

論文 Original Paper

熊本城におけるFEM解析を用いた熊本地震及び被災履歴による石垣被害要因分析

橋本隆雄*¹・松尾拓*²・磯部有作*³・石作克也*⁴

Damage factor analysis of stone walls based on damage history using FEM analysis of Kumamoto Castle

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

Abstract: In the 2016 Kumamoto earthquake, 10% of Kumamoto Castle collapsed and 30% was uplifted by the M6.5 foreshock and the Mj7.3 mainshock. However, the seismic resistance performance of the stone walls has not been confirmed with regard to the effects of seismic motion on the entire ground of the castle stone walls. Therefore, in this paper, we estimated the three-dimensional space of the ground at 35 locations surveyed before the earthquake throughout Kumamoto Castle. Therefore, we obtained the response acceleration and response speed of the stone wall by dynamic FEM analysis for 35 points throughout Kumamoto Castle, and used the results to analyze the damage factors and damage history of the stone wall due to the Kumamoto earthquake. As a result, it was clarified that the main causes of damage to stone wall structures were the collapse of stone foundations, the protruding type of semi-stone foundations, and the embankment type of non-stone foundations.

Key words: stone wall, Kumamoto Castle, ramparts, force diagram, stability analysis, FEM analysis

1. はじめに

2016年熊本地震はMj6.5の前震及びMj7.3の本震により熊本県全域に大きな被害をもたらした。特に、熊本県のシンボルである熊本城では、石垣総数973面・約79,000m²のうち図-1に示すように築石が崩落したのが229面・約8,200m²で全体の約1割、図-2に示すような孕みのため積み直しを要すると考えられているものが517面・約23,600m²で全体の約3割の面積に及んだ¹⁾。これまで、石垣の崩壊メカニズムは、非破壊検査等を用いた被害分析^{2)~12)}、解析^{13)~22)}、実験^{23)~29)}等が行われてきているが、まだ十分に明らかになってきていない。熊本地震後の熊本城の復興をする際に必要な熊本城石垣全体の被害要因分析は、これまで石垣崩壊箇所の一部の検証があるだけで、城郭全体石垣の地盤も含めた地震動の影響についてはまだ行われていない。

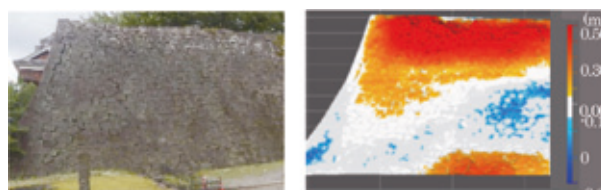
そこで、石垣形状は地震前の既存測量を用い、地層構

造はボーリング調査から地盤の3次元空間モデルを作成して推定した。本論文では、熊本城全域の35箇所を対象に動的FEM解析により石垣の応答加速度や応答速度を求め、その結果を用いて熊本地震及び被災履歴による石垣被害要因分析を行った。



(a) 前震 (b) 本震

図-1 熊本地震による重要文化財北十八間櫓石垣の崩壊



(a) 地震後の状況 (b) 3Dレーザーを用いた孕み分析

図-2 飯田丸平櫓石垣の孕み状況

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

2. 熊本城石垣被害の特徴

2.1 石垣のタイプ

熊本城石垣のタイプは、本論文では図-3及び図-4に示すように3つに分類した。

- ①石塁タイプ：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半石塁タイプ：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非石塁タイプ：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。

2.2 修復と被害箇所

2016年熊本地震の前震では、図-5の緑色の○で示すように2016年熊本地震までに修復してきた10箇所が被害箇所が発生した。本震では、図-5の赤色の○で示すようにこれまで修復してきた箇所のほとんどに被害が発生した。

2.3 石垣タイプ毎の被害程度分析

本論文では熊本城石垣のタイプをさらに地盤により図-6のように熊本城の各石垣タイプ延長／全石垣延長で算出した石垣型に分類した。石塁タイプは石塁型21%・芯土型5%の26%、半石塁タイプは緩い地盤型11%・やや緩い地盤型31%・固い地盤型6%の48%、非石塁タイプは緩い地盤型13%・やや緩い地盤型6%・固い地盤型7%の26%である。図-7から石塁タイプは崩壊しているもの多く、半石塁タイプ及び非石塁タイプの緩い地盤及びやや緩い地盤型で崩壊または孕みの被害が多

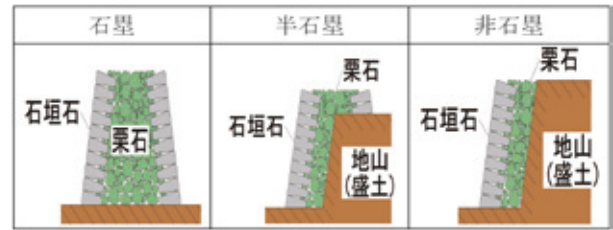


図-3 石垣構造のタイプ

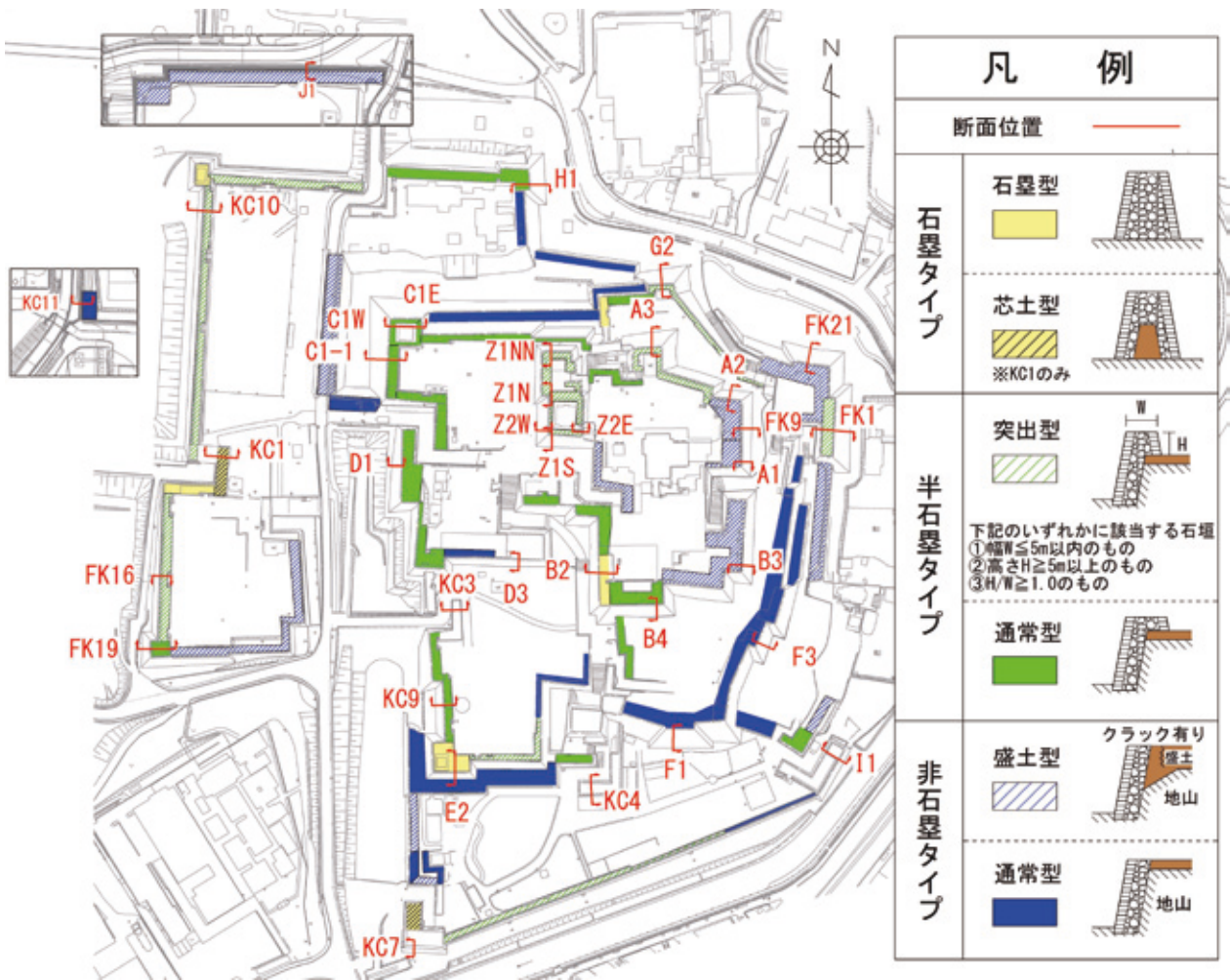


図-4 石垣タイプ及び検討断面位置図



図-5 熊本地震（前震＋本震）による石垣被害状況

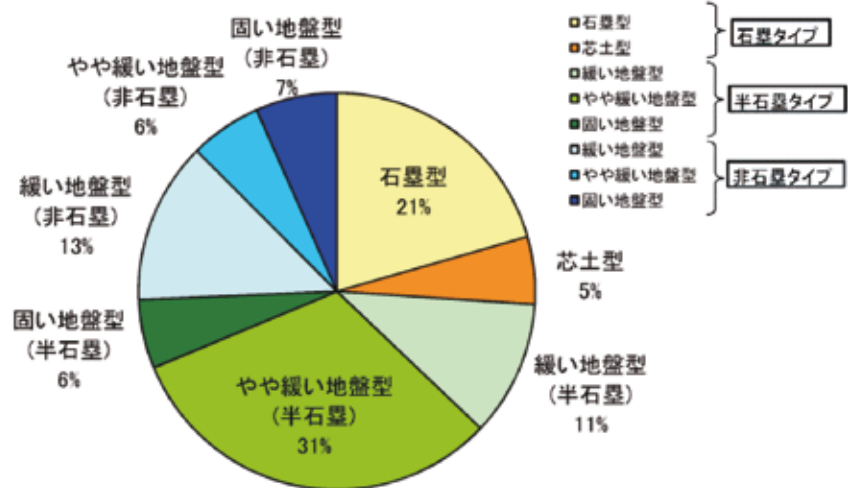


図-6 石垣型の分類

いことが分かる。一方、半石畳タイプ及び非石畳タイプの固い地盤型は被害が軽微であることが分かる。

3. 地盤の3次元空間の推定

石垣はさまざまな場所で被害を受けており、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、熊本城調査研究センターからボーリングデータと地層断面図から地層の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、地球統計学的手法の一つであるクリギング法³⁰⁾を用いた。熊本城は、堀、塀、石垣、盛土、槽、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、起伏に富む地形となっているため、石垣背面の地盤の地層分布も地山、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次元的な地層分布を把握することで地盤が構造物被害に及ぼす影響を明らかにすることができる。

図-8、図-9は推定に用いた地層断面図やボーリング柱状図、および地形面データを示し、図-10、図-11は推定後の地質モデルである。推定に用いた条件として、地形面は国土地理院の5mDEMデータを用い、地層構成には21本のボーリングデータを用い、領域は東西1510m×南北1150mの範囲で、10m間隔のグリッドである。

今回新たに調整した結果を3次元で可視化が可能になったことで、さまざまな個所の地層構成が容易に把握できるようになった。地層構成を把握できることで、被害との因果関係の分析に役立つことが期待される。

4. 動的FEM解析による数値解析

4.1 解析条件

動的FEM解析は作成した3次元空間モデルより任意の断面を抽出し、SHAKEと同様の理論であるFLUSHを用いた複素応答解析である等価線形解析³¹⁾により行った。検討断面の設定は、構造物に被害のあった箇所を2次元で切取った断面とし、それらの切取った断面に対して数値解析を行った。数値解析からどの程度の応答加速度が生じたのかを推定することができる。また、数値解析を行った断面の結果を平面的もしくは3次元モデルにマッピングさせることで全体の応答を容易に把握することができる。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数値解析を行った。被害箇所を分析し、被害が無かった箇所も含め被害状況を分類して切り取りを行った。図-12は3次元地層モデルからの切り取り断面の一例を示す。

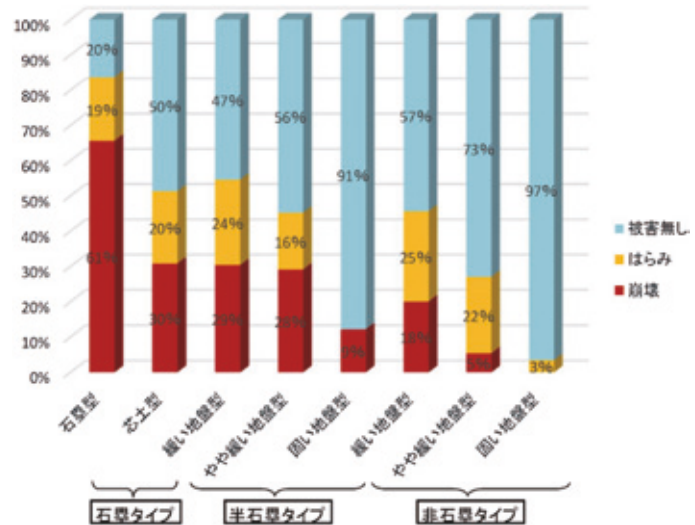


図-7 石垣タイプ毎の被害形態の割合

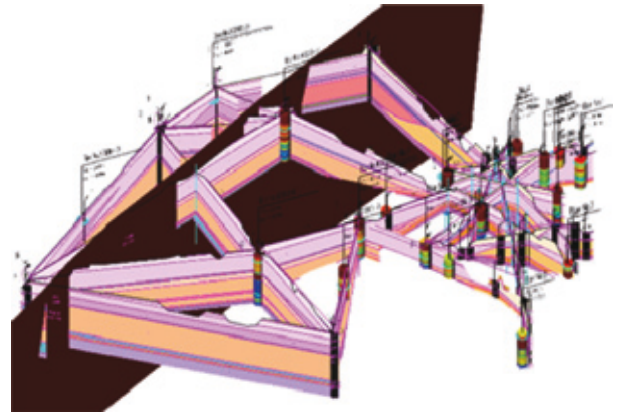


図-8 断面位置およびボーリング位置関係

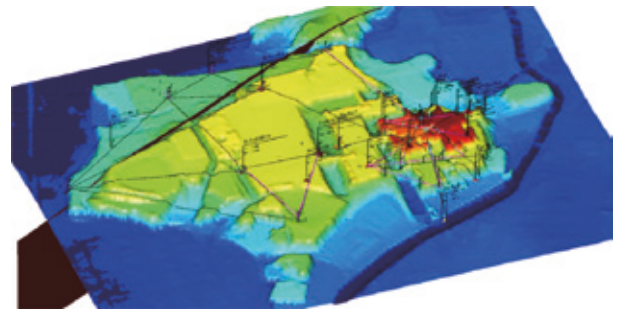


図-9 地形面

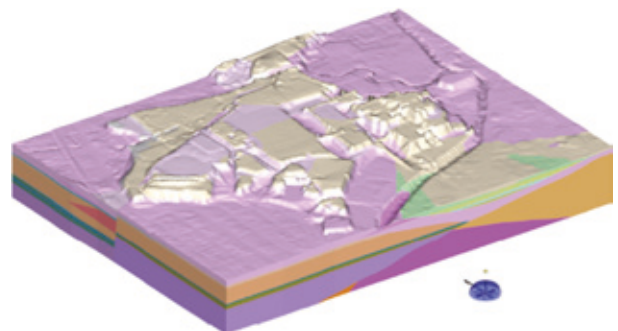


図-10 推定後の3次元地質モデル

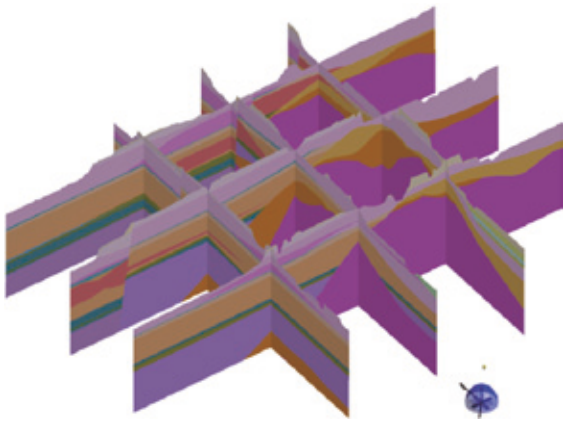


図-11 推定後の3次元地質モデル内の任意断面切り取り図

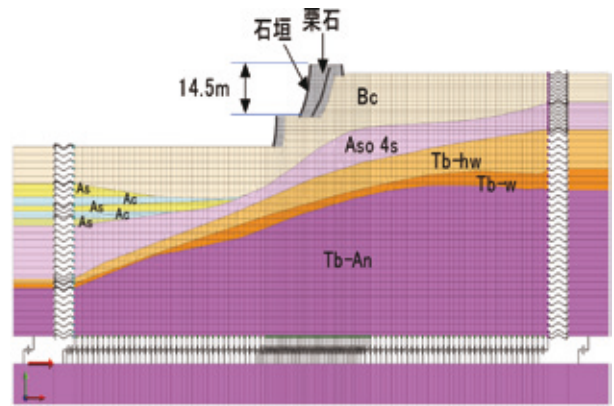


図-13 解析メッシュ図

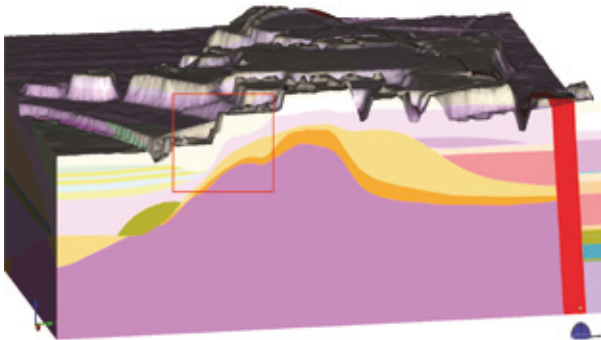


図-12 3次元地層モデルからの切り取り断面

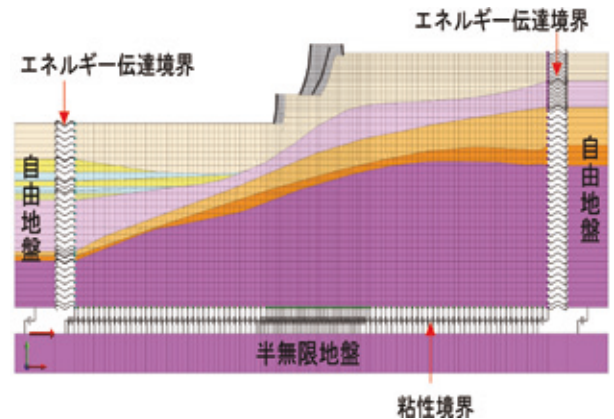


図-14 境界条件図

4.2 解析用モデル

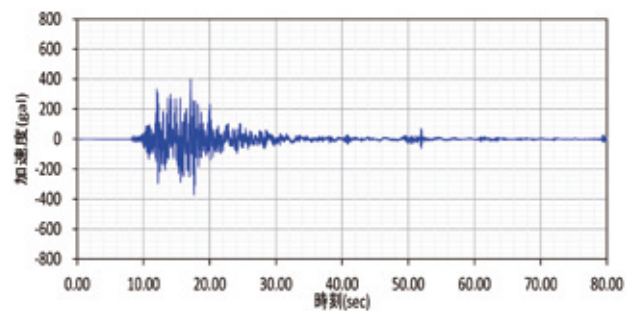
図-13は、FEM用のメッシュ分割の一つとして飯田丸5階櫓付近を切取った断面での解析メッシュ図を示す。石垣の高さは14.5mである。同様に、35断面の切り取り断面を作成し、動的FEM解析を実施した。なお、石垣と栗石と背後地盤との接触は、ジョイント要素などは設けず連続とした。

4.3 境界条件

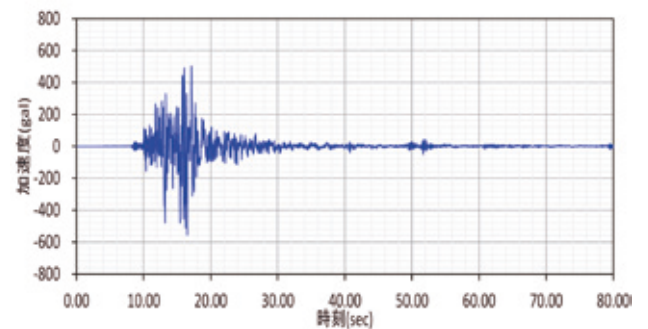
境界条件は、図-14に示すように側方境界にはエネルギー伝達境界を用いた。解析対象領域内で反射され逸散する波動のエネルギーはこの境界条件で吸収する特性があるため、自由地盤からの反射の影響は受けることが無い。底面境界には粘性境界を設定し下方を半無限地盤としている。入力地震動は底面より入力する。

4.4 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-15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。



(a) EW方向



(b) NS方向

図-15 入力地震動

4.5 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、沖積粘土土、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。また、石材・栗石の物性値は港湾構造物設計事例集（平成30年改訂版）（一般社団法人沿岸技術研究センター）の動的FEM解析事例を参考に設定し、この設定値をもとにした石材の固有周期などを確認して設定した。

4.6 解析結果

ここでは、動的FEM解析の一例として、最大水平加速度分布図を図-16に、最大水平速度分布図を図-17に示す。速度分布は毎秒あたりの変位量を示していることを意味している。

図-18は応答結果の出力位置図である。図-19は石垣

天端及び底面の時刻歴応答加速度結果で、このモデルの最大応答値を表-2に示す。一方、図-20は石垣天端及び底面の時刻歴応答速度結果で、このモデルの最大応答値を表-3に示す。解析の最大加速度の大きさは1000gal前後であり、小山ら³²⁾の調査と比較して解析の応答加速度は調査結果の加速度と近い傾向を示していることを確認した。

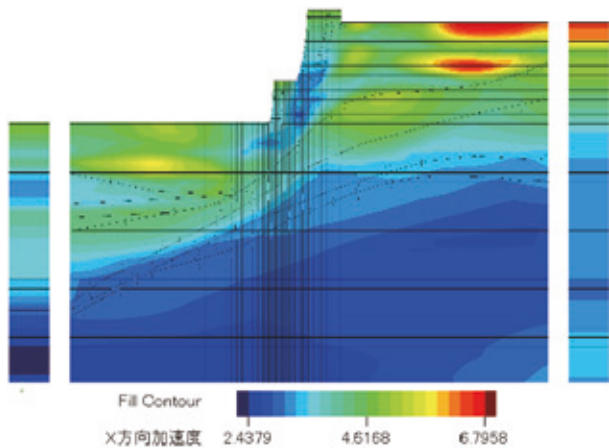


図-16 最大水平加速度分布図 (m/s²)

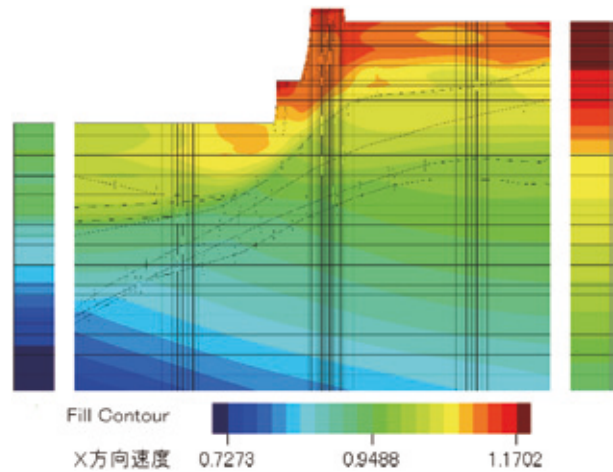


図-17 最大水平速度分布図 (m/s)

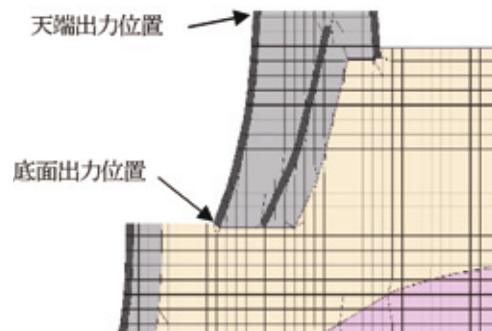
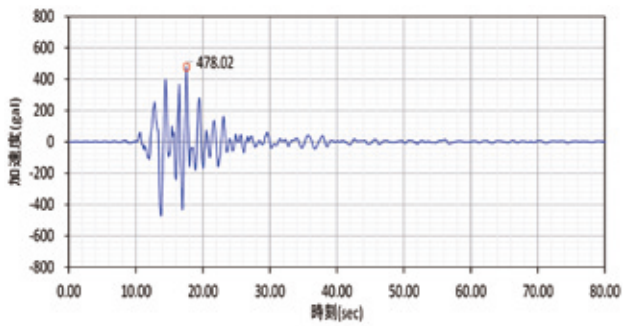


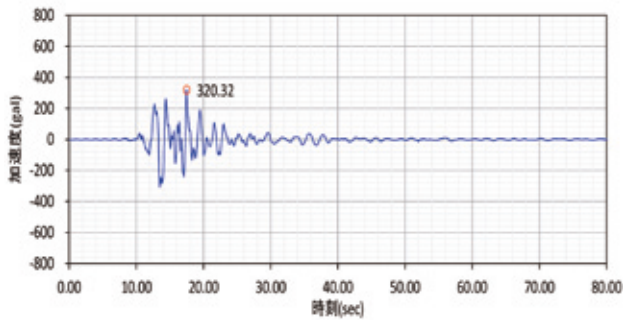
図-18 応答結果出力位置図

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
As	1.74	7	149.3		38800
Ac	1.54	4	151.8		35500
m-tr	2.04	38	269.0		147600
Aso-4s	1.70	22	224.2	425.0	307100
Tb-hw	1.70	17	-	370.0	232700
Tb-An/Tb-w	2.10	50	-	540.0	612400



(a) 石垣天端



(b) 石垣底面

図-19 石垣天端及び底面の時刻歴応答加速度結果

表-2 石垣の加速度の応答値

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

4.7 被害状況との比較分析

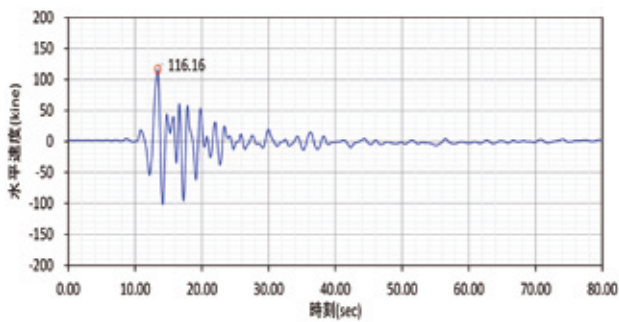
検討断面の石垣は高さ14.5m、勾配74.3度で、図-21及び図-22の着色に示すように石垣上部で崩壊し、灰色線で示した熊本城内の他の石垣と比べても勾配が急であることがわかる。特に上部で勾配が大きく、崩壊と関係があると考えられる。地盤との相互関係では、Bc層上に石垣は建造されているため、解析結果の最大加速度からも示されているように、大きく変位する地盤の特性であることから、石垣の崩壊が起きたと考えられる。大き

表-3 石垣の速度の応答値

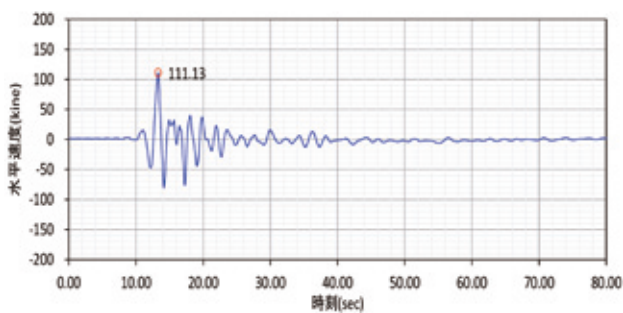
天端最大速度 (kine)	116.2
底面最大速度 (kine)	111.1
天端最大速度/底面最大速度	1.05



図-21 石垣崩壊の様子



(a) 石垣天端



(b) 石垣底面

図-20 石垣天端及び底面の時刻歴応答速度結果

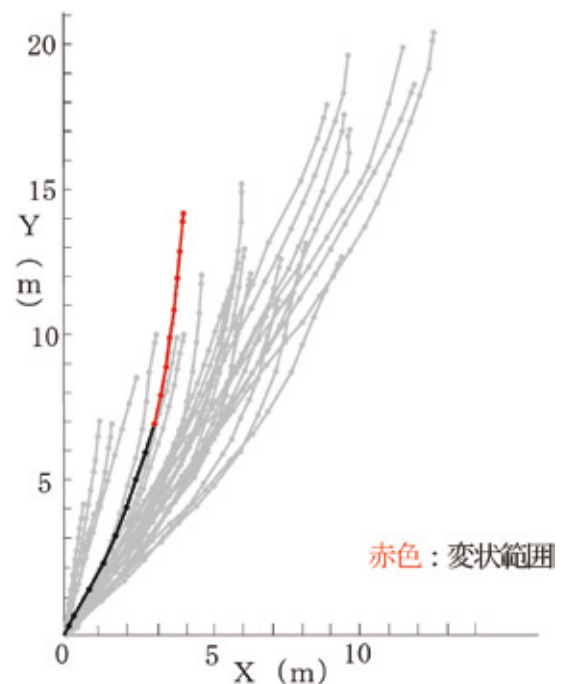


図-22 石垣の高さと奥行の関係

な速度が出ている箇所は図-5に示す被害状況とほぼ一致している。

図-23に動的FEM解析で得られたすべての断面における石垣の応答加速度の最大値を平面図にプロットした分布結果を示す。また、図-24に同様に求めた石垣の応答速度の最大値を平面図にプロットした分布結果を示す。また、南南西から北北東の方角に応答速度が大きくなる傾向を示している。

熊本城の石垣崩壊の特徴は石垣が忍返しの反り返った上部で発生していることである。そこで、最大加速度と最大速度と石垣被害の分析では、石垣天端のものを採用した。図-25は図-23の石垣天端の最大加速度と図-5の熊本地震による石垣被害状況被害の関係である。最大加速度が大きくなるにしたがい被害が大きくなっている傾向を示している。

また、図-26は図-24の天端の最大速度と図-5の熊本地震による石垣被害状況被害の関係である。最大速度が120kineを超えるとすべて崩壊している。

5. 熊本城石垣の被害要因分析

被害要因分析は地盤の3次元空間を推定し、図-4に示す熊本城全域で主に地震前の既存測量がある35箇所を

対象に、動的FEM解析により石垣の応答加速度・速度の算定を行った。

5.1 被害分析方法

石垣の被害は、これまでの橋本他の研究⁸⁾で平均勾配ではなく上部の最大勾配の影響を受けていることが分かっている。また、半石塁の場合は、背後の勾配の方が急となっているものが多い。そこで、被害分析は石垣の各断面について、図-27に示すように石垣前面の高さと上部勾配及びの石垣背面の高さと背後勾配、動的FEM解析による加速度と速度を比較対象とした。ここで最大勾配とは、上部勾配D及び背後勾配dのうち値の大きい方のことをいう。

5.2 被害分析結果

石垣の各断面の分析は、全石垣タイプ、石塁タイプ、半石塁タイプの通常型と突出型、非石塁タイプの通常型と盛土型について行った。石塁タイプは芯土型の対象断面が1箇所のみ、石塁型と芯土型に分類せず分析した。図-28～31のプロットの形は各石垣構造型を、色は被害形態を示す。石垣構造としては、石塁、半石塁の突出型、非石塁の盛土型の崩壊が多い。石垣形状としては、

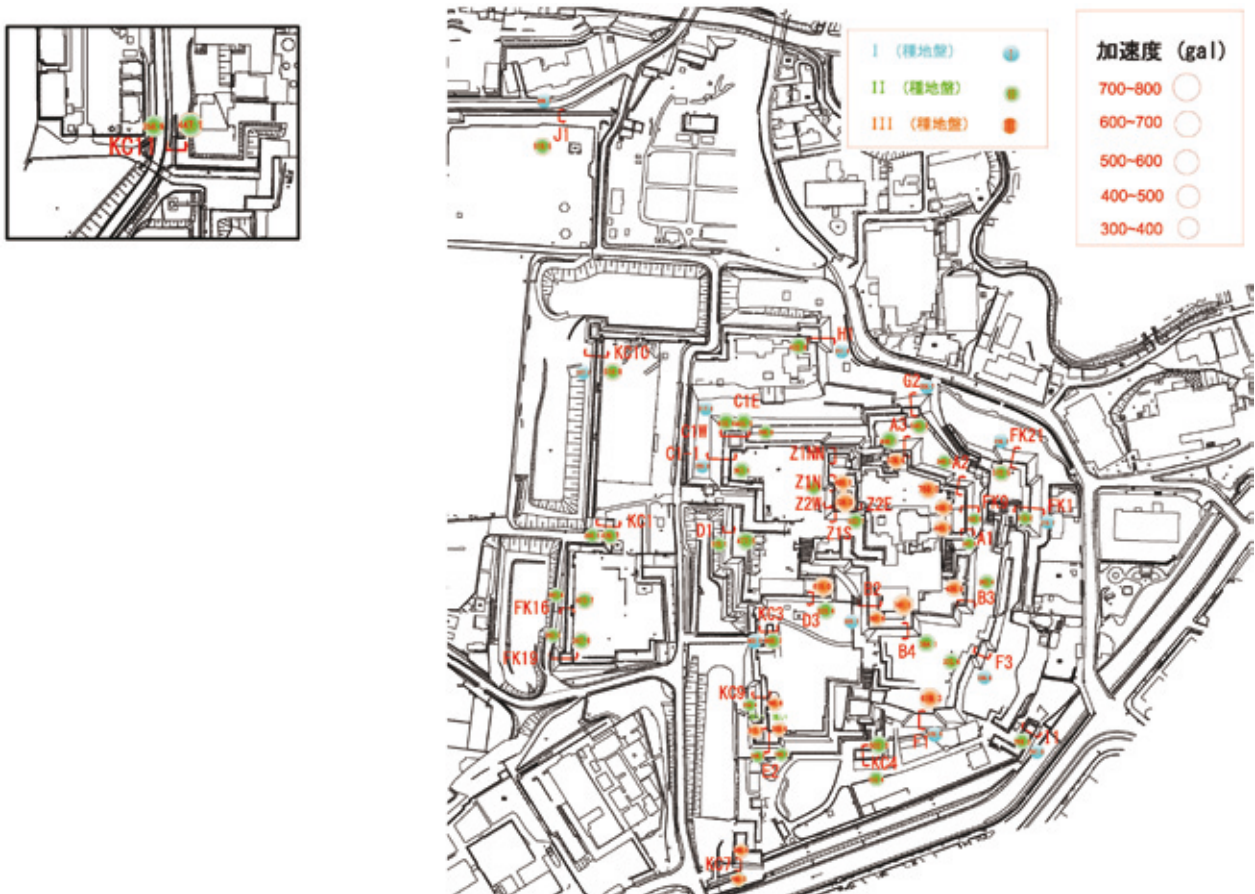


図-23 石垣における応答加速度分布結果

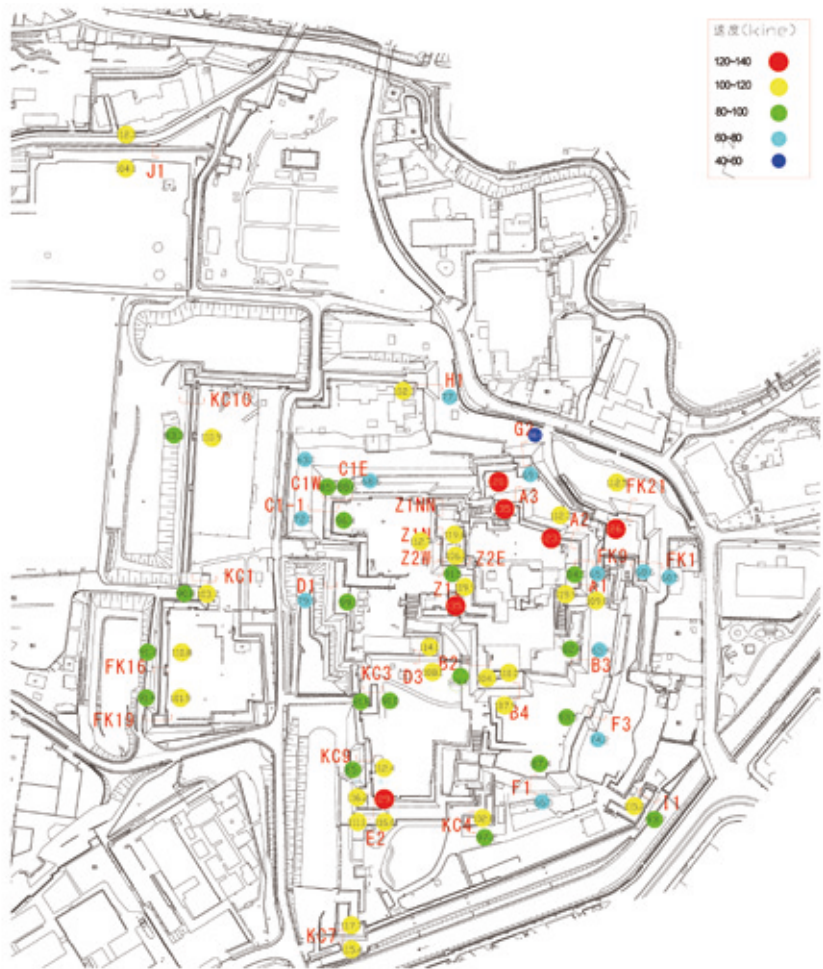


図-24 石垣における応答速度分布結果

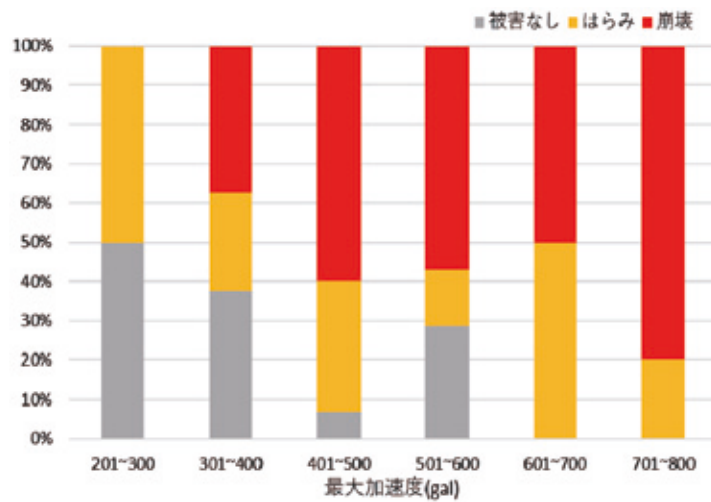


図-25 最大加速度と被害の関係

以下の結果となった。

i. 全石垣タイプの被害分析 (図-28 参照)

(a) 最大勾配と高さ

高さに関わらず、最大勾配が急なほど崩壊した石垣がある。石垣はほとんど崩壊または孕みを生じている。半

石垣 (突出型) や非石垣 (盛土型) は勾配が緩くても崩壊した石垣がある。

(b) 高さと天端加速度, (c) 高さと天端速度

高さに関わらず、天端加速度や天端速度の大きいほど崩壊した石垣がある。石垣はほとんど崩壊または孕みを

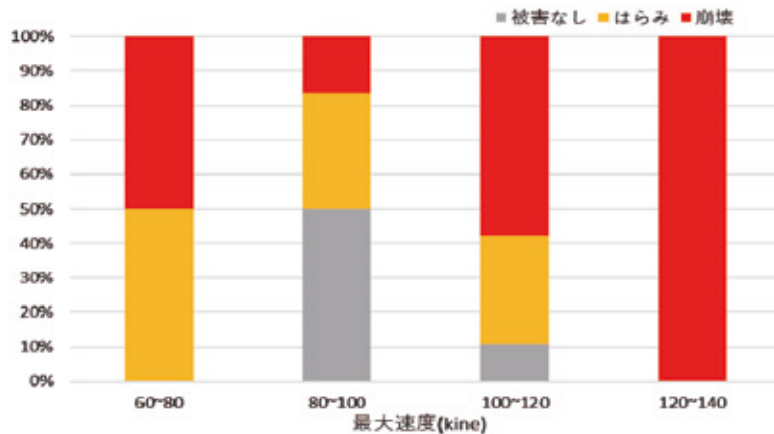


図-26 最大速度と被害の関係

生じている。石罫、半石罫（突出型）、非石罫（盛土型）は天端加速度や天端速度が小さくても崩壊した石垣がある。

(d) 最大勾配と天端加速度, (e) 最大勾配と天端速度

最大勾配が急で天端加速度や天端速度の大きいほど崩壊した石垣がある。石罫はほとんど崩壊または孕みを生じている。半石罫（突出型）や非石罫（盛土型）は勾配が緩くても崩壊した石垣がある。

ii. 石罫タイプの被害分析 (図-29 参照)

(a) 最大勾配と高さ

石罫は最大勾配が急で、高さが低くても崩壊した石垣がある。ただし、平御櫓 (II) は石垣に建物荷重が作用し崩壊していない。

(b) 高さ と 天端加速度, (c) 高さ と 天端速度

高さに関わらず、天端加速度や天端速度の大きいほど崩壊した石垣がある。ただし、平御櫓 (II) は石垣に建物荷重が作用し崩壊していない。

(d) 最大勾配と天端加速度, (e) 最大勾配と天端速度

最大勾配が急で天端加速度や天端速度の大きいほど崩壊した石垣がある。ただし、平御櫓 (II) は石垣に建物荷重が作用し崩壊していない。

iii. 半石罫タイプの被害分析 (図-30 参照)

背後勾配や天端幅の違いにより被害形態に特徴がみられた為これらの分析を行った。

(a) 背後勾配と高さ

高さに関わらず、背後勾配が急なものほど崩壊した石垣がある。半石罫（突出型）は勾配が緩くても崩壊した石垣がある。

(b) 背後勾配と天端速度

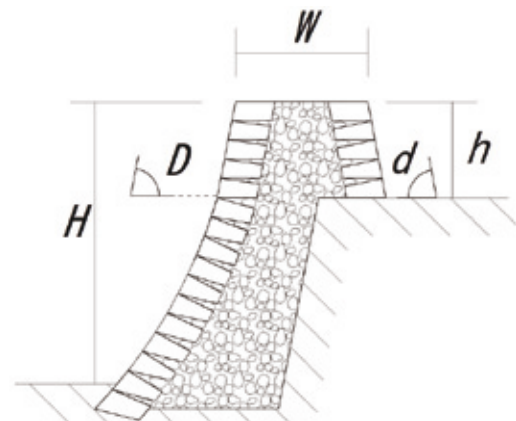
天端速度が100kineを超えると崩壊した石垣がある。

(c) 上部勾配と天端幅

天端幅が狭く上部勾配が急なものほど崩壊した石垣がある。

(d) 背後高さ と 天端幅

背後高さに関わらず、天端幅が狭いものほど崩壊した



D: 上部勾配 d: 背後勾配 H: 高さ h: 背後高さ
W: 天端幅

図-27 石垣の各測定箇所

石垣がある。

(e) 天端幅と天端速度

天端幅が狭いほど天端速度が大きく崩壊した石垣がある。半石罫（突出型）は崩壊した石垣がある。

iv. 非石罫タイプの被害分析 (図-31 参照)

(a) 最大勾配と高さ

高さに関わらず、最大勾配が急なものほど崩壊した石垣がある。非石罫（盛土型）は勾配が緩くても崩壊した石垣がある。

(b) 高さ と 天端加速度, (c) 高さ と 天端速度

高さに関係なく、天端加速度や天端速度が大きいほど崩壊した石垣がある。非石罫（盛土型）は天端加速度や天端速度が大きく崩壊した石垣がある。

(d) 最大勾配と天端加速度, (e) 最大勾配と天端速度

最大勾配が急で天端加速度や天端速度の大きいほど崩壊した石垣がある。非石罫（盛土型）は勾配が緩くても崩壊した石垣がある。

5.3 まとめ

石垣の被害分析の結果、以下のことが明らかとなっ

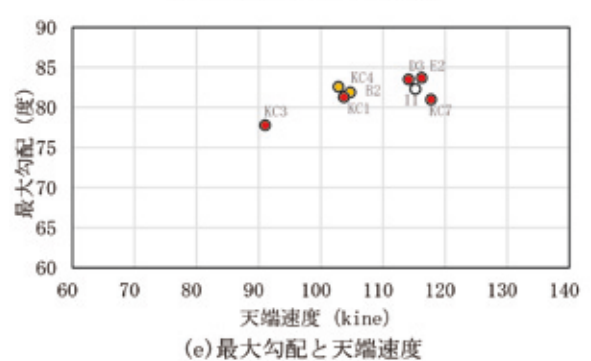
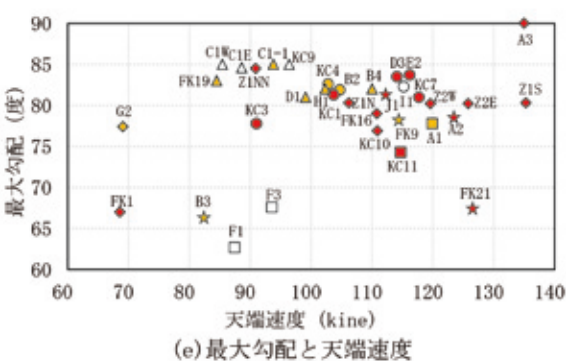
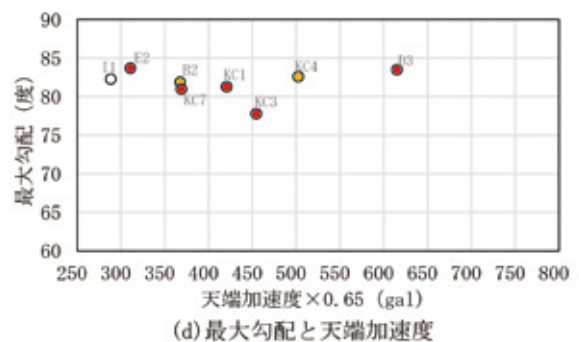
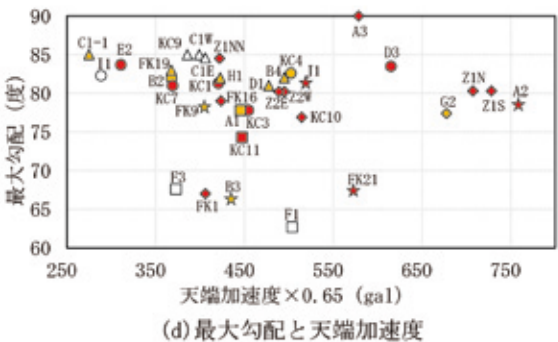
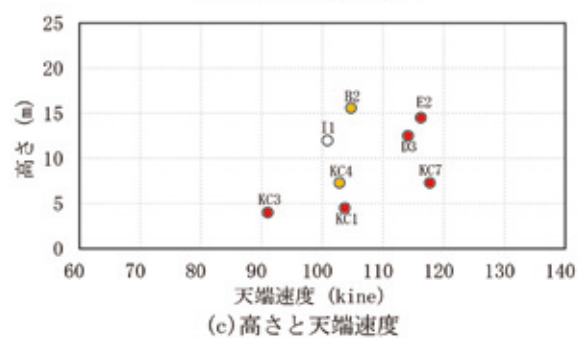
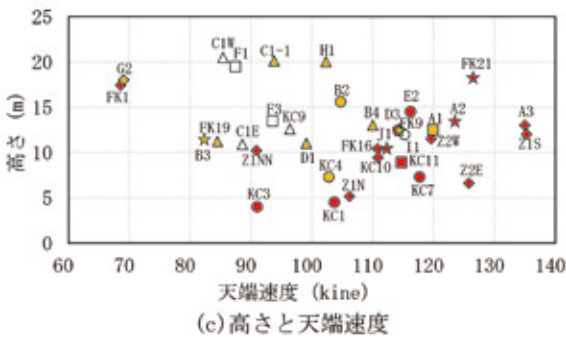
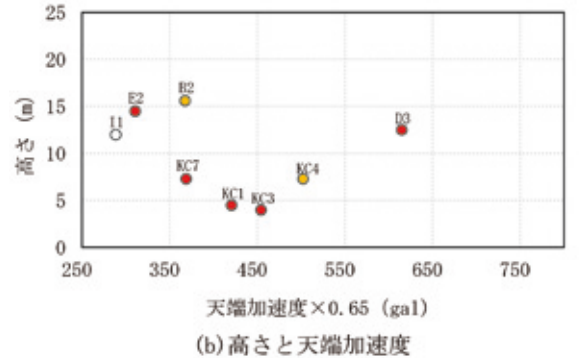
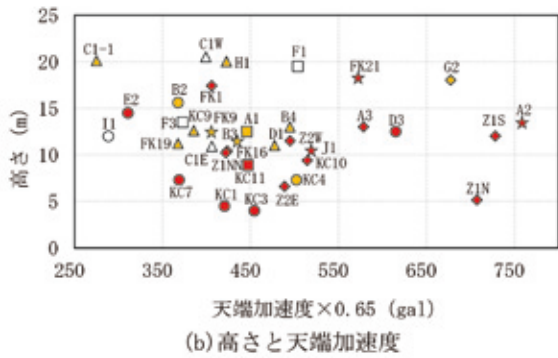
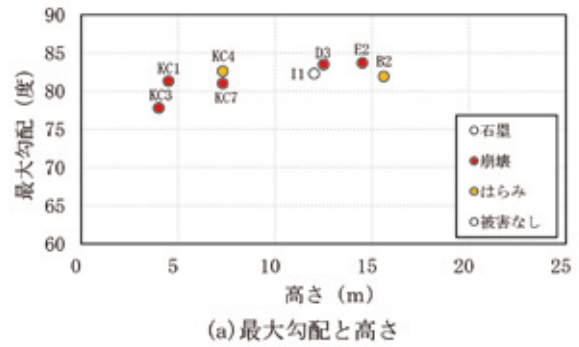
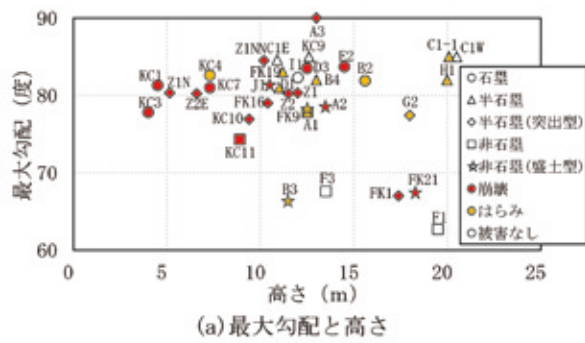


図-28 全石垣の被害分析結果

図-29 石垣タイプの被害分析結果

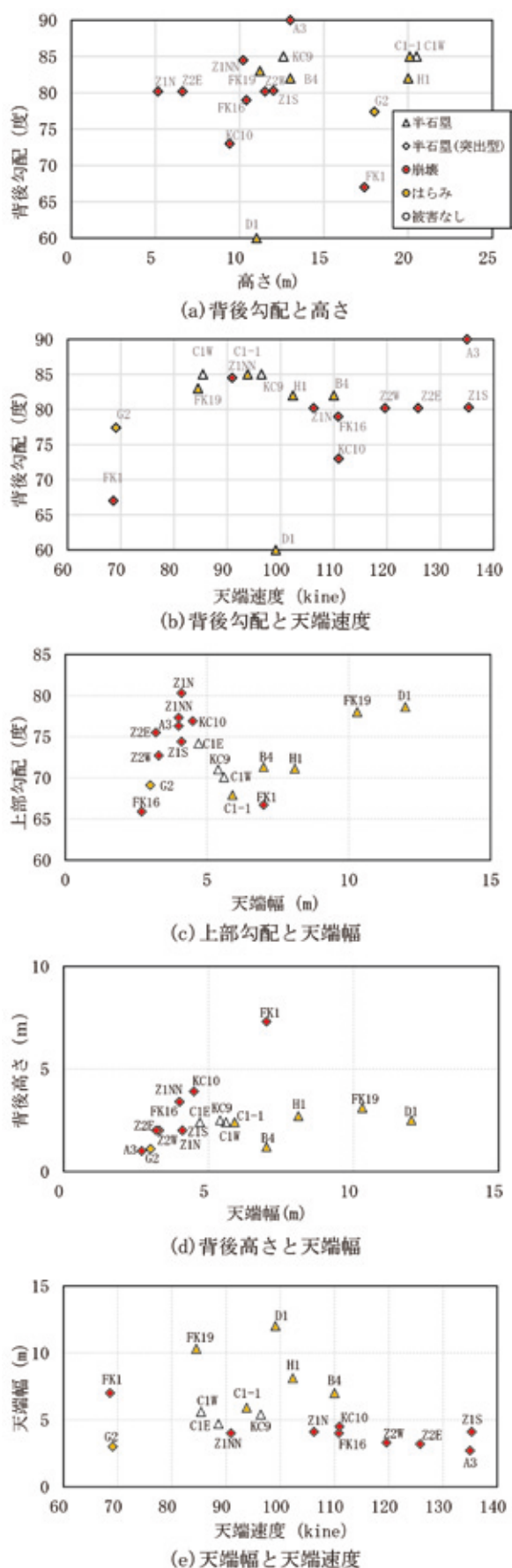


図-30 半石畳タイプの被害分析結果

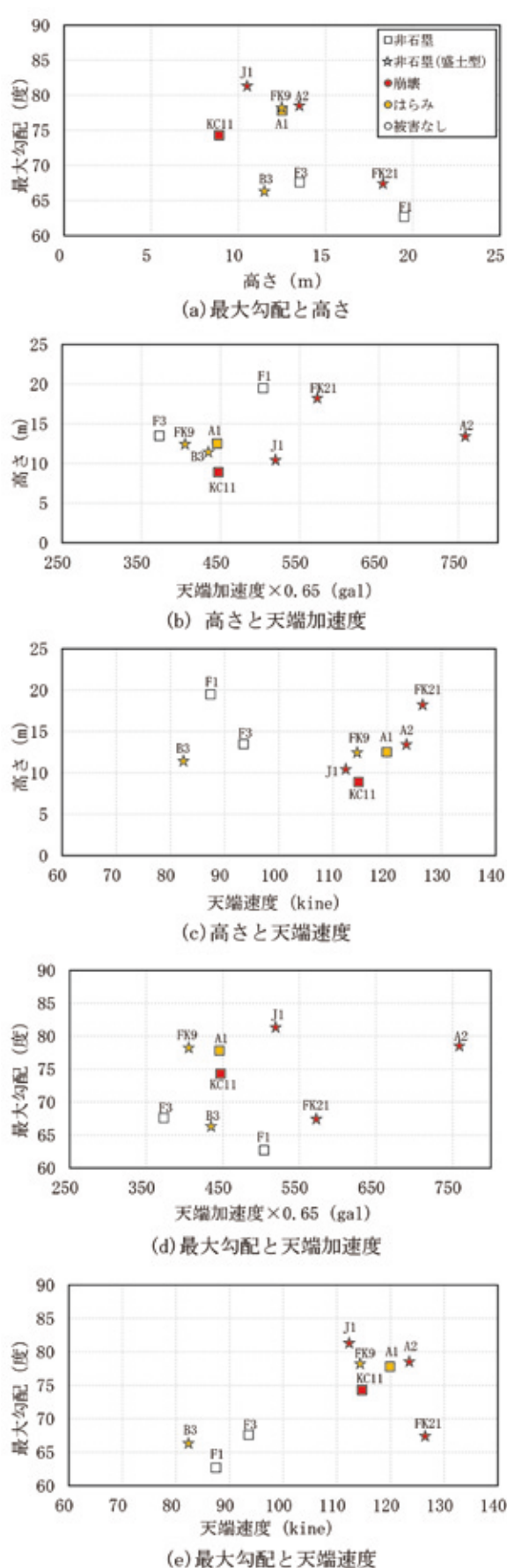


図-31 非石畳タイプの被害分析結果

た。

- (a) 石垣構造の被害要因としては、石塁、半石塁の突出型、非石塁の盛土型の崩壊が多い。
- (b) 全石垣の被害要因としては、石垣高さよりも上部勾配と天端速度の影響を受けている。
- (c) 半石塁の被害要因としては、突出型の構造石垣高さよりも背後勾配と天端速度の影響を受けている。

6. 熊本城石垣の被災履歴と被害要因分析

6.1 分析方法

被害要因分析は地盤の3次元空間を推定し、図-4に示す熊本城全域で主に地震前の既存測量がある35箇所を対象に、動的FEM解析により石垣の応答加速度・速度の算定を行った。この結果から熊本城石垣の被災履歴と被害要因分析を行った。

6.2 被害分析結果

石垣の各断面の分析は、全石垣タイプ、石塁タイプ、半石塁タイプの通常型と突出型、非石塁タイプの通常型と盛土型について行った。石塁タイプは芯土型の対象断面が1箇所のため、石塁型と芯土型に分類せず分析した。

i. 最大勾配と被災履歴との関係 (図-32参照)

- (a) 石塁の場合
被災履歴がある断面はすべて最大勾配が80度を超える。
- (b) 半石塁の場合
被災履歴1回の被害が最も多く、通常型より突出型の方が崩壊が多い。
- (c) 非石塁の場合
勾配が大きいほど被災履歴が多くなる。
- (d) 全体の場合
被災履歴1回の孕みが多い。1回以上のものは82度付近が多い。

ii. 高さとの被災履歴との関係 (図-33参照)

- (a) 石塁の場合
低くとも1回以上の被災履歴が多い。
- (b) 半石塁の場合
高さ5～13mの間で1回以上の被災履歴が多い。
- (c) 非石塁の場合
高さとの被災履歴に関連は見られない。
- (d) 全体の場合
高さ10m以下では被災履歴1回が多い。

iii. 天端加速度と被災履歴との関係 (図-34参照)

- (a) 石塁の場合
被災履歴2回以上は加速度300galでも崩壊する。
- (b) 半石塁の場合
加速度400gal以上で被災履歴1回以上が多い。
- (c) 非石塁の場合
天端速度と被災履歴に関連は見られない。

(d) 全体の場合

被災履歴2回以上は400gal付近で崩壊している。

iv. 天端速度と被災履歴との関係 (図-35参照)

- (a) 石塁の場合
天端速度が大きい程、被災履歴が増える。
- (b) 半石塁の場合
通常型は天端速度90kineでは被災履歴0回、100kineでは1回になる。突出型では110kineで1回以上が多い。
- (c) 非石塁の場合
天端速度110kine以上で崩壊が多い。
- (d) 全体の場合
天端速度80kineで被災履歴1回、100kine以上で2回以上が多い。

6.3 まとめ

石垣の被害分析の結果、以下のことが明らかとなった。

- (a) 石垣の被災履歴と被害要因としては、被災履歴1回の石垣は孕みのものが多いが、被災履歴2回以上の石垣はすべて崩壊している。
- (b) 石垣タイプの被災履歴分布の割合を比較すると、石塁タイプは2回以上が最も多く、半石塁タイプは1回が多く、非石塁タイプは0回が多い。

7. 総括

本論文では、熊本城全域で主に地震前の既存測量がある35箇所を対象に、地盤の3次元空間の推定し石垣で算定される応答加速度・速度に着目した動的FEM解析から石垣タイプの被害要因分析と耐震性の検証を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

7.1 熊本城石垣の被害要因分析

- (a) 石垣構造の被害要因としては、石塁、半石塁の突出型、非石塁の盛土型の崩壊が多い。
- (b) 全石垣の被害要因としては、石垣高さよりも上部勾配と天端速度の影響を受けている。
- (c) 半石塁の被害要因としては、突出型の構造石垣高さよりも背後勾配と天端速度の影響を受けている。

7.2 熊本城石垣の被災履歴と被害要因分析

- (a) 過去に1回でも被災した石垣は孕みや崩壊が発生しやすく、2回以上被災した石垣は崩壊しやすい。
- (b) 石垣構造の被害要因としては、石塁、半石塁、非石塁の順で被災履歴が多い。

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。

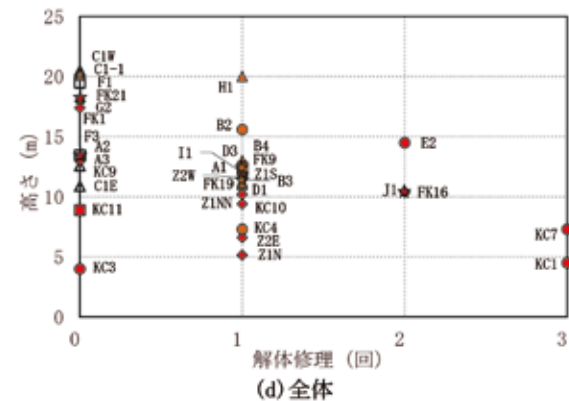
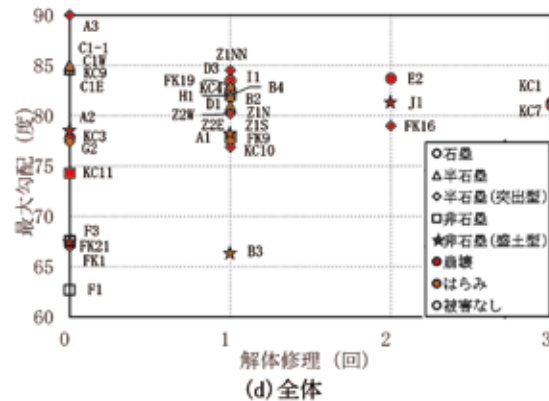
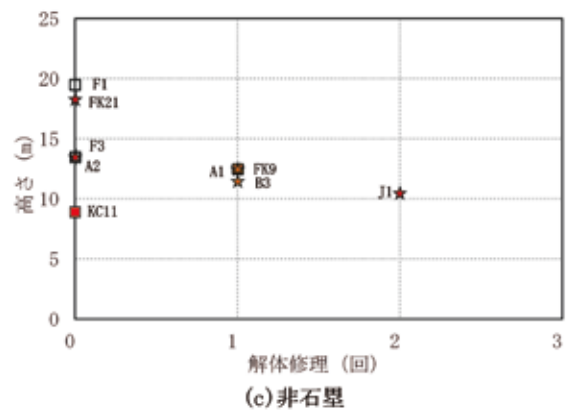
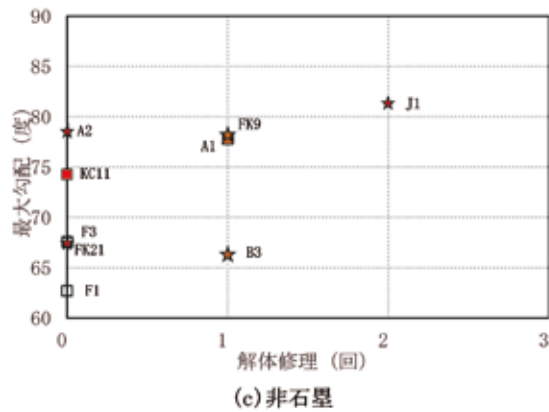
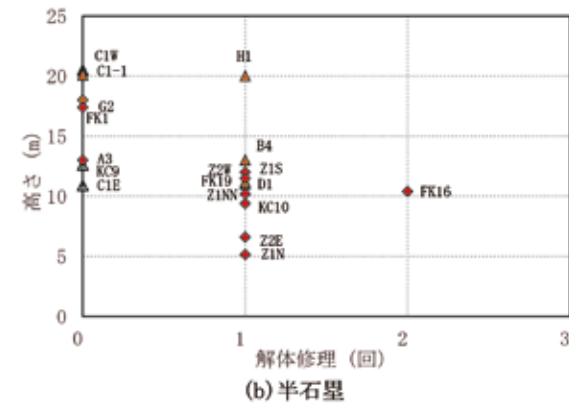
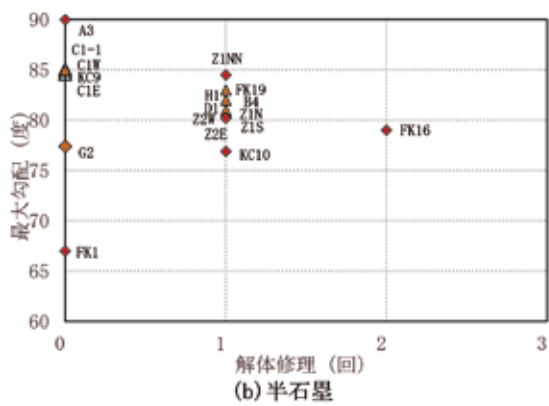
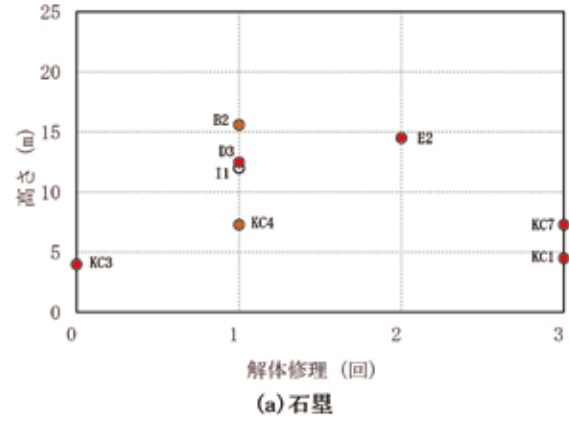
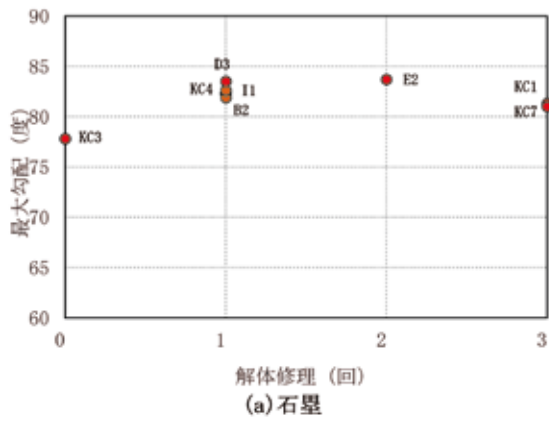
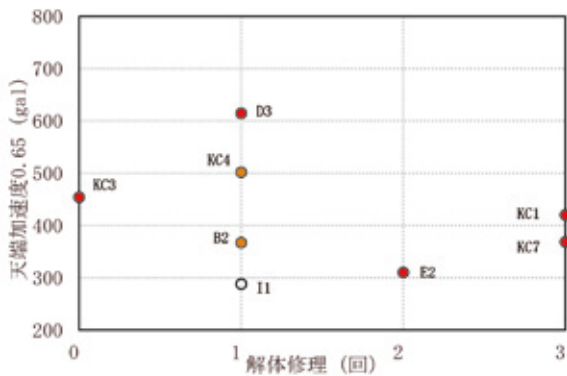
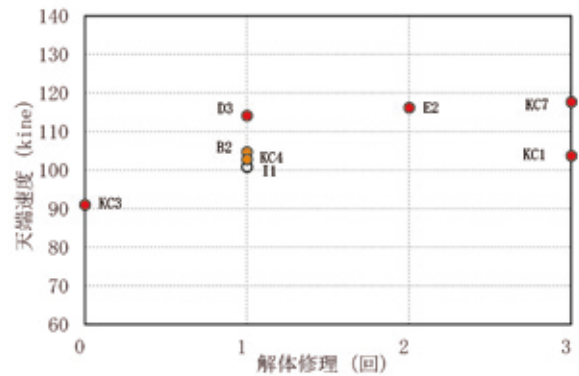


図-32 最大勾配と被災履歴との関係

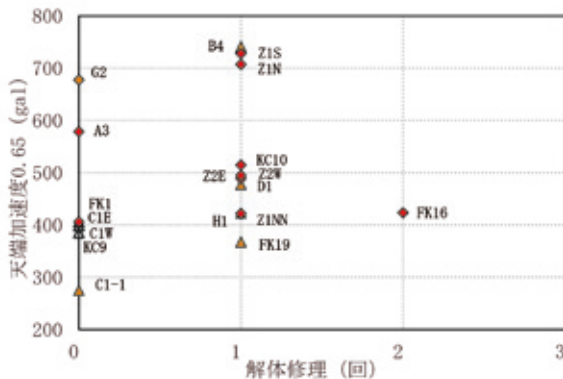
図-33 高さ と被災履歴との関係



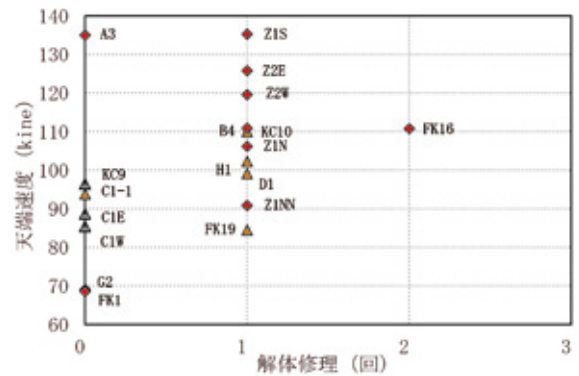
(a) 石垣



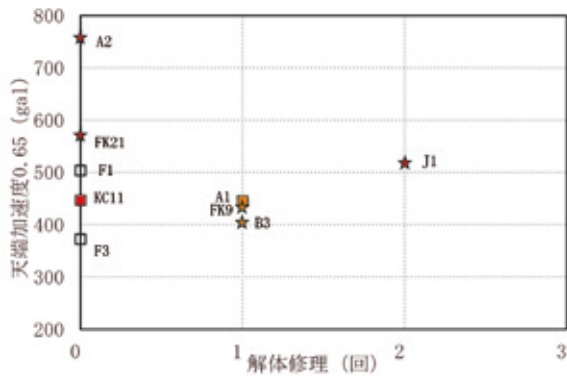
(a) 石垣



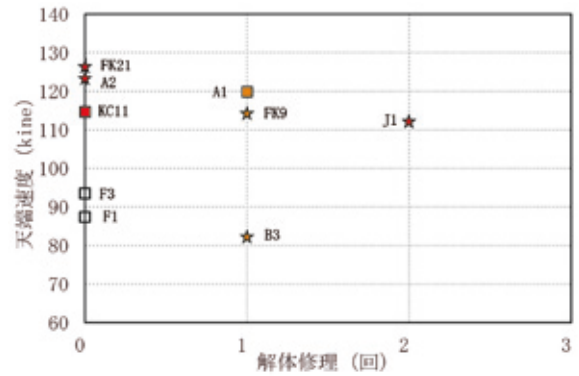
(b) 半石垣



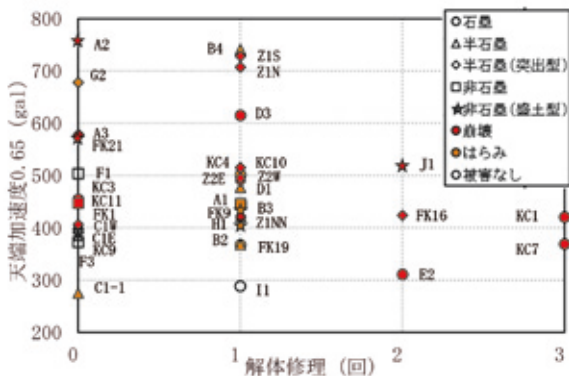
(b) 半石垣



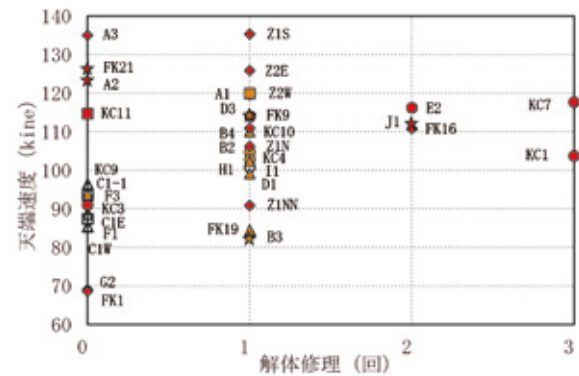
(c) 非石垣



(c) 非石垣



(d) 全体



(d) 全体

図-34 天端加速度と被災履歴との関係

図-35 天端速度と被災履歴との関係

参考文献

- 1) 源健二：特別史跡熊本城跡の被災状況と復旧について，建設マネジメント技術，pp41-55, 2017.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 橋本隆雄，齊藤猛：表面波・弾性波・地中レーダ探査による小峰城石垣の崩壊原因の分析，国士館大学理工学部紀要，第13号（2020），pp.95-108, 2020.
- 6) Takao Hashimoto, Katuya Ishizukuri, Taku Matsu：Analysis of the stone wall damage of Kumamoto Castle by 2016 Kumamoto earthquake using 3D laser scanner and ground survey, Journal of 2019 Rock Dynamics Summit In Okinawa, RDS-FS-0029, 2019.5.
- 7) 橋本隆雄，齊藤猛：熊本城の微動アレイ探査の解析，国士館大学理工学部紀要，第12号（2019），pp.231-246, 2019.
- 8) 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，第12号（2019），pp.247-259, 2019.
- 9) 橋本隆雄，石作克也，松尾拓：2016年熊本地震による熊本城石垣崩壊メカニズムの分析，第73回年次学術講演会，pp.GO11-01-11，第15回日本地震工学シンポジウム，日本地震工学会，2018.
- 10) Reo Tsunekawa, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Takao Hashimoto：Collapse behavior and Analysis of Stone Retaining Masonry's damage in Kumamoto castle during the 2016 Kumamoto earthquake ISAIA S2-10, pp.1075-1079, 2018.
- 11) Satoshi Sugimoto, Minoru Yamanaka, Yuuya Katsuda：Research of damaged condition by the 2016 Kumamoto earthquake and ground investigation on stone walls and earth structures in Kumamoto castle, International Journal of GEOMATE 14 (45), pp.66 - 72, 2018.
- 12) 橋本隆雄，鈴木彩加，石作克也：赤外線サーモトレーサ及び3Dレーザースキャナを用いた2016年熊本地震による熊本城石垣の被害調査に関する研究，国士館大学理工学部紀要，第11号，2017.
- 13) 大塚鎮，酒井久和，小野祐輔：3次元DEMによる地震時の組積構造に対する適用性の研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学）75（4），I_199-I_206, 2019.
- 14) 篠崎将也，栗原陸人，伊吹竜一，石川大地，小野祐輔，酒井久和，末富岩雄，福島康宏，橋本隆雄：熊本地震で被災した百間石垣に対するSPH-DEM法による崩壊シミュレーション，第39回地震工学研究発表会，D12-1494, 2019.
- 15) 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及び崩壊挙動解析，歴史都市防災論文集，Vol. 12，pp.59-66, 2018.
- 16) 池本敏和，宮島昌克，橋本隆雄，岩津雅也：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，地震工学研究発表会，2017.
- 17) 小野祐輔，相澤類，酒井久和，太田直之，中島進，藤原寅士良，高柳剛，湯浅友輝，池田勇司：石積擁壁の耐震補強効果の検討のためのSPH-DEM連成解析法の開発，土木学会論文集A1（構造・地震工学），73巻4号I，pp.357-I_365, 2017.
- 18) 伊吹竜一，小野祐輔，酒井久和，高柳剛，湯浅友輝，池田勇司：SPH-DEM法に基づく石積み擁壁の引き抜き模型実験に対する数値シミュレーション，土木学会論文集A1（構造・地震工学），74巻4号，pp.I_608-I_616, 2018.
- 19) 小野祐輔，内藤正輝，酒井久和，太田直之：SPH法による石積擁壁の模型振動実験の再現解析，土木学会論文集A1（構造・地震工学），72巻4号，pp.I_515-I_522, 2016.
- 20) 野間康隆，山本浩之，西村毅，笠博義，西形達明，西田一彦：城郭石垣の地震時変形予測と安定性評価に関する研究，土木学会論文集C（地圏工学）69巻4号，pp.444-456, 2013.
- 21) 村上友基，沼田宗純，目黒公郎：2次元拡張個別要素法を用いた石垣構造に対する耐震補強策の検討，生産研究，2013年65巻4号447-451，pp.2013.
- 22) 酒井久和，山地智仁，小川悟史：不連続変形法に基づく2001年芸予地震時の石積み擁壁の崩壊シミュレーション，土木学会論文集A1（構造・地震工学），65巻1号，pp.575-580, 2011.
- 23) 橋本隆雄，中澤博志，池本敏和，宮島昌克：非石墨構造石垣における補強技術の耐震性評価に関する大型振動台実験，第75回年次学術講演会，土木学会，CS10-17, 2020.
- 24) 橋本隆雄，中澤博志，池本敏和，宮島昌克：石墨構造石垣における補強技術の耐震性評価に関する大型振動台実験，第55回地盤工学研究発表会，地盤工学会，DS-3-10, 2020.
- 25) 恒川怜央，影山亮太，池本敏和，宮島昌克，橋本隆雄：地震時における城郭石垣の対策工法に関する動的模型実験，第39回地震工学研究発表会，D12-1525, 2019.
- 26) 池本敏和，宮島昌克・橋本隆雄，中島進，藤原寅士良，池本宏文：石積擁壁の耐震挙動に関する模型実験及び不連続変形法を用いた挙動解析，土木学会論文集F6（安全問題），73（2），pp.181-188, 2017.
- 27) 山本浩之，西形達明，八尾真太郎，西田一彦，笠博義：実物大モデルを用いた城郭石垣の地震時挙動の検討，土木学会論文集C 66（1），43-57, 2010.
- 28) 梶田啓介，北浦勝，池本敏和，宮島昌克：石垣築石部の水平動的荷重時の水平移動量評価—もたれ擁壁型小型模型の振動実験—，土木学会中部支部研究発表会，2008
- 29) 太田直之，杉山友康，岡田勝也，鳥井原誠，山本彰，山田祐樹：間知石による石積壁の地震時変形メカニズムに関する実験的研究，土木学会論文集F，62巻2号，pp.213-225, 2006.4.
- 30) 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.
- 31) 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.
- 32) 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，社会安全学研究 第7号，2016.