

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月6日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06179

研究課題名(和文)地震により発生する大規模斜面崩壊の粒子法シミュレーション技術の構築

研究課題名(英文) Development of a particle-based method for simulation of large-scale slope failures caused by an earthquake

研究代表者

小野 祐輔 (ONO, Yusuke)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00346082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：地震によって引き起こされる大規模な斜面崩壊の過程を精度良く再現できる数値解析手法の確立を目的として、連続体の大規模な変形を取り扱うことのできるSPH法に基づくシミュレーションモデルの開発を行った。本研究の主要な成果は次の通りである。(1) SPH法においてすべり面(不連続面)を取り扱うための解析モデルの開発を行った。(2) 解析コードの三次元化とOpenMPライブラリを用いた並列化を実施した。(3) 2008年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢地すべりと、2016年熊本地震における阿蘇大橋地すべりの再現解析を実施した。(4) SPH法による連続体と剛体ブロックの連成解析法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：A simulation model to reproduce the process of large-scale slope failures induced by an earthquake has been developed based on the SPH method which can deal with large-scale deformation of continuum body. The preliminary results of this study are as follows. (1) An analytical model to handle the slip surface (discontinuous surface) was developed. (2) The simulation obtained the capability of three-dimensional analysis. Furthermore, parallelization code using OpenMP library were implemented. (3) Reproduction analysis of the Aso Bridge landslide in the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake and the Aso Bridge Landslide in the 2016 Kumamoto earthquake were conducted. (4) A coupled analysis method of a continuum body and rigid block by SPH method was developed.

研究分野：地震工学

キーワード：地震地すべり 斜面崩壊 数値解析 SPH法

1. 研究開始当初の背景

地震時には、盛土・切土などの崩壊による交通遮断や土砂災害に起因する建物の倒壊など、斜面崩壊による被害が多くみられる。こうした被害を抑制するにあたり、地震時の斜面の挙動を数値解析により予測することの意義は大きい。斜面の地震時挙動に用いる数値解析法としては、古くから有限要素法が利用されてきた。しかしながら、有限要素法ではメッシュを利用するため、対象が大きく変形する場合にはメッシュが歪み、精度の大幅な低下が生じる、あるいは解析の続行が困難になるという問題がある。そのため、斜面が崩壊を起こすかどうかの検討や、その安全率の計算には十分な実績を持っているが、最終的な変形状態や被害の及ぶ範囲を予測するための解析手法としては、十分な性能を有していない。そのため、近年では、有限要素法に代わる斜面の大変形挙動の予測を行う解析ツールとして、メッシュフリー法の一つである粒子法が注目されている。

研究代表者は、これまでに粒子法の一つである SPH 法による土構造物の地震時挙動を対象とした解析を実施し、事例を蓄積してきた。この経験を通じて、SPH 法を斜面の崩壊等を含む大変形解析へ適用する上での大きな問題点が明らかとなりつつある。これは、SPH 法による地盤系材料を対象とした大変形解析では、対象が比較的粘着力の小さい砂質土系材料で構成される場合には、実験結果との良い一致を示すのに対し、比較的粘着力の大きい粘性土系材料で構成されたものに対しては、実験の再現性が著しく悪化するという問題である。実際に、砂質土を対象とした SPH 解析では、実験結果を高い精度で再現できたとの研究成果が発表されているが、粘性土を対象としたものは見当たらない。

2. 研究の目的

地震によって引き起こされる大規模な斜面崩壊によって、種々の社会基盤施設が重大な被害を受けることがある。このような被害を防ぐためには、地震によって引き起こされる大規模な斜面崩壊の過程を詳細に追跡し、最終的な変状を予想する数値解析手法の確立が望まれる。本研究では、連続体の大規模な変形を取り扱うことのできる SPH 法に基づき、地震によって引き起こされる大規模な斜面崩壊の過程を精度良く、力学的な合理性を保ちながら解析することのできるシミュレーションモデルの構築を目的とする。

3. 研究の方法

SPH 法により地震地すべり等の斜面崩壊の実被害及び実験結果の再現解析を行い、その問題点を明らかにした。さらに、明らかになった問題点を解決するための解析モデル、解析手法の開発を行った。SPH 法による数値解析を行う解析プログラムは、すべて自作したものであり、解析プログラムの機能追加

に加えて、安定化と高速化を併せて実施した。

4. 研究成果

(1) SPH 法において不連続面(すべり面)を取り扱うための解析モデルの開発を行った。これは、粘着力の影響が卓越する斜面への SPH 解析の再現性を改善するためには、地盤中に存在する切り込み(不連続面)を取り扱うことのできる解析モデルが必要であったためである。粒子と粒子の接触を基本とし、粒子同士の噛み合わせの効果を除去できるように、接触力の接触面の法線方向成分のみを用いることにした。摩擦がない場合、等加速度直線運動をする物体の変位を理論値に対して精度良く再現できた(図1)。

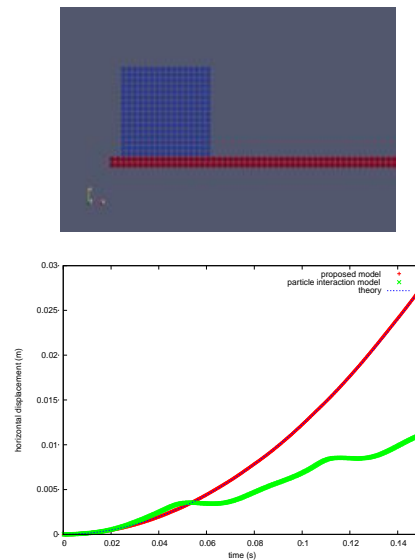


図1 上段：物体を摩擦の無い床上で右方向に等加速度直線運動する物体の解析モデル。下段：時刻と物体の変位の関係。粒子と粒子の反発力で解析した場合(緑実線)は、粒子が噛み合うため理論値(青点線)と一致しない。一方、本研究の解析モデル(赤実線)は理論値(青破線)と一致している。

さらに、この解析モデルは地震断層を含む周辺地盤の変形予測解析に応用可能であることが分かったため、表面に切り込みを入れた弾性体を圧縮し、切り込み周辺の変位を計測した実験に対して再現解析を実施したところ、良い一致が得られた(図2、図3)。

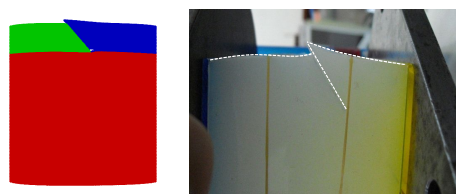


図2 表面に切り込みを入れた弾性体を圧縮させた結果。左：SPH 解析結果，右：実験結果。

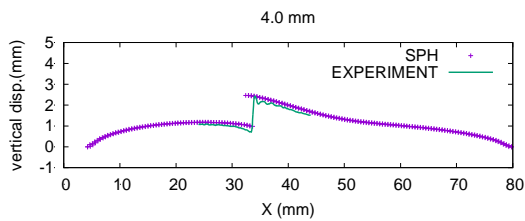


図3 切り込みを入れた弾性体の表面の変位の分布．本研究による解析モデルを用いた解析は実験と一致している．

(2) 地震地すべりに対する SPH 法解析の適用に関する研究を行った．まず，解析コードの三次元化を実施した．その際，三次元化に伴い計算時間の大幅な増加が見込まれるため，OpenMP ライブラリを用いた解析コードの並列化を実施した．その性能評価を実施した．開発した解析コードは，4 から 8 コア程度の一般的なデスクトップ PC において，十分な計算効率を持つことを確認した．次に，SPH 法における解析モデルの作成を効率化する手法として，数値標高モデルに基づき半自動的に解析モデルを作成するシステムを開発した(図4)．さらに，UAV により撮影した画像データに対する画像処理を行うことで三次元モデルを作成する技術を導入することで，容易に SPH 法による解析モデルを作成できるようになった(図5)．

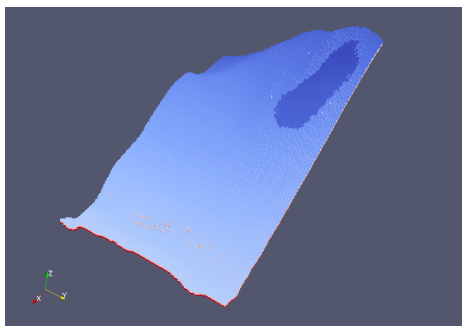


図4 数値標高モデルに基づき半自動生成した SPH 解析モデル．阿蘇大橋地すべりを対象とした事例．地すべりにより失われた土塊はすべり面形状を仮定した上で除去した．

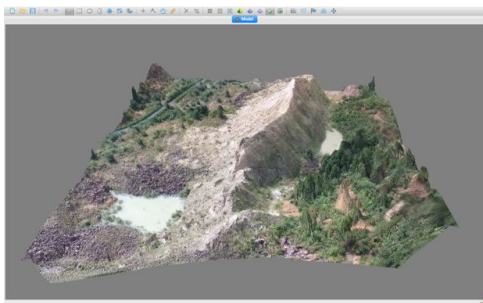


図5 UAV による空撮画像から作成した三次元モデル．空撮した動画から静止画を抽出し，三次元モデルを作成した．

一方，実被害を対象とした解析として，2008 年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢地すべり(図5)と，2016 年熊本地震における阿蘇大橋地すべり(図6)の再現解析を実施した．荒砥沢地すべりについては，著者らが過去に実施した解析の問題点について検討した．まず，SPH 法に固有の解析パラメータである人工粘性の影響について検討を行った．人工粘性は，SPH 法解析を安定させるために必要なパラメータであり，対象とする物体の特性とは独立に設定する必要がある．検討を行った結果，人工粘性の値は，解析結果，特にすべり土塊の移動量に大きな影響を及ぼすことがわかった．

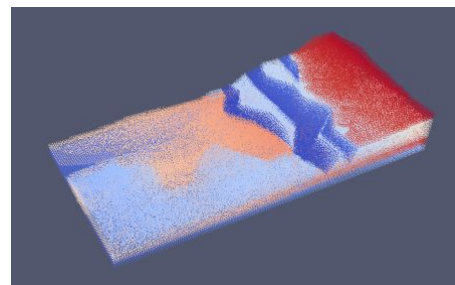


図5 荒砥沢地すべりの SPH 解析モデル

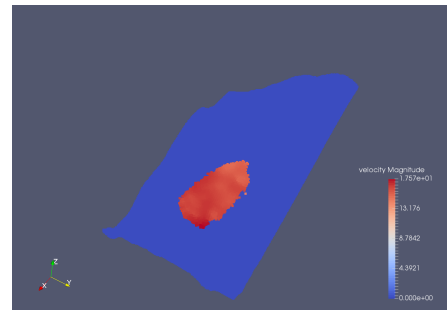


図6 阿蘇大橋地すべりの SPH 解析結果の例．

(3) SPH 法による連続体と剛体ブロックの連成解析法の開発を行った．SPH 法の解析で用いる粒子に対して，離散体の数値解析法である個別要素法で用いる粒子と同様に円形を仮定し，接触ばねを導入した．剛体ブロックは個別要素法における粒子の集合としてモデル化し，SPH 粒子と接触時には接触ばねを介して力の伝達をする．この解析モデルを用いることで，地震作用による石積擁壁と地山地盤との動的相互作用を考慮した数値解析が実行可能となった(図7)．



図7 個別要素法と SPH 法の連成解析による最終変形状態

(4) SPH 法における Rigid Body Dynamics

の応用に関する基礎的検討を行った。本研究で行った様々な検討の結果，すべり面に生じる摩擦を精度良く解析するために粒子と粒子の接触をばねとして表すモデルを導入した場合，法線方向ばねによる振動が発生し，安定した滑り摩擦特性の再現が困難であることがわかった。そこで，次の手段として，剛体動力学(rigid body dynamics)に着目した検討を行うことにした。剛体動力学に基づく解析法では，物体同士の滑り摩擦を伴う運動が高い精度で再現できることが分かった。さらに，高い剛性を持つ滑りブロックの挙動の再現に重要なロッキング運動についても高い精度で解析できることも分かった(図8)。そこで，今後は，SPH法による地震地滑り解析に対する適用について検討を行うこととした。

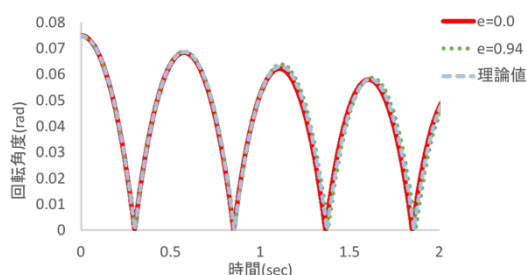


図8 Rigid Body Dynamics による剛体のロッキング運動の解析精度の検証。理論値(青破線)と解析値(赤実線, 緑点線)は良い一致を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

小野祐輔, 岡本遼太, 河野勝宣, 酒井久和, 秦吉弥, 池田勇司: SPH法を用いた荒砥沢地すべりの三次元解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.I_346-I_356, 2017, 査読有,

https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I_346

小野祐輔, 相澤類, 酒井久和, 太田直之, 中島進, 藤原寅士良, 高柳剛, 湯浅友輝, 池田勇司: 石積擁壁の耐震補強効果の検討のための SPH—DEM 連成解析法の開発, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.I_357-I_365, 2017, 査読有,

https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I_357

小野祐輔, 内藤正輝, 酒井久和, 太田直之: SPH法による石積擁壁の模型振動実験の再現解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.I_515-I_522, 2016, 査読有,

http://doi.org/10.2208/jscejseee.72.I_515

嶋中貴史, 小野祐輔, 竹澤麻衣, 野畑拓也, 酒井久和: 2008年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢地すべりの解析シミュレーション, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71(4), pp.I_725-I_736, 2015,

査読有,

https://doi.org/10.2208/jscejseee.71.I_846

小野祐輔, 金光功樹, 谷口朋代, 中瀬仁: 地表断層近傍地盤の大変形を対象とした SPH法に基づく数値解析手法の開発, 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集, pp.67-72, 2015, 査読無。

〔学会発表〕(計2件)

小野祐輔, 岡本遼太, 河野勝宣, 酒井久和, 秦吉弥, 池田勇司: SPH法を用いた荒砥沢地すべりの三次元解析, 第36回地震工学研究発表会, 2016。

小野祐輔, 相澤類, 酒井久和, 太田直之, 中島進, 藤原寅士良, 高柳剛, 湯浅友輝, 池田勇司: 石積擁壁の耐震補強効果の検討のための SPH—DEM 連成解析法の開発, 第36回地震工学研究発表会, 2016。

6. 研究組織

(1)研究代表者

小野 祐輔 (ONO, Yusuke)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 00346082