

個別要素法を用いた土石流の数値シミュレーション

山梨大学工学部 正会員 宮沢 直季
鹿島道路 金澤 博司

1. はじめに

今日、全国的にハード・ソフト両対策を組み合わせた総合的な土石流対策が実施されている。砂防施設の効率的な設計方法を確立するには、土石流の流動メカニズム、砂防ダムに作用する土石流の衝撃力、砂防ダムの土石流捕捉効果を明らかにすることが重要である。しかし、土石流中の砂礫の挙動は十分検討されていない。本研究は、個別要素法を用いて岩屑流との比較・検討により土石流中の砂礫の挙動を調べた。

2. モデル

2.1 砂礫の運動モデル：個々の砂礫の運動モデルとして Cundall and Strack¹⁾による個別要素法を適用する。前提条件として砂礫は同一粒径の円盤要素とし、2次元場を対象とする。 x 軸方向は流下方向、 y 軸方向は垂直上方とする（図-1参照）。砂礫 i の x 軸方向、 y 軸方向及び回転の運動方程式は次式で表される。

$$m_i \ddot{x}_i = m_i g \sin \theta - \rho V_i g \sin \theta + \sum_j (-F_n \cos \alpha_{ij} - F_s \sin \alpha_{ij}) + D_x \quad (1)$$

$$m_i \ddot{y}_i = -m_i g \cos \theta + \rho V_i g \cos \theta + \sum_j (-F_n \sin \alpha_{ij} + F_s \cos \alpha_{ij}) + D_y \quad (2)$$

$$I_i \dot{\omega}_i = \sum_j r F_s \quad (3)$$

ここで、 m_i は砂礫 i の質量、 (x_i, y_i) は砂礫 i の位置、 g は重力加速度、 θ は水路勾配、 ρ は水の密度、 $V_i = m_i / \sigma$ は砂礫 i の体積、 σ は砂礫の密度、 F_n, F_s は砂礫 i が他の砂礫と衝突している場合に作用する力、 D_x, D_y は砂礫 i が水から受ける力、 I_i は砂礫 i の慣性モーメント、 ω_i は砂礫 i の角速度（反時計回りを正）、 α_{ij} は砂礫 ij 間の接触角、 r は砂礫の半径である。 $\dot{}$ （ドット）は時間微分を表す。式(1)、式(2)の第1項は重力、第2項は浮力を表す。岩屑流の場合、浮力と水から受ける力は考えない。

2.2 衝突時に作用する力：砂礫 i が砂礫 j と衝突しているとき、砂礫 i が受ける力についてモデル化する。図-2のように砂礫 i の中心から砂礫 j の中心へ向かう方向（法線方向： n 方向）、 n 軸を右回りに 90° 回転させた方向（せん断方向： s 方向）から成る局所座標系を設定する。図-3は2つの砂礫 i, j が衝突している際に作用する力をモデル化したものである。バネとダッシュポットを考慮して n

方向の作用力 F_n^N と s 方向の作用力 F_s^N は次のように表される。

$$F_n^N = e_n^N + d_n^N \quad (4) \quad F_s^N = e_s^N + d_s^N \quad (5) \quad e_n^N = e_n^{N-1} + K_n \dot{n}^{N-1/2} \Delta t \quad (6)$$

$$e_s^N = e_s^{N-1} + K_s \dot{s}^{N-1/2} \Delta t \quad (7) \quad d_n^N = C_n \dot{n}^{N-1/2} \quad (8) \quad d_s^N = C_s \dot{s}^{N-1/2} \quad (9)$$

ここで、添え字の n は法線方向、 s はせん断方向、 N は時間ステップ、 e_n^N 、 e_s^N はバネ弾性力、 d_n^N 、 d_s^N は減衰力、 $\dot{n}$ 、 $\dot{s}$ は接触点における相対速度、 K_n 、 K_s は n 方向、 s 方向のバネ定数、 C_n 、 C_s は n 方向、 s 方向の粘性減衰係数、 Δt は時間刻みである。砂礫が離れているとき、即ち $e_n^N < 0$ のとき、 $F_n^N = F_s^N = 0$ である。これがカップリングを表す。せん断力は砂礫間に作用する摩擦力を越えない。スライダー（せん断破壊）は、 $|e_s^N| > \mu e_n^N$ のとき、 $F_s^N = \mu e_n^N \text{sign}(e_s^N)$ と表される。ここで、 μ は摩擦係数、 $\text{sign}(a)$ は a の符号を付けることを意味する。計算では、加速度と角加速度、速度と角速度、砂礫の位置を順次求める。

2.3 水が砂礫に与える力に関するモデル：砂礫 i が周囲の間隙水から受ける抗力のモデル化を検討する。本研究では、砂礫 i の近くに存在する水の水速は近傍の砂礫 j の水速で表されると仮定し、砂礫 ij 間の相対速

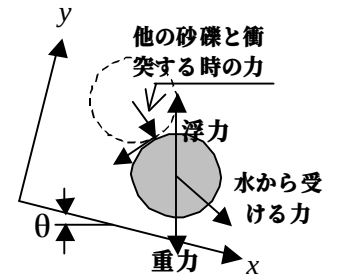


図-1 座標系と砂礫に作用する力

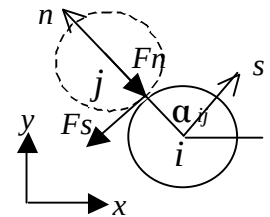


図-2 局所座標系と衝突時の作用力

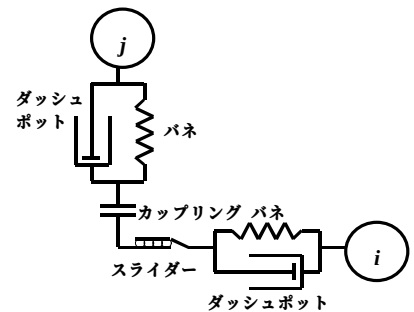


図-3 粒子間衝突のモデル

キーワード：土石流、個別要素法、シミュレーション、岩屑流、速度分布

〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11 TEL055-220-8523 FAX055-220-8773

表-1 計算条件

r (m)	0.05	ρ (g/cm ³)	1.0
σ (g/cm ³)	2.5	K_n (N/m)	6.0×10^6
K_s (N/m)	3.0×10^6	C_n (N.s/m)	200
C_s (N.s/m)	100	Δt (秒)	2.0×10^{-5}
C_D	0.66		

度の2乗に比例する抗力が砂礫 i に作用すると考えた。そのときの抗力の n 成分 D_n^N と s 成分

$$D_n^N = 1/2 \rho C_D A U_n^N |U_n^N| \quad (10)$$

$$D_s^N = 1/2 \rho C_D A U_s^N |U_s^N| \quad (11)$$

ここで、 C_D は抗力係数、 A は砂礫の投影面積、

U_n^N 、 U_s^N は砂礫 ij 間の相対速度の n 成分、 s 成分である。 D_x と D_y は次式より計算される。

$$D_x = \sum_j (-D_n^N \cos \alpha_{ij} - D_s^N \sin \alpha_{ij}) \quad (12)$$

$$D_y = \sum_j (-D_n^N \sin \alpha_{ij} + D_s^N \cos \alpha_{ij}) \quad (13)$$

式(12)、式(13)における抗力に寄与する砂礫 j は、砂礫 i から半径 $4r$ の円内に存在する砂礫であると仮定した。なお、これらの式は厳密に土石流中の間隙水による抗力の発生機構を考慮したものではない。この点については更に検討する必要がある。

2.4 初期条件及び境界条件：砂礫群の初期配置を図-4に示す。この初期状態を水路勾配 $\theta=30^\circ$ で傾斜させて解析を行った。土石流の場合、水面は最上段の砂礫の上面とし、以後この水面は一定と仮定した。水面を越えた砂礫には浮力と抗力は働かないとした。砂礫の最下段は固定とし、側方は計算の効率化を図るべく周期境界とした。計算条件を表-1に示す。

3. 土石流及び岩屑流の砂礫の挙動

図-5、図-6に土石流と岩屑流の流下方向速度分布の比較を示す。図-5が摩擦係数 $\mu=0.1$ の場合、図-6が $\mu=0.3$ の場合である。時刻は $t=11.54$ 秒で、この時刻では土石流、岩屑流ともに定常状態となった。この図から、同一条件において土石流は岩屑流の30～50%の速度で流動することがわかる。土石流の流速分布形は、 $\mu=0.1$ では直線分布に近く、 $\mu=0.3$ では下に凸の分布に近い。また、岩屑流、土石流とも摩擦係数が小さいと流下方向の速度が大きいことがわかる。図-7に土石流と岩屑流の瞬間像の比較を示す。この図より砂礫の混合の度合いを見ることができる。岩屑流では層を構成する砂礫の混合が大きいのに比べて、土石流では砂礫の混合が小さくほぼ層状の流れとなっている。

4. おわりに

個々の砂礫の運動モデル（個別要素法）と水が砂礫に与える抗力に関するモデルを用いて、土石流及び岩屑流のシミュレーションを行い、両者の比較より内部の砂礫群の挙動を検討した。今後は、既往の土石流の流動則と比較・検討するとともに実験結果および現地観測結果より本モデルの妥当性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Cundall, P.A. and Strack, D.L. : A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.

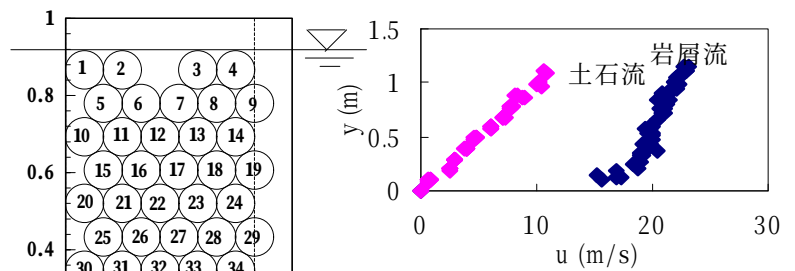
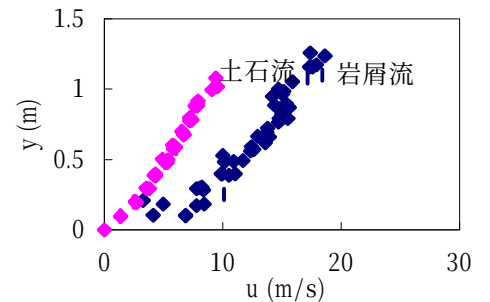
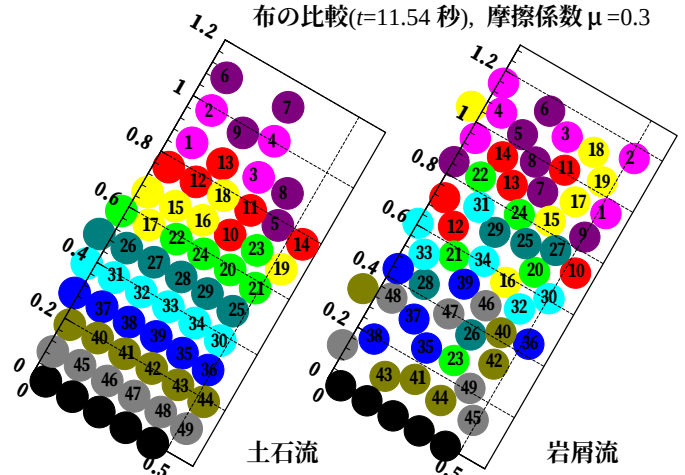


図-4 砂礫群の初期配置

図-5 土石流と岩屑流の流下方向速度分布の比較($t=11.54$ 秒), 摩擦係数 $\mu=0.1$ 図-6 土石流と岩屑流の流下方向速度分布の比較($t=11.54$ 秒), 摩擦係数 $\mu=0.3$ 図-7 土石流と岩屑流の瞬間像の比較($t=11.54$ 秒), 摩擦係数 $\mu=0.1$