

個別要素法 (DEM) による土石流の流動・堆積過程の数値計算

群馬大学工学部 建設工学科 正 員 清水義彦
 群馬大学工学部 建設工学科 正 員 若井明彦
 群馬大学大学院 工学研究科 学生員 長田健吾

1. 研究の背景と目的 従来、土石流研究の多くは混相流としての扱いによる連続体力学の観点からなされ、数多くの成果が得られてきた¹⁾。しかしながら、土石流の流動・堆積過程ではむしろ土石粒子と水流の運動を個別に捉えた方法がより現象に忠実な場合もある。例えば、発生初期段階における粒子骨格構造の力学的不安定性による運動、集合流動に至るまでの未発達な段階での運動、水流の抜け出しによって分離された土石のみの粒子運動など、各々の過程では非連続体としての挙動が本質的となる。本研究では、これらの各過程とともに連続体としての挙動も含め統一的に記述できるモデルとして、Cundall ら²⁾の個別要素法 (DEM) を導入し土石流の流動・堆積過程を数値計算する。土石流に対するこうした試みは、例えば水野ら³⁾によるものがあるものの数少なく、DEM の構成パラメタの決定を含め未解決な問題も多い。一方、移動床素過程への DEM の適用はすでに後藤ら⁴⁾によって精力的に進められ、DEM を取り込んだラグランジュ・オイラーカップリングモデルによる数値解析法を構築しその有効性を示している。本研究もこうした立場から、土石流の挙動解明を DEM とオイラー的流体解析をカップリングさせて試みるものである。

2. 数値解析のフレーム DEM では、土石粒子群を剛体要素群として、粒子間の力の伝達を接触点を介して行うものとし、各粒子要素ごとに独立な運動方程式を立て、その時間発展から個々の粒子運動を追跡する。いま、粒子 i に干渉する粒子群 j からの作用力と流体からの駆動力を考慮した基礎式は以下ようになる。

$$m_i \frac{du_{pi}}{dt} = \sum_j [-f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij}]_j + \frac{1}{2} r C_D A_2 d^2 \sqrt{(U - u_{pi})^2 + (V - v_{pi})^2} (U - u_{pi}) + (m_i - r V_i) g \sin \theta$$

$$m_i \frac{dv_{pi}}{dt} = \sum_j [-f_n \sin \alpha_{ij} + f_s \cos \alpha_{ij}]_j + \frac{1}{2} r C_D A_2 d^2 \sqrt{(U - u_{pi})^2 + (V - v_{pi})^2} (V - v_{pi}) - (m_i - r V_i) g \cos \theta$$

$$I \frac{d\omega_{pi}}{dt} = \frac{d}{2} \sum_j [f_{sj}]_j \quad \text{ただし、} m_i = r[s/r + C_M] A_3 d^3 \quad \text{である。}$$

(ρ : 水流の密度, σ : 土石粒子の密度, C_M : 付加質量係数 (=0.5), A_2, A_3 : 粒子の2次元, 3次元形状係数, d : 粒子径, u_{pi}, v_{pi} : 土石粒子の流下, 鉛直速度, U, V : 水流の流下, 鉛直速度, f_n, f_s : 粒子 i, j 間の中心を結ぶ法線 n と接線 s 方向の作用力 (DEM ではこれらを弾性ばねと粘性ダッシュポットを配置して表現する), α_{ij} : 粒子 i, j の接触角, C_D : 抗力係数, m_i : 粒子質量, V_i : 粒子体積, g : 重力加速度, I : 慣性モーメント, ω_{pi} : 粒子 i の回転速度)

計算の手順としては、まず、粒子初期配列を計算し、その後、各時間ステップにおける個々の土石粒子の接触状況が検査され、接触状態にある粒子間については作用力が考慮される。また、水流内に存在する粒子群には流体からの駆動力が作用し、これらを取り込んだ上記基礎式を逐次時間積分することにより、粒子群の運動が追跡される。ここで、水流はオイラー的な流体解析で与えるが、簡便のため、粒子群が与える流体系への運動量変化は考慮していない。計算時間ステップは、DEM の計算で 10^{-5} sec、流れの計算で 10^{-4} sec とし、粒子系の各時間ステップの計算では流速場は一定に保持されている。

3. 砂防ダムの崩壊による土石流の発生・流動・堆積過程の数値計算 満砂した砂防ダム崩壊後の土石粒子群の流動、堆積過程を計算する。粒子系は DEM で、流体系は数値粘性の少ない CIP による1次元流数値解析とした。まず、一様な斜面勾配角 (15 度) の上流端に、土石粒子のみで満杯 (水なし) となった砂防ダムを配置し、このダムを崩壊させた。このとき、最終的には斜面上に堆積する条件であることが分かり、その形状は高橋ら⁵⁾が検討した天然ダムの形状に近い (図1)。次に、水と粒子 (2 粒径モデル) で満杯となった

キ・ワ・ド 土石流, 個別要素法, 流動・堆積過程, 砂防ダムの崩壊

〒376-8515 桐生市天神町1-5-1, 群馬大学工学部建設工学科, TEL.0277-30-1642, FAX0277-30-1601



図1 一様斜面上の土石粒子の堆積形状

に求めた形状に近い。

4. まとめ 本研究では、土石流の流動・堆積の素過程を求めるため、DEMとオイラー的流体解析をカップリングさせて検討した。その結果、定性的には既往の水理実験結果と対応するものが数値実験として得られた。今後は勾配変化や粘着性の影響などを取り込んで検討を進める予定である。

- 参考文献 1) 例えば、江頭：土石流の流動機構と氾濫・堆積域の解析，第35回水工学に関する夏期研究会講義集，1999。
 2) Cundall, P.A.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29, No.1, pp.47-65, 1979.
 3) 水野ら：個別要素法を用いた鋼管製透過型砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析，砂防学会誌，Vol.52, No.6, pp.4-11, 2000.
 4) 後藤ら：混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析，土木学会論文集，No.649/II-51, pp.17-26, 2000.
 5) 高橋・匡：天然ダムの決壊による土石流の規模に関する研究，京大防災研年報，第31号B-2, pp.601-615, 1988。

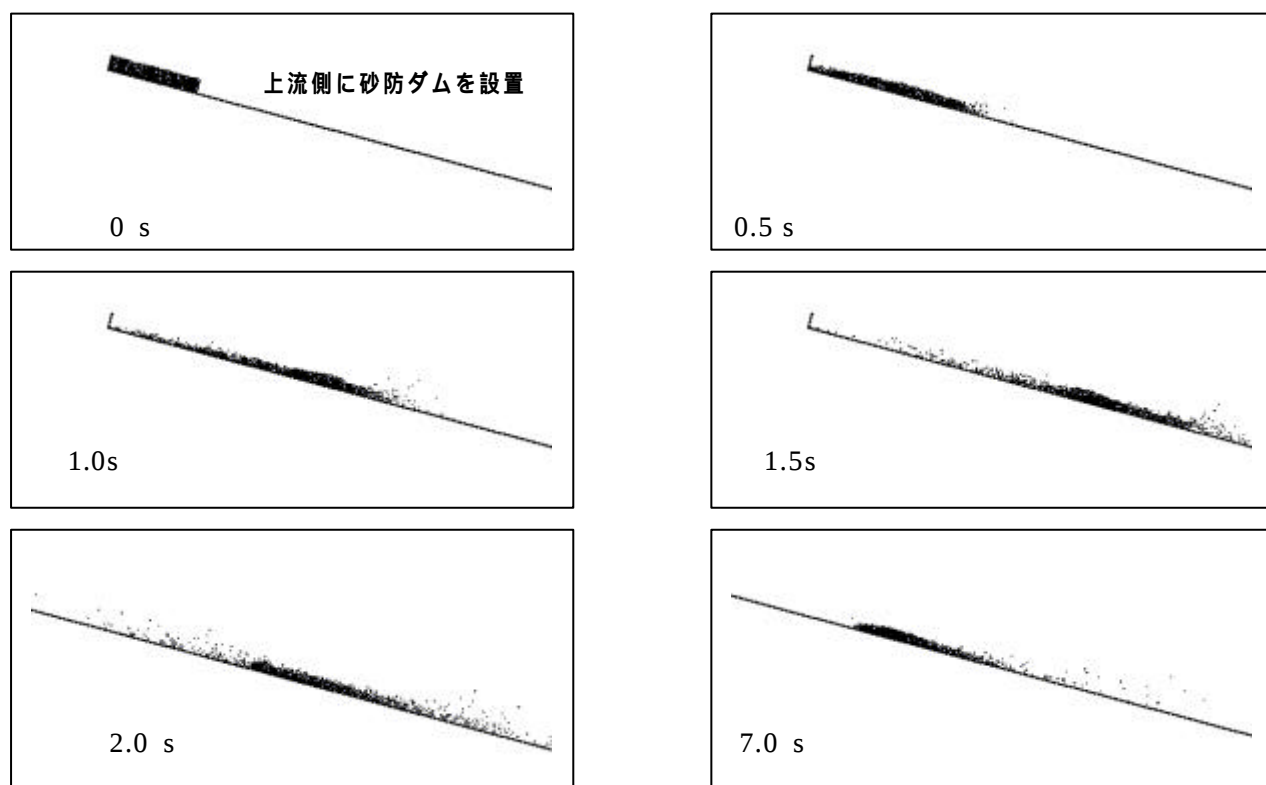


図2 砂防ダムの崩壊に伴う土石流の流動と堆積の数値結果

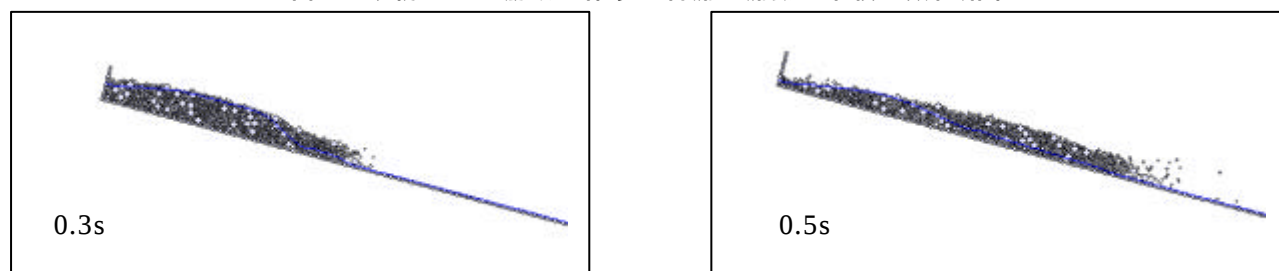


図3 段波形成直後の粒子群と水位