

## 第Ⅲ部門

## 地震による緩傾斜地の地すべりに対する SPH 法の適用性

関西大学大学院理工学研究科 学生員 ○上野 友彰  
 関西大学大学院理工学研究科 正会員 飛田 哲男  
 鳥取大学大学院 正会員 小野 祐輔

## 1. はじめに

地震による火山灰質粘性土をすべり面とする地すべりは世界各地で発生しており、日本では 2011 年東北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震で発生したことが報告されている(例えば<sup>1)</sup>)。しかし、火山灰質粘性土による地すべりが発生しやすいのは緩傾斜地であり、そのため土砂災害警戒区域外となっているのが現状である。

地盤の変形問題に対する数値解析手法として有限要素法などが挙げられるが、これらの解析手法は地すべりのように極めて大きな変形を伴う場合には、メッシュが歪み、解析精度が低下する。一方、粒子法 (Smoothed Particle Hydrodynamics : SPH)<sup>2)</sup>は、流体解析などに用いられるメッシュフリー法であり、近年では地盤工学分野にも応用が進められている(例えば<sup>3,4)</sup>。

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0, 震源深さ = 24 km) の際、福島県白河市葉ノ木平で発生した地すべりに対し SPH 法の適用性を検討する。

## 2. 解析方法

(1) SPH 法の基本式<sup>3)</sup>

SPH法はラグランジュ的手法の1つであり、連続体を有限個の粒子にして分割し、粒子間の相互関係を数値的に解く手法である。この際、粒子間の相互関係を評価する挙動をさせるために、平滑化近似 (Kernel approximation) と粒子近似 (Particle approximation) の二種類の近似計算を行う。平滑化近似は次式で与えられる。

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \cdot W(x - x', h) dx' \quad (1)$$

ここで、 $W$ はカーネル関数と呼ばれる重み関数であり、 $x$ は座標値を示す。 $h$ は平滑化距離と呼ばれ、粒子間の相互作用を特徴づけるパラメータである。式(1)の積分を次式のように粒子近似と呼ばれる手法で離散化する。

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (2)$$

ここで

$$\nabla_i W_{ij} = \frac{x_i - x_j}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} = \frac{x_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \quad (3)$$

である。離散化された点  $x_i$  を SPH 粒子と呼ぶ。式(2)の  $m_j$ ,  $\rho_j$  はそれぞれ粒子  $j$  の持つ質量と密度である。SPH 法ではある1つの粒子に着目した場合、この粒子を中心とした半径  $h$  の円を描き、円内にある粒子の持つ物理量を、カーネル関数  $W$  を重みとした重み付き平均として求める。

(2) 運動方程式の離散化<sup>3)</sup>

連続体の運動方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{dv^\alpha}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{x^\beta} + b^\alpha \quad (4)$$

ここで、 $v$  は速度、 $t$  は時間、 $\sigma$  は応力、 $b$  は物体力、添字  $\alpha$  および  $\beta$  は座標軸を表す。式 (4) を SPH 法によって離散化することによって、次式を得る。

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left\{ \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{(\rho_i)^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{(\rho_j)^2} \right\} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_j^\beta} + b_i^\alpha \quad (5)$$

ここで、 $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$  である。

## 3. 地すべり問題に対する SPH 法の適用性

## (1) 葉ノ木平の地すべり

東北地方太平洋沖地震で発生した福島県白河市葉ノ木平の地すべりは、高速で土砂が移動したことが知られており、この地すべりで 10 家屋 13 名の犠牲が出ている。地質は、古土壌、スコリア、軽石、風化火山灰である。主な移動土塊は約 190 m 移動した後、向いの山に衝突して停止していることが確認されている<sup>5)</sup>。住民の証言により地すべり時にブラストが発生したことが確認されている。

(2) 解析モデル

地すべり発生箇所に着目した解析を行った。解析対象地域の標高データは、以下の手順で取得した。まず、国土地理院基盤情報データベース<sup>6)</sup>から数値地図 5m メッシュ (標高) より、2002 年の数値地図データを得た。次に、「基盤地図情報ビューア FGDV<sup>7)</sup>」を用いて解析対象地域の座標を取得し地形を作成した。基盤粒子と流動粒子を各 3 層に配置した。なお、本検討では、流動粒子は解析対象範囲を覆う全領域に配置した。材料パラメータ (表-1) は、実験値<sup>8)</sup>を参考にした。本解析で設定した SPH 法の基本パラメータを表-2 に示す。

表-1 解析時の物性値およびパラメータ

	密度 g/cm <sup>3</sup>	ヤング率 MN/m <sup>2</sup>	ポアソン比	粘着力 kN/m <sup>2</sup>	内部摩擦角 deg.	粘性係数 Pa・s
流動粒子	2.67	0.0539	0.499	20	14.8	0.001
基盤粒子 壁粒子	4.88	1000	0.499	750	20	0.001

表-2 本研究で設定した SPH 法の基本パラメータ

粒子数	流動粒子	58926個
	基盤粒子	67716個
	壁粒子	18179個
粒子間隔		1.0m
影響半径		1.3m
積分時間間隔		0.001秒
解析ステップ数		3.0×10 <sup>5</sup> step
継続時間T		300秒

(3) 地震動解析

図-1 に示す地震動<sup>9)</sup>を加えた場合の流動変位図を図-2 に示す。黄色範囲内が実際に地すべり発生した箇所である。最大変位は 13m であり、過小評価されているものの、地すべり地形が抽出できていることがわかる。また傾斜面に沿って粒子が移動していくことが見られた。

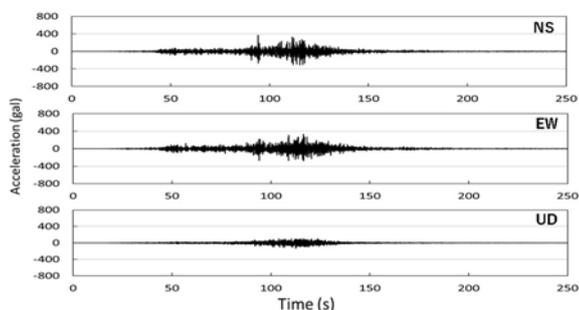


図-1 入力地震動 (K-Net 観測地点 FKS016 白河市教内)<sup>9)</sup>

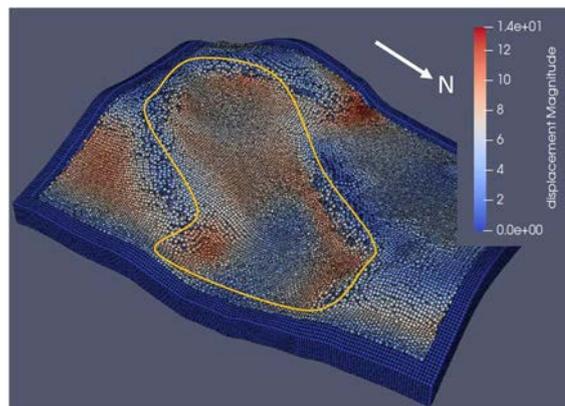


図-2 地震動解析による流動変位量 (600s)

4. まとめ

福島県白河市葉ノ木平の地すべりに対し、実験値から得られた地盤パラメータを用いて SPH 法を適用したところ、傾斜に沿って地すべりが発生し、実現象とほぼ同じ範囲で地盤流動が再現された。しかし、流動距離は 13m と過小評価となった。

謝辞

本論文で用いた観測記録は防災科学技術研究所および気象庁が観測・収集したものを配布いただいたものです。記して感謝の意を表します。

参考文献

- Chigira, M. and Suzuki, T.: Prediction of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits, Journal of natural disaster science, Vol.4, No2, pp.1-32, 2016.
- Liu, G. R. and Liu, M. B.: Smoothed Particle Hydrodynamics -A Meshfree Particle Method, World Scientific Publishing, pp.35-44, 2003.
- 小野祐輔: 地震時の進行型斜面崩壊を対象とした SPH 解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4 (地震工学論文集第 38 巻), pp. I\_770-I\_777, 2019.
- 野々山栄人: 地盤工学分野における SPH 法の適用, 砂防学会誌, 68(1), pp.68-71, 2015.
- Wang G., Suemine, A., Zhang, F., Hata, Y., Fukuoka, H. and Kamai, T.: Some fluidized landslides triggered by the 2011 Tohoku Earthquake (Mw 9.0), Japan. Geomorphology, Vol. 208, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.009>, pp. 11-21, 2014.
- 国土地理院, 基盤情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (閲覧日: 2022.2.25).
- 国土地理院, 基盤地図情報ビューア FGDV, [https://fgd.gsi.go.jp/otherdata/tool/fgdv\\_manual.pdf](https://fgd.gsi.go.jp/otherdata/tool/fgdv_manual.pdf) (閲覧日: 2022.2.25).
- Kawahara, T., Ueda, K., Iai, S., Chigira, M., and Tobita, T. (2016.6). "Numerical analysis of landslides of pyroclastic fall deposit." 1st International Conference on Natural Hazards & Infrastructure, ICONHIC2016, Chania, Greece.
- 防災科学技術研究所, K-NET, KiK-net. <https://doi.org/10.17598/nied.0004> (2019).