

## 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3）

橋本隆雄\*<sup>1</sup>・磯部有作\*<sup>2</sup>・松尾拓\*<sup>3</sup>・石作克也\*<sup>4</sup>

## 2D seismic response analysis of Ishigaki in Kumamoto Castle (3)

Takao Hashimoto\*<sup>1</sup>, Yusaku Isobe\*<sup>2</sup>, Taku Matsuo\*<sup>3</sup> and Katsuya Ishizukuri\*<sup>4</sup>

**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<sup>1)</sup>。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、図-1に示すように天守閣や本丸跡地を取り囲む石垣、塀、門、櫓など様々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。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。

様々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<sup>2)</sup>。

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。数値解析には様々な手法があるが、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<sup>3), 4)</sup>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<sup>5), 6)</sup>。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。



図-1 頼当御門周辺の石垣崩壊

\*<sup>1</sup> 国土舘大学 理工学部まちづくり学系 教授

\*<sup>2</sup> 株式会社IMAGEi Consultant 代表取締役

\*<sup>3</sup> 株式会社日測 業務推進室主任

\*<sup>4</sup> 株式会社日測 取締役

## 2. 3次元地質モデル

熊本城のような構造物は、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次元的地層分布を把握することで地盤と構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-2に示す。

### 3. 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<sup>7)</sup>によるFEM動的解析を行った。

#### 3.1 石垣の構造タイプ

熊本城石垣のタイプは、本論文では表-1に示すように3つに分類している。

- ①石垣タイプ：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半石垣タイプ：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非石垣タイプ：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、非石垣に分類し

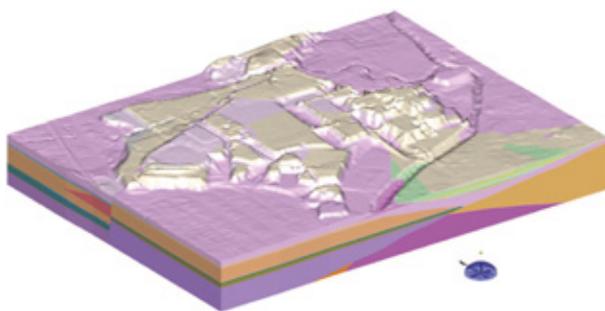


図-2 3次元全体俯瞰図

表-1 石垣構造のタイプ

石垣	半石垣	非石垣

た箇所の断面を切り出し、解析を行った。非石垣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既往の事例では推察した<sup>8)</sup>。本検討では、崩壊には至らなかったがはらみが生じた箇所についての分析を行った。

#### 3.2 非石垣タイプのはらみ箇所

はらみの様子は写真からではわかりにくいので、B3（本丸御殿南西側石垣）、FK9（長局櫓）、A1（長局櫓）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-6の凡例で示しているように非石垣は、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やすいと推察する。



図-3 B3（本丸御殿南西側石垣）の様子



図-4 FK9（長局櫓）の様子



図-5 A1（長局櫓）の様子

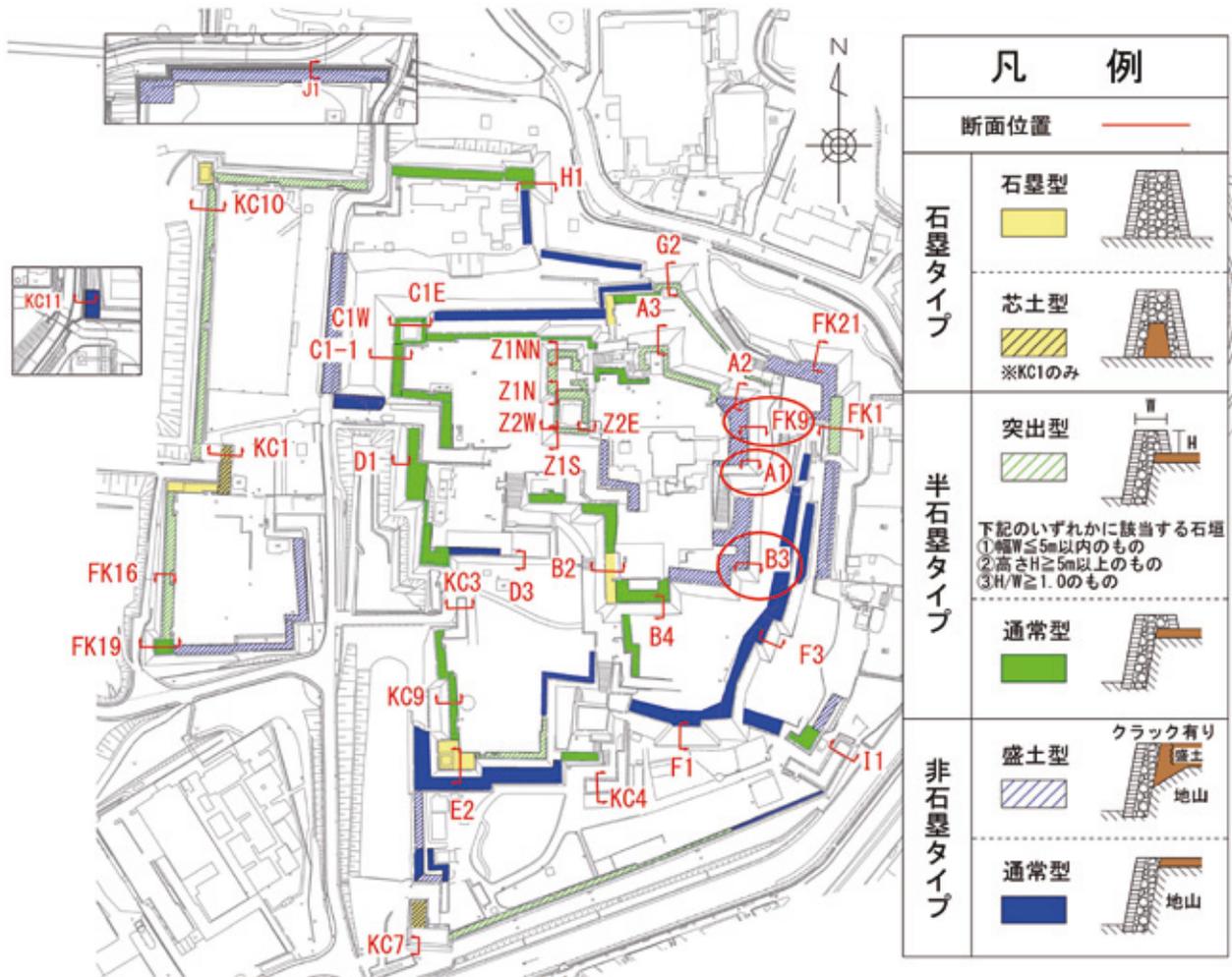


図-6 石垣タイプ及び検討断面位置図

なお、FK9とA1は長局櫓の近い位置関係にあり、同じような挙動が起きたと考えられる。

### 3.3 解析断面

B3（本丸御殿南西側石垣）の形状は、高さ11.5m、勾配58.1度で図-7に示す。FK9（長局櫓）の形状は、高さ12.5m、勾配65.1度で図-8に示す。A1（長局櫓）の形状の形状は、高さ12.5m、勾配65.1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勾配を示す。なお、黄色線でプロットした範囲がはらみの位置を示す。

B3（本丸御殿南西側石垣）、FK9（長局櫓）、A1（長局櫓）の解析メッシュ図を図-10～図-12に示す。

### 3.4 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。

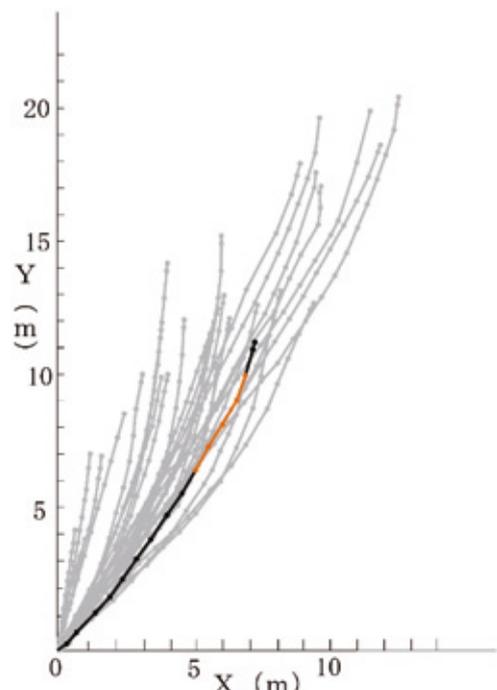


図-7 B3（本丸御殿南西側石垣）の形状

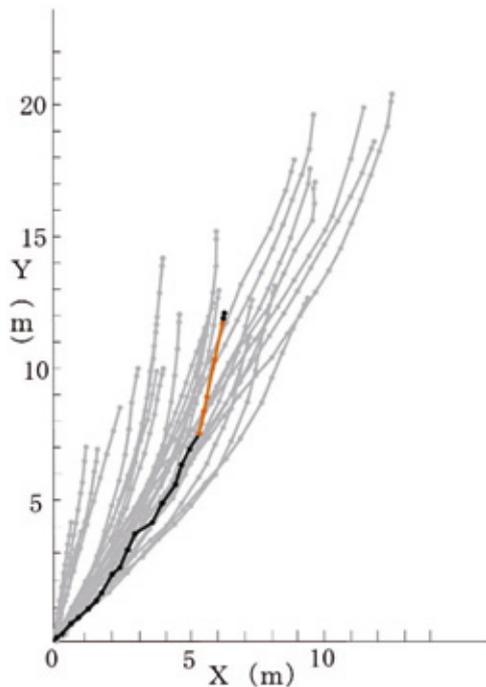


図-8 FK9 (長局槽) の形状

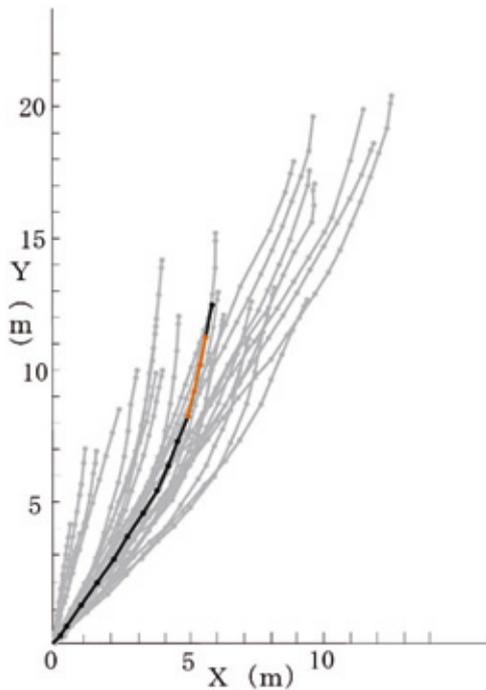


図-9 A1 (長局槽) の形状

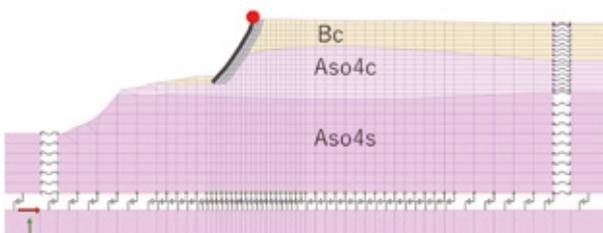


図-10 B3 (本丸御殿南西側石垣) の解析メッシュ図

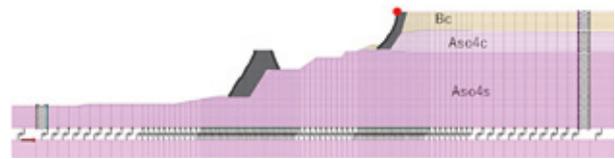


図-11 FK9 (長局槽) の解析メッシュ図

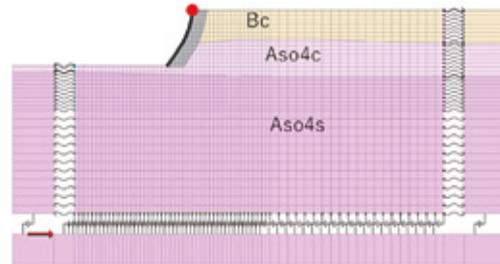


図-12 A1 (長局槽) の解析メッシュ図

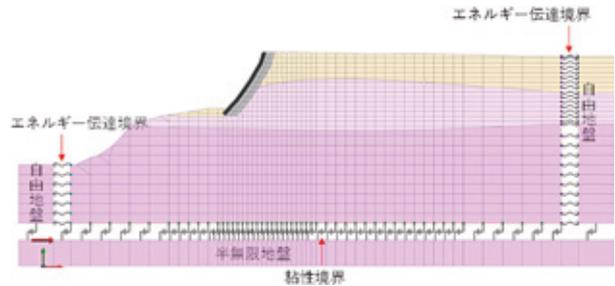


図-13 境界条件図

### 3.5 入力地震動

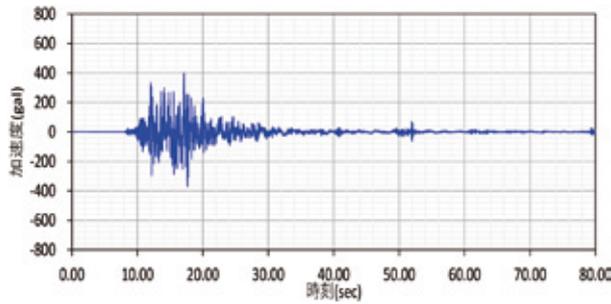
入力地震動は、熊本市中央区の消防署で観測された観測波を基盤に引戻した後、図-14に示すように平面的に断面方向が東西、南北方向にそれぞれEW方向とNS方向の地震動を解析用の入力波とした。

### 3.6 入力物性値

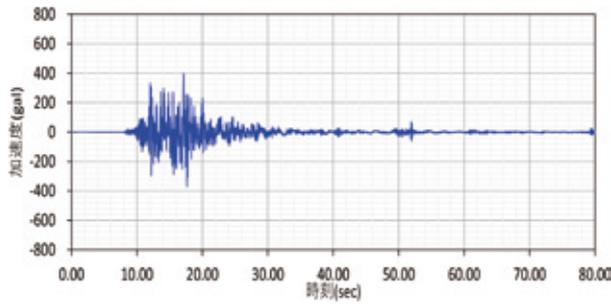
表-2に示す地盤の物性値を入力し、動的変形特性は、建設省土木研究所で行われた動的変形試験で、沖積粘性土、砂質土の動的変形特性を算出する式(土木研究所の式)により設定した。基盤以浅の地層構成は阿蘇4火砕流堆積物が主な堆積物で同一年代の地層であり、埋土も築城から数百年経過しており場内範囲内での状態は平均的であるとした。

## 4. 動的FEM解析による数値解析結果

B3(本丸御殿南西側石垣)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406.4gal、天端では668.8galとやや増幅している。同様に、FK9(長局槽)



(a) EW方向



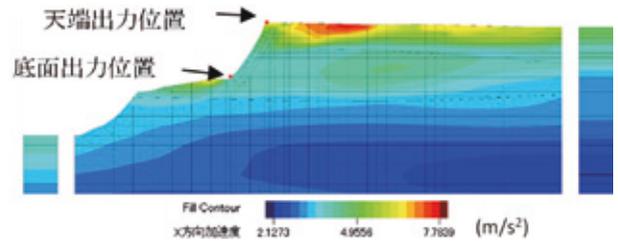
(b) NS方向

図-14 入力地震動

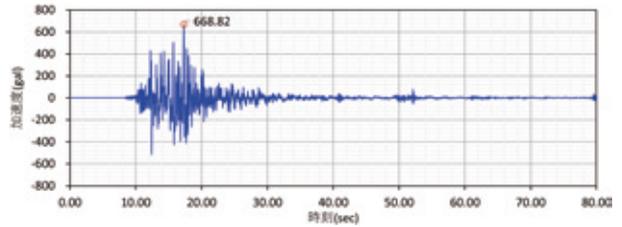
表-2 地盤の物性値

土層名	質量密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	N値	N値換算のせん断波速 Vs(m/s)	PS検層 Vs(m/s)	せん断弾性係数 G <sub>0</sub> (kPa)
石	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

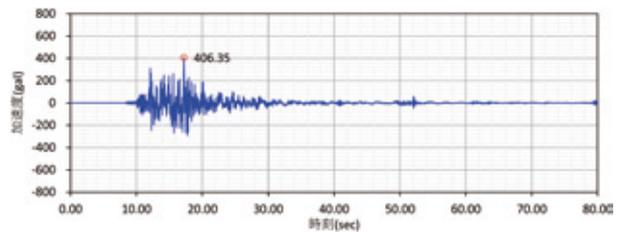
およびA1（長局槽）の応答加速度結果をそれぞれ図-16および図-17に示す。FK9（長局槽）も（a）最大応答加速度分布結果をみると盛土である地表面付近で最大応答加速度は大きくなっている。石垣天端位置と石垣底面位置の時刻歴応答加速度結果を（b）、（c）に示しているように、底面の最大応答加速度は347.9galであるが、天端では623.5galと増幅している。A1（長局槽）においても（a）最大応答加速度分布結果をみると盛土部分で最大応答加速度は大きくなっている。石垣天端位置と石垣底面位置の時刻歴応答加速度結果を（b）、（c）に示しているように、底面の最大応答加速度は371.5galであるが、天端では685.6galと増幅している。表-3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) 最大応答加速度分布結果

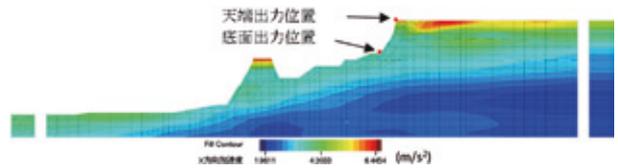


(b) 石垣天端の時刻歴応答加速度結果

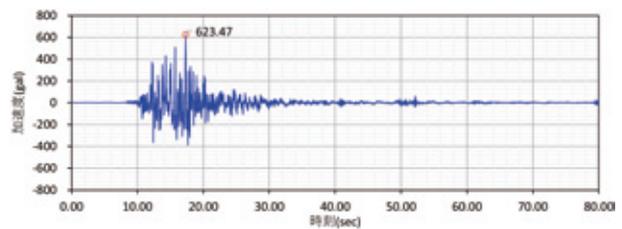


(c) 石垣底面の時刻歴応答加速度結果

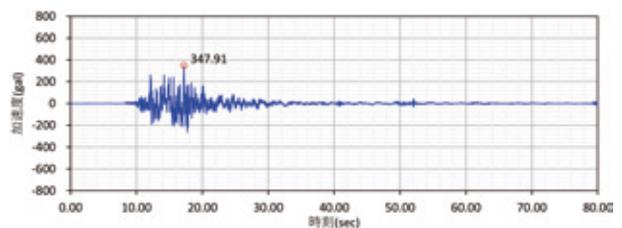
図-15 B3（本丸御殿南西側石垣）の応答加速度結果



(a) 最大応答加速度分布結果

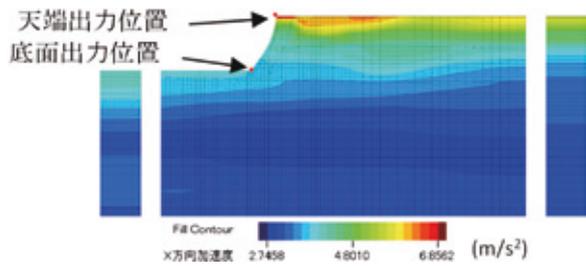


(b) 石垣天端の時刻歴応答加速度結果

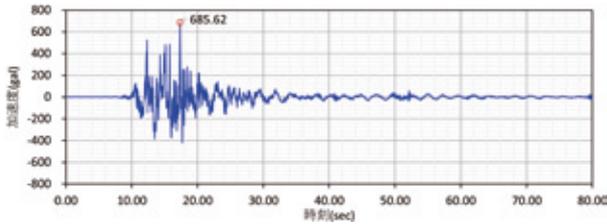


(c) 石垣底面の時刻歴応答加速度結果

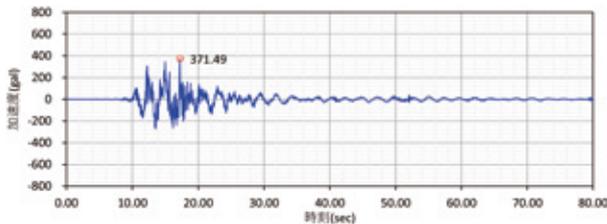
図-16 FK9（長局槽）の応答加速度結果



(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-17 A1(長局櫓)の応答加速度結果

表-3 最大応答加速度結果 (gal)

断面	石垣底面	石垣天端
B3(本丸御殿南西側石垣)	406.4	668.8
FK9(長局櫓)	347.9	623.5
A1(長局櫓)	371.5	685.6

表-4 石垣が崩壊した箇所の最大応答加速度結果 (gal) <sup>8)</sup>

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

### 5. 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にもかかわらず、石垣背面に盛土された構造であった。それゆえ、盛土部が大きく揺れ石垣上部で大きな変状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や大きな変状の原因であったと説明できる。

また、表-4に既往検討<sup>8)</sup>での石垣が崩壊した箇所での応答解析結果が示すように、今回の検討での応答加速度はやや小さく、崩壊には至らず、はらみ程度の変状となったものと考えられ、応答加速度の大小による揺れの大きさが変状の違いとなったと考えられる。しかし、ほぼ同じような地層構成で同じ形状の石垣であるにもかかわらず、被害が起きた箇所と起きなかった箇所での原因は2次元の断面解析からだけでは説明することが容易ではないが、被害が無かった本検討での石垣構造は、わずかであるが勾配が緩いまたは高さが低いということが一つ要因と考えられる。また、3次元的な奥行き方向の加速度や地形の影響によることも考えられ、今後の課題である。

### 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, 国士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, 国士館大学理工学部紀要論文, 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.
- 8) 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2次元地震応答解析(その2), 国士館大学理工学部紀要論文, Vol. 16, pp.17-23, 2023.