

斜面土砂流動の数値解析法

筑波大学大学院 ○豊田 衛
 筑波大学大学院 正会員 山田 恭央
 筑波大学大学院 正会員 松島 亘志
 産業技術総合研究所 正会員 竿本 英貴

1. 目的

斜面土砂流動には土石流のような流体的挙動を示すもの、斜面崩壊のような固体的な挙動を示すもの、また、その中間的な挙動を示すものもあり、これらの現象を統一的に理解するためには、ひとつのモデルで解析できる計算手法の開発が求められている。本研究では SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法に各種の物性モデルを組み込み、流体的な挙動から固体的な挙動までをシミュレートし、模擬実験の結果と比較して、その妥当性を検討した。

2. 模擬実験

実験装置(流動距離 800mm、幅 150mm、アクリル製)は、斜面の傾斜角は自由に変更でき、仕切りの上部に流動粒子を貯め、仕切りを外して粒子を落下させ、その様子を側方より高速度カメラで撮影した。用いた材料はガラスビーズ(D=4.05mm)と豊浦砂(D₅₀=0.206mm)で、それぞれ傾斜角 30° と 40° で実験を行った。なお、斜面底部には流動粒子と同じ粒子を張り付けている。

図 1 から図 4 に実験におけるある時刻での流動形態を、図 5 に先端粒子の移動距離と時間関係を示す。傾斜角 40° ではガラスビーズ、豊浦砂とも最後まで流動するが、ガラスビーズの方が流動速度が大きいことが分かる。一方、傾斜角 30° では、ガラスビーズは最後まで流動したが、豊浦砂は斜面途中で流動が止まった。

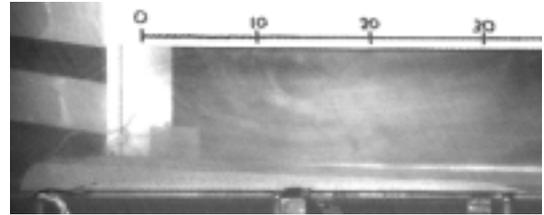


図 4 豊浦砂 (傾斜角 30° t=1.0(s))

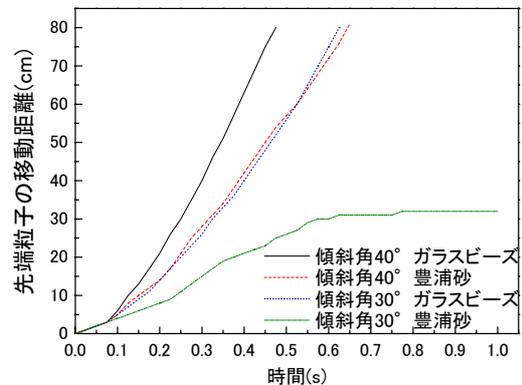


図 5 先端粒子の移動距離

3. SPH 法による解析

SPH 法は連続体解析手法の一つで、連続体を粒子の集合として表現し、離散化して解く手法である。SPH 法は自由に構成則を組み込むことができ、本研究では、構成則として粘性流体、粘弾性体、Bingham 流体を用いて流体的な挙動から固体的な挙動までを表現している。

(1) 粘性流体モデル

Navier Stokes 方程式を用いた。

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad (1)$$

ここに、 σ_{ij} は応力テンソル、 p は等方圧力、 D_{ij} はひずみ速度テンソル、 μ は粘性係数(Pa・s)である。ただし、 p は連続体の密度の関係式(状態方程式)より求める。本研究では粘性係数 μ を変えて解析を行っている。

(2) 粘弾性体モデル

弾性体の構成則は、

$$\begin{aligned} dp &= \frac{d\sigma_{ij}}{3} = 3Kd\varepsilon_p \\ d\varepsilon_p &= \frac{d\varepsilon_{ij}}{3} \\ ds_{ij} &= d\sigma_{ij} - \delta_{ij}dp = 2Gde_{ij} \\ de_{ij} &= d\varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_p \end{aligned} \quad (2)$$

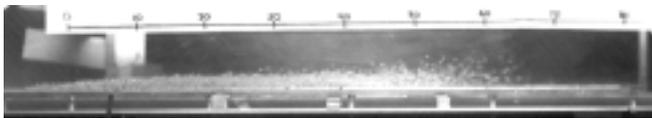


図 1 ガラスビーズ (傾斜角 40° t=0.4(s))

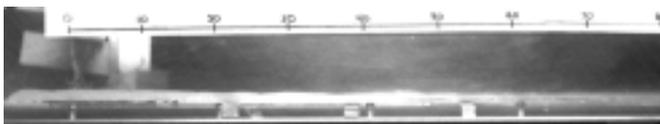


図 2 豊浦砂 (傾斜角 40° t=0.4(s))



図 3 ガラスビーズ (傾斜角 30° t=0.4(s))

キーワード 斜面土砂流動、SPH 法

連絡先 〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学 地盤工学研究室 TEL029-853-5138

で与えられる。ここに、 σ_{ij} は応力テンソル、 ε_{ij} はひずみテンソル、 p は平均応力、 ε_p は平均ひずみ、 s_{ij} は偏差応力テンソル、 e_{ij} は偏差ひずみテンソル、 K は体積弾性係数、 G はせん断弾性係数である。本研究では独立な変形係数として、せん断弾性係数 G とポアソン比 ν を与えている。本研究ではこれに(1)で述べた粘性流体の応答を重ね合わせて粘弾性体を表現している。

(3) Bingham 流体モデル

このモデルは、ある偏差応力 q_y を超えない範囲では粘弾性体として振る舞い、それを超えた時には弾性体としての応力増分はゼロとなり、粘性流体として振る舞う。

5. 実験と解析の比較

(1) 粘性流体モデル

図6は粘性流体モデルを用いて行った解析結果と実験結果を流動距離に関して比較したものである。粘性係数の値を変えることにより、先端部での流動速度は大きく変化し、実験結果と同程度の流動速度を再現可能であることが分かった。また、傾斜角 40° で粘性係数 $\mu=0.1(\text{Pa}\cdot\text{s})$ の時の解析結果は傾斜角 40° でのガラスビーズの実験とほぼ同じ流速を与えており、一方傾斜角 30° で粘性係数 $\mu=0.1(\text{Pa}\cdot\text{s})$ での解析結果は傾斜角 30° でのガラスビーズの実験結果とほぼ等しい値を与えている。しかし、流動時の形状(図7)を見るとガラスビーズではダイレタンシーにより体積が膨張したが、この傾向は解析では表現できていないことや、実験では上流部に粒子が残るが、解析では流動先端部が盛り上がるなどの違いが見られる。また傾斜角 30° での豊浦砂の実験は途中で流動が止まってしまったが、粘性流体モデルではそれを表現することが出来ない。

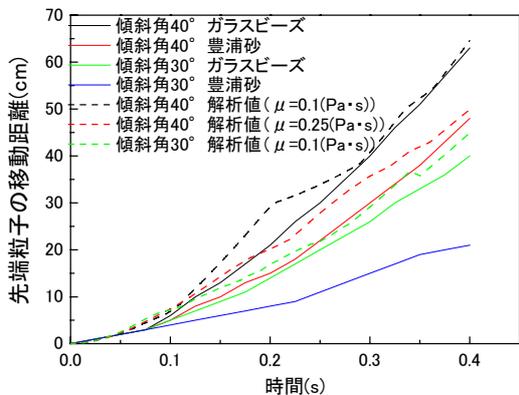


図6 実験値と解析値の比較

図7 解析結果(40° $\mu=0.1(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 、 $\Delta t=1.0e-5$ 、 $t=0.4(\text{s})$)

(2) 粘弾性体モデル

粘弾性体モデルを用いて解析を行った一例を図8に

示す。流動が停止するのは再現できたが、停止時の形状には角が残るなど大きな差異が見られた。



図8 解析結果(30° 、 $G=1.0*10^4$ 、 $\nu=0.25$ 、 $t=0.4(\text{s})$)

(4) Bingham 流体モデル

Bingham 流体モデルを用いて解析を行った一例を図9に示す。流動時に上流部に粒子が残る様子や、流動が止まる様子などの解析結果は得られなかった。



図9 解析結果(30° 、 $G=1.0*10^6$ 、 $\nu=0.25$ 、 $q_y=100$ 、 $\mu=1.0$)

5. 結論

粘性流体モデルを組み込んだ SPH 法において、粘性係数を変えることにより、実験結果に整合する流動速度を制御できた。しかし、粘性流体モデルでは流動が途中で止まってしまう流れや、流動形状を表現することは出来なかった。粘弾性体モデルを用いた際には、流動の停止は再現できたが、形状に大きな差異が見られた。Bingham 流体モデルでは流動時に上流部に粒子が残るなどの形状を再現することは出来なかった。また、固体的な構成則の導入には、自由表面の問題や、固体的な構成則の大変形など、様々な問題点も残った。

今後は、固体的な構成則の改良を試みたいと考えている。

参考文献

- ・ 竿本英貴：粒子一流体系に関する可視化実験と数値解析、筑波大学学位論文 2004
- ・ 佐藤和正：土石流に及ぼす粒子物性の影響、筑波大学修士論文 2005
- ・ L.B.Lucy：A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astronomical Journal*, Vol.82, pp. 1013-1024, 1977
- ・ R.A.Gingold and J.J.Monaghan：Smoothed particle hydrodynamics：theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*,181,375-389, 1977