

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14722

研究課題名(和文) 粒子法を用いた土砂災害の発生とその挙動予測および砂防施設の新しい構造形式の提案

研究課題名(英文) Prediction of occurrence and behavior of landside using particle method and proposal of new structure type of sabo facilities

研究代表者

竹山 智英 (Takeyama, Tomohide)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00452011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：斜面崩壊のような非常に大きな変形を伴う現象の解析に適する粒子法のひとつであるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法をベースとして土砂災害に対する予測に必要な数値解析手法を構築した。特に流量境界を与えるための手法を提案し、その妥当性を検証した。降雨の特徴と災害発生の関係を検討するため、数種類の降雨条件と強度を設定し、単純な斜面を対象に解析を行った結果、降雨の特徴によって崩壊の発生や挙動に違いがみられ、降雨の情報をもとに斜面崩壊発生の有無を予測できる可能性が高いことが分かった。また土の強度によっても崩壊の発生や挙動に違いがみられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過剰間隙水圧および有効応力の変化という土骨格と間隙水圧の相互作用や不飽和土を対象として考慮することができるようなSPH法を構築し、降雨の違いによる土砂災害の発生の有無を力学モデルに立脚して予測しようとしている点に学術的意義がある。また本研究をさらに進めることにより、ハザードマップの作成や災害・被害のリアリティのある可視化によって防災に対する意識向上にも役立てることができると考えている。

研究成果の概要(英文)：Based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method, which is one of the particle methods suitable for analysis of phenomena with very large deformation such as slope failure, the numerical method necessary for prediction of landslides was developed. In particular, it was proposed that the method to give flux boundary conditions by using Lagrange multiplier method and verified through the simulations of seepage flow problems. In order to examine the relationship between the characteristics of rainfall and the occurrence of slope failure, the analyses with several types of rainfall conditions and strengths were performed. The results suggested that the possibility of the occurrence of slope failure could be predicted based on the information of rainfall. In addition, the occurrence and behavior of slope failure also differed depending on the strength of the soil.

研究分野：地盤工学

キーワード：土砂災害 粒子法 不飽和地盤

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、大型化する台風や豪雨による土砂災害が多発している。このような激甚化する土砂災害への対策は今後ますます重要な課題となることが予想される。土砂災害の発生やその挙動を予測することが、このような災害に対してどのような対策が必要であるかということやその対策がどの程度有効であるかを検討するために必要不可欠である。

2. 研究の目的

地盤材料は、土骨格、間隙を満たす水および空気から構成されている。豪雨による斜面崩壊を対象とするため、当然ながら土骨格の運動と間隙水の移動を記述した連成問題を解く必要がある。また、斜面崩壊の原因として、土の重量の増加、水圧が上昇することによる強度低下に加えて、不飽和領域の飽和度が増加しサクションが低下することによる強度低下が挙げられる。したがって、不飽和地盤を表すことができる数理モデルも必要となる。SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^①は有限要素法などで必要となるメッシュを必要としない手法であるため、メッシュを必要とする解析手法では困難な非常に大きな変形を伴う現象、例えば斜面崩壊などの解析に適している。さらに、連続体を扱う手法であるため、これまで提案されている不飽和地盤を対象とした構成モデルや水分特性曲線モデルが適用可能である。本研究では、SPH 法を用いた豪雨による斜面崩壊の発生やその挙動を予測するための数値解析手法を構築し、構築した解析手法を用いて降雨の特徴と災害の発生の関係を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 豪雨による斜面崩壊のシミュレーションをするためには、不飽和地盤を対象として、降雨による過剰間隙水圧の上昇やそれに伴う有効応力の減少、サクションの低下を計算することができる手法が必要である。不飽和地盤を考慮した数理モデルはサクションと有効飽和度の関係式、透水係数と有効飽和度の関係式を考慮する。斜面崩壊のような問題を解く場合、斜面の境界を適切に取り扱う方法が必要となる。初期に斜面を構成していた粒子が、変形後も境界条件を課すべき個所に位置する保証がないため、計算中、逐次どこが斜面を構成する粒子であるかを判定するアルゴリズムが必要である。このアルゴリズムについては、Marrone et al.^②によって提案されている方法を適用した。SPH 法では、強形式で表された支配方程式をメッシュを用いずに解くため、弱形式で表された支配方程式をメッシュを用いて解く方法（例えば有限要素法）のように境界条件を簡単に取り扱うことができない。土/水連成問題では、境界条件として、変位境界および水圧境界のディリクレ境界条件と応力境界および流量境界のノイマン境界条件を設定しなければならない。変位境界の設定についてはすでに様々な方法が提案^③されており、これを用いた。水圧境界、応力境界については、対応する粒子の水圧や応力を直接指定することにより考慮した。流量境界については、これまで図-1に示すように境界外に仮想的な粒子を配置し、その粒子と境界に対して対称な位置にある点の水頭 h^{ref} を SPH 近似によって求め、その水頭値を仮想的に配置した粒子の水頭 h^b とすることによって、境界法線方向の動水勾配がゼロとなるため、流量境界の特別な条件としての非排水境界条件を課することが可能であったが、ある流量を与えるような境界条件の設定はできなかった。しかし、降雨による斜面崩壊をシミュレーションする場合には、斜面表面に流量を与える境界条件を課す必要があり、さらに斜面表面にはその他の固定された境界と異なり、仮想的な粒子を配置することが困難であるため、従来の方法は使えない。本研究では、ラグランジュの未定乗数法を用いて流量境界条件を設定する方法を考え、その妥当性を検討した。その後、構築した不飽和地盤を考慮できる土/水連成 SPH 法を用いて不飽和領域を持つ単純な斜面に降雨を与える解析および地下水位面を徐々に上昇させる解析を行い、崩壊のメカニズムが適切に表現され、崩壊が発生するかを確認した。

(2) 降雨の強さや継続時間は土砂災害の発生を予測する際に重要となる指標である。短時間でも降雨強度が強い場合や降雨強度が比較的弱くても長時間降雨が継続することによって、災害が発生することが考えられる。したがって、数種類の降雨強度、継続時間の組み合わせについて数値計算を実施した。SPH 法によって長時間の降雨を計算するためには、計算時間が膨大となるため、本研究では、降雨による飽和度変化を有限要素法によって計算し、計算された飽和度分布から強度を推定し、SPH 法による計算に引き継ぐ方法を採用した。

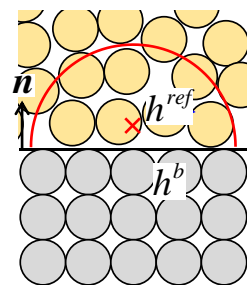


図-1 非排水境界条件

4. 研究成果

(1) 降雨を表現するためにラグランジュの未定乗数法による流量境界条件の設定を SPH 法のプログラムに実装した。まずラグランジュの未定乗数法による流量境界条件の設定方法が適切に機能するかを検証した。検証にあたり、簡単のため対象とする問題は土/水連成問題ではなく、浸透流問題（土骨格の変形を考慮しない問題）とした。検証は定常飽和浸透流問題と不飽和非定常浸透流問題とした。

まず、飽和浸透流問題を対象とした検証では、図-2に示すような境界条件を設定し、非排水境界条件について、従来の方法を適用した場合とラグランジュの未定乗数法を適用した場合の

2通りの計算を行った。図-3 に従来の方法を適用した場合の水頭分布，図-4 にラグランジュの未定乗数法を適用した場合の水頭分布を示す。従来の方法を適用した場合には，ステップを進めると最終的には，理論解と同様の水頭分布が得られるが，対象としているのは定常浸透流問題であるため，本来であれば，時間に依存しない問題であるはずであり，このようにいくつかのステップを経て変化するような分布となる結果は不適切であると言える。一方，ラグランジュの未定乗数法を適用した場合は，1 回目のステップで理論解と同様の水頭分布を得ることができており，適切に境界条件が設定されていることがわかる。

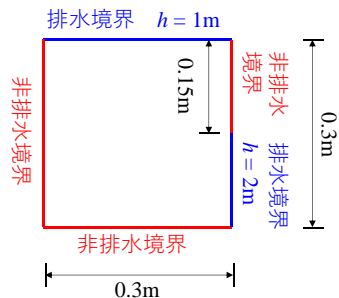


図-2 定常浸透流問題の境界条件

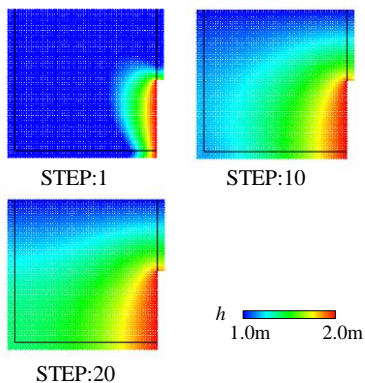


図-3 非排水境界条件に従来の方法を適用した場合の水頭分布

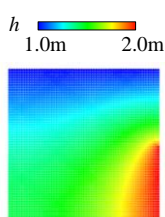


図-4 非排水境界条件にラグランジュの未定乗数法を適用した場合の水頭分布

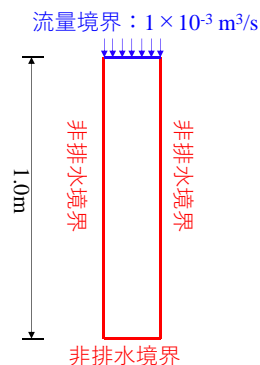


図-5 非定常浸透流問題の境界条件

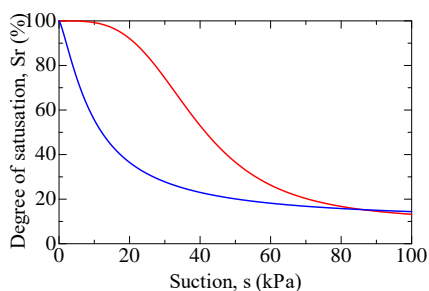


図-6 水分特性曲線

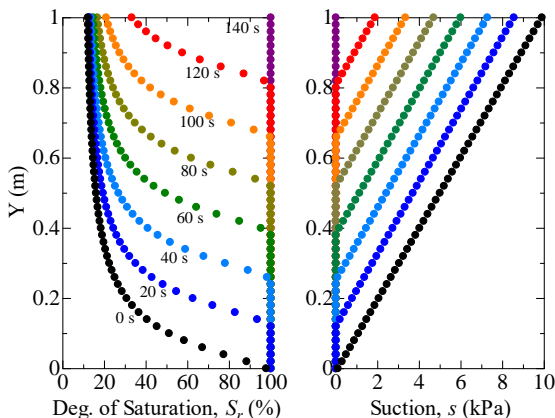


図-7 非定常浸透流問題における飽和度とサクシヨンの高さ方向分布

非排水境界条件だけでなく，流量を与える境界条件の確認を行うため，図-5 に示すような上端以外を非排水とした不飽和状態の土柱に上面から $1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ の流量を与える非排水非定常浸透流問題の計算を行った。解析に使用した水分特性曲線は，図-6 に示すとおりであり，透水係数は， $1 \times 10^{-3} \text{m}/\text{sec}$ とした。図-7 に飽和度とサクシヨンの高さ方向分布を示す。この結果は，有限要素法による同条件の計算結果と一致しており，ラグランジュの未定乗数法による流量境界条件の設定が適切に行えていることが確認できた。

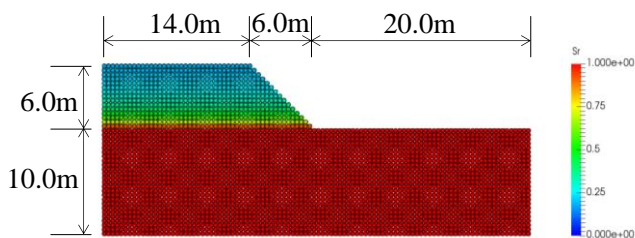


図-8 解析対象とした斜面

構築した不飽和土/水連成 SPH 法を用いて，図-8 に示すような 1:1 の勾配を持つ単純な斜面内の地下水水面を徐々に上昇させる解析および斜面に降雨を与える解析を行った。図-8 には初期の飽和度分布も併せて示してある。解析に用いた構成モデルは，Drucker-Prager モデルであり，

パラメータとして、密度 $\rho=1800\text{kg/m}^3$ 、体積弾性係数 $K=3\text{Mpa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.333$ 、内部摩擦角 $\phi'=40^\circ$ 、粘着力 $c=5\text{kPa}$ 、ダイレタンシー角 $\psi=0^\circ$ を与えた。また、解析に使用した水分特性曲線は図-6 に示したものと同様である。図-9 に斜面内の水位を上昇させた場合の計算結果を示す。また、図-10 に斜面に降雨を与えた場合の計算結果を示す。どちらも計算開始から3秒後の変形の様子と偏差ひずみの分布を示している。斜面内の水位を上昇させた場合、上昇させなかった場合と比べて大きな変形が生じており、すべり面のひずみも大きくなっている。また、斜面に降雨を与えた場合では、流量が大きくなるにしたがって変形量が大きくなっており、サクシオン低下による強度低下によって崩壊が生じていることが確認できた。

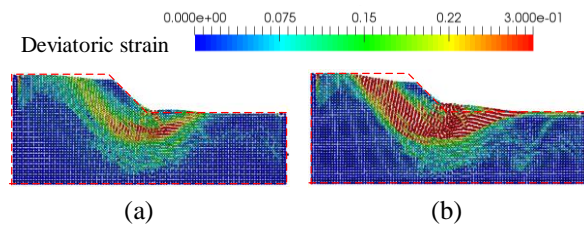


図-9 変形の様子と偏差ひずみ分布 (a)斜面内の水位を上昇させなかった場合、(b)斜面内の水位を上昇 (0.6m/s) させた場合

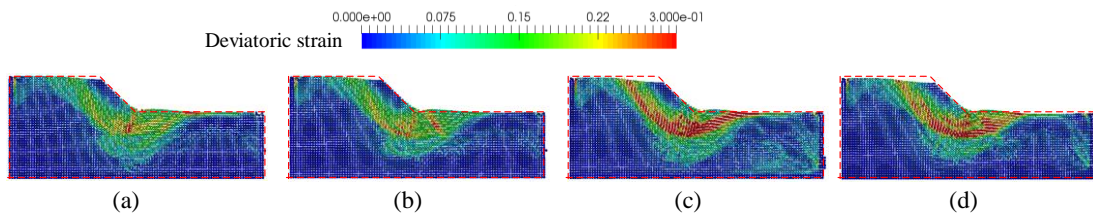


図-10 変形の様子と偏差ひずみ分布 斜面に与えた流量(a) $1.0 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ 、(b) $1.0 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ 、(c) $1.0 \times 10^{-2}\text{m}^3/\text{s}$ 、(d) $1.0 \times 10^{-1}\text{m}^3/\text{s}$

(2) 神奈川県が平成 30 年 1 月 17 日に変更した 60 分間積算雨量と土壌雨量指数の関係におけるクリティカルライン^④ (図-11) を参考に 3 種類の降雨条件を設定した。SPH 法によって長時間の降雨を計算するためには、計算時間が膨大となるため、本研究では、降雨による飽和度変化を有限要素法によって計算し、計算された飽和度

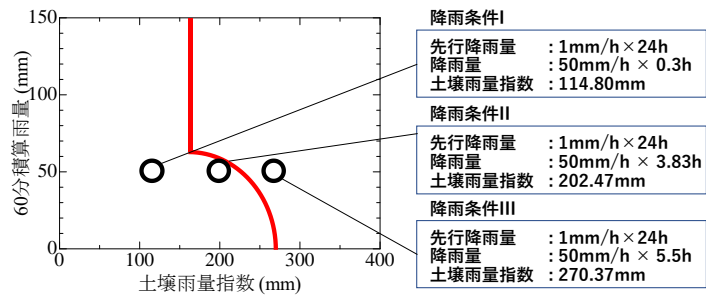


図-11 設定した降雨条件

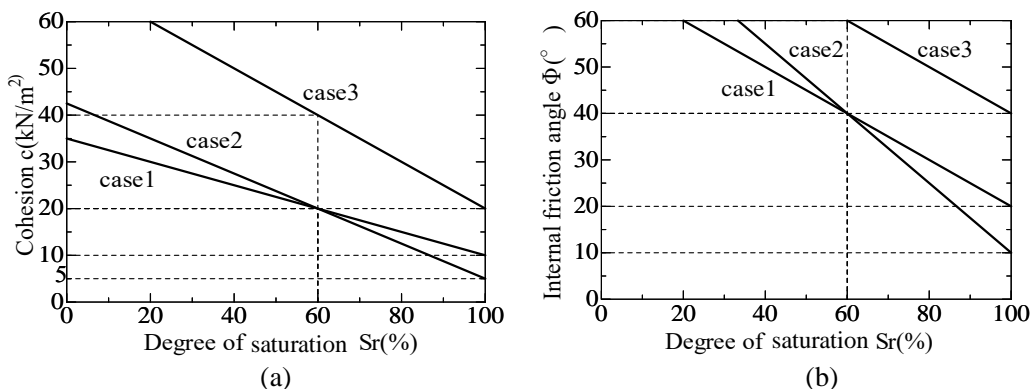


図-12 飽和度と強度の関係 (a)粘着力、(b)内部摩擦角

分布から強度を設定した。図-12 に示すような 3 ケースの強度と飽和度との関係を用いて強度を設定した。計算の対象とした斜面を図-13 に示す。用いた構成モデルは Drucker-Prager モデルである。

図-14 に降雨条件 III、強度ケース 1 における 100 秒後、300 秒後、500 秒後の斜面の変形の様子と偏差ひずみの分布を示す。すべり面が生じ、時間とともに崩壊が進行していることがわか

る。図-15 にすべての降雨条件，すべての強度ケースについて 500 秒後の変形の様子と偏差ひずみ分布を示す。強度が最も大きいケース 3 では，いずれの降雨条件においても崩壊は生じなかった。強度ケース 2 では，降雨条件 II および III において大きな崩壊が生じた。降雨条件 I では，崩壊は生じなかったものの斜面の浅層でひずみの蓄積が見られた。強度ケース 1 では，降雨条件 II および III において斜面に大きな変形が生じ，降雨条件 I においては，崩壊が生じず，強度ケース 2 で見られたひずみの蓄積も生じなかった。

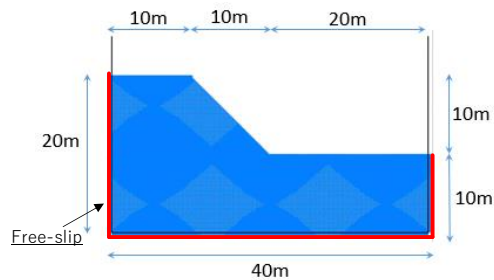


図-13 計算の対象とした斜面形状

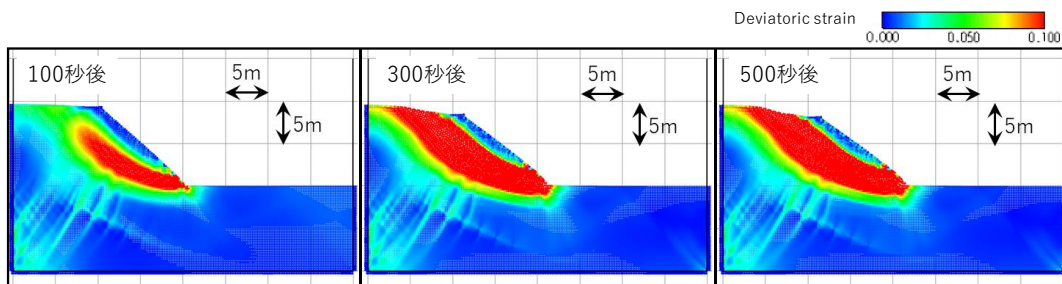


図-14 降雨条件 III，強度ケース 1 における斜面の変形の様子と偏差ひずみ分布

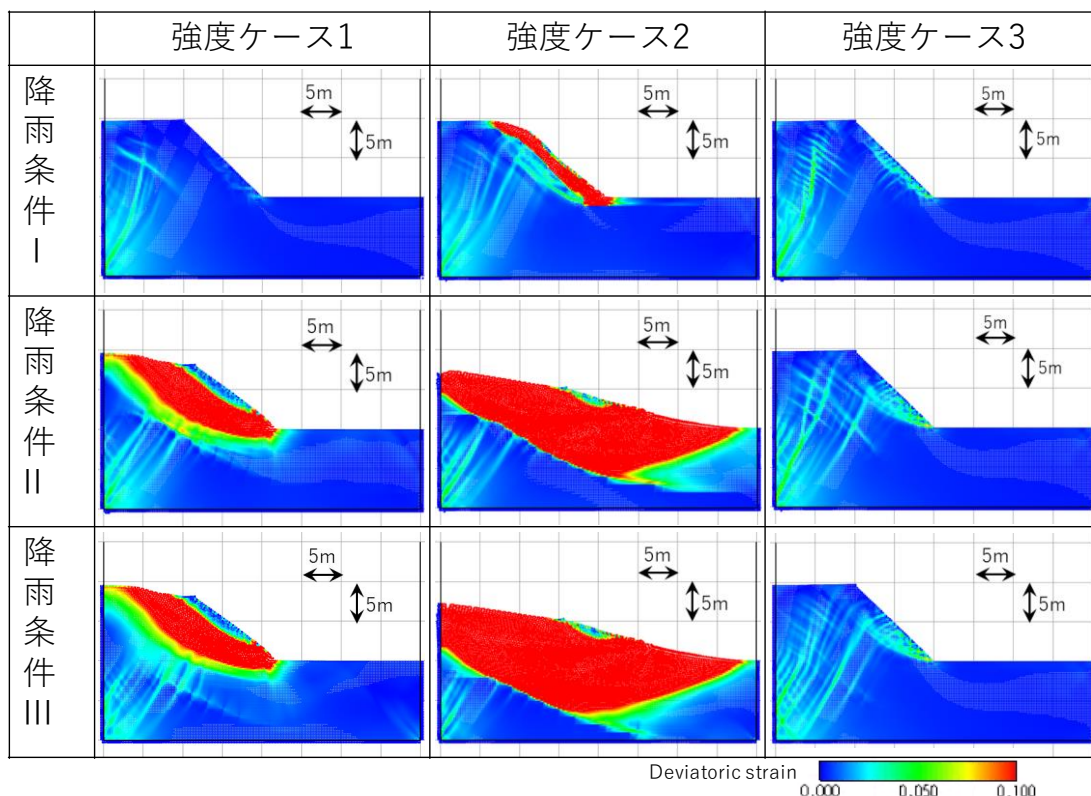


図-15 全ケースにおける 500 秒後の斜面の変形の様子と偏差ひずみ分布

降雨の特徴によって崩壊の発生や挙動に違いがみられ，降雨の情報をもとに斜面崩壊発生の有無を予測できる可能性が高いことが分かった。また土の強度によっても崩壊の発生や挙動に違いがみられた。

<引用文献>

- ① L. Lucy : A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, Astronomical Journal, Vol.82, pp.1013-1024, 1977
- ② S. Marrone, A. Colagrossi, D. Le Touze, G. Graziani: Fast free-surface detection and level-set function definition in SPH solvers, Journal of Computational Physics 229,

3652-3663, 2010

- ③ Ha H. Bui, Ryoichi Fukagawa, Kazunari Sako, Ahintaro Ohno: Lagrangian meshfree particle method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 32, 1537-1570, 2008
- ④ 国土交通省：神奈川県による土砂災害警戒情報発表基準の見直し事例（平成30年1月17日）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① B.Charatpangoon, A.Furukawa, J.Kiyono, S.Tachibana, T.Takeyama, A.Iizuka, Finite strain finite element formulation of coupled solid-fluid mixture for dynamic problem, International Journal of GEOMATE, 査読有, Vol.15, No.51, 2018
DOI: 10.21660/2018.51.86896

〔学会発表〕（計5件）

- ① 野中沙樹, 大石哲, 竹山智英, 陳健, FDPSを用いたSPH法による斜面崩壊シミュレーションに関する研究, 土木学会応用力学委員会, 2018
- ② 中道洋平, 杉江茂彦, 竹山智英, 粒子法を用いた浸透破壊解析, 地盤工学会, 2018
- ③ 関一, 竹山智英, 不飽和土/水連成SPH法を用いた斜面崩壊解析, 地盤工学会, 2018
- ④ 中道洋平, 杉江茂彦, 竹山智英, SPH法を用いた浸透破壊解析, 地盤工学会, 2017
- ⑤ 上野山裕己, 竹山智英, 飯塚敦, SPH法を用いた仮置き盛土に対する安全性検討, 地盤工学会, 2017

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等：なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者：なし

(2) 研究協力者：なし