

### SPH 法を用いた斜面崩壊シミュレーションによる崩壊形状の妥当性に関する一考察

鹿児島大学 学生会員 ○東元 大介

鹿児島大学学術研究院 正会員 酒匂 一成, 伊藤 真一

#### 1. はじめに

近年、気候変動による豪雨の発生頻度が増加することにより、土砂災害が多発しており、国土の強靱化が喫緊の課題である。例えば、防災・減災対策の一種として、建築基準法では、土砂災害特別警戒区域内に居室を有する建築物の構造などが定められている。それらの効果的な構造を検討する上で、がけ崩れや土石流に関する数値シミュレーションを実施することが有効と考えられる。そこで、大変形や衝撃荷重を扱いやすい Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法<sup>1)</sup>に着目した。本研究では、防災・減災対策に SPH 法を活用する前段階として、今回使用する SPH シミュレーションの妥当性を検討するため、テイラーの安定図表における斜面形状、土質パラメータから決定される崩壊形状とシミュレーションによる崩壊形状との比較を行う。

#### 2. SPH 法による斜面崩壊シミュレーションの概要

本研究では、Bui ら<sup>2)</sup>によって開発された SPH シミュレーションプログラムを用いた。以下に、シミュレーションにおける数値モデルを示す。

まず、今回は間隙水圧を考慮せず ( $p_w=0$ ) に解析を行うため、運動方程式は、次式で表される。

$$\rho \ddot{u}^\alpha = \nabla_\beta \sigma'^{\alpha\beta} + \rho g_i^\alpha \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ : 土の密度、 $u$ : 変位 (上付きのドットは時間微分を示す)、 $\alpha, \beta$ : 直交座標系の成分、 $\sigma'$ : 有効応力テンソル、 $g$ : 重力加速度。式(1)を SPH 表記にしたものを式(2)に示す。

$$\ddot{u}_i^\alpha = \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + C_{ij}^{\alpha\beta} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + g_i^\alpha \quad (2)$$

ここに、 $i$ : 中心となる粒子、 $\rho_i, \rho_j$ : 粒子  $i, j$  の土の密度、 $N$ : 粒子  $i$  の影響範囲内にある近傍粒子  $j$  の数、 $m_j$ :  $j$  粒子の質量、 $W_{ij}$ : 重み関数、 $C_{ij}^{\alpha\beta}$ : SPH の数値不安定性を解決するための安定化項。SPH 法に用いる土の構成モデルとして、本研究では、非関連流れ則の Drucker-Prager の弾塑性モデルを用いた。なお、構成モデルについては、紙面の都合上、参考文献 2) を参照されたい。本研究で用いる構成モデルは、粘着力

$c$ 、内部摩擦角  $\phi$ 、ダイレイタンシー角  $\psi$ 、ヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、土の密度  $\rho$  の 6 つの土質パラメータから求めることができる。

#### 3. 斜面崩壊シミュレーションによる崩壊形状の妥当性評価

ここでは、第 2 章で説明した SPH 法による斜面崩壊シミュレーションによる崩壊形状や入力パラメータの妥当性を評価するため、テイラーの安定図表<sup>3)</sup>を用いて検討した。テイラーの安定図表では、予想される斜面破壊形態の種類と臨界高を安定係数  $N_s$  から決定できることから、安定図表を基に解析領域を決定した。図-1 にテイラーの安定図表で用いられる斜面の基本的形状を示す。なお、安定係数は次式で与えられる。

$$N_s = \frac{\gamma_t H}{c} \quad (3)$$

本研究では、設定した斜面係数  $N_s$  に対応した斜面高さ  $H$  において、斜面の傾斜角  $\beta$  を変化させながら、SPH 法による斜面崩壊シミュレーションを実施し、崩壊時の傾斜角  $\beta_{cr}$  とその時の斜面破壊形態が、テイラーの安定図表と同様な結果を示すかを確認した。表-1 に SPH 解析に必要な入力パラメータを示す。これらの値は、Bui ら<sup>2)</sup>のパラメータ設定を参考に、軟弱な土からなる斜面を想定して決定した。

まず、安定係数  $N_s=8$  の斜面 ( $n_d=2, H=5.0m$ ) について、内部摩擦角を持つ斜面に対するテイラーの安定図表では崩壊時の傾斜角  $\beta_{cr}$ =約  $78^\circ$  で斜面先破壊

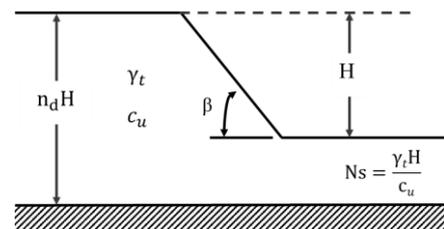


図-1 斜面の基本的形状

表-1 入力パラメータ

Material	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg.)	$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	$\psi$
Parameters	16.0	10.0	25.0	10,000.0	0.3	9.0

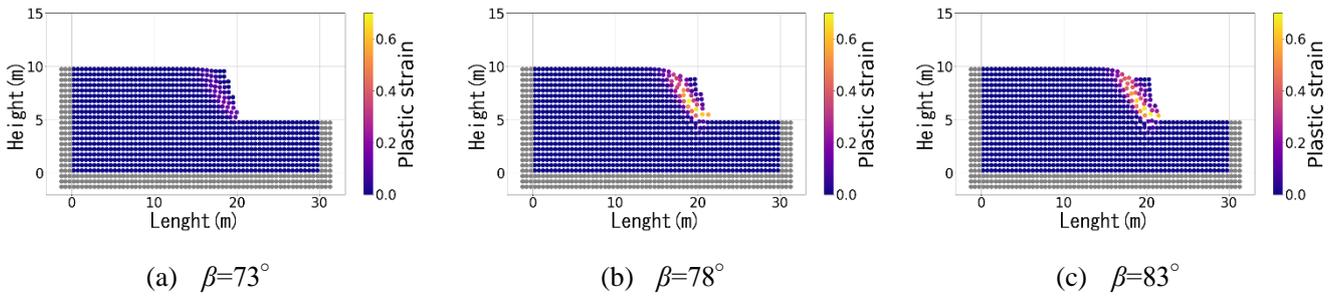


図-2 安定係数  $N_s=8$  の斜面 ( $n_d=2, H=5.0m$ ) の解析結果 (移動土塊が停止した時点)

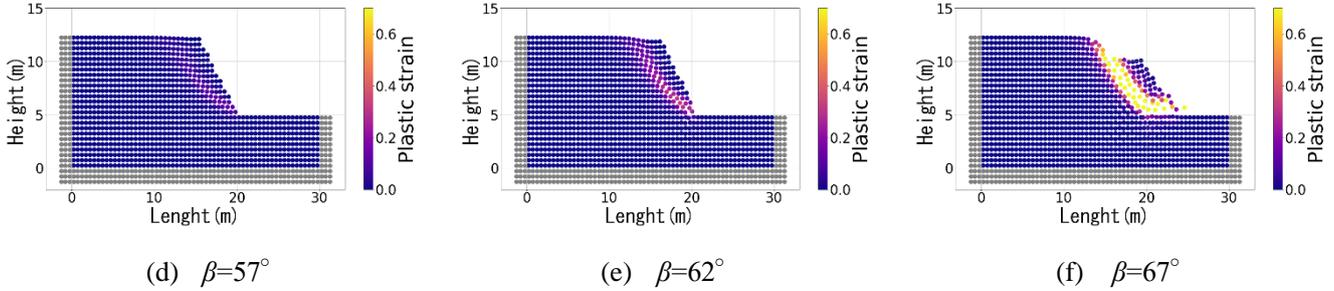


図-3 安定係数  $N_s=12$  の斜面 ( $n_d=2.5, H=7.5m$ ) の解析結果 (移動土塊が停止した時点)

を生じさせることが予想されるため、斜面の傾斜角  $\beta=73^\circ, 78^\circ, 83^\circ$  の3つのケースで解析を行い、その結果を図-2に示す。 $\beta=73^\circ$ の斜面(図-2(a))では、わずかな塑性ひずみが生じつつある状態である。 $\beta=78^\circ$ の斜面(図-2(b))では、大きな塑性ひずみが生じ、斜面先破壊を生じていることがわかる。 $\beta=83^\circ$ の斜面(図-2(c))では、さらに大きな塑性ひずみが生じている。

同様に、安定係数  $N_s=12$  の斜面 ( $n_d=2.5, H=7.5m$ ) について、テイラーの安定図表では崩壊時の傾斜角  $\beta_{cr}$ =約  $62^\circ$  で斜面先破壊を生じさせることが予想されるため、斜面の傾斜角  $\beta=57^\circ, 62^\circ, 67^\circ$  で解析を行い、その結果を図-3に示す。図より、崩壊時の傾斜角よりも大きくなると、明確に斜面先破壊が生じることがわかる。さらに、安定係数  $N_s=12$  の斜面 ( $n_d=2.5, H=7.5m$ ) について、内部摩擦角  $\phi$  を  $15^\circ$  に変えて解析を行った。この時、テイラーの安定図表では崩壊時の傾斜角  $\beta_{cr}$ =約  $45^\circ$  で斜面先破壊が生じることが予想される。図-4に斜面の傾斜角を  $45^\circ$  で解析した時の結果を示す。破壊形状は斜面先破壊となり、図-3のときよりも内部摩擦角が低くなったことにより、すべり面の傾斜が緩勾配となった。

また、本来なら崩壊時の傾斜角  $\beta_{cr}$  より大きい範囲で塑性ひずみは発生するが、今回の入力パラメータでは、崩壊時の傾斜角  $\beta_{cr}$  より緩い角度でも生じていることがわかつたため、検討を重ねる必要がある。

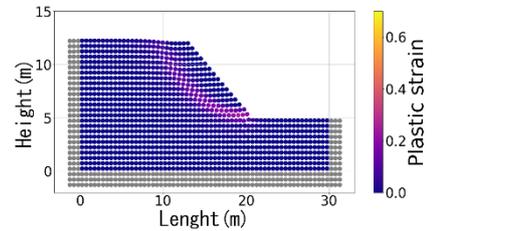


図-4 安定係数  $N_s=12$  の斜面 ( $n_d=2.5, H=7.5m$ ) 内部摩擦角  $\phi=15^\circ$  に変更

4. おわりに

本研究では、テイラーの安定図表における斜面形状、土質パラメータから決定される崩壊形状とシミュレーションによる崩壊形状との比較による妥当性の検討を行った。その結果、SPH法による解析手法および入力パラメータが、土からなる斜面の挙動の特徴をうまく表現できているのではないかと考えられる。今後は、鹿児島において問題視されているシラス斜面の対策工を検討するために活用していきたい。

参考文献

- 1) L. Lucy: A numerical approach to testing the fission hypothesis, *Astronom. J.*, Vol. 82, pp.1013-1024, 1977.
- 2) H. H. Bui et al.: Slope stability analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed particle hydrodynamics (SPH), *Geotechnique*, Vol.61, No.7, pp.565-574, 2010.
- 3) Taylor, D. W.: Stability of earth slopes, *J. Boston Soc. Civil Eng.*, Vol.24, No.3, pp.197-247, 1937.