

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760426

研究課題名(和文)メッシュフリー粒子法の斜面の地震応答解析への適用と高精度化・高速化に関する研究

研究課題名(英文)Application of the mesh free particle method to earthquake response analysis of slopes

研究代表者

小野 祐輔(ONO, Yusuke)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00346082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、メッシュフリー粒子法の一つであるSmoothed Particle Method (SPH) 法による斜面の地震時崩壊挙動の解析手法の開発を行った。具体的な研究成果として、有限要素法に相当する精度を達成するための新たな計算式を提案し、さらにレイリー減衰のSPH法への導入を行った。その後、実際に斜面崩壊への適用性を検討するため、公開されている斜面模型実験を対象として、その再現解析を実施した。また、2011年東北地方太平洋沖地震において発生した盛土造成斜面の崩壊を対象として、SPH法による再現解析を行った。

研究成果の概要(英文)：The Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method was applied to the of earthquake triggered slope failures. The conventional SPH formulation was modified to improve the accuracy of the earthquake response analysis. The Rayleigh damping was introduced into the SPH analysis successfully. The developed simulation program was verified through test cases. First the large-scale slope failure experiments were reproduced and the results were compared. Next the slope failure induced by 2011 Tohoku earthquake was simulated by the developed program.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：SPH法 斜面 地震応答解析

1. 研究開始当初の背景

山地や丘陵地帯における自然斜面、あるいは河川堤防や道路・鉄道盛土、宅地造成盛土といった人工造成地盤における斜面は、地震に対して極めて脆弱であるのにも関わらず、その重要度は大きい。過去、斜面の崩壊により多くの被害が発生している。このため、斜面の耐震設計法の高度化が進められている。

斜面の耐震設計法を橋梁や建物と同様なレベルまで高度化するためには、その地震応答を適切に再現できる数値解析法の確立が不可欠である。橋梁や建物の地震応答解析には広く有限要素法が利用されており、高度な挙動予測が可能となっている。斜面の地震応答解析に対しても、有限要素法の利用が試みられている。しかしながら、有限要素法を用いた斜面の地震応答解析は、回避することの困難な問題を抱えている。

斜面の地震被害は、引張りと滑りのモードを中心とした破壊を伴うことが特徴である。このような不連続面を伴う物質の解析は、本来連続体を取り扱うための解析手法である有限要素法が不得手とするところである。有限要素法に不連続面の取り扱いを組み入れるために、これまでジョイント要素が用いられている。ジョイント要素は予め不連続面が発生すると予想される箇所に事前に設定しておく必要がある。これは、解析以前に斜面に発生する破壊モードを事前に設定した上で、解析を行うことを意味しており、被害予測に利用するにあたっては大きな問題である。

このため、斜面物の地震応答解析では個別要素法が用いられることも多い。個別要素法は解析対象を多数の剛体粒子に分割し、粒子と粒子の接触を考慮した運動方程式を解く手法である。個別要素法は不連続面の取り扱いに優れているが、解析に必要な接触ばね定数といったパラメータの設定が容易ではないため、現状では、解析対象ごとに実験等によるパラメータのキャリブレーションが必要になっており、被害の予測手法としては不便である。

2. 研究の目的

先に述べたように、現在、斜面の地震時破壊に関しては、有限要素法による地震応答解析によって、破壊の生じる直前までの応力状態に基づく安全率を算定することで、破壊の有無を予測するにとどまっている。したがって、斜面が強い地震動を受けた際の、最終的な変形状態の予測を行うことはほとんど不可能である。本研究では連続体の支配方程式を粒子に離散化して取り扱う、メッシュフリー粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics 法（以下、SPH 法）を応用し、斜面の地震応答を包括的に再現できる数値解析手法を確立することを目的とする。

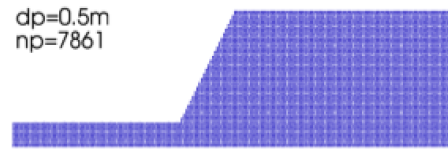


図1 レイリー減衰の導入効果の検討に用いた解析モデル

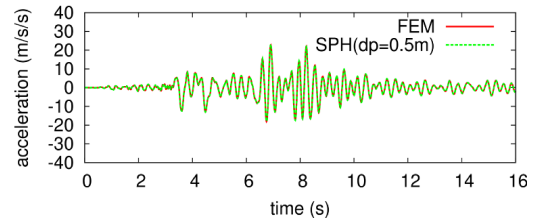


図2 レイリー減衰を導入した SPH 法と有限要素法の解析結果の比較

3. 研究の方法

本研究では、メッシュフリー粒子法の一つである SPH 法による斜面の地震災害の再現のための解析プログラムの開発を行う。まず、これまでに研究代表者が作成した SPH 法による斜面の地震応答解析を行う解析プログラムを元に、さらなる解析精度の向上と流動化による大変形を追跡する機能を追加する。また、滑り破壊面の生成と滑りによる大変形を再現するためのアルゴリズムの開発と実装、さらに GPU を用いた解析速度の向上を試みる。既往の実験を対象とした再現解析を実施し、開発した解析手法の妥当性と適用性を検証する。

4. 研究成果

本研究は、メッシュフリー粒子法の一つである Smoothed Particle Method (SPH) 法による斜面の地震応答解析において、有限要素法に相当する精度を達成するための新たな計算式を提案するとともに、レイリー減衰の SPH 法への導入を行った。SPH 法においてレイリー減衰を行った結果の妥当性を確認するため、図1に示した斜面モデルに対して地震応答解析を行い、有限要素法との比較を行った。図2にその結果を示す。SPH 法による解析結果と有限要素法による解析結果は一致しており、レイリー減衰の導入が適切に行われていることが分かる。

次に、原子力安全基盤機構により実施された実大三次元振動破壊実験装置 E-Defense による大型斜面模型実験の再現解析を実施した。実験では斜面中の地震動増幅がない場合に発生する滑落型、斜面が大きく応答することで発生する進行型の二種類の崩壊モードが生じたのに対し、SPH 法では斜面に崩壊が発生する以前の加速度応答は良好に再現できたものの、崩壊が発生する入力地震動の大

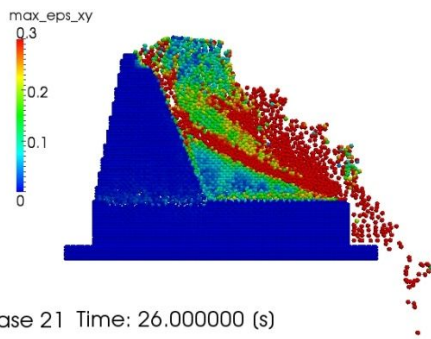


図3 進行形破壊斜面を対象としたSPH解析結果

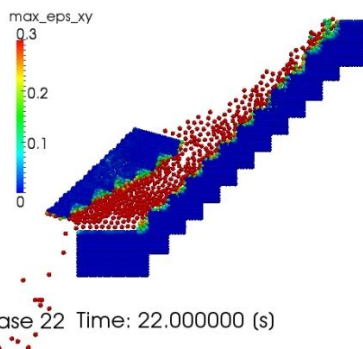


図4 滑落型破壊斜面を対象としたSPH解析結果

きさと崩壊の形態，土塊の移動量の再現性には課題が残った．図3に進行形破壊斜面，図4に滑落型破壊斜面を対象としたSPH法による解析結果を示している．

また，2011年東北地方太平洋沖地震において発生した福島市伏拝の盛土造成斜面の崩壊（図5）を対象として，SPH法による再現解析を行った．公開されている現地の地盤情報に基づき作成した基本モデルを用いた解析（図6）では，実被害と比較して土塊の移動量が小さく，かつ法肩の形状が失われるなど実被害を精度良く再現することはできなかった．SPH法において法肩の形状が失われる原因は，滑り線となるせん断ひずみの大きな領域が盛土全体に拡大してしまうことにあると考えられる．そこで，せん断ひずみが狭い範囲に集中して発生することを期待して粒子密度を4倍にしたSPH法による解析を実施した（図7）．しかしながら，解析結果は基本モデルによるものと同様であり，改善は見られなかった．さらに解析に用いた地盤材料の強度と実地盤の強度には差異があると考えられるため，特に斜面の変状に影響を与えらると思われる残留強度を変化させた解析を実施した．残留強度を低下させることで斜面の変形量は増加するものの，盛土部全体

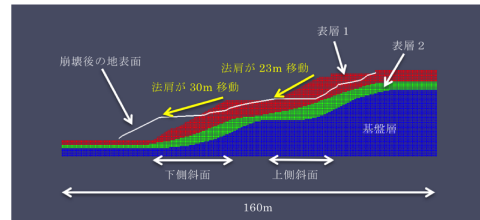


図5 解析対象造成盛土地盤

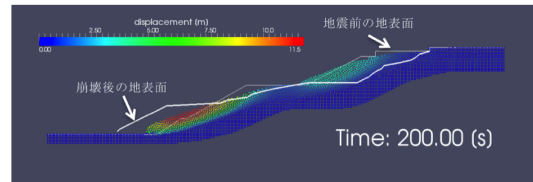


図6 基本モデルによる解析結果

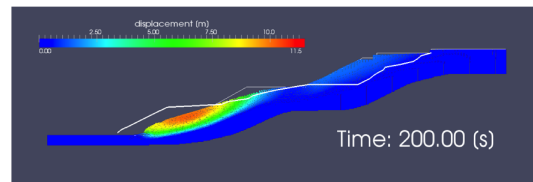


図7 粒子密度4倍モデルによる解析結果

が激しく流動化する結果となり実被害の様子を再現するには至らず，引き続き今後の研究が必要である．

GPUを用いた解析コードの高速化に関しては，現時点において十分な成果が得られておらず，この点についても引き続き開発を進める．

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計2件)

1. 小野祐輔：SPH法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），査読有，Vol.69，No.4（地震工学論文集第32巻）p.1_650-1660 2013．
2. 小野祐輔・中村晋：2011年東北地方太平洋沖地震による宅地造成盛土の崩壊を対象としたSPH解析，第33回地震工学研究発表会講演論文集，査読無，Vol.33，pp.1-8，2013．

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
なし

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：