

熊本城跡における物理探査による 表層地盤構造の把握

山中 稔¹・杉本 知史²・福田 直三³・前田 秀喜⁴・吉村 辰朗⁵

¹正会員 香川大学教授 創造工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)
E-mail: yamanaka@eng.kagawa-u.ac.jp

²正会員 長崎大学准教授 工学部 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)
E-mail: s-sugi@nagasaki-u.ac.jp

³正会員 (株)新日本技術コンサルタント (〒890-0034 鹿児島市田上 8-24-21)
E-mail: na0z0-f@hotmail.co.jp

⁴正会員 西日本技術開発(株) (〒852-8521 福岡市中央区渡辺通 1-1-1)
E-mail: h-maeda@wjec.co.jp

⁵正会員 第一復建(株) (〒852-8521 福岡市南区清水 4-2-8)
E-mail: tt_yoshimura@dfk.co.jp

2016年熊本地震により熊本城石垣が大きな被害を受けた。この石垣被害箇所は、敷地内を横断する何本かの線状に分布すると見て取れることから、この線状での地盤構造の急変(地盤の不陸等)が推測された。そこで本研究では、 γ 線測定で地質的弱線の位置を検出し、地盤物理探査手法である表面波探査や常時微動測定を実施することで、熊本城石垣の被害要因としての地盤構造の急変部の有無を検討した。本研究の結果、表面波探査による表層部のS波速度構造および常時微動測定による振動特性の変化からは、 γ 線測定で推定された弱線を挟む箇所において、地盤構造の明瞭な急変は見られないことが明らかとなった。

Key Words: disaster survey, subsurface layers, geophysical exploration, gamma-ray survey

1. はじめに

2016年熊本地震により、熊本城は建造物や石垣などの地盤構造物に甚大な被害が生じた。建造物では、国指定文化財の北十八間櫓、東十八間櫓や飯田丸五階櫓等が崩壊した。また、地震により熊本城内の多数の石垣が崩壊するとともに、崩壊に至らなくても大きな孕み出しや石材の割れ、背後地盤へのクラックの発生や変形が生じている¹⁾²⁾³⁾。

著者らは熊本地震発生直後の5月から、熊本城内の地盤被害を中心に調査を進めるなかで、被災した石垣部は、石垣背面盛土や石垣下部の基礎地盤に影響を受けていることが想定された。すなわち、地震動を増幅させる盛土層や軟弱層の層厚の急変が、石垣被害を生じさせたのではとの考えに至った。

本研究では、熊本城内の表層地盤構造の把握を目的として、地盤物理探査手法である γ 線測定、表面波探査および常時微動測定を実施し、地層急変部の検出を試みた。

2. 熊本城跡の地形地質概要

(1) 地形地質

熊本城跡は、阿蘇の火砕流が堆積した植木台地が熊本平野に突出する「茶臼山」と呼ばれる丘陵に築かれている。その東端は海拔50mであり、西に向かって次第に低くなる地形を有している。熊本城は、加藤清正が関ヶ原の戦い後、肥後一国の領主となり茶臼山の丘陵全体にわたる城郭建設にかかり、慶長12年(1607)に完成させた。その城郭は周囲5.3km、総面積98万 m^2 に及ぶ広大な敷地を有している。

図-1に、熊本城周辺の表層地質図⁴⁾を示す。熊本城の天守や二の丸は中段丘面上にあり、地形は急崖が多く形成されており、浸食谷が点在している。周りは沖積低地に囲まれている。

また、熊本城跡の北西部には立田山断層が存在しており⁵⁾、熊本城の被災への影響を示唆するものである。

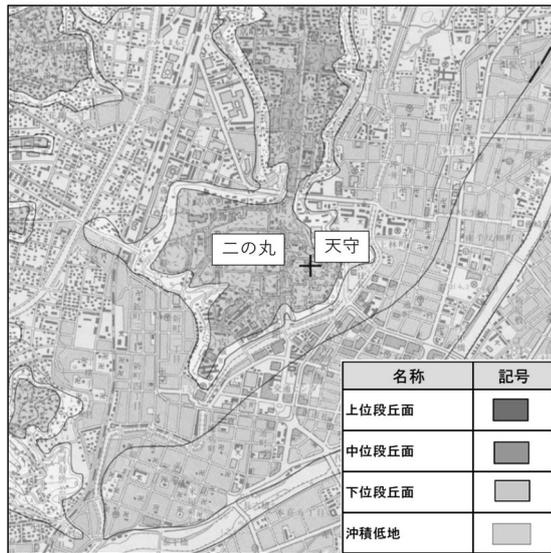


図-1 熊本城周辺の表層地質⁴⁾

(2) 地盤構成

熊本城内の震災前の昭和 33 年ならびに平成 27 年の天守閣北側の限られた範囲での計 12 本のボーリング調査結果からは、に地表面より深さ 10m 程度までは、 N 値が 10 前後の造成時の埋土や火山灰質砂・シルトで構成されている。深さ 50m までには、 N 値が 10~20 程度の火山灰質砂や風化が進行していると思われる凝灰角礫岩の層が存在する。さらに 50m 以深には、 N 値 50 超の安山岩の基盤層が存在することが確認されている。

3. 2016 年熊本地震による熊本城の被害

(1) 地盤の被害

国土地理院による地殻変動に関する熊本城の変動値は、上下動で -22cm、水平動では北から 57 度東の北東方向へ 51cm 動いている。

図-2 に、熊本城内の石垣被災箇所を示す。地震を受けた後の石垣背面に陥没や地割れが約 70 箇所、延べ面積で約 12,345m² が確認されている⁹⁾。これらのほとんどは、石垣の裏込めである栗石と盛土(地山)の境で生じており、地震動によって栗石が揺すり込み沈下したために発生したものと考えられている。

(2) 石垣の被害

熊本城の石垣は、本震後において 973 面(約 79,000m²)に被害が及んでいる。そのうち築石が崩落したのは全体面積の約 1 割にあたる 229 面(約 8,200m²)であり、緩みや膨らみのため積み直しを要するのは全体面積の約 3 割の 517 面(約 23,600m²)に及んでいる⁷⁾。

崩壊した石垣の特徴として、嘉村⁹⁾は以下のようにまとめている。

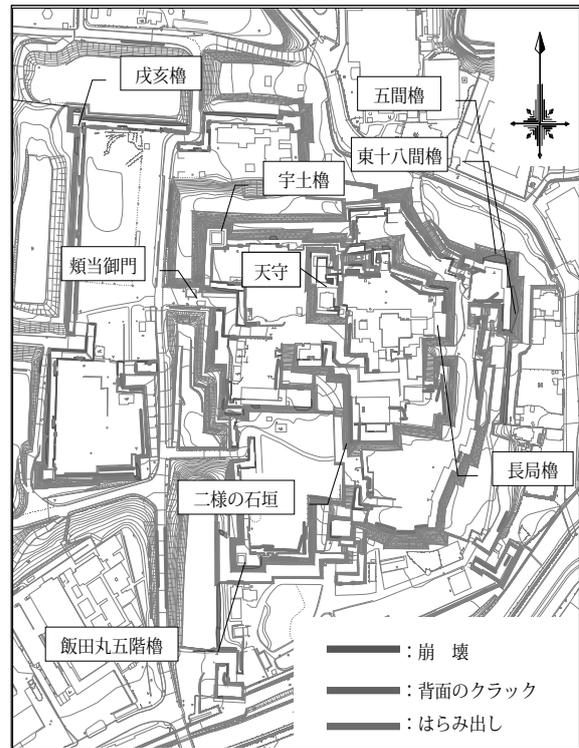


図-2 熊本城跡の石垣被災箇所
(熊本城調査研究センター提供資料より作成)

- ・大天守台など初期築造の緩い勾配をもつ石垣には大きな崩壊はない。
- ・急勾配は虎口と呼ばれる出入口部分は崩落が多い。
- ・高石垣の上部に孕み出しが多い。
- ・地盤、石垣ともに全体的に沈下している。
- ・石垣上面では地割れ、裏込栗石の沈下が起きている。
- ・明治 22 年地震での被災箇所の約 8 割で今回の地震でも被害を受けている。
- ・修復履歴のある石垣の被害が多い。

本研究では、この繰り返して被害が生じていることや、修復履歴のある石垣の被害が多いことに、特に着目した。

4. γ 線測定による地質的弱線の検出

(1) γ 線測定の目的

熊本城石垣の発生箇所を検討する中で、明治 22 年の地震(M6.3, 金峰山地震)と平成 28 年の熊本地震における被災箇所に関連が見られること、熊本城近傍には立田山断層が存在することから、熊本城内においても立田山断層から派生する地質的弱線の存在が考えられた。

図-3 に示すように、立田山断層の走向(NW-SE 方向)を考慮した上で石垣被災箇所を直線で結ぶと、4 本の直線が得られる。これらは地層断層や地質的弱線に対応するものと推定した。

吉村ら⁸⁾⁹⁾は、地表面における断層や地質的弱線の存在について、岩盤がもつ放射線(γ 線)の測定から位

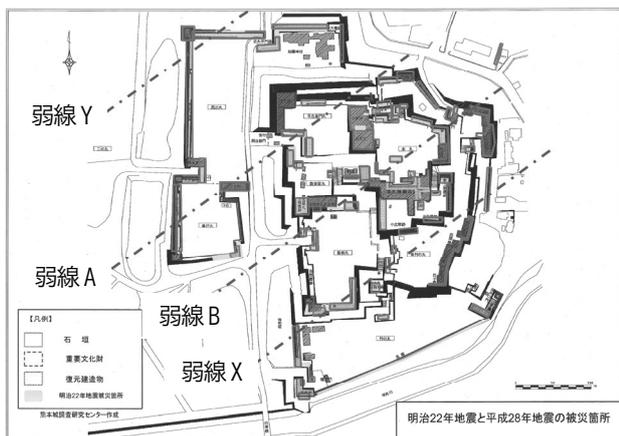


図-3 明治22年地震と平成28年地震の被災箇所の直線上分布から弱線 (Y, A, B, X) を設定

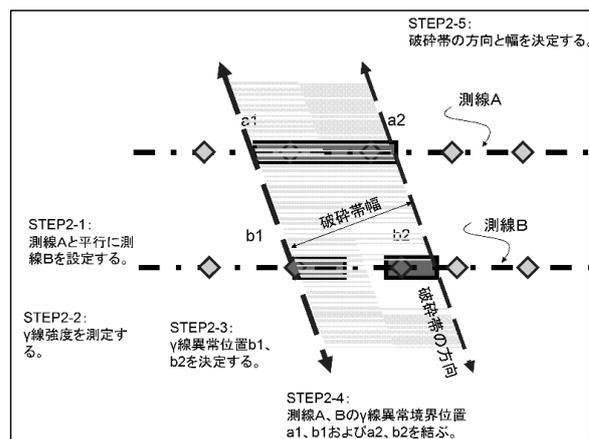


図-4 γ 線の計測による正常値と異常値境界の設定と幅・方向の設定方法

置・幅・方向を特定する技術開発に取り組んでいる。

本研究では、熊本城内に4本の地質的弱線（弱線A, B, X, Y）が存在すると仮定し、これら弱線上で γ 線を測定し、 γ 線強度の変化から弱線の存在を検証した。

(3) γ 線測定の方法

岩石や鉱物中にわずかに含まれる天然放射性元素が放出する γ 線の強度（放射線の数）を、 γ 線用シンチレーションカウンター（アロカ社製 TCS-151 型）で全計数法により計測した。測定はセンサー部分を地盤に密着させ、 γ 線強度 (Sv/h) を10秒おきに5回読み取り、その平均値を測定値とした。

図-4に示すように、弱線を横断する方向に γ 線強度を測定し、正常値と異常値の境界を2測線で求め、弱線位置と方向を確認した。

(4) γ 線の測定例

図-5に、 γ 線測定の代表例として弱線Aにおける測定結果を示す。測線距離5~15mにおいて γ 線の平均 6.74×10^2 ($\mu\text{Sv/h}$)に対し、測線距離10m前後では γ 線が 5.71×10^2 ($\mu\text{Sv/h}$)と大きく低下しており、この位置において幅1.4mの弱線が分布していると判断した。また平行する γ 線測線により得られた弱線分布のずれにより、弱線の方向（走行）はN57°Eと推定した。

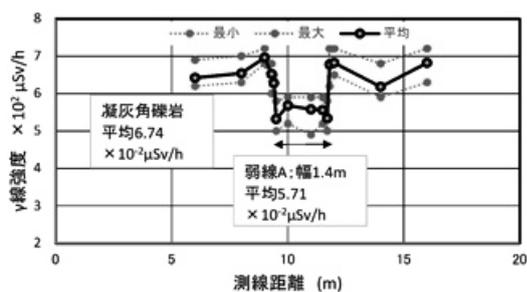


図-5 弱線A上における γ 線強度の分布

5. 表面波探査による表層地盤の調査

(1) 表層地盤調査の目的

熊本城石垣の被災要因として地盤の影響が考えられる。前章では γ 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。

(2) 表面波探査の測線と方法

図-6に、表面波探査の測線配置を示す。本丸で5測線（測線7~11）（図-7参照）、平左衛門丸で6測線（測線1~6）（図-8参照）、そして周辺で6測線（測線12~17）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、測線12~測線17は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。

(3) 表面波探査の結果

図-9(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る。

図-10(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、その下位に $V_s=240\sim 300\text{m/s}$ 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ともなって堆積していることが分かる。

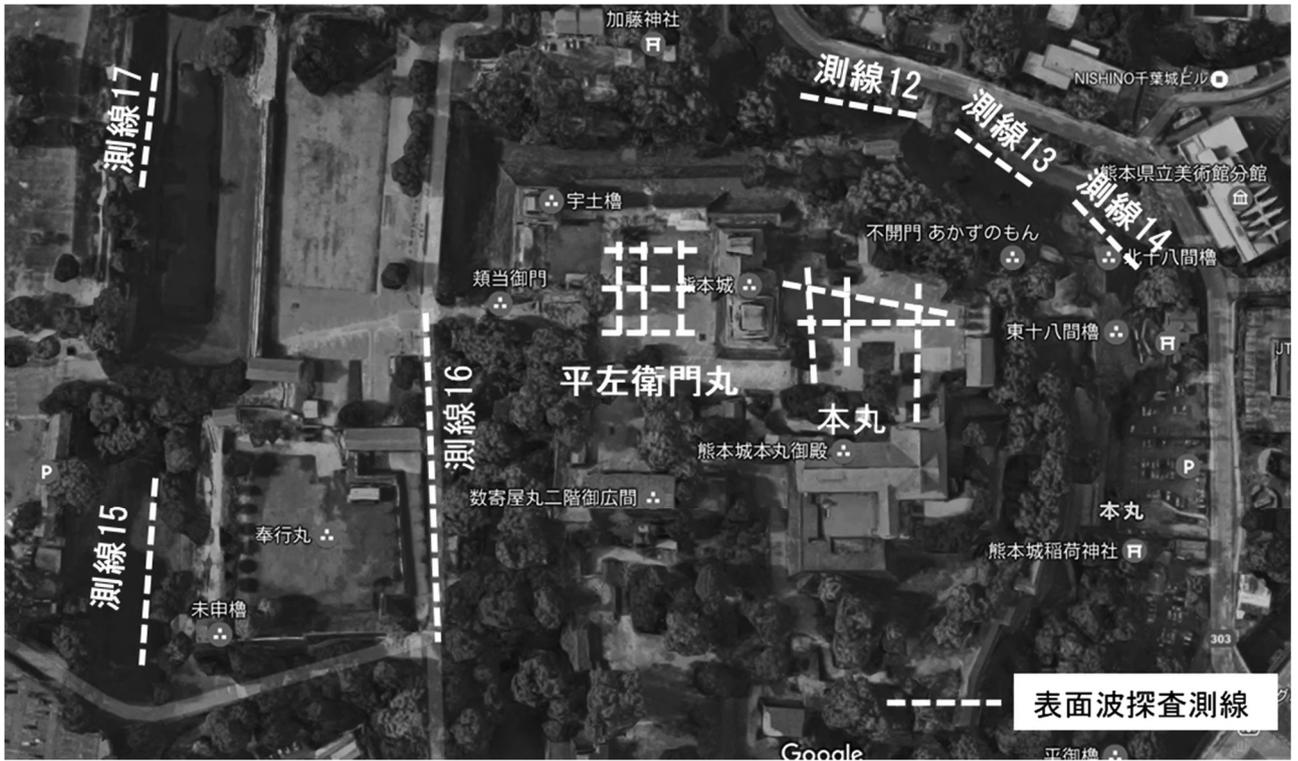


図-6 表面波探査の測線位置図 (全体図)

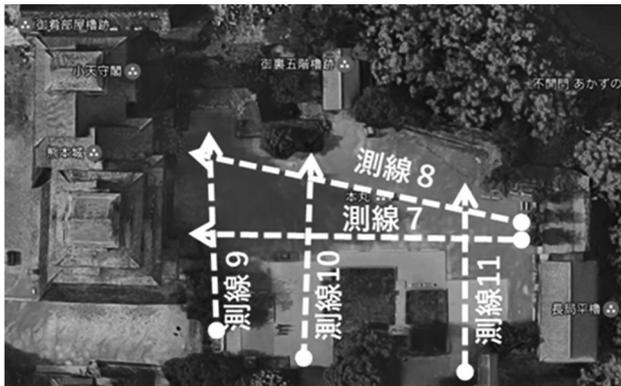


図-7 本丸における測線図

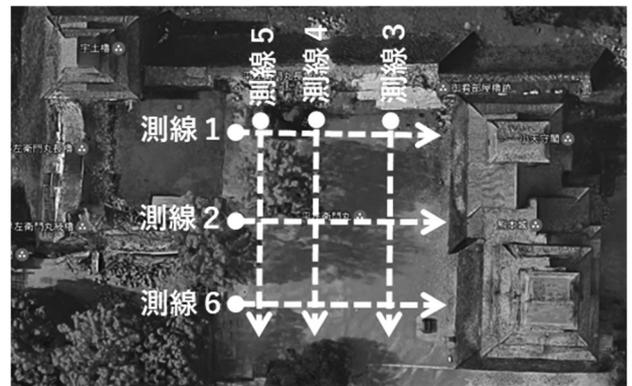


図-8 平左衛門丸における測線図

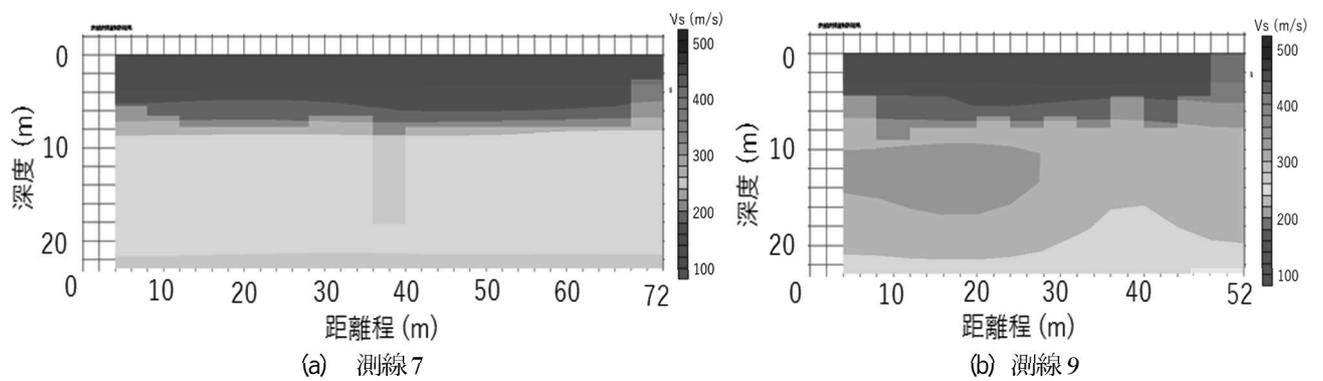


図-9 S波速度 V_s の解析断面 (本丸)

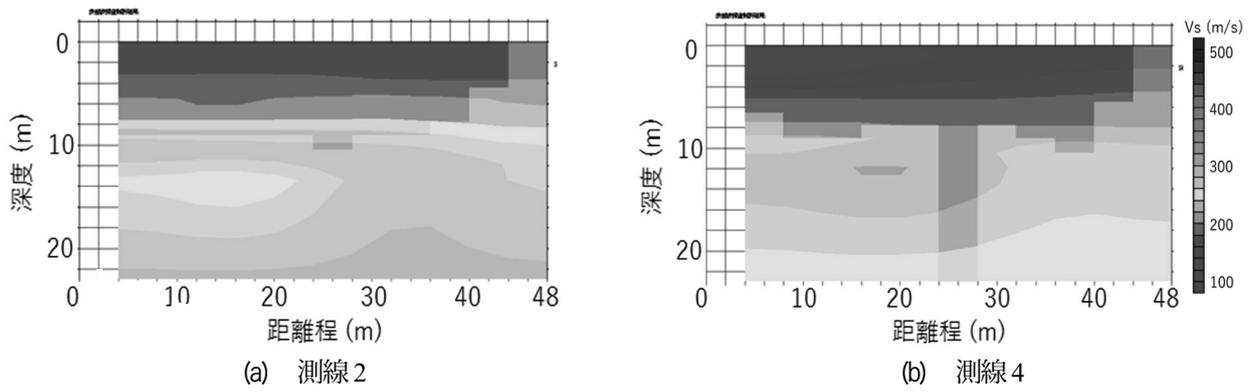


図-10 S波速度 V_s の解析断面（平左衛門丸）

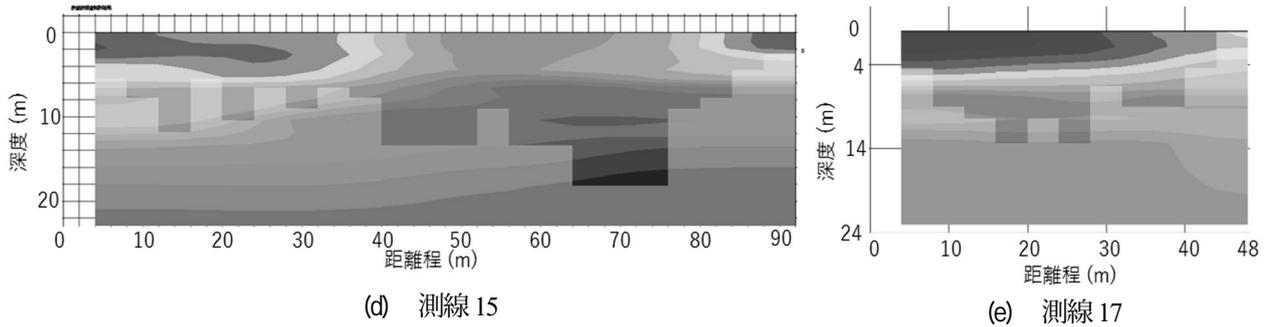
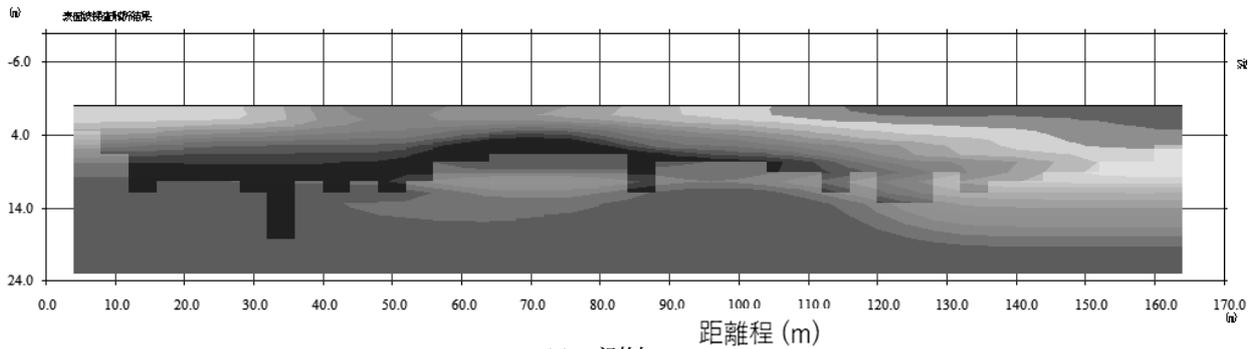
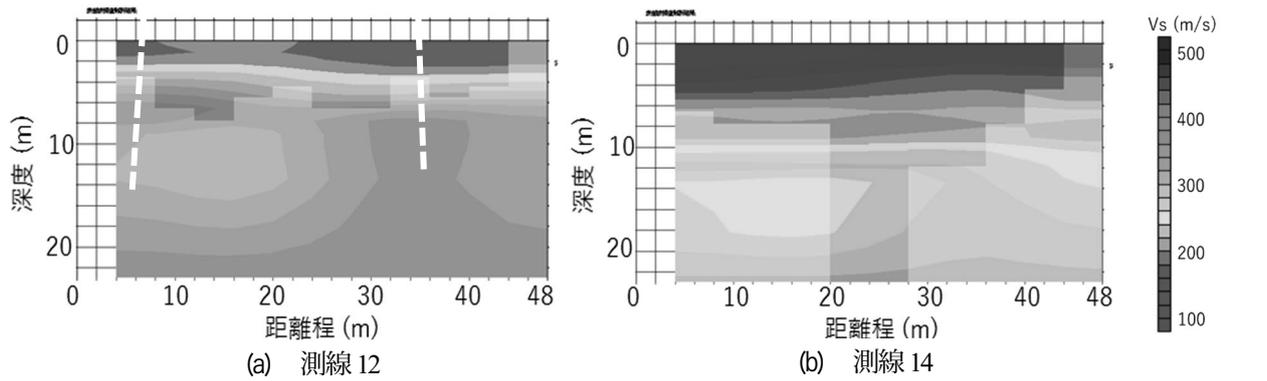


図-11 S波速度 V_s の解析断面（その他の測線）

(4) その他の測線におけるS波速度の解析断面

図-11(a)～(e)に、その他の測線でのS波速度の解析断面を示す。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 $V_s=200\sim400\text{m/s}$ の比較的締まった層が水平に厚く堆積している。

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。

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。

6. 常時微動測定による表層地盤の調査

(1) 常時微動測定の目的

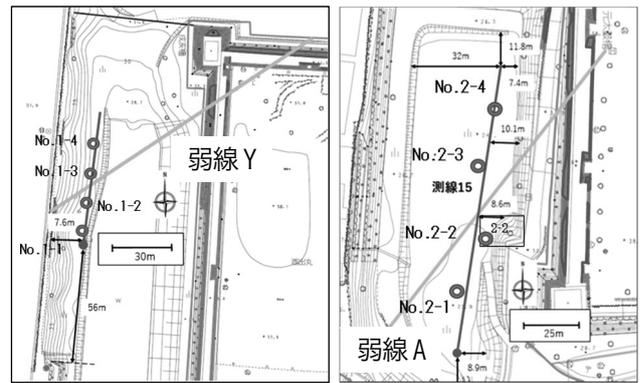
熊本城内の表層地盤について表面波探査を実施した結果、 γ 線測定で推測された弱線（地層の急変部）の存在は検出できなかった。表面波探査で検出できる深度（概ね 23m）よりも、より深い深度に地層の急変部が存在することが考えられたために、地盤物理探査手法の一つである常時微動測定を実施した。

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。

(2) 常時微動測定の測点と方法

常時微動測定の測点は、3章で示した弱線（図-3）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（図-12(a)参照）、薬研堀 4 地点（図-12(b)参照）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-MTNEO）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。



(a) 弱線 Y 上 (b) 弱線 A 上

図-12 常時微動測定位置図

(3) 常時微動測定の結果

弱線 Y が横断する薬研堀北側（表面波探査測線 No.17）と、弱線 A が横断する薬研堀（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-13 に示す薬研堀北側の堀での弱線 Y をまたいだ地点と、図-14 の薬研堀での弱線 A をまたいだ地点での、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-15 (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

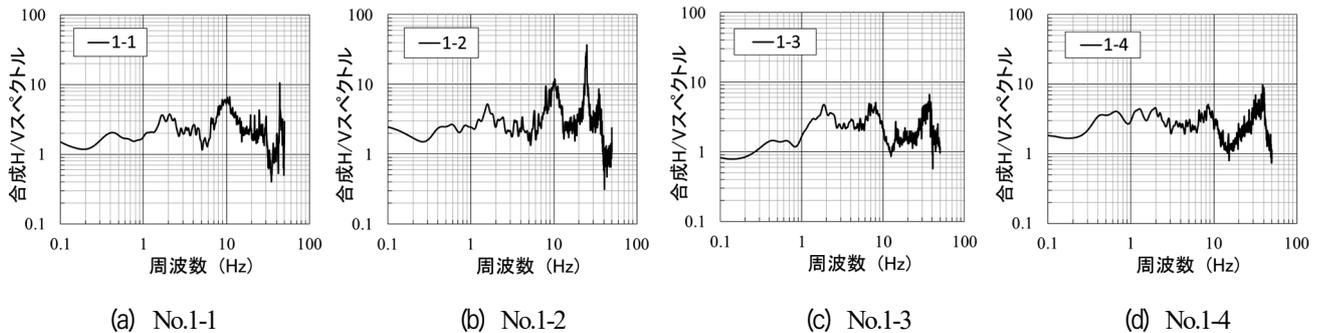


図-13 常時微動測定結果（弱線 Y 上）

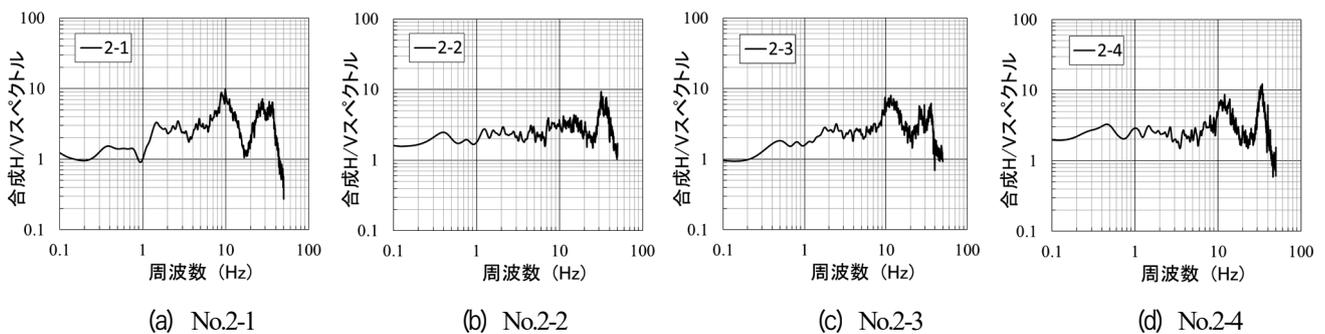


図-14 常時微動測定結果（弱線 A 上）

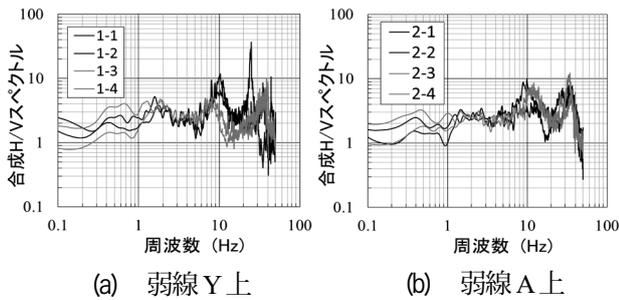


図-15 弱線を挟む常時微動特性の変化

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の形状に大きな違いは見られない。

また、他の γ 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、 γ 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。

7. 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、 γ 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。

謝辞：熊本市経済観光局熊本城総合事務所熊本城調査研究センターの嘉村哲也氏には、本研究における熊本城内での調査の実施に多大な便宜を図って頂きここに感謝の意を表する次第である。また本論文は、地盤工学会平成28年熊本地震地盤災害調査団歴史遺産関連班の調査活動の一部をまとめたものである。さらに、科学研究費(基盤研究(C), 17K06556, 研究代表者：山中稔)によるものを付記する。

参考文献

- 1) 地盤工学会平成28年熊本地震地盤災害調査団：歴史遺産関連班の調査活動，平成28年熊本地震地盤災害調査報告書，pp.223-242, 2017.4.22.
- 2) 杉本知史，山中 稔：熊本城の被災地盤構造物の調査報告，第54回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，京都大学防災研究所自然災害研究協議会，pp.45-51, 2017.9.14.
- 3) 勝田侑弥，杉本知史，山中 稔：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，土木史研究講演集，土木学会，Vol.38, pp.141-147, 2018.6.
- 4) 国土地理院：都市圏活断層図，http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/active_fault.html, 2016.
- 5) 渡辺一徳：活断層としての立田山断層，熊本地学会誌，No.85, pp.6-13, 1987.
- 6) 嘉村哲也：熊本地震による熊本城の被害と復旧，地質と調査，全国地質調査業協会連合会，Ser.150, pp.22-27, 2017.3.
- 7) 村崎孝宏：熊本地震による文化財被害と復旧の取組について，遺跡学研究，No.14, pp.202-205, 2017.
- 8) 吉村辰朗，松木宏彰： γ 線測定でみる断層破碎帯一本質的問題と今後の課題一，土と基礎，Vol.42, No.5, pp.41-46, 1994.
- 9) 吉村辰朗，大野正夫：断層破碎帯における帯磁率異常に伴う γ 線量の変化，物理探査，Vol.65, No.3, pp.151-160, 2012.

(2019. 4. 8 受付)

SURVEY OF SUBSURFACE LAYER BY GEOPHYSICAL EXPLORATION AT KUMAMOTO CASTLE

Minoru YAMANAKA, Satoshi SUGIMOTO, Naozo FUKUDA,
Hideki MAEDA and Tatsuro YOSHIMURA

So many stone of Kumamoto Castle walls were seriously damaged during 2016 Kumamoto Earthquake. These damaged stone walls seem to continue meaningfully on some straight lines, it can be considered that a subsurface layer changes suddenly along the straight line what is called a weak line.

In this study, in order to clear a distribution of subsurface layer in Kumamoto Castle and a relationship between the damage of stone wall and the weak line, the gamma-ray survey, the surface wave exploration and the microtremore survey that is one of geophysical exploration were carried out at many sites.

As a result, the distribution of surface wave velocity and the change of vibration spectrum on the measuring line that crosses over the weak line can not confirm a significant difference.