

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：17301
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2023
課題番号：20K05030
研究課題名（和文）城郭築石構造物の災害レジリエンス向上のための力学的安定性の定量的評価手法の提案

研究課題名（英文）Quantitative Evaluation of Mechanical Stability for Improving Disaster Resilience of Castle-Built Stone Structures

研究代表者
杉本 知史（Sugimoto, Satoshi）
長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60404240
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多点変状モニタリングシステム設置・運用、変状石垣の表面形状ならびに不安定石垣の振動特性の評価、中型遠心力載荷試験装置を用いた築石構造物の動的模型実験の実施、個別要素法解析による城郭石垣の力学的安定性評価をそれぞれ行った。の成果に基づき、の評価手法の妥当性を明らかにするとともに、の成果を踏まえた現況の熊本城の変状石垣の力学的安定性の評価と、の結果に基づいた、石垣を構成する石材表面の粗度と栗石層幅との関係から、崩壊パターンの分類を行った。これにより、基本的な石垣構造別の地震動による崩壊リスクの度合いを定量的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来の経験則による文化財保護的観点ではなく、地盤工学的手法を用いた工学的観点より、城郭石垣の崩壊予測や崩壊に対する安全性評価を定量化することで、より安全な工事の遂行や、観光客等の安全確保のために必要な判断基準を、城郭を管理する行政や管理者が設定する上で、工学的根拠に基づく情報を提供することが可能となる。これにより、城郭石垣の維持管理や被災対象の復旧の要否といった実務的課題を解決する一助となることに意義を有する。

研究成果の概要（英文）：Following four points were addressed. (1) Installation and operation of a multi-point deformation monitoring system, (2) evaluation of the surface shape of deformed stonewalls and vibration characteristics of unstable stonewalls, (3) implementation of dynamic model experiments of built stone structures using a medium-sized centrifuge, and (4) evaluation of the mechanical stability of castle stonewalls using individual element method analysis. Based on the results of (3), we clarified the validity of the evaluation method in (4), and evaluated the mechanical stability of the current altered stone wall of Kumamoto Castle based on the results of (1), (2), and (4), and classified the collapse patterns based on the relationship between the roughness of the stone surface and the chestnut stone layer width that constitutes the stone wall, which was based on the results of (4). This quantitatively showed the degree of risk of collapse due to seismic motion for each basic stone wall structure.

研究分野：地盤工学

キーワード：築石構造物 変状 力学的安定性 個別要素法 遠心力載荷模型実験

1. 研究開始当初の背景

2016年熊本地震では熊本城が甚大な被害を受け、国重要文化財13棟が損壊し、沈下やはらみを含め被災した石垣は52箇所にとんでいる。被災した多くの石垣の背面盛土には無数のクラックが生じており、崩壊の危険性が高く非常に不安定な状態にある。地震時に崩壊を免れた石垣であっても、今後の豪雨などにより雨水が背面盛土に浸透し水圧が上がることで崩壊に至ることが容易に予想される。また、地震により割れや孕み出し等の変状を受けた石垣は、石垣石同士の接触力が低下しているとみられることから、今後、段階的かつ急激に変形が進むことが予想される。被災した熊本城石垣の修復には20年以上かかるとされており、その間の復旧工事作業においては、安全確保の観点から石垣変形監視システムの設置と崩壊危険度評価の確立が必要とされる。

地震により被災した石垣や、経年劣化により変形が進行する石垣において、今後の崩壊を予測し工事時の安全性を確保するためには、石垣変形のモニタリングが必要である。また、城郭石垣の崩壊挙動については、これまで観測された事例はなく、崩壊後の状況から崩壊に至る過程を推定しているに過ぎない。現場条件を反映させた異なる条件での石垣の崩壊プロセスを解明するためには、数値解析による力学的な観点からの検証が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、従来の経験則による文化財保護的観点ではなく、地盤工学的手法を用いた工学的観点より、城郭石垣の崩壊予測や崩壊に対する安全性評価を定量化することで、より安全な工事の遂行や、観光客等の安全確保のために必要な判断基準を、城郭を管理する行政や管理者に高精度かつ高頻度で提供し得る手法を構築することを目標としている。本研究で対象とする熊本城と丸亀城のみならず、日本全国に分布する城郭石垣の崩壊危険度を評価する方法として一般化を図ることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 熊本城石垣における多点変状モニタリングシステム設置・運用

降雨による石垣ならびに裏込地盤の安定性の低下は、徐々に進行することが考えられ、変状が著しい箇所の定常的な監視が望まれる。一方、地震動により被災した未崩壊石垣は、被災前と比べ安全率が大きく低下していることが伺え、工事時の安全確保のための常時監視が求められる。

長崎大学の杉本と石塚が開発してきた変状モニタリングシステムを、熊本城の地震で崩壊に至らないものの大きな変状が生じた石垣に設置した。センサ設置箇所は、管理する熊本城調査研究センターとの協議により、飯田丸周辺、東竹ノ丸周辺ならびに南大手門周辺の被災変状石垣を対象とした。また、比較的安定性の良い石垣にも設置することで、安定性の良否による傾向の差異を明らかにすることとした。さらに、独立した電源や良好な通信環境の確保など、現地におけるシステムの安定運用に関する評価を行い、適切なシステム設計やセンサ配置方法も検討した。

(2) 熊本城内の変状石垣の表面形状ならびに不安定石垣の振動特性の評価

後述の(4)の数値シミュレーションに基づく石垣の変状傾向の特徴の解明において計算結果の妥当性を評価すること、また変状発生箇所の復旧の必要性や優先度の判定に有用と考えられる定量的評価を行うことを目的とし、熊本城内の変状石垣の表面形状の計測、ならびに不安定石垣の振動特性の定量的評価を行った。前者については、レーザー距離計による石垣表面の計測を行い、過去のデータとの比較を行った。また、同石垣面内において、変状の大小を定量的に比較する手法について提案した。後者については、高精度の加速度センサによるランマー打撃の振動波形計測を行い、石垣石の相対的な不安定性について評価を行った。

(3) 中型遠心力載荷試験装置を用いた築石構造物の動的模型実験の実施

後述の(4)の数値シミュレーションの妥当性を検証することを目的として、主に半石墨タイプと呼ばれる築石・栗石・背面地盤の三層構造の築石構造物を模擬した石垣模型を作製し、

振動台を有する中型遠心力載荷試験装置を用いて、加振条件下での模型の変状観測ならびに模型内の各所の土圧変化の計測を行った。特に、築石部の勾配、築石の表面粗度、背面地盤の強度定数に着目して計測結果の比較を行うとともに、同条件下での数値シミュレーションの再現結果の妥当性の検証を行った。

(4) 個別要素法解析による城郭石垣の力学的安定性評価

城郭石垣の構造は、前面より石垣石、栗石、盛土、背面地山で構成されているが、石垣石や栗石は連続体ではなく個別体である。そのため、岩盤崩壊や重要施設の基礎岩盤の力学的評価に使用実績のある個別要素法解析を ITASCA 社の UDEC により実施した。同計算ソフトウェアは、一部の剛体ブロックを変形可能ブロックと呼ぶ弾塑性材料に置き換えて計算することが可能な点が特徴であり、特に築石・栗石・背面地盤の三層構造の半石塁タイプへの適用に有用である。本研究では、熊本城に実際に存在する石塁タイプ、半石塁タイプ、非石塁タイプの3種類を計算モデルの構築を構築した上で、築石表面の勾配、築石・栗石のブロック体の表面粗度、背面地盤の強度定数、地震動を模擬した水平振動等の諸条件を与え、崩壊形態もしくは未崩壊時の変状傾向を明らかにした。

(5) 崩壊危険度判定基準作成に資する崩壊パターンの分類

(4)の結果に基づき、石垣表面形状ならびに構成する石材表面の粗度の値に基づく崩壊パターンの分類を行った。この分類作成により、基本的な石垣構造別の地震動による崩壊リスクの度合いを定量的に示した。将来的に、モニタリング結果や数値解析および詳細測量による変形量の進行速度に関する情報も併せ、総合的に築石建造物の危険度判定基準作成に資する情報を提示した。

4. 研究成果

(1) レーザー距離計による熊本城石垣表面計測

表面計測には主に土地区画や建物の形状計測に用いられているレーザー距離計を、三脚に取り付けて使用した。既往研究では、計測機と水平面をなす角が45度超えると約0.3%程度の誤差が生じることを確認している。計測箇所を図-1に示す。南大手門東面(10側線)、南大手門北面(15側線)、東竹之丸西面(13側線)、茶櫓跡西面(7側線)、茶櫓跡南面(23側線)、既往の研究で計測された13側線の計81側線の計測を行った。B-1とI-1の既往の計測データと2022年の計測データを比較したものを図-1に示す。I-1は、天端周辺に変状が確認された。今回計測した他の計測箇所では、B-1のように変状は確認されなかった。

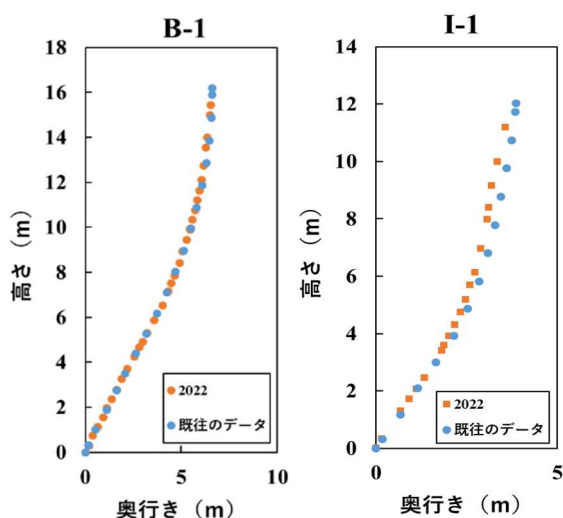


図-1 石垣表面形状の計測例

(2) 遠隔モニタリングによる天端石垣石の常時観測

遠隔モニタリングでは、崩壊に至らなかったものの、大きな変状が生じた天端石垣石に傾斜センサを設置し、計測を行っている。同システムは水平面内の直交方向の累積角度などを10分間隔で記録し親機に送信することで、ブラウザ上で確認することができる。測定範囲

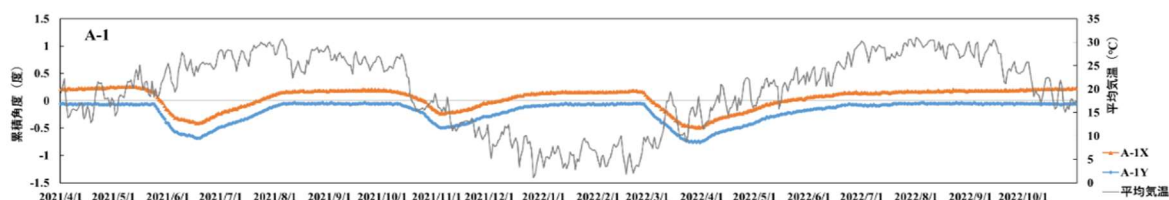


図-2 傾斜センサから得られた累積角度の経時変化

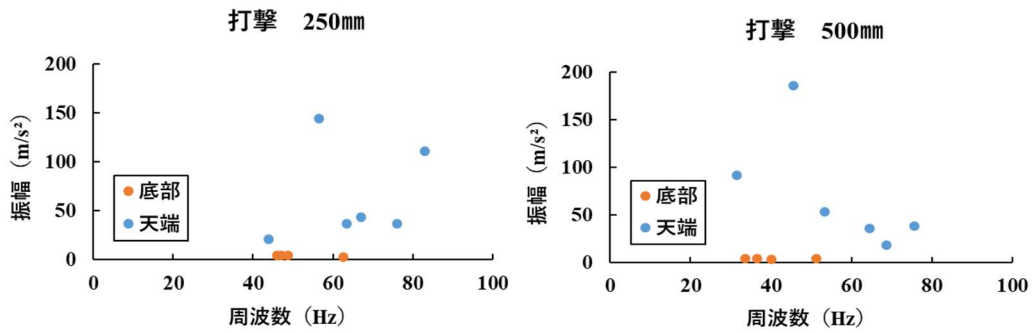


図-3 天端石垣と底部石垣の計測ピーク平均値の比較

は、 $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ ，分解能は、 0.02° である．南大手門（A 地点）には石垣面の中央に孕み出しが大きく見られる．図-2 にセンサ出力値の経時変化を示す．初期値を 0° とした場合，その後の約 2 年程度の推移は，最大で 1° 程度の変化が確認できる．季節的な気温の変化により，センサの温度特性の影響が表れているものと考えられるが，一方で石垣の背面地盤が季節的に膨張と収縮を繰り返し変動していることも一つの可能性として考えられる．石垣の挙動は，ほぼ累積変化はないと判断することが妥当と考えられる．

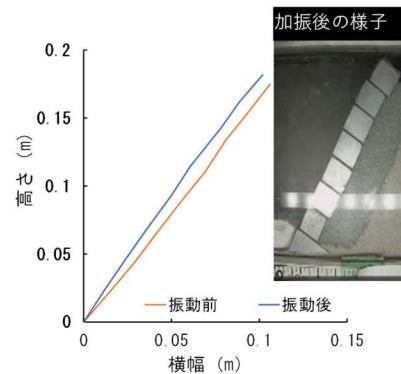
(3) 天端石垣の振動計測

熊本城内の石垣石を，一軸加速度センサを設置し，石垣面に垂直な方向の挙動についてデータを記録した．また，ランマーを用いて落下高さ 25 mm の位置から打撃を加えて波形を計測する．センサから 250 mm と 500 mm の距離で打撃を数回与える．計測結果からフーリエ解析を行い，固有周期を求めた．計測箇所については，茶櫓跡向かい底部石垣石 2 箇所，茶櫓跡南西角底部石垣石 2 箇所，飯田丸南面天端石垣石 6 箇所の計 10 箇所を行った．振動計測を行った計 10 箇所の打撃回数分のピーク値を算出し，平均値を求めプロットしたものを図-3 に示す．底部石垣石は，加速度振幅がほぼ 0 cm/s^2 を表し，天端石垣石は，石垣石の体積，形状などによってピーク値にばらつきがみられる．底部石垣石の加速度振幅がほぼ表れていない理由は，上部石垣の大きな上載圧が作用しており，相対的に振動が極小であることが考えられる．

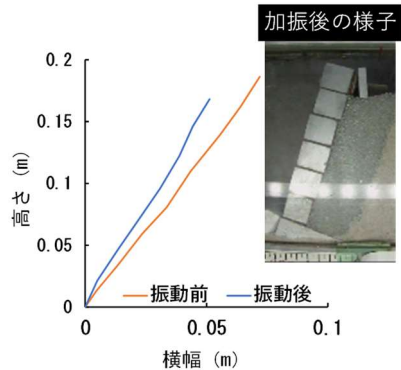
(4) 半石墨タイプの模型石垣に関する動的遠心力載荷実験

図-4 に 60° ， 70° 模型の加振前後の表面形状を，LiDAR アプリを用いて計測した結果を示す． 60° ， 70° 模型においては，崩壊は発生しなかったが，栗石部の沈下により石垣石を押し出す挙動が見られた．特に， 60° 模型と比べ， 70° 模型では石垣天端部の押し出しが大きい傾向が確認された． 80° 模型は加振開始直後に栗石が石垣石上部を押し出すように崩壊した．

図-5 に示すような 60° 模型と 70° 模型について石垣石栗石間の土圧の推移を比較すると， 60° 模型では下部の土圧が先に増加した後に上部の土圧が増加していることがわかる．また， 70° 模型では逆の推移を示していることがわかる．これは，勾配の違いによって， 60° 模型では石垣下部が押し出され， 70° 模型では石垣全面が押し出されるような土圧の推移を示していることが分かった．



(a) 勾配 60° 模型

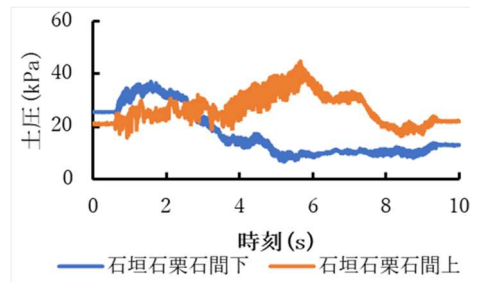


(b) 勾配 70° 模型

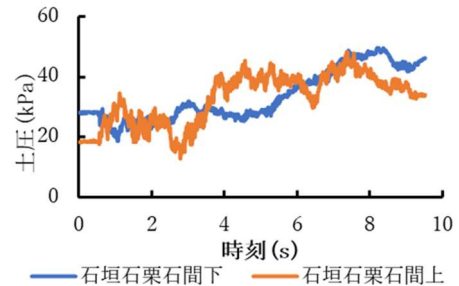
図-4 加振前後の表面形状

(5)個別要素法解析による城郭石垣の変形に関する数値解析

図-6 に半石墨タイプの解析結果を示す。栗石厚さが 2m の場合はすべてのケースにおいて崩壊がみられなかった。また、栗石厚さが 3m の場合は表面のせん断抵抗角が 10° の場合は、くの字に折れ曲がるような崩壊を示した。 20° の場合は石垣石上段から押し出すような変形のしかたがみられたが崩壊まではいたらなかった。栗石厚さ 5m の場合はすべてのケースで崩壊がみられた。これらの傾向の違いは、入力したブロック表面のせん断抵抗角の値による栗石の安息角と、背面地盤ならびに石垣石の勾配との大小関係によるものと考えられる。以上のように、基本的な石垣構造別の地震動による崩壊リスクの度合いを定量的に示した。



(a) 勾配 60° 模型



(b) 勾配 70° 模型

図-5 石垣石栗石間の土圧推移

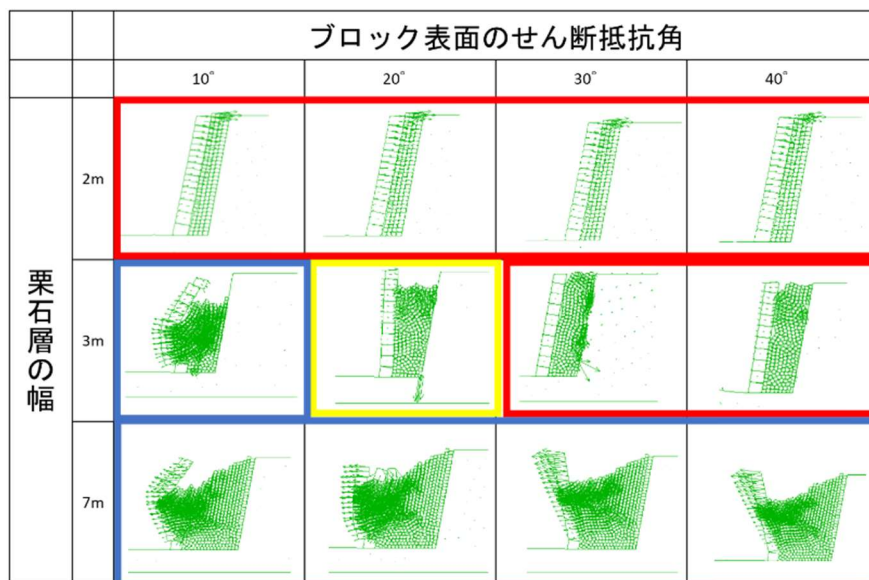


図-6 栗石層幅と石材表面粗度との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1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 山口晃佑, 杉本知史, 石塚洋一	4. 巻 42
2. 論文標題 熊本城の被災石垣の形状計測と動態観測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木史研究講演集	6. 最初と最後の頁 99-104
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 無
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 杉本知史・有津享佑・藤谷久	4. 巻 43
2. 論文標題 変状観測による熊本城の被災石垣の安定性評価に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木史研究講演集	6. 最初と最後の頁 337-340
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 無
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 Satoshi Sugimoto, Maho Yamaguchi and Minoru Yamanaka	4. 巻 20
2. 論文標題 SURFACE SHAPE MEASUREMENT AND EVALUATION OF MECHANICAL STABILITY BY DEM SIMULATION FOR DAMAGED TRADITIONAL STONEWALLS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 121-127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21660/2021.80.GX360	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 山口晃佑, 杉本知史, 山中稔, 山口真歩	4. 巻 41
2. 論文標題 被災城郭石垣の変状評価と動的挙動の再現実験に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木史研究講演集	6. 最初と最後の頁 17-22
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 無
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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Satoshi Sugimoto, Kosuke Yamaguchi and Maho Yamaguchi
2. 発表標題 REPRODUCTION OF DYNAMIC BEHAVIOUR AND CLASSIFICATION OF FAILURE PATTERNS OF STONEWALLS BY DISTINCT ELEMENT METHOD SIMULATION
3. 学会等名 12th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口晃佑・杉本知史・石塚洋一
2. 発表標題 熊本城の被災石垣の形状計測と動態観測
3. 学会等名 第42回土木史研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有津享佑・杉本知史・蒋宇静・大嶺聖
2. 発表標題 形状計測と動態観測による熊本城の被災石垣の変状評価に関する研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口晃佑・杉本知史・大嶺聖・蒋宇静
2. 発表標題 数値解析による築石構造物の背面土に着目した力学的安定性評価
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中尾雪音, 杉本知史, 蒋宇静, 大嶺聖
2. 発表標題 簡易計測による熊本城の被災石垣の変状評価に関する研究
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥山大輔, 杉本知史, 蒋宇静, 大嶺聖
2. 発表標題 遠心力載荷模型実験による築石構造物の動的挙動に関する研究
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口真歩, 杉本知史, 蒋宇静, 大嶺聖
2. 発表標題 被災地築石構造物の数値解析によるモデル化と評価
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口真歩・杉本知史・蒋宇静・山中稔
2. 発表標題 熊本城の被災石垣の変状計測と力学的安定性評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 第40回土木史研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口晃佑・杉本知史・蒋宇静・大嶺聖・山口真歩
2. 発表標題 熊本城石垣表面形状計測による変状評価に関する研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口晃佑, 杉本知史, 山中稔, 山口真
2. 発表標題 被災城郭石垣の変状評価と動的挙動の再現実験に関する研究
3. 学会等名 第41回土木史研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本知史・有津享佑・藤谷久
2. 発表標題 変状観測による熊本城の被災石垣の安定性評価に関する研究
3. 学会等名 第43回土木史研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 窪田圭祐・杉本知史・大嶺聖・蒋宇静
2. 発表標題 半石畳タイプの築石構造物の崩壊メカニズムの解明
3. 学会等名 令和5年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2024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
研究 分 担 者	石塚 洋一 (Ishizuka Yoichi) (50284708)	長崎大学・総合生産科学研究科・教授 (17301)	

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
---------	---------