

令和 2 年 5 月 12 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13829

研究課題名（和文）離散体連続体連成解析で紐解く柔構造擁壁の耐震性能：石積擁壁を中心に

研究課題名（英文）Study on seismic performance of flexible retaining walls using discontinuum-continuum coupled analysis: Focusing on masonry walls

研究代表者

橋本 涼太 (Hashimoto, Ryota)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：60805349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：城郭石垣や鉄道沿線に見られる石積み擁壁など、壁面が変形可能な柔構造を持つ擁壁が現在も多数存在している。一方で、各石材が独立して動くことができるためその力学挙動は複雑で、その力学特性、例えば石材の積み方が安定性に及ぼす影響についても明らかでない。本研究では、石積擁壁の地震時の挙動を解明することを目的として、地盤-石積構造物間の相互作用を考慮した地震応答解析手法の開発を行い、妥当性を石積壁の模型振動台実験の再現解析により検証した。さらに、開発手法を用いて石材の積み方による地震時挙動の違いを様々な条件でシミュレートし、崩壊に至る加速度や壁面の変形形状の変化との関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、研究代表者が従来地盤-石積構造物間の準静的な相互作用問題の解析手法として開発してきたマニフォールド法-不連続変形法連成解析に、石材どうしあるいは石材と地盤の間に生じる摩擦力や、地盤の変形を精度良く取り扱うための技術を導入・発展させることで、石積擁壁の動的挙動を精緻に表現可能なシミュレーション技術を実現しており、今後の安定性評価への活用が期待される。また、それを用いて得られた石積壁の地震時力学特性は脆弱な石垣等を抽出するための基礎資料として有用である。

研究成果の概要（英文）：There are many retaining walls with flexible structures, such as castle stone walls and masonry retaining walls along railroad lines in Japan. On the other hand, since each stone can move independently, its mechanical behavior is complex, and its mechanical properties, e.g., the effect of the stacking conditions of the stones on stability, are not clear. In this study, a seismic response analysis method considering the interaction between the ground and the masonry structure was developed to clarify the seismic behavior of a masonry retaining wall, and its validity was verified by reproducing a model shaking table experiment of a masonry wall. In addition, the developed method was used to investigate the differences in seismic behaviors due to the way stone is stacked under various conditions, and the relationship between the acceleration leading to the collapse and the changes in the deformation shape of the wall was clarified.

研究分野：地盤工学

キーワード：石積擁壁 地震時挙動 数値解析

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

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柔軟に追従する特性も有するが, 変形を許容する分, 性能照査型の耐震性評価が重要となる。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擁壁である。

石積擁壁は特に文化財である城郭石垣を中心に, 現在も目地材を用いない空積みで職人の経験に基づき施工されている。石材の噛み合わせや摩擦のみで背面土圧に抵抗するため, 壁面部材の独立性が他の構造物と比べても極めて高く非線形性の強い挙動を示す。よって, 石積擁壁の挙動を精緻に再現する動的応答シミュレータを開発できれば, 他の柔構造擁壁一般の耐震性能評価を促進することができる。

また, 石積擁壁や城郭石垣は近年地震による崩落が相次ぐ中で補強技術の開発が進められているが, 一方で要補強箇所の効率的な選定が必要となる。シミュレーションにより経験的な建設技術の意味合いを地盤工学の立場から検討し, 築造条件による耐震性能の違いを体系的に整理すれば, 補強を要する既設構造物の合理的診断が可能になると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では柔構造擁壁の力学挙動の理解, 性能評価手法の構築を最終的な目標に据え, 石積擁壁を対象とした離散体連続体連成動的解析技術を開発・検証する。そして, 開発手法により従来経験的に知られている安定性に寄与する築造条件, 特に石材の積み方に着目し, 力学的にいかなる影響を及ぼすのかを解き明かすことを目的とする。

3. 研究の方法

上記の研究目的に沿い, (1)石積擁壁の動的解析技術の構築, (2)手法の妥当性検証, (3)経験的築造技術の評価について次の手順で遂行した。

- (1)研究代表者が開発してきた地盤と石積構造物の準静的相互作用解析手法である弾塑性 NMM-DDA を改良し, 地盤-石積構造物連成系の地震応答解析技術を実現した。
- (2)模型振動台実験とその再現解析を通じ, (1)で開発した解析手法の妥当性を検証。
- (3)(2)を基準に異なる築造条件下での石積擁壁の地震応答解析を行い, 壁面の条件が構造物全体としての耐震性に与える影響を検討する。

4. 研究成果

(1) 地盤-石積構造物連成系の地震応答解析手法の開発

石垣・石積壁の地震応答解析を確立するため, 離散体と連続体の相互作用解析手法であるマニフォールド法-不連続変形法連成解析(NMM-DDA)の改良・拡張を行った。NMM-DDA とともに離散体の接触解析手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)を組み合わせた数値解析手法であり, 有限要素法(Finite Element Method: FEM)と同様に連続体の変形を表現できる NMM と落石等回転を伴う大変形を扱える DDA の間の接触を定義することで両者の同時解析が可能であり, 過去には研究代表者が石積構造物の準静的な安定解析へと適用してきた。一方で, 動的問題への適用性は検証されておらず, かついくつかの課題があった。

一つは, 地盤をモデル化する NMM 要素として 4 節点四角形アイソパラメトリック要素を使用するが, この際, 地盤の弾塑性構成則の使用による体積ロッキングを引き起こし, 過度に剛な応答を示すことである。これに対し本研究では, 有限要素法で用いられている拡張ひずみ仮定法に基づく要素を導入し, 改善した。

もう一つは, 石材間あるいは石材と地盤の間の接触処理方法の課題である。従来の NMM-DDA では物体間の接触条件を満足させるため接触面の法線・接線各方向に剛なばねを挿入するペナルティ法を用いているが, 物体間に生じる摩擦力を更新する際に陽解法を用いることで物性値として与えた摩擦強度を大きく超える過大な摩擦力が生じることがあった。これに対し本研究では摩擦構成則のリターン・マッピング法と滑動開始時の静止摩擦係数から動摩擦係数への移行アルゴリズムを導入し, 再定式化することで材料間の摩擦力を精緻に反映できるようになった。なお, 非線形方程式の反復解法として Newton-Raphson 法も合わせて実装した。

(2)-1 石積壁の模型振動台実験

開発手法の石積壁の地震応答解析への適用性検証のため, 石積壁模型の 1g 場の模型振動台実験を行った。本実験で用いた模型の概要図を図 4 に示す。模型は均一な幅だけずらして積まれた五段の石材と背面地盤で構成される。最下段の石材は土槽壁面に接し固定されている。背面地盤

には含水比 $w_c = 4.31\%$ ，比重 $G_s = 2.65$ ，50%粒径 $D_{50} = 0.31\text{ mm}$ のシドニー砂を用い，石材は一つあたり 12.33 kg ，平均密度が 0.876 g/cm^3 の中空のコンクリートブロックで代用した．一面せん断試験から求めたシドニー砂の粘着力は $c = 4.09\text{ kPa}$ ，内部摩擦角は $\phi = 33.7^\circ$ であった．石材間および石材と地盤間の静止摩擦角 ϕ_s と動摩擦角 ϕ_d は，石材間は上段と振動台に固定された下段の二つの石材で構成された単一石材振動台実験とその再現解析を別途実施し， ϕ_s と ϕ_d をパラメトリックに設定して再現性が高かった $\phi_s = 37.0^\circ$ ， $\phi_d = 27.5^\circ$ を採用し，石材と地盤間はばね計りを用いた予備実験で $\phi_s = 31.0^\circ$ ， $\phi_d = 31.0^\circ$ を得た．石材と背面地盤の挙動を観察するため背面地盤に計5個の水平方向加速度計と滑動が想定される石材2から石材5と振動台にそれぞれ水平・鉛直方向の加速度計を取り付け，石材の変位は実験時に撮影した動画を解析することにより算出した．

振動台にはニューサウスウェールズ大学(オーストラリア)で開発された水平鉛直2軸振動台(最大水平加速度 0.83 G ，最大鉛直加速度 0.58 G)を用いた．図5に本実験で用いた入力加速度(振動台に設置した加速度計の計測波形)を示す．周波数は 4 Hz で，水平成分，鉛直成分の最大加速度はそれぞれ 706.3 gal ， 470.9 gal とした．

図6の水平動のみのケースの加振後のStone 2が停止した時刻での模型の様子を見ると，背面地盤が主働破壊し，Stone 2が前面(紙面右)に滑動していることがわかる．また，他の2ケースでも同様の挙動が見られ，背面地盤に発生したすべり線を直線と仮定すると図7のように推定でき，各ケースですべり線角度に違いが見られた．また，図8の各ケースのStone 2の土槽に対する相対水平変位量から石材の滑動タイミングは鉛直同位相のケースが最も早く，水平動のみのケースが最も遅かった．以上の結果を踏まえ，土層内のすべり線的位置やStone 2の滑動開始時刻に着目しNMM-DDAの妥当性を検討した．

(2)-2 模型振動台実験の再現解析

NMM-DDAの石積壁の地震応答解析への適用性の検証を目的として，模型振動台実験の再現解析を行った．本解析では図9に示す石垣モデルを対象として，振動台に加速度を与え加振する．モデルは実験模型と同寸法で，地盤をNMM，石材をDDAでモデル化して地盤と石積構造を同時に解析する．石材および背面地盤の解析用物性値は表1に示す．石材は弾性体，背面地盤はDrucker-Pragerの破壊規準を用いた弾完全塑性体とした．地盤の強度定数は先述の通り一面せん断試験で決定した．また，表2に不連続面の解析用物性値を示す．

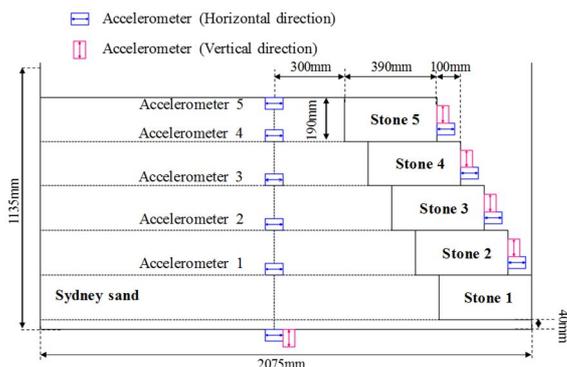


図4 石積壁の模型寸法

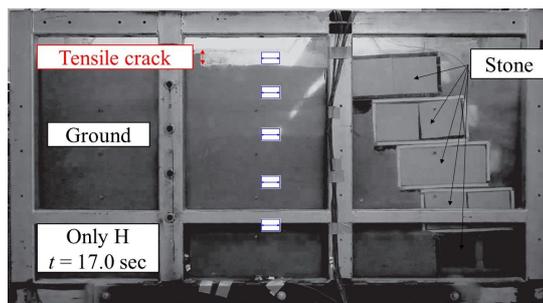


図6 実験結果(水平加振, $t = 17.0\text{ sec}$)

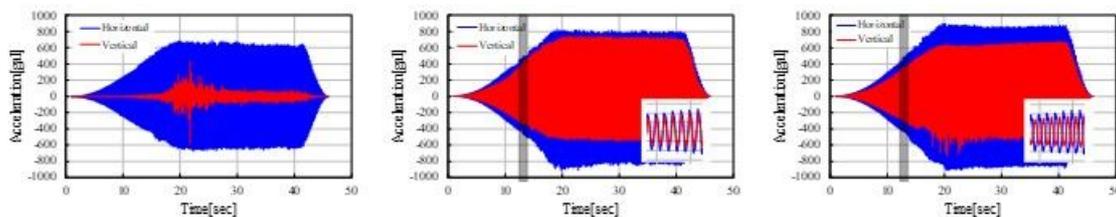


図5 入力加速度

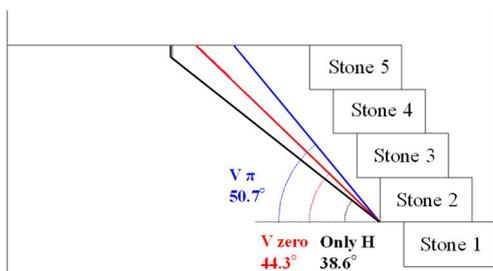


図7 滑り線的位置

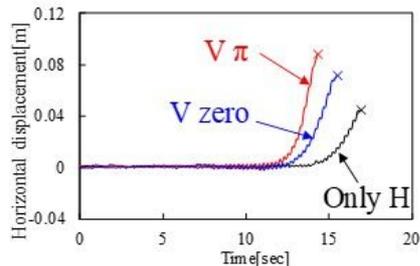


図8 Stone 2の水平変位の時刻歴

振動解析の前に自重解析で初期応力を決定した。自重解析は模型作成過程を考慮し一段ごとに石材と地盤に自重を漸増载荷し、応力分布が収束したときの応力を引き継ぎ次の段の自重を载荷するという手順を繰り返した。

水平方向に加振したケースの最終状態の偏差ひずみ分布を図 10 に示す。Stone 2 周辺に変形が集中し、背面地盤は主働破壊に至らず、Stone 2 もほぼ滑動しなかった。これは模型地盤の拘束圧 (15 kPa) に対し一面せん断試験の拘束圧 (20~90 kPa) が大きく強度が過大評価され背面地盤が自立したと考えられる。そこで、影響が大きいと考えられる粘着力をパラメトリックに変化させて再現解析を実施した。

その結果、 $c = 1.9 \text{ kPa}$ と設定し得られた偏差ひずみ分布図を図 11 に示す。 $c = 4.09 \text{ kPa}$ の場合と比較すると、Stone 2 から背面地盤上部まで破壊が見られ、実験で見られたすべり線と照らし合わせると、破壊形態が概ね一致していることが確認できる。また、図 12 に示す Stone 2 の相対水平変位量の時刻歴から、石材の滑動開始のタイミングもほぼ一致していることがわかる。以上より、適切な強度定数を用いて解析を行うことで、NMM-DDA は実験での石材と地盤両者の挙動を定性・定量的に再現できた。

鉛直同位相 ($V \text{ zero}$)、鉛直逆位相 ($V \pi$) のケースの解析結果より得られた偏差ひずみ分布図を図 13、図 14 にそれぞれ示す。両ケースで Stone 2 が滑動し背面地盤が主働破壊する破壊形態が見られた。実験時に生じたすべり線と比較しても地盤部の破壊形態が概ね一致した。また、紙面の都合上図は割愛するが、各ケースでの Stone 2 の相対水平変位量を比較すると、実験で見られた鉛直同位相のケースが最も早い時刻で滑動し水平動のみのケースが最も遅い時刻に滑り出す傾向と一致し、地震時挙動の定性的な傾向は捉えていると判断した。

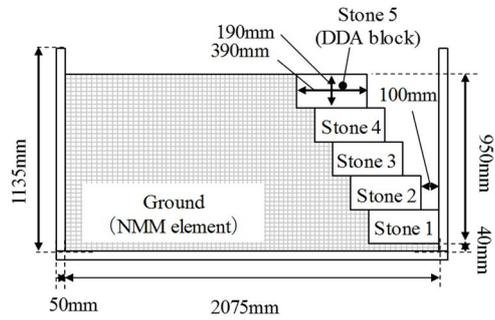


図 9 NMM-DDA における石積壁のモデル

表 1 材料物性値

		Stones	Ground
Unit weight γ	[kN/m ³]	8.6	14.8
Young's modulus E	[GPa]	10.0	0.1
Poisson's ratio ν		0.2	0.3
Friction angle ϕ	[°]	N/A	33.7
Dilatancy angle ψ	[°]	N/A	33.7
Cohesion c	[kPa]	N/A	4.09

表 2 不連続面の物性値

		Stones	Stones-Ground
Static friction angle ϕ_s	[°]	37.0	31.0
Dynamic friction angle ϕ_d	[°]	27.5	31.0
Normal penalty coefficient	[GN/m]	1.0	1.0
Tngential penalty coefficient	[MN/m]	100.0	100.0

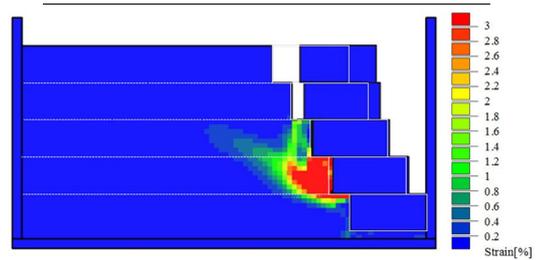


図 10 最終状態の偏差ひずみ分布 (水平方向に加振)

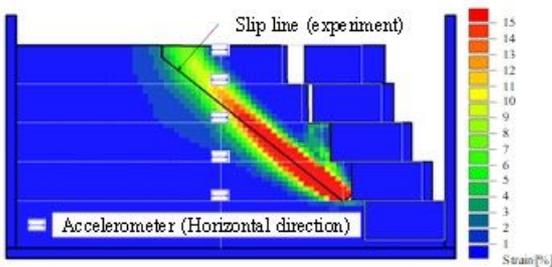


図 11 偏差ひずみ分布 ($c = 1.9 \text{ kPa}$, $t = 17.0 \text{ sec}$)

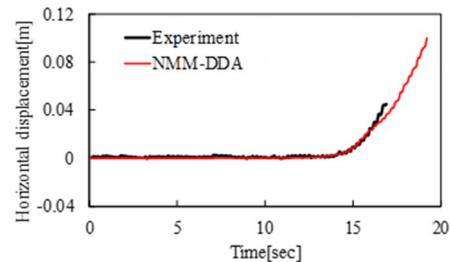


図 12 Stone 2 の水平変位の時刻歴 ($c = 1.9 \text{ kPa}$)

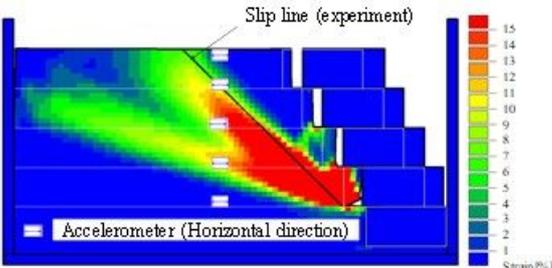


図 13 偏差ひずみ分布 ($V \text{ zero}$, $t = 15.1 \text{ sec}$)

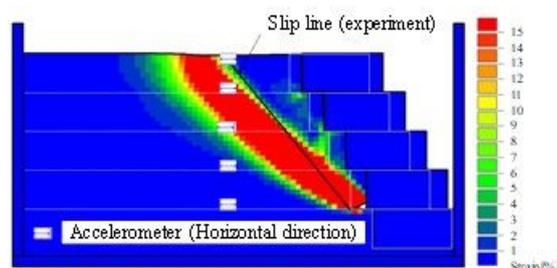


図 14 偏差ひずみ分布 ($V \pi$, $t = 18.1 \text{ sec}$)

(3) 石積壁の石材組積条件に関するパラメトリック・スタディ

石材の積み方が地震時挙動に及ぼす影響の検討を目的として、勾配と石積高さに関するパラメトリック・スタディを実施した。解析モデルを図 15 に、実施した解析ケースを表 3 に示す。 $\theta=60^\circ$ 、 $n=4$ の Case 1 を基準として Case 2 と 3 で勾配の影響を、Case 4 と 5 で段数 n の影響を検討した。なお、石材は再現解析で使用した石材モデルと高さと同重量が一致するようにモデル化した。入力加速度は実験時に観測された加速度を、解析用物性値は再現解析と同じ設定値とした。

まず、Case 1, 2, 3 のモデルに水平加速度のみ入力した解析結果の比較により勾配に関して考察する。図 16 の Stone 1 の相対水平変位量の時刻歴から勾配が急なほど石材の変形量大きいことが確認された。これは勾配が緩いほど加振される際に石材に働く慣性力が上段と下段の石材に顕著に伝わることで t_n が増加し、石材が滑らなかったと考えられる。一方、Case 3 では加振方向と不連続面の向きが Case 2 より近いため t_s が増加し、石材が滑動したと推察される。このように石材の勾配と加振条件が石材間の接触力に顕著に影響するとわかった。

Case 1, 4, 5 のモデルに(2)で最も顕著な変形を生じた鉛直同位相の加速度を与えた解析結果を比較すると Stone 1 の相対水平変位量から、段数が多いほど石材の変位量大きいとわかった。また、最も変形が大きい Case 5 の水平変位分布(図 17)ではモデル中腹の変位が大きくはらみ出している。図 18 に示した Case 5 の石積上部の変形図(変形量 8 倍)から、石積壁が左方向に加振されたとき石材が地盤から剥離している。この時剥離によって生じた隙間に背面地盤が隙間を埋めるように沈む。その後、再度右向きに加振された際に石材が背面地盤に向かって倒れ込み、石材間のずれが進展している。したがって、この回転・剥離・倒れ込みの過程によってはらみ出しが進展するものと考えられる。きっかけとなる石材の転倒は石材の段数が増えて高くなるに従い土圧による石積下端周りのモーメントが大きくなることによって生じるため、これが石材の段数すなわち高さによる変形形態の変化を引き起こしたと結論付けられる。以上のように、連続体と離散体の挙動を同時に考慮可能な数値解析手法を用いることで石材と地盤の接触・剥離を伴う石積壁の変形メカニズムが明らかとなった。

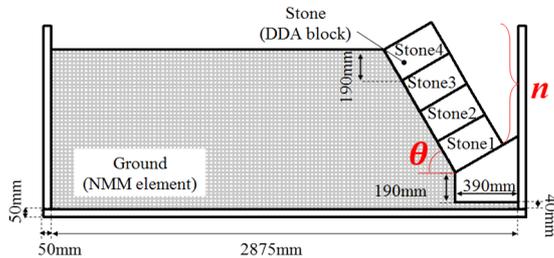


図 15 パラメトリック・スタディに用いた石積壁の解析モデルと構造パラメータ

表 3 壁面傾斜角と段数に関するパラメトリック・スタディの実施ケース

Case No.	θ	Number of stones n
1	60°	4
2	50°	4
3	70°	4
4	60°	6
5	60°	8

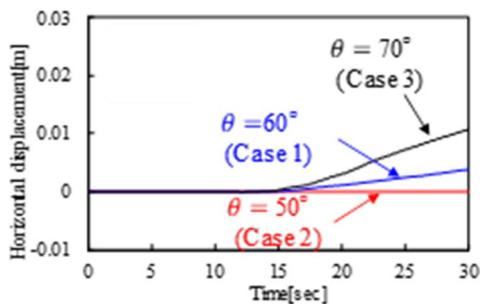


図 16 Stone 1 の水平変位の時刻歴 (水平方向に加振)

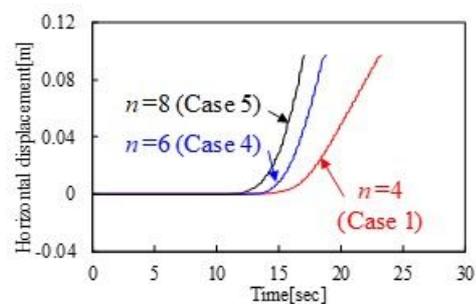


図 17 Stone 1 の水平変位の時刻歴 (V zero)

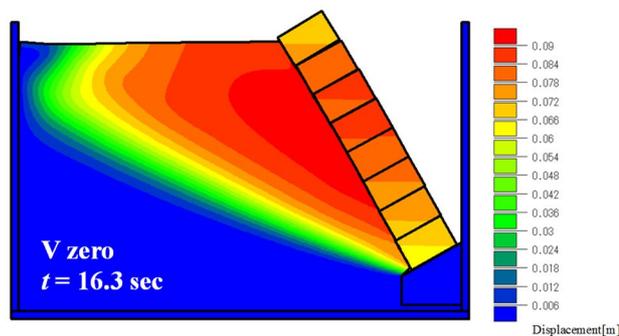


図 18 水平変位分布 (Case 5, $t = 16.3$ sec)

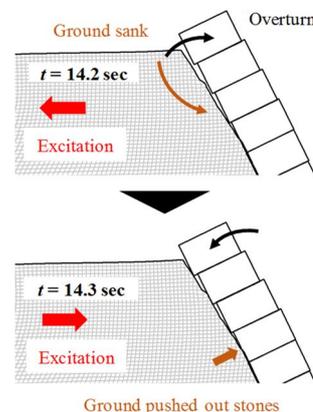


図 19 孕み出しの進展メカニズム

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 1件）

1. 著者名 神谷 圭祐, 菊本 統, 橋本 涼太, 桑島 流音, 小山 倫史	4. 巻 37
2. 論文標題 2016年熊本地震による熊本城石垣の変状の分析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 自然災害科学	6. 最初と最後の頁 1-16
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 -

1. 著者名 橋本涼太, 菊本統, 小山倫史	4. 巻 75
2. 論文標題 摩擦構成則の陰的積分アルゴリズムを導入した不連続変形法 (DDA) の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集C (地圏工学)	6. 最初と最後の頁 336 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejge.75.336	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 Hashimoto Ryota, Ohnishi Yuzo, Sasaki Takeshi, Miki Sigeru	4. 巻 92
2. 論文標題 Stability analysis of underground space with discontinuous planes using a four-node iso-parametric element numerical manifold method with rigid body rotation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tunnelling and Underground Space Technology	6. 最初と最後の頁 103047 ~ 103047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103047	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 末岡 知紘, 橋本 涼太, 菊本 統, 小山 倫史
2. 発表標題 石垣の地震時安定性に対する鉛直動の影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Hashimoto, Tomofumi Koyama, Mamoru Kikumoto
2. 発表標題 Introduction of implicit integration of friction law into numerical manifold method
3. 学会等名 The 10th Asian Rock Mechanics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Sueoka, Ryota Hashimoto, Mamoru Kikumoto, Tomofumi Koyama
2. 発表標題 Fundamental study on the dynamic behavior of Japanese castle masonry wall using NMM-DDA
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 神谷圭祐, 菊本統, 橋本涼太
2. 発表標題 NMM-DDAを用いた城郭石垣の構造条件に関するパラメータスタディ
3. 学会等名 第74回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rie Tanaka, Tomofumi Koyama, Ryuto Kuwajima, Ryota Hashimoto, Mamoru Kikumoto
2. 発表標題 Deformation analysis of stone walls in Kumamoto Castle after the Kumamoto Earthquake -An example of Uto- and Hira-yagura turrets
3. 学会等名 The 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Mechanics for Innovative Future (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末岡知紘, 橋本涼太, 菊本統, 神谷圭祐, Adrian Russell
2. 発表標題 NMM-DDAを用いた石垣模型振動台実験の再現解析
3. 学会等名 第47回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2020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