

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04255

研究課題名（和文）大変形した城郭石垣の物理探査の適用による安定性評価手法の構築

研究課題名（英文）Development of stability evaluation method of large deformed castle stone walls by geophysical exploration

研究代表者

山中 稔 (Yamanaka, Minoru)

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：50264205

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）：本研究により、丸亀城天守台石垣の石垣断面形状測量や地中レーダ探査の結果をもとに、累積示力線法や円弧すべり等による地震時の安定性診断を実施し、地震時の安定性を満足していることが明らかとなった。熊本城跡での常時微動計測による地層区分を導入した三次元地盤図を作成するとともに、石垣被災に及ぼす地盤の影響について明らかにした。

仙台城や白河小峰城での石垣被災現場において常時微動測定を実施し、石垣被災に盛土厚さが大きく影響していることを明らかにした。さらに、金沢城跡での常時微動計測による地層区分を導入した三次元地盤図を作成し、石垣変状に及ぼす地形や表層地盤の影響について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

築城から400年を超える近世城郭石垣の自然災害による被害が顕著になってきている。文化財石垣は歴史の証拠として後世に長く伝えていく必要がある。本研究は、城郭石垣の物理探査の適用による安定性評価において、城郭石垣のオーセンティシティ（真正性）を考慮した新たな調査方法を構築するものである。

研究成果の概要（英文）：As a result of this study, based on the results of cross-sectional surveys of the stone walls of the Marugame Castle and ground radar surveys, stability diagnosis during earthquakes was carried out using cumulative force line method and circular arc sliding analysis, etc., and it was found that the stability during earthquakes is satisfactory.

A three-dimensional ground map was created at the Kumamoto Castle ruins, incorporating strata classification based on microtremor, and the influence of the ground on damage to stone walls was clarified. the three-dimensional ground map of the Kanazawa Castle ruins was created, and the influence of the topography and surface ground on deformation of the stone walls was clarified.

Microtremor measurements were carried out at the damaged stone walls of Sendai Castle and Shirakawa-Komine Castle, and it was cleared that the thickness of the embankment had a large influence on the damage to the stone walls.

研究分野：地盤工学

キーワード：石垣 物理探査 安定性 地盤調査

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2016年熊本地震による熊本城石垣の変形・崩壊や、2018年7月と9月の豪雨では丸亀城石垣が崩落した。これらの石垣崩壊現象は、地震や降雨という外力としては異なるものの、石垣石の孕みや抜けによる大きな変形が既に生じていた箇所が崩壊に至っているケースが多い。しかし一方で、被災後の大変形した石垣であってもその後の変形が進行せず安定を保っている箇所も見られる。この石垣変形の進行の違いは、石垣背面の緩み域の存在にあると考えられる。すなわち、石垣の変形が進む箇所は、石垣同士の間隙力が低下した緩み領域が生じ、その緩み領域では石垣背面からの土圧への抵抗力が低下することで、いずれ崩壊にいたるものと考えられる。

石垣の変形が生じた箇所は、石垣石同士に緩みが生じ安定性は低下していると考えられるが、実際の石垣はたとえ大変形していても内部は詰石や間詰め石の存在により決して緩んでいない場合も多くある。大変形した石垣の安定性を評価するためには、緩み領域を抽出する必要がある。城郭石垣の多くは文化財でもあり、緩み領域の調査手法としては破損を伴わない物理探査の適用が考えられる。

2. 研究の目的

老朽化の進展や自然災害により大変形した城郭石垣が今後に変形が進行するかどうかは、現状の石垣の剛性の高さ、すなわち石垣石同士のかみ合わせの強さや、石垣石背面の栗石層の密実さが大きく影響していると考えられる。すなわち、石垣内部の緩み域が検出できれば、大変形した城郭石垣の現状の力学的安定性評価を行うことが可能となる。

本研究は、豪雨で崩壊した丸亀城石垣や地震で被災した熊本城石垣を主な調査対象として、各種の物理探査手法を適用して、さらには既存のボーリングデータを活用した城郭三次元地盤図を作成し、新たな城郭石垣の力学的安定性評価手法を構築しようとするものである。

3. 研究の方法

3.1 丸亀城石垣への物理探査の適用

1) 加振伝播速度測定

石垣石に与えた衝撃の波は、加振点から測定点までを直線的に伝播するが、石垣石間に隙間が生じている場合、隙間箇所を迂回して伝播すると考えられる。そこで、加振伝播速度の基礎実験として、コンクリートレンガ間の隙間の有無が及ぼす加振伝播速度への影響について検証した。経年的な変形が進行する丸亀城石垣において加振伝播速度試験を行い、石垣緩み域の検出を試みた。

2) 石垣内部の空洞調査

城郭石垣は、前面から石垣石、栗石層、盛土層との構造となっているが、変形の大きな箇所では、前面の石垣石の接触が減少するとともに、背面の栗石が下方に移動し大きな空洞が生じていることが考えられる。この空洞の状態を直接的に確認するために、石垣変形の大きい丸亀城の石垣を対象にウエアブルカメラを用いて空洞調査を実施した。

3) 地中レーダ探査による調査

石垣石控え長さや石垣石背面の栗石層の幅を定量的に把握することを目的として、丸亀城石垣において地中レーダ探査を実施した。

3.2 熊本城跡および金沢城跡の三次元地盤図の作成

2016年4月に発生した熊本地震により、熊本城では石垣に甚大な被害が生じた。石垣被災箇所の多くが過去の石垣修復箇所と重なっており、熊本城における石垣被災箇所は表層地盤構造と密接な関係があると考えられる。本研究では、ボーリングデータの不足する地点において常時微動探査を実施し、新たに得られる地層区分でボーリングデータ間を補完することで、熊本城跡全域における旧地形等の立体表示の可能な三次元地盤図を作成した。

また、近世城郭の多くは、自然地形を生かしつつも、一方でそれを大きく改変する造成により成立している。石垣変形には地盤が大きく影響することから詳細な地盤図が必要である。そこで、金沢城跡で多数地点での単独微動探査を実施し、H/V スペクトル解析より三次元地盤図を作成した。

3.3 仙台城跡および白河小峰城跡の石垣の被災要因の検討

1) 仙台城跡石垣の被災要因の調査

東日本大震災で崩壊しその後修復した仙台城跡本丸北西石垣部において、2022年3月の余震(最大震度6強)によって約15mの幅で石垣が崩壊した。この石垣の崩壊は、地震時に増大した土圧が石垣石の有する摩擦抵抗力を超えた場合に生じると考えられ、この地震時土圧が崩壊部で大きくなったことが容易に考えられる。仙台城跡での地震被災石垣箇所でも常時微動測定を実施し、得られたH/Vスペクトルより地層区分を行い、石垣背後の地盤構造から石垣崩壊要因を検討する。

2) 白河小峰城石垣の被災要因の調査

2011年東日本大震災で福島県白河市に位置する白河小峰城跡の石垣が被災し、変形・崩壊を起こした。その後の発掘及び復旧工事により、被災石垣の背後地盤は埋没谷上に位置し盛土が厚い等の特徴があることが判明している。本研究では、白河小峰城石垣部において常時微動測定を行い、得られた振動特性から地層構造を推定し、崩壊した石垣背後地盤の盛土層厚の変化について考察するとともに、解析で得られたS波速度の大きさから、盛土改良範囲の一軸圧縮強さについて検討を行った。

4. 研究成果

4.1 丸亀城石垣への物理探査の適用結果

1) 加振伝播速度試験

図-1に示す丸亀城の二の丸と三の丸の石垣において加振伝播速度試験を実施した

図-2に、二の丸における加振伝播速度試験の結果を示す。高さ1mよりも2mの伝播速度が全体的に高いが、これは石垣の変形形状による違いであると考えられる。

図-3に、伝播速度を測定した二の丸の各石垣面での伝播速度の平均値を示す。平均伝播速度が低いのは、およびの石垣面であり、これら石垣面では、石垣の緩みが大きいことが考えられる。最も平均伝播速度が低い二の丸の石垣は、石垣間の隙間が大きく石垣が大きく変形しており、石垣の緩みが顕著であり、石垣の安定性が低下している恐れがあると言える。

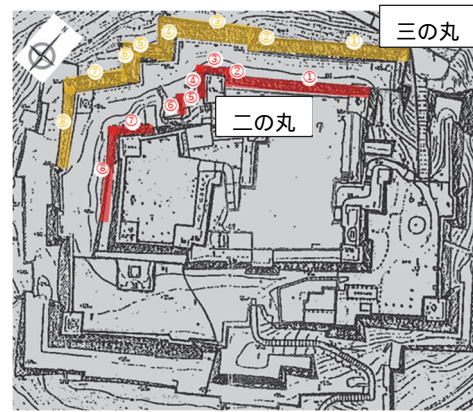


図-1 加振伝播速度試験位置（丸亀城）

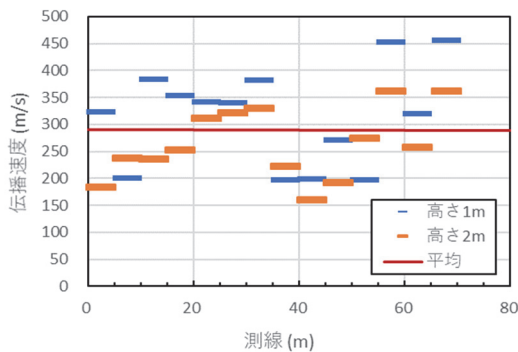


図-2 加振伝播速度試験の結果（二の丸）

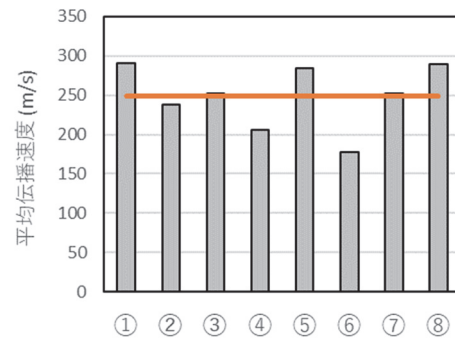


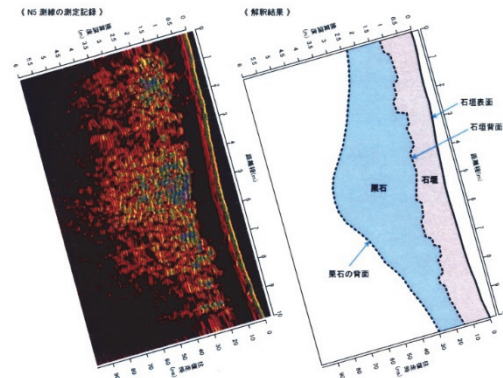
図-3 二の丸石垣での平均加振伝播速度の違い

2) 石垣内部の空洞調査結果

石垣変状の大きい丸亀城の石垣を対象にウェアブルカメラを用いて空洞調査を実施した結果、変状部の石垣背面には空洞が多く、栗石が十分に入っていないことが判明した。このことから、石垣変状の要因としては、石垣背面の栗石の密実性が大きく影響していることが明らかとなった。

3) 地中レーダ探査による調査結果

図-4に、丸亀城天守台石垣 N5 測線における地中レーダ探査結果を示す。(a)図の地中レーダ解析結果から得た、(b)図の解釈図からは、石垣石控え長さが 82~132cm と最大で 50cm も異なる長さとなっていることや、栗急層の厚さは石垣の高さが中央部ほど栗石層の厚さが増大している。丸亀城天守台石垣は、控え長さが短い石垣石が使われていることや、栗石層の厚さが統一されていないことが、石垣形状の変形につながっていることが判明した。



(a) 地中レーダ解析結果 (b) 解釈図

図-4 石垣 N5 測線の解析結果

4.2 熊本城跡および金沢城跡の三次元地盤図の作成

1) 熊本城跡の三次元地盤図

図-5に、熊本城跡における三次元地盤図の作成に用いたボーリング地点と常時微動探査の実施地点を示す。測定は主にボーリングデータの少ない地点で実施した。私有地等を除き、熊本市が管理している区域全域において計 196 箇所での常時微動探査を実施した。

図-6に示す観測分散曲線における採用ピーク周波数と、1/4 波長則を基に得られる S 波速度構造における理論上の卓越周波数が一致するように S 波速度構造を変化させる。この際、解析上の変数を少なくするために Vs の値は変化させずに層厚の値のみを変化させて解析を行った。2 つの曲線のピーク周波数が一致したときの S 波速度構造が理論上の測定地点における地盤構造を反映していることになる。



図-5 常時微動探査の実施地点

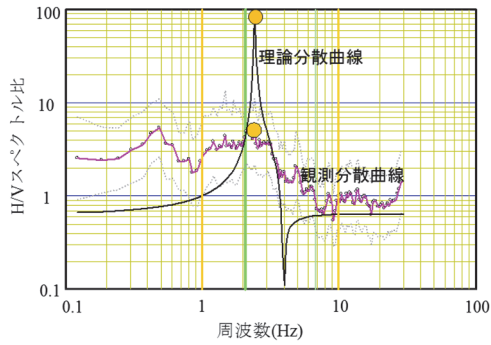


図-6 常時微動データによる地層区分の解析例

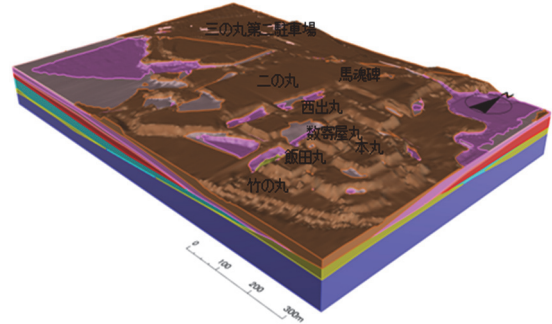


図-7 解析結果を組み込んだ三次元地盤図

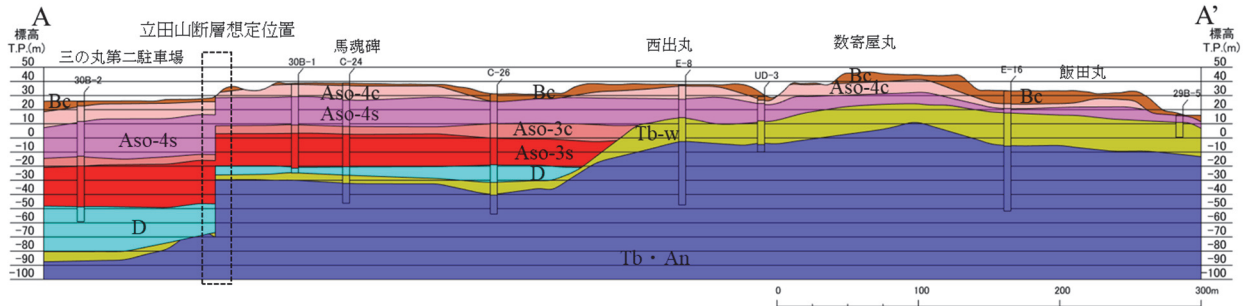


図-8 三次元地盤図より切り出した二次元断面図 (A-A' 断面)

図-7 に、構築した熊本城跡における三次元地盤図の全体像を示す。三次元地盤図は作成した地質境界面モデルを使って各層ごとに構成されている。熊本城跡全域における表層地盤構造や地山形状について、様々な視点から把握することが可能になった。

図-8 に、三次元地盤図より切り出した二次元断面図 (A-A' 断面) を示す。微動解析結果を組み込むことで、Tb・An 層までの立田山断層の表現も可能となった。Aso-3 層および D 層の地層境界面の上面深度に大きな変化はなく、平坦な形状となっていることが確認できた。

2) 金沢城跡の三次元地盤図

本研究で構築する金沢城三次元地盤図は、既存のボーリングデータ計 326 本（ほとんどが土層観察記録のみ）と、常時微動解析により得られた盛土層厚 416 箇所分のデータを用いた。これらの地層情報を三次元地質解析システム (GEO-CRE) に導入して可視化した。

図-9 に、三次元地質解析システムに入力した常時微動解析による地層区分と既存ボーリングの地層区分を元に、金沢城跡全域の盛土層と地山層の地質対比図を示す。

図-10 に、構築した三次元地盤図を用いた地山層の上面分布を示す。傾斜部は自然地形を反映して緩い起伏となっており、堀や埋没谷の存在を確認することができる。

図-11 に、三次元断面図から切り出した二次元断面図を示す。(a) 図からは、新丸における盛土層厚がほぼ均等に分布し、斜面部における盛土分布が表現できていることが分かる。

(b) 図からは均等であった三ノ丸部の盛土厚が自然な凹凸を有した層厚となっている。

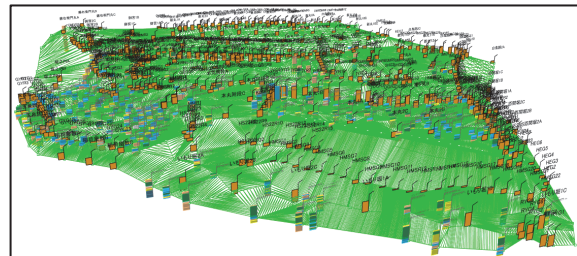


図-9 盛土層と地山との地質対比の入力結果

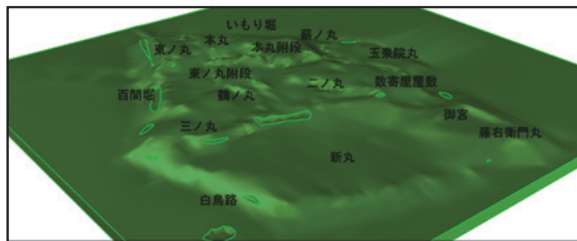


図-10 三次元地盤図による地山の上面分布

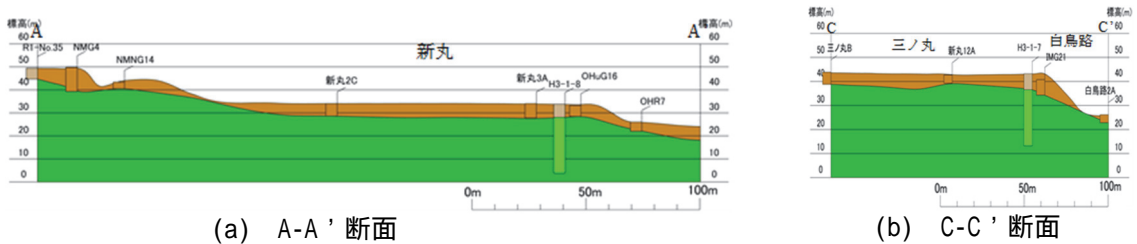


図-11 微動解析データ導入による金沢城跡の三次元地盤図から切り出した二次元地盤断面

4.3 仙台城跡および白河小峰城跡の石垣の被災要因の検討結果

1) 仙台城跡石垣の被災要因について

図-12 に、常時微動探査の測点位置を示す。石垣平行方向に 5.0m 間隔で、石垣直交方向に石垣前面から 1.5m, 3.0m, 6.0m, 10.0m の 4 測線で実施した。

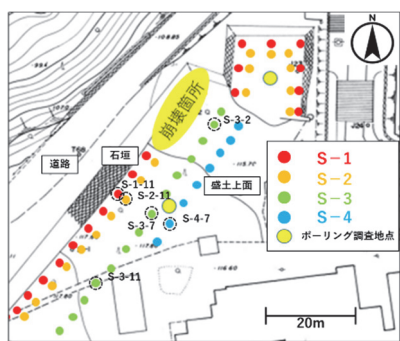
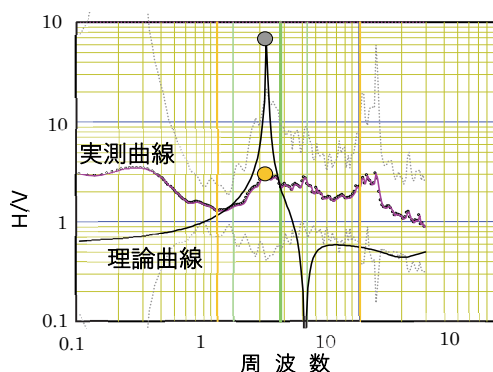
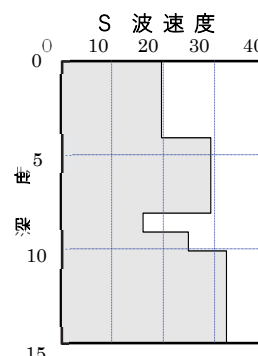


図-12 常時微動探査測定位置



(a) H/V スペクトル図



(b) S波速度分布

図-13 S-3-6 地点での解析結果

図-13 に、一例として S-3-6 地点での解析結果を示す。(a)図の H/V スペクトルにおいて、実測曲線のピークを求め、そのピークに理論曲線のピークを一致させる。この手法によって(b)図の S 波速度分布図を得ることができ、地層区分を決定した。

その他の各地点での H/V スペクトルからの地層区分においては、既存調査資料より得た地層の連続性を考慮して行った。

図-14 に、S-3 測線における地層区分図を示す。石垣崩壊部背面の地層は、礫質土層の分布が低下し、表層の粘性土層が厚くなるという結果となった。この軟質な表層粘性土層が厚くなっていることが、石垣崩壊の地盤工学的要因になっていることが示唆される。

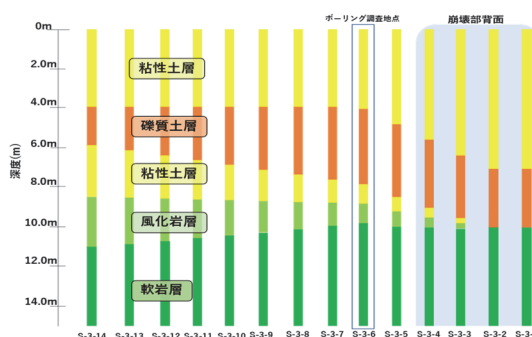


図-14 地層区分図 (S-3 測線)

2) 白河小峰城石垣の被災要因について

白河小峰城の本丸での常時微動測定を実施した。石垣直行方向に石垣上端の前面より地盤側に 1.5m, 5.5m, 9.5m とし、石垣平行方向には水平距離で 5m の間隔をとした。

図-15 に示す検討断面での測点 -1-5 (セメント改良断面) と測点 -2-5 (未改良断面) において、深度方向のせん断波速度から、一軸圧縮強さを求めた。

図-16 に、盛土部のせん断波速度分布を示す。(a)図の測点 -1-5 で改良部の $V_s=180\text{m/s}$ より換算した q_u は 191kN/m^2 となり、必要強度を満足していることが分かった。一方、(b)図の測点 -2-5 での改良部の $V_s=148\text{m/s}$ より換算した q_u は 126kN/m^2 であり、必要強度を満足していた。

白河小峰城の地震により崩壊した石垣修復箇所での、常時微動測定で得たピーク周波数から、石垣被害の要因となった埋没谷の分布を得るとともに、石垣修復工事での盛土部のセメント改良強度について検証することが出来た。

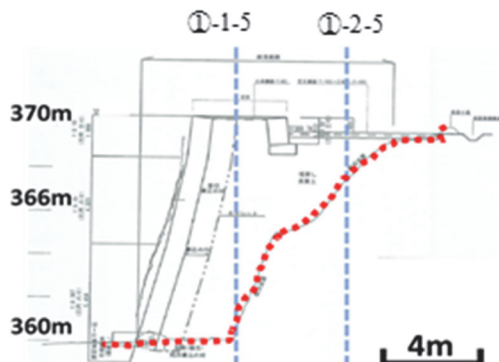
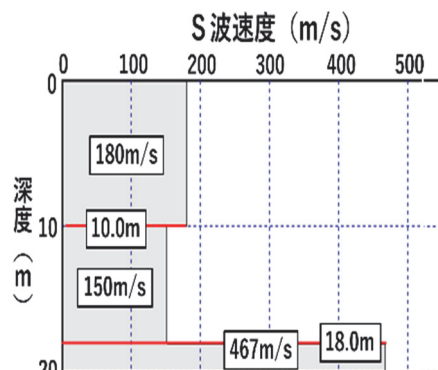
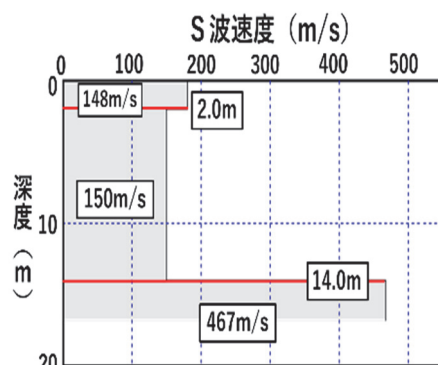


図-15 崩壊修復断面での検討測線



(a) 測点 -1-5 (改良断面)



(b) 測点 -2-5 (未改良断面)

図-16 盛土部の S 波速度深度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0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 山中 稔	4. 巻 18
2. 論文標題 土木工学の観点からの石垣の背面構造の重要性～高松城天守台を事例として～	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第18回全国城跡等石垣整備調査研究会 基調講演・報告資料	6. 最初と最後の頁 12-28
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 荻野将樹, 山中 稔	4. 巻 41
2. 論文標題 常時微動探査による地層区分を利用した熊本城三次元地盤図の作成	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木史研究講演集, 土木学会	6. 最初と最後の頁 1-7
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 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 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, 土木学会	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7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 荻野将樹, 山中 稔, 嘉村哲也, 中田 卓
2. 発表標題 熊本城三次元地盤図を利用した石垣の地震被害に及ぼす地盤要因について
3. 学会等名 地盤工学会四国支部令和4年度技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本達哉, 山中 稔, 荒木裕行, 山田愛也
2. 発表標題 仙台城跡石垣の常時微動振動特性からの石垣崩壊要因の検討
3. 学会等名 地盤工学会四国支部令和4年度技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田愛也, 山中 稔, 小山倫史
2. 発表標題 白河小峰城跡石垣盛土部の常時微動探査による埋没谷の検出
3. 学会等名 地盤工学会四国支部令和4年度技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本道隆, 榎 治彦, 合田泰三, 直井智治, 松江康司, 阪本晃弘, 高島雄基, 山中 稔, 荒木裕行
2. 発表標題 実粒径の石垣背面栗石を対象とした一面せん断試験
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会令和5年度発表講演集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮川玲緒, 小山倫史, 山中 稔, 北野博司, 西田郁乃, 富田和氣夫
2. 発表標題 自己組織化マップにおける金沢城城郭石垣の変状要因の分析
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会令和5年度発表講演集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山中 稔, 荻野將樹
2. 発表標題 常時微動探査による地層区分とボーリング柱状図を併用した熊本城三次元地盤図の作成
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荻野將樹, 山中 稔, 嘉村哲也, 中田 卓
2. 発表標題 熊本城三次元地盤図の作成における常時微動探査による地層区分とボーリング柱状図との比較検討
3. 学会等名 地盤工学会四国支部令和3年度技術研究発表会
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