

SPH シミュレーションによる斜面崩壊の定量的評価に関する研究

A Study on Quantitative Evaluation of Slope Failure using SPH Simulation

野中 沙樹 (神戸大・工) 大石 哲 (神戸大・工) 阿波田 康裕 (JAXA)

Saki NONAKA, Kobe University

Satoru OISHI, Kobe University

Yasuhiro AWATA, JAXA

FAX: 78-803-6394, E-mail: tetsu@phoenix.kobe-u.ac.jp

The reproduction and quantitative evaluation of past landslide disaster cases will lead to the evaluation of the risk of slope failure and the prediction of the damage after the collapse. The purpose of this study is to perform high-speed calculations by parallelizing 3D large-scale SPH simulations that model real ground. In the calculation for the actual ground, the calculation was performed on about 1.45 million particles, and it was shown that parallel calculation with high scalability was performed. Therefore, it is suitable as a framework for large-scale calculation.

1. はじめに

斜面崩壊などの地盤の変形問題に関する数値解析手法のひとつに連続体を粒子を用いてモデル化する粒子法があり、大変形を伴う現象でも計算できることから地盤分野でも適用されてきている。先行研究では2次元計算で、模型実験や単純斜面を対象とした再現計算がほとんどであるが、崩壊前から崩壊後まで一貫して計算できる特徴などから、3次元の実際の斜面に対しても崩壊が発生するかどうかの危険性の評価や崩壊後の土砂の挙動と周囲にどのような被害を及ぼすかといったことも定量的に評価できる手法であると考えられる。

そこで、2次元計算で妥当性が確認されている粒子法のひとつである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 計算手法をスーパーコンピュータを用いた高効率並列計算を行うことで、実際の複雑な地形での大規模3次元斜面崩壊シミュレーションに適用する。

本研究では、過去の地震による斜面崩壊事例に対して実際の地形データをもとに粒子モデルを作成して FDPS¹⁾ (Framework for Developing Particle Simulator) を用いた再現計算を行い、再現度よりも計算速度の観点から大規模計算を行うフレームワークとして適切であるかを検討することを目的とする。

2. 計算方法

地盤材料の変形問題を解くために Bui et al.²⁾を参考に固体の支配方程式を粒子表現に離散化し、弾塑性構成則に非関連流れ則の Drucker-Prager モデルを適用した。数値計算の流れを Fig. 1 に示す。

粒子法の計算の計算において高効率で行うためのボトルネックとなる近傍粒子探索や、並列化するときの問題となる領域分割などを、高速で計算するためのモジュールをもつ FDPS を使用してスーパーコンピュータ Oakforest-PACS (以下、OFP とする) で並列計算を行っている。

3. 斜面崩壊事例への適用

今回対象としたのは、1995年1月17日の兵庫県南部地震により西宮市仁川百合野町で発生した地すべりである。崩壊前の地形データと崩壊直後の航空写真を Fig.2 に示す。

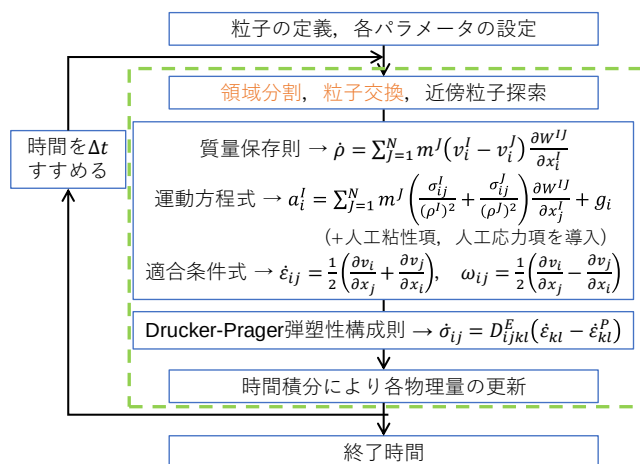


Fig. 1 Flowchart

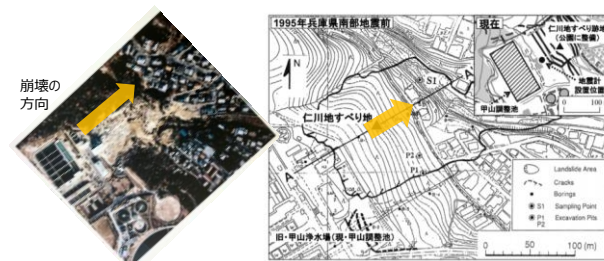


Fig.2 (Left) aerial photograph of the landslide, (Right) topographic map³⁾

Fig.2 の崩壊地を覆うように東西 235m, 南北 205m を計算対象領域とし、地形図と国土地理院の 5m メッシュの DEM データをもとにスプライン補間を行うことで作成した 1m 間隔の 3 次元斜面モデルを Fig. 3 に示す。座標軸に関しては x, y 軸は平面直角座標系に従っており、 z 軸は標高値である。崩壊地の断面図を参考に、粒子を下層の基盤層と盛土層の強度の異なる 2 層に分けている。Fig.3 において基盤粒子を赤色、盛土粒子を青色で示しており、各層の材料強度は Table 1 に示す。図に示す土粒子が 1,447,809 個で、その外側に壁粒子を配置しており、合計で 1,454,781 個の粒子で計算を行う。計算条件としては、初期粒子間距離 1.0m, 時間刻み 1.0×10^{-4} 秒で、地盤と壁の間の境界条件は non-slip 条件としている。

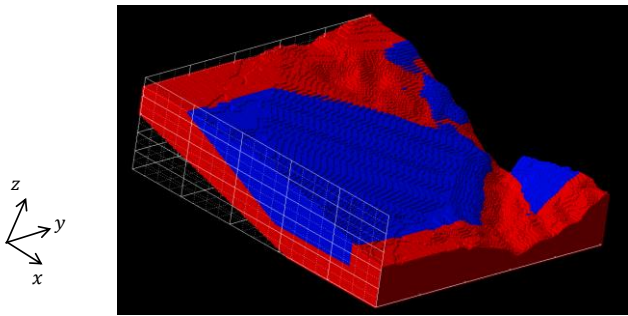


Fig. 3 3D particle model

Table 1 Strength of soil particle		
	盛土	基盤
単位体積重量 γ [kNm ⁻³]	16.4	20.0
ヤング率 E [kPa]	4850.0	8000.0
ポアソン比 ν	0.35	
粘着力 c [kPa]	3.0	70.0
内部摩擦角 ϕ [°]	30.0	5.0
ダイレタンシー角 ψ [°]	0.0	

まず、並列方法を決めるにあたってスケーラビリティを調べるため、この粒子モデルで 100 ステップまでの計算を行い、MPI 並列数と計算時間の関係調べた。その結果を Fig.4 に示す。OFPI ノードあたり 64 プロセス立てており、1, 2, 4, 8, 16 ノード使用した時の 5 ケースの計算を行った。図の青線が初期化や出力も含めた全実行時間①で、赤線が Fig.1 のループの中の部分(破線内の処理)のみの実行時間②を示している。この計算中粒子の初期化と 2 回ファイル出力を行っており、今回の計算中の約 50%を占めている。また、並列化効率に関して 1 ノードのときの計算時間を基準に算出すると、8 ノードで①は 40%、②が約 86%、16 ノードで①が 22%、②が約 72%となっている。ファイル操作等の時間の影響により①では並列化効率は低くなっているが、②に関しては非常に高く並列化できていることがわかる。本計算では 8 ノードでの計算を行うものとし、このときの 1 プロセス当たりの粒子数は約 2,800 個ほどである。

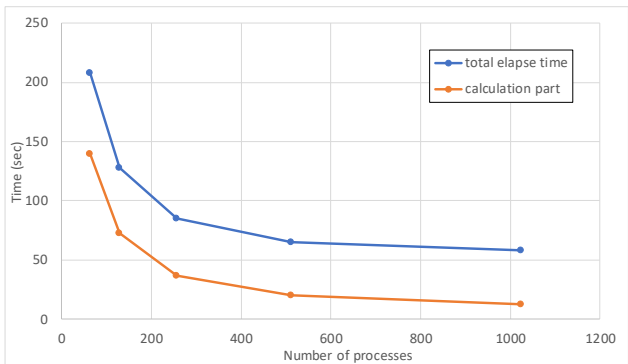


Fig. 4 Relationship between number of processes and calculation time

また、振動として、0.5～5.5 秒の間、Fig.5 で示す波形の加速度を全基盤粒子に対して一様に与えた。

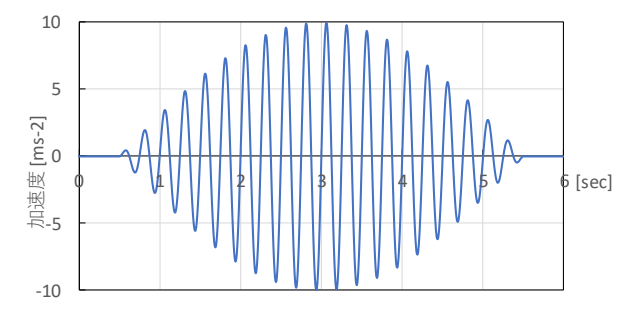


Fig. 5 Input acceleration

10 秒後 (100,000 ステップ) の変形状態を Fig.6 に示す。粒子の色は塑性ひずみの大きさの分布を示している。流れ落ちるような変形は再現できなかったが、盛土粒子を中心に変位、ひずみが発生しており、崩壊していることがわかる。

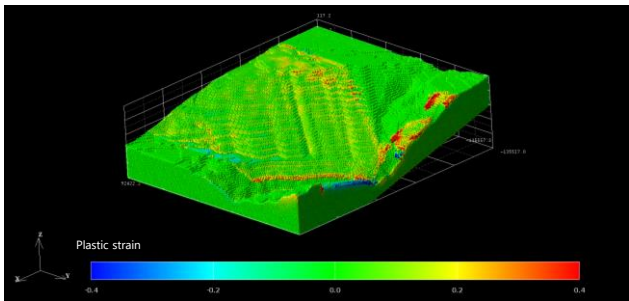


Fig. 6 Result at 10.0 sec

また、計算時間をまとめると、8 ノードを使用した 512 プロセス並列の計算で総計算時間は約 6.6 時間だった。ファイル出力の時間を除くと 1 ステップあたり約 0.2 秒以下となり、本プログラムは実地盤を対象とした大規模計算のフレームワークとして妥当なものであると言える。

5. 結論

FDPS を用いた 3 次元斜面崩壊シミュレーションの並列計算プログラムを作成した。過去の地震による斜面崩壊事例に対しても、実際の地形データをもとに約 145 万個の大規模な粒子モデルを作成し、計算を行った。並列数を増やしても高いスケーラビリティで並列計算を行うことができ、振動により変形も見られたので、大規模計算のフレームワークとして適切なものである。今後はこれを用いて崩壊規模等の定量的評価を行ったり、水の影響を考慮した連成計算を行う。

参考文献

- 1) M. Iwasawa et al.: Implementation and performance of FDPS: a framework of developing parallel particle simulation codes, PASJ, Vol.68, No.54, pp.1-22, 2016.
- 2) Ha H. Bui et al.: Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model, IJNMG., Vol.32, pp.537-1570, 2008.
- 3) 秦ら: 1995 年兵庫県南部地震における仁川地すべり地での強震動の評価, J. of the Jpn. Landslide Soc., Vol.51, No.5, 2014