

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14827

研究課題名（和文）地震・降雨のマルチハザードに対する石積壁の安定性評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of stability evaluation method for masonry retaining walls against multi-hazards of earthquake and rainfall

研究代表者

橋本 涼太（Hashimoto, Ryota）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：60805349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、地震を経験し変形を生じた後に強い雨によって崩壊に至る石積壁・石垣が多数見られる。本研究では、地震による擁壁の変形から再度の地震または降雨といった次の外力による崩壊に至るまでの挙動を一連の流れで解析する技術を開発した。まず裏込め土の崩落を含む石積壁の動的解析手法として連続体の大変形解析手法であるMPMと不連続変形法（DDA）の連成手法を開発した。その上で、地盤内部への水の浸透を考慮するため、Darcy-Brinkman式に基づく有限差分解析とMPMを連成することで土・水連成現象も考慮可能にし、石積壁の振動台実験や典型的な浸透破壊現象の計算例を通じて妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究以前に実施された石積壁の数値解析には個別要素法（DEM）や有限要素法（FEM）が用いられている。しかし、前者は地盤の構成関係や間隙圧挙動を反映できず、後者は地盤の構成則を利用できるが、不連続な壁面部材の大変形の表現は難しく、別個に検討されており、また、土中への浸透現象は考慮されてこなかった。本研究では研究代表者がこれまで整備してきた陰解法に基づく地盤・石積構造物間の相互作用解析コードを地盤の大変形と水の浸透現象へと拡張させた。これにより、従来手法では困難だった石積壁を含む柔構造擁壁の地震・降雨のマルチハザードに対する応答のシームレスな予測・評価が可能となる。

研究成果の概要（英文）：In recent years, many masonry walls have experienced earthquakes, resulting in deformation and then collapse due to strong rainfall. In this study, we developed a technique to analyze the behavior of masonry retaining walls from deformation caused by an earthquake to collapse caused by the next external force, such as another earthquake or rainfall, in a series of events. First, a coupled method of MPM and discontinuous deformation analysis (DDA) was developed to analyze the dynamic behavior of masonry walls, including the collapse of backfill soil. Then, in order to take into account water infiltration into the ground, MPM is coupled with finite difference analysis based on the Darcy-Brinkman equation to take into account soil-water coupling phenomena.

研究分野：地盤工学

キーワード：石積壁 石垣 数値解析 MPM-DDA 浸透 - 変形連成解析 FDM

1. 研究開始当初の背景

石積・ブロック積擁壁やふとんかご工、補強土壁など分割型の壁面を使用した柔な構造の抗土圧構造物(以下、柔構造擁壁)が施工性、経済性の観点から広く利用されている。これらは地盤の変形に追従しやすい構造だが、変形を許容する分、性能照査型の設計や変形後の安定性の評価が重要となる。一方で個々の部材が独立して変位可能なため破壊機構が複雑で、現状安定性評価は経験則によっている。その最たる例が石積壁である。

文化財である城郭石垣や石橋、昭和初期の鉄道沿線などの石積壁の多くは、目地材を用いない空積みで施工されている。石材の自重や石材どうしの摩擦で背面土圧に抵抗するため、一度変形が生じて石材の配置が変わると石材間の荷重伝達状況も変化し、構造物全体の安定性に大きく影響する。例えば、2016年熊本地震で多くの石垣が崩落した熊本城では前震を経験した後、本震によって崩落範囲が格段に広がった。また、重要文化財である石橋・通潤橋(熊本県)では、同地震による石積壁面の変状箇所が補修を待つ間に発生した大雨で崩落した。

このように、柔構造擁壁は複数回の地震や地震と降雨の組み合わせといったマルチハザードによって不安定化する恐れがある。2度目の被災による崩壊を防ぐには、変状後、力学的な裏付けがある合理的な指標で優先順位を付け迅速に補修することが重要である。

一方、研究代表者は石積構造物を対象とした変形解析技術の開発を進めてきた。地盤-石積構造系の安定問題を連続体的変形を示す基礎地盤と離散体である石材の間の力学的相互作用問題と考え、離散体の解析法であるマニフォールド法(Numerical Manifold Method: NMM)と不連続変形法(Discontinuous Deformation Analysis: DDA)の連成手法(NMM-DDA; Miki *et al.*, 2010)を増分形の構成則と陰的応力積分を搭載した弾塑性解析に拡張し、土の材料非線形性と石材間の不連続性を精緻に考慮した解析コードを開発・適用してきた。ただし、従来法は地震に対する応答のみを対象とし、その前後の降雨の影響は考慮できなかった。また、地盤をモデル化するNMMは格子ベースの数値解析手法であり、裏込め盛土の完全な崩落を伴う挙動評価は難しい。すなわち、地震と降雨のマルチハザードに対する石積壁の安定性評価手法は存在しない状況であった。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、申請者が過去の研究課題で開発してきた離散体-連続体連成系の動的変形解析手法を、地盤の大変形挙動と浸透-変形連成現象へと発展させ、石積壁の地震による変形からその後の地震・降雨までのマルチハザードによる挙動をシームレスに評価可能な数値解析コードを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

研究目的に沿って、(1)地盤の大変形を考慮した地盤-石積構造物連成系の地震応答解析手法を定式化および開発し、つづいて(2)土中への水の浸透とそれによる地盤の破壊現象への拡張を進め、複数の計算例を通じて開発手法の妥当性を検証した。

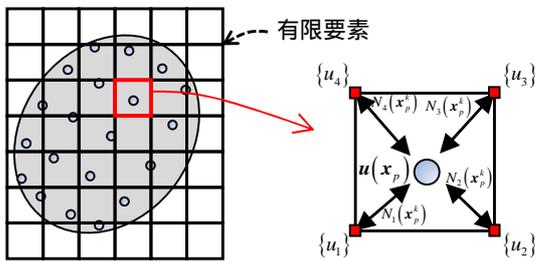
4. 研究成果

(1) 地盤の大変形を考慮した地盤-石積構造物連成系の地震応答解析手法の開発

既開発の石積壁の地震応答解析手法(NMM-DDA)をベースにして、地盤の大変形領域まで破綻することなく解析可能な技術として、Material Point Method(MPM)とDDAの連成解析手法を開発した。先にも触れたが、従来のNMM-DDAで地盤のモデル化するために使用してきた連続体ベースの解析手法であるNMMは、有限要素法(Finite Element Method:FEM)と同様に格子ベースの手法であるため、地盤の破壊などに伴う大変形が生じると要素の歪みに起因して計算が破綻する。一方、MPMは粒子と格子を併用した連続体解析技術(図1)であり、解析対象の連続体を体積と質量を持つ粒子に分割し、背後に設けた有限要素メッシュに質量や運動量などの物理量をマッピングし、メッシュ上で運動方程式を解いて、得られた変位場を粒子に再度補間し、粒子を移動させることで物体の変形を表現する。このとき、メッシュについては時間ステップごとにリセットすることでメッシュのつぶれを防ぎ、大変形問題の解析を可能にする。このMPMをNMMの代わりに裏込め地盤に取り入れ、石材をモデル化するDDAとの接触を考慮し、連成した石積壁の変形・破壊解析手法(図2)を定式化・実装することとした。

MPMとDDAの連成に当たっては、DDAが陰解法に基づく不連続体解析であることから、両手法の親和性を考慮し、MPMについてもNewmarkの β 法を用いた陰解法による定式化を採用することとした。そして、MPMの連続体粒子とDDAの間の接触をペナルティ法によって処理し、両者の運動方程式を連立して解く一体型解法を定式化し、プログラム実装した。

開発手法の妥当性はまず、Bui *et al.* (2014)が行ったブロック積擁壁モデルの自重崩壊実験の再現解析に適用し、検討した。アルミ棒積層体で摩擦性の裏込め土を模擬し、アルミブロックを壁面部材としたブロック積擁壁モデルを自重で崩壊させるもので、各材料の物性値およびブロックとアルミ棒の間の摩擦係数を入力し、解析を実行した。その結果、地盤および壁面部材の大変形挙動を再現することができた(図3)。



$$\mathbf{u}(\mathbf{x}_p) = [\mathbf{N}(\mathbf{x}_p)]\{\mathbf{u}\}$$

図1 MPMの概要図

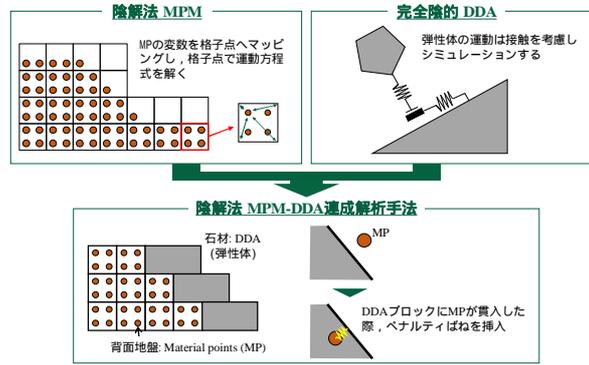


図2 MPM-DDAの概要図

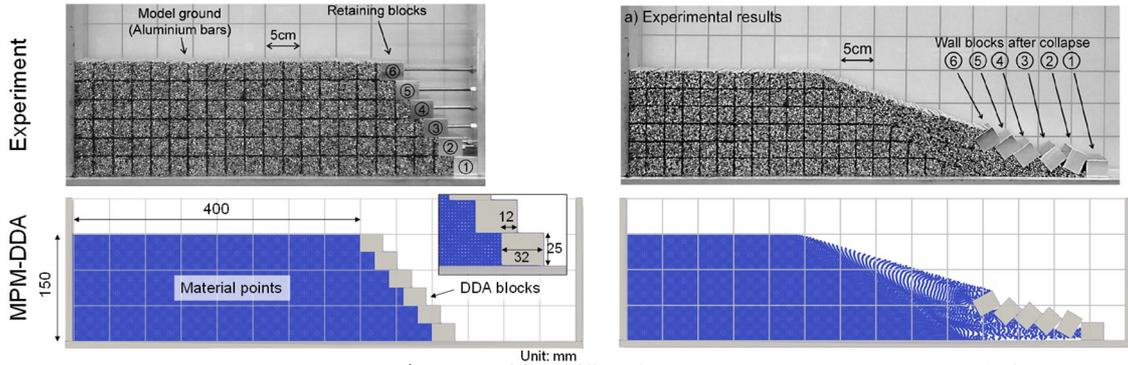
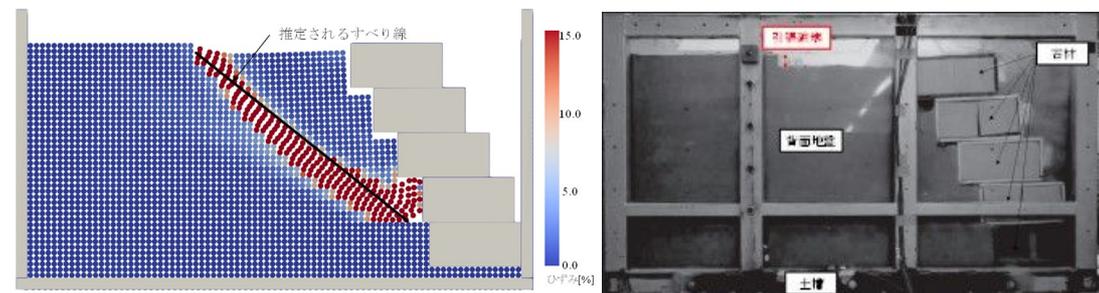
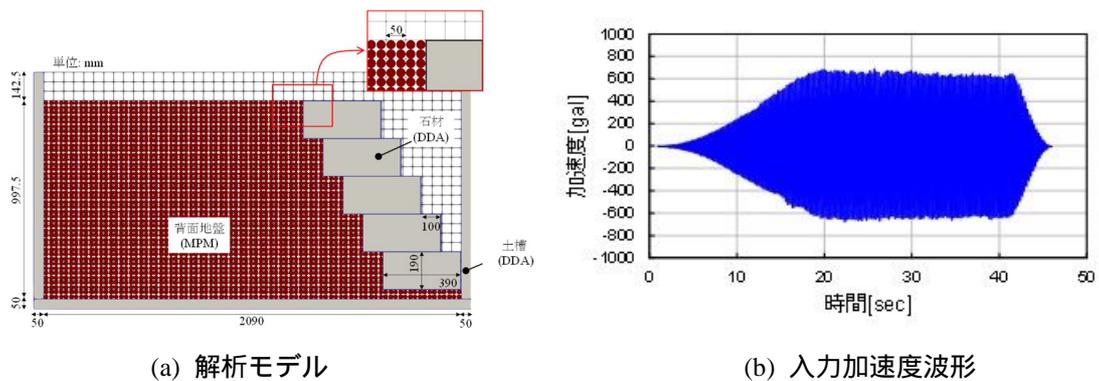


図3 MPM-DDAによるブロック積擁壁模型実験 (Bui et al., 2014) の再現解析

つづいて、MPM-DDAの石積壁の地震応答解析への適用性を検討するため、研究代表者が既往研究で実施した石垣模型振動台実験の再現解析を行った。先の計算例と同様に、裏込め土をMPM、石材と土槽をDDAでモデル化し(図4(a))、実験で計測された図4(b)の入力加速度を土槽に与えた。地盤にはひずみ軟化を考慮可能なDrucker-Pragerの弾塑性モデルを用いた。加振により裏込め土の明瞭なすべり面を伴って石垣が破壊する(図4(c))という結果が得られ、模型実験(図4(d))と合致した。主に滑动した下から二番目の石材の変位量も定量的に一致し、開発手法の妥当性が確認された。



(c) 加振開始 17.0 s 時点の偏差ひずみ分布図 (d) 加振開始 17.0 s 時点の模型の状態
 図4 MPM-DDAによる石垣模型振動台実験 (末岡ら, 2020) の再現解析

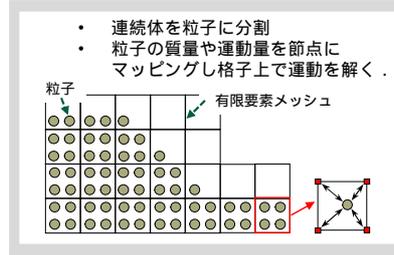
(2)水の浸透による地盤の破壊現象への拡張

(1)で開発した MPM-DDA では、土中への水の浸透現象は考慮されていない。そこで、地震と降雨のマルチハザード下での石積壁の挙動評価を可能にするため、土 - 水連成解析への拡張を行った。

浸透流を考慮した土 - 水連成 MPM としては、土骨格の変形を MPM で、飽和 - 不飽和浸透流を有限差分法 (Finite Difference Method: FDM) で定式化し、同じ位置に配置した計算メッシュを介して両者の相互作用を考慮した Higo et al. (2010) の研究が先駆的である。本研究では浸透流だけでなく土の外部の非圧縮性流体 (水) の流れを含め FDM で扱い、MPM の粒子が存在する要素でのみ土と水の間の相互作用を考慮することで両者を連成することとした。

開発手法の概要図を図 5 に示す。MPM には先ほどの MPM-DDA と同じく Newmark の β 法を用いた陰的 MPM を用いた。一方、非圧縮性流体挙動を解析するにあたっては、支配方程式として、Navier-Stokes 方程式に Darcy 則に基づく土中での抵抗力項を加えることで土の内外の挙動を統一的に表すことができる Darcy-Brinkman 式を採用し、FDM で離散化した。FDM による空間離散化については、スタッガード格子を用いて、粘性項には二次精度中心差分、移流項には土の内外の境界での急な流速変化を表現しやすくするため、有理関数 CIP (Constrained Interpolation Profile) 法を使用した。前進差分で時間離散化し、連続式を考慮した圧力計算はフラクショナル・ステップ法で行うこととした。

MPM (Material Point Method)



FDM (Finite Difference method)

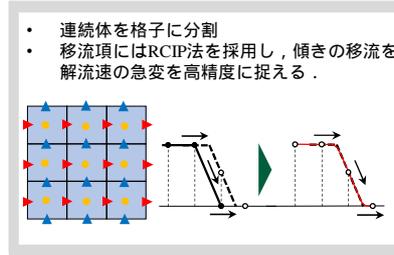


図 5 MPM と FDM による土 - 水連成解析

飽和地盤を対象として水の浸透およびそれに起因した地盤の破壊現象を再現できることを確認するため、二次元のボイリング解析を行った。図 6 に示すように矢板が鉛直に挿入された飽和地盤を想定した。5.0 x 5.0 m の範囲に MPM と FDM の計算メッシュを用意し、解析領域底部から 2.4 m の範囲に土 (MPM の粒子) を配置した。なお、矢板は DDA のブロックでモデル化し、MPM の粒子と矢板の間の接触を考慮した。解析領域全体に水が満たされている飽和条件である。

矢板の右側上面の圧力を一定にしたまま、左側上面の圧力を上昇させて水頭差を与え、矢板の下を回り込むような浸透流を発生させた。図 7 は左右の圧力差が 10 kPa のときの流速ベクトル図であるが、土の内外で連続した流れ場が見られ、また、矢板周辺で流速が大きくなる様子が表現されている。

さらに圧力差を大きくすると、矢板周辺の土の変形が生じはじめ、圧力差を 21 kPa としたとき、矢板まわりの土が浸透力によって完全に押し流され、破壊する典型的なボイリング現象が起こった (図 8)。以上のように、MPM で土の大変形を扱い、かつ土の内外での水の流れを同時に考慮した開発手法を用いることで浸透破壊現象を表現できることが確認された。

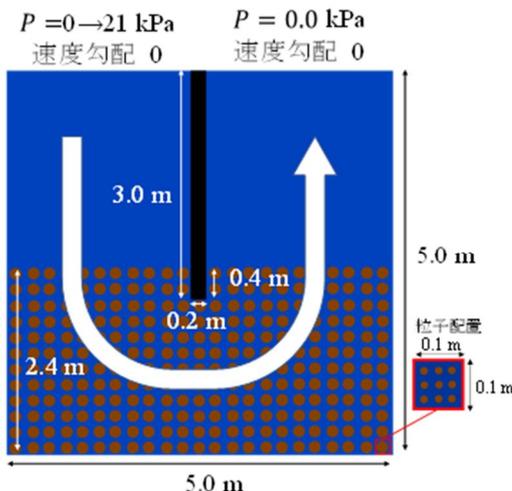


図 6 ボイリング解析の計算領域

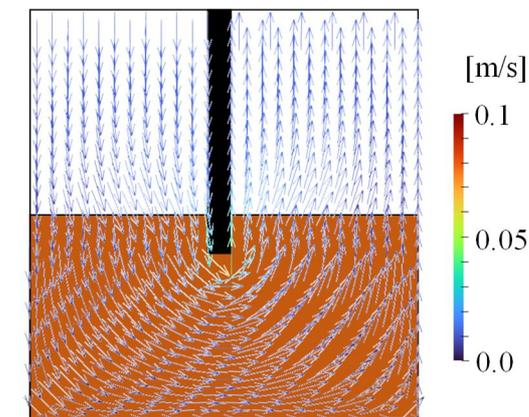


図 7 圧力差 10 kPa での流速ベクトル分布

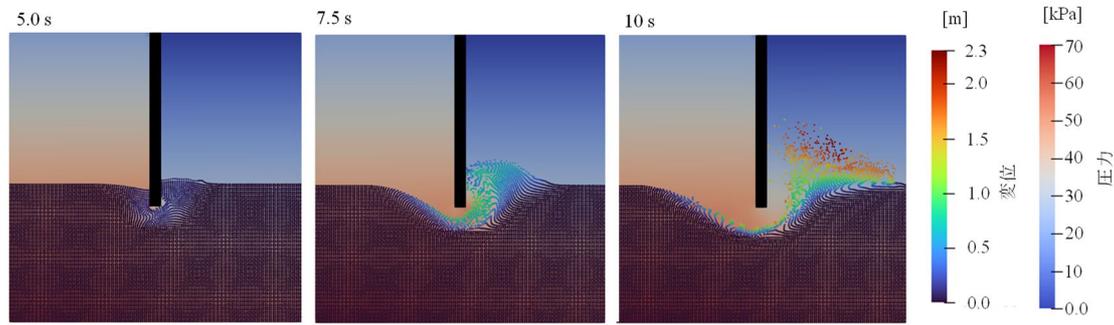


図8 MPM-DDA-FDMによる二次元ボイリング解析

ここまでの検討では飽和地盤のみを対象としていたが、実際に石積壁への浸透時挙動を解析するためには不飽和土中への浸潤を扱う必要がある。そこで最後に、非圧縮性流れを扱うFDMを自由表面流れへと拡張した。自由表面の表現にあたっては、界面捕捉法の一つとして実績のあるVolume Of Fluid (VOF) 法(図9) 自由表面の再構成にはWLIC (Weighted Line Interface Calculation) 法を採用した。計算格子ごとの水の体積分率であるVOF関数は土中においては飽和度と見なせることから、土と水の間の相互作用力項においてその影響を考慮した。

VOF法 (Hirt & Nichols, 1981)

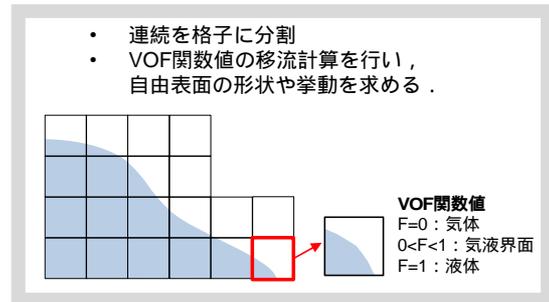


図9 VOF法

以上のフレームワークで開発した土 - 水連成解析手法を用いて一次元の浸透流解析を行った。図10に示すような0.2×0.6mの領域の中心の0.2mの区間に土(飽和度ゼロ)を設け、その上から水を自重で浸透させる。図11のように浸潤過程を解析でき、不飽和浸透への拡張の可能性を確認できた。

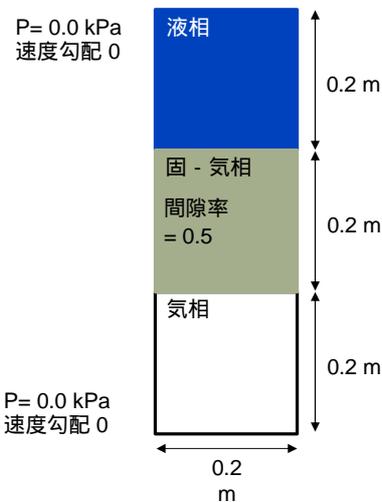


図10 浸透流解析モデル

<引用文献>

- Miki, S., Sasaki, T., Koyama, T., Nishiyama, S. and Ohnishi, Y.: Development of coupled discontinuous deformation analysis and numerical manifold method (NMM-DDA), Int. J. Comput. Meth., Vol. 7, pp. 1-20, 2010.
- 末岡知紘 橋本良太 菊本 統 神谷圭介, Adrian, R.: NMM-DDAを用いた石垣模型振動台実験の再現解析, 第47回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.167-172, 2020.
- Bui, H. H., Kodikara, J. K., Bouazza, A., Haque, A. and Ranjith, P. G.: A novel computational approach for large deformation and post-failure analyses of segmental retaining wall systems, Int. J. Numer. Anal. Geomech., Vol. 38, No. 13, pp. 1321-1340, 2014.
- Hirt, C. W. and Nicholas, B. D.: Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, J. Comput. Phys., Vol. 39, No. 3, pp. 201-225, 1981.

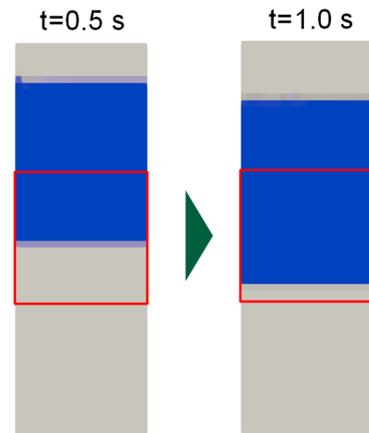


図11 浸潤過程

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ryota Hashimoto, Tomohiro Sueoka, Tomofumi Koyama, Mamoru Kikumoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Improvement of discontinuous deformation analysis incorporating implicit updating scheme of friction and joint strength degradation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 4239-4263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-021-02459-2	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 上園浩志, 橋本涼太	4. 巻 39
2. 論文標題 2次元DDA-VOF法連成解析による土石流中の巨礫の衝撃力に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地盤と建設	6. 最初と最後の頁 29-38
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tomohiro Sueoka, Ryota Hashimoto, Mamoru Kikumoto, Keisuke Kamiya
2. 発表標題 Numerical Analysis on Stacking Conditions of Stones Influencing the Seismic Stability of Castle Masonry Wall
3. 学会等名 The 15th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗原歩, 橋本涼太, 菊本統
2. 発表標題 NMM-DDAによる基壇模型支持力実験の再現解析
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hashimoto, R., Bodhinanda, C. and Soga, K.
2. 発表標題 A coupled implicit MPM-DDA for soil-structure interaction problems
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上園浩志, 橋本涼太, 畠俊郎
2. 発表標題 MPM-FDMによる土の変形と非圧縮性流れの相互作用解析に関する基礎的研究
3. 学会等名 第63回地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川野慎之介, 橋本涼太
2. 発表標題 MPM-DDA による石垣振動台実験の再現解析における背面地盤のひずみ軟化の影響
3. 学会等名 第49回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上園浩志, 橋本涼太
2. 発表標題 DDA と VOF 法を用いた固体 流体連成解析手法の開発
3. 学会等名 第73回令和3年度土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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		
米国	カリフォルニア大学バークレー校		