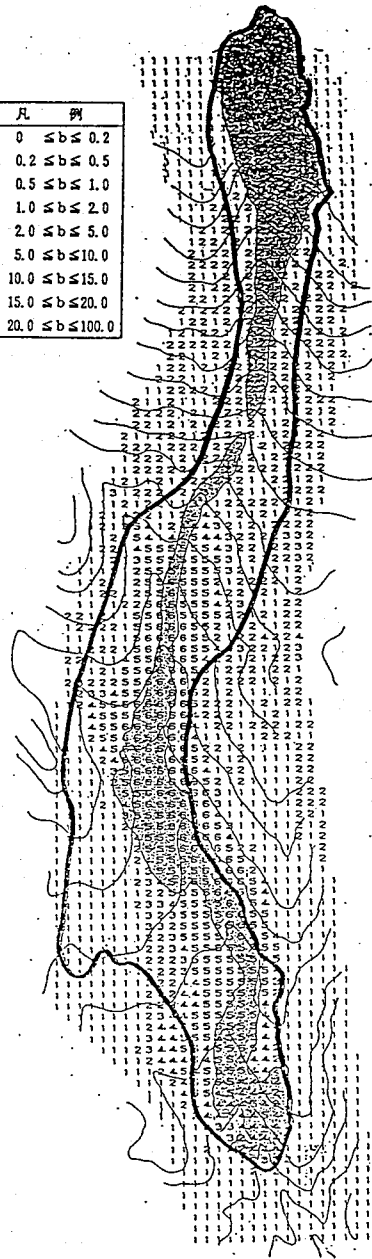


図4 岩屑流の計算結果

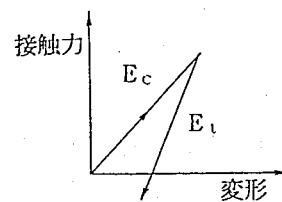


図5 バネ定数

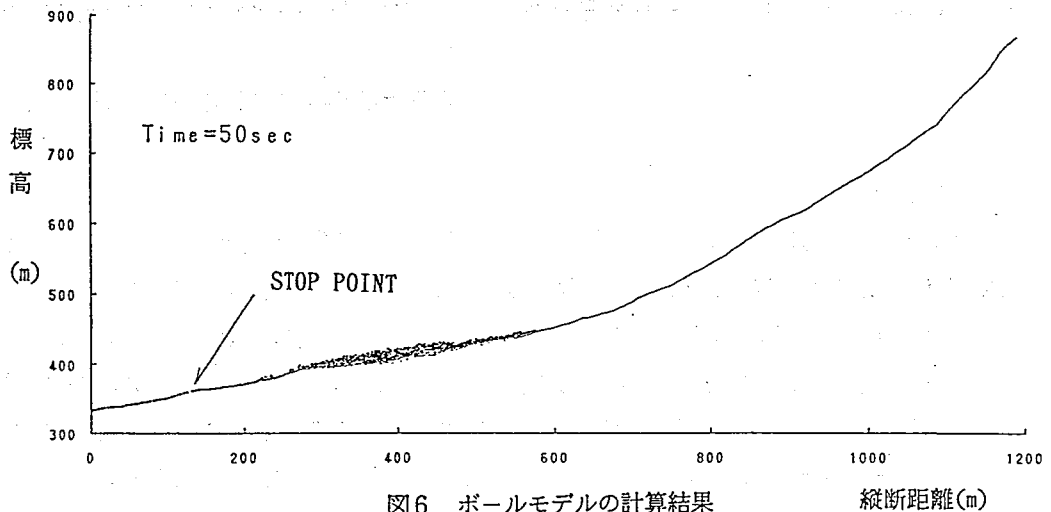


図6 ボールモデルの計算結果

表 1 解析パラメータ

ボール半径	2.0	[m]
ボール密度	2,650	[kg/m ³]
バネ定数 (載荷時)	2.0E7	[kgf/m ²]
バネ定数 (除荷時)	4.0E7	[kgf/m ²]
動摩擦係数	0.45	

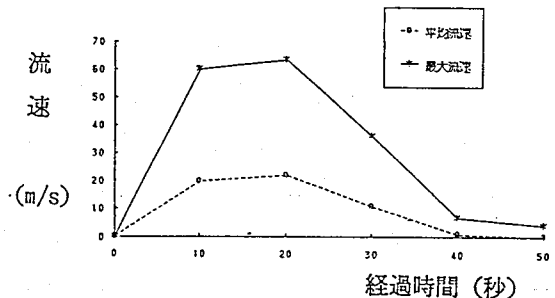


図7 ボールモデルによる土砂の平均および最大流下速度

4. まとめ

岩屑流を対象に乾燥粒子流の連続体モデルと離散ボールモデルの適用を検討した。連続体モデルの特徴は土砂の流下能力をエネルギー保存則と常態方程式によって求める手法に改良した点である。これによると、堆積範囲はほぼ再現できるが、堆積過程は必ずしも正確に再現できてはいない。今後、より詳細なシミュレーションを行うためには底面抵抗の評価方法を検討する必要がある。

離散ボールモデルについては計算量が膨大であるため、現地の粒度分析結果では 50% 粒径で半径 1m であったのに対して、今回のシミュレーションでは 2m を用いている。離散ボールモデルを用いた他の解析例でボール半径の違いが到達範囲に影響を及ぼさない事が報告されているが³⁾、2次元での詳細な解析及び3次元での解析を行う場合を考えると計算アルゴリズムの改良が必要と考えられる。また現時点では斜面に張り付けて固定したボールを取り除いて平滑な板とすれば計算量もかなり減少させる事ができるが、今後両者の計算結果の違いを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 寺田他 2 ; 乾燥粒子流の流下堆積実験、平成 3 年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 294-297, 1991
- 2) 寺田他 4 ; 乾燥粒子流の流動特性とシミュレーション、平成 3 年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 298-301, 1991
- 3) 建設省 : 第 4 3 回建設省技術研究会共通部門指定課題論文集、PP103 ~ PP105、1989