

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01672

研究課題名(和文) 斜面災害シミュレーションの具体的なV&Vの例示

研究課題名(英文) An example of Specific V&V for slope disaster simulations

研究代表者

森口 周二 (Moriguchi, Shuji)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：20447527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：災害シミュレーションでは精度や信頼性の議論が難しいものとなる。一方で近年では数値解析のV&V(Verification & Validation)が重要視されている。本研究では、個別要素法(DEM)を用いた落石解析および土砂流動解析のV&Vに必要な情報を具体的な例を示しながらV&Vの材料となる情報を整備することを目的として実施した。具体的には、ベンチマーク問題の設定、各種不確実性が解に及ぼす影響、計算コストを低減させるための枠組みの3項目について、DEM解析の結果に基づいて情報を整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

DEMは、落石や土砂流動など、数値解析に広く用いられている連続体力学ベースの手法では解きにくい現象の表現を可能とするが、入力パラメータや解析結果の妥当性を根拠を持って示すことが難しい場面が多々ある。本研究で整備した情報は、入力パラメータや計算条件の影響の議論に有効なものであり、工学的な観点も含めて、DEMを落石解析や土砂流動解析に用いる際に重要な知見を提供するものである。今後、斜面災害分野においては災害リスク評価のためにDEMが広く利用されていくと予想されるが、その状況において、本研究で整備した情報が重要なものとなる。

研究成果の概要(英文)：It's generally difficult to discuss the accuracy and reliability in disaster simulations. On the other hand, recently, V&V (Verification & Validation) of numerical simulations has been emphasized and widely discussed. The purpose of this study is to develop the information that are necessary for V&V of rockfall analysis and sediment flow analysis using the discrete element method (DEM). Specifically, information on the following three topics was studied based on the results of DEM analysis: setting up benchmark problems, quantification of the effect of uncertainties in DEM simulations, and frameworks for reducing computational cost.

研究分野：地盤工学 計算工学

キーワード：V&V 落石 土砂流動 個別要素法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

観測技術やシミュレーションの著しい発展により、災害シミュレーションの精度、時空間分解能、そしてその可能性を劇的に変化させた。一方で、自然災害には多くの不確実性が含まれており、1つの災害を対象とした場合でも多くのシナリオが存在する。近年では、高度に発達した計算機能力を活用して、計算コストの高い数値解析手法であっても複数ケースの解析を行うことが可能であり、不確実性の影響を確認することは可能である。また、実際の災害事例を数値解析の対象とすることで、計算精度についても議論することは可能である。しかしながら、実災害を考えた場合、その実災害に対応する計算条件を完全に表現することは一般的には難しく、厳密に再現精度を議論することは難しい。

先述のように、災害シミュレーションでは精度や信頼性の議論が特に難しいものとなる。一方で近年の数値解析では V&V (Verification & Validation) の考え方が重要視されている。これは、数値解析の精度や妥当性を議論するための考え方や評価手法に関するものであり、様々な分野の数値解析に関する V&V の整備が進んでいる。災害シミュレーションに関しても、具体的な V&V の構築が重要な課題である。

2. 研究の目的

災害シミュレーションに関する V&V の構築を目的として、具体的な例を示しながら V&V の材料となる情報を整備する。ただし、必要となる情報は災害種別によって大きく異なるため、全ての災害に対して共通の情報を整備することは難しく、網羅的な研究を実施したとしても、既知の一般的な情報のみが整備される可能性が高い。より効果的な V&V を考えるためには、各災害それぞれに特化した形で情報を整備すべきであり、それらの積み重ねとして災害シミュレーション全体の信頼性を高めていく必要がある。そのため、本研究では、個別要素法 (DEM) を用いた落石・土砂流動シミュレーションに特化して V&V に関する具体的な情報を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

下記の項目について研究を進めた。

(1) ベンチマーク問題

DEM を用いた落石解析と土砂流動解析についてベンチマーク問題を設定し、その問題に対して解析精度を定量的に評価する方法を構築する。

(2) 不確実性の影響度の定量化

落石解析と土砂流動解析に含まれる不確実性について、それらが結果に与える影響を定量化する。また、その結果に基づいて、工学的に必要な計算条件を分析する。

(3) 確率論ベースの評価手法と計算コストを低減する枠組みの構築

落石と土砂流動には多くの不確実性が含まれるため、そのリスクを適切に評価するためにはシミュレーションの中で現象のパラツキを表現し、それをリスク評価に反映させる必要がある。また、確率論的な評価には多数の結果が必要となるが、DEM を用いて直接的に多くの試行回数 of モンテカルロシミュレーションを実施することは計算コストの観点から困難であるため、計算コストを低減させるための枠組みも構築する。

4. 研究成果

(1) ベンチマーク問題

DEM による落石解析と土砂流動解析のそれぞれに対するベンチマーク問題として2つの模型実験を設定した。図1 (落石) と図2 (土砂流動) がそれらの実験のイメージである。

落石解析用のベンチマーク問題として設定した模型実験は、木製の落石モデルを用いた実験であり、実験自体はこの研究の中で実施したものではないが、本研究のためのベンチマーク問題として有益であると考えて採用した。実験は、模擬落石を模型斜面上部に固定し、固定を解除することで模擬落石が斜面上および水平部分を移動して最終的に停止するというものであり、3000回の試行により得られた模擬落石の最終到達位置分布を対象として実験と解析を比較するものとした。この実験の再現解析を実施し、DEM 解析によって実験結果を精度よく再現できることを確認している。また、混合ガウスモデル (Gaussian Mixture Model) ¹⁾ を用いて最終到達位置の分布を定量化する方法を採用しており、これにより実験結果と解析結果の差を定量的に評価することが可能となっている。

土砂流動用のベンチマーク問題については、樹脂製の人工粒子を用いた安息角計測実験を設定した。この実験は、本研究の中で実施したものである。実験は、図2に示すように、アクリル製の直方体の箱の中に人工粒子を配置し、箱の1面を一定速度で引き上げ、内部の人工粒子が流出することで安息角を形成する挙動を観察するものである。また、400回の試行により得られた

安息角の分布を作成した。この安息角の分布を評価対象として実験と解析を比較したところ、DEM 解析によって平均値だけでなく分布の標準偏差もある程度の精度で表現できることを確認した。なお、人口粒子同士や人口粒子とアクリル面の間の反発係数や摩擦係数の計測のために別途実験を実施しており、それらの結果も複数回の試行に基づいて分布データとして整備した。この実験は、地盤工学会の TC105 国内委員会が運営する「Round robin test of angle of repose」の解析対象としても採用され、その特設 Web サイト (<http://geotech.civil.yamaguchi-u.ac.jp/tc105/>) でデータが公開されている。

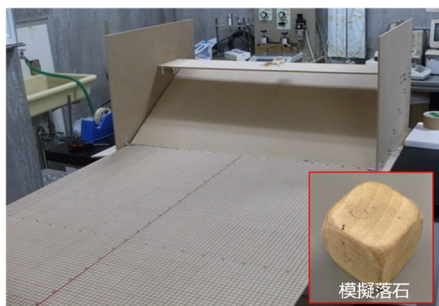


図1 落石解析用ベンチマーク問題

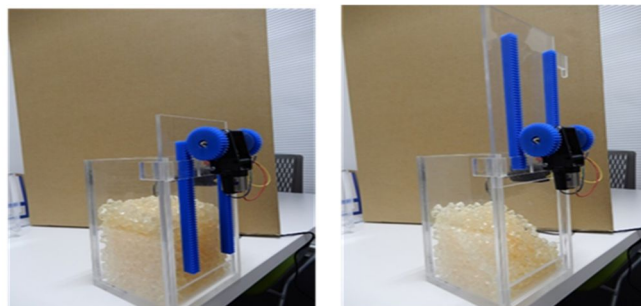


図2 土砂流動用ベンチマーク問題

(2) 不確実性の影響度の定量化

落石と土砂流動について、DEM 解析の中で考慮すべき不確実性をピックアップし、それらが結果に与える影響を解析的に検討した。

落石については、入力パラメータ、斜面物性の空間分布、斜面形状の表現精度、落石形状を対象としてそれらが結果に与える影響を分析した。入力パラメータと斜面物性の空間分布については、反発係数と摩擦角が寄与度の高いパラメータであり、バネ定数はある程度の値(ある程度高い剛性を表現する値)であれば、結果にさほど大きな影響を与えないことが確認された。このバネ定数に関する知見は、実際の材料の物性にあわせた大きな値を必ずしも使う必要がないことを意味しており、DEM の実務利用を考える上で重要なものである。また、物性の空間的なバラツキは、反発係数や摩擦係数などが結果に与える影響に比べればそれほど大きな意味を持たないことが確認された。なお、斜面形状の表現精度についても複数の条件で DEM による落石解析を実施し、その影響を分析したものの、落石形状との関係が複雑となり、十分な知見の蓄積までには至らなかった。落石形状については、図3に示すような様々な形状特性の落石モデルを用いて DEM 解析を実施し、その結果を分析した。アスペクト比、扁平率、カット比の3種類の形状パラメータで形状をコントロールしており、この他に形状をコントロールした結果として得られる球形度についても各落石モデルに対して定量化している。得られた解析結果に基づいて落石の到達特性と形状パラメータの関係を分析したところ、落石の平均的な到達特性は球形度と強い相関を持ち、偶発的に到達距離が長くなる事象に対してはアスペクト比や扁平率の影響が大きいことを確認した。また、カット比については、到達特性に対して非線形な影響を持つことが確認され、最も到達距離が長くなりやすいカット比が存在することが明らかとなった。

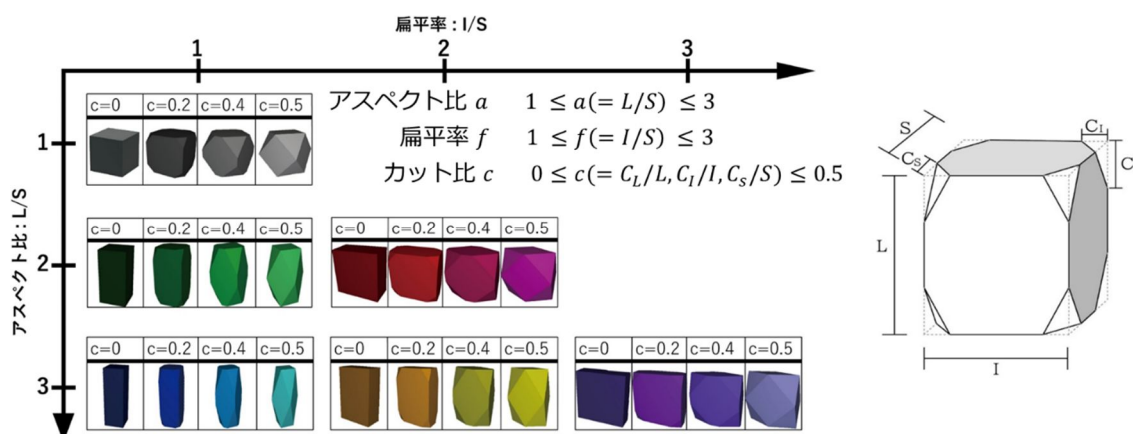


図3 落石形状の影響を調べるための落石モデル

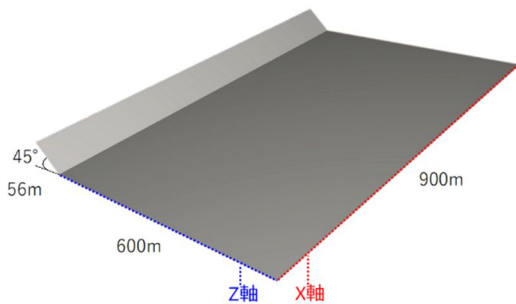


図4 斜面モデル

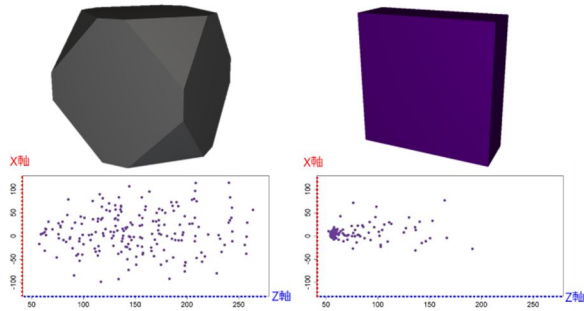


図5 落石形状の違いによる最終到達位置分布の変化

土砂流動については、入力パラメータ、粒子形状、粒度分布を対象として、それらが結果に与える影響を分析した。図6に示すような斜面モデル上で粒子群を流動させ、その結果として得られる粒子群の最終配置を観察することで到達特性を分析している。まず、単一粒径の条件で粒子形状と入力パラメータが異なる複数の条件で流動解析を実施し、粒子群の主要堆積部と先端部の挙動に対する影響を定量化した。図7がその分析結果であり、粒子形状によって入力パラメータの影響度は大きく変化せず、主要堆積部では底面摩擦角が、先端部では反発係数が到達特性に対して支配的なパラメータになることを確認した。また、粒子間摩擦角とバネ定数は粒子群の到達特性に対してさほど大きな影響を与えないことが明らかとなった。続いて、同様の斜面モデルを用いて粒度分布の影響について調べた。総重量は一定の条件で、単一粒径を含む粒度分布の異なる5種類の粒子群モデルを用いて流動挙動を確認した。図8は用いた5種類の粒子群モデルの粒径加積曲線を示している。得られた解析結果に基づいて、図9に示す粒度分布と到達特性の関係を得た。横軸が混合させる粒子の種類の数であり、この値が大きいほど幅広い粒度分布であることを意味する。この結果より、単一粒径の場合は粒度分布を持つ場合よりも到達距離が短くなることが確認された。また、最も到達距離が長くなるのは2種類の粒子を混合させた場合であり、その種類数を増加させていくと一定値に近づいていくことが明らかとなった。この結果は、最小粒径と最大粒径を固定した条件でその間の粒径の種類数を増加させていくというルールの下で確認された傾向であり、自然の土砂の粒度分布には様々なパターンがあるため、土砂流動に対する粒度分布の影響について完全に一般性を持つものではない。しかしながら、少なくとも単一粒径の条件では、土砂流動のリスクを過小評価する可能性があることを示唆しており、DEMを土砂流動解析に適用する際の留意点として、工学的に重要な知見であると考えられる。

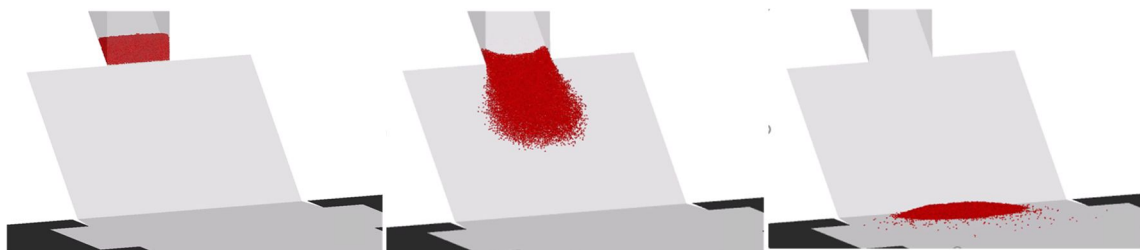


図6 粒子形状と入力パラメータの影響を分析するための土砂流動解析

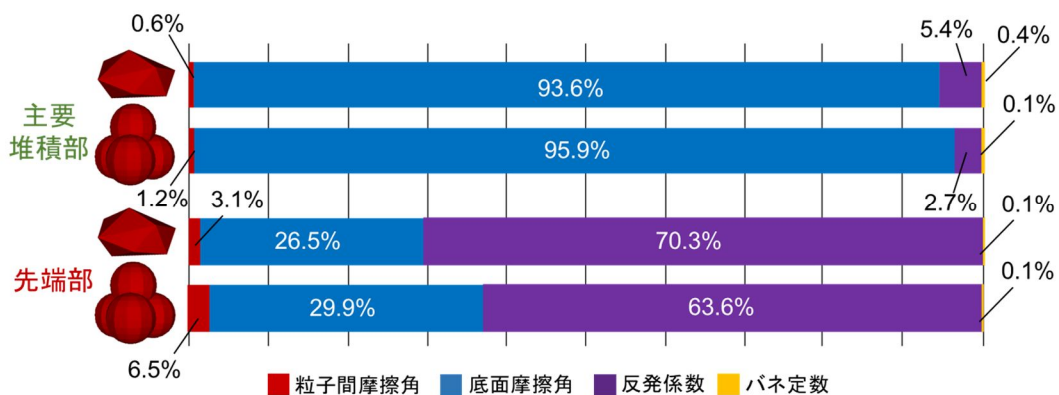


図7 粒子形状と入力パラメータの影響の分析結果

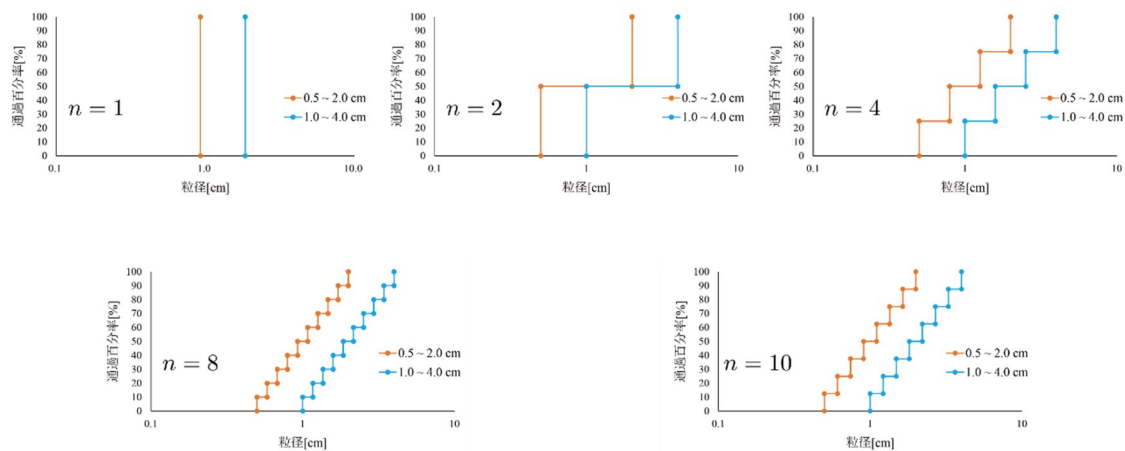


図8 粒度分布の影響を調査するために用いた粒度分布（粒径加積曲線）の例

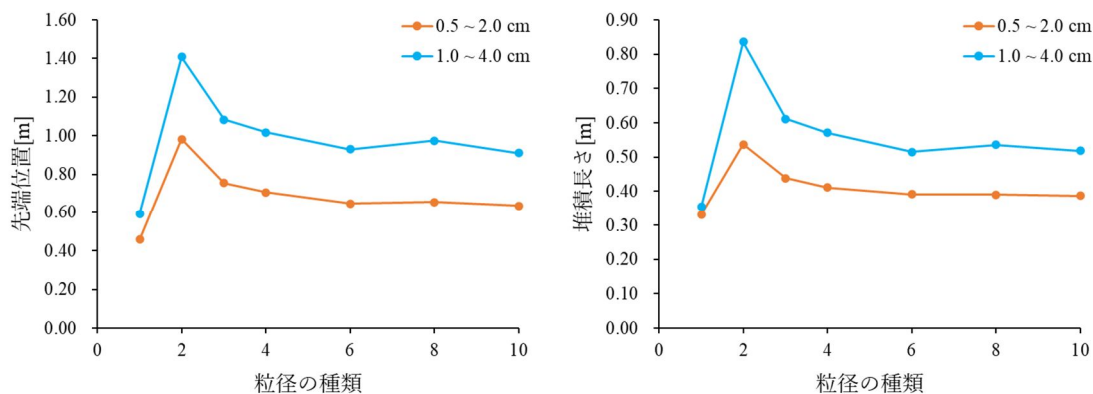


図9 粒度分布が到達特性に与える影響の分析結果

(3) 確率論ベースの評価手法と計算コストを低減する枠組みの構築

本研究の中では、先述のように、落石の最終到達位置の分布を定量的に表現するために混合ガウスモデル (Gaussian Mixture Model)¹⁾を用いており、これにより落石挙動のパラツキを表現するための計算コストを低減している。また、土砂流動については、土砂の到達特性を表現する指標と入力パラメータを関連付ける代理モデルを構築するために、RBF 補間 (Radial Basis Function Interpolation)²⁾の技術を導入し、さらに複数の入力パラメータによる多次元空間の中で効率的に応答曲面を作成するために、ラテン超方格サンプリング (Latin Hypercube Sampling)法³⁾を導入した。これらの具体的な導入方法については、論文として公開している。

参考文献

- 1) McLachlan, G. J. and Basford, K. E. : Mixture Models: Inference and Applications to Clustering, Marcel Dekker , 1988 .
- 2) Buhmann, M.D. : Multivariate cardinal interpolation with radial-basis functions, Constructive Approximation, Vol. 6, No. 3, pp. 225-255, 1990.
- 3) McKay, M. D., Beckman, R. J. and Conover, W. J. : A com-parison of three methods for selecting values of input varia-bles in the analysis of output from a computer code, Tech-nometrics, Vol. 21, No. 2, pp. 239-245, 1979

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 森口周二, 奥山大輝, 寺田賢二郎, 大竹雄, 青木尊之	4. 巻 72
2. 論文標題 離散要素法を用いた粒状体の流動解析に及ぼす解析パラメータの寄与率の定量化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_369-I_377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hasuka Kanno, Shuji Moriguchi, Shunsuke Hayashi, Kenjiro Terada	4. 巻 284
2. 論文標題 A computational design optimization method for rockfall protection embankments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 105920
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enggeo.2020.105920	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 森口周二, 菅野蓮華, 寺田賢二郎,	4. 巻 69
2. 論文標題 落石挙動の数値モデリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 4-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Shuji Moriguchi, Hasuka Kanno, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya
2. 発表標題 Simulation-based optimal design approach for rockfall protection walls
3. 学会等名 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuji. Moriguchi
2. 発表標題 A simulation of Hulu Langat landslide for disaster education
3. 学会等名 Handover Ceremony to Selangor State Government and Knowledge Sharing Seminar by Flood and Landslide Experts (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Moriguchi, Hasuka Kanno, Kenjiro Terada
2. 発表標題 Simulation-aided optimal design approach for rockfall protection walls
3. 学会等名 2nd International Symposium on Seismic Performance and Design of Slopes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森口周二, 菅野蓮華, 上原直秀, 寺田賢二郎
2. 発表標題 落石解析における斜面の表面形状と物性値の空間的不確実性に関する解析的検討
3. 学会等名 第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森口周二, 上原直秀, 寺田賢二郎
2. 発表標題 落石解析における斜面の表面形状と物性値の空間分布の影響
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森口周二, 奥山大輝, 寺田賢二郎
2. 発表標題 DEM土砂流動解析におけるパラメータの感度分析
3. 学会等名 第26回信頼性設計技術WS & 第39回最適設計研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Okuyama, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, Takashi Kawai
2. 発表標題 Numerical investigation of contribution of DEM parameters on granular flows and their correlations
3. 学会等名 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥山大輝, 森口周二, 寺田賢二郎, 河井正
2. 発表標題 DEMを用いた土砂流動解析における解析パラメータの相関分析
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊大規, 奥山大輝, 鬼頭昂平, 森口周二, 寺田賢二郎
2. 発表標題 個別要素法による土砂流動シミュレーションのV&Vに関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森口周二, 奥山大輝, 寺田賢二郎, 青木尊之
2. 発表標題 安息角に対する個別要素法のパラメータの感度分析
3. 学会等名 第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuji Moriguchi, Hiroki Okuyama, Kenjiro Terada, Tadashi Kawai, Takayuki Aoki
2. 発表標題 Effects of repose angle and basal friction angle in granular flow simulations
3. 学会等名 IS Atlanta 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuji Moriguchi ¹ , Naohide Uehara, Kenjiro Terada
2. 発表標題 Effect of Spatial Distribution of Slope Material in Rockfall Simulations
3. 学会等名 International Symposium on Seismic Performance and Design of Slopes 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥山大輝, 橘一光, 寺田賢二郎, 森口周二, 青木尊之
2. 発表標題 安息角に対する物性や粒子形状の影響
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuji Moriguchi, Naohide Uehara, Kenjiro Terada
2. 発表標題 Effect of Spatial Distribution of Slope Material in Rockfall Simulations
3. 学会等名 The 8th Japan-Korea Workshop on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥山大輝, 橘一光, 森口周二, 寺田賢二郎, 青木尊之
2. 発表標題 安息角をベースとした土砂流動解析のための個別要素法の解析パラメータ選定
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 森口周二 他35名	4. 発行年 2018年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 338
3. 書名 地盤・土構造物のリスクマネジメント 地盤崩壊・液状化のメカニズムとその解析、監視、防災対策	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	高瀬 慎介 (Takase Shinsuke) (00748808)	八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授 (31103)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	橋 一光 (Tachibana Ikkoh) (20839295)	福島工業高等専門学校・都市システム工学科・助教 (51601)	
研究分担者	寺田 賢二郎 (Terada Kenjiro) (40282678)	東北大学・災害科学国際研究所・教授 (11301)	
研究分担者	大竹 雄 (Otake Yu) (90598822)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	渦岡 良介 (Uzuoka Ryosuke) (40333306)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関