

積石構造物の被害分析 (話す内容)

積石構造物の被害分析

国士舘大学理工学部 まちづくり学系教授
工学(博士) 橋本 隆雄

1. 熊本城の石垣被害分析
2. 石積擁壁の被害分析
3. 石橋の被害分析

1. 熊本城の被害分析

熊本城調査研究センターのご協力をいただき調査させていただきました。

熊本城はどのような地盤の上に構築されたのでしょうか？

中世の茶臼(ちやうす)山の様子

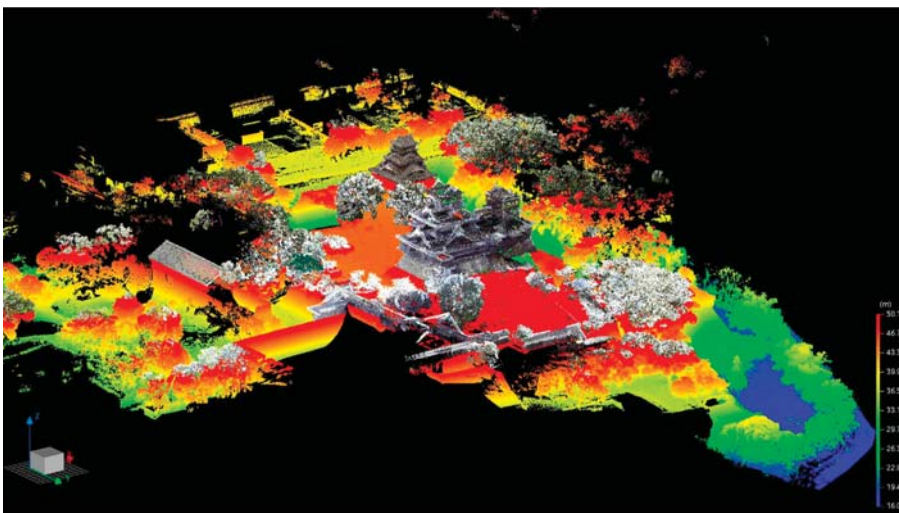


図- 3.5 中世の熊本（『茶臼山ト熊本之絵図』を転写）

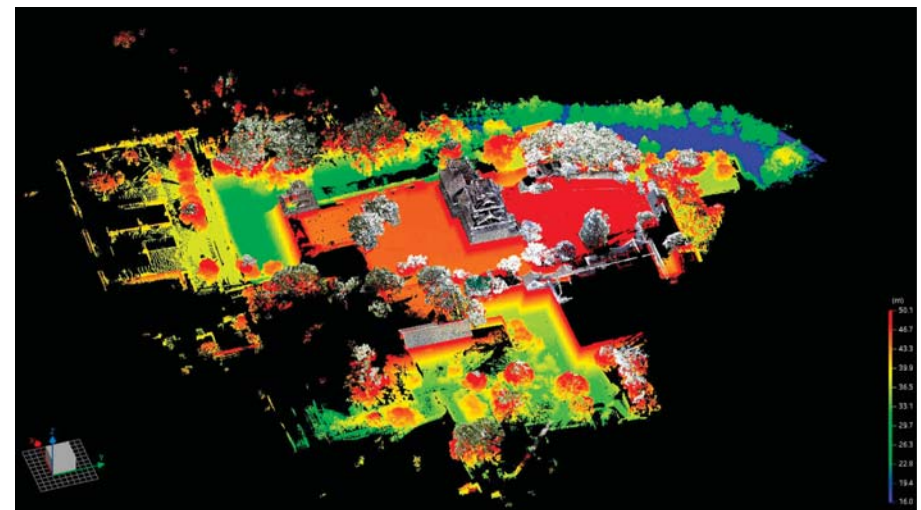
3Dレーザースキャナ位置図



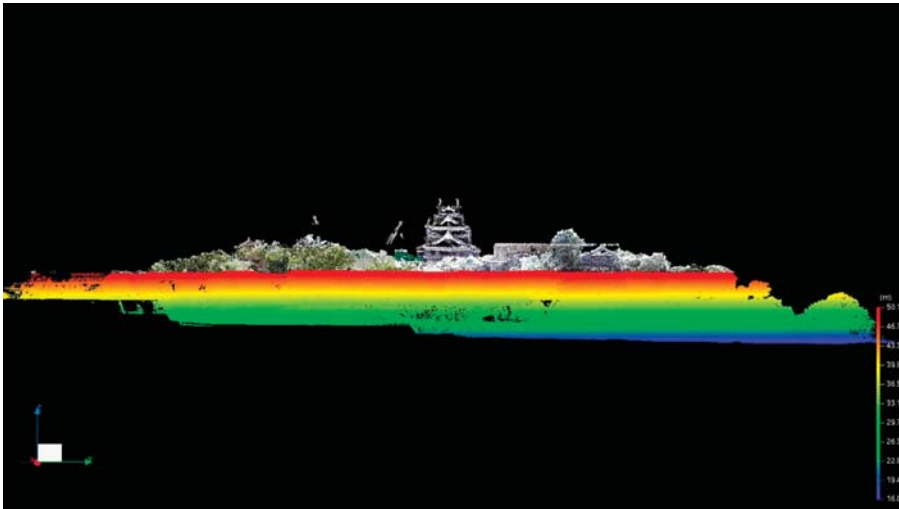
熊本城の標高鳥瞰図



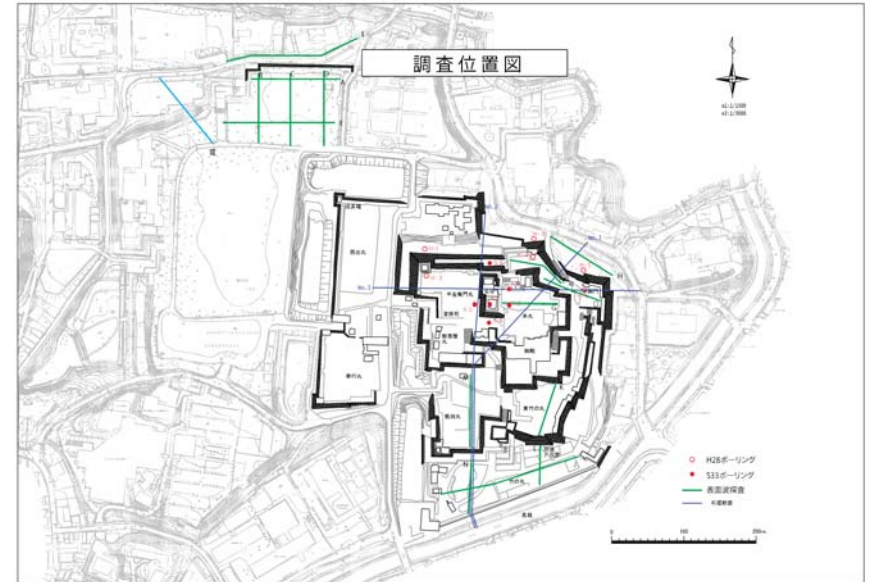
熊本城の標高鳥瞰図



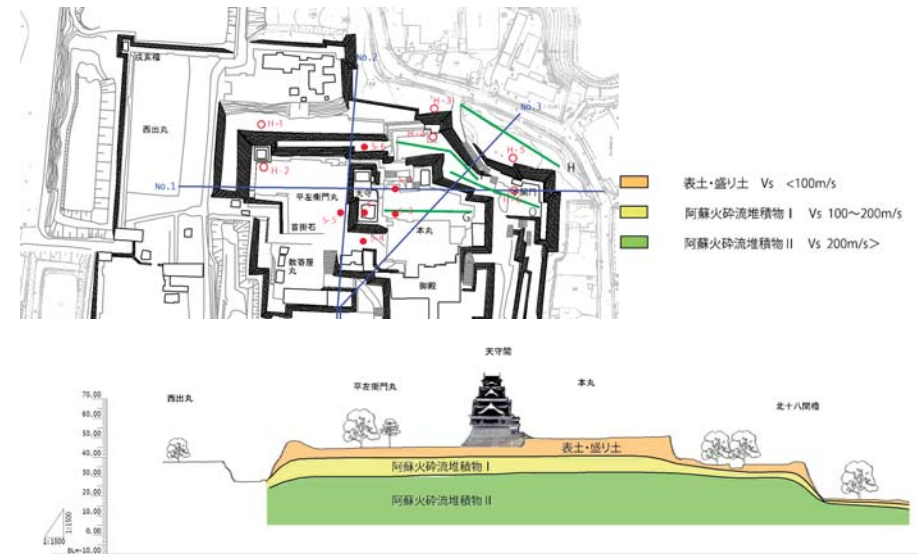
熊本城の標高横断図



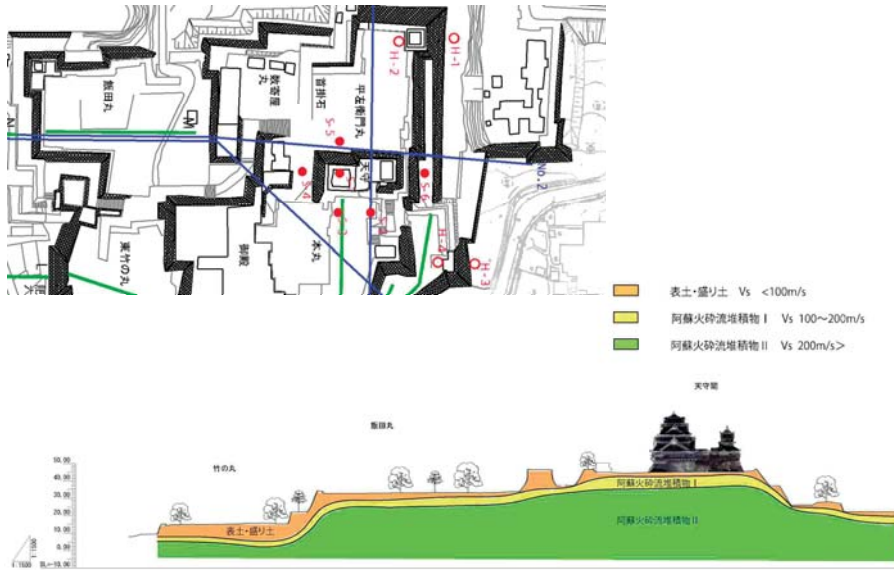
地質断面位置図



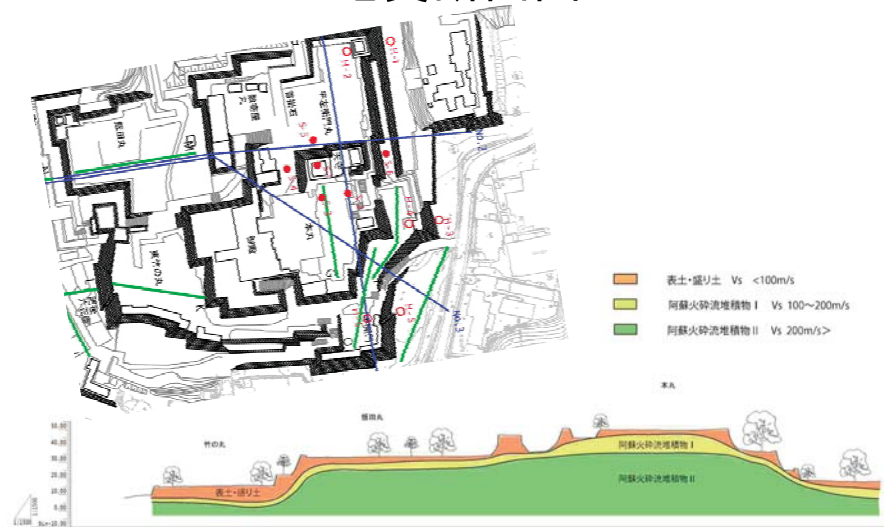
東西方向の地質断面図



南北方向の地質断面図



北東(不開(あかずの)門~南(飯田丸)) 地質断面図



百間石垣の鳥瞰図

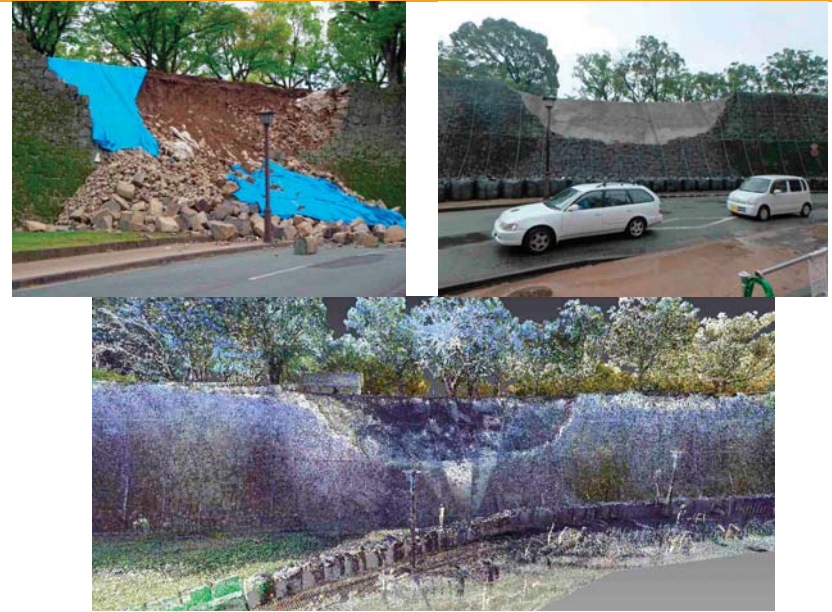


熊本城内に断層があるの？

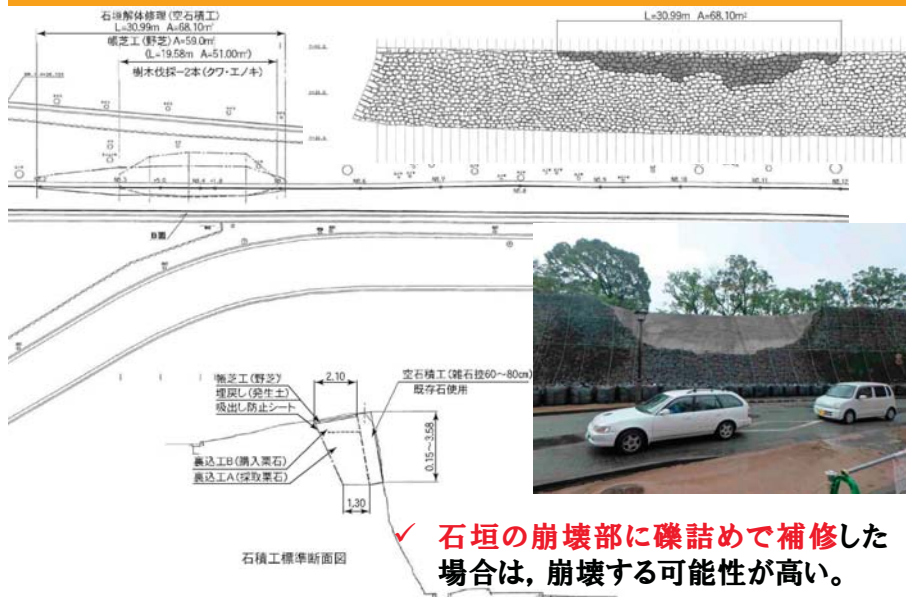
百間石垣西側の崩壊部



百間石垣東側の崩壊部



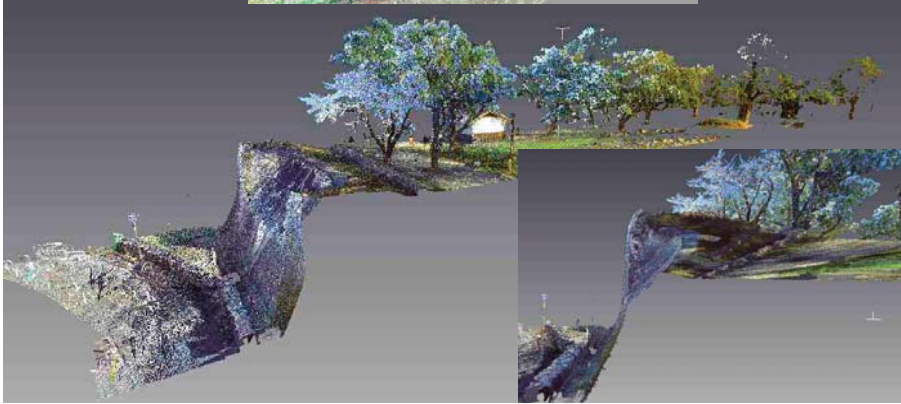
百間石垣東側の修復履歴



百間石垣の崩壊角度



百間石垣東側の崩壊部



全体調査位置図

調査期間：
平成28年10月23日～26日



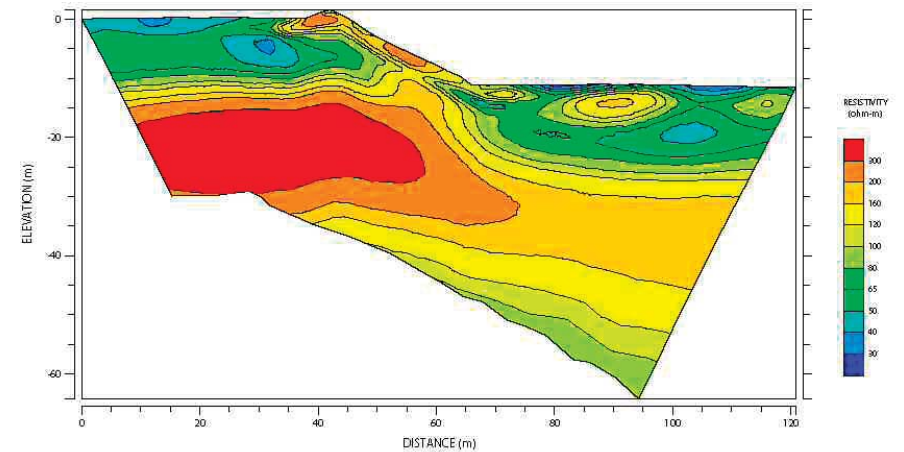
電気(抵抗2次元)探査位置



電気探査は、1測線の延長120mを2mピッチで行った。



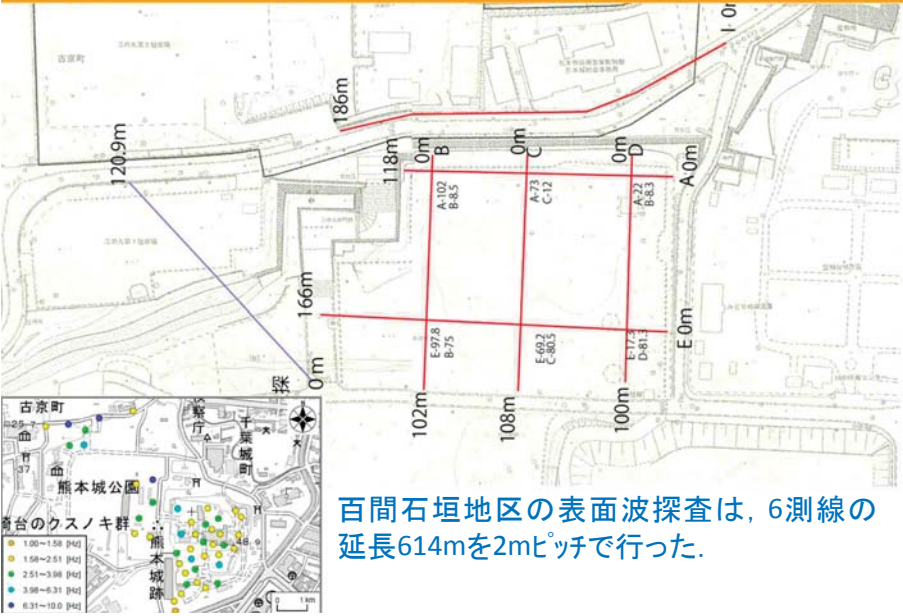
電気探査



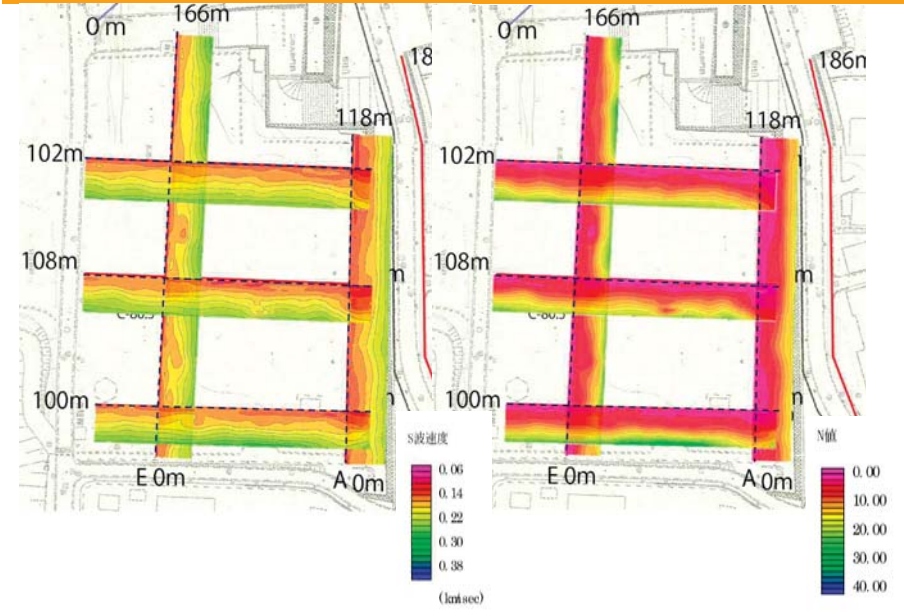
電気探査では地質による比抵抗の違いが顕著に出ており、測線の中央法面付近を境にずれている構造が見られる。

✓ 電気探査で百間石垣法面付近を境に断層があることが分かった。

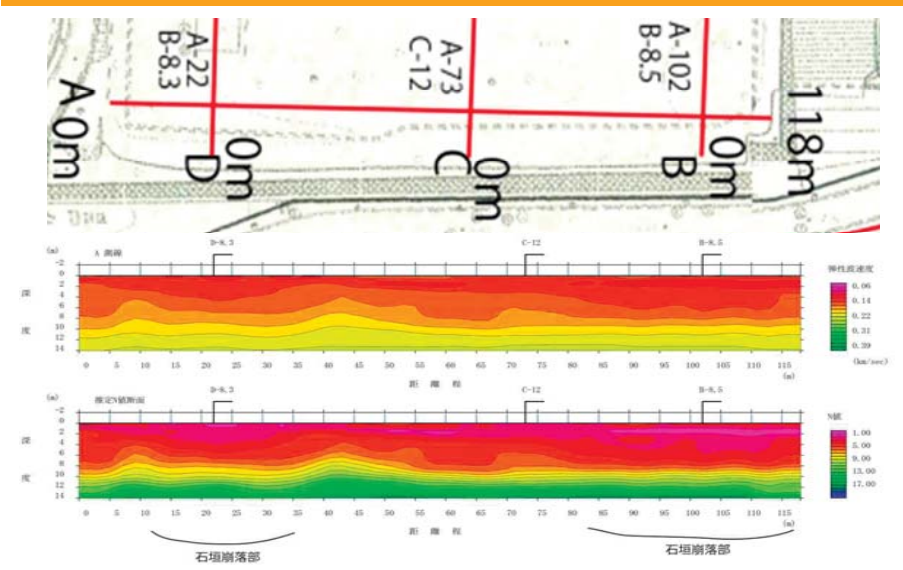
百間石垣地区の表面波調査位置図



百間石垣全体の表面波探査結果

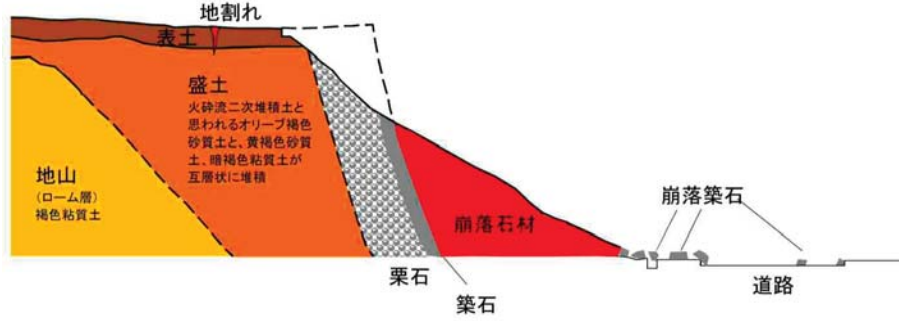


A測線の表面波探査結果



百間石垣西端部の断面図

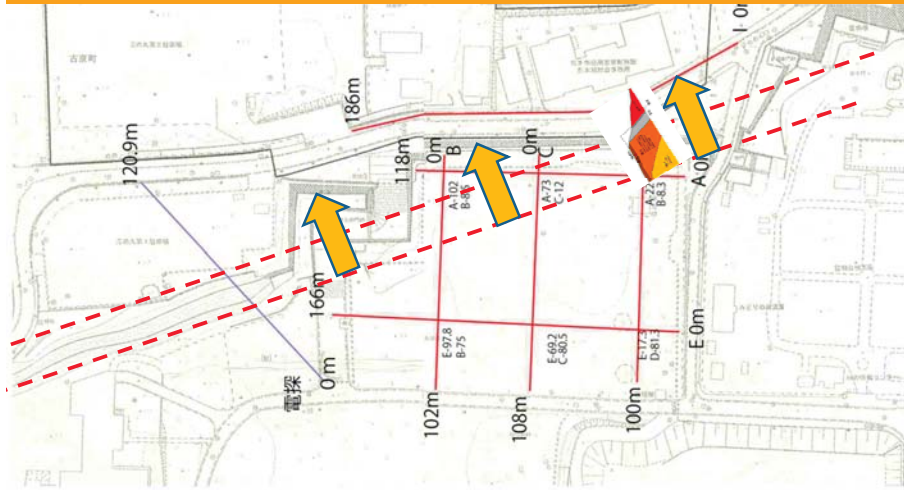
* 背面の発掘調査による推定を含む



表面波探査の解析後に熊本城調査研究センターより資料提供を受けた。
⇒トレンチ調査結果と一致していた。

✓ 表面波探査で石垣崩壊付近で軟弱地盤の影響を受けている可能性がある。

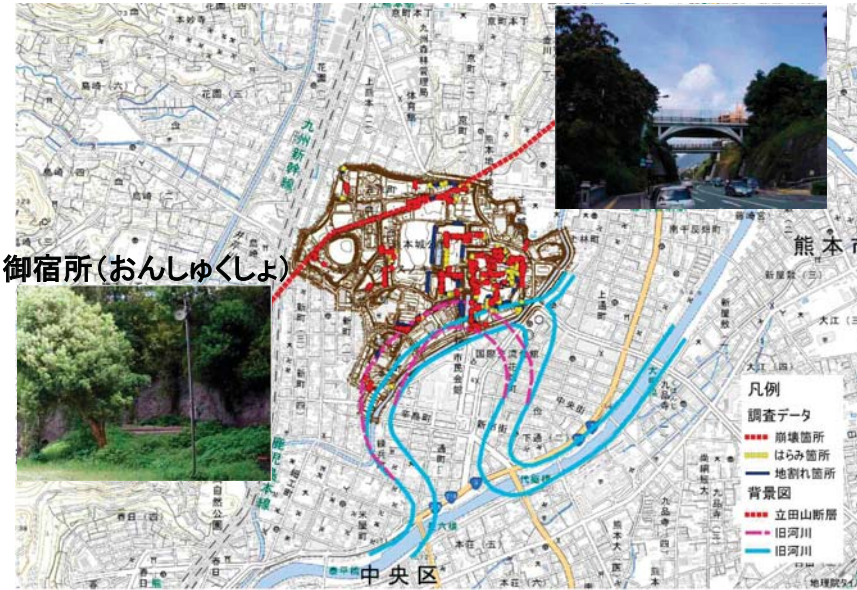
百間石垣崩壊は盛土が原因



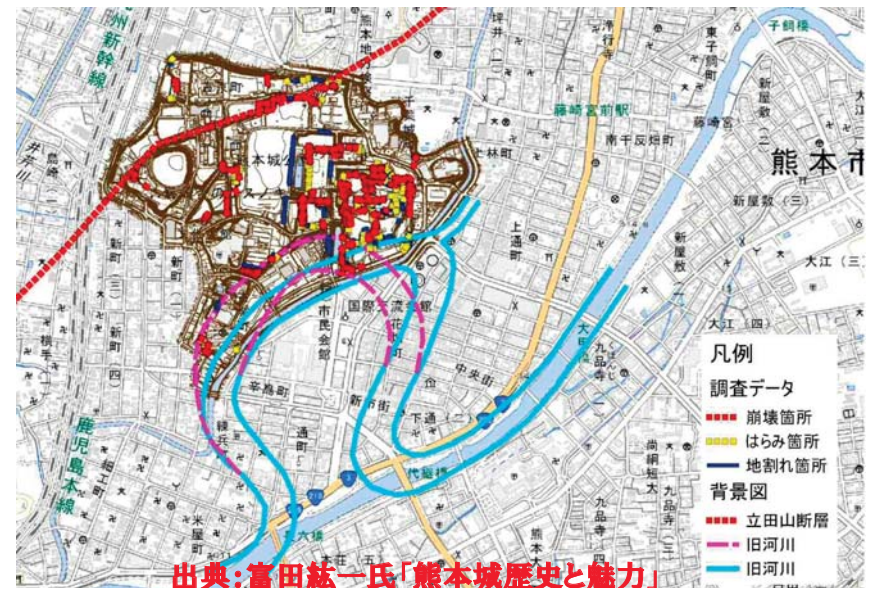
熊本城内に旧河川敷があるの？



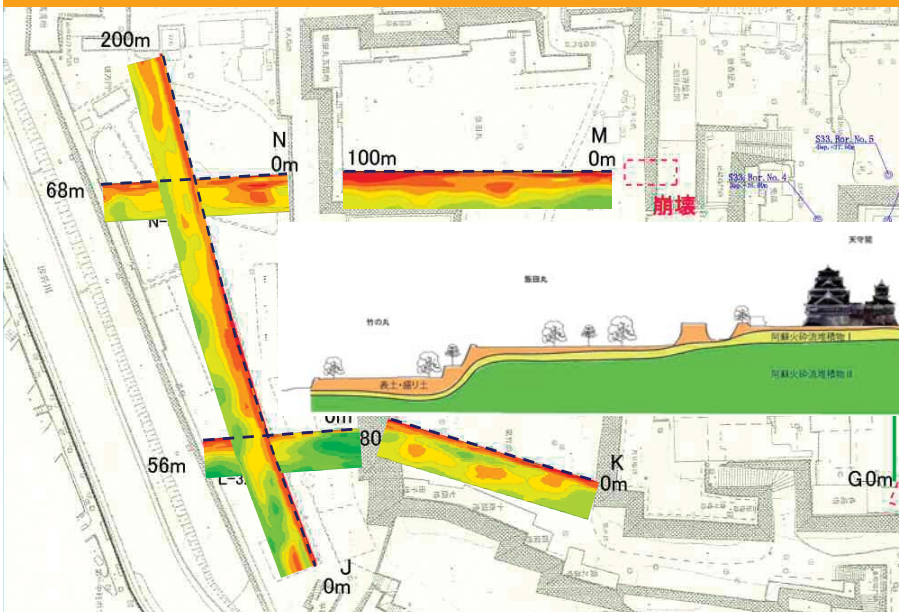
熊本城の土地条件



熊本城の土地条件

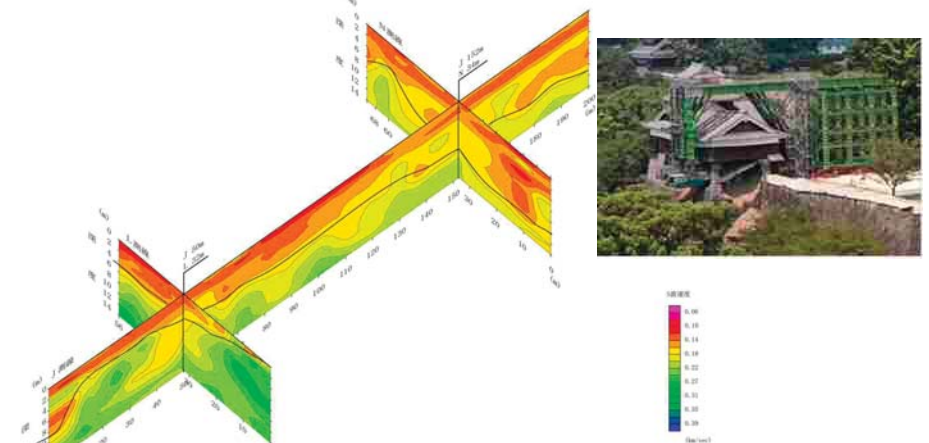


S波速度構造図(表面波探査)



S波速度構造図(表面波探査)

熊本城表面波探査 J,L,N 測線 鳥瞰図



石垣の変状はどうしてわかるの？

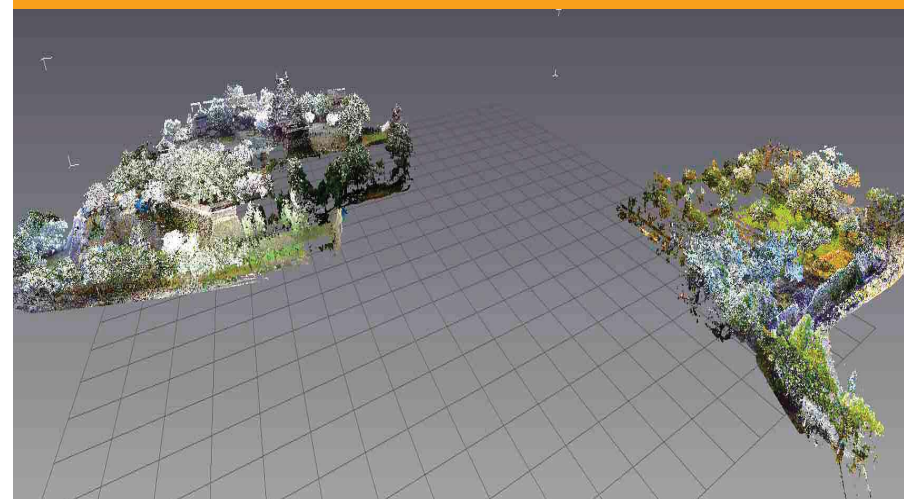
3Dレーザースキャナ位置図



3Dレーザースキャナの測定イメージ

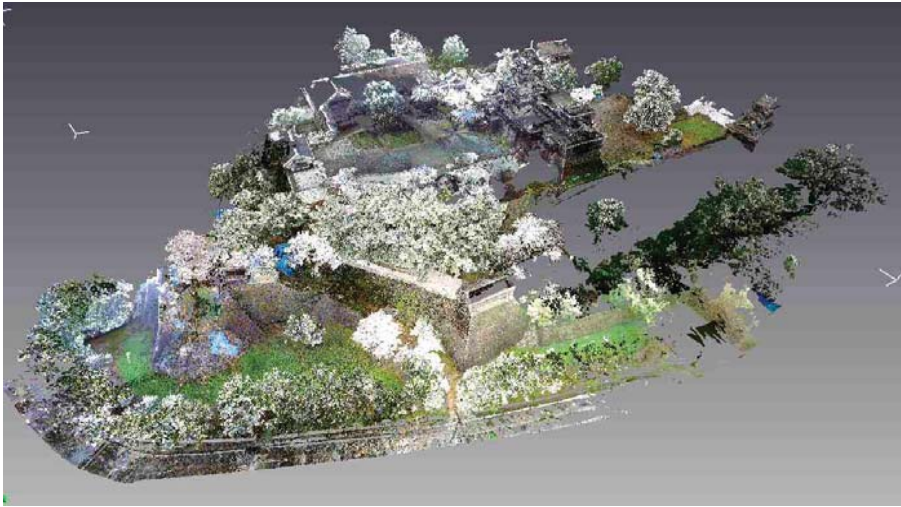


全体の3Dレーザースキャナ

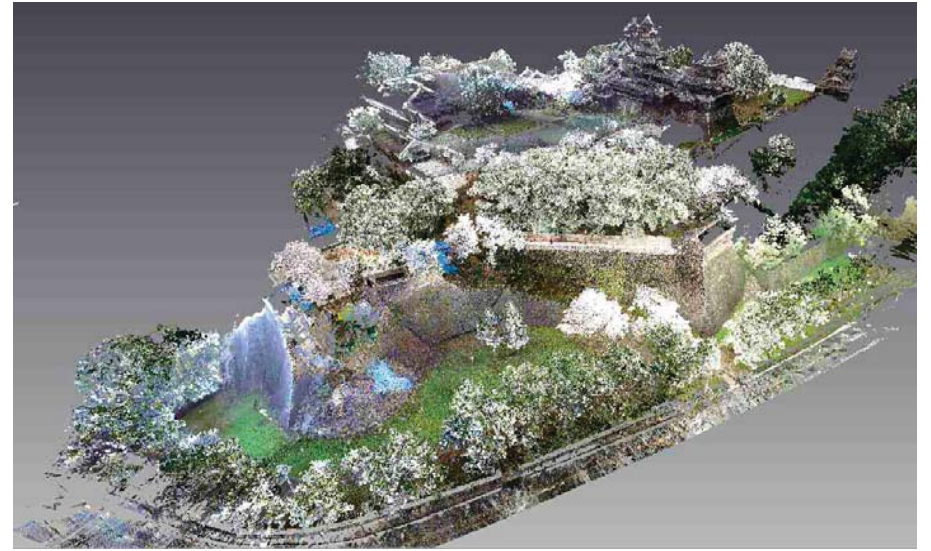


- 点群画像の座標数
- ①百間石垣エリア 約380,000,000点
- ②本丸・天守閣エリア 約700,000,000点 **合計10億点**

全体鳥観図(本丸・天守閣)



天守閣付近の3Dレーザースキャナ鳥瞰図



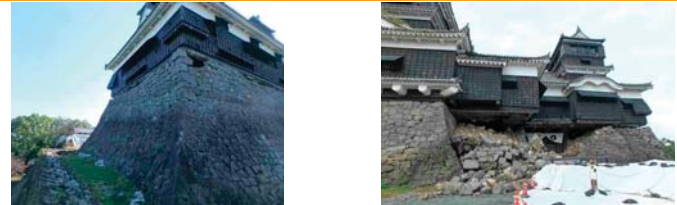
天守閣付近の3Dレーザースキャナ鳥観図



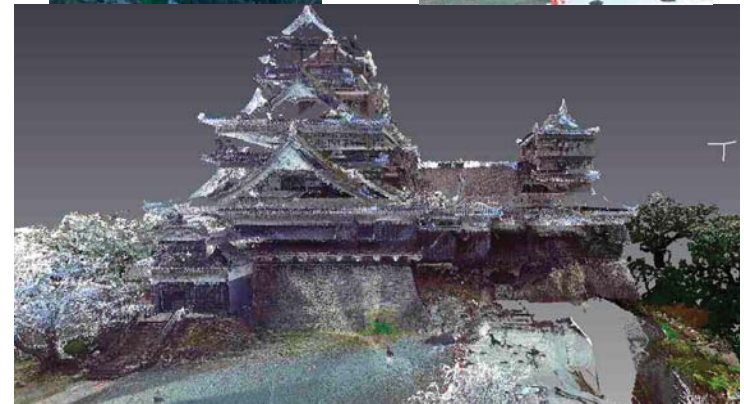
東側より

西側より

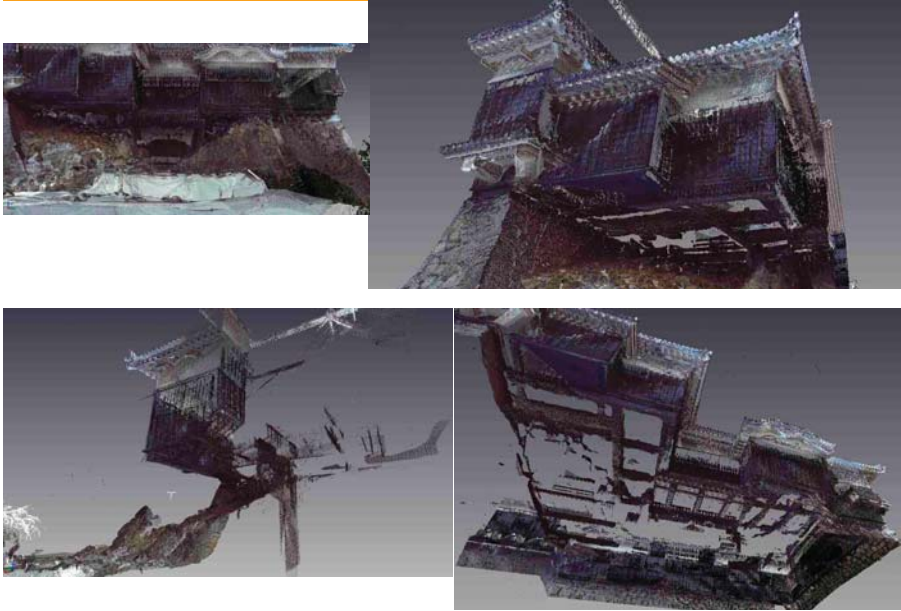
天守閣石垣東側の被害状況



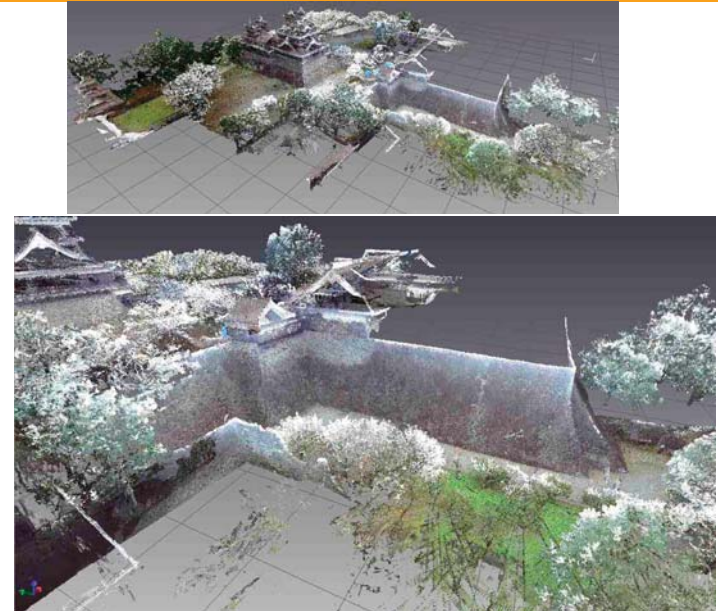
東～西断面



天守閣東側石垣崩壊状況



二様の石垣南西側の鳥瞰図

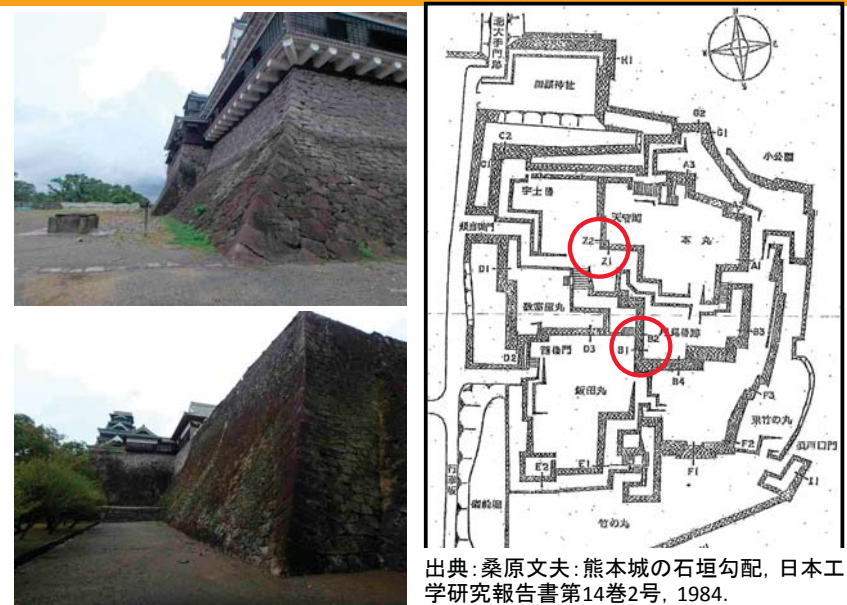


二様の石垣南西側の鳥瞰図



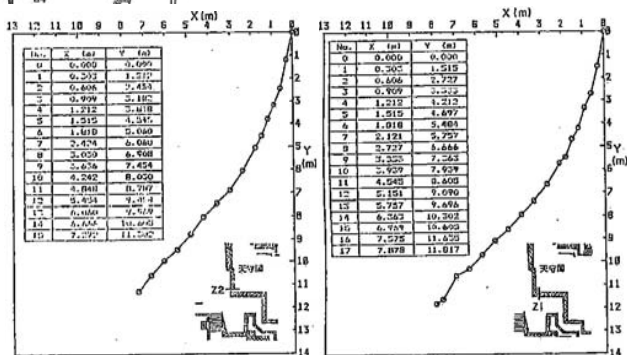
✓ 加藤清正の石垣構造(緩勾配・算木積み)に耐震性能があることが明らかとなった。

熊本城石垣の地震前後の測量位置



出典: 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.

天守閣の石垣曲線図

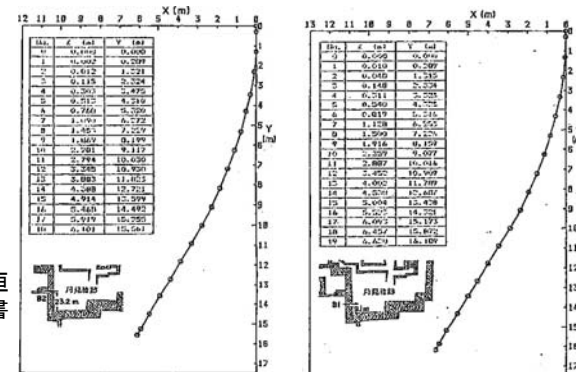


出典: 桑原文夫: 熊本城の石垣勾配, 日本工業大学研究報告書第14巻2号, 1984.

(y) 天守西側 Z2

(x) 天守南側 Z1

二様の石垣曲線図

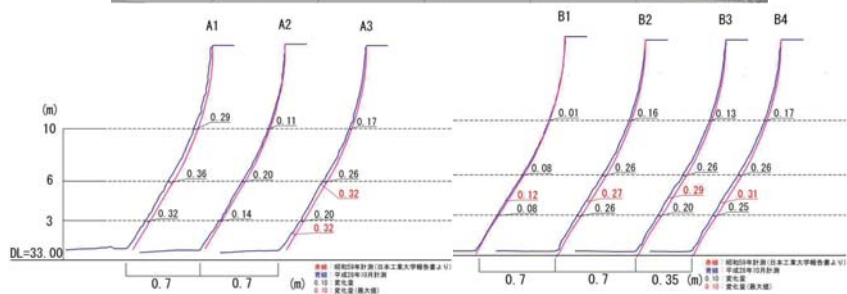
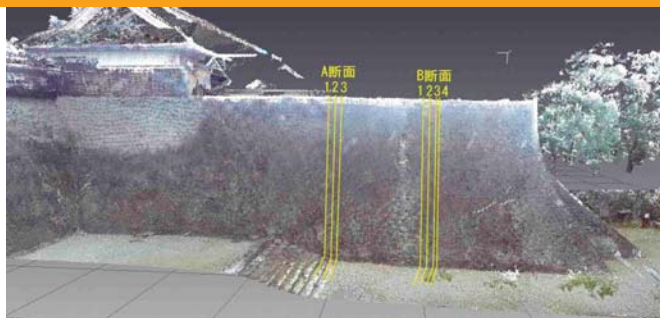


出典: 桑原文夫: 熊本城の石垣勾配, 日本工業大学研究報告書第14巻2号, 1984.

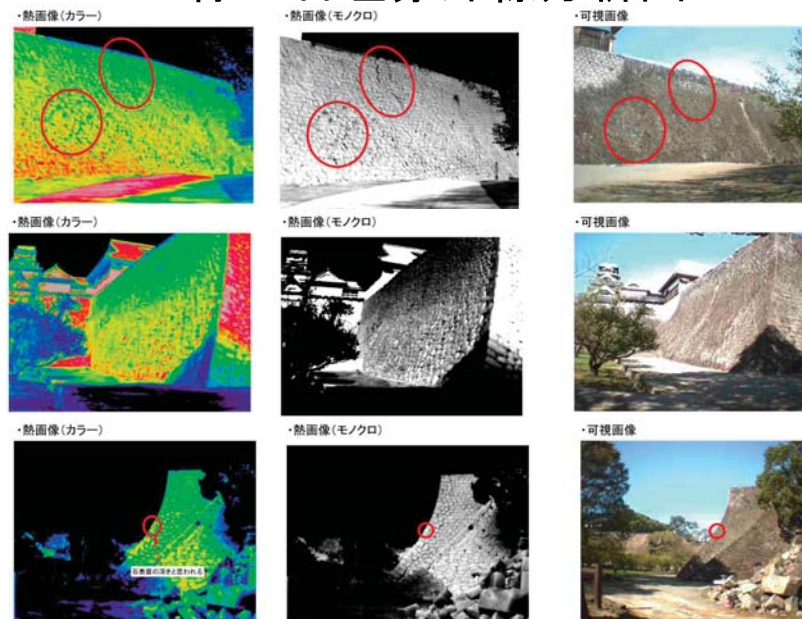
(e) 月見曲線西側 B2

(d) 月見曲線西側 B1

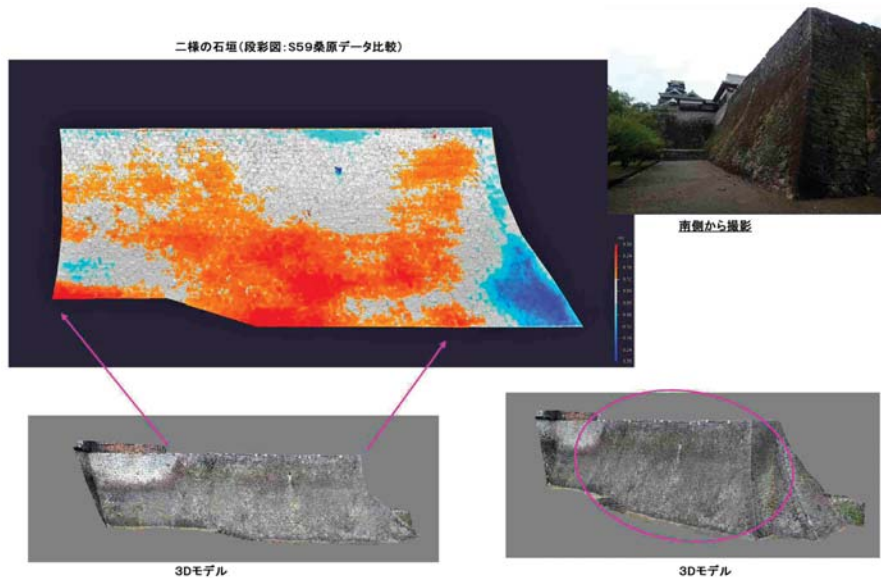
二様の石垣勾配比較図



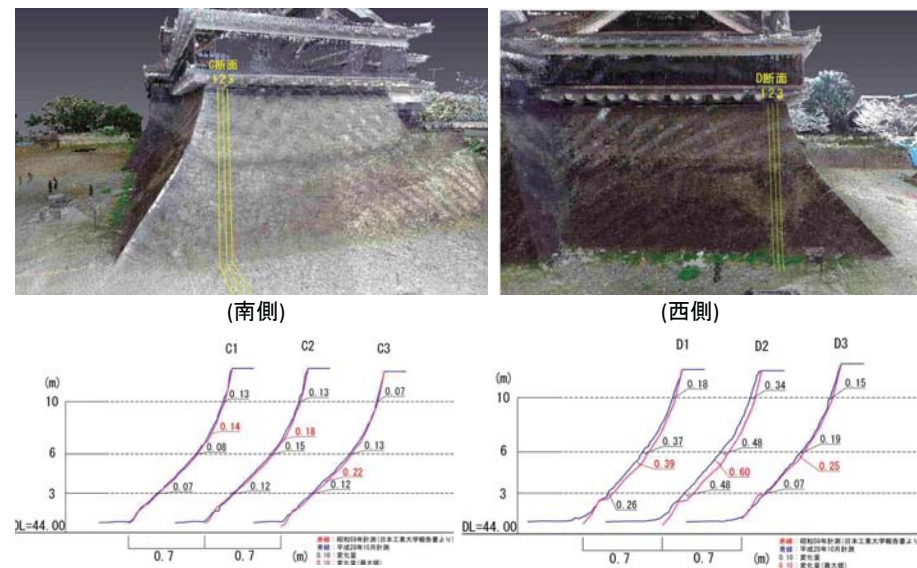
二様の石垣赤外線分析図



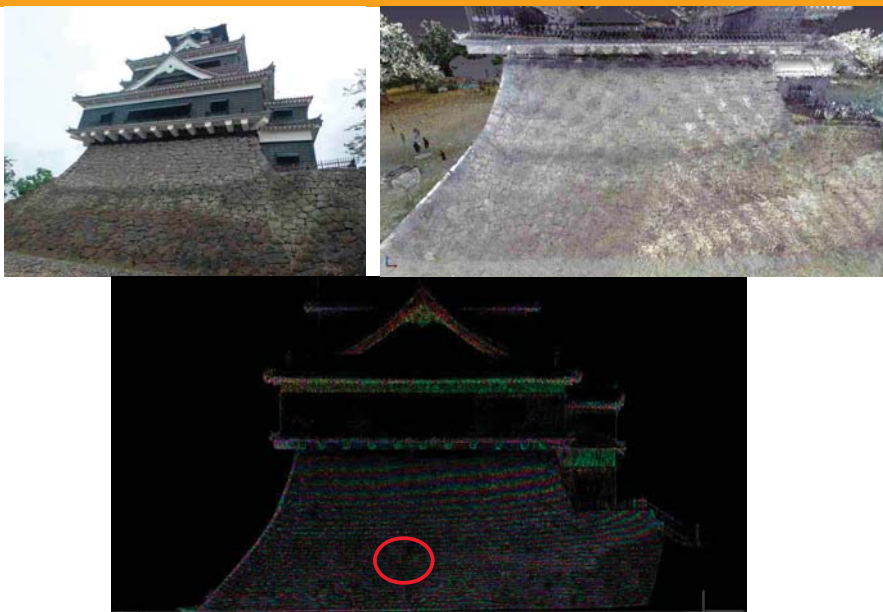
二様の石垣はらみ分析図



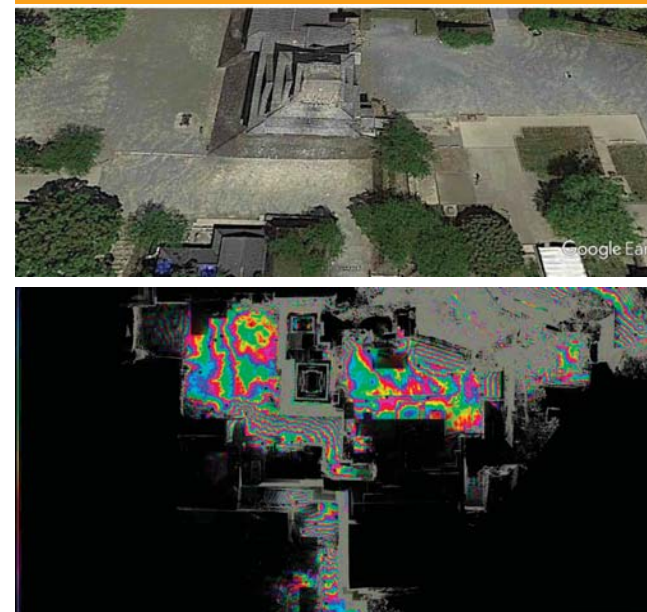
天守閣(南西側)の石垣勾配比較図



天守閣南側石垣の段彩図



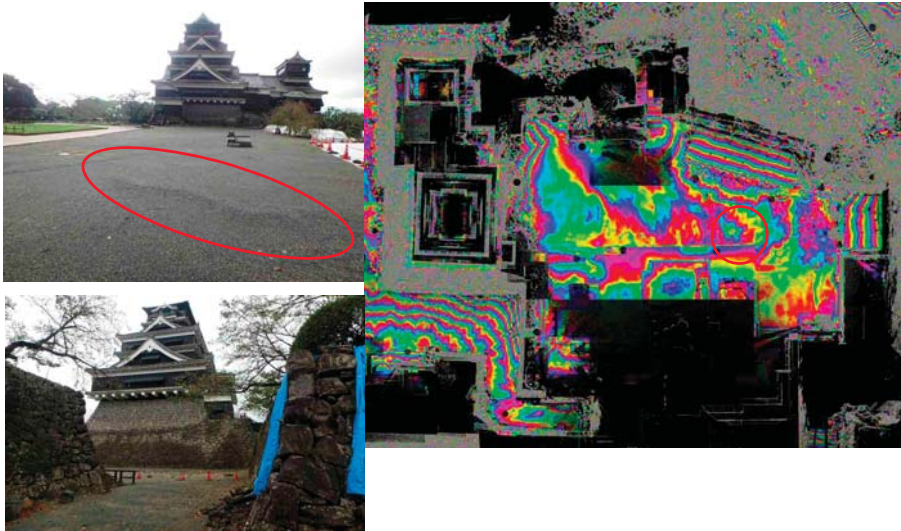
天守閣周辺地盤の段彩図



➤ 段彩図とは、標高値を高度の段階毎に分け、その段階毎に色付けを行う表現方法である。

➤ 色を付けることで、より直感的に地形の高低やその間隔を把握できる。

天守閣周辺地盤の段彩図



✓ 3Dレーザースキャナで石垣の孕(はら)みや地盤の変状把握できることが明らかとなった。

熊本城の被害

◆4月14日地震

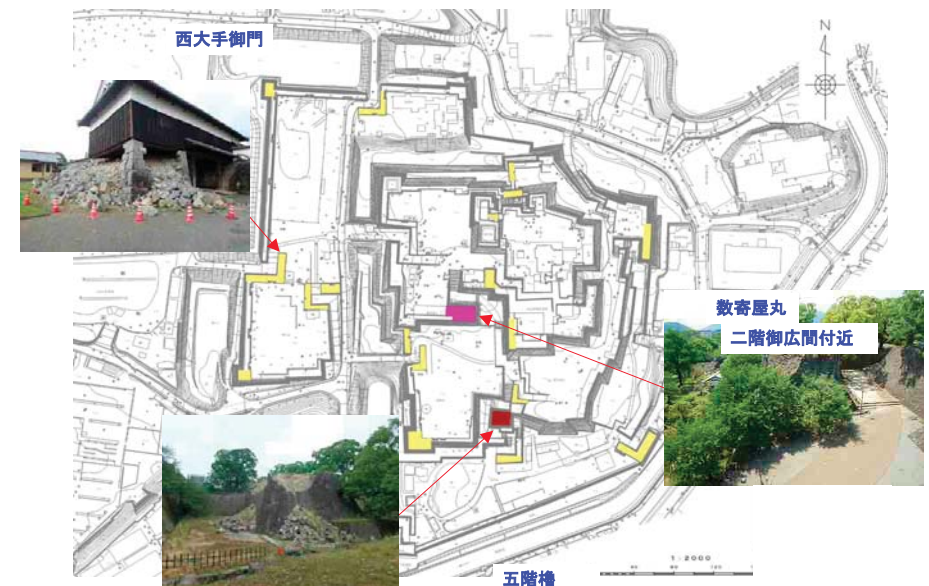
重要文化財建物10棟, 復元建造物7棟
石垣の崩落箇所 6ヶ所

◆4月16日地震

重要文化財建物13棟, 復元建造物 20棟
石垣の崩落・孕(はら)み・緩み 517ヶ所
地盤の陥没・地割れ70ヶ所
石垣の被害は全体の30%, 崩落は全体の10%
(熊本城調査研究センターの速報)

高い石垣がなぜ壊れなかったの？

石塁タイプ



石垣の裏込材が栗石のみの被害



飯田丸五階櫓の石垣は、上半部は明治22年地震で修復し、前震でも崩壊し、本震でさらに大きく崩壊しています。



飯田丸櫓台石垣(隅石の算木積みは健全) 戌亥(いぬい)櫓の石垣(隅石の算木積みは健全)



加藤神社内石垣



馬具(ばぐ)櫓の石垣

✓ 石垣の裏込め材が石材のみの場合は、崩壊する可能性が高い。

石罫型の崩壊角度



半石罫タイプ

加藤神社北側

戌亥(いぬい)櫓南側

数寄屋丸 二階御広間付近

半石罫型	
地山型	

半石罫タイプ

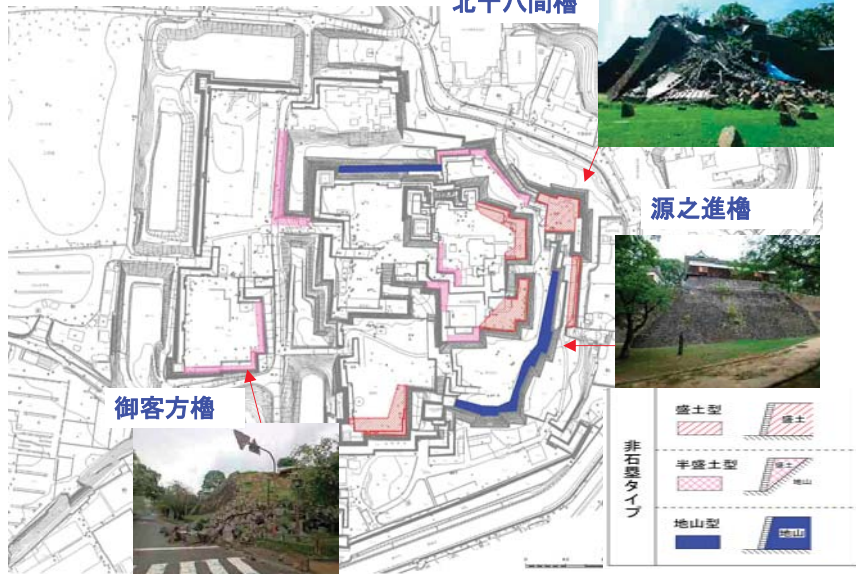
半石罫型の崩壊角度



戌亥櫓(いぬいやぐら)南側

非石塁タイプ

北十八間櫓



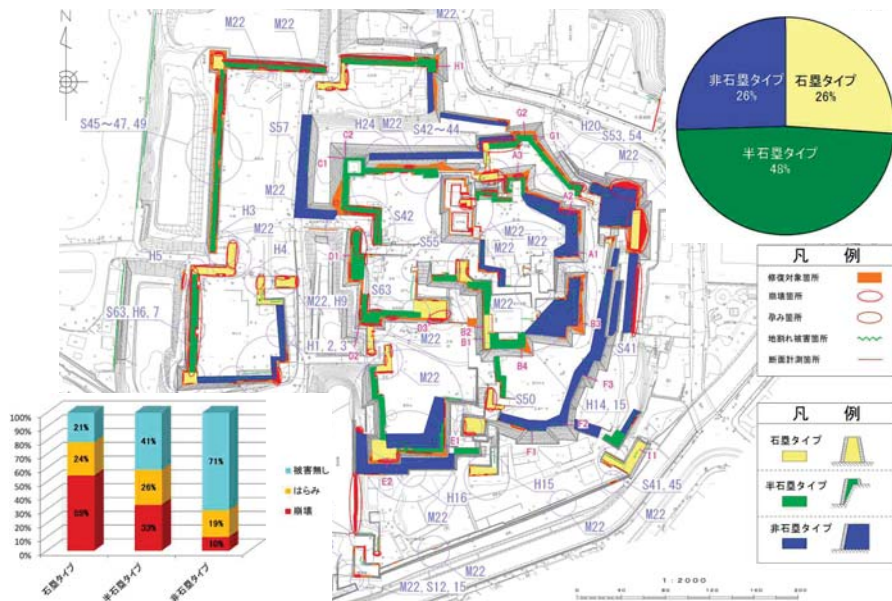
非石塁型の崩壊角度

半盛土型...御客方櫓

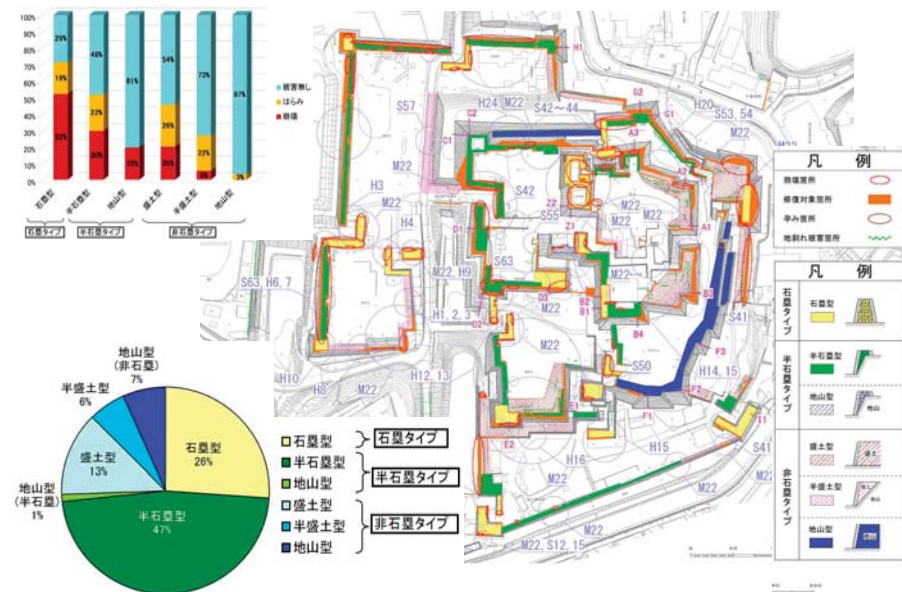


盛土型...北十八間櫓

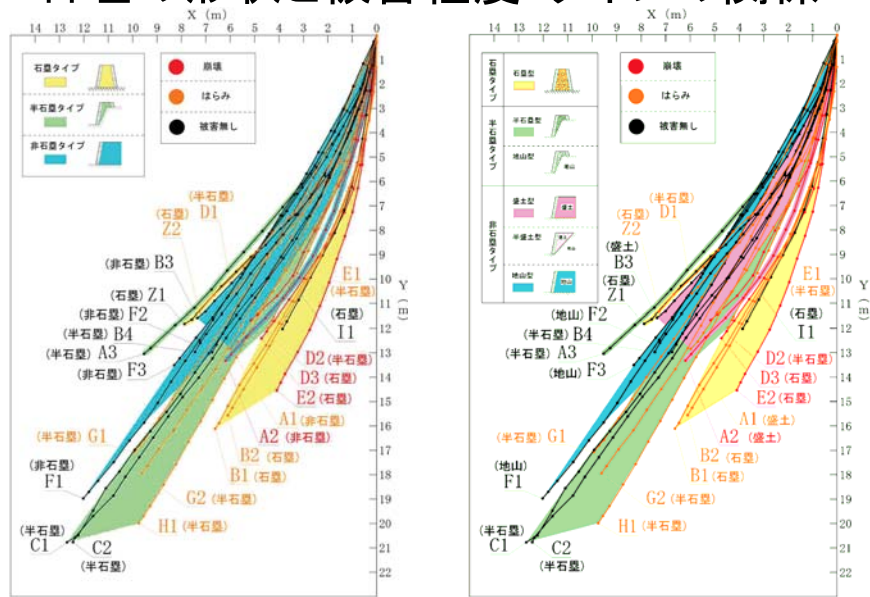
石垣タイプ毎の被害程度



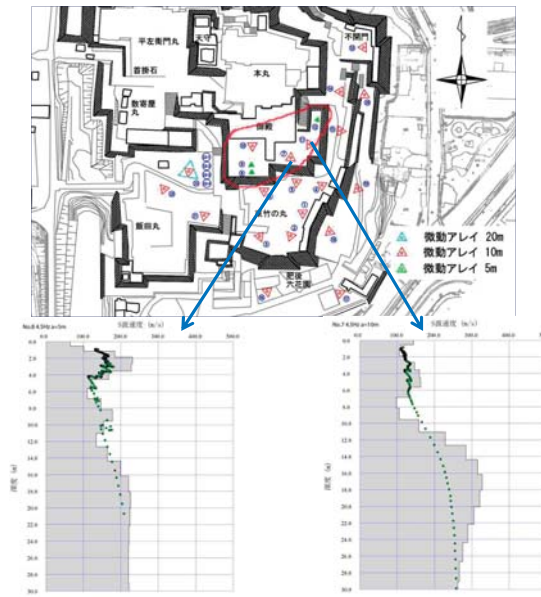
詳細な石垣タイプ毎の被害程度



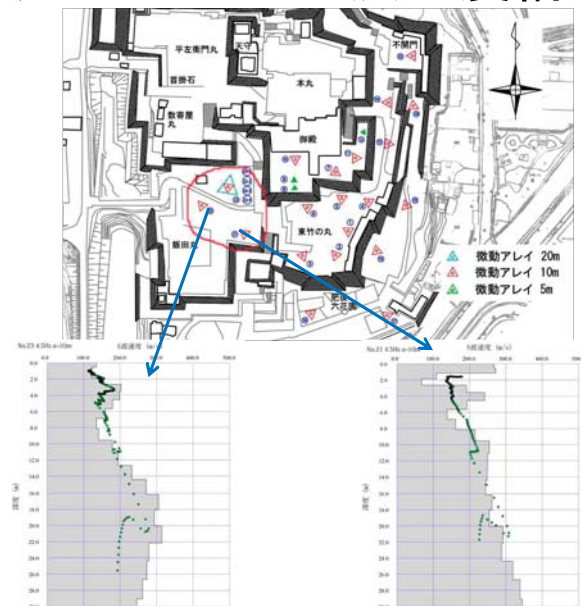
石垣の形状と被害程度・タイプの関係



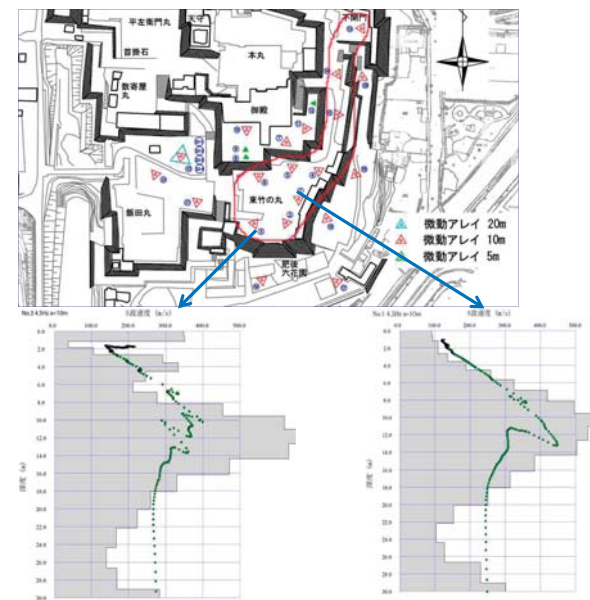
本丸御殿地区のS波速度構造



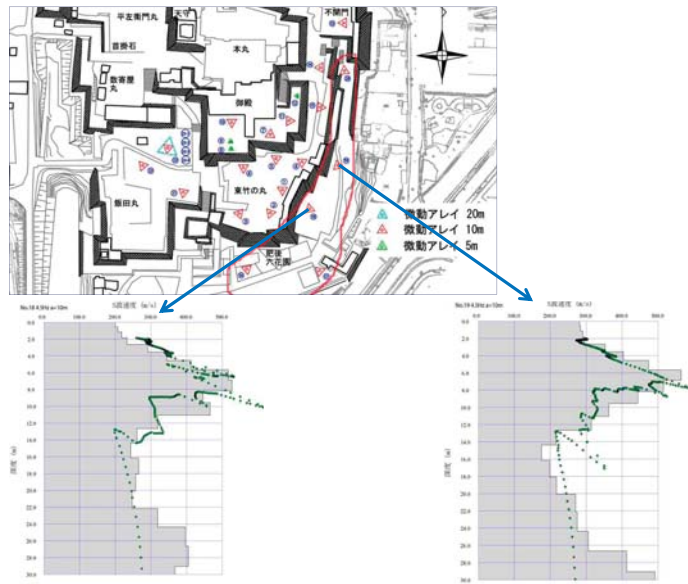
飯田丸地区のS波速度構造



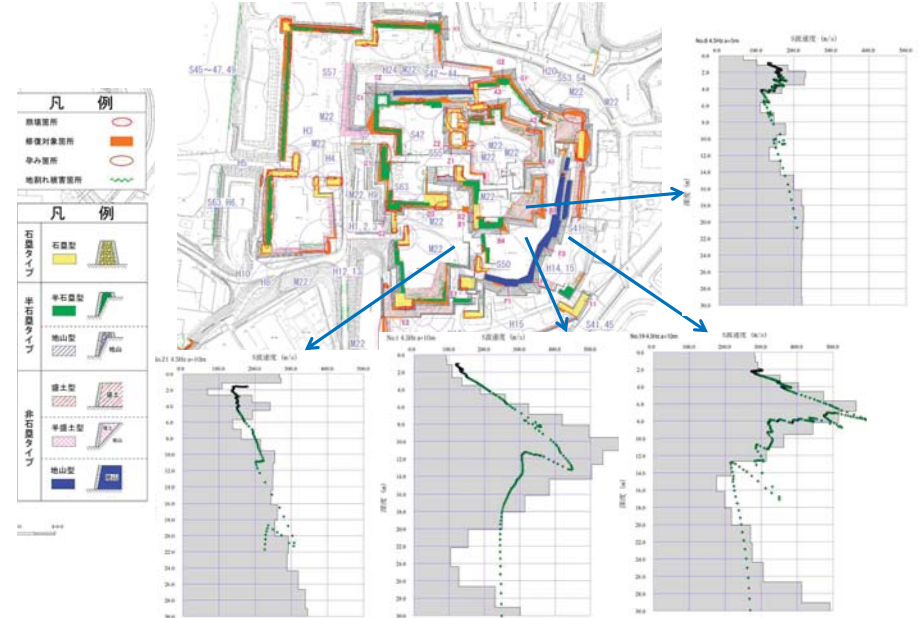
東竹之丸地区のS波速度構造



竹之丸地区のs波速度構造

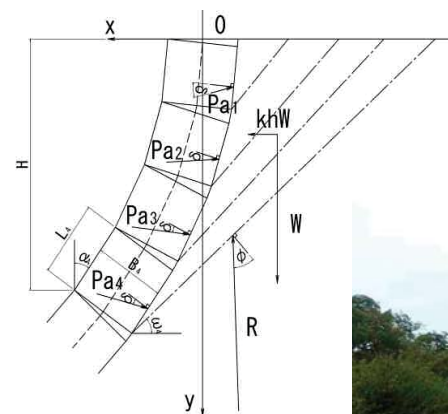


石垣タイプと各地区のs波速度構造



複雑な構造の石垣について
解析できるの？

示力線の計算モデル



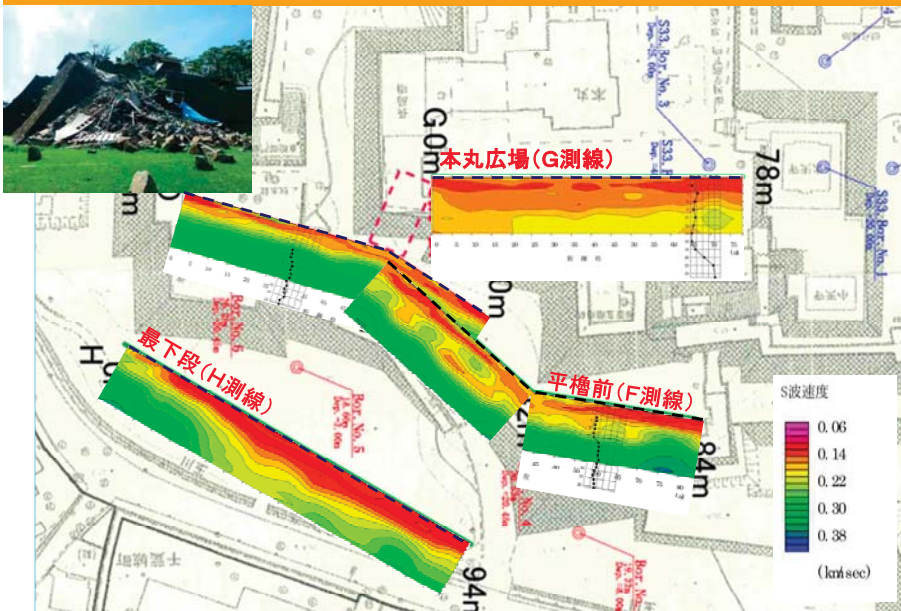
示力線による解析結果



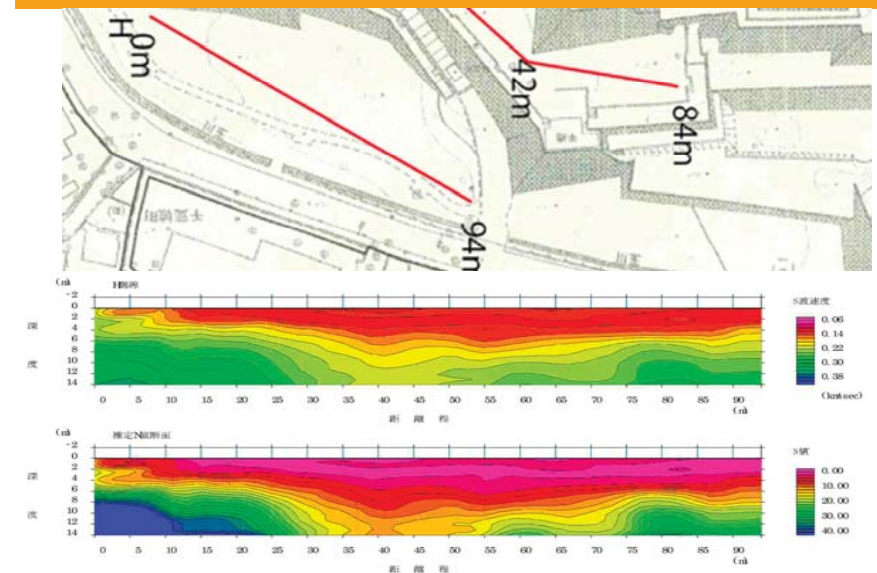
北十八間櫓の鳥瞰図



S波速度構造図(表面波探査)

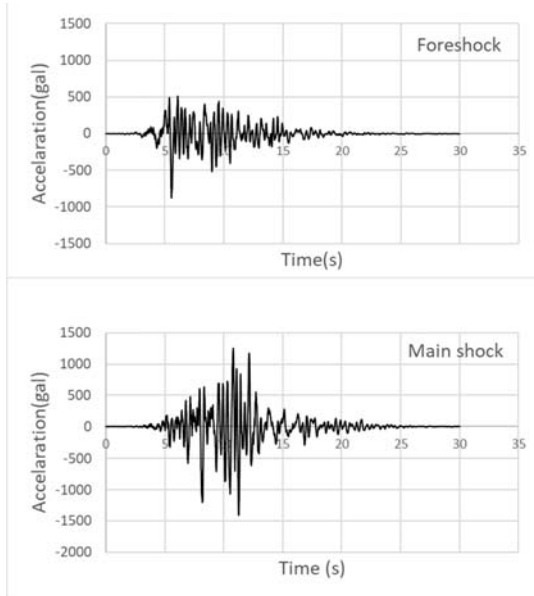


H測線の表面波探査結果



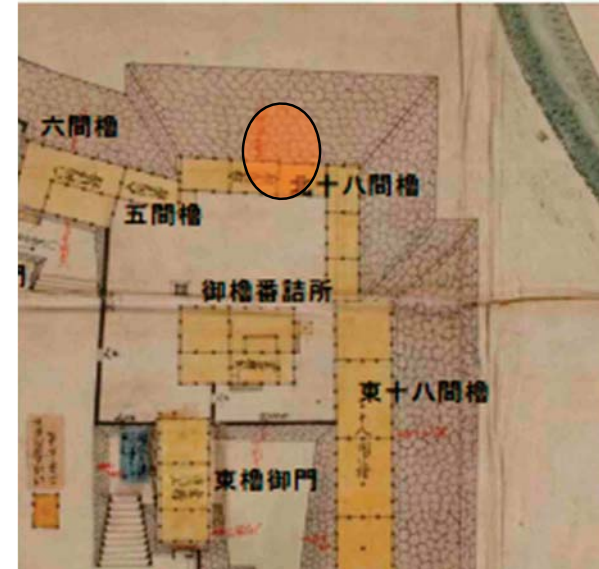
✓ 表面波探査で石垣崩壊付近で軟弱地盤の影響を受けている可能性がある。

(a) 前震



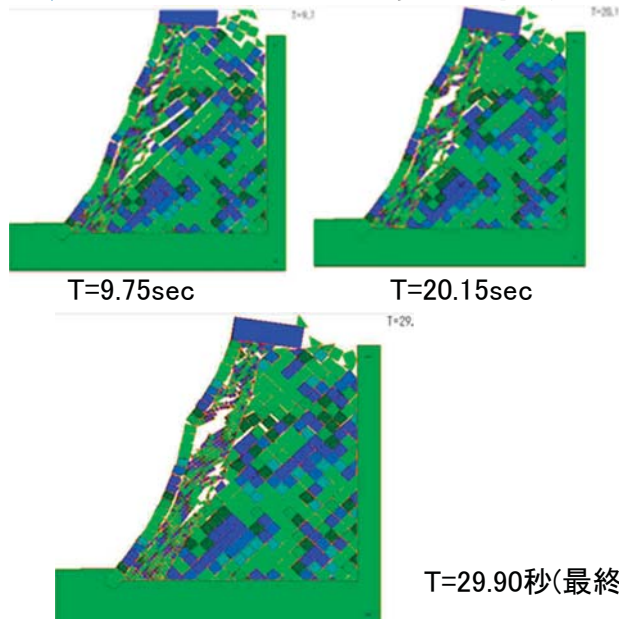
(b) 本震

古絵図による石垣状況

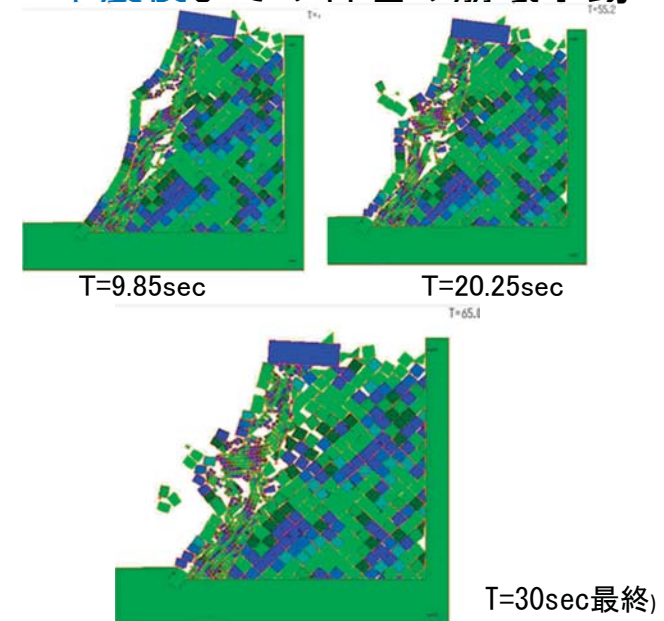


解析モデルへの推定水平入力波形(前震, 本震) 81

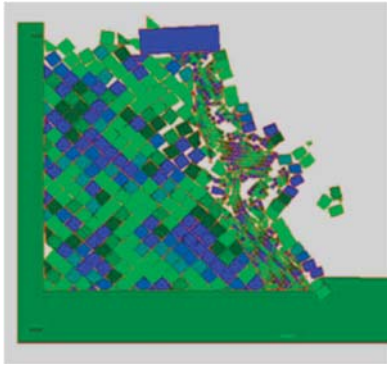
前震後までの石垣の変形挙動



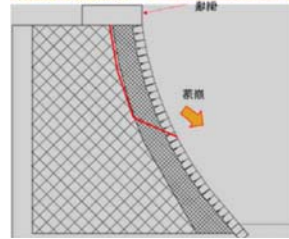
本震後までの石垣の崩壊挙動



崩壊石垣の斜面の様子



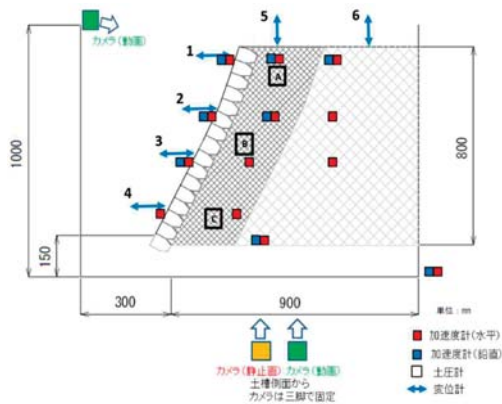
T=30.00 sec



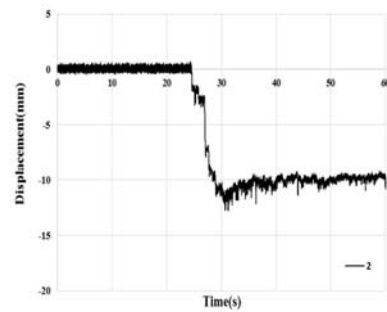
85

複雑な構造の石垣について実験で再現できるの？

石垣模型の振動台実験の状況



(a)計測機器配置図

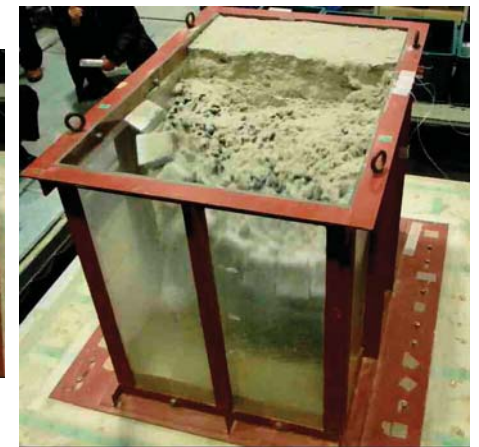


(b)土圧の計測結果

石垣模型の振動台実験の状況



(c)前震:無被害



(d)本震:上方部の崩壊

まとめ

現地被害調査結果から得られた主な結論を以下にまとめた。

- ✓ 電気探査で百間石垣付近の法面付近を境に断層があることが分かった。
- ✓ 表面波探査で旧河川敷があることが分かった。
- ✓ 3Dレーザスキャナで石垣の孕(はら)みや地盤の変状把握できることが明らかとなった。
- ✓ 赤外線探査で石垣の孕(はら)みや空隙の変状を把握できることが明らかとなった。
- ✓ 石垣の被害は、石罫型 > 半石罫型 > 非石罫型の順で崩壊する可能性が高い。ただし、非石罫型でも盛土の被害が多い。
- ✓ 支力線の解析でも被害の傾向を把握できた。
- ✓ 2次元の石垣モデルを用いた2D-DDA(不連続変形法)解析を行った結果、崩壊を再現できた。
- ✓ 石垣模型の振動台実験を行った結果、崩壊を再現できた。

はじめに

- 2016年熊本地震では、益城町、西原村、南阿蘇村の宅地及び建物に甚大な被害をもたらした。
 - そこで、被災市町村では国土交通省及び被災宅地危険度判定協議会に対し他の都道府県の被災宅地危険度判定士の派遣要請をした。
 - 被災宅地危険度判定士が赤(危険)、黄(要注意)、青(調査済)の3段階で危険度判定を行った。
- ↓
- 2016年熊本地震による被災宅地危険度判定士による宅地擁壁の被害状況判定結果を分析し、今回の地震被害状況とその特徴を明らかにした。

2. 石積擁壁の被害分析

被災宅地危険度判定士が行った判定帳票は、国土交通省国土技術政策総合研究所及び国土交通省都市局都市安全課から資料を提供して頂きました。

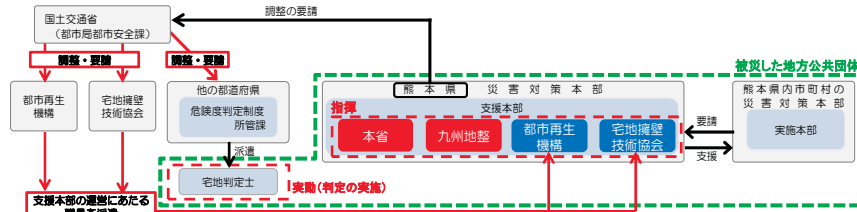
また、熊本市の龍田西小学校の被害は、熊本市都市建設局土木部北部土木センター道路課及び熊本市教育委員会事務局教育総務部施設課から資料を提供して頂きました。

対象地区

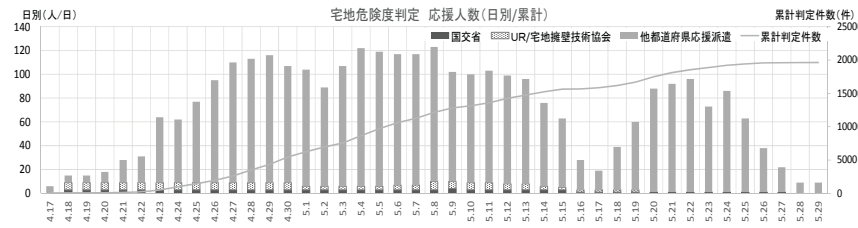
- 国土交通省の危険度判定士に対して依頼した12市町村を対象とする。
- 判定調査は、平成29年1月11日において延べ判定士数2,977人が危険2,760件、要注意4,377件を含む合計20,022件を実施した。



実施体制及び判定士数



熊本地震における被災宅地危険度判定の実施体制



熊本県に派遣された被災宅地危険度判定士数及び判定件数

宅地擁壁の被害状況



(a) 練石積擁壁の縦クラック(益城町) (b) 擁壁の上部宅地地盤の沈下(益城町)



(c) 練石積擁壁の横クラック(益城町) (d) 練石積擁壁のコーナー部の崩壊(益城町)

宅地擁壁の被害状況



(e) 練石積擁壁の倒壊(西原町)



(f) 練石積擁壁の倒壊(南阿蘇村)



(g) 空石積擁壁の崩壊(西原町)



(h) L型擁壁の倒壊(南阿蘇村)



(i) 練石積擁壁の倒壊



(j) 練石積擁壁の倒壊

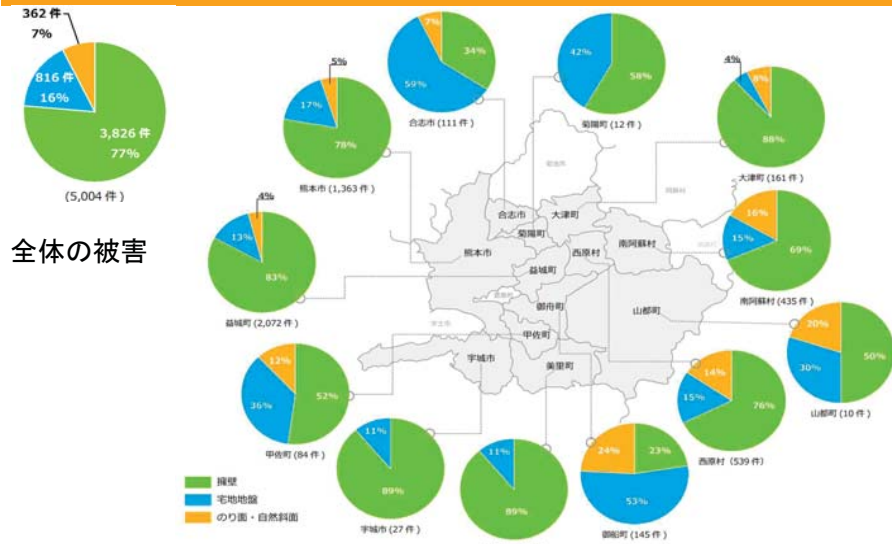


(k) 空石積擁壁の崩壊



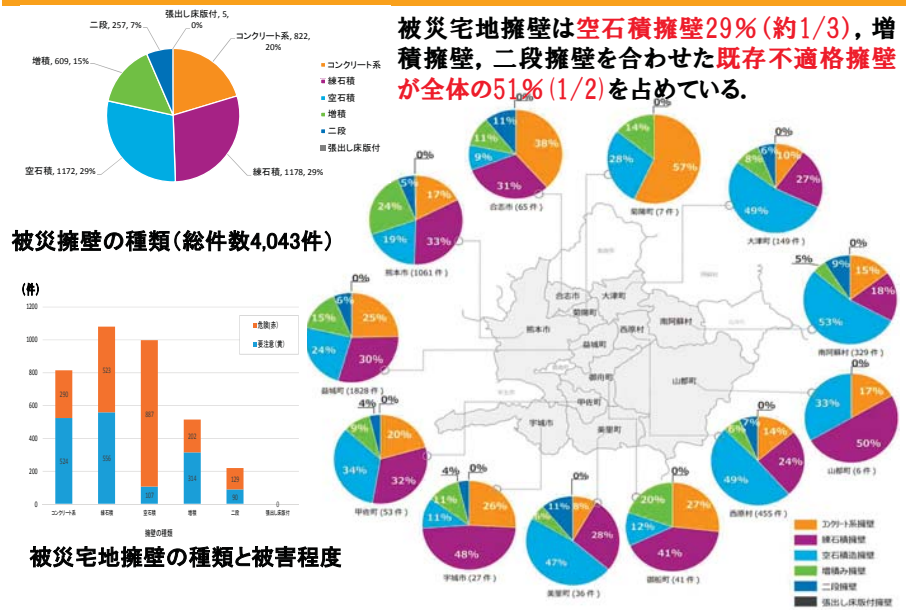
(l) 空石積擁壁の崩壊

市町村毎の宅地被害状況(5,004件)

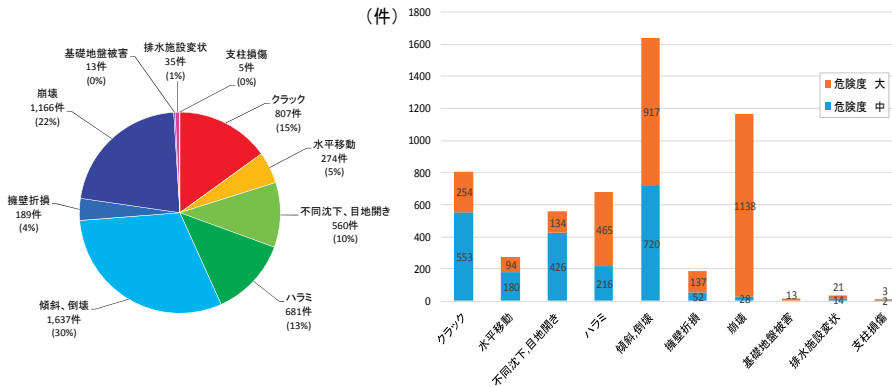


✓ 被災宅地擁壁は、擁壁が77%、宅地地盤が16%、のり面が7%を占めている。宅地地盤被害は御船町、合志市、甲佐町に多い。

被災宅地擁壁の種類



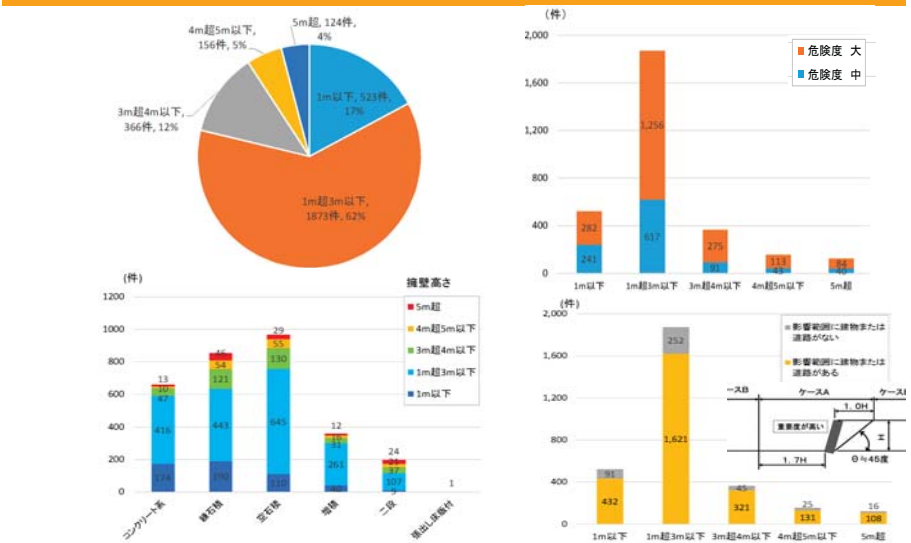
被災宅地擁壁の分類



被災宅地擁壁の分類

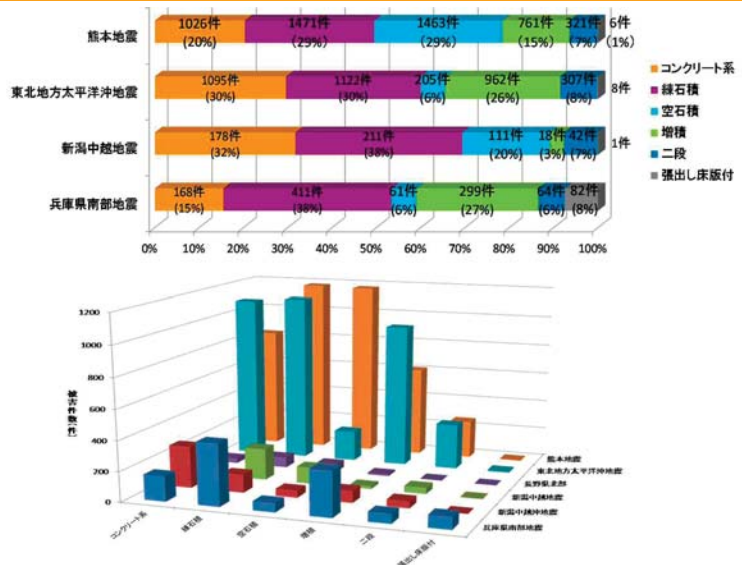
✓ 被災宅地擁壁の分類では、地震動が大きかったことと空石積擁壁が非常に多いことから傾斜・倒壊及び崩壊の被害が非常に多くなっている。

被災宅地擁壁の高さ



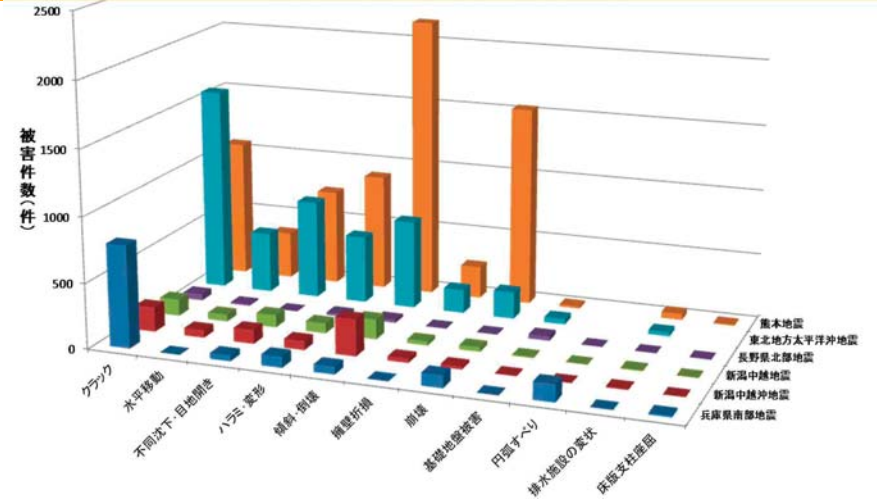
被災宅地擁壁の高さは、全体的に3m以下の擁壁79%が被害を受けており、高さ1mを超えると危険度大のものも多くなっている。

熊本地震と過去の地震との比較



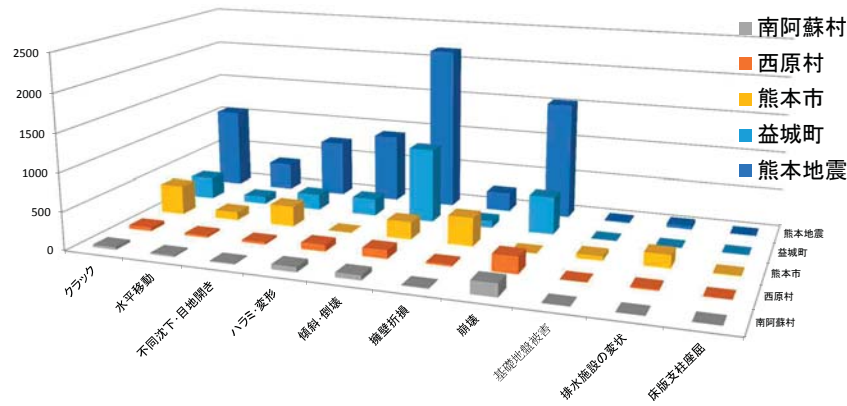
✓ 熊本地震と過去の地震の比較では、空石積擁壁が非常に多い。

被災宅地擁壁の変状項目の分類



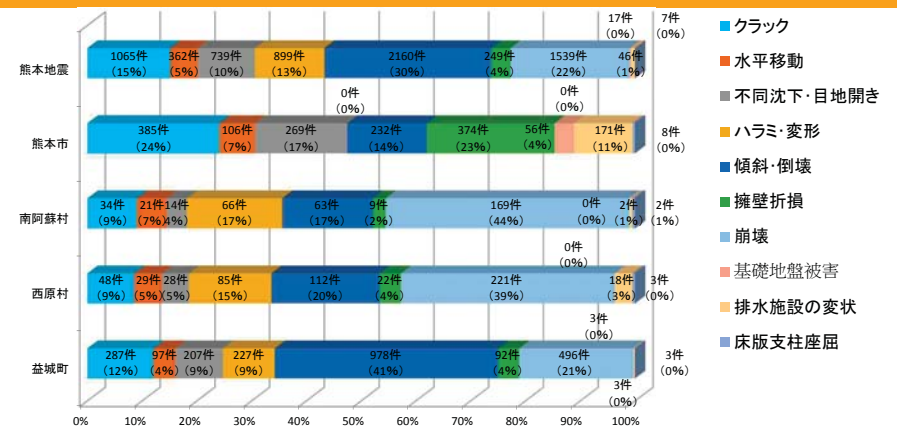
✓ 熊本地震の宅地擁壁の変状では、地震動が大きかったことと空石積擁壁が非常に多いことから傾斜・倒壊及び崩壊の被害が非常に多くなっている。

被災宅地擁壁の変状項目の分類 —熊本地震4市町村の比較—



✓ 熊本地震の宅地擁壁の変状では、地震動が大きかったことと空石積擁壁が非常に多いことから傾斜・倒壊及び崩壊の被害が多くなっている。

被災宅地擁壁の変状項目の分類 —熊本地震4市町村の比較—



✓ 熊本市はクラック、折損、不同沈下・目地開きが多く、西原町と南阿蘇村は崩壊、傾斜・倒壊、ハラミ・変形が多く、益城町は傾斜・倒壊、崩壊が多くなっている。

まとめ

- ✓ 被災宅地擁壁は**空石積擁壁29% (約1/3)**, 増積擁壁, 二段擁壁を合わせた**既存不適格擁壁が全体の51% (1/2)**を占めている。
- ✓ 被災宅地擁壁の高さは, 全体的に3m以下の擁壁79%が被害を受けており, **高さ1mを超えると危険度大のものも多くなっている。**
- ✓ 被災宅地擁壁の分類では, 地震動が大きかったことと空石積擁壁が非常に多いことから**傾斜・倒壊及び崩壊の被害が非常に多くなっている。**
- ✓ 熊本市道龍田陳内2丁目の第1号線道路法面及び龍田西小学校では, 擁壁自体では対応できないため**盛土全体の大規模盛土滑動崩落対策が必要**である。

3. 石橋の被害分析

熊本大学山尾敏孝名誉教授より資料提供していただきました。

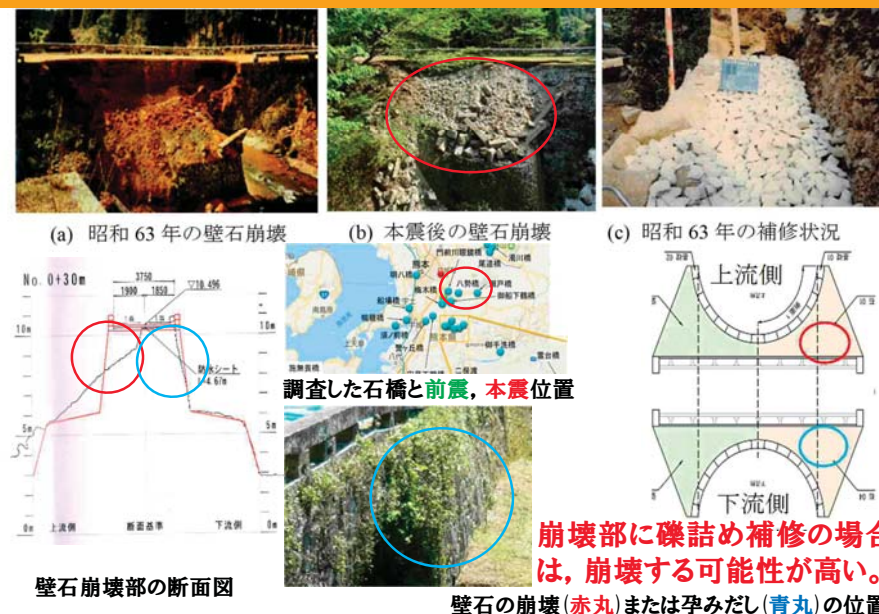
石橋の被害調査結果



- ✓ 調査対象の石橋は震源地から**半径が約30 km以内**
- ✓ **19橋(被害有)/31橋 (調査全体)**

- 壁石に被害があった石橋: 10橋
- 壁石崩壊を生じた石橋: 9橋
- 孕(はら)みだしの被害があった石橋: 1橋
- アーチ輪石に被害があった石橋: 12橋
- アーチ輪石の割れや欠損が生じたもの: 10橋
- 隙間が生じたもの: 5橋

八勢(やせ)橋の被害状況



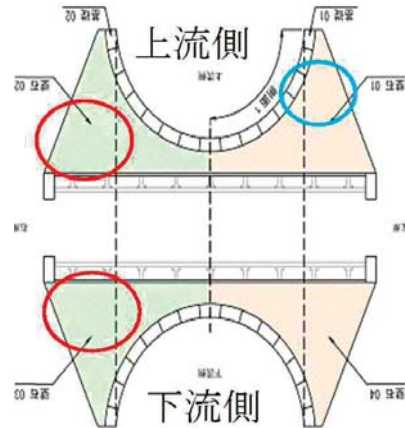
梅木橋の被害状況



調査した石橋と前震、本震位置



石材の中詰め



壁石の崩壊(赤丸)または孕みだし(青丸)の位置

壁石の崩壊部に礫詰めで補修した場合は、崩壊する可能性が高い。

二俣福良渡(ふたまたふくらわたし)の被害状況



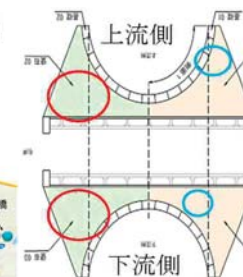
(a) 地震前右岸上流側壁石の孕み



(b) 地震後の右岸側壁石崩壊状況



調査した石橋と前震、本震位置



地震前に壁石にハラミ等の損傷がある場合は、崩壊する可能性が高い。

壁石の崩壊(赤丸)または孕みだし(青丸)の位置

銭瓶(ぜにがめ)橋の壁石崩壊状況



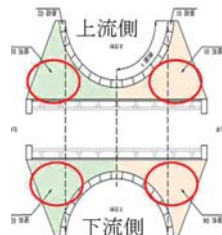
(a) 下流側



(b) 上下流壁石の崩壊状況



調査した石橋と前震、本震位置



壁石の崩壊(赤丸)または孕みだし(青丸)の位置

壁石の石材をモルタルで接着した場合は、崩壊する可能性が高い。

通潤橋(つうじゅんきょう)の被害状況



(a) 地震前の放水状況



(b) 地震後のアーチ輪石からの漏水状況



(c) 通潤橋の被災状況の全体



(d) 橋面上の亀裂の発生状況

輪石被害の特徴



(a) 地震前

(b) 地震後

地震前後の鴨籠橋(すき間の拡大と大きな沈下が発生)



(a) 銭瓶橋の亀裂状況

(b) 濁川橋の亀裂状況

アーチ輪石のモルタル接着の亀裂状況

安見下鶴橋(橋軸直角水平方向に開く)

輪石をモルタルで接着することは、輪石のすき間の発生を制御することに対して有効である。

まとめ

現地被害調査結果から得られた主な結論を以下にまとめた。

- ✓ 壁石の崩壊部に礫詰めで補修した場合は、崩壊する可能性が高い。
- ✓ 壁石の中詰め材が石材のみの場合は、崩壊する可能性が高い。
- ✓ 地震前に壁石にハラミ等の損傷がある場合は、崩壊する可能性が高い。
- ✓ 壁石の石材をモルタルで接着した場合は、崩壊する可能性が高い。
- ✓ 輪石をモルタルで接着することは、輪石のすき間の発生を制御することに対して有効である。



ご清聴ありがとうございました。