

個別要素法・粒子法による土石流モデルのシミュレーション解析

防衛大学校 別府万寿博 砂防鋼構造研究会 石川信隆
九州大学 園田佳巨 (財)建設技術研究所 長谷川祐治
京都大学大学院 水山高久

1. はじめに

土石流による砂防堰堤の損傷や下流側住民の被害を防ぐためには、土石流衝突時に砂防堰堤に作用する荷重を正確に把握し、適切な設計を行わなければならない。そのためには土石流の挙動と流体力を正確に再現できる数値解析手法の確立が必要である。本研究では、個別要素法 (DEM) および粒子法を用いて、石川ら¹⁾が行った土砂の流下実験のシミュレーションを行い、両手法の流下解析への適用性と問題点について考察を行った。

2. 実験の概要

図-1 に示すように勾配 17 度の水路(幅 10cm)において水+土砂(平均粒径 0.14cm の一様砂)の土石流モデルを流下させ、下流側壁面に分力計を設置して荷重～時間関係を計測した。土砂を、予め止め板背後に高さ 40cm に敷き詰め、上流側から水を流量約 1.5 ℓ/sec で流し、止め板を越流した直後に止め板を取り除き、水と土砂を流下させた。

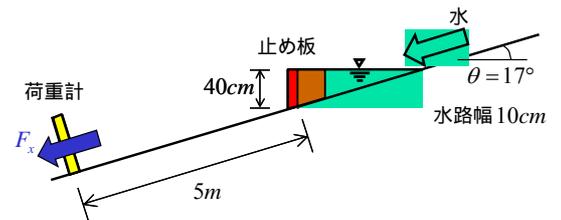


図-1 実験の概要

3. 解析手法の概要

3.1 個別要素法

個別要素法²⁾は、接触した要素間には弾性バネと粘性ダッシュポットによる力が作用する。また、クーロン摩擦によるスライダーを設けている。剛体粒子ごとに次の運動方程式を解く手法である。

$$m_i \cdot \ddot{u} + C_i \cdot \dot{u} + F_i = 0 \quad (1) \quad I_i \cdot \ddot{\phi} + D_i \cdot \dot{\phi} + M_i = 0 \quad (2)$$

ここに、 F_i は要素に働く合力、 M_i は要素に働く合モーメント、 C_i, D_i は減衰係数、 u は要素の変位ベクトル、 ϕ は要素の回転変位、なお、解析のパラメータは、バネ係数、摩擦係数および減衰係数である。本解析において要素のバネ係数は法線方向、接線方向で同じ値を用いた。

3.2 粒子法

本研究では、粒子法として MPS 法³⁾を用いている。粒子法は、連続体を有限個の粒子によって表し、着目している粒子を影響半径内に存在する粒子群と相互作用させ、連続体の挙動を粒子の運動によって計算する手法である。粒子法では、微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用いて、次の連続の式とナビエ・ストークス方程式を解く。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3) \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (4)$$

ここに、 ρ は密度、 P は圧力、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数である。本研究では、動粘性係数をパラメータとして計算を行った。

図-2 に解析モデルを示す。解析では、個別要素法、粒子法いずれも直径 1cm の粒子を配列した。

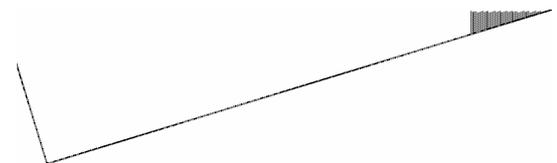
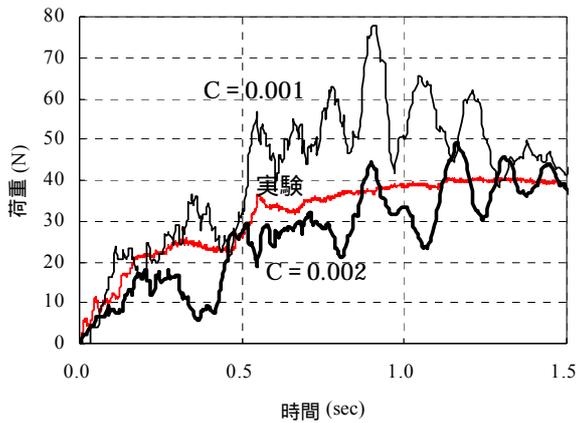


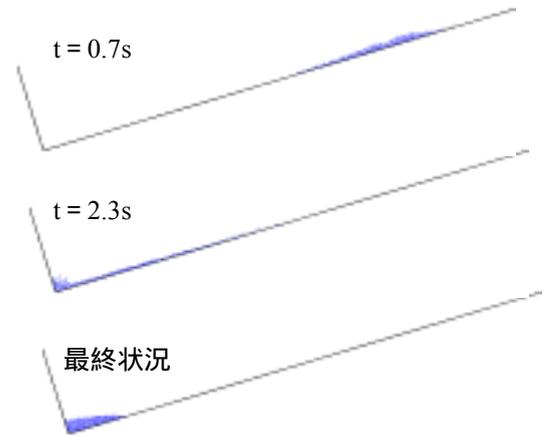
図-2 解析モデル

4. 解析結果および考察

個別要素法による解析では、予備的検討により法線、接線方向のバネ係数を 100N/cm、摩擦係数を 0.5 と決定した上で、減衰係数を変化させた。図-3 に減衰係数 $C=0.001$ および 0.002 の解析結果を示す。図は土石流モデルが壁に衝突した時点をもととして描いている。図より、減衰係数 $C=0.001$ では解析による荷重が実験値に比べて大きく

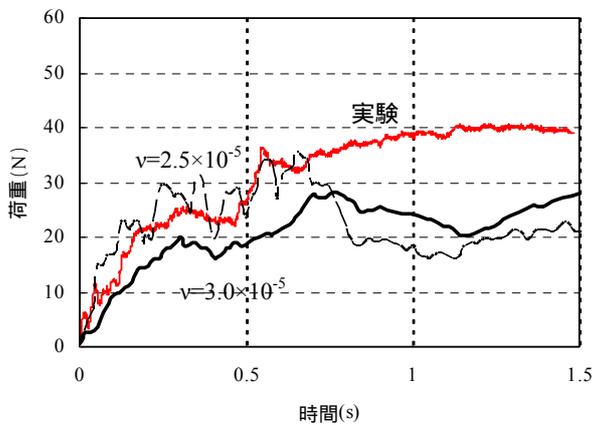


(a) 荷重～時間関係

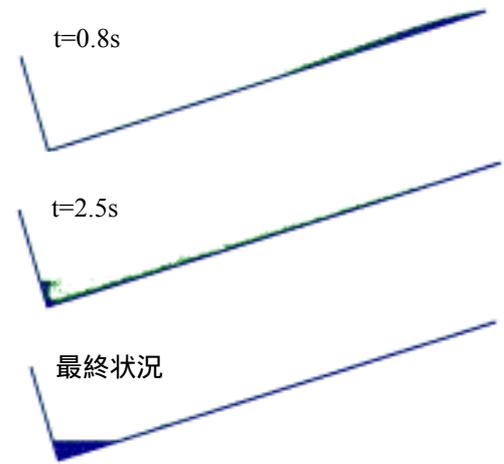


(b) 流れの様子 (C=0.002)

図-3 個別要素法による解析結果



(a) 荷重～時間関係



(b) 流れの様子 ($\nu=3.0 \times 10^{-5}$)

図-4 粒子法による解析結果

なるが、 $C=0.002$ の場合には実験の傾向を比較的良く再現できた。ただし、時間 0.8s 以降においても荷重は振動した。また、図-3(b)に示す流れの状況を見ると、流下の初期段階から不自然な凹凸がみられ、壁に衝突する際の跳ね返り挙動などは再現できなかった。

図-4 に、粒子法による解析における、動粘性係数 $\nu=2.5 \times 10^{-5}$ および $\nu=3.0 \times 10^{-5}$ の解析結果を示す。これより、最終的な荷重値はやや低いものの、動粘性係数を $\nu=2.5 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-5}$ に設定することで、土石流モデルの荷重特性を比較的良好に再現できることがわかる。また、図-4(b)に示すように、土石流モデルが壁に衝突して堰上げる様子なども再現されている。

以上の比較より、個別要素法では、解析定数を適切にチューニングすることで土石流モデルの荷重特性をシミュレートできたが、流れの状況は実験とあまり一致しなかった。また、解析定数の決定法についても検討する必要がある。粒子法は、荷重値がやや小さくなる傾向があるものの、荷重の特性や流体の堰上げ挙動を良好に再現できた。粒子法の今後の課題としては、土石流モデルの構成則や底面摩擦を考慮することがあげられる。

参考文献

- 1) 石川信隆, 井上隆太, 林建二郎, 長谷川祐治, 水山高久: 土石流モデルを用いた衝撃的流体力の測定実験について, 第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2006年11月。
- 2) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, 1997年5月。
- 3) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005年1月。