

令和 2 年 4 月 22 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06556

研究課題名(和文)熊本城内の潜在断層による石垣被害拡大に関する物理探査および地震動解析による検証

研究課題名(英文)Geophysical Explorations and Seismic Analysis for Damage Factors of Stonewalls in Kumamoto Castle during 2016 Kumamoto Earthquake

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：2016年熊本地震での熊本城石垣の被災要因として、表層地質構造の弱線部(地層の急変部)の存在を想定し、その検証のために、物理探査手法である表面波探査と常時微動測定を実施した。

本研究の結果、表層部の軟弱層厚に狭い範囲において若干の変化が見られ、岩盤程度の硬質な地層が検出された箇所はあるものの、想定した弱線上において地層が急変する箇所は見られなかった。しかし、盛土層厚が厚い箇所では、スペクトルの増幅率が大きくなる傾向がみられており、また、同じ盛土層であってもS波速度やスペクトルの増幅率に違いがみられていることから、この違いを詳細に検討を進めることで石垣被災要因を検証することが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした近世城郭石垣は貴重な文化財であり、地盤調査においては地盤であっても非破壊とする必要がある。本研究で採用した物理探査手法は、被災した城郭内での地盤調査手法として極めて有効であることを、実証できたと考えている。今後の我が国の城郭における新たな地盤調査方法として広めていきたい。

本研究によって、熊本城内に岩盤層の急激な変化がないことが確認できたとともに、表層地盤の層厚や硬さを知ることができ、現在進行中の熊本城石垣修復工事に必要な貴重な地盤工学的知見を得ることが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Existence in a sudden change of surface geologic structure is assumed by gamma-ray survey as a damage factor of stonewalls in Kumamoto Castle during 2016 Kumamoto earthquake. Surface wave exploration and microtremor were carried out to verify the hypothesis. As a result of this study, the sudden change of hard rock layer were could not discerned clearly along the assumed sudden change direction in the range of depth of surface layer where is possible to detect by the surface wave exploration. But The difference was seen that the gain of spectrum by microtremor tended to become large at the part where surface layer thickness was increase, also there was difference in the S-wave velocity and the gain of spectrum though it was the same surface layer. The consideration with this detailed difference will be advanced from now on, and I consider it's necessary to inspect the damage factor of Kumamoto castle's stone wall.

研究分野：地盤工学

キーワード：熊本地震 石垣 地盤調査 物理探査 表面波探査 常時微動 盛土

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2016年熊本地震により熊本城では、国重要文化財13棟が損壊し、沈下やはらみ(膨らみ)を含め被災した石垣は52箇所及んだ。石垣被害の要因として、石垣の積み方や当時の施工技术が言われているが、1889(明治22)年の明治熊本地震で被災した熊本城西出丸付近や飯田丸五階楼等の石垣部が、今回2016年の地震でも同様に石垣の崩壊被害を受けている。

研究代表者は地盤工学会平成28年熊本地震地盤災害調査団のメンバーの一員として、熊本城を管轄する熊本城調査研究センターの協力の元、4回の熊本城被災石垣の調査を行った。調査の結果、崩壊した石垣は上部から崩れていること、石垣石の控え長さが短い箇所が崩れていること、栗石の幅が薄いこと、近年に積直し補修をした石垣が再度崩れていること、再度崩壊した箇所は直線状に分布すること等が判明した。

上記～の石垣構造に関して、石垣の振動実験にもとづく既往の研究では、地震動が小さい場合は石垣上部の変形が大きく、地震動が大きい場合は石垣下部が孕み出すような変形が生じることが指摘されている(西垣ら2011)。これは、熊本城石垣の被災調査の結果とは整合していない。研究代表者の知見では、石垣の積み方は石垣の振動特性に影響を与える可能性があるものの、その程度は決して大きくない。すなわち、地質・地盤の影響が大きく、上記を重要視する必要があることが判明した。

また、研究代表者らの現地調査により、明治22年と平成28年の被災箇所が2本の直線上に位置することが判明した(図-1参照)。熊本城近傍に分布する立田山断層から派生した潜在断層(弱層)であり、この弱層により基盤に急激な標高差が生じ、弱層上で地震動が増幅し、地表面の石垣被害を拡大させたと考えられた。この弱層の分布は、周囲のバックグラウンド値より明らかにガンマ線量の異なる位置をつなげることで推測できた。一般に断層破砕帯においては帯磁率異常に伴いガンマ線量に変化することが知られ(吉村ら2012)、ガンマ線測定は、潜在断層の位置や地質の境界を調べる目的で、近年用いられることが多くなっている。



図-1 被災石垣と推定弱層の位置

本研究では、熊本城被災調査の一つとしてガンマ線測定を行った結果、ガンマ線が異常値を示した線状と実際の石垣被害箇所が概ね一致すること、さらには、既往のボーリング調査結果でも被害の大きかった宇土櫓部での基盤標高が大きく異なっており、この弱層の分布が石垣被災の大きな要因であると考えた。

地震時の石垣構造物の挙動を解明するためには、石垣構造物の構造をモデル化するとともに、基盤への地震入力波形や推定地層での地震波形増幅特性をも事前に明らかにする必要がある。すなわち、熊本城が立地する茶臼山(丘陵地)の動的地盤特性を同定し、入力地震動を推定するための基礎的な地盤構造を得る必要がある。地盤構造の各地層の分布を調べるためにはボーリング調査が一般的であるが、熊本城内での調査は、屋根瓦等の落下物の危険性が高いなかでの調査であり迅速性が要求されるとともに、文化財を破壊せずに現状変更せずに調査することが望まれる。このためには、ボーリングではなく非破壊で地盤内の基盤深度分布が解析可能な、物理探査である表面波探査や常時微動測定が適していると言える。

研究代表者らはこれまで、熊本城内での宇土櫓の地盤面で表面波探査(GL-20mまで探査可能)を実施したところ、基盤である安山岩層の上位にある火山灰質層Aso-4の堆積深度が、安山岩層の深度の急変に同調するように低下していることが確認できた。しかし、より深層部の地層変化を判明させるためには表面波探査では探査深度が足りないために、常時微動測定を適用する。常時微動測定によって、地表面下30mより以深の安山岩の分布深度を推定することが可能となる。

2. 研究の目的

2016年熊本地震では熊本城が甚大な被害を受けたが、それらの被災箇所は1889年明治熊本地震での被災箇所と多くが重なっている。同じ箇所が繰り返し被災する要因として、潜在断層(弱層)により基盤岩の深度が急変していることで、地表面地震動が局所的に増幅され、弱層に沿う箇所の被害が大きくなったことが考えられる。

本研究では、熊本城内での弱層となる基盤岩の分布が急変する箇所およびその深度を、物理探査である表面波探査と常時微動測定を行うことで明らかにするとともに、基盤が急変する地層条件での2次元地震動解析により地震動の増幅特性と変位卓越方向を解明し、熊本城石垣被害の要因について明らかにするものである。

3. 研究の方法

(1) 表面波探査による表層地盤の調査

線測定により熊本城内に表層地盤の不陸(凹凸)による4本の弱線の存在が考えられたために、表層地盤(深度10~20m程度)の物性変化を非破壊で探査できる物理探査手法として表面波探査を実施した。

表面波探査の測線配置として、本丸で5測線、平左衛門丸で6測線、そして周辺で6測線の、計17測線で実施した。なお、測線配置においては、平左衛門丸および本丸では測線を格子状になるよう配置した。また、弱線をまたぐように配置した。

表面波探査は、地震計24ヶを2m間隔で設置し(1測線46m)、カケヤによる起振の間隔2mでのランドストリーマ形式で実施した。解析深度は概ね23mとなる。

(2) 常時微動測定による表層地盤の調査

熊本城内の表層地盤について表面波探査を実施した結果、線測定で推測された弱線(地層の急変部)の存在は検出できなかったために、表面波探査で検出できる深度(概ね23m)よりも、より深い深度に地層の急変部が存在することが考えられたことから、地盤物理探査手法の一つである常時微動測定を実施した。

地盤の振動特性はその下部の地盤構造の影響を受ける。常時微動の性質は一般的に、柔らかい地盤ほど揺れが大きく、硬く密な地盤ほど揺れが小さいとされている。常時微動測定により得られた振動特性を解析することにより、地盤の卓越周波数や増幅率から弱層の検出を試みることを調査目的とした。

常時微動測定の測点は、推定される弱線をまたぐように、平左衛門丸8地点、本丸12地点、本丸北側の外周道路沿い8地点、薬研堀北側の堀4地点、薬研堀4地点の計36地点である。常時微動の計測には、3成分常時微動計(McSEIS-MT NEO)を用いた。この常時微動計では、水平2成分と上下1成分の加速度を測定し、測定時間は1箇所約1時間とした。

4. 研究成果

(1) 表面波探査の結果

図-2(a)(b)に、本丸での測線7および測線9における表面波探査により得られたS波速度の解析断面を示す。いずれの測線ともに、深度6~8mにおいて $V_s=200\text{m/s}$ 以下、深度8~9m以深では $V_s=250\text{m/s}$ 前後の均質な土層が分布していることが分かった。

図-3(a)(b)に、平左衛門丸における測線2および測線4でのS波速度の解析断面図を示す。両図より深度8m付近まで $V_s=240\text{m/s}$ 以下を示す盛土およびAso-4c層が緩く堆積しており、その下に $V_s=240\sim 300\text{m/s}$ 程度の比較的締まったAso-4s層が、あまり明瞭ではないが起伏をもたせて堆積していることが明らかとなった。

その他の測線でのS波速度の解析断面からは、測線12および測線13では4m程度までは V_s が 200m/s 以下の緩い軟質土層が分布し、その下位には $V_s=200\sim 400\text{m/s}$ の比較的締まった層が水平に厚く堆積していることや、測線16では比較的浅い深度に V_s が 400m/s 以上の硬質層が堆積しており、硬質層の上位の盛土層は距離程が長くなるほど厚くなっていること、さらに表層測線15では深度20m以深に硬質な安山岩層の堆積が見られ、測線15とほぼ同じ標高にある測線17では、測線15で見られた安山岩層の分布は検出されなかった。

以上のことから、安山岩層の分布深度の明瞭な急変部は表面波探査からは検出できなかった。

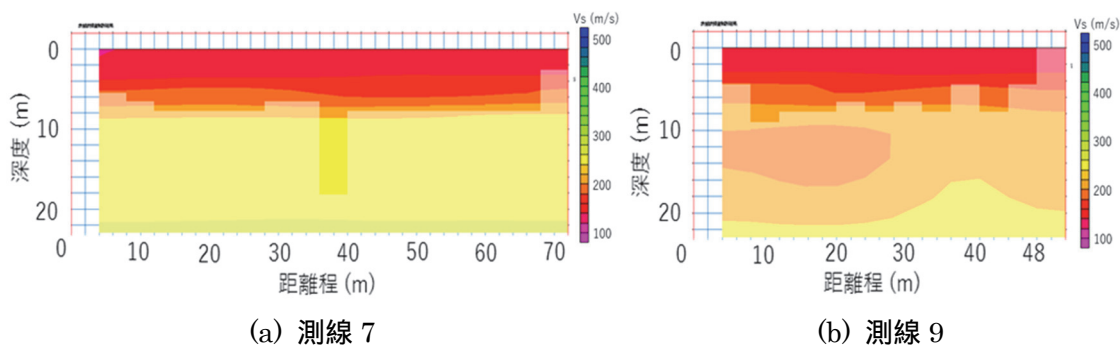


図-2 本丸での表面波探査により得られたS波速度解析断面

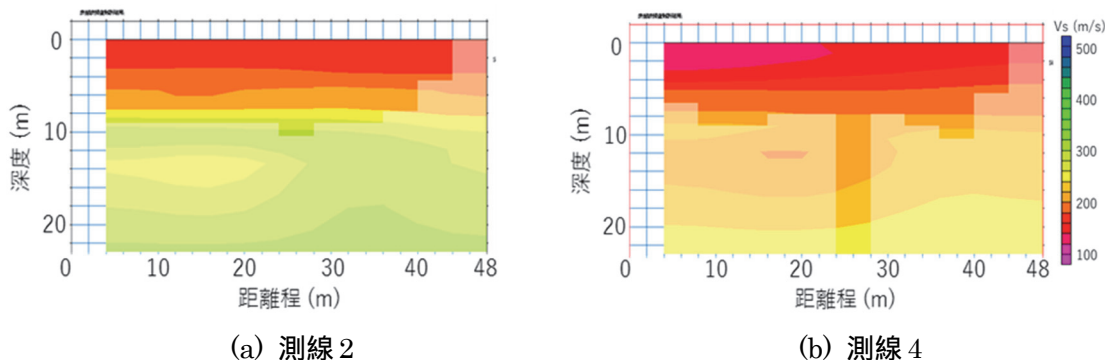


図-3 平左衛門丸での表面波探査により得られたS波速度解析断面

(2) 常時微動測定の結果

弱線 Y が横断する葉研堀北側（表面波探査測線 No.17）と、弱線 A が横断する葉研堀（表面波探査測線 No.15）の計 2 測線での常時微動測定の結果のみを、紙面の都合上述べるものとする。

図-4 に示す葉研堀北側の堀での弱線 Y をまたいだ地点と、図-5 の葉研堀での弱線 A をまたぐ地点での、いずれの合成 H/V スペクトルの周波数特性は、岩盤上の堆積層厚により変化すると考えられる低周波数側では、周波数 10Hz 付近にピークが見られることが分かる。

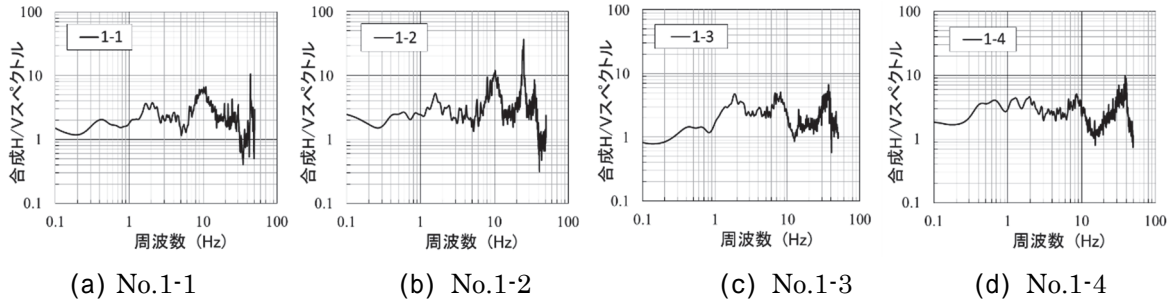


図-4 常時微動測定結果（弱線 Y 上）

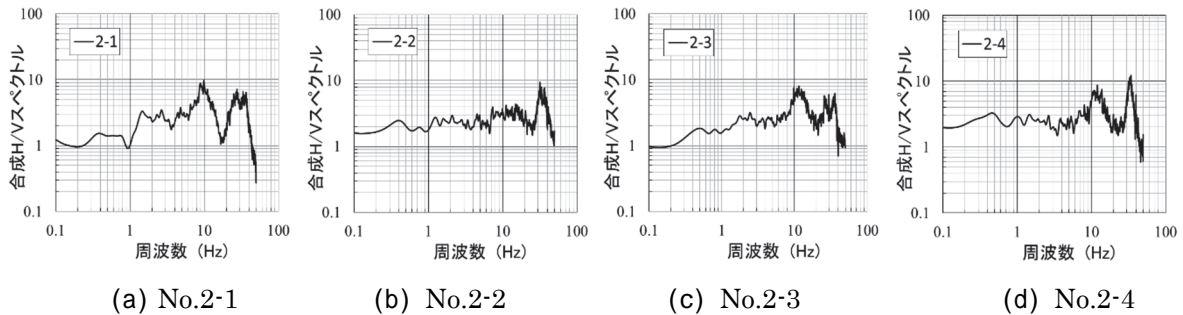


図-5 常時微動測定結果（弱線 A 上）

図-6(a)(b)には、弱線をまたいだ常時微動特性の変化をみるために、各地点でのスペクトルを重ねた図を示す。(a)図の弱線 Y をはさんだ南側 (No.1-1, No.1-2) と北側 (No.1-3, No.1-4) においてスペクトルの形状に大きな違いは見られない。一方、(b)図の弱線 A を挟んだ南側 (No.2-1, No.2-2) と北側 (No.2-3, No.2-4) においても同様にスペクトルに大きな違いは見られない。

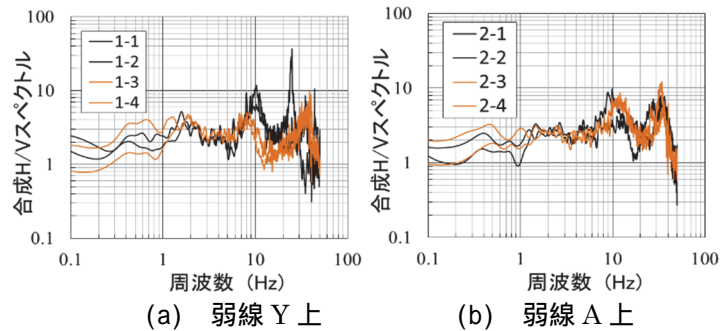


図-6 弱線を挟む常時微動特性の変化

また、他の 線測定で推定された弱線を挟む測線上での常時微動測定の結果からも、振動特性に有意な変化は見られなかった。

以上のことから、常時微動測定の結果からは、線測定で推定された弱線部での地層の急変は、検出ができなかった。

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、2016 年熊本地震での熊本城石垣の被災要因として、線測定の結果から表層地質構造の弱線部（地層の急変部）にあたるのではと想定し、その検証のために、物理探査手法である表面波探査と常時微動測定を実施した。

本研究の結果、表層部の軟弱層厚に狭い範囲においても若干の変化が見られ、岩盤程度の硬質な地層が検出された箇所はあるものの、想定した弱線上において地層が急変する箇所は見られなかった。このように、研究の発端として線測定の結果から推測されていた熊本城内の石垣崩壊部での基盤岩深度の急変は、本研究による表面波探査および常時微動測定の結果からは確認することができなかったが、何を表しているのかは今後の研究課題として残っている。

本研究の成果により、盛土層厚が厚い（基盤岩深度が深い）箇所では、スペクトルの増幅率が大きくなる傾向がみられており、また、同じ盛土層であっても S 波速度やスペクトルの増幅率に違いがみられていることから、この違いを詳細に検討していくことで、地震による石垣崩壊要因を検証することが可能となる。さらに、本研究で採用した物理探査手法は、被災した城郭内での地盤調査手法として極めて有効であることを、実証できたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 0件）

1. 著者名 S. Sugimoto, M. Yamanaka, H. Maeda, N. Fukuda, Y. Katsuda	4. 巻 14
2. 論文標題 Research of Damaged Condition by the 2016 Kumamoto Earthquake and Ground Investigation on Stone Walls and Earth Structures in Kumamoto Castle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 66-72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2018.45.7268	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 勝田侑弥, 杉本知史, 山中 稔	4. 巻 38
2. 論文標題 熊本城の築石構造物の被災状況調査と再現解析に関する基礎的研究	5. 発行年 2018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 141-147
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 S.Sugimoto, M.Yamanaka, H.Maeda, N.Fukuda, Y.Katsuda	4. 巻 7
2. 論文標題 Research of Damaged Condition by the 2016 Kumamoto Earthquake and Ground Investigation on Stone Walls and Earth Structures in Kumamoto Castle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 7th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment	6. 最初と最後の頁 269-274
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 -

1. 著者名 杉本知史, 山中 稔	4. 巻 54
2. 論文標題 熊本城の被災地盤構造物の調査報告	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第54回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 45-51
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 山中 稔, 杉本知史, 福田直三, 前田秀喜, 吉村辰朗	4. 巻 39
2. 論文標題 熊本城跡における物理探査による表層地盤構造の把握	5. 発行年 2019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 233-239
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, 石塚洋一, 高江州竜馬, 山中 稔	4. 巻 39
2. 論文標題 熊本城の被災石垣の変状計測とその定量的分析	5. 発行年 2019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 287-292
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 1件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 勝田侑弥, 杉本知史, 山中 稔, 嘉村哲也
2. 発表標題 平成28年熊本地震における熊本城石垣の変状調査に関する研究
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会平成30年度発表講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 勝田侑弥, 杉本知史, 山中 稔
2. 発表標題 平成28年熊本地震における熊本城石垣の変状調査に関する研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山中 稔, 中川瑞希, 嘉村哲也, 杉本知史
2. 発表標題 熊本城被災石垣における伝播速度測定による緩み域検出の試み
3. 学会等名 地盤工学会四国支部平成30年度技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山中 稔, 三原弘暉, 中川瑞希, 嘉村哲也, 杉本知史
2. 発表標題 城郭石垣に用いる栗石粒径の画像解析による計測について
3. 学会等名 地盤工学会四国支部平成30年度技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山中 稔, 橋本凌太, 杉本知史, 勝田侑弥
2. 発表標題 熊本城二様の石垣の振動特性の特徴について
3. 学会等名 地盤工学会四国支部平成29年度技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森川高樹, 山中 稔, 佐川 唯
2. 発表標題 熊本城地盤図による石垣修復履歴箇所にあぼす地盤工学的要因の検討
3. 学会等名 地盤工学会四国支部令和元年度技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山中 稔
2. 発表標題 熊本城と丸亀城における城郭石垣の被災要因と維持管理に向けた調査研究
3. 学会等名 地盤工学会九州支部・長崎地盤研究会，第119回勉強会ジオラボ（招待講演）
4. 発表年 2019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	杉本 知史 (sugimoto satoshi) (60404240)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	