

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

橋本隆雄*¹・磯部有作*²・松尾拓*³・石作克也*⁴

3D geological modeling and 2D seismic response analysis of Ishigaki in Kumamoto Castle

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 and response velocity 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 velocity 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。3次元地層モデルの推定には、地球統計学の手法の一つであるクリギング法を用いた。

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、FEMによる動的解析を行った。数値解析にはさまざまな手法がある。石垣と背後地盤は不連続であるため個別要素法 (DEM) や不連続変形法 (DDA) などがあり、恒川ら²⁾によりDDAを用いて石垣の崩壊挙動を追った解析が行われている。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)}。個別の石垣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、まずは1箇所の分析結果について報告する。

*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 取締役

*⁴ 株式会社日測 業務推進室主任

2. 地盤の3次元空間の推定

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。ボーリングデータより3次的な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。ボーリングデータから2次元断面を推定するだけで、このような複雑な構造に対しては、地層分布を把握するには限界もある。そこで3次的に地層分布の推定を行った。

(1) クリギング法による推定

地球統計学的手法の一つであるクリギング法⁷⁾により地層の3次元空間分布を推定する。クリギング法は、空間の線形回帰法で、一つの領域内部の平均または、領域の特定の位置における値のいずれかを推定する手段として、バリオグラムあるいは共分散関数を利用する手法であり、地球統計学の分野においては広く用いられている。ここでは、詳細な理論は割愛する。

(2) 地形モデル

地形モデルを作成するために、地質縦断面図の地表線と国土地理院5mDEMを用いた。地形面のモデル化を図-1に示す。

(3) 地層モデルおよび断層モデル

地層モデルは、図-2に示すように、地層縦断面図およびボーリングデータを平面図上に合わせて配置させ、モデルは、地質縦断面図を包含するような範囲で作成した。立田山断層は、破碎幅はほとんどなく数mmオーダーと言われているため、本モデルでは断層の厚みを伴わないモデルとした。図-3および図-4に示すような位置関係で、走向と傾斜を設定した。なお、傾斜角は80°程度北傾斜に設定した（政府地震調査研究推進本部ホームページ参照）。

ジ参照)。

(4) 3次元地層モデル

地形モデル、地層断面図、ボーリングデータ、断層データより推定した全体の3次元モデルを図-5に示す。地層の推定後は、図-6に示すように任意の断面の地層構成の分布を確認することができる。つまり、地上の構造物とその直下の地層構成や石垣とその背面の地層構成などを把握し、相互関係を解明するのに理解しやすくなる。また、地層構成の3次元空間分布がわかることで、数値解析に応用することも可能となる。図-7～図-11は各地層の3次元分布を示す。

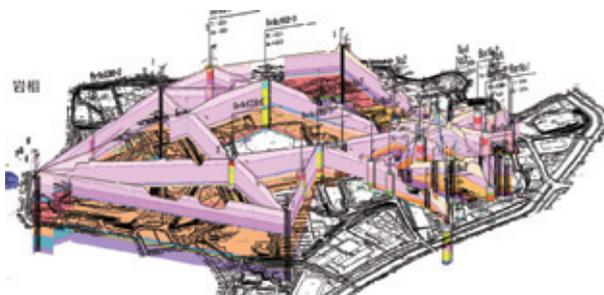


図-2 地層断面図およびボーリングの配置図

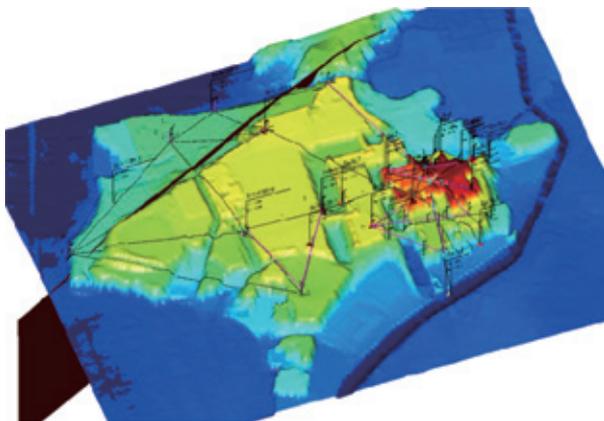


図-3 地形面と立田山断層の位置関係

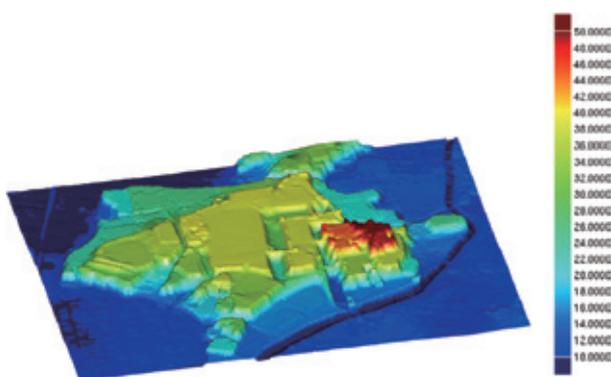


図-1 地形モデル

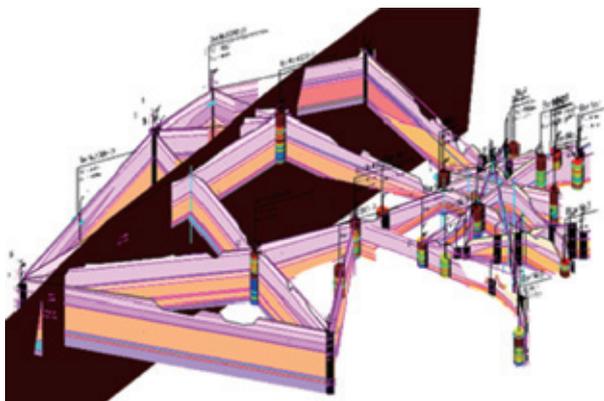


図-4 地層分布と立田山断層の位置関係

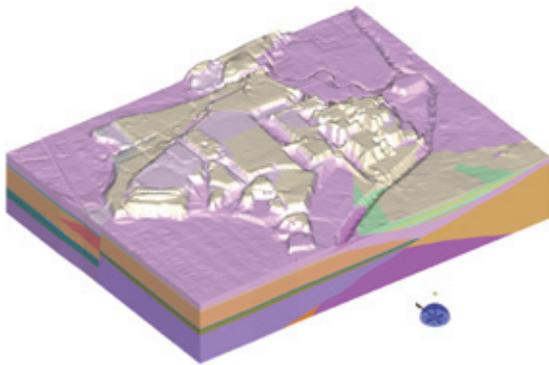


図-5 3次元全体俯瞰図

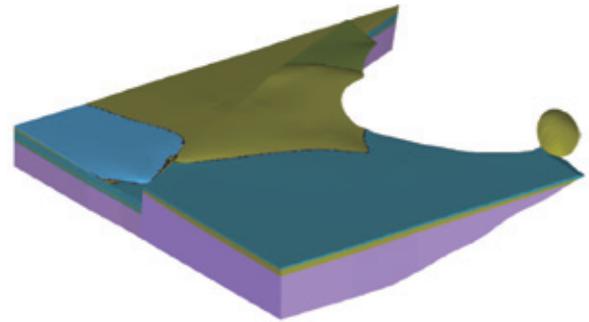


図-10 砥川溶岩および洪積層の地層分布図

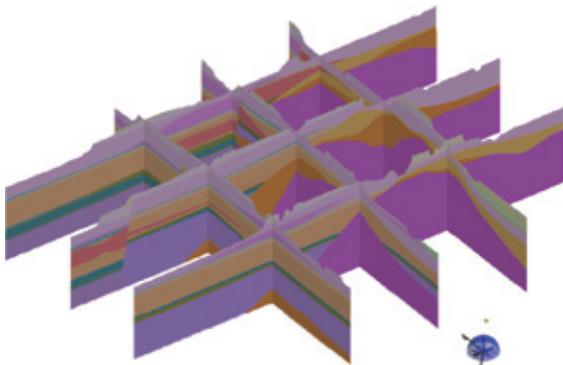


図-6 任意断面の切り取り図

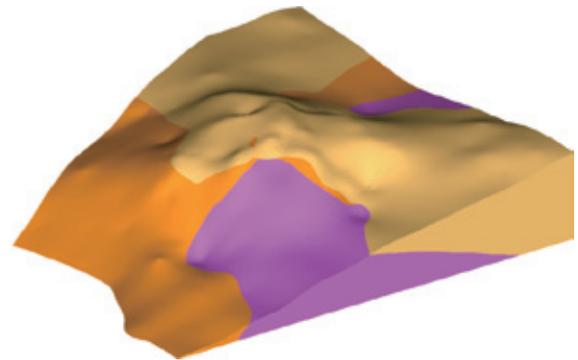


図-11 金峰山古期火山噴出物の地層分布図



図-7 完新統の地層分布図

3. 動的FEM解析による数値解析

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⁸⁾によるFEM動的解析を行った。構造物に被害のあった箇所を2次元断面で切り取り、いくつかの断面について数値解析を行うことで、どの程度の応答加速度が生じたのかを数値解析から推定することができ、全体の応答を把握するのにとても優位性がある。応答加速度の大小は地層構成や構造物の配置位置などによって変わり、本検討においては、石垣構造物を対象とした断面を切り取り、さまざまな個所において計算した。ここで、1断面の結果を示す。

(1) 2次元モデル

3次元空間モデルから図-12に示すように切り取り面を選択し、図-13に示す2次元解析用モデル断面を作成した。

(2) 解析用の工学的基盤面と地盤種別の判定

解析用基盤は図-14に示すようにTb-hwとした。また風化岩であるが沖積層ではないため、地盤種別判定の計算からは除外した。地盤種別判定は石垣底面までと石垣背後地盤天端までの2か所で算出し判定した。なお、地盤種別判定は道路橋示方書（V耐震設計編）⁹⁾に基づく。

(3) 解析用モデル

図-15は解析メッシュ図を示す。工学的基盤面を

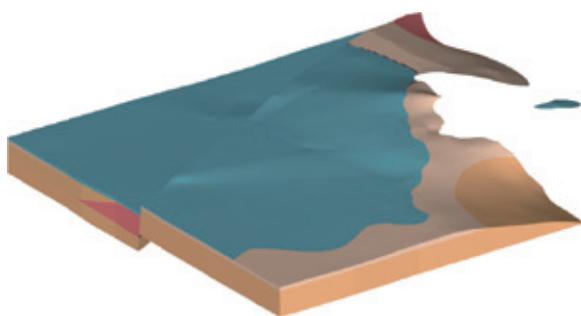


図-8 阿蘇3火砕流堆積物の地層分布図

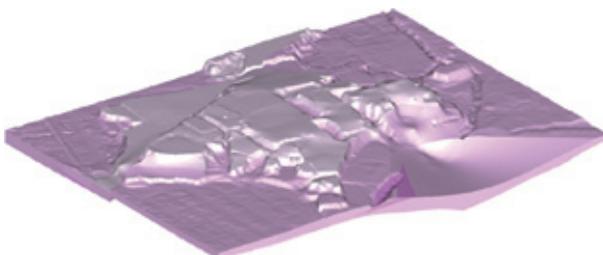


図-9 阿蘇4火砕流堆積物の地層分布図

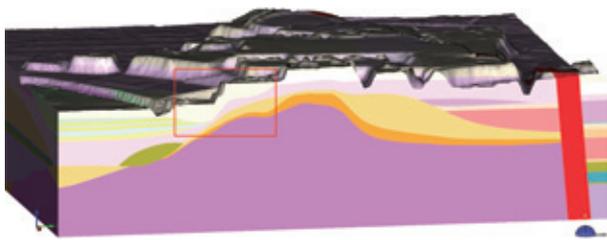


図-12 3次元空間モデルからの切り取り面

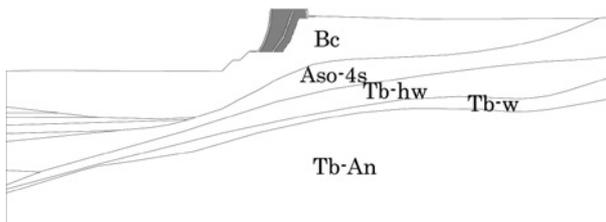


図-13 2次元解析用モデル断面図

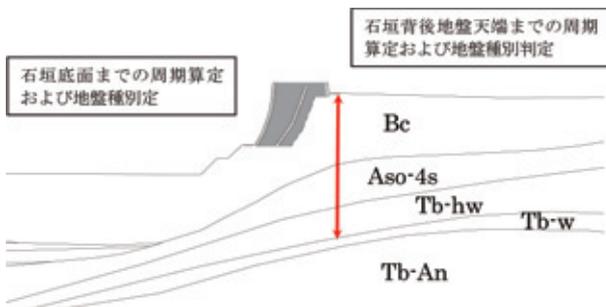


図-14 解析用工学的基盤面の位置

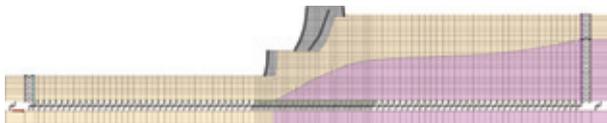


図-15 解析メッシュ図 (浅いモデル)

Tb-hwとすると、図に示すように図面左側では、Bc層が基盤に無限な状態となるため、図-16に示すように深く領域をとった解析メッシュを作成し、境界による影響があるかないか2つのモデルで検討を行った。

(4) 境界条件

境界条件は、図-17に示すように側方境界にはエネルギー伝達境界を用い、側面境界において逸散する波動エネルギーを吸収する。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。

(5) 入力地震動

入力地震動は、図-18および図-19に示すように平面的にEW方向とNS方向の地震動より、本検討断面は南北方向であることから、図-19に示す地震動を解析用の入力波とした。

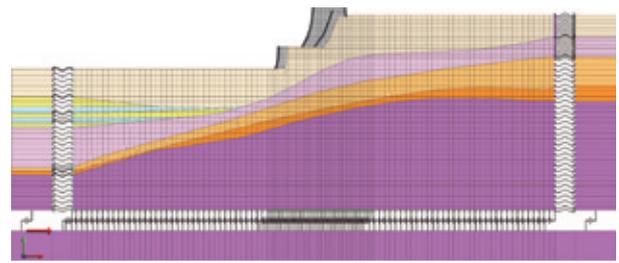


図-16 解析メッシュ図 (深いモデル)

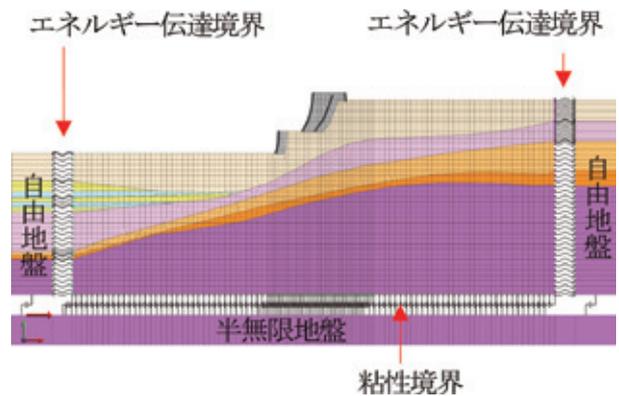


図-17 境界条件図

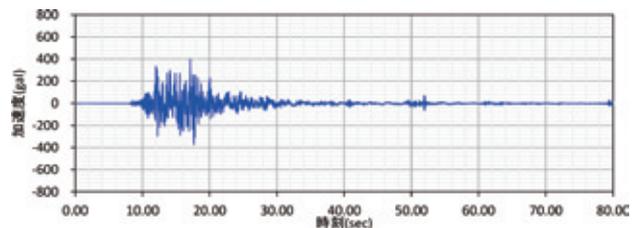


図-18 EW方向の地震動

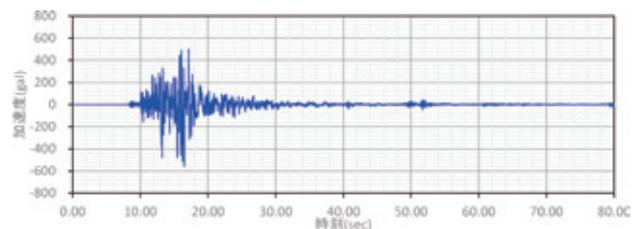


図-19 NS方向の地震動

(6) 入力物性値

表-1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。

(7) 解析結果

水平加速度の最大値分布結果図を図-20および図-21に示す。図-22に示す位置での応答値の結果として、図-23～図-26に水平加速度の時刻歴応答結果を示し、それぞれのモデルで応答値の最大値を表-2および表-3に

表-1 地盤の物性値

土層名	質量密度 ρ (t/m ³)	N値	N値換算の せん断波速 Vs(m/s)	PS換層 Vs(m/s)	有効鉛直 応力 σ_v (kPa)	平均有効 拘束圧 σ_u (kPa)	せん断 弾性係数 G _s (kPa)
石材	2.00	-	300	300	-	-	180000
栗石	2.00	-	300	300	-	-	180000
Bc	1.70	-	-	100.0	123.41	82.27	17000
As	1.74	7	149.3	-	287.79	191.86	38800
Ac	1.54	4	151.8	-	350.66	233.77	35500
m-tr	2.04	38	269.0	-	393.58	262.38	147600
Aso-4s	1.70	22	224.2	425.0	323.53	215.69	307100
Tb-hw	1.70	17	-	370.0	451.95	301.30	232700
Tb-An/Tb-w	2.10	50	-	540.0	890.94	593.96	612400

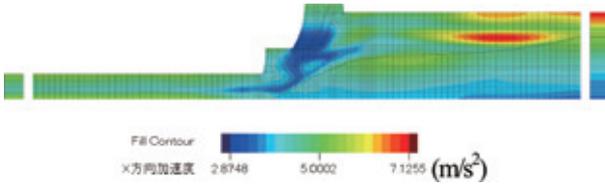


図-20 最大水平加速度分布図 (浅いモデル)

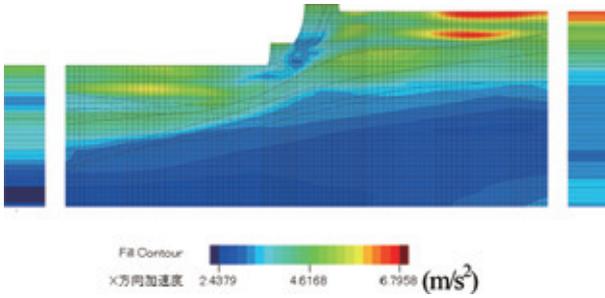


図-21 最大水平加速度分布図 (深いモデル)

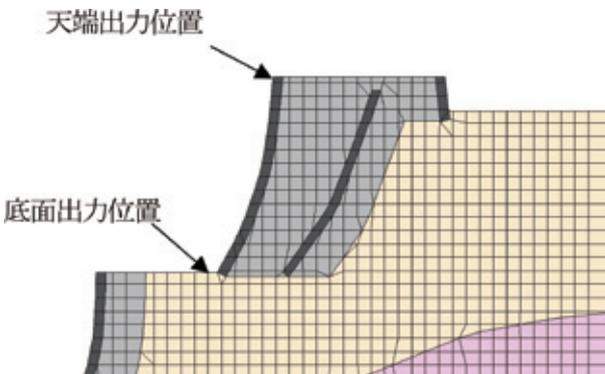


図-22 応答値出力位置図

表-2 石垣の加速度の応答値 (浅いモデル)

天端最大加速度 (gal)	498.1
底面最大加速度 (gal)	304.7
天端最大加速度/底面最大加速度	1.63

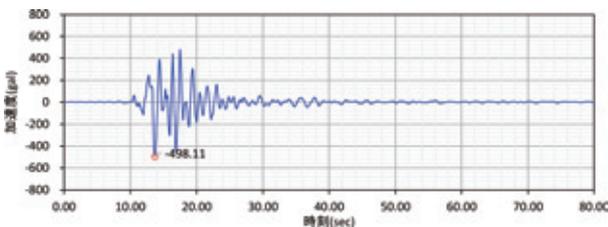


図-23 石垣天端の時刻歴応答加速度結果 (浅いモデル)

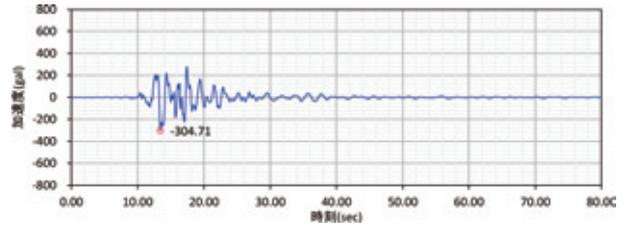


図-24 石垣底面の時刻歴応答加速度結果 (浅いモデル)

表-3 石垣の加速度の応答値 (深いモデル)

天端最大加速度 (gal)	478.0
底面最大加速度 (gal)	320.3
天端最大加速度/底面最大加速度	1.49

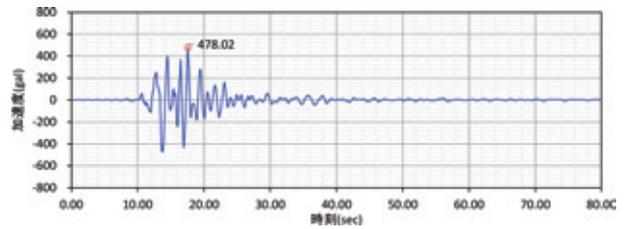


図-25 石垣天端の時刻歴応答加速度結果 (深いモデル)

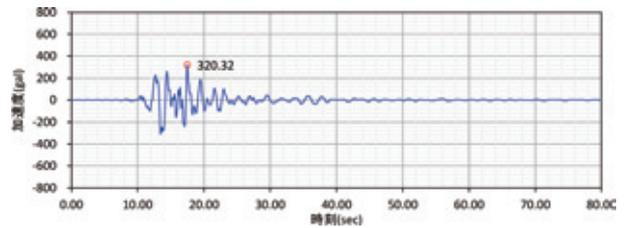


図-26 石垣底面の時刻歴応答加速度結果 (深いモデル)

示す。2つのモデルで応答値は大きく変わらない結果であった。図-27および図-28は水平速度の最大値分布結果図を示す。この結果は毎秒あたりの変位量を示しており、最大で毎秒1m以上の変位が生じていること示している。水平加速度と同様に、図-22に示す石垣の天端と底面位置での水平速度の時刻歴応答結果を図-29～図-32に示し、その最大値を表-4および表-5に示す。石垣天端では最大で毎秒1.3m近くとなり、大きな変位が生じている。

4. 被害状況との比較分析

検討解析を実施した断面において、実際の被害状況は図-33に示すように石垣上部で崩壊している。検討断面の石垣は、高さ14.5m、勾配74.3度で、図-34の着色で示した形状である。他の石垣と比べても勾配が大きいたことがわかる。特に上部で勾配が大きく、崩壊と関係があると言える。地盤との相互関係では、Bc層上に石垣は建造されているため、解析結果でも示されたように、最大で毎秒1m以上の変位となり、大きく変位する地盤

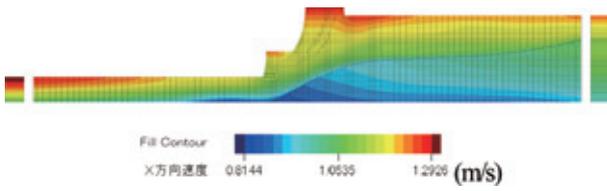


図-27 最大水平速度分布図 (浅いモデル)

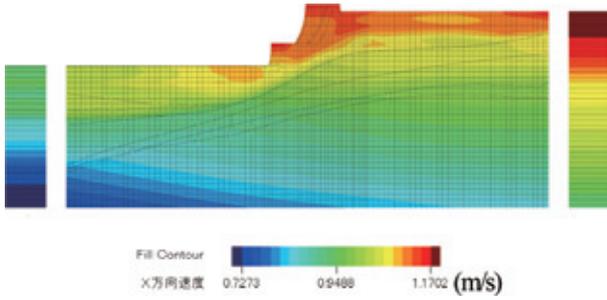


図-28 最大水平速度分布図 (深いモデル)

表-4 石垣の速度の応答値 (浅いモデル)

天端最大速度 (kine)	129.3
底面最大速度 (kine)	116.0
天端最大速度/底面最大速度	1.11

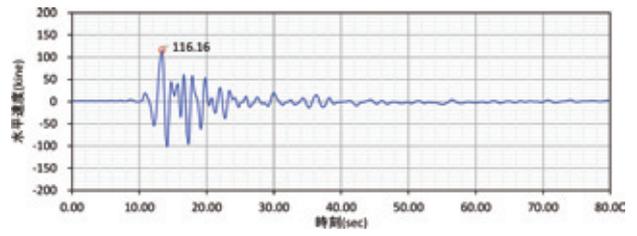


図-31 石垣天端の時刻歴応答速度結果 (深いモデル)

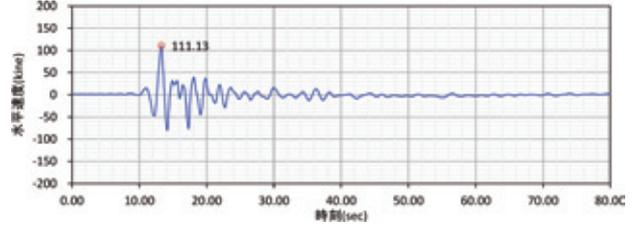


図-32 石垣底面の時刻歴応答速度結果 (深いモデル)



図-33 石垣崩壊の様子

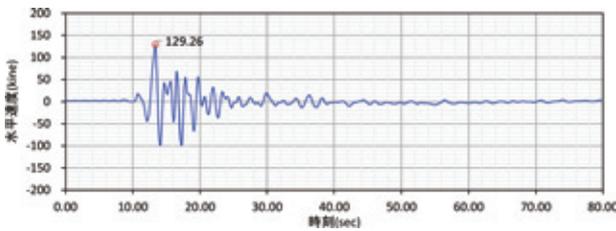


図-29 石垣天端の時刻歴応答速度結果 (浅いモデル)

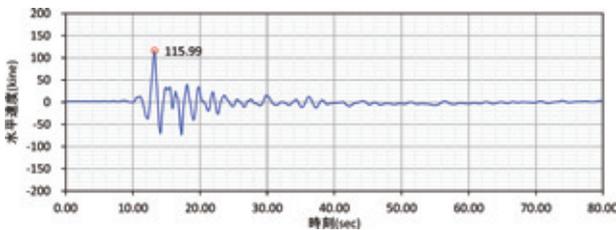


図-30 石垣底面の時刻歴応答速度結果 (浅いモデル)

表-5 石垣の加速度の応答値 (深いモデル)

天端最大速度 (kine)	116.2
底面最大速度 (kine)	111.1
天端最大速度/底面最大速度	1.05

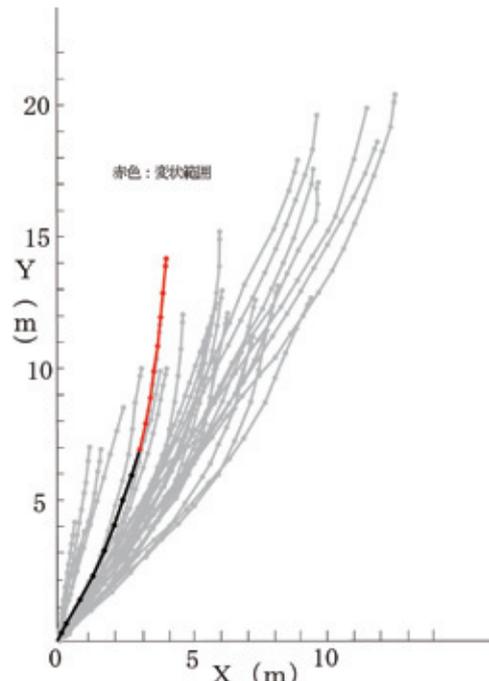


図-34 石垣の高さと勾配の関係

の特性であることから、石垣の崩壊が起きたと考えられる。解析結果は被害状況をうまく表現している結果と言える。

5. ま と め

複雑な構造や地形を有した場合、地層の空間分布を3次元的に把握することを目的に3次元地層モデルを作成した。地層分布がわかることで、構造物の立地条件や状態を確認することが出来た。また、任意の断面を切り出すことも可能となり、2次元断面を作成し、FEMによる動的解析の検討を行った。このことにより、被害が生じた石垣の崩壊メカニズムは、地層構成と石垣の相互作用の関係を把握することで、説明することが可能となった。また、石垣における最大速度の結果からも、数値解析と被害状況は整合性をとることができた。このように、ボーリングデータから地層構成を3次元空間に展開することは、地震による被害のメカニズム解明に役立てることが出来ると言える。今後は、さまざまな断面の解析を行い、データを蓄積し崩壊形態の解明をより詳細に行っていく必要がある。

謝辞：熊本市経済観光局熊本城総合事務所及び熊本城調査研究センターに熊本城内のボーリングデータを提供いただくとともに、城内の案内や有益な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

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) 恒川怜央, 池本 敏和, 宮島 昌克, 橋本 隆雄：2016年熊本地震における熊本城内の石垣被害および崩壊挙動解析, 歴史都市防災論文集 Vol. 12, pp.59-66, 2018.
- 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) 新井勝男：地球統計学の基本的概念とその応用—鉱床品位のクリッキングとシミュレーションについて—, 鉱山地質, Vol. 35, pp.299-311, 1985.
- 8) 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.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.69-70, 2017.