

論文 Original Paper

熊本城内の石垣を対象とした2次元地震応答解析（その2）

橋本隆雄*¹・磯部有作*²・松尾拓*³・石作克也*⁴

2D seismic response analysis of Ishigaki in Kumamoto Castle (2)

Takao Hashimoto*¹, Yusaku Isobe*², Taku Matsuo*³ and Katsuya Ishizukuri*⁴

Abstract: In this study, in order to estimate a three-dimensional geological model, a three-dimensional spatial model of the stratum was created from boring data and a geological profile using the Kriging method, which is one of the methods of geostatistics. A cross section including the target stone wall was cut out from the three-dimensional geological model, the geological composition of the ground behind the stone wall and the foundation ground was grasped, and dynamic analysis was performed by FEM. Since the purpose is not to express the phenomenon of the collapse behavior itself, but to use it in the seismic intensity method used for design in the future, the response acceleration calculated at the stone wall are calculated using FEM, which is a continuum analysis. Focusing on it, we analyzed the relationship with damage. As a result, it became possible to explain by understanding the relationship between the geological composition and the interaction between stone wall, and from the result of the maximum acceleration at the stone wall, the numerical analysis and the damage situation can be consistent.

Key words: Kumamoto castle, Kumamoto earthquake, stone wall, 3D geological model, dynamic analysis

1. はじめに

2016年4月14日と4月16日に発生した熊本地震で、住宅地などに多くの被害もたらした¹⁾。熊本市のシンボリック的存在である熊本城の大きな被害を受けた天守閣をはじめ、天守閣や本丸跡地を取り囲む石垣、塀、門、櫓などさまざまな文化的財産である建造物においても大きな被害となった。本研究の背景は、このような建造物が崩壊、一部損壊、孕みが発生した原因は、建造物の揺れの大きさだけでなく、地表面や建造物における応答加速度と、建造物の基礎となる地盤の地層構成に原因があることに着目し、その中でも石垣の被害形態と地盤との相互作用によるメカニズムの解明を目的とした。

さまざまな場所で石垣は被害を受けており、限られたボーリングデータから石垣の基礎や背面の地層構成は把握できている状態ではなかった。そこで、ボーリングデータと地質縦断図から地層の3次元空間モデルを作成した²⁾。

3次元地層モデルから対象とする石垣を含めた断面を切り出し、石垣の背後地盤や基礎地盤の地層構成を把握し、数値解析を行った。数値解析にはさまざまな手法が

あるが、本研究では、局所的な崩壊挙動そのものの現象を表現することではなく、将来的に設計に用いる震度法などに用いることを目的としているため、地盤全体の挙動や応答が把握できる連続体解析のFEMを用い、石垣位置でFEMから得られる応答加速度や応答速度に着目し、被害との関係性を分析することとした。

被害状況について、熊本城石垣の変状分析^{3), 4)}が行われているが、本研究においても現地視察や調査を事前に行い被害状況を確認している^{5), 6)}。石垣崩壊そのものを対象とせず全体の傾向や関係の分析を目的としているが、本稿においては、既往検討とは別の位置における分析結果について報告する。

2.3 次元地質モデル

熊本城のような建造物は、堀、塀、石垣、盛土、櫓、天守閣など様々な構造から成り立っており、平面的に見ても規則的な構造ではなく、3次元的に複雑な構造となっている。そのため、地盤内の地層分布も地山、盛土、掘削などにより複雑になっている。ボーリングデータから3次元的な地層分布を把握することで地盤と建造物の相互関係を明らかにすることができる。そこで既往の研究において3次元的に地層分布の推定を行っており、本研究においてもこの3次元モデルを用いて対象となる箇所を切断し2次元解析用のモデルを作成した。3次元地質モデルの俯瞰図を図-1に示す。

*¹国土舘大学 理工学部まちづくり学系 教授*²株式会社IMAGEi Consultant 代表取締役*³株式会社日測 業務推進室主任*⁴株式会社日測 取締役

2. 動的FEM解析による数値解析条件

作成した3次元空間モデルより任意の断面を抽出し、等価線形法⁷⁾によるFEM動的解析を行った。

2.1 石垣の構造タイプ

熊本城石垣のタイプは、本論文では図-2に示すように3つに分類している。

- ①石墨タイプ：石垣の内部が栗石のみで構成されているもの。平地に突出して建つ櫓台や郭部の石垣など。
- ②半石墨タイプ：石垣が背面側の地面より立ち上がり、背面が栗石層と地山（盛土）で構成されているもの。
- ③非石墨タイプ：石垣が築石と栗石層からなり、背面側の地面より立ち上がりがなく背面が栗石層と地山のもの。

本研究において、この分類の中から、非石墨に分類した箇所断面を切り出し、解析を行った。非石墨では石垣背面が盛土となっている場合で、この盛土の剛性が小さいため、揺れやすくなると考えられ、石垣上部から崩壊したものと推察している。

2.2 非石墨タイプの崩壊箇所

石垣上部が崩壊しているA2（長局櫓北側石垣）、J1（百間石垣）、FK21（北十八間櫓）の様子を順に図-3～図-5に示す。これらは図-6の赤丸で記した位置にあり、



図-3 A2（長局櫓北側石垣）崩壊の様子



図-4 J1（百間石垣）崩壊の様子

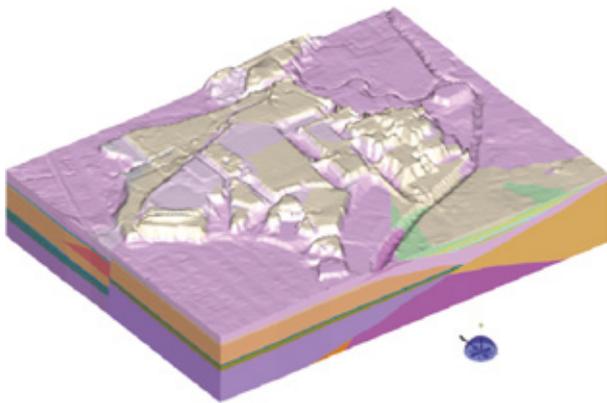


図-1 3次元全体俯瞰図



図-5 FK21（北十八間櫓）崩壊の様子

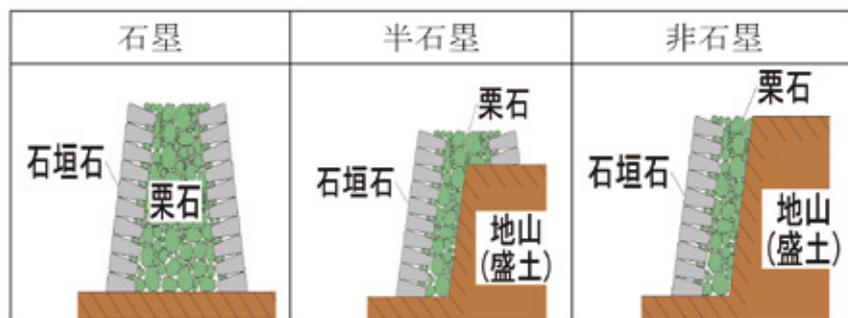


図-2 石垣構造のタイプ

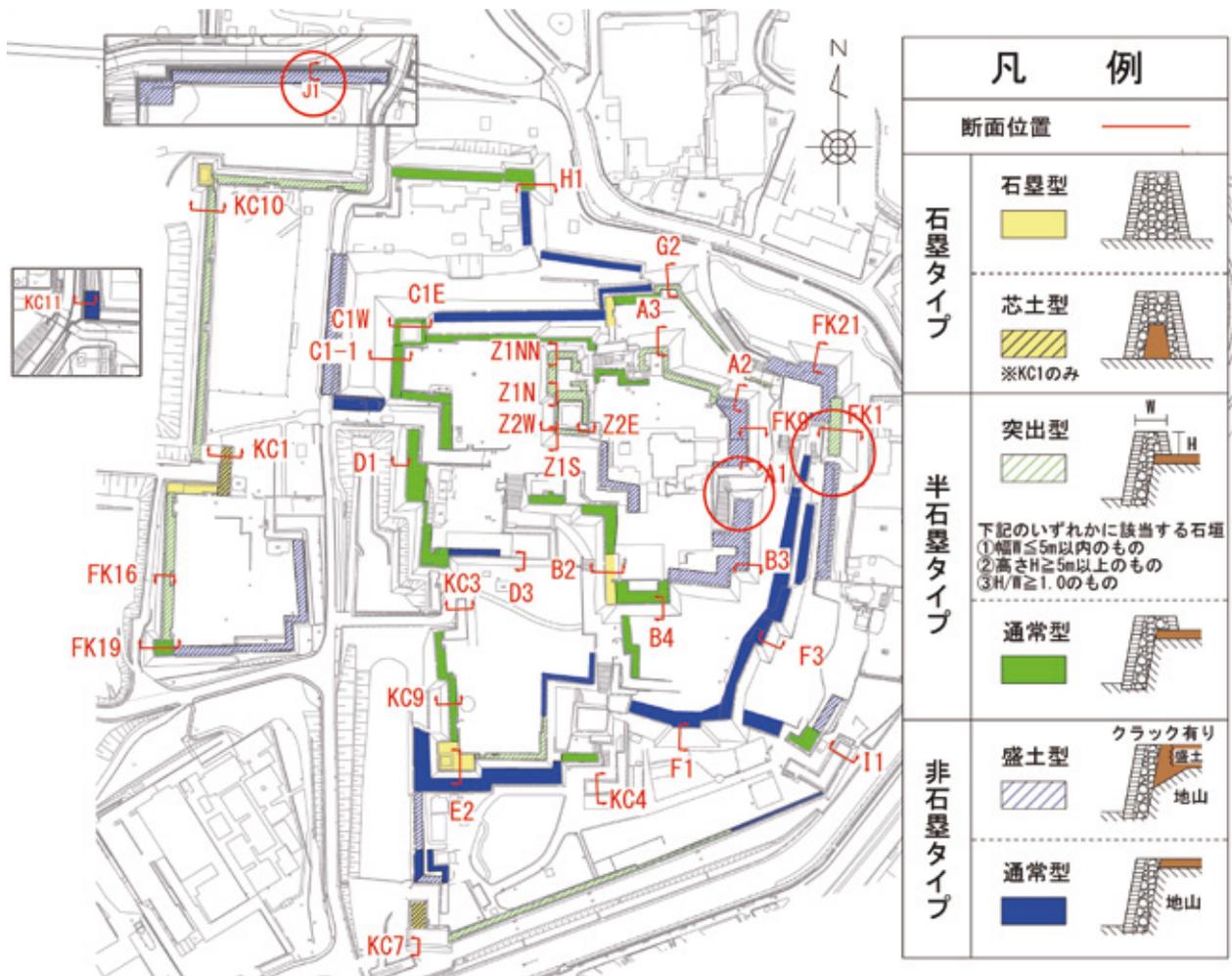


図-6 石垣タイプ及び検討断面位置図

図-6の凡例で示しているように非石塁のなかでも、石垣の下方は地山に支えられているが、石垣上部背面の盛土が厚く堆積している構造である。ゆえに盛土が増幅して石垣上部が大きく揺れ、崩壊を至ったと推察する。

2.3 解析断面

A2（長局櫓北側石垣）の形状は、高さ13.5m、勾配65.1度で図-7に示す。J1（百間石垣）の形状は、高さ10.5m、勾配73.0度で図-8に示す。FK21（北十八間櫓）の形状の形状は、高さ18.8m、勾配63.7度で図-9に示す。各図とも着色されたプロットが該当箇所の勾配を示す。なお、赤線でプロットした範囲が崩壊した位置を示す。

A2（長局櫓北側石垣）、J1（百間石垣）、FK21（北十八間櫓）の解析メッシュ図を図-10～図-12に示す。

2.4 境界条件

境界条件は、図-13に示すように側方境界にはエネルギー伝達境界を用いた。解析対象領域内で反射され逸散する波動のエネルギーはこの境界条件で吸収する特性があるため、自由地盤からの反射の影響は受けることが無

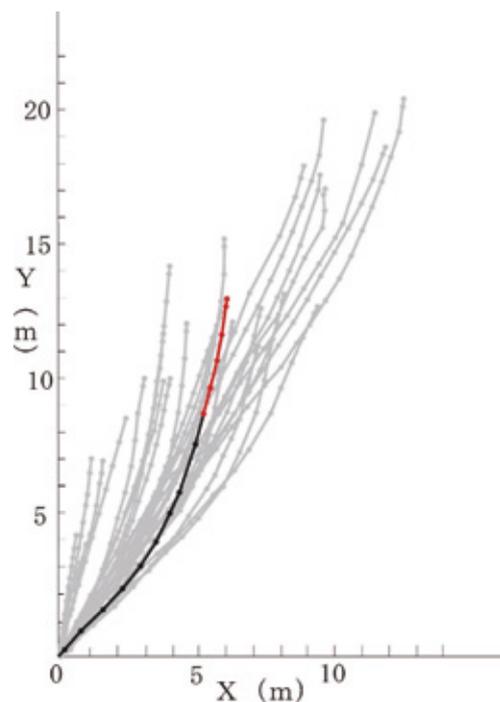


図-7 A2（長局櫓北側石垣）の形状

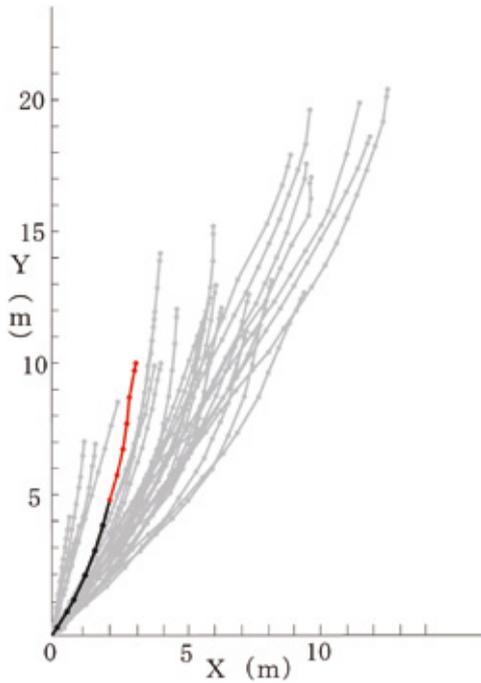


図-8 J1 (百間石垣) の形状

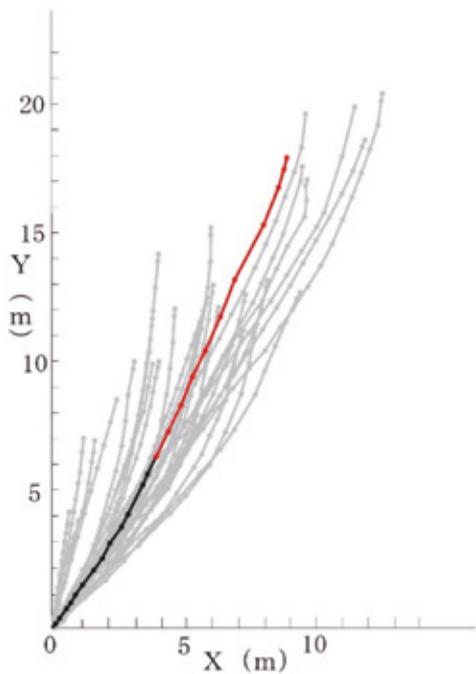


図-9 FK21 (北十八間槽) の形状

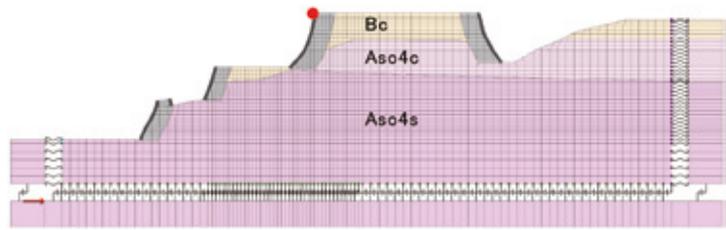


図-10 A2 (長局槽北側石垣) の解析メッシュ図

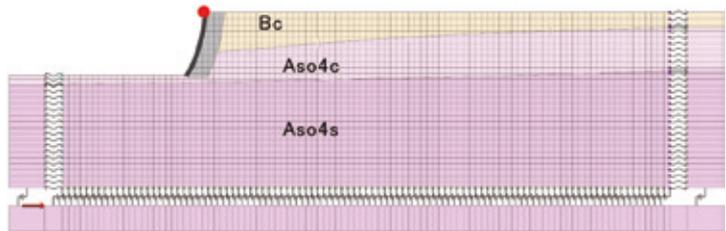


図-11 J1 (百間石垣) の解析メッシュ図

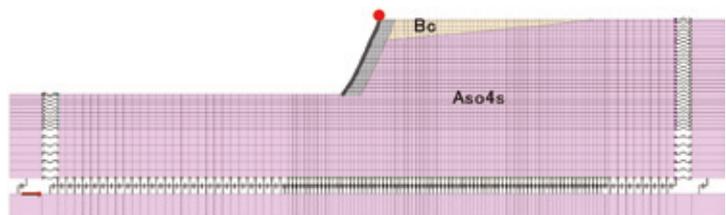


図-12 FK21 (北十八間槽) の解析メッシュ図

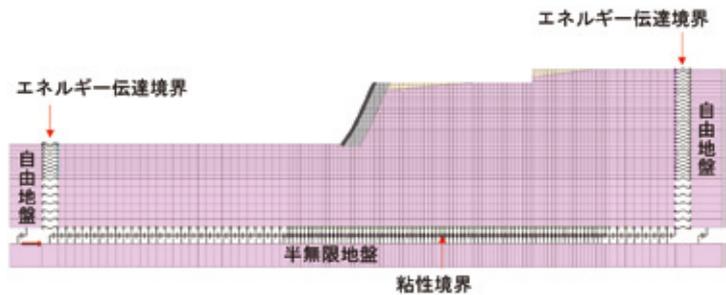


図-13 境界条件図

表-1 地盤の物性値

土層名	質量密度 $\rho(t/m^3)$	N値	N値換算の せん断波速 $V_s(m/s)$	PS検層 $V_s(m/s)$	せん断 弾性係数 $G_0(kPa)$
石材	2.00		300		180000
栗石	2.00		300		180000
Bc	1.70	-	-	100.0	17000
Aso-4c	1.50	3	144.2	185.0	51300
Aso-4s	1.70	22	224.2	425.0	307100

い。底面境界には粘性境界を設定し下方を半無限地盤としている。入力地震動は底面より入力する。

2.5 入力地震動

入力地震動は、熊本市中央区の消防署で観測された観測波を基盤に引戻した後、図-14に示すように平面的に断面方向が東西、南北方向にそれぞれEW方向とNS方向の地震動を解析用の入力波とした。

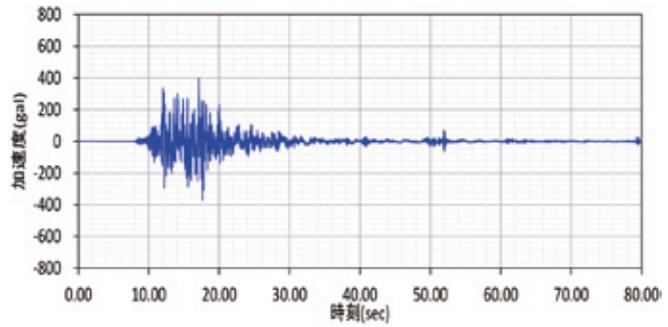
2.6 入力物性値

砂質土の動的変形特性を算出する式（土木研究所の式）により設定した。基盤以浅の地層構成は阿蘇4火砕流堆積物が主な堆積物で同年代の地層であり、埋土も築城から数百年経過しており場内範囲内での状態は平均的であるとした。

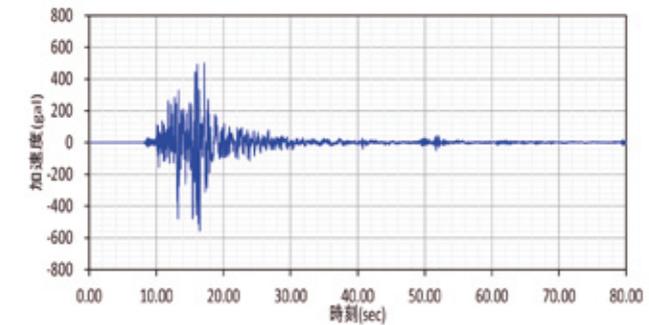
3. 動的FEM解析による数値解析結果

A2（長局櫓北側石垣）の応答加速度結果を図-15に示す。(a) 最大応答加速度分布結果をみると盛土である地表面付近で最大応答加速度は大きくなっていることがわかる。着目点として (a) に示す石垣天端位置と石垣底面位置の時刻歴応答加速度結果を (b), (c) に示している。底面の最大応答加速度は537.8galであるが、天端では1167.7galと増幅している。同様に、J1（百間石垣）およびK21（北十八間櫓）の応答加速度結果をそれぞれ図-16および図-17に示す。J1（百間石垣）も (a) 最大応答加速度分布結果をみると盛土である地表面付近で最大応答加速度は大きくなっている。石垣天端位置と石垣底面位置の時刻歴応答加速度結果を (b), (c) に示しているように、底面の最大応答加速度は476.4galであるが、天端では799.2galと増幅している。FK21（北十八間櫓）の (a) 最大応答加速度分布結果をみると盛土部分で最大応答加速度は大きくなっている。石垣天端位置と石垣底面位置の時刻歴応答加速度結果を (b), (c) に示しているように、底面の最大応答加速度は424.1galであるが、天端では880.7galと増幅している。表-2に最大応答加速度の結果一覧を示す。

これらの結果は同じ傾向であることを示した。

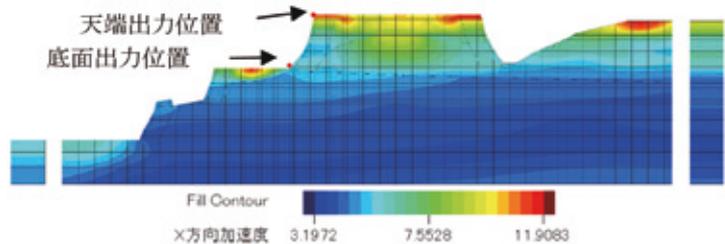


(a) EW方向

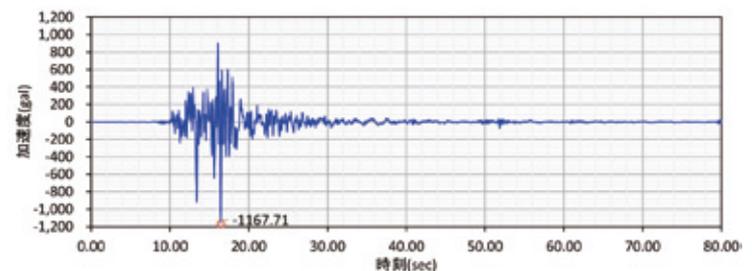


(b) NS方向

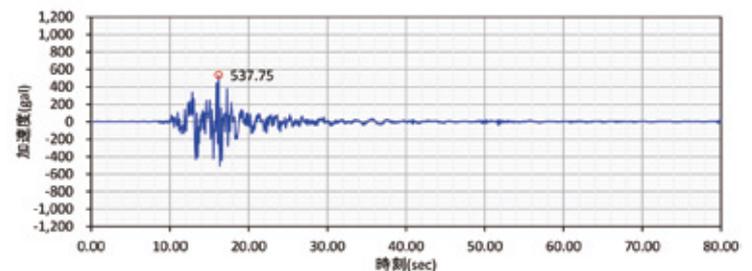
図-14 入力地震動



(a) 最大応答加速度分布結果

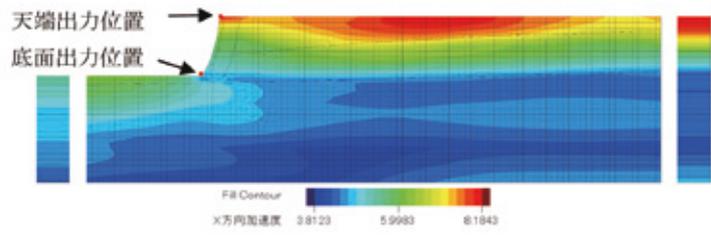


(b) 石垣天端の時刻歴応答加速度結果

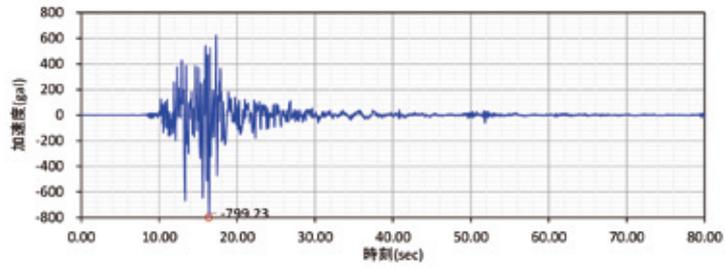


(c) 石垣底面の時刻歴応答加速度結果

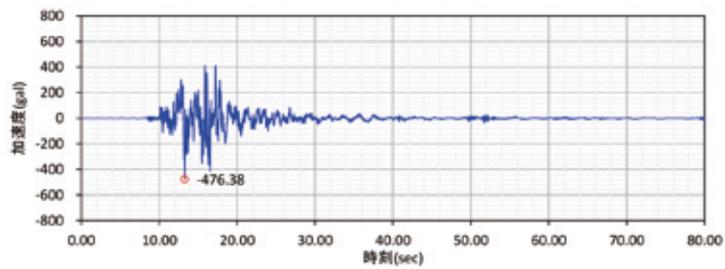
図-15 A2（長局櫓北側石垣）の応答加速度結果



(a) 最大応答加速度分布結果



(b) 石垣天端の時刻歴応答加速度結果

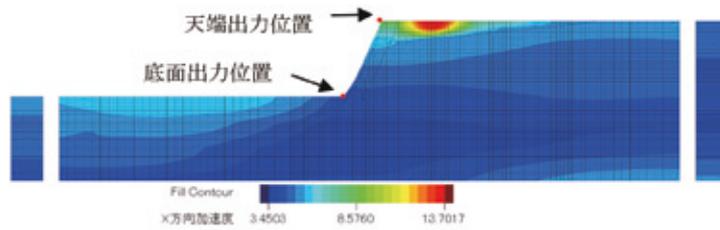


(c) 石垣底面の時刻歴応答加速度結果

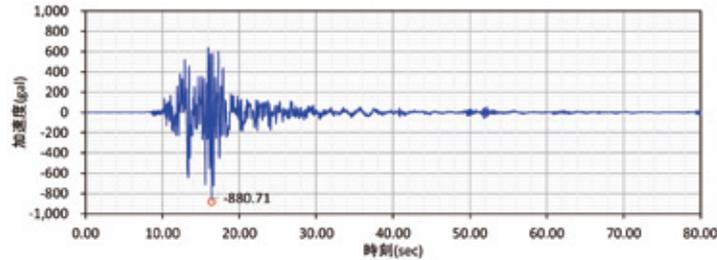
図-16 J1 (百間石垣) の応答加速度結果

表-2 最大応答加速度結果 (gal)

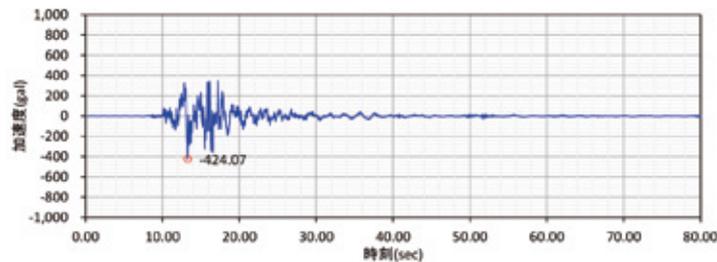
断面	石垣底面	石垣天端
A2(長局櫓北側石垣)	537.75	1167.71
J1(百間石垣)	476.38	799.23
FK21(北十八間櫓)	424.07	880.71



(a) 最大応答加速度分布結果



(b) 石垣天端の時刻歴応答加速度結果



(c) 石垣底面の時刻歴応答加速度結果

図-17 FK21（北十八間櫓）の応答加速度結果

4. ま と め

本研究で検討した箇所では、いずれも石垣が地山に支持されているながらも、石垣背面に盛土された構造であった。それゆえ、石垣上部で崩壊が起きたと推察していた。その検証として動的FEM解析を行い、解析から応答加速度の結果を確認したところ、いずれの断面においても石垣底面では入力加速度に比べて大きく増幅しないが、石垣天端ではかなり増幅している結果が得られたことから、盛土の揺れが大きくなったと言える。つまり、盛土の揺れの大きさが石垣上部で崩壊の原因であったと説明できる。

本研究では、非石畳に分類した箇所での被害との関係性を検証した。今後は別の石畳タイプの検証を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：地震被害調査シリーズ No.1, 2016年熊本地震被害調査報告書, 2017
- 2) 橋本隆雄, 磯部有作, 松尾拓, 石作克也：熊本城内の石垣を対象とした3次元地盤モデルの構築と2次元地震応答解析, 国土館大学理工学部紀要 Vol. 14, pp.113-119, 2021.
- 3) 神谷圭祐, 菊本統, 橋本涼太, 桑島流音, 小山倫史：2016年熊本地震による熊本城石垣の変状の分析, 自然災害科学, Vol. 37 特別号, pp.1-16, 2018.
- 4) 小山倫史, 菊本統, 橋本涼太, 桑島流音：平成28年（2016年）熊本地震における熊本城の城郭石垣の被害調査およびその分析, 社会安全学研究, pp.53-64, 2017.
- 5) 橋本隆雄, 石作克也：3次元レーザースキャナによる熊本城石垣等調査, 第2回擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 7, pp.87-95, 2017.
- 6) 橋本隆雄, 石作克也, 松尾拓：熊本城の石垣タイプと被害の相関についての研究, 国土館大学理工学紀要論文, Vol. 12, pp.247-259, 2019.
- 7) Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972.