

高粘性領域を有する非ニュートン流体の陰的 SPH 解析

九州大学	学生会員	○岡野 翔大
九州大学	学生会員	大崎 春輝
海洋研究開発機構	非会員	森川 ダニエル
九州大学	正会員	浅井 光輝

1. 緒言

我が国は急峻な地形が多く、各地で大規模な斜面崩壊が発生している。特に、大雨や短時間強雨の発生頻度は全国的に増加しており、斜面崩壊の被害予測技術の高度化へのニーズが高まっている。そこで本研究では、発生規模の予測のみならず被害規模の想定まで可能な数値解析技術の構築を目指し、その基礎検討として崩壊後の地盤流動現象のモデル化を行っている。

直径 0.001~10mm 程度の土粒子を直接モデル化した DEM などによる離散体モデルで、地盤全体の解析を行うことは非現実的である。そこで、巨視的な視点から、地盤を等価な流動特性(レオロジー)を持つ連続体とみなした SPH モデルによる解析ツールの開発を行った。特に本研究では、流動化後のレオロジー特性のモデル化に焦点をあて、数値解析と実験との比較検証を通してモデル化の妥当性確認を行った。

2. 解析手法

2. 1. 支配方程式と材料モデル

非圧縮性流体の運動方程式は、次式で表される。

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{v} + \mathbf{g} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は速度、 ρ は密度、 p は圧力、 ν は動粘度、 $\mathbf{g}$ は外力である。非ニュートン流体に対しては様々な粘性モデルが提案されているが、本研究では Jop ら¹⁾によって提案された $\mu(I)$ モデルを用いて、粒状体流れの局所的な動粘度 ν を次のようにモデル化した。

$$\nu = \frac{1}{\rho\dot{\gamma}} \left[c + \left\{ \mu_s + \frac{(\mu_d - \mu_s)\dot{\gamma}}{I_0\sqrt{p/\rho_s d_s^2 + \dot{\gamma}}} \right\} p \right] \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度、 c は粘着力、 μ_s は静摩擦係数、 μ_d は動摩擦係数、 I_0 は材料定数、 d_s は材料の粒径、 ρ_s は材料の密度である。

類似の研究で多く用いられている Bingham モデルと異なり、 $\mu(I)$ モデルは静的摩擦だけでなく、動的な状態の摩擦までが表現できる。

2. 2. 離散化手法

粒子法による非圧縮性流体の解析では、速度場を陽的に、圧力場を陰的に解く半陰解法型のソルバーである ISPH (Incompressible SPH) 法が多く用いられている。

しかし、非ニュートン流体を半陰解法によって計算する場合、安定して解析を行うためには、粘性が高い状態での時間増分 Δt を非常に小さく設定しなければならない。そこで、本研究では完全陰解法型 ISPH 法²⁾を導入して運動方程式を解く方針とした。本手法では、粘性項と重力項によって陰的に仮速度 $\mathbf{v}^*$ を求める予測ステップと、圧力 Poisson 方程式を陰的に解くことにより得られた圧力により次の時間ステップの速度 $\mathbf{v}^{N+1}$ を求める修正ステップに分離して運動方程式を解く。その2つのステップの計算は次式によって与えられる。

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{v}^N + \Delta t(\nu\nabla^2\mathbf{v}^* + \mathbf{g}) \quad (3)$$

$$\mathbf{v}^{N+1} = \mathbf{v}^* - \frac{\Delta t}{\rho}\nabla p^{N+1} \quad (4)$$

以上の完全陰解法型 ISPH 法により、高粘性状態の非ニュートン流体でも無条件で安定した解析を行うことができる。

3. 実験との比較検証

3. 1. 実験概要

粒状体流れに対して本手法の有用性を検討するために、森口ら³⁾の実験の数値解析を行い、結果を比較した。この実験では、図-1に示すように水平面から傾斜角 θ だけ傾いた水槽の上部から乾燥砂を自由落下させ、その際の衝撃力を記録している。

数値解析での時間増分 Δt は 0.001s、初期粒子間隔 d (粒径)は 5mm に設定した。実験で用いられた砂の平

キーワード 粒状体、非ニュートン流体、 $\mu(I)$ レオロジー、SPH 法、完全陰解法型 ISPH 法

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 九州大学 構造解析学研究室 TEL: 092-802-3370

均粒径 D_{50} は 0.273mm であり，単純に平均粒径を用いた DEM 解析と比較して，粒子数を約 6000 分の 1 に抑え，計算コストを低減させることができた．

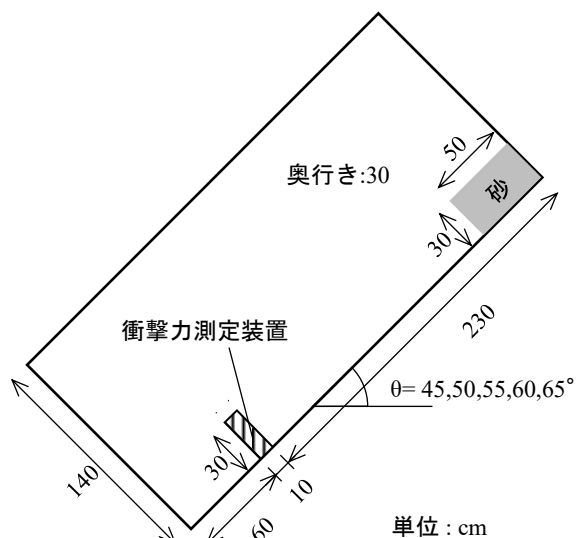


図-1. 実験の模式図

3. 2. 形状の比較

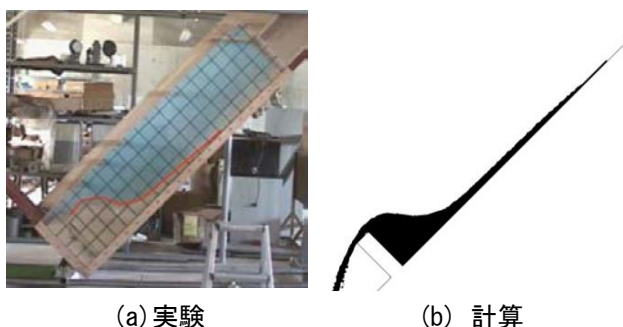


図-2. 砂の形状 ($t = 1.6s$)

図-2 (a) は実験での砂の形状，図-2 (b) は $\mu(I)$ モデルを用いて連続体として計算した砂の形状である．数値解析で得られた流動状態の形状は，実験時の写真と整合した結果が得られている．

3. 3. 衝撃力の比較

図-3 に示す通り， $\mu(I)$ モデルは衝撃力の推移についても実験値に近い値が得られた．非ニュートンモデルとしてしばしば用いられている Bingham モデルと比較

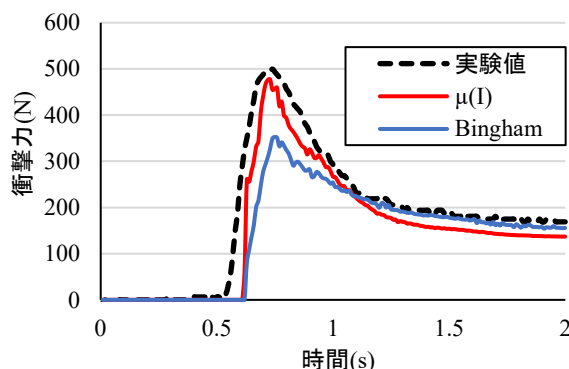


図-3. 衝撃力の時系列推移 ($\theta = 65^\circ$)

しても，より高い精度でピーク衝撃力を再現できた．図-4 に示す他の傾斜角のケースにおいても，Bingham モデルはピーク衝撃力の誤差が 20～40%であったのに対し， $\mu(I)$ モデルは全て 10%以内に抑えることができた．

4. 結論

本研究では，斜面崩壊の被害予測のための数値解析手法の構築を目的として，流動化した地盤に着目した基礎検討を行った．非ニュートン流体のひとつである $\mu(I)$ モデルによりモデル化し，完全陰解法型 ISPH 法により安定かつ効率的な解析が実施できるように改良した．さらに，数値解析と実験の比較から，本手法の有用性を確認した．

今後，安定した地盤が静止状態から流動へと遷移する過程の解析までをシームレスに行うことで，斜面崩壊の発生から流動化後までを統一的に解くことができる数値解析法への発展を行う計画である．

参考文献

- 1) P. Jop, Y. Forterre, and O. Pouliquen. A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, Vol. 441, No. 7094, pp. 727-730, 2006.
- 2) D. Morikawa, M. Asai, N. Idris, Y. Imoto, and M. Isshiki. Improvements in highly viscous fluid simulation using a fully implicit SPH method. *Computational Particle Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 529-544, 2019.
- 3) S. Moriguchi, R. I. Borja, A. Yashima, and K. Sawada. Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction. *Acta Geotechnica*, Vol. 4, No. 1, pp. 57-71, 2009.

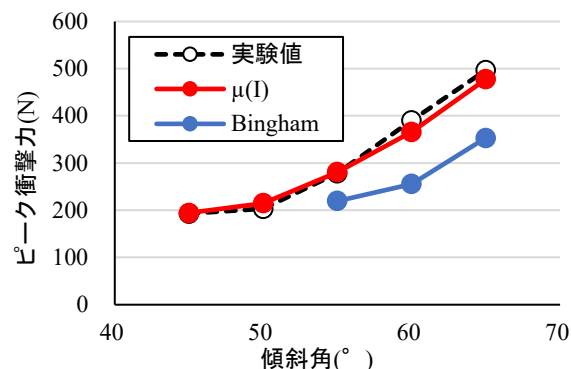


図-4. ピーク衝撃力の比較