

論文 Original Paper

熊本城の石垣タイプと被害の相関についての研究

橋本隆雄*¹, 石作克也*², 松尾拓*³

A study of the correlation between the stone wall type and damage of Kumamoto Castle

Takao Hashimoto *¹, katuya Ishizukuri *², Taku Matsuo *³

Abstract: Kumamoto castle of stone walls, received a total of 30% of the damage by the 2016 earthquake Kumamoto. On the other hand, although castle of stone walls has the same height and structure, there are collapsed parts and parts that do not collapse. But, the mechanism of the collapse of the stone wall has not been clarified. Therefore, the type of the stone wall was classified into three types, stone base, semi-stone base and non-stone base type according to the structure of each stone wall and the back ground.

In this paper, we analyzed the relationship between its shape and damage rate. As a result, it was found that the shape of the stone base type is not the height of the stone wall, but the cause of the collapse. Moreover, it was found that there were many damage of collapse or pregnancy with loose ground and a slightly loose ground type.

Key words: earthquake, stone wall, collapse, castle

1. はじめに

2016年熊本地震の一連の地震活動による強震動の作用によって、4月14日21時26分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震（以後、前震と呼ぶ）、その約28時間後の4月16日1時25分に熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の地震（以後、本震と呼ぶ）が発生した。熊本城では、強震動の作用により、写真-1及び写真-2に示すように石垣の崩壊・孕み出し、櫓・長塀の損壊などの甚大な被害が熊本城内のほぼ全域で広範囲にわたって発生した。

熊本城調査研究センターの速報（2016年6月10日時点）による被害概要では、熊本城内の石垣の被害は全体の30%にも及んでいるが、その被害原因については明らかとなっていない。これまでの研究では、赤外線サーモトレーサ¹⁾及び3Dレーザスキャナ²⁾を用いた調査で熊本城石垣の変状程度を把握できるかの検討を行った。図-1はその結果を用いた熊本城の標高鳥瞰図である。ここでは、石垣の形状がいくつかあり、その影響を分析



写真-1 百間石垣の崩壊



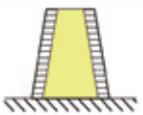
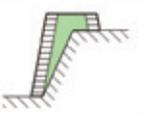
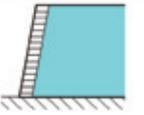
写真-2 重要文化財「北十八間櫓」の崩壊

*¹正会員国士舘大学理工学部理工学科、教授 博士（工学）*²株式会社 日測、測量部*³ ■

するために以下のように定義する。石塁とは表面の築石内の裏込石が全て径20～30cmもある石からなるもので、中央の芯部に土（改良土）がある場合を芯土型という。半石塁は土斜面上に石塁を斜面上部地盤よりも高く築造したものをいう。非石塁タイプは斜面上部地盤の前面に石垣を築造したものをいう。

そこで、本論文では孕み変状の有無を3Dレーザスキャナ^{3), 4)}により抽出し、各石垣の背後地盤等について表-1に示すように石塁・半石塁・非石塁タイプの3種類に分け、石垣の形状と被害程度・タイプの関係被害割合を分析して、石垣崩壊メカニズムを明らかにすることを目的としている。

表-1 各石垣のタイプ

タイプ	石塁	半石塁	半石塁
形状			

2. 石垣の修復と被害箇所

2016年熊本地震では、図-2(a)に示すように前震でこれまで修復してきた10箇所被害箇所が発生した。本震では、図-2(b)に示すようにこれまで修復してきた箇所ほとんどに被害が発生した。

3. 石垣構築年代と被害箇所

図-3は、富田時代区分に基づいた石垣構築年代の平面図である。図-4は、石垣構築年代と被害箇所の平面図である。この中のピンク色(A～Z)は桑原が地震前の1984(昭和59)年に熊本城23箇所の石垣の断面を実測し、正確な石垣曲線を明らかにした報告書⁵⁾の測量ポイント位置である。またこの中の緑色(FK1～28)は福田が地震前の1984(昭和59)年に熊本城28箇所の石垣の断面を実測し、正確な石垣曲線を明らかにした報告書⁶⁾の測量ポイント位置である。ただし、ここでは桑原断面と同一測定位置の9断面及びFK8とFK27は計測データが実態と異なるため除外した。さらに、熊本城調査研究センターが刊行している報告書に記載の青色の9断面図(KC1～9)を作成した。以上から、断面の合計は49断面となった。

図-5は、石垣構築年代毎の形状と被害を示した断面図で、Xは石垣の地面と接した点からの水平距離を、Yは垂直変位である。地震後の石垣の変状は、橋本・石作が桑原の測量した地震前の同じ箇所付近の測量を行い、地震前後の石垣断面のグラフを作成して比較を行い、孕みの状態を把握した。(a) I期1599年は、天守閣付近の中央部で緩い勾配で造られていて崩壊していないものが多い。ただし、急な勾配になるとはらみを生じてい

る。(b) II期1600年は飯田丸五階櫓付近で勾配の急なものははらみ・崩壊を生じている。(c) III期1601年は緩い勾配で被害が無い。(d) IV期1601年～1607年は孕みを生じた宇土櫓、崩壊を生じた不開門・北十八間櫓・東十八間櫓等多くの被害を受けた石垣が造られている。(e) V期1607年は小天守等の隅部が多く、孕みも多くなっている。(f) VI期1633年～1820年は全てが孕みとなっている。

4. 石垣のタイプと被害状況の分析

(1) 石垣タイプの分類

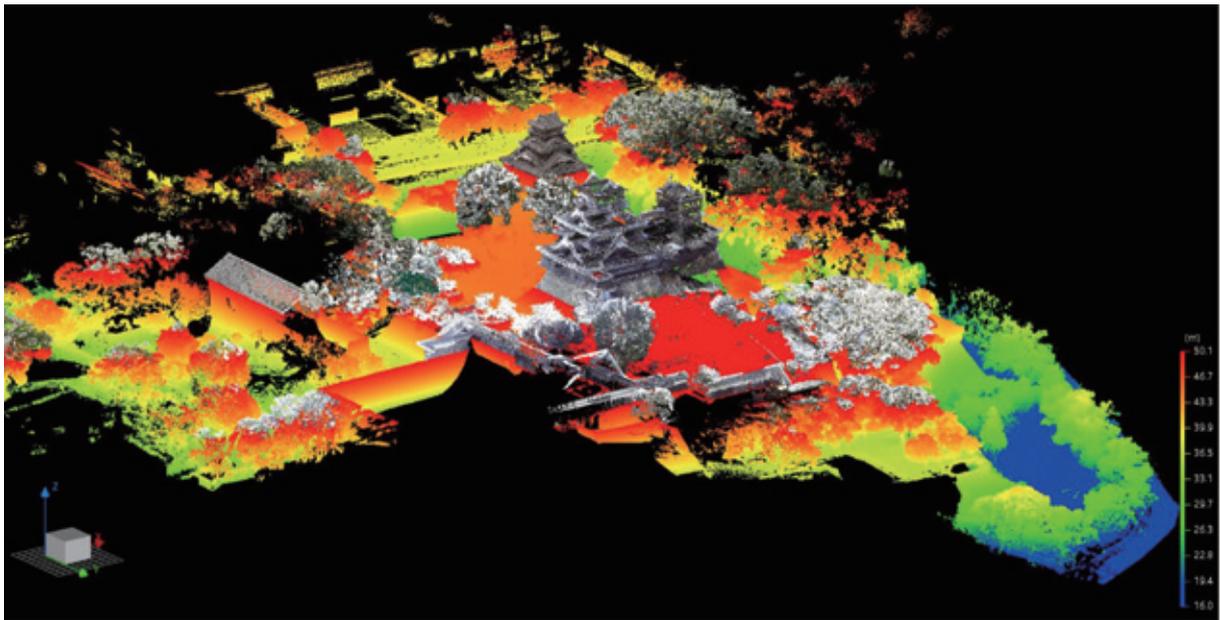
図-6は石塁タイプの位置図で、西大手御門、地藏門櫓台、西竹之丸五階櫓台などがある。石塁タイプには石塁の他に芯土型があり、写真-3のように高さも低くても緩い勾配で崩壊している。図-7は半石塁タイプの位置図で、戌亥櫓、加藤神社北側、数奇屋丸二階御広間付近などがある。半石塁タイプには石垣底部からの緩い地盤型と石垣背後に緩い地盤を持つやや緩い地盤型(写真-4)、背後が地山の固い地盤型の3つがある。図-8は非石塁タイプの位置図で、北十八間櫓、源之進櫓、御客方櫓などがある。非石塁タイプには半石塁と同様に石垣底部からの緩い地盤型と石垣背後に緩い地盤を持つやや緩い地盤型(写真-5)、背後が地山の固い地盤型の3つがある。



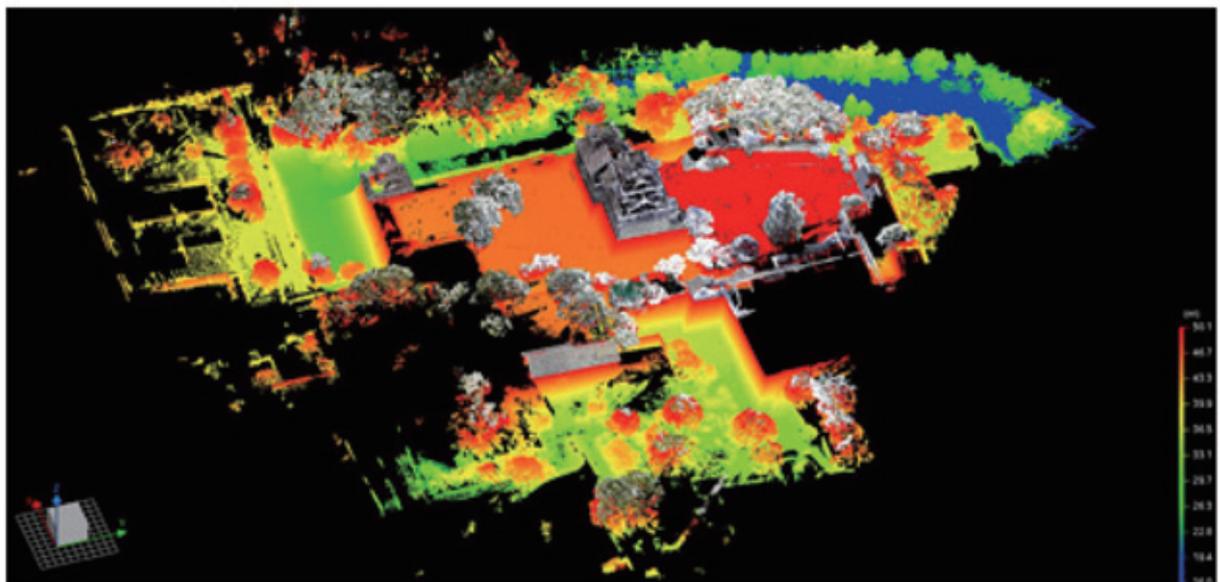
写真-3 石塁型の崩壊角度
(西大手御門)



写真-4 半石塁型の崩壊角度
(戌亥櫓(いぬいやぐら)南側)



(a) 南北方向

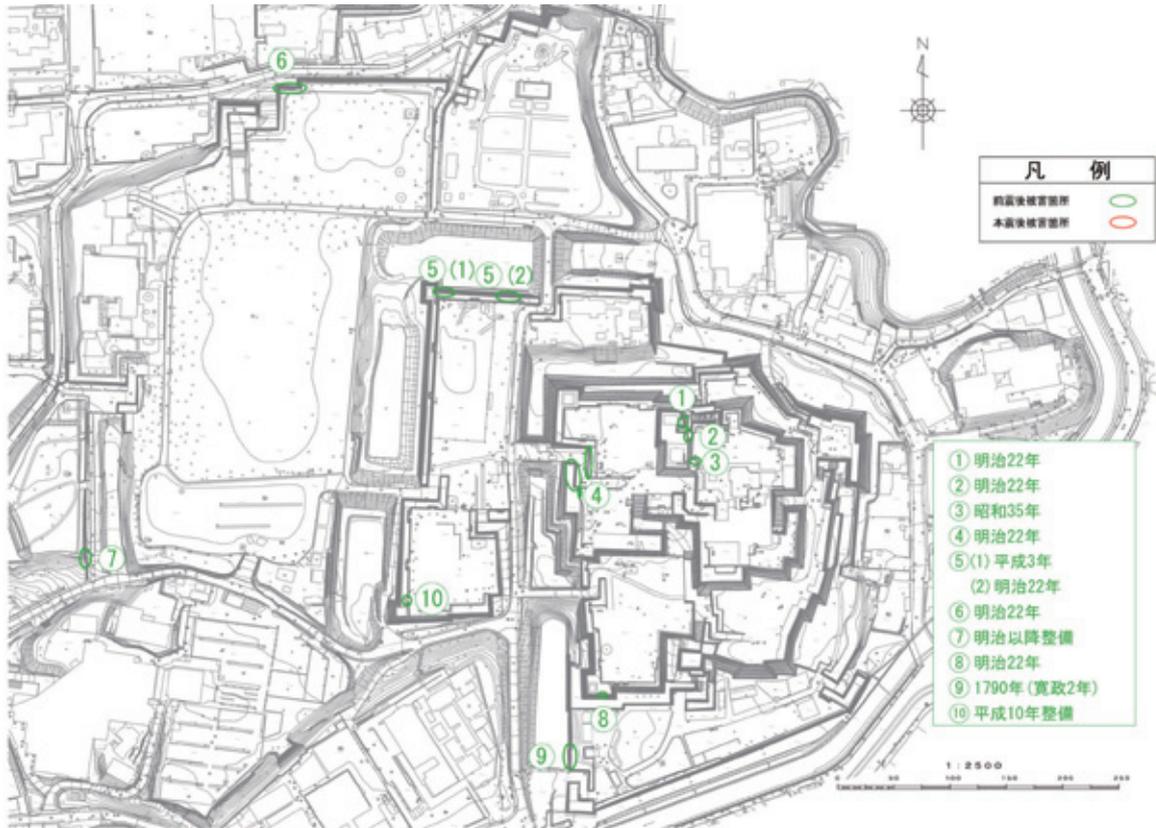


(b) 東西方向



(c) 東西方向の断面図

図-1 熊本城の標高鳥瞰図



(a) 前震



(b) 前震+本震

図-2 熊本地震による石垣修復箇所の被害



図-3 石垣構築年代

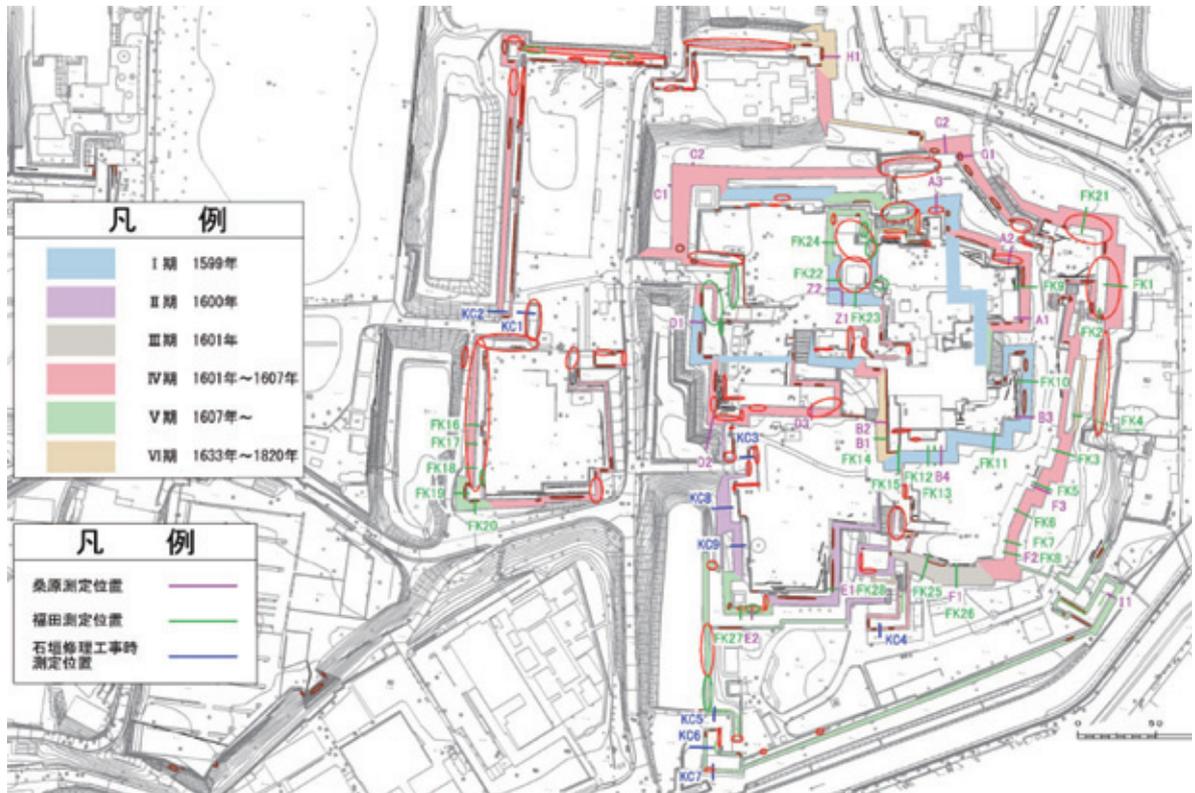
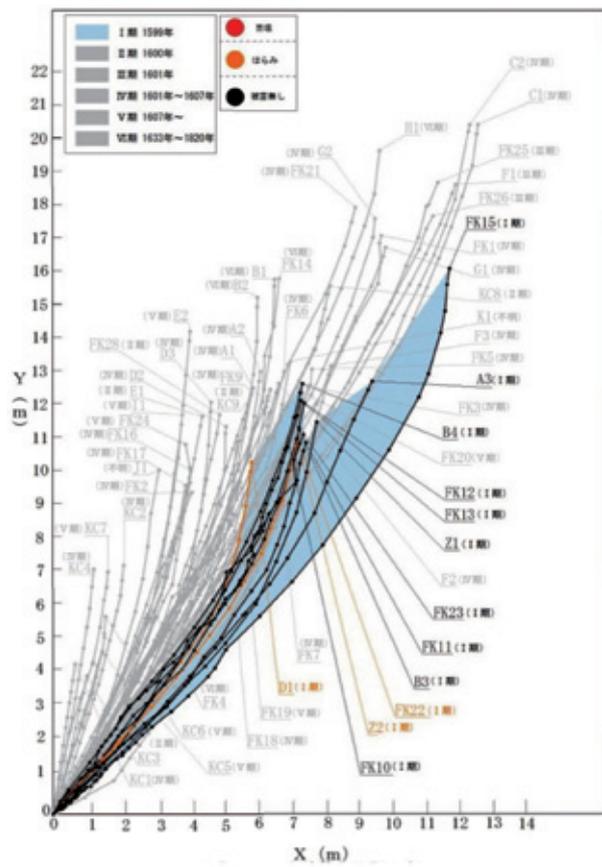
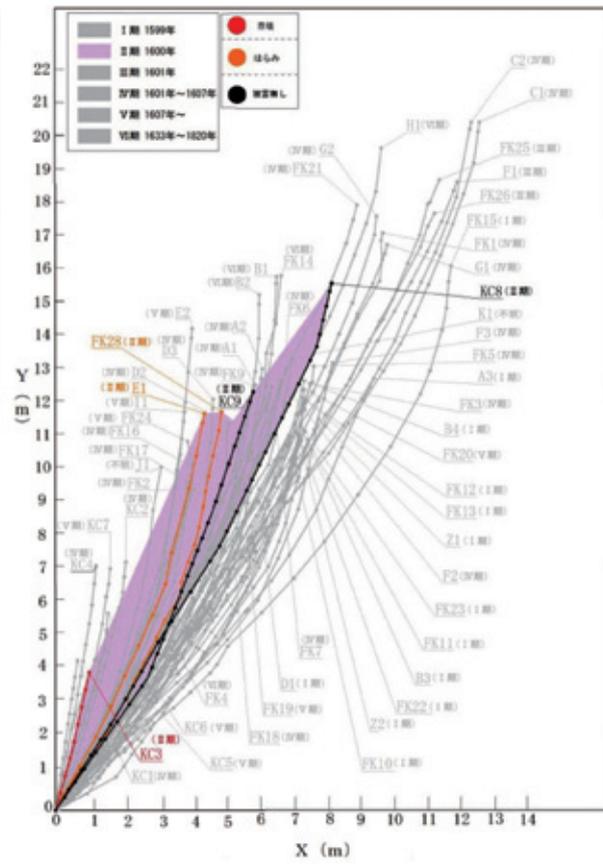


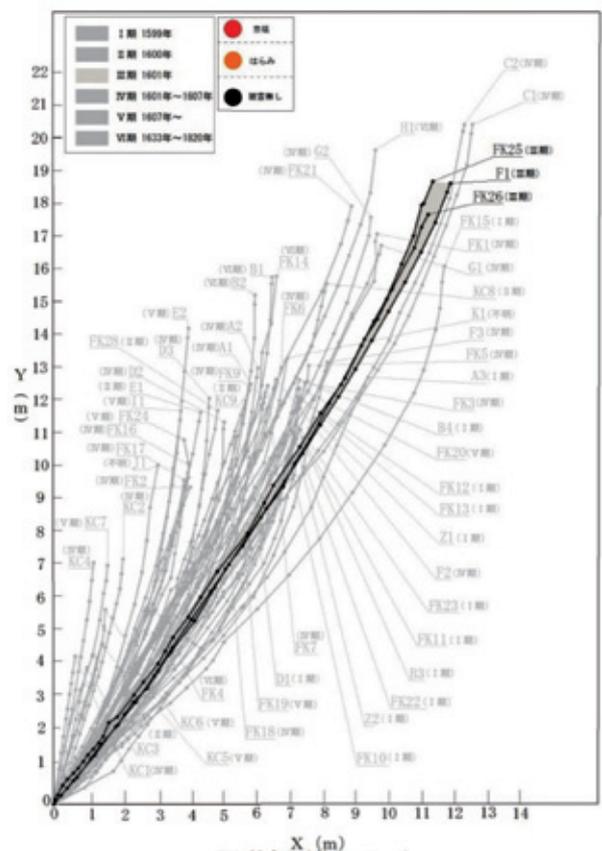
図-4 石垣構築年代と被害箇所



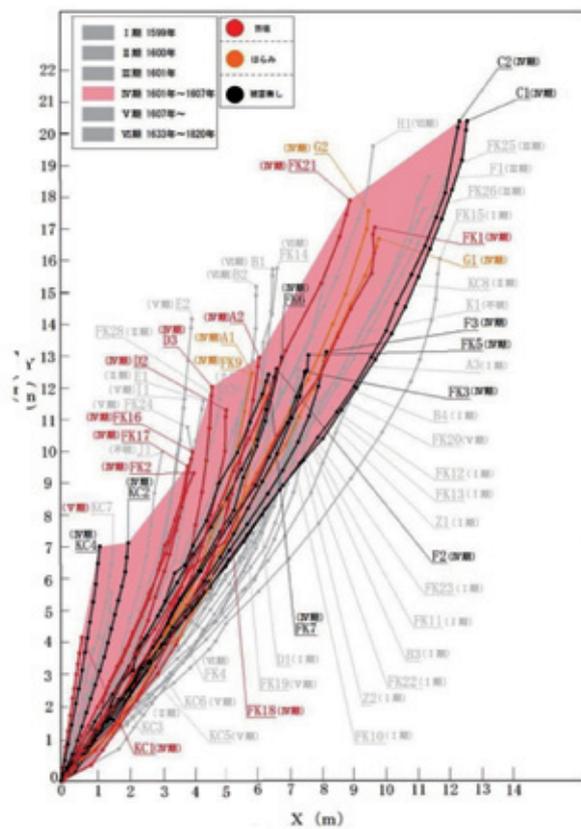
(a) I期1599年



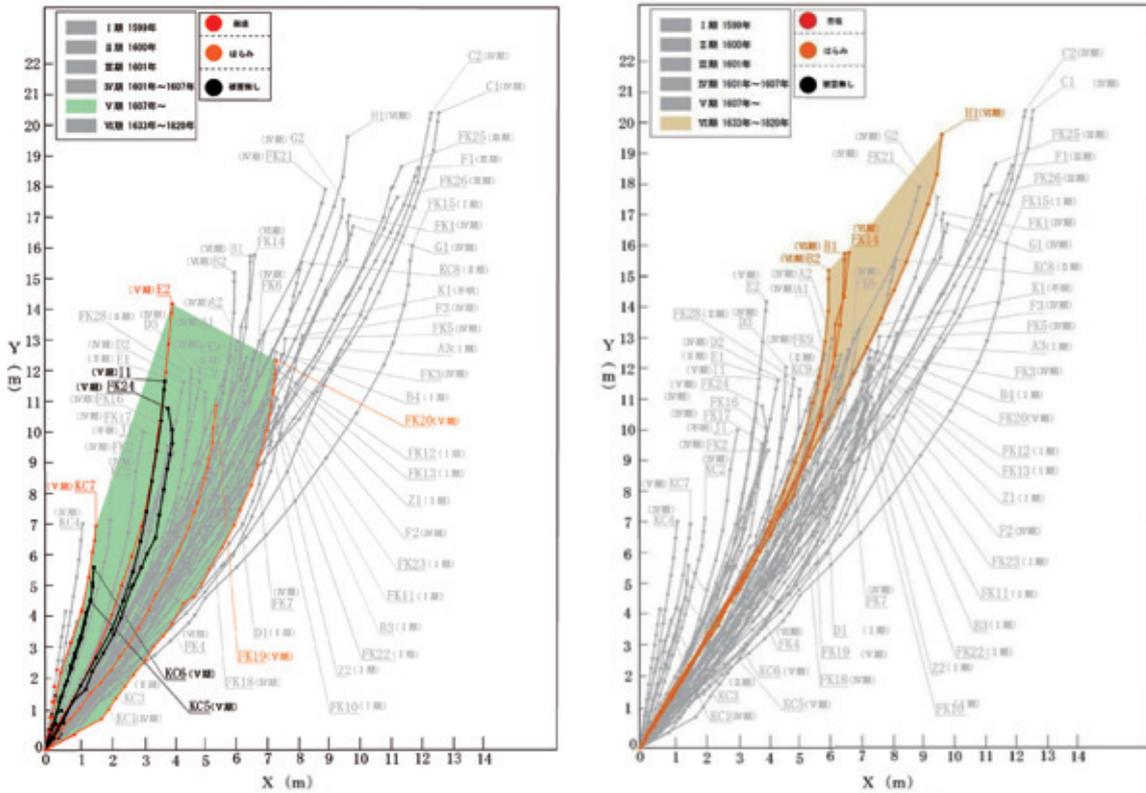
(b) II期1600年



(c) III期1601年

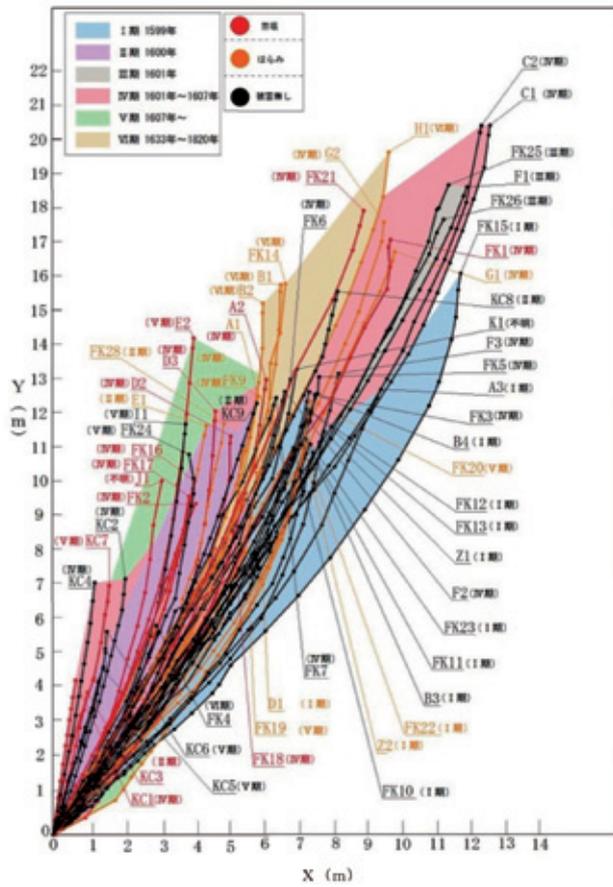


(d) IV期1601年~1607年



(e) V期1607年～

(f) VI期1633年～1820年



(g) 全体

図-5 石垣構築年代毎の形状と被害



図-6 石塁タイプの位置図

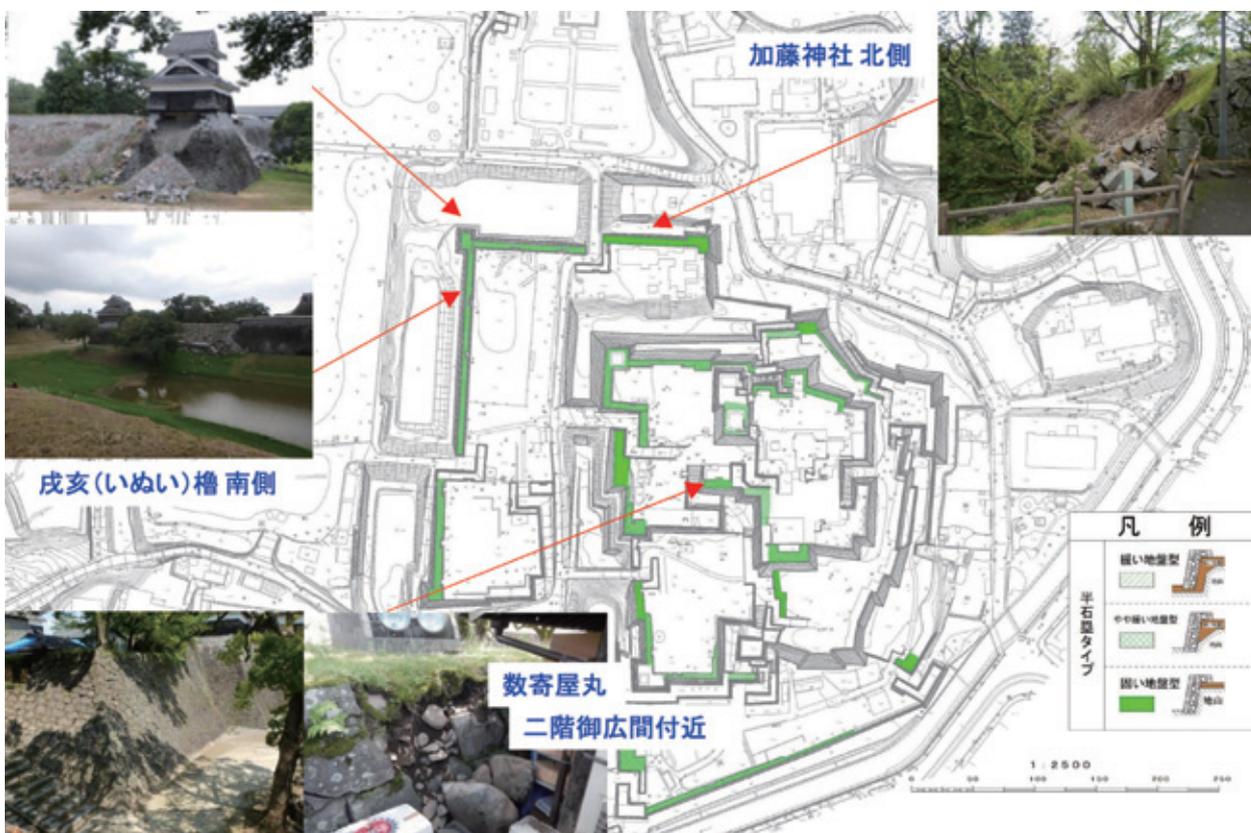


図-7 半石塁タイプの位置図



図-8 非石墨タイプの位置図



(a) 御客方櫓



(b) 北十八間櫓

写真-5 非石墨型の崩壊角度

(2) 石墨タイプと形状、被害程度の関係

図-9は詳細な石垣タイプ毎の被害程度である。図-10は石垣の形状と被害状況である。石垣の形状（高さ及び勾配）は桑原・福田・熊本城調査センター地震前の石垣の断面を実測した結果について法端を揃えて同じグラフにまとめたものである。ただし、図-9の断面数は60断面であるが、図-10の断面は全体の均一性を考慮して同一断面では精度が高いものを選択したために49断面となっている。ただし、この図に地震後の崩壊箇所（赤線）及びその後の3D測量^{3), 4)}を基に地震前との比較を行い、孕み変状箇所（橙線）を抽出し、被害なし（黒線）の3色に色分けした。さらに石垣のタイプは石墨タイプ（黄色）、半石墨タイプ（緑色）、非石墨タイプ（青色）に分類した。図-10(a)の石墨タイプ（黄色）は高さが低いが勾配が急なため、崩壊しているものが多い。図-10(b)の半石墨タイプ（緑色）は高さが高く勾配がやや緩いため、孕みを生じているものが多い。図-10(c)の非石墨タイプ（青色）は高さが高いが勾配が緩いため、崩壊しているものが少ない。

(3) 微動アレイ探査結果による地表面からのS波速度

図-11は微動アレイ探査結果による地表面からのS波速度150m/sを2m毎のコンターで示したものである。

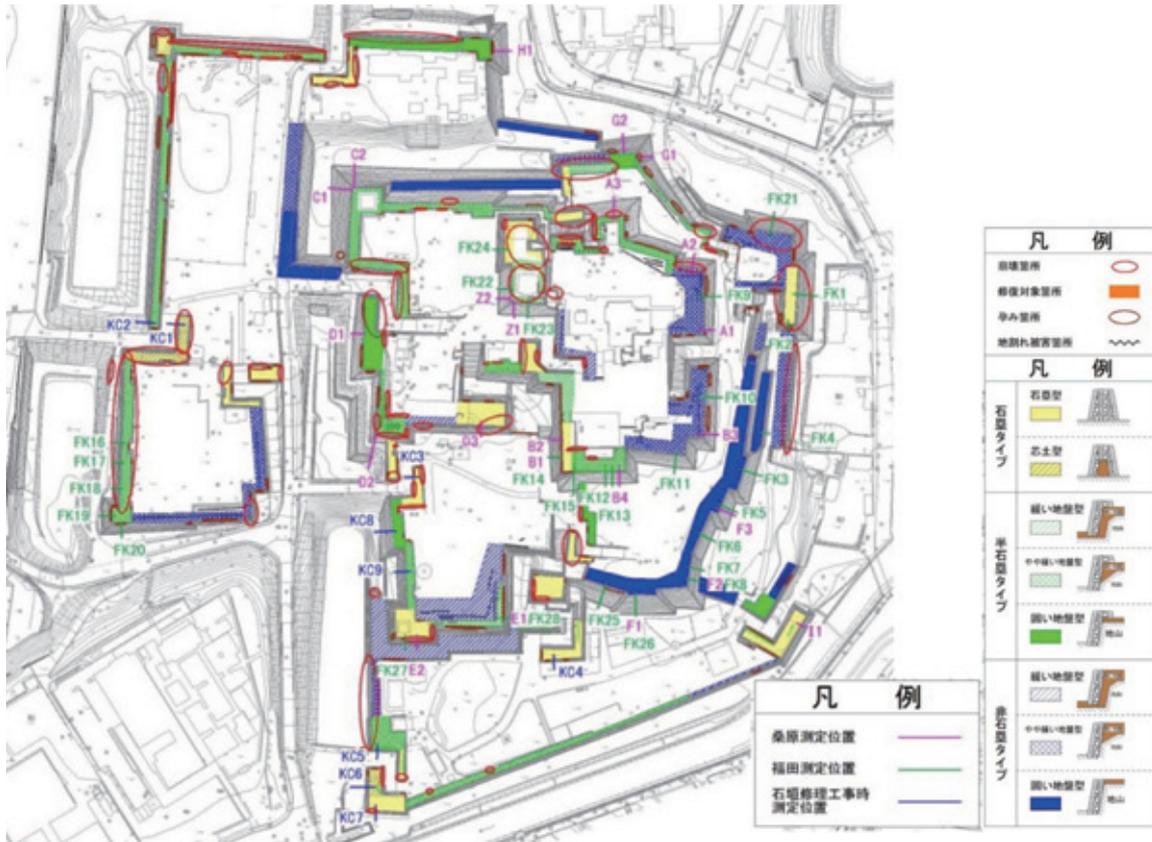
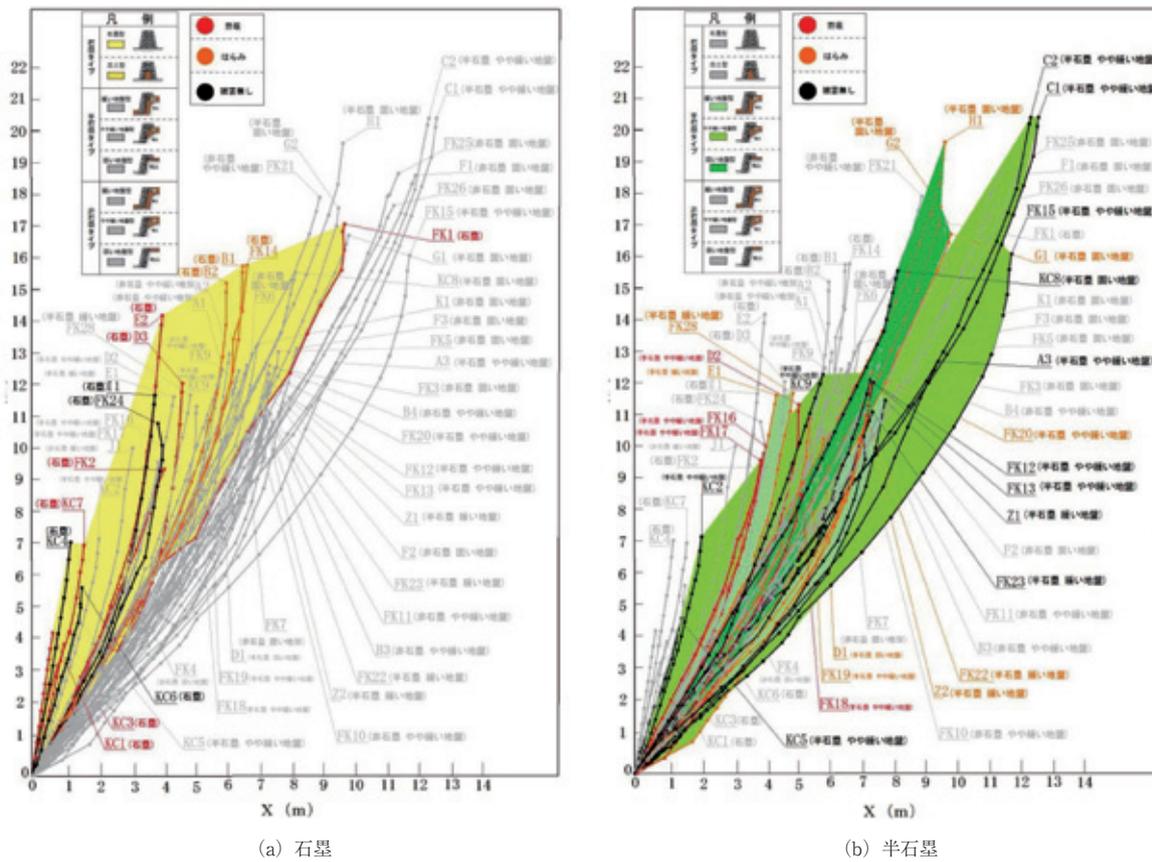


図-9 詳細な石垣タイプ毎の被害程度



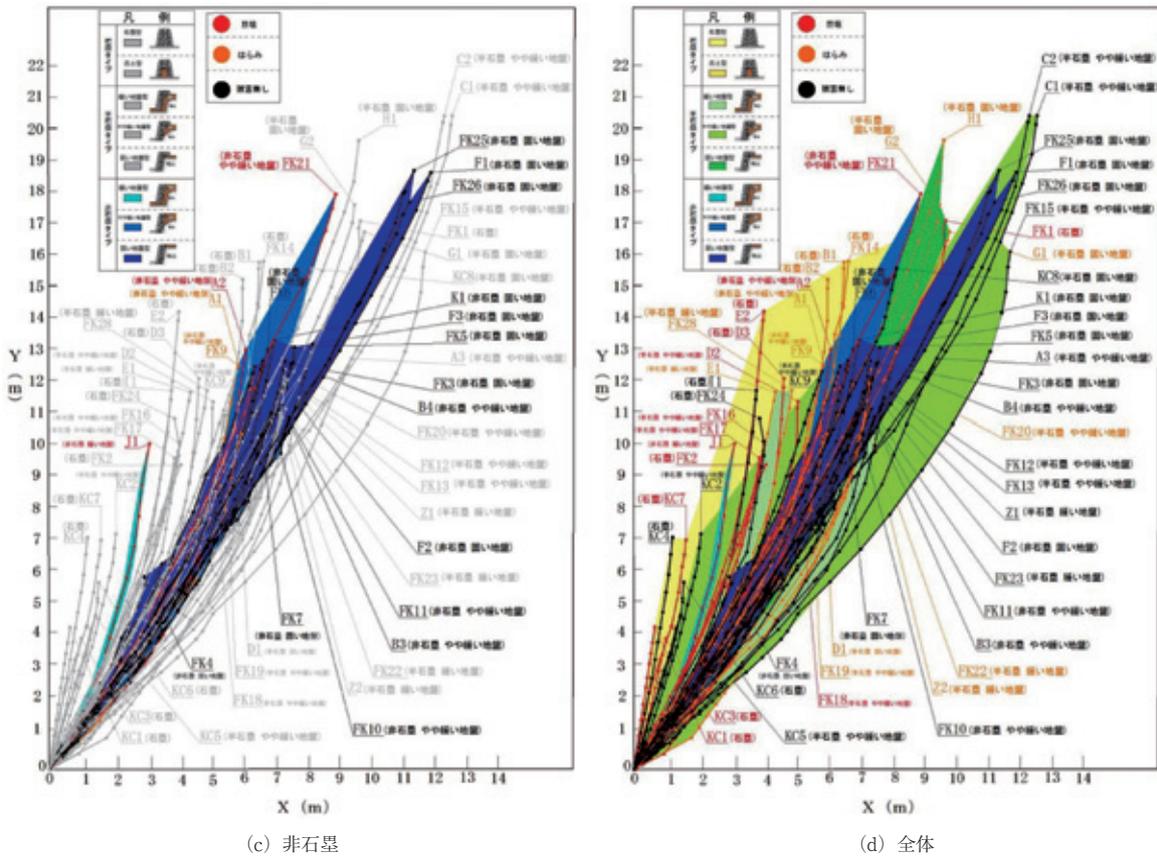


図-10 石垣の形状と被害状況

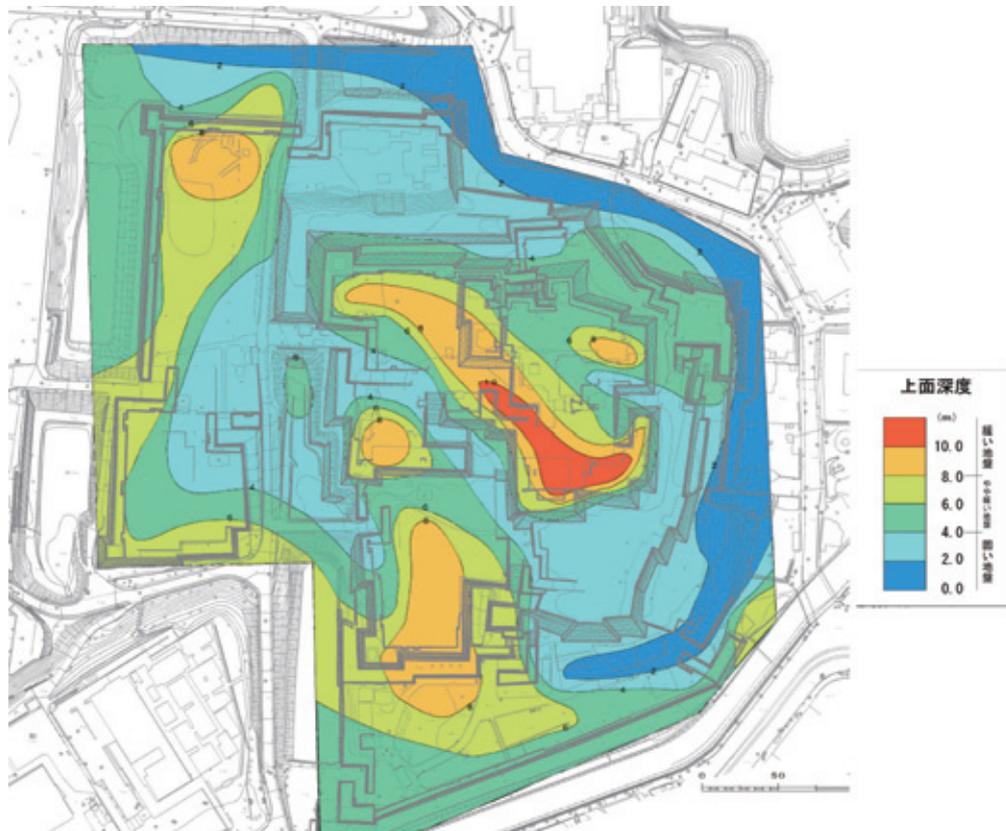


図-11 地表面からのS波速度150m/s

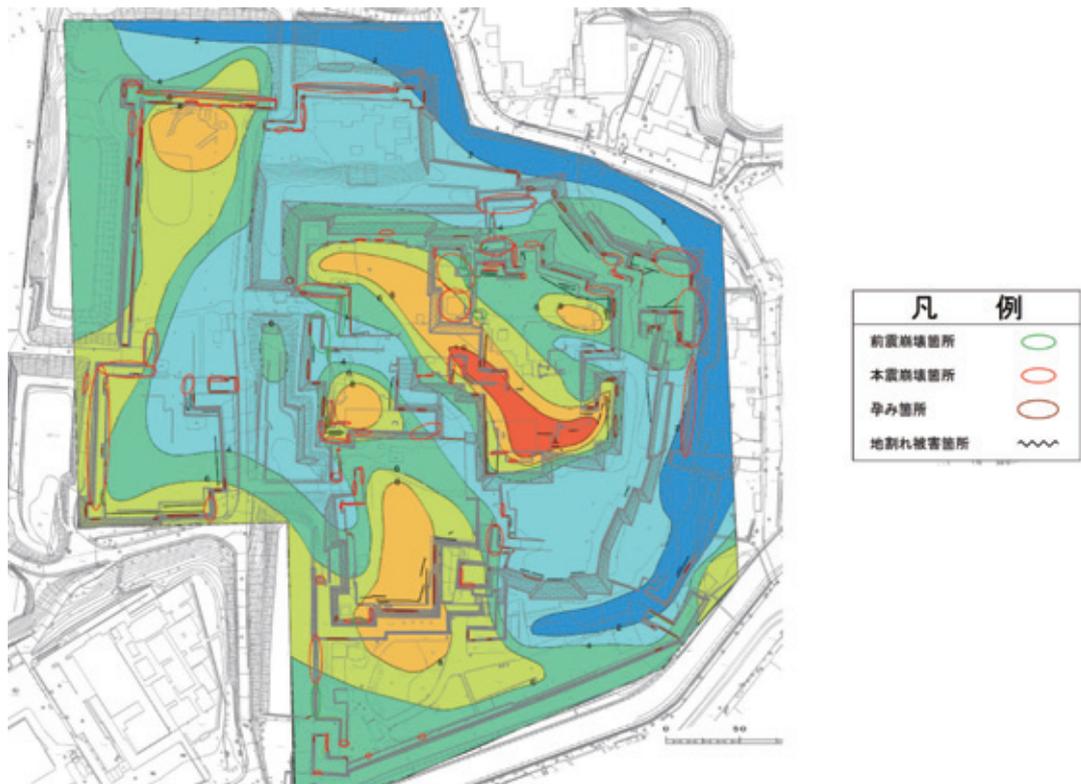


図-12 地表面からのS波速度150m/sと石垣崩壊箇所

地盤の種別はこのS波速度150m/sの深さから、緩い地盤を8m以上、やや緩い地盤を4～8m未満、固い地盤を0～4mと定義した。図-12は地表面からのS波速度150m/sと石垣の崩壊および孕み箇所を重ねたものである。この図面から、石垣の崩壊および孕み箇所が地盤の緩い箇所に変化する箇所での被害が多いことから地盤による地震動の増幅が発生したことが想定される。

(4) 石垣タイプ毎の被害程度分析

図-13は熊本城の各石垣タイプ/全石垣延長で算出した石垣タイプの分類である。石垣型21%・芯土型5%の26%，半石垣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%，非石垣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-14は石垣タイプ毎の被害程度の割合である。このグラフから石垣タイプは勾配が急で高さが低くても崩壊しているもの多く、半石垣タイプ及び非石垣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いことが分かる。一方、半石垣タイプ及び非石垣タイプの固い地盤型がともに被害が軽微であることが分かる。

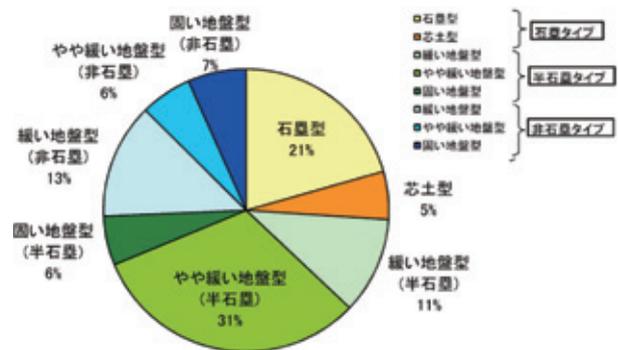


図-13 石垣タイプの分類

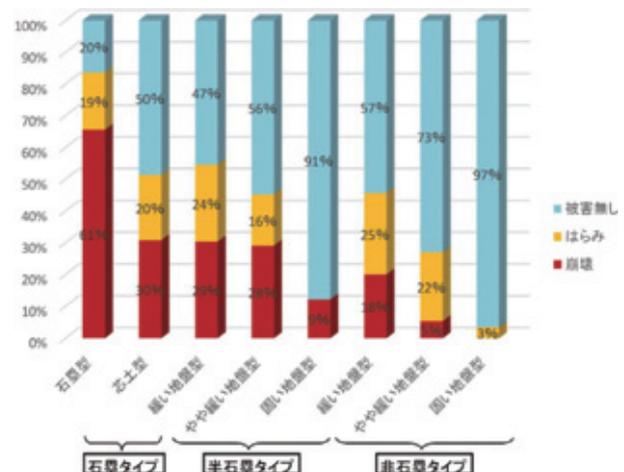


図-14 石垣タイプ毎の被害程度の割合

5. ま と め

石垣タイプは勾配が急で高さが低くても崩壊しているもの多く、半石垣タイプ及び非石垣タイプの盛土型で崩

壊または孕みの被害が多いことが分かった。一方、半石垣タイプ及び非石垣タイプの地山型がともに被害が軽微であることが分かった。すなわち、熊本城の被害原因は石垣タイプが崩壊素因で、激震が崩壊誘因として発生していることが明らかとなった。

謝辞

本論文の作成に当たっては、熊本城調査研究センターの鶴嶋文化財保護主幹、東園主任技師、嘉村文化財保護主事等の職員の皆様、国土館大学理工学部まちづくり学系深澤晃平氏にご協力いただきました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 橋本隆雄, 鈴木彩加: 赤外線サーモグラフィ法による熊本城石垣等調査, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.75-91, 2017.
- 2) 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回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.53-64, 2017.
- 3) 橋本隆雄, 石作克也: 3次元レーザーキャナを用いた熊本城石垣等の変状分析, 第72回年次学術講演会, 土木学会, 2017.
- 4) 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, 国土館大学理工学部紀要, 査読有, 第11号, 2018.11.
- 5) 桑原文夫: 熊本城の石垣勾配, 日本工業大学研究報告書第14巻2号, 1984.
- 6) 公益社団法人 土木学会 関西支部: 歴史的地盤遺跡の保全と活用に関する研究委員会報告書, 歴史的地盤遺跡の保全と活用に関する研究委員会, pp. 79-105, 2018.9.