

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

小野 祐輔¹・中村 晋²

¹正会員 鳥取大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)

E-mail:ysk@cv.tottori-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

E-mail:s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震によって引き起こされた福島市伏拝の宅地造成盛土の崩壊を対象に, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた再現解析を実施した. SPH法は, メッシュフリー粒子法の一つであり, 連続体の大変形挙動の取り扱いに優れていることから, 地震時の斜面崩壊を対象とした再現解析への利用が試みられている. 解析において, 地盤材料の弾塑性構成則としてDrucker-Pragerモデルを適用した. Nakamura et al.(2012)が現場で採取した資料から求めた値を参考に材料パラメータを設定したSPH解析により, 造成盛土が崩壊するという結果は得られたが, 実被害における崩壊後の形状を再現するには至らなかった.

Key Words : slope failure, mesh-free particle method, numerical simulation, smoothed particle hydrodynamics

1. はじめに

2011年3月11日に発生したMw9.0の東北地方太平洋沖地震によって, 宮城県, 福島県を中心に複数箇所造成盛土が崩壊した¹⁾. 数値解析手法を用いてこれらの被災地における被災メカニズムを再現することは, 造成盛土の耐震性評価手法の高精度化を進め, より効果的な抑止対策を開発するための一助となると考えられる.

造成盛土の地震応答解析においては, 従来から有限要素法が用いられている^{2,3,4)}が, 盛土の崩壊のような大変形問題への適用が困難である. そのため, 地震によって引き起こされる盛土の崩壊挙動の再現解析に対して, 連続体の大変形解析問題を容易に取り扱うことができるメッシュフリー粒子法に基づく数値解析手法の開発が進められている^{5,6)}.

本研究では, 2011年東北地方太平洋沖地震によって引き起こされた福島市伏拝の宅地造成盛土の崩壊⁹⁾を対象として, メッシュフリー粒子法の一つであるSmoothed Particle Method (SPH)¹⁰⁾を用いた再現解析を試みる. この被災盛土は, 中村ら⁸⁾によって他のメッシュフリー粒子法であるMaterial Point Method (MPM)によって再現解析が試みられている.

2. SPH解析の概要

SPH法では, 連続体を多数の粒子の集合とみなした近似的な計算を行う. SPH法においては, カーネル近似と粒子近似という二種類の近似計算が行われる. カーネル近似は次式で与えられる¹⁰⁾.

$$f(\mathbf{x}) = \int f(\mathbf{x}') W(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|, h) d\mathbf{x}' \quad (1)$$

ここで W はカーネル関数と呼ばれる重み関数であり, $\mathbf{x}$ は座標値を表す. h は粒子間の相互作用を特徴づけるパラメータであり, 平滑化距離と呼ばれる. カーネル関数には, 全領域で積分した値が 1 になること, および $h \rightarrow 0$ の極限がディラックのデルタ関数となること

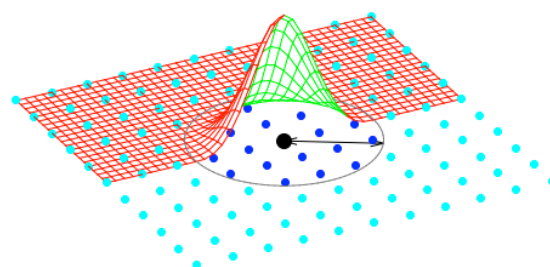


図-1 SPH粒子とカーネル関数

要求される。また、式(1)において関数 W をディラックのデルタ関数に置き換えたものは、デルタ関数の合積に関する恒等式であり、カーネル近似はこの恒等式を近似したものと解釈することができる。

次に、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¹⁰⁾。

$$f(\mathbf{x}^i) = \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(\mathbf{x}^j) W(|\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i|, h) \quad (2)$$

ここで離散化された点 $\mathbf{x}^i$ を SPH 粒子と呼ぶ。 N は粒子 i からカーネル関数の値が非零となる距離内に存在する粒子の数である。SPH 粒子は、質量 m^i 、密度 ρ^i 、受け持つ体積 m^i/ρ^i 、その座標値 $\mathbf{x}^i$ での関数の値 $f(\mathbf{x}^i)$ を有しているが、明確な形状は持たない。

実際に SPH 法を弾性体や弾塑性体の解析に適用する際には、関数 $f(\mathbf{x}^i)$ そのものではなく、その微分形 $\partial f(\mathbf{x}^i)/\partial x_\alpha$ が必要になる。その SPH 近似は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\frac{\partial f(\mathbf{x}^i)}{\partial x_\alpha} = - \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(\mathbf{x}^j) \frac{\partial W^{ij}}{\partial x_\alpha} \quad (3)$$

ここで、

$$W^{ij} = W(|\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i|, h) \quad (6)$$

である。

カーネル関数 W として様々なものが提案されているが、本論文における数値解析例では、適用例の多い3次スプライン関数¹⁰⁾によるものを用いる。この場合、着目した点から平滑距離 h 以内でカーネル関数は非零となり、それ以遠では零となる。すなわち、図-1の中央の黒い粒子について、ある物理量 f を評価する場合、この粒子から一定の距離内にある粒子（図中の青い粒子）の持つ値の重み付き平均を、カーネル関数の値を重みとして求めることに相当する。水色の粒子の位置では、カーネル関数の値が零であり、計算に含まれない。

以上がSPH法の基本的な概念であるが、実際の解析においては、計算精度を向上させるために種々の修正が施された定式化によることが多い。本研究では、小野⁷⁾に従って解析を実施する。

3. 解析対象とした造成盛土と入力地震動

(1) 解析対象とした造成盛土

解析対象とした造成盛土の層構造モデルと被災後の地

表-1 材料特性⁹⁾

	表層 1	表層 2	基盤層
密度 ρ [kg/m ³]	1.55	1.55	1.55
ポアソン比 ν	0.45	0.45	0.45
せん断波速度 V_s [m/s]	150	240	330
ピーク強度	粘着力 C_p [kPa]	14.8	-
	内部摩擦角 ϕ_p [deg.]	29	-
残留強度	粘着力 C_r [kPa]	14.8	-
	内部摩擦角 ϕ_r [deg.]	29	-

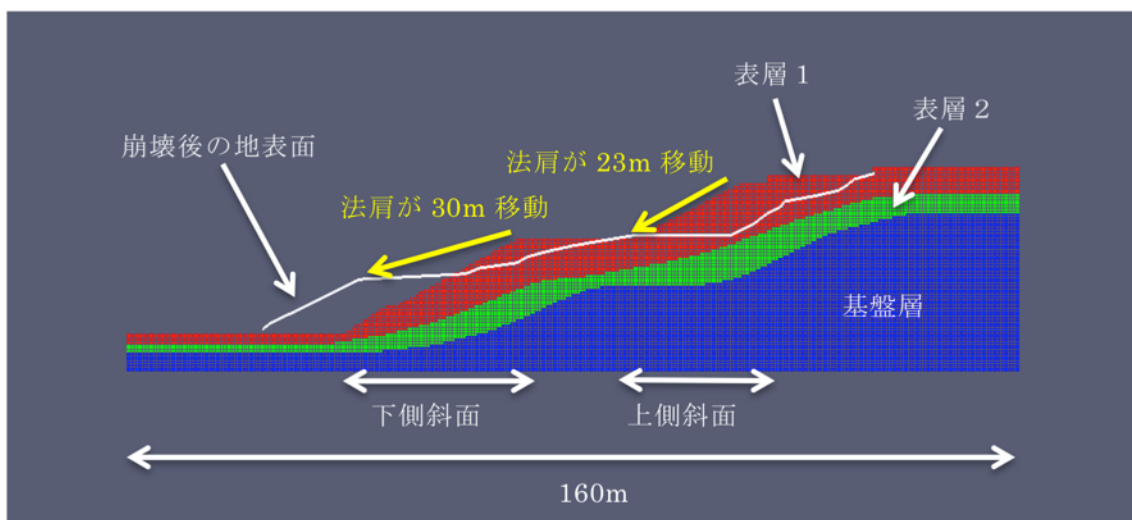


図-2 解析対象造成盛土の層構造と被災状況⁹⁾

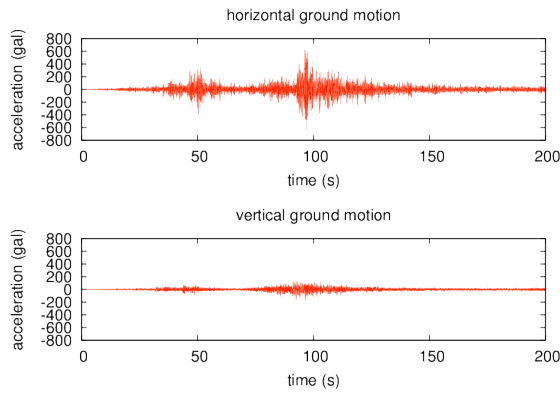


図-3 入力地震動

表面変形の様子⁹⁾を図-2に示す。図に示したように、表層1、表層2および基盤層からなる三層構造モデルを仮定した。表層1が崩壊した盛土部に相当する。各層の材料特性は、Nakamura et al.⁸⁾を参考に表-1のように設定した。ただし、後の解析においては、基盤層を取り除いた解析モデルを使用した。

(2) 入力地震動

本研究で対象とした福島市伏拝の宅地造成盛土の崩壊地点を引き起こした本震地震動は、サイト特性置換手法に基づき秦ら¹¹⁾によって再現されている。秦ら¹¹⁾が求めた地震動の時刻歴波形を図-3に示す。この地震動は大きく二つの山からなり、完全に切り分けることはできないが、それぞれ本震に含まれる異なるサブイベントから生成されたと考えられる。水平成分、鉛直成分を解析モデル底面から同時に入力する。

4. 解析モデルと解析手順

(1) 基本解析モデルの設定

SPH法による解析を行うにあたり、図4に示すようにSPH粒子分布を与えた。ここで、基盤層における地震動の増幅特性は大きくないと仮定し、斜面モデルから基盤層を取り除いた。また、後に解析パラメータを変化させた検討を行うため、このモデルを基本モデルと呼ぶ。SPH粒子は0.5m間隔で均等に配置されており、総数は5,833個である。報告によると⁹⁾、実斜面の被災は、造成盛土（表層1）あるいは旧表土が崩壊していると推定されていることから、表層2のSPH粒子の移動を拘束し、表層1のみが変形を生じるものとした。また、側方の境界は水平、鉛直方向ともに固定した。

地盤材料には弾性あるいは弾塑性モデルを用いた。弾塑性モデルとしては、一般的なモール・クーロンの破壊規準を用いた弾完全塑性モデルを適用した。ただし、材料のピーク強度と残留強度に異なる値を用いており、応力がゼロの状態から初めての降伏に達するまではピーク強度を用い、一旦ピーク強度に達した以降は残留強度を用いた。

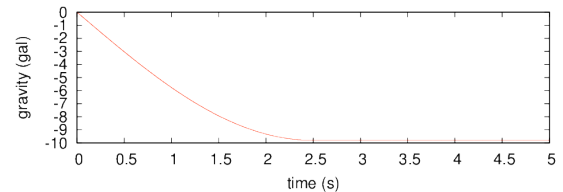


図-5 自重解析に用いる重力载荷の時刻歴

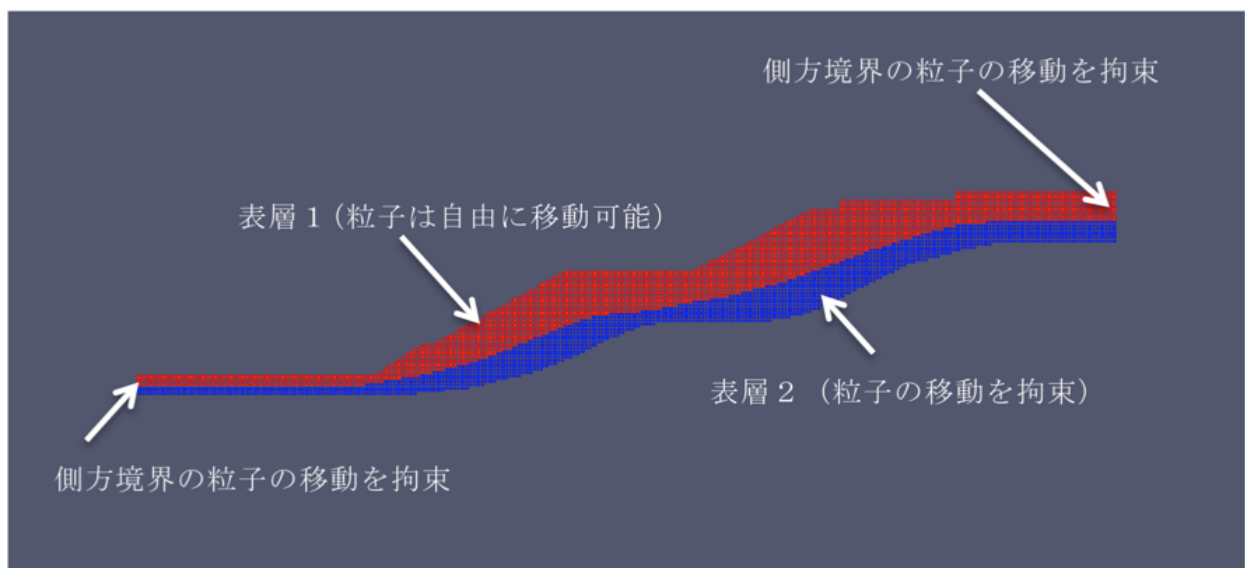


図-4 SPH粒子の配置と拘束条件

(2) 解析手順

本研究における解析は、地震動が作用する以前の応力状態を求めるための自重解析と、地震動を作用させた崩壊解析の二段階で実施した。以下、それぞれの解析について詳細を説明する。

a) 自重解析

作成した SPH 解析モデルに対して、鉛直方向に重力加速度を作用させることにより、地震動が作用する以前の斜面中の応力分布を求めることを目的として実施する。ここでは、実斜面の盛土の造成過程の影響は考慮せず、解析モデル全体に一齐に重力加速度を与える。ただし、重力加速度を瞬間的に作用させた場合に生じる振動によって地盤の破壊が激しく発生する恐れがあるため、図 5. 示すような漸増载荷とし、解析時間は 5 秒間とした。さらに粒子の振動を抑制することを目的として、運動方程式に減衰項(ξ/dt) $\cdot v$ を与える⁷⁾。ここで、 dt は解析時間間隔、 v は粒子速度、 ξ は減衰の大きさを支配するパラメータであり、自重解析においては 0.002 とした。自重解析において生じる変形は微小であるため、SPH 粒子の移動にともなう粒子間相互作用の更新は行わず、初期

状態のものを全解析ステップで用いることで、解析に要する時間の短縮を図ることができる。

b) 崩壊解析

自重解析によって得られた応力を各 SPH 粒子の初期応力とし、地震動を作用させた解析を行う。自重解析によって各 SPH 粒子に生じた変位は無視し、解析モデルを作成した際の初期配置から解析を始めた。自重解析が終了した段階では、重力加速度が作用した状態の釣り合い状態となっているため、崩壊解析では解析開始時点から重力加速度を作用させた。

5. 解析結果と考察

(1) 基本モデルの解析結果

a) 自重解析結果

図-4に示した基本モデルを用いて自重解析を実施し、得られた最大主応力分布を図-5に示す。表層 2 では SPH 粒子の移動を拘束しているため、ひずみが発生せず応力もゼロとなっている。表層 1 では土被りの厚さに対応した応力分布が得られている。解析は時間間隔 dt を 0.0004

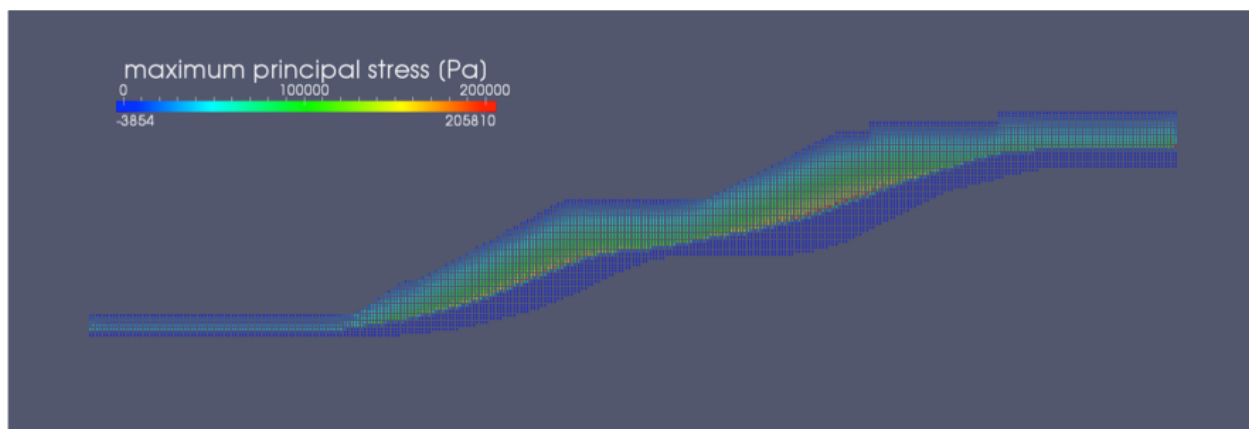


図-6 自重解析の結果（基本モデル）

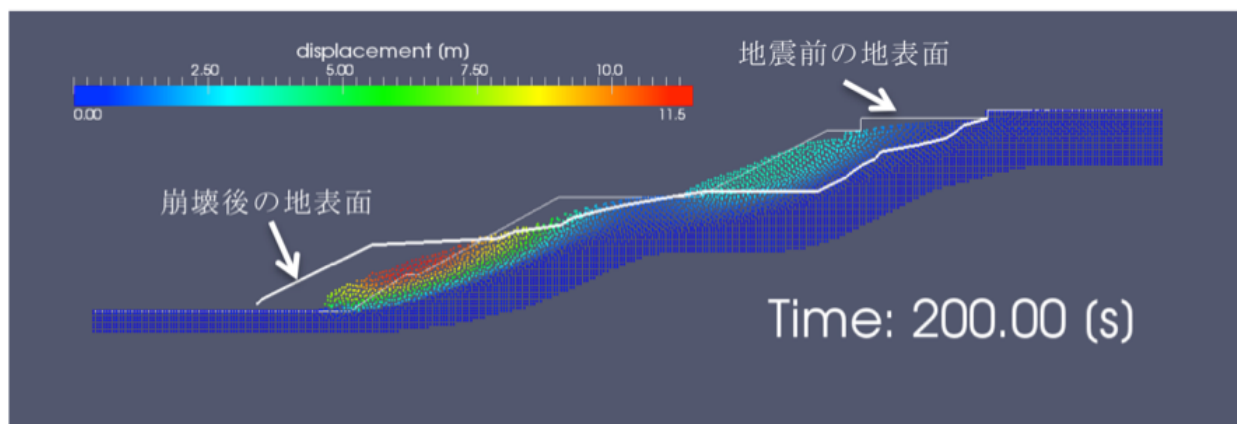


図-7 基本モデルによる斜面の崩壊の様子

秒とし、5秒間行っった。

b) 崩壊解析結果

図-6に示した応力分布を初期応力状態として与えた上で、図-2に示した地震動を入力することにより斜面の崩壊解析を行った。解析では時間間隔 dt を0.0004秒とし、200秒間行っった。

解析によって得られた最終的な斜面の変形状態を図-7に示す。図中には地震前の地表面を細い白線で、崩壊後の地表面を太い白線で示している。解析によれば、上段の斜面、下段の斜面とも大きく変形した結果が得られた。土粒子の移動量は、上段の斜面では最大で4m程度、下段の斜面で10m程度となっている。これらの値は、実際の被災状況と比較すると小さい。

変形の形状についてみると、実被害では下段の斜面が法肩部の形状を保ったまま左方に移動しているのに対して、SPH解析では元の形状が失われ、粘性を持つ流体のような挙動を示している。これは、土塊が移動する中で土塊の全体に破壊が伝達して残留状態まで強度が失われ、元の形状を保てなくなったためであると考えられる。すなわち、実被害においては滑りが表層1と2の境界の限定された範囲に生じて斜面法肩付近が剛体的に移動したと考えられるのに対して、この状態がSPH解析では再現できていない。一方で、上段の斜面についても、実被害では激しく流動化した様子が認められるのに対し、SPH解析結果では元の形状を保ちながら移動しており、実被害を再現できていない。

次に、図-8において、上下段それぞれの斜面法肩の変位の時刻歴を示す。まず下段斜面において50秒付近で崩壊が生じ、その後95秒付近で上段の斜面の崩壊が始まったことが分かる。すなわち、図-2に示した入力地震動において、一つ目のサブイベントに対応する地震動によって下段の斜面の崩壊が始まったのに対して、上段の斜面の崩壊はより振幅の大きな二つ目のサブイベントによって引き起こされた。また、50秒付近で開始さ

れた下段の斜面の崩壊は一つ目のサブイベントの終盤で一旦停止するが、二つ目のサブイベントによって再び変形が進行した。土粒子の移動量と入力地震動の二つサブイベントの関係について着目すると、上段の斜面については二つ目のサブイベントが支配的であり、下段の斜面については一つ目のサブイベントが支配的となった。

(2) 粒子間隔の影響

基本モデルを用いたSPH解析では、斜面に崩壊が生じることは再現できたが、その形状を再現することができなかった。これは、実斜面では表層1と2の境界付近の極めて限定された範囲で滑りが生じたと考えられるのに対して、SPH解析では滑り領域が集中せず、土塊全体で破壊が発生したためである。この原因として、解析に用いた粒子密度の不足が考えられるので、SPH粒子を配置する間隔を基本モデルの二分の一である0.25mとした解析モデル（粒子密度4倍モデル）を作成し、基本モデルとの比較を行った。粒子密度4倍モデルではSPH粒子の総数は23,282個となった。各SPH粒子の拘束条件、解析手順、重力加速度、地震動の入力方法は基本モデルを用いた解析ケースと同様である。解析の時間間隔は0.0001秒とし、200秒間の解析を行った。

粒子密度4倍モデルを用いて斜面の崩壊解析を実施した結果を図-9に示す。この解析モデルにおいても表層1と2の境界付近に滑りが集中する領域は発生せず、

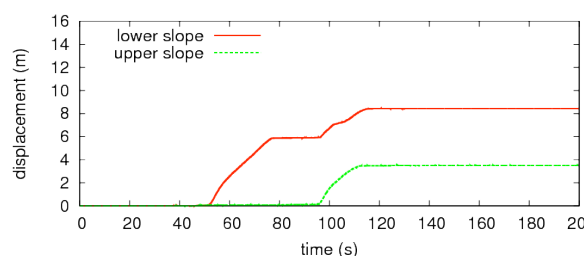


図-8 基本モデルの斜面法肩の変位量

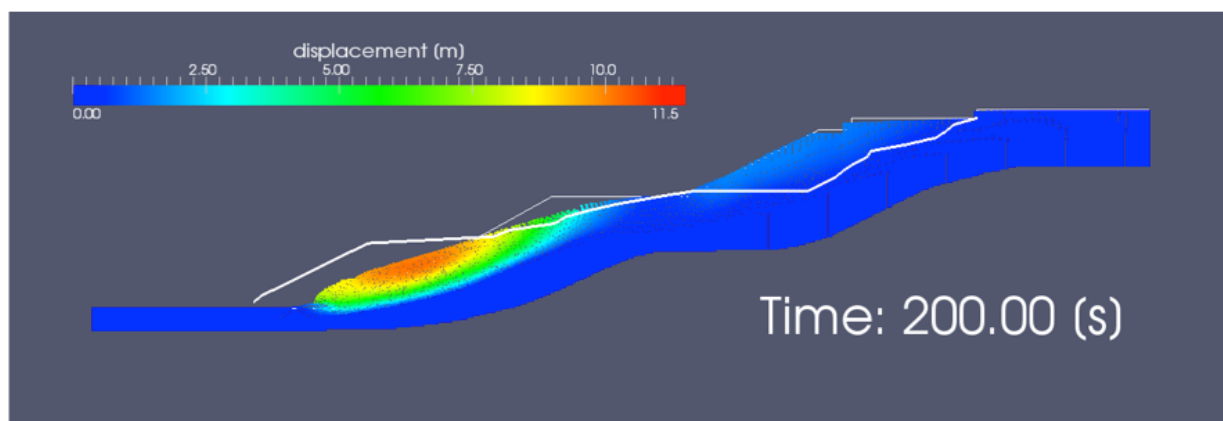


図-9 粒子密度4倍モデルによる斜面の崩壊の様子

基本モデルによるものとほぼ同じ結果となり、解析結果の改善は見られなかった。

図-10 に上下段それぞれの斜面の法肩の変位の時刻歴を示す。基本モデルによる解析結果と同様に、一つ目のサブイベントで下段の斜面の崩壊が始まり、二つ目のサブイベントによって上段の斜面の崩壊が生じている。ただし、変位量に着目すると、基本モデルよりも小さな値となっている。特に、二つ目のサブイベントで生じる変位量が小さくなっている。

このように、SPH法を用いた斜面の崩壊解析においては、粒子密度の違いによって、解析結果に大きな差異が現れる。今後、SPH解析における合理的な粒子密度の決定法の確立が望まれる。

(3) 残留強度の影響

ここでは、解析に用いた残留強度の値の影響を確認す

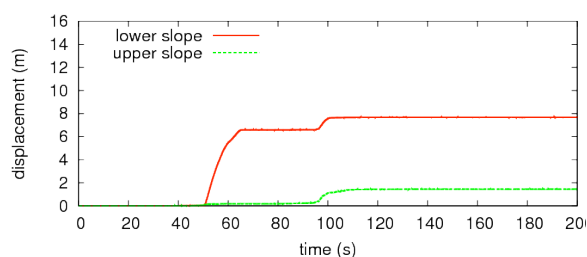


図-10 粒子密度4倍モデルの斜面法肩の変位量

るため、残留強度の粘着力を2分の1にしたケース（残留強度2分の1モデル）と4分の1にしたケース（残留強度4分の1モデル）の解析を実施した。残留強度の粘着力以外のパラメータ、粒子の配置は全て基本モデルと同じである。それぞれの解析モデルに対する解析結果を図-11及び図-12に示す。

残留強度2分の1モデルでは、土粒子の移動は下段の斜面で最大15m程度、上段の斜面で最大10m程度と基本モデルよりも大きな値が得られた。崩壊後の土塊の形態としては、法肩付近の形状は完全に失われており、流体的な流動を生じた。残留強度4分の1モデルでは下段の斜面で最大25m、上段の斜面で最大20mと、残留強度2分の1モデルよりも大きな土粒子の移動が発生した。

法肩の変位の時刻歴を図-13及び図-14に示す。図-13より、基本モデルとは異なり、入力地震動の一つ目のサブイベントに対応する50秒付近で上段、下段の斜面が同時に崩壊を始めたことが分かる。ただし、一つ目のサブイベントの振幅が小さくなった時点で、上段の斜面の移動が下段の斜面より先に停止し、上段の斜面の移動量が下段の斜面よりも小さくなっている。また、二つ目のサブイベントにおいても、二つの斜面の移動はほぼ同時に再開している。一方、図-14に示した残留強度4分の1モデルによる解析結果では、やはり一つ目のサブイベントの際に上下両方の斜面の崩壊が始まり、二つ目のサ

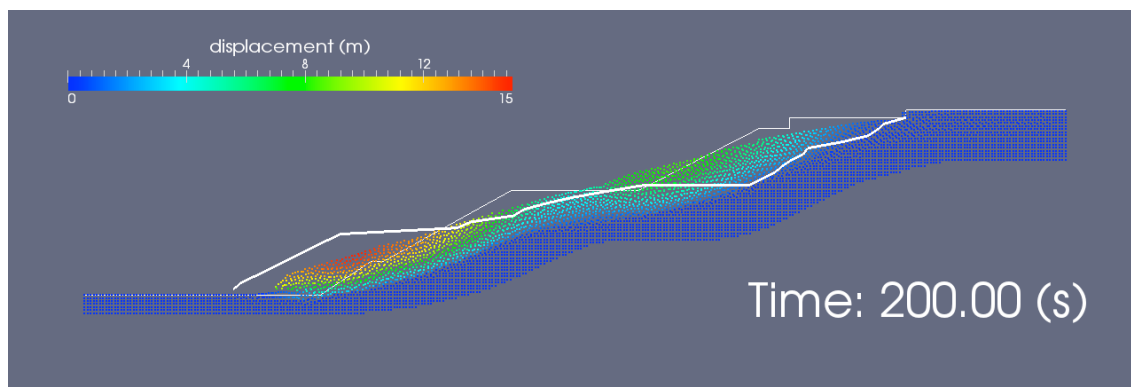


図-11 斜面崩壊解析結果（残留強度2分の1モデル）

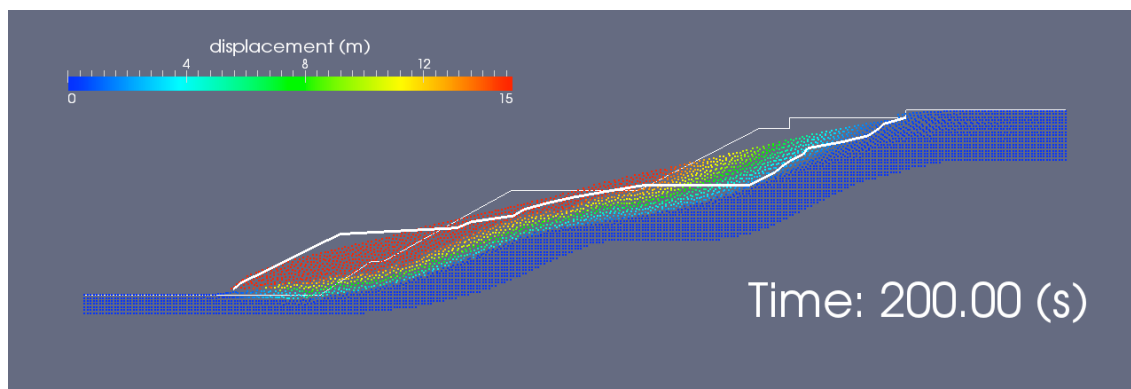


図-12 斜面崩壊解析結果（残留強度4分の1モデル）

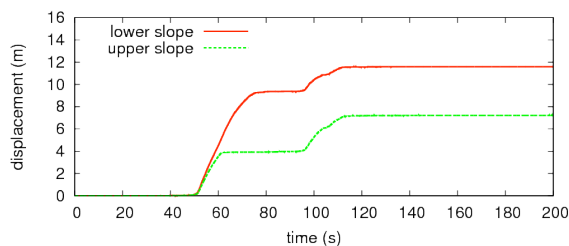


図-13 斜面法肩の変位の時刻歴（残留強度 2 分の 1）

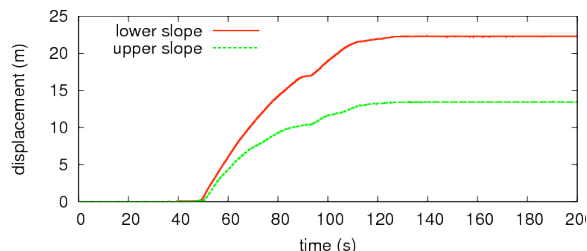


図-14 斜面法肩の変位の時刻歴（残留強度 4 分の 1）

ブイベントの振幅が大きくなる前に短時間だけ移動が停止するが、その後二つ目のサブイベントによる振幅が大きくなると土粒子の移動が再開している。

土粒子の移動量と入力地震動の二つサブイベントの関係について着目すると、残留強度 2 分の 1 モデルでは、下段の斜面では一つ目のサブイベントが支配的であるが、上段の斜面では二つのサブイベントの影響は同程度となっている。一方、残留強度 4 分の 1 モデルでは、上段の斜面、下段の斜面ともに一つ目のサブイベントによって引き起こされる土粒子の移動が支配的となった。このように、残留強度の値の設定によって、異なった斜面崩壊過程が得られる結果となった。

6. まとめ

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を対象として、SPH 法による再現解析を行った。

基本モデルを用いた解析では、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 解析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 解析を実施した。しかしながら、解析結果は基本モデルによるものと同等であり、改善は見られなかった。

また、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したものの、盛土部全体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ことはできなかった。さらに、残留強度を変えることで、斜面の崩壊が始まる時刻や二つのサブイベントのうちどちらが主要因となるかが異なり、異なった崩壊過程が得られた。

以上のように、SPH 解析では、実被害で発生した法肩付近の形状を保ったまま大きく移動するという崩壊形態を再現することができなかった。この被害形態を再現するためには、せん断ひずみが極限られた範囲に集中するようなモデル化が必要となる。そのためには、今回の解析で用いたモール・クーロンの破壊規準を用いた弾完全塑性型構成則ではなく、ひずみ軟化を考慮できる構成則の導入が必要であると考えられる。土塊の移動量については、材料の残留強度を調整することで、実被害と対応した値を得ることができると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、JSPS 科研費 23760426 の助成を得た。

参考文献

- 1) 土木学会東日本大震災被害調査団（地震工学委員会）：緊急地震被害調査報告書，<http://committees.jsce.or.jp/report/node/43>，（accessed 2013-09-19）.
- 2) Toki, K., Miura, H. and Oguni, Y.: Dynamic slope stability analyses with a non-linear finite element method, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.13, pp.151-171, 1985.
- 3) 鶴飼恵三，井田寿朗，若井明彦：動的弾塑性 FEM 解析による地震時斜面のすべり解析，日本地すべり学会誌，Vol.32，No.1，pp.8-11，1995.
- 4) Zheng, H., Liu, D. F. and Li, C. G.: Slope stability analysis based on elasto-plastic finite element method, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol.64, pp.1871-1888, 2005.
- 5) 小野祐輔，西田真悟，清野純史：SPH 法による土構造物の弾塑性解析，応用力学論文集，Vol.9，pp.717-723，2006.
- 6) 小野祐輔，西田真悟，清野純史：SPH 法による盛土破壊シミュレーションとその CG 化，地域安全学会論文集，Vol.8，pp.1-6，2006.
- 7) 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，Vol.69，No.4，pp.I_650-I_660，2013.
- 8) Nakamura, S., Hata, Y., Abe, K., Shinoda, M., Sento, N. and Nozu, A.: Study for clarifying the failure mechanism of reclaimed land at Fukushima city by use of the estimated strong earthquake motion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM, 2012.
- 9) 中村晋，仙頭紀明，梅村順，大塚悟，豊田浩史：

2011 年東北地方太平洋沖地震による福島県中通りおよびいわき地域における地盤災害—造成盛土や自然斜面の崩壊と変状，および液状化—，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.91-101，2012.

ト増幅特性の評価—2011 年東北地方太平洋沖地震による福島市の造成盛土崩壊地点での地震動の推定—，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.139-149，2012.

- 10) Liu, G. R. and Liu, M. B.:Smoothed Particle Hydrodynamics, *World Scientific Publishing*, 2003.
- 11) 秦吉弥，中村晋，野津厚：地盤非線形応答時のサイ

SPH SIMULATION OF COLLAPSE OF RECLAIMED LAND DURING 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Yusuke ONO and Susumu NAKAMURA

The reclaimed land at Asahidai housing complex in the Fukushima city was seriously damaged due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M9.0). In this paper, the SPH simulations are conducted to reproduce the collapse behavior of the damaged embankment and to investigate the mechanism of the failure. The SPH is a attractive tool for a numerical simulation of the collapse behavior of earth structures caused by an earthquake ground motion. The simulation results could not reproce the displacement of the sliding block as well as the residual shape of the failed embankment.