

# 歴史的建造物の被害

国士舘大学理工学部 橋本 隆雄

1

## 1. 熊本城の被害

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。

2

# 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

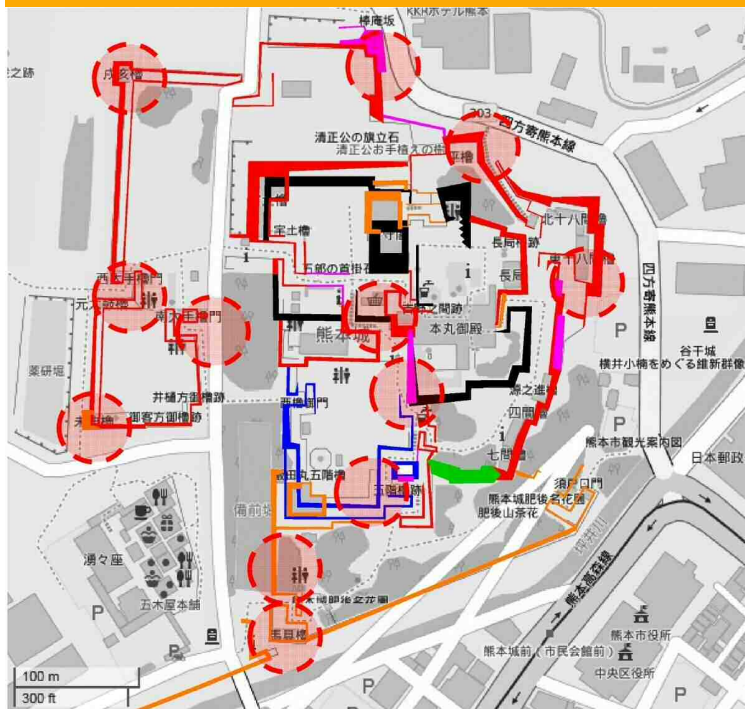
## ◆4月16日地震

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)

3

## 石垣の変遷及び被害箇所



石垣崩壊地点

- I期 1592(文禄元年)~1600(慶長4年)
- II期 1600(慶長4年)~1601(慶長5年)
- III期 1601(慶長5年)~1602(慶長6年)
- IV期 1602(慶長6年)~1608(慶長12年)
- V期 1608(慶長12年)~1633(寛永10年)
- VI期 1633(寛永10年)~

I期 1599年 石垣の傾斜が緩勾配 二様の石垣

II期 1600年 I期よりも急勾配 飯田丸を囲む西側と南側の石垣

III期 1601年前半 算木工法が混在

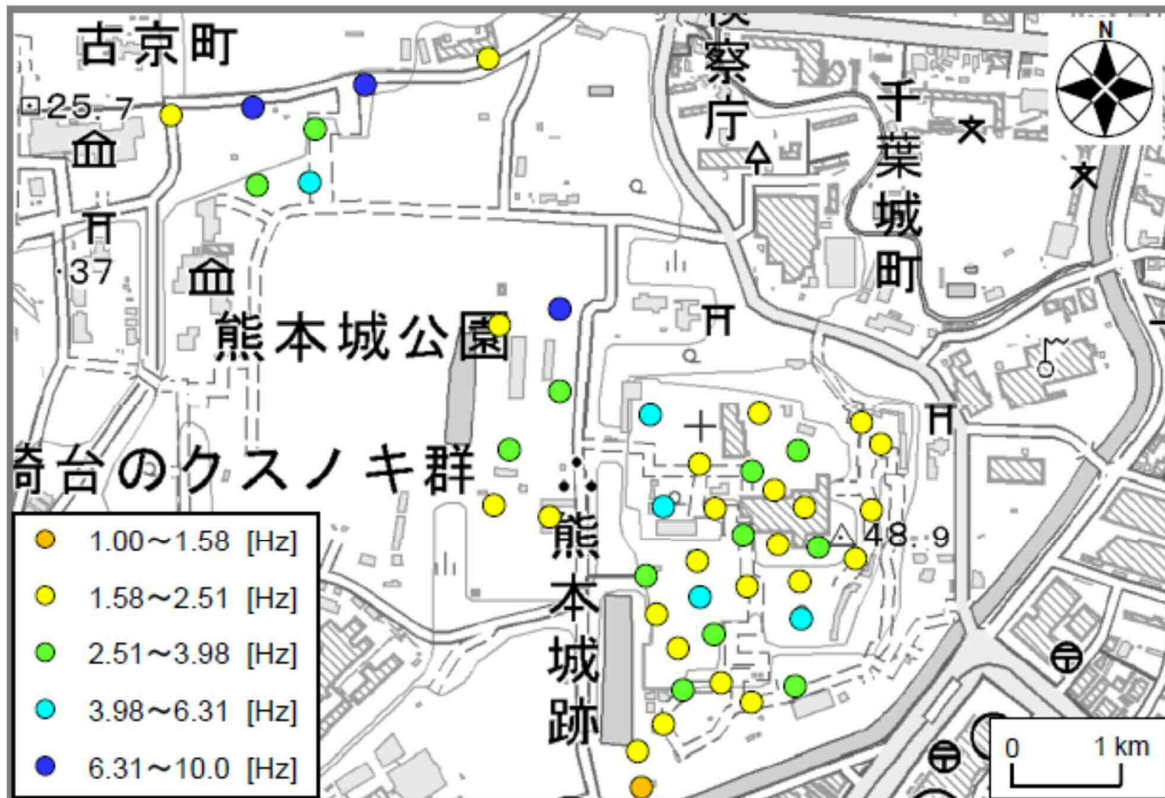
IV期 宇土櫓 続櫓 東十八間櫓・北十八間櫓 不開門 平櫓 田子櫓  
西出丸西面石垣

V期 1607年以降 飯田丸五階櫓下段の石垣 長塀 小天主台

VI期 1633年細川 櫓方三階櫓台(石垣がゆるみ出したので、膨らんだ石垣を築き直し、櫓を立て直した、1820年)

4

# 熊本城内でのH/Vスペクトルのピーク周波数の分布



出典: 秦吉弥, 村田晶, 池本敏和, 橋本隆雄, 宮島昌克: サイト増幅特性置換手法に基づく2016年熊本地震における熊本城の地震動の評価, 土木学会論文集A1

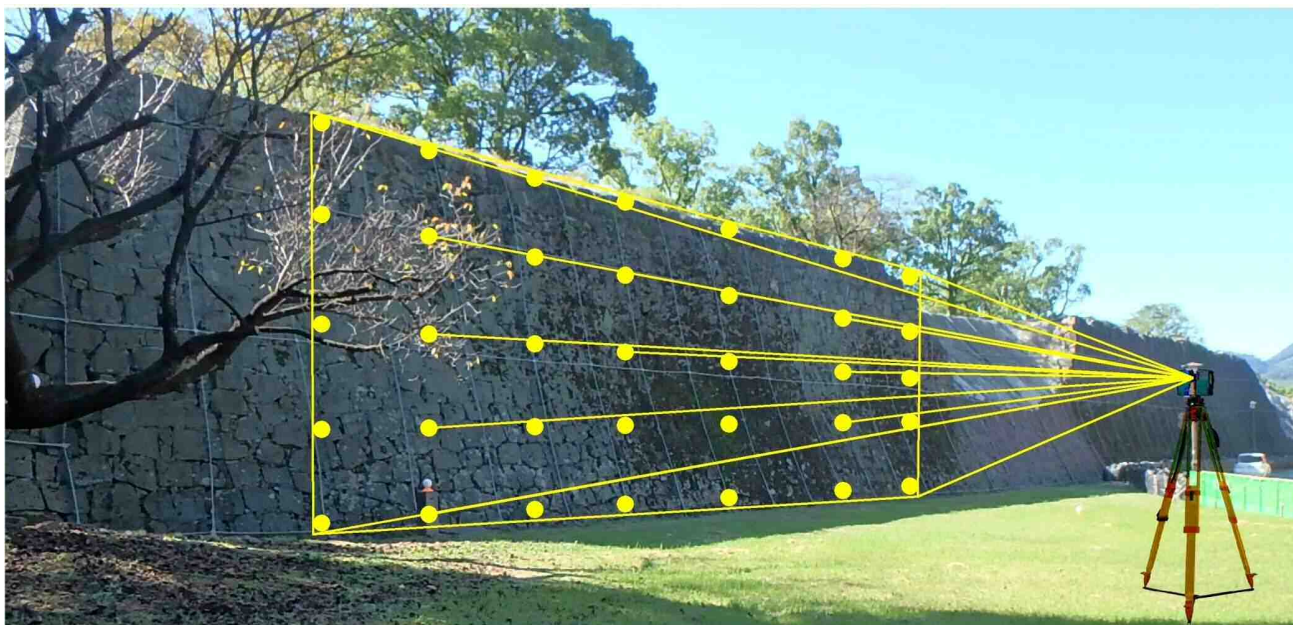
5

# 3Dレーザースキャナ位置図



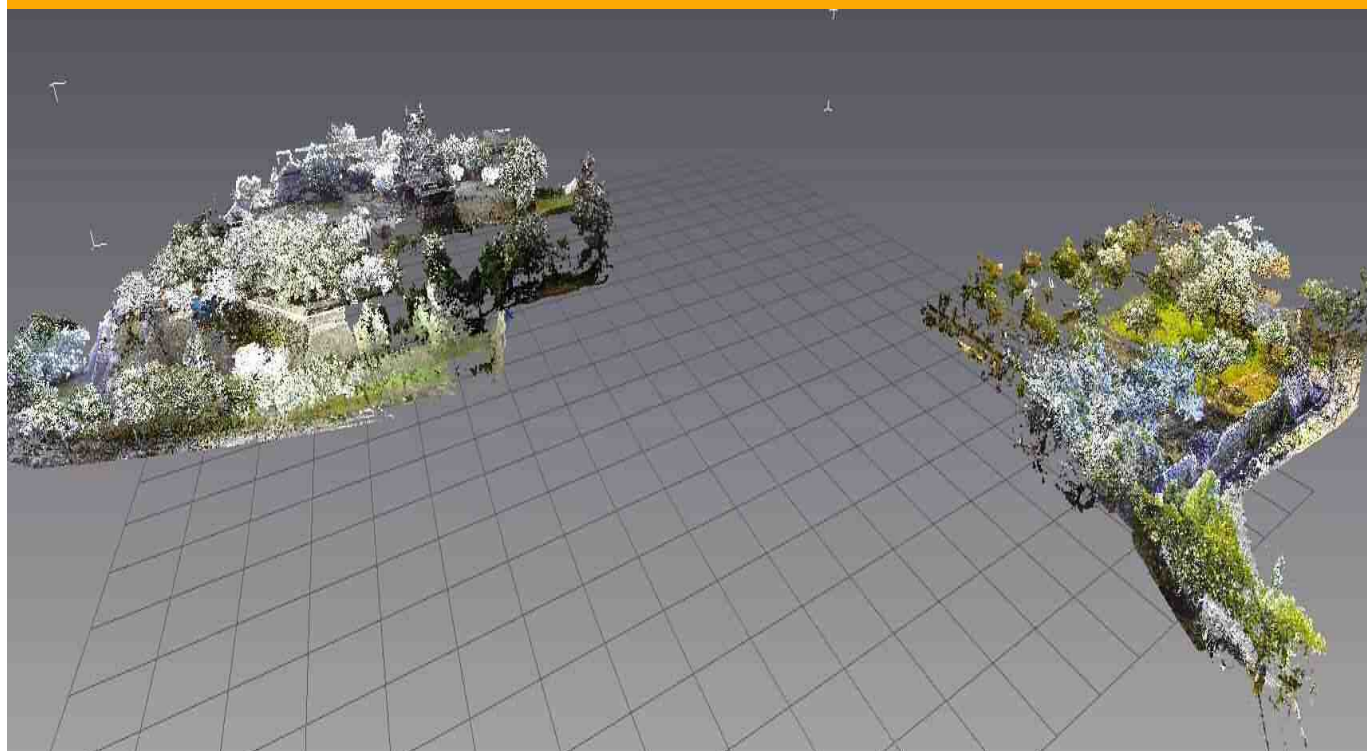
6

# 3Dレーザースキャナの測定イメージ



7

## 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**

8

## 全体鳥観図(本丸・天守閣)



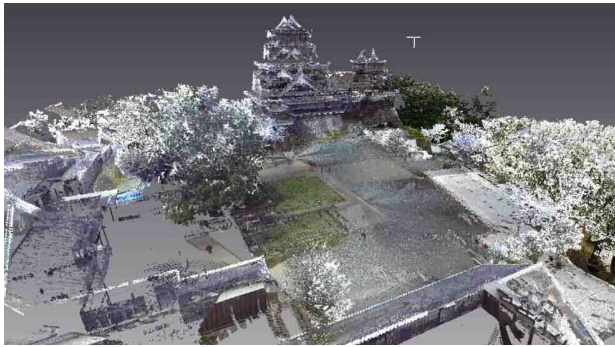
9

## 天守閣付近の3Dレーザースキャナ鳥瞰図



10

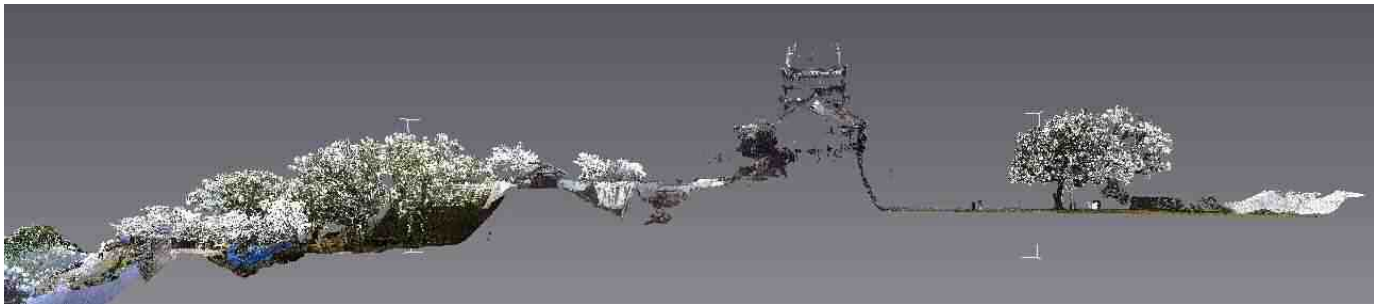
# 天守閣付近の3Dレーザースキャナ鳥観図



東側より



西側より



東～西断面

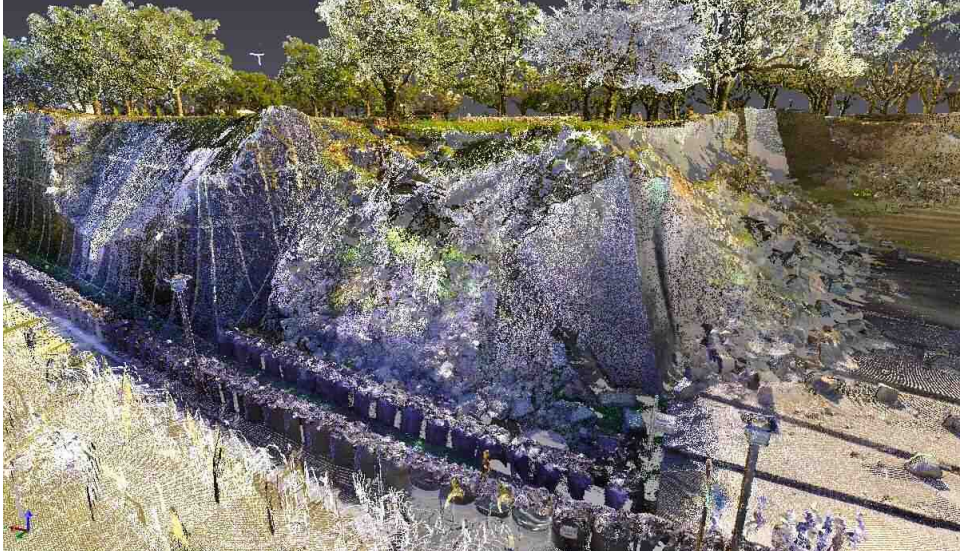
11

# 百間石垣の鳥瞰図



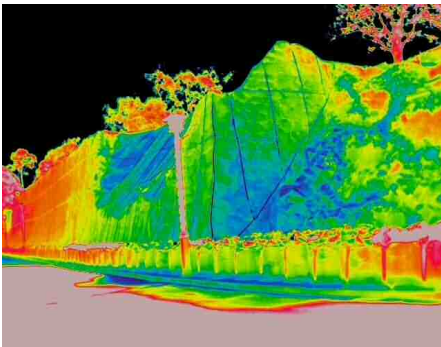
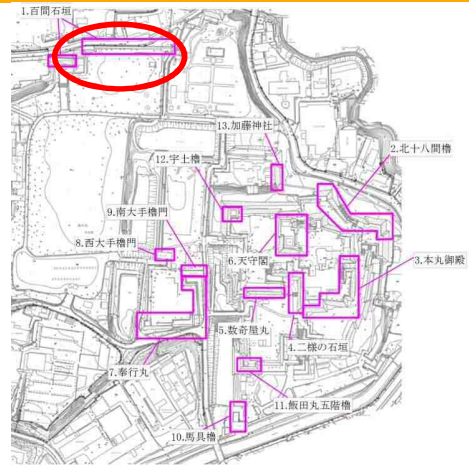
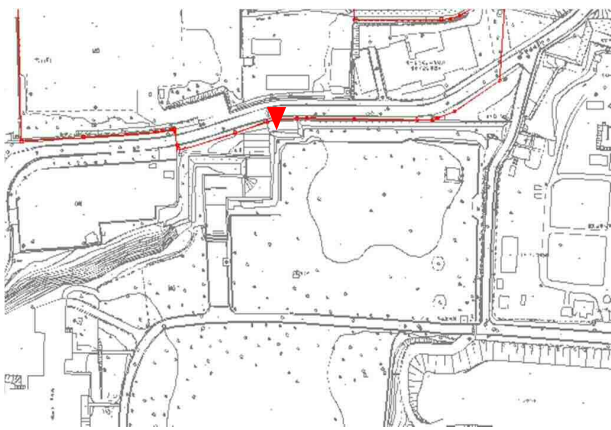
12

# 百間石垣西側の崩壊部

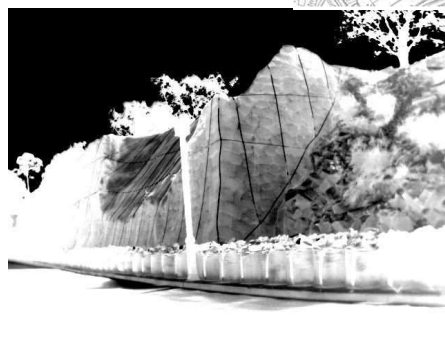


13

## 1. 百間石垣-北側



熱画像 (カラー)



熱画像 (モノクロ)



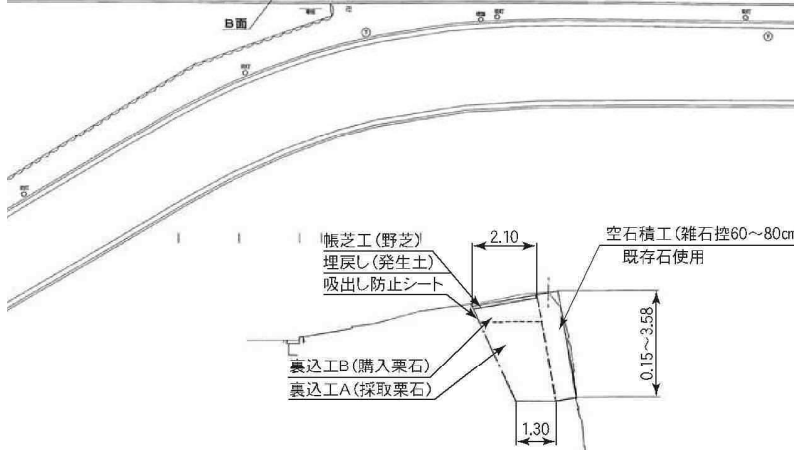
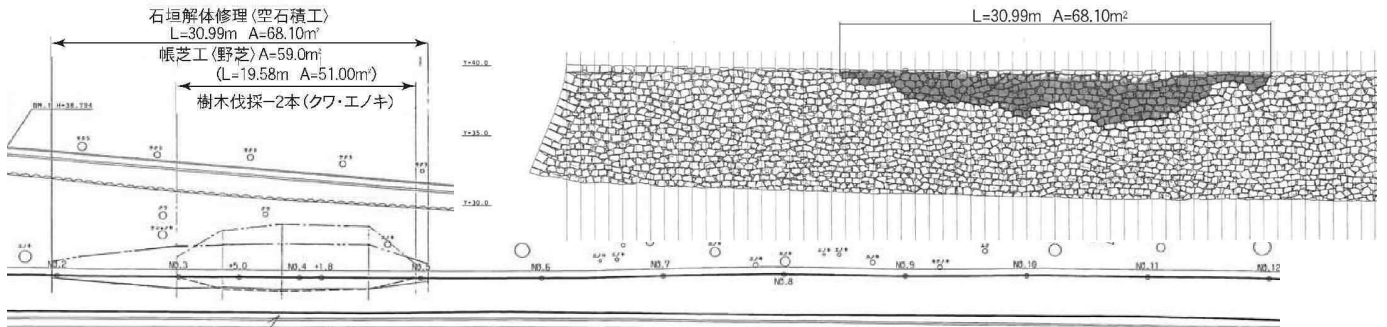
可視画像

14

# 百間石垣東側の崩壊部



15



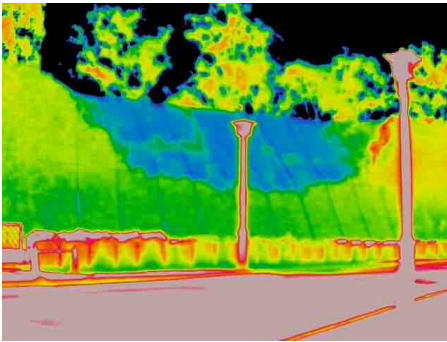
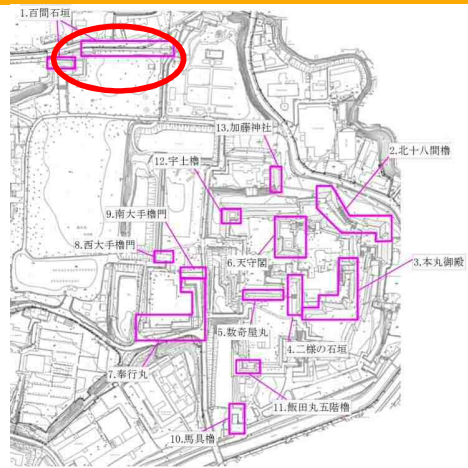
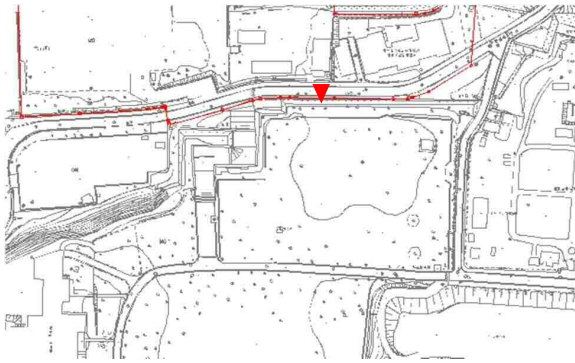
✓ 石垣の崩壊部に礫詰めで補修した場合は、崩壊する可能性が高い。

石積工標準断面図

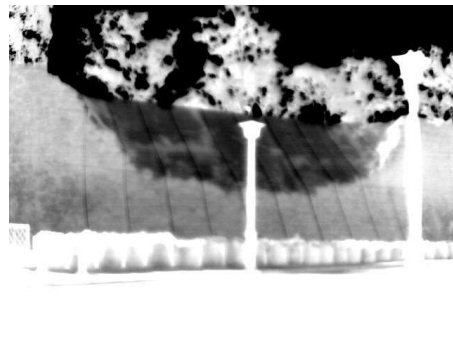
16



# 1. 百間石垣-北側



熱画像 (カラー)

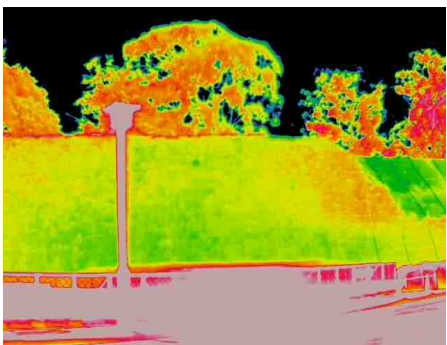
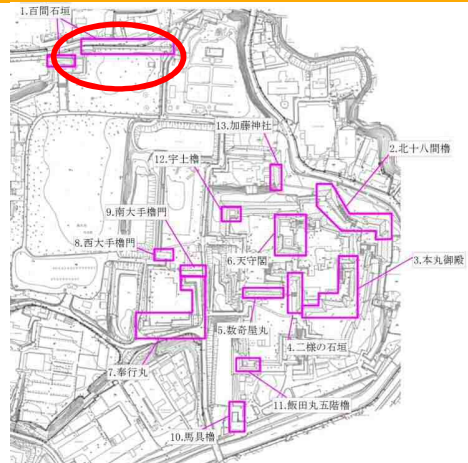
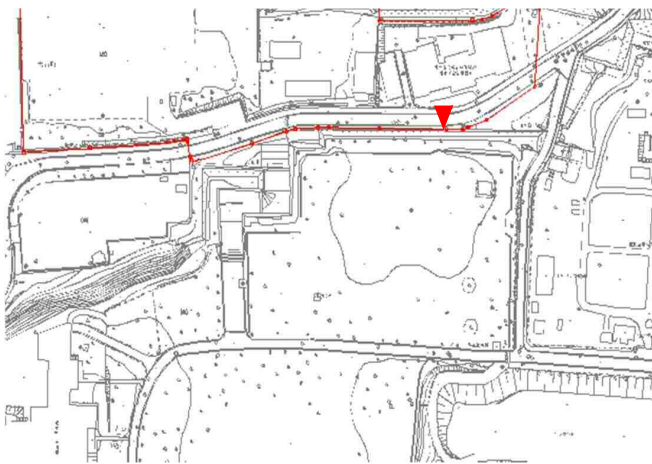


熱画像 (モノクロ)

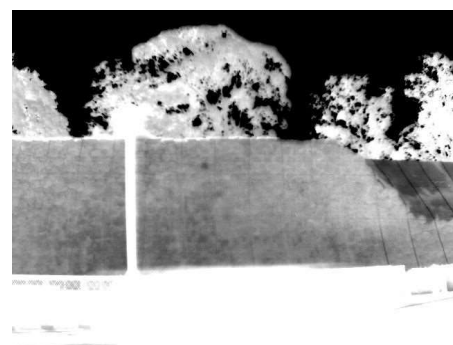


可視画像

# 1. 百間石垣-北側



熱画像 (カラー)

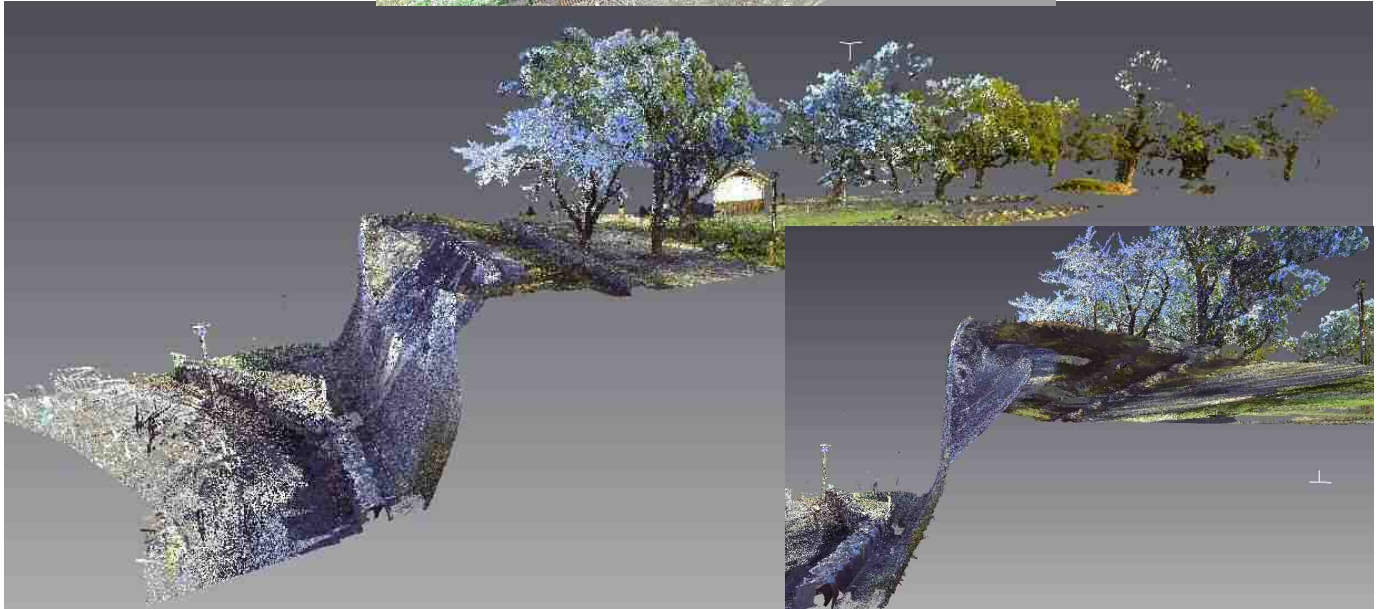


熱画像 (モノクロ)



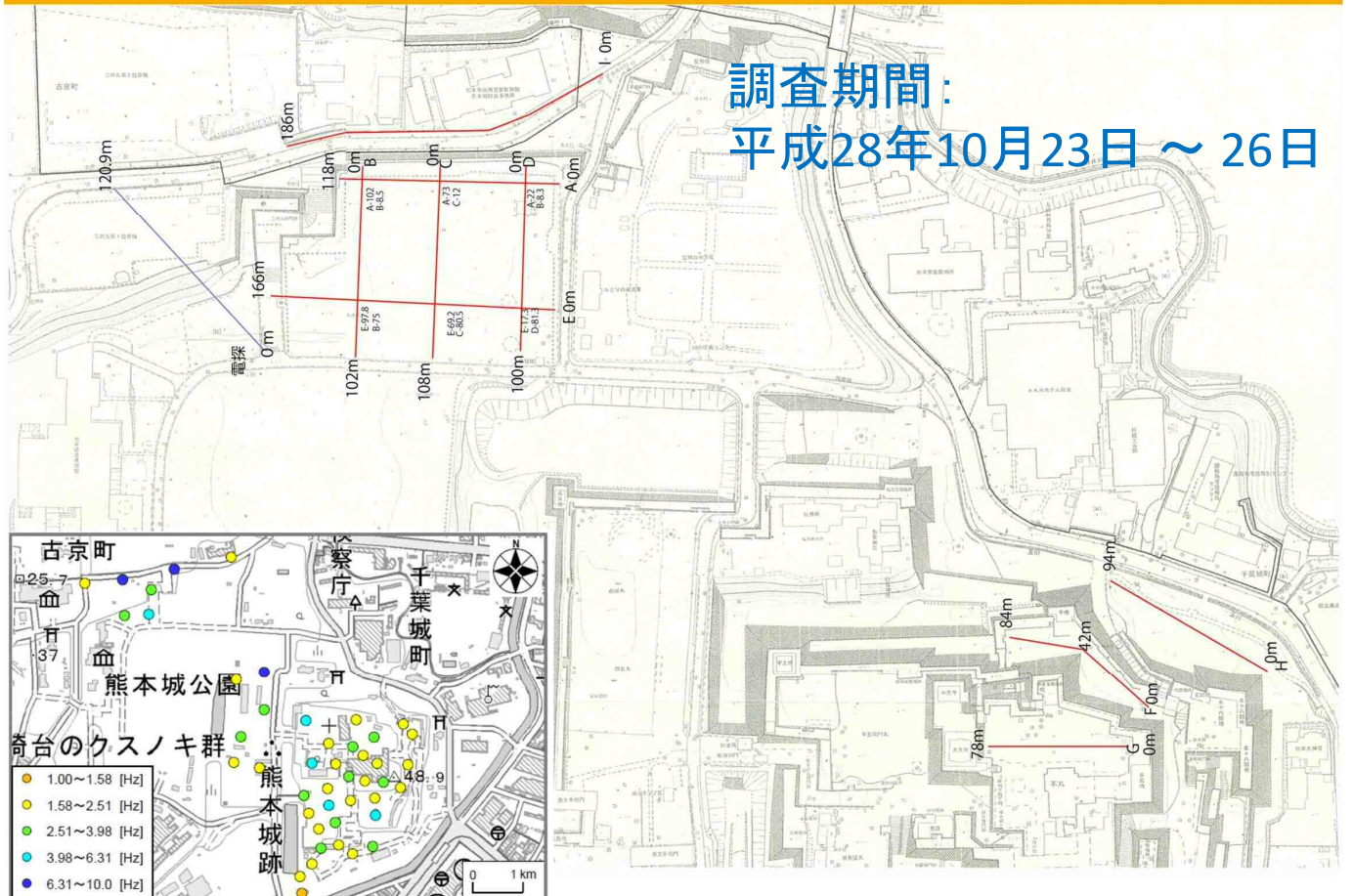
可視画像

# 百間石垣東側の崩壊部



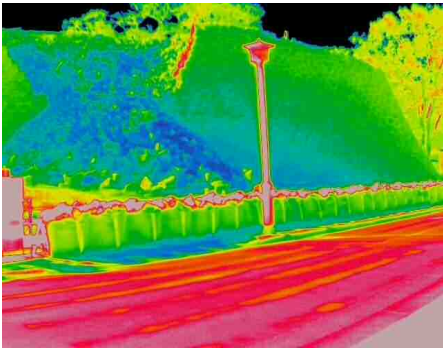
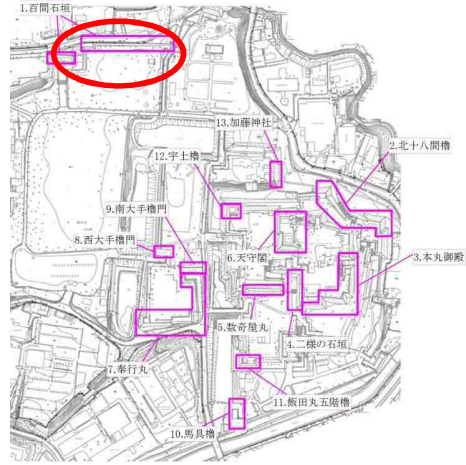
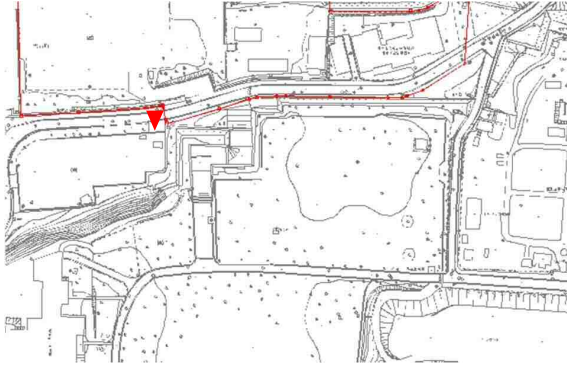
19

# 全体調査位置図

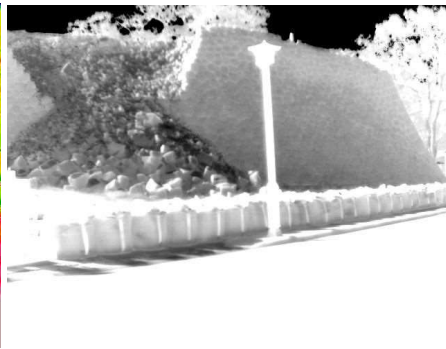


20

# 1. 百間石垣-北側



熱画像(カラー)



熱画像(モノクロ)

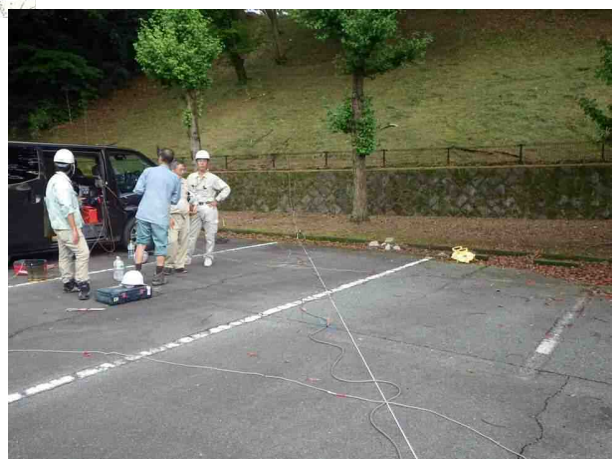


可視画像

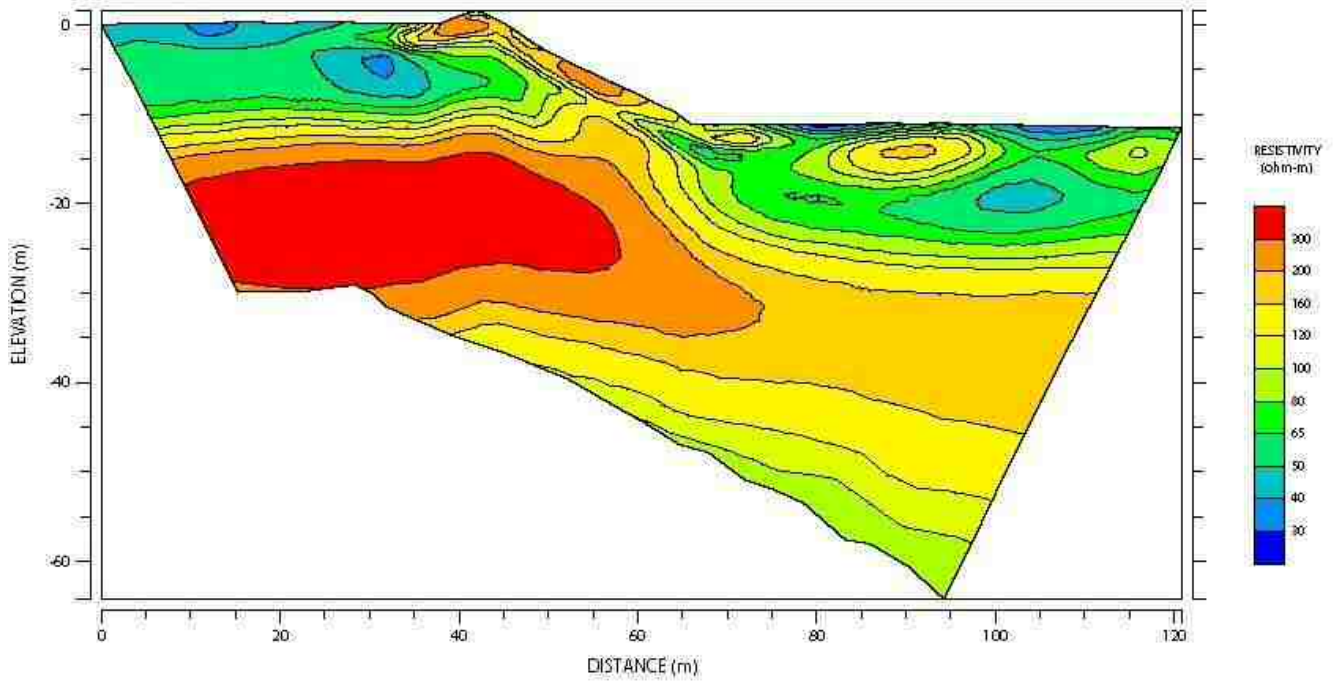
# 電気(抵抗2次元)探査位置



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

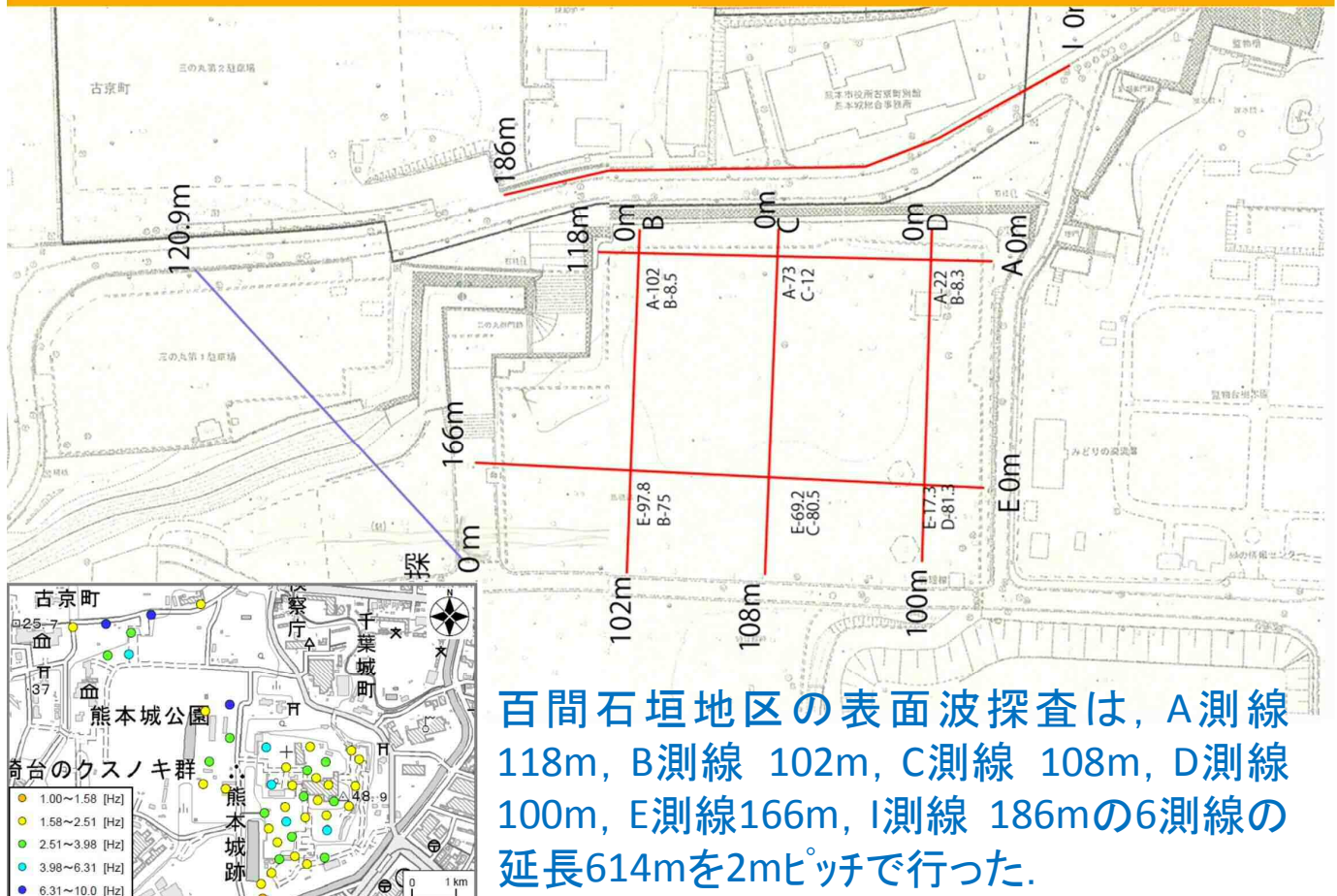


電気探査では地質による比抵抗の違いが顕著に出ており、測線の中央法面付近を境にずれている構造が見られる。

✓ 電気探査で百間石垣付近の法面付近を境に断層の可能性はある。

23

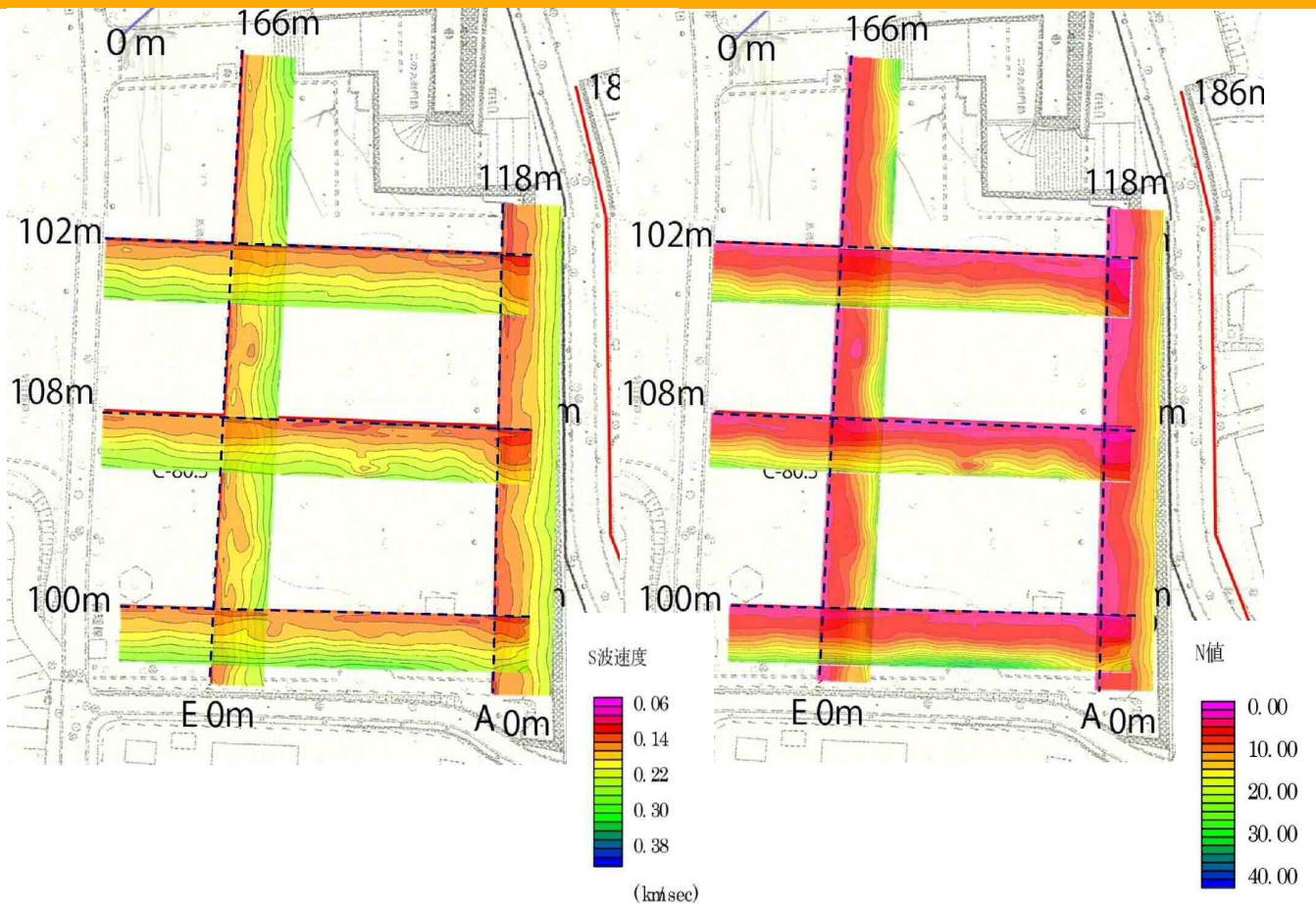
## 百間石垣地区の表面波調査位置図



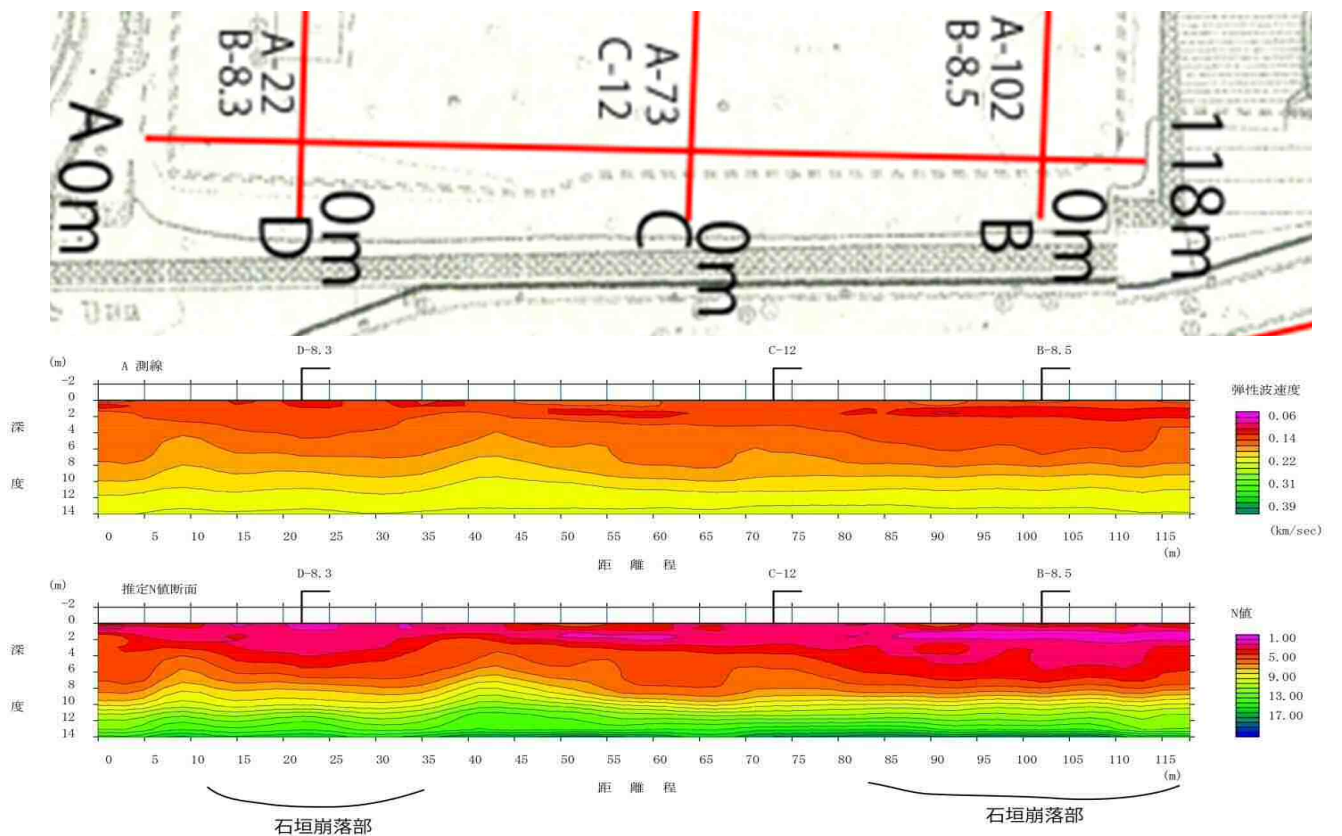
百間石垣地区の表面波探査は、A測線 118m, B測線 102m, C測線 108m, D測線 100m, E測線 166m, I測線 186mの6測線の延長614mを2mピッチで行った。

24

# 百間石垣全体の表面波探査結果

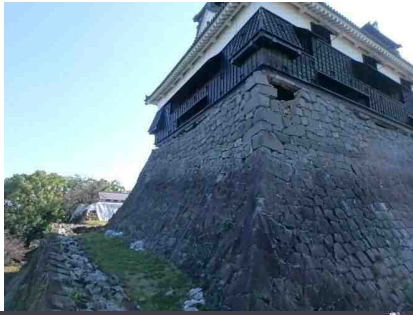


# A測線の表面波探査結果



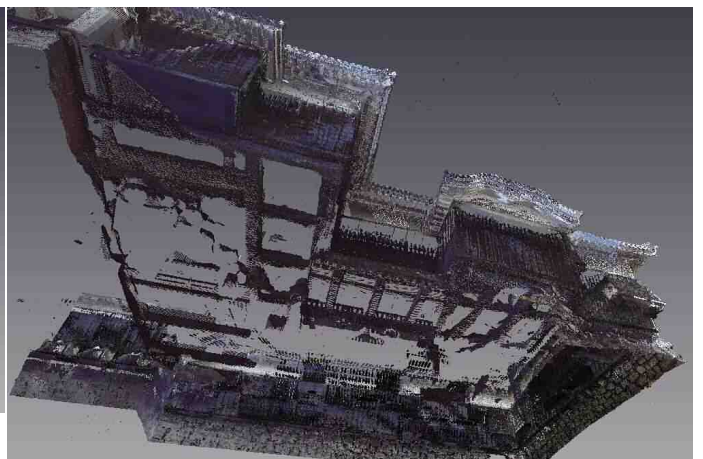
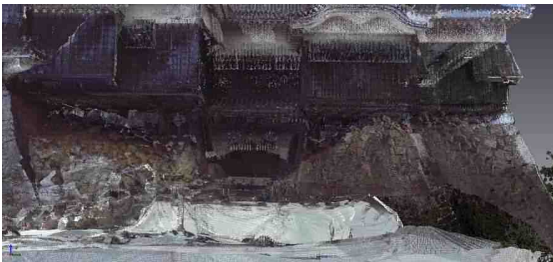
✓ 表面波探査で石垣崩壊付近で軟弱地盤の影響を受けている可能性がある。

# 天守閣石垣東側の被害状況



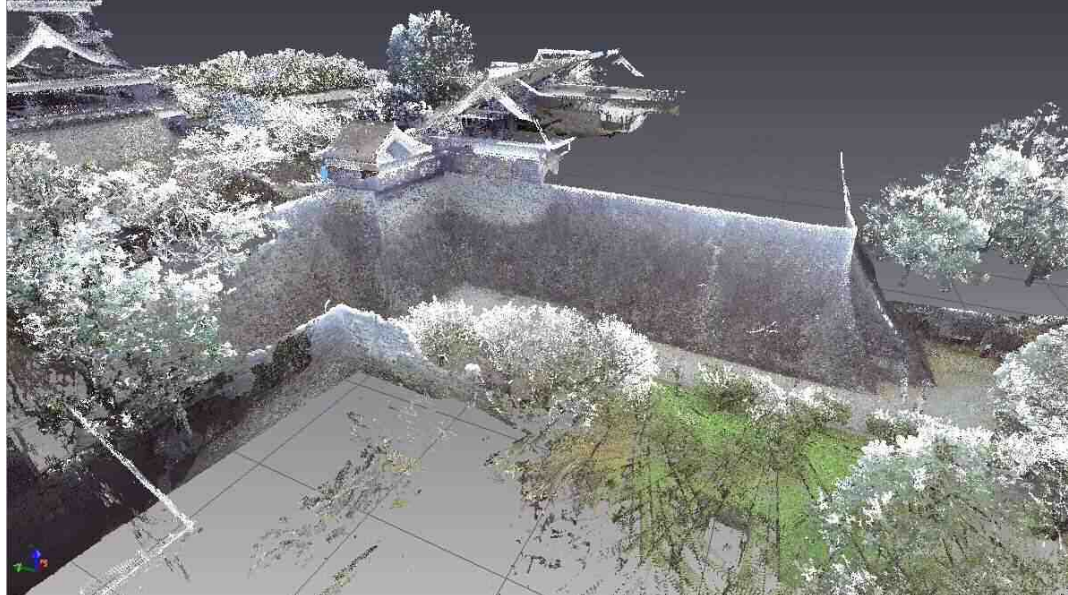
27

# 天守閣東側石垣崩壊状況



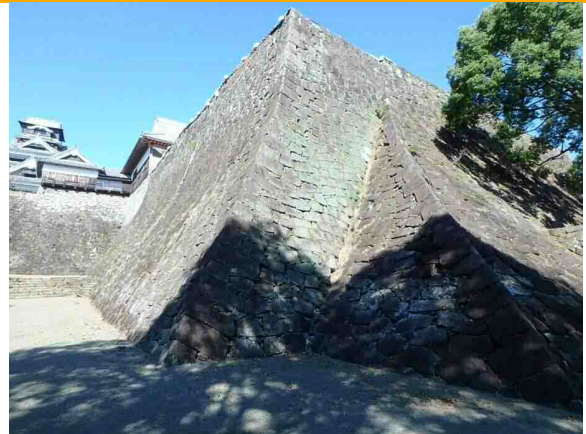
28

## 二様の石垣南西側の鳥瞰図



29

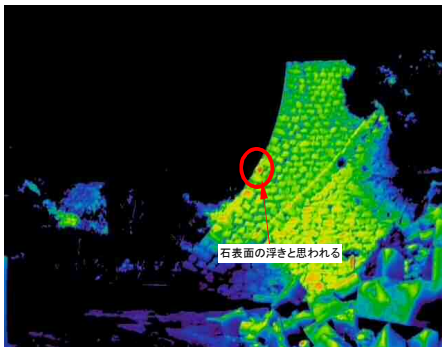
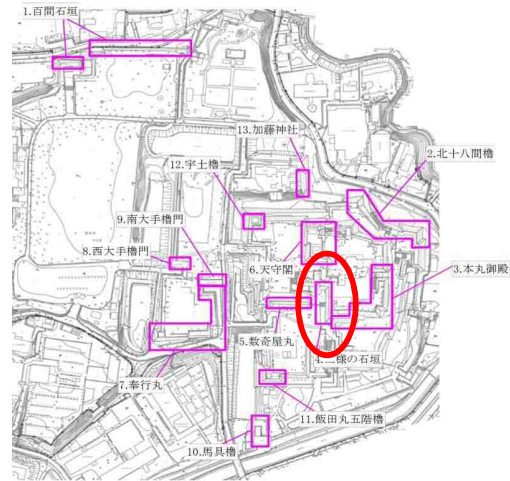
## 二様の石垣南西側の鳥瞰図



✓ 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。

30

# 4. 二様の石垣-南側



熱画像(カラー)

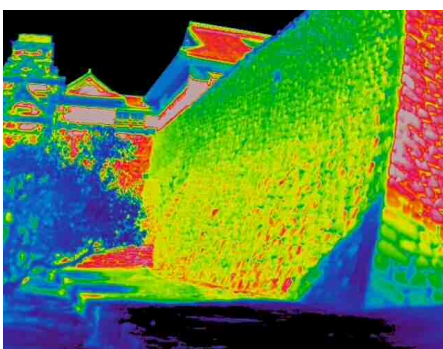
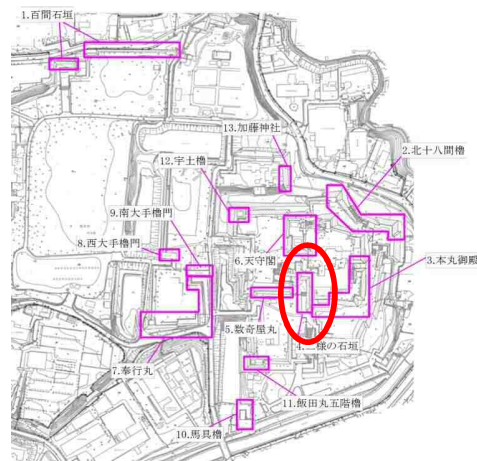


熱画像(モノクロ)



可視画像

# 4. 二様の石垣-南側



熱画像(カラー)



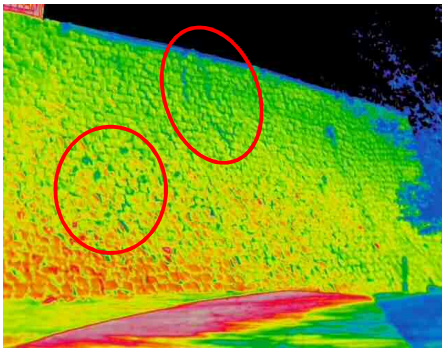
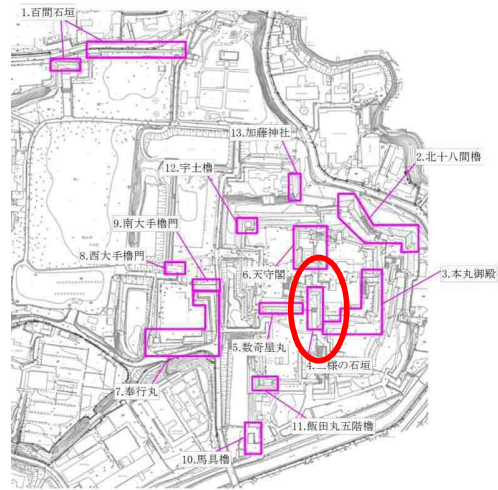
熱画像(モノクロ)



可視画像



# 4. 二様の石垣-南側



熱画像(カラー)

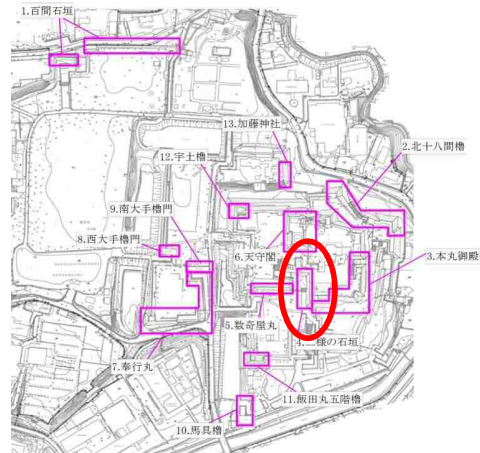


熱画像(モノクロ)

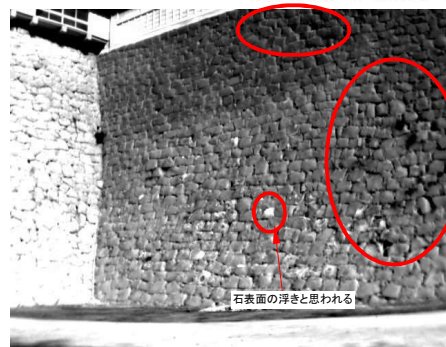


可視画像

# 4. 二様の石垣-南側



熱画像(カラー)



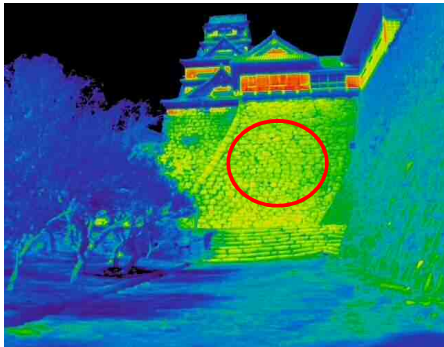
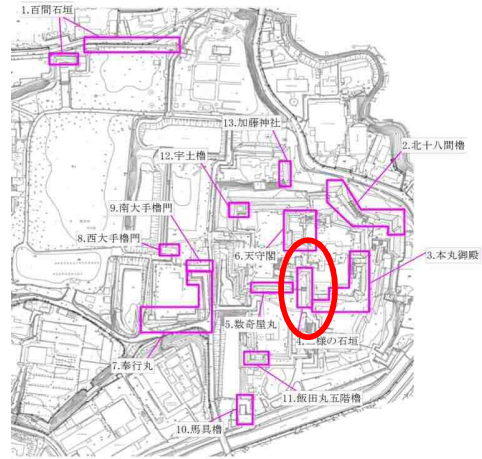
熱画像(モノクロ)



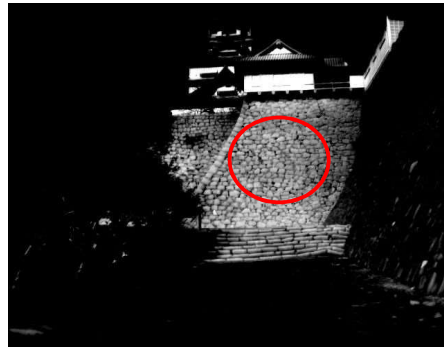
可視画像

✓ 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。

# 4. 二様の石垣-南側



熱画像(カラー)

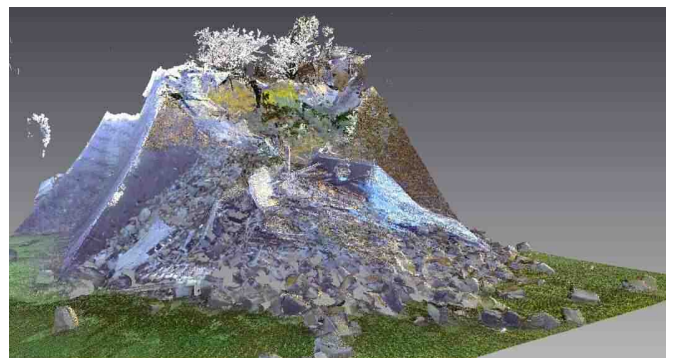
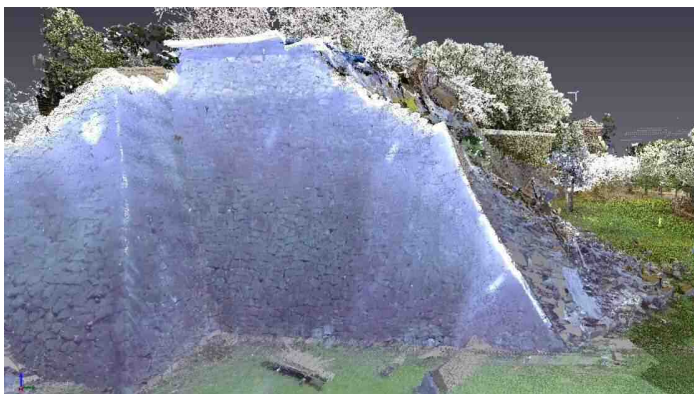


熱画像(モノクロ)

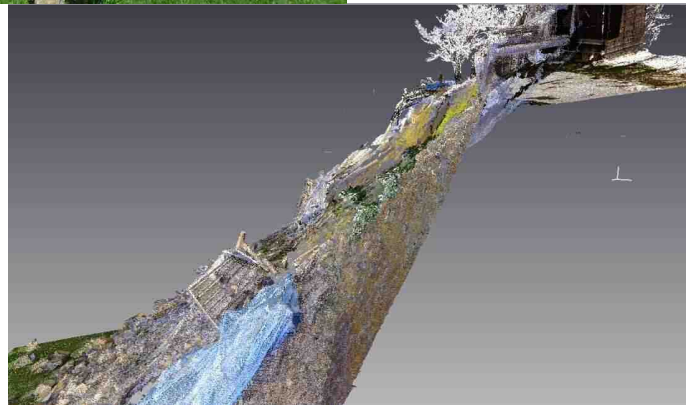
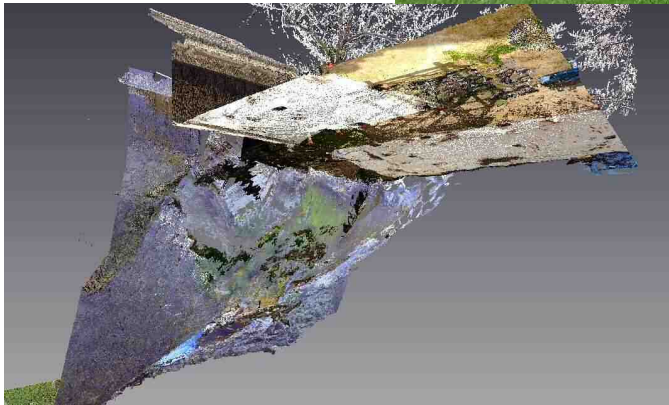


可視画像

# 北十八間櫓の鳥瞰図



# 北十八間櫓の鳥瞰図



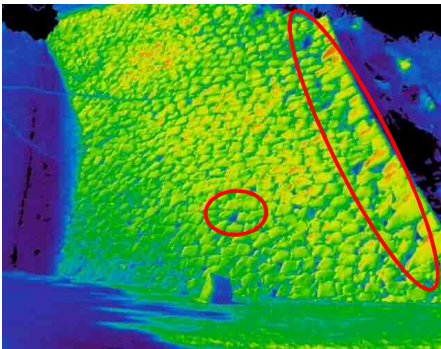
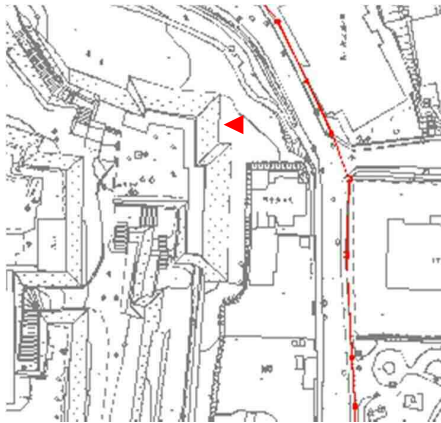
37

# 北十八間櫓の鳥瞰図

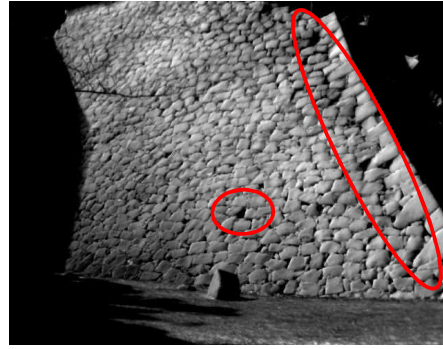


38

## 2. 北十八間櫓-東側



熱画像(カラー)



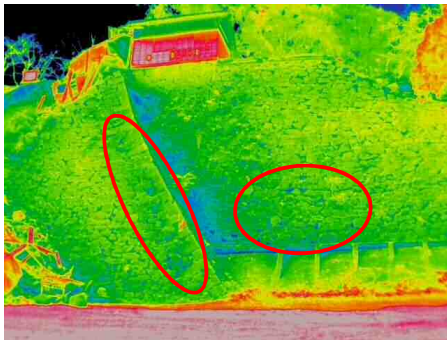
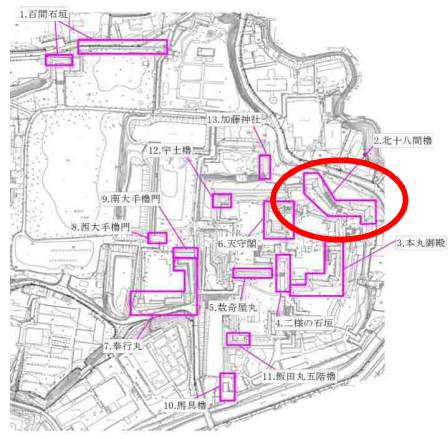
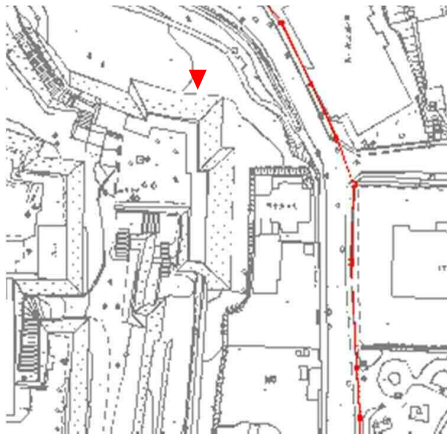
熱画像(モノクロ)



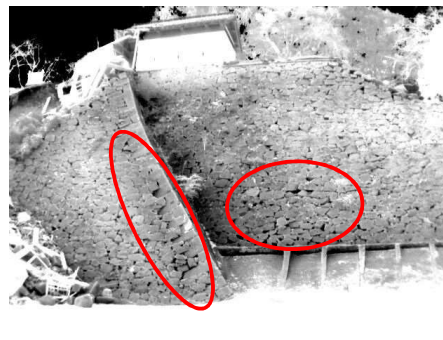
可視画像

39

## 2. 北十八間櫓-東側



熱画像(カラー)



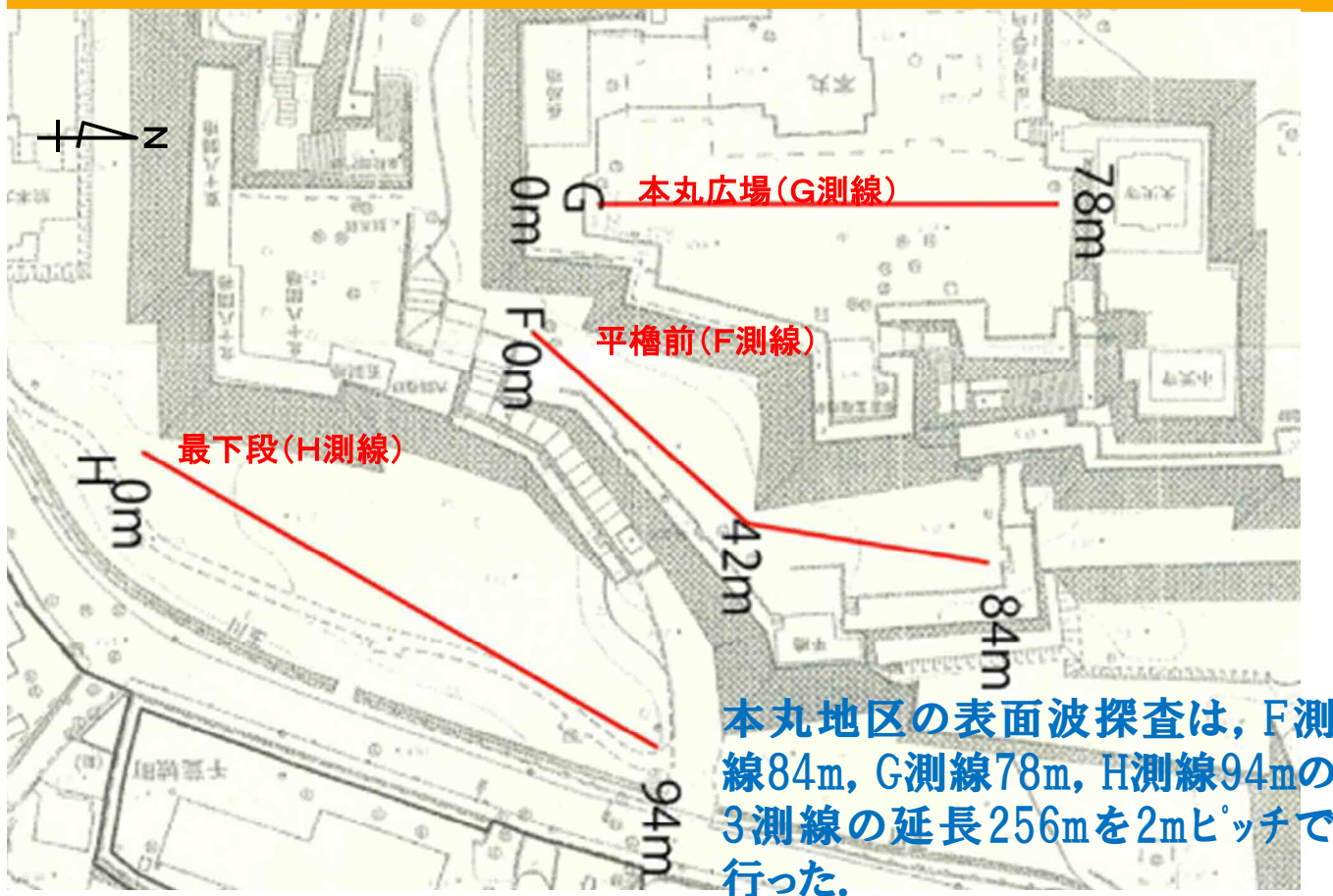
熱画像(モノクロ)



可視画像

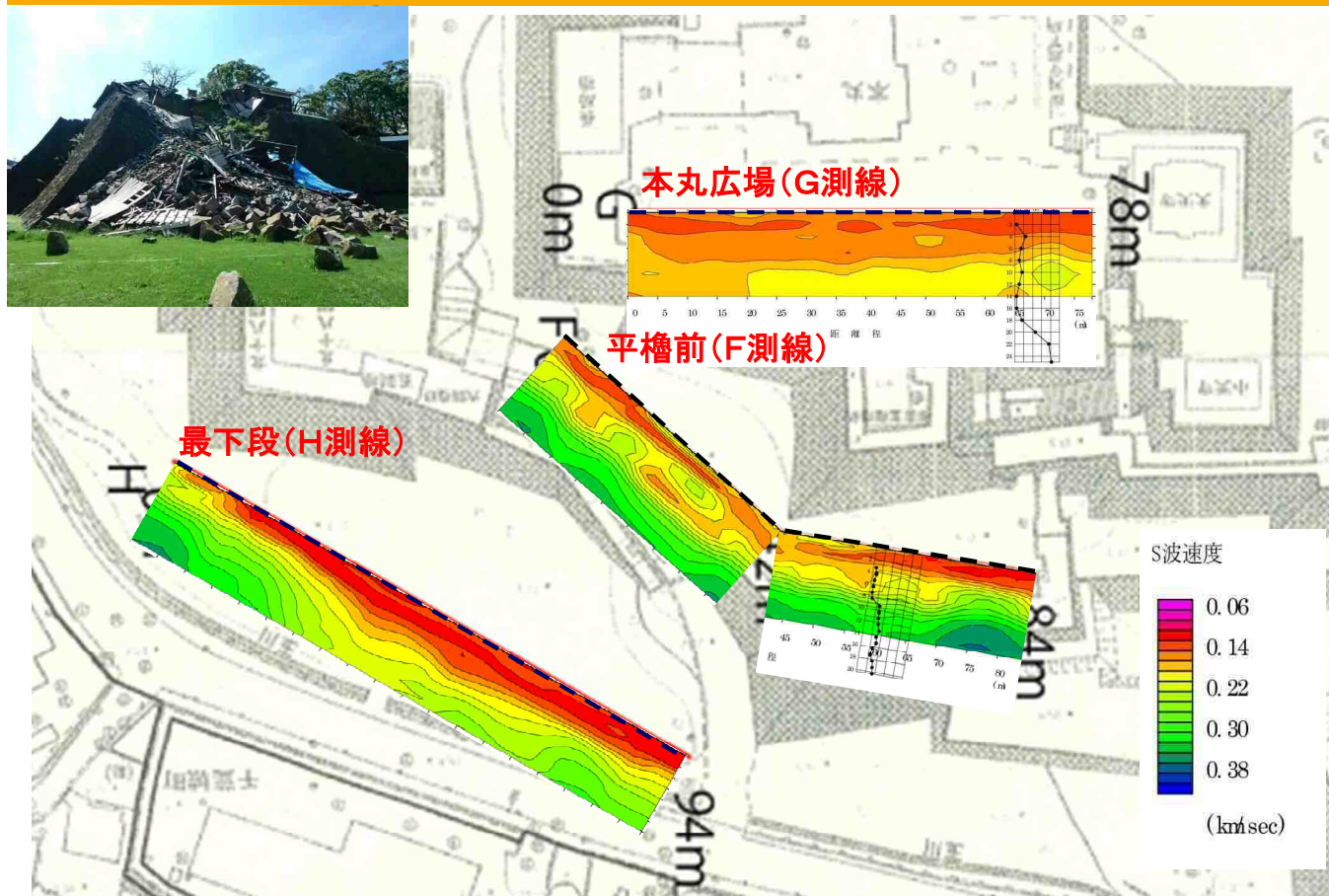
40

# 表面波探査位置図



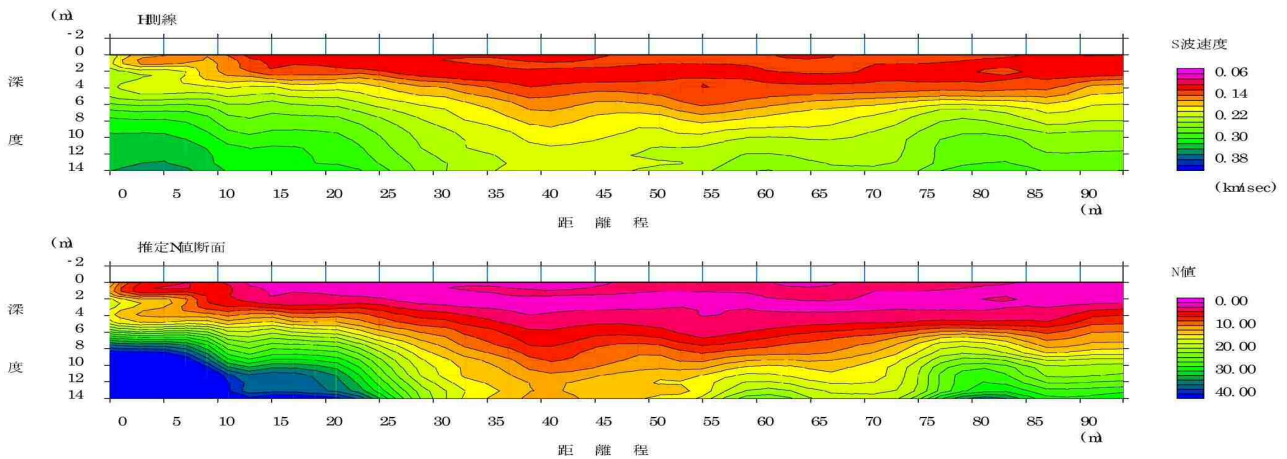
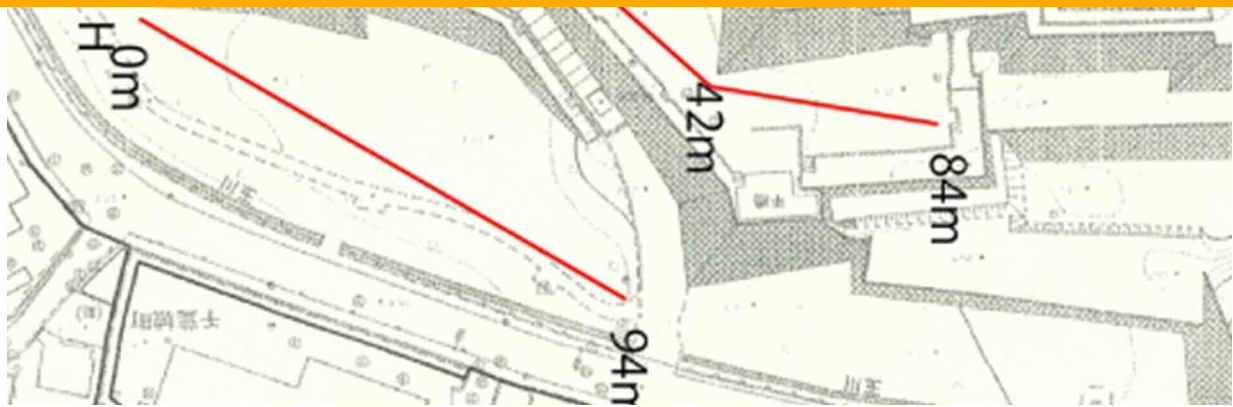
41

# S波速度構造図(表面波探査)



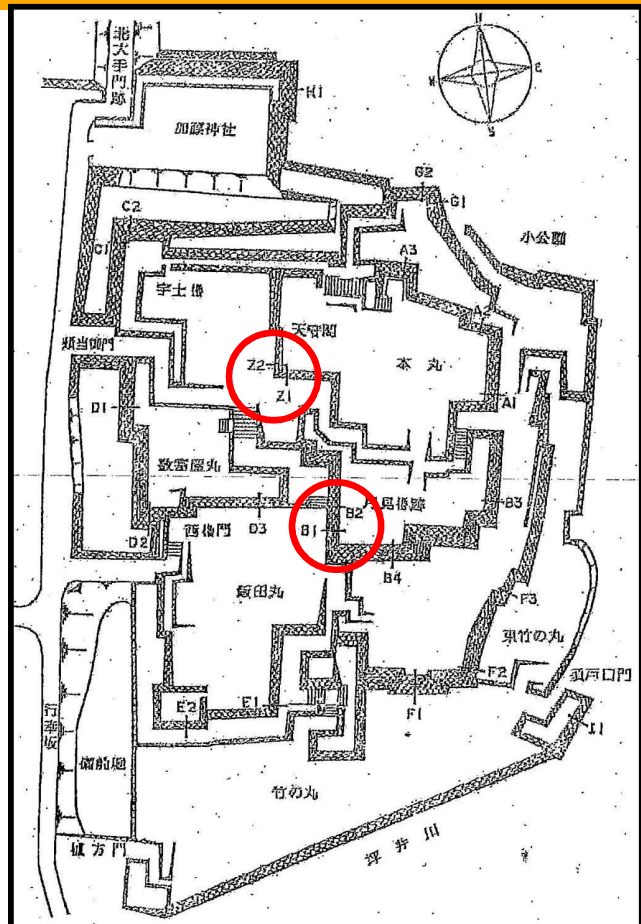
42

# H測線の表面波探査結果

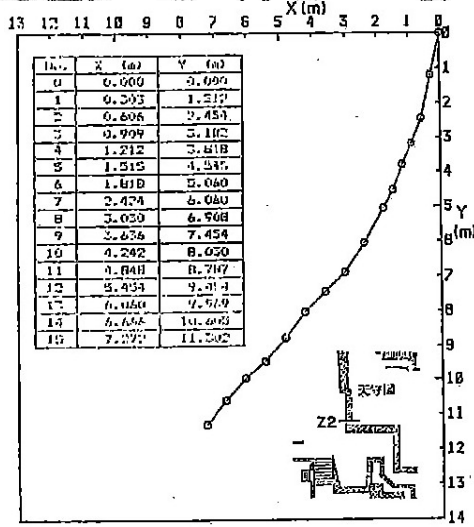
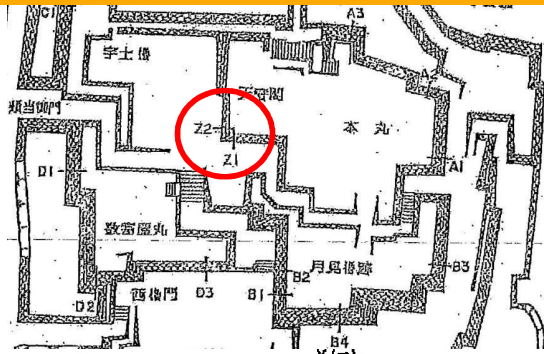


✓ 表面波探査で石垣崩壊付近で軟弱地盤の影響を受けている可能性がある。

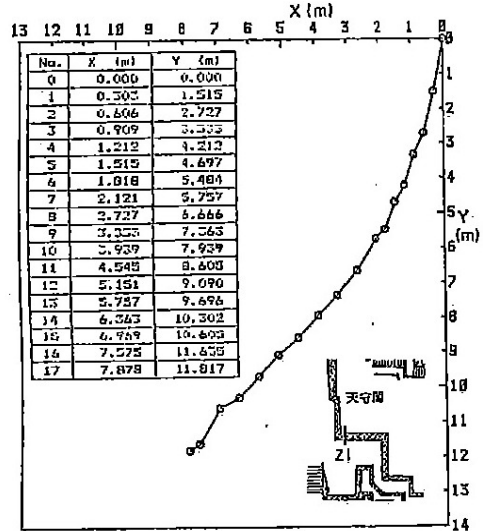
# 熊本城石垣の地震前後の測量位置



# 天守閣の石垣曲線図

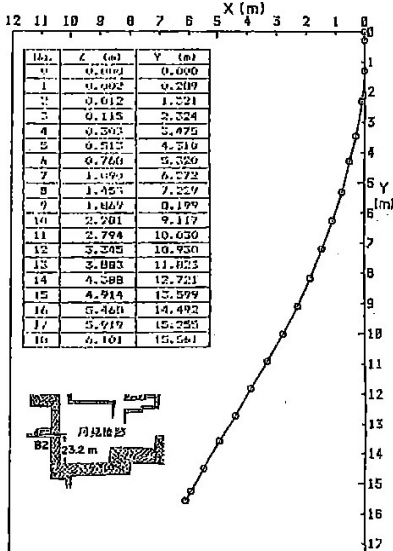
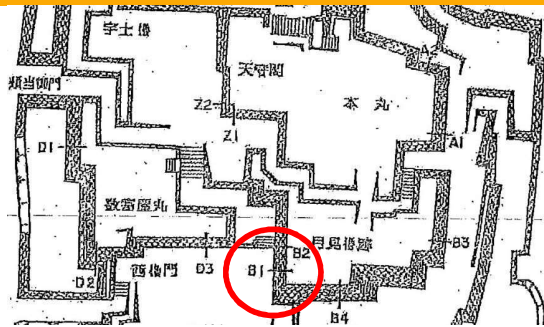


(y) 天守西側 Z2

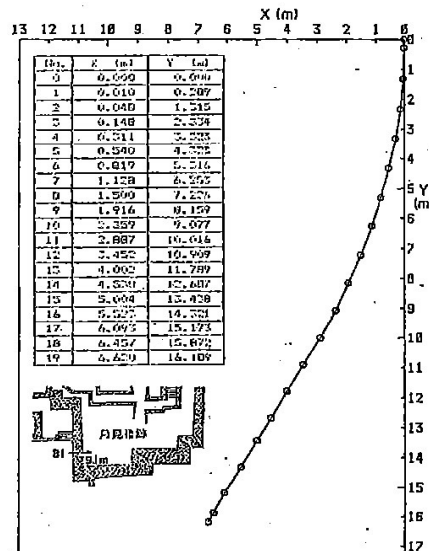


(x) 天守南側 Z1

# 二様の石垣曲線図

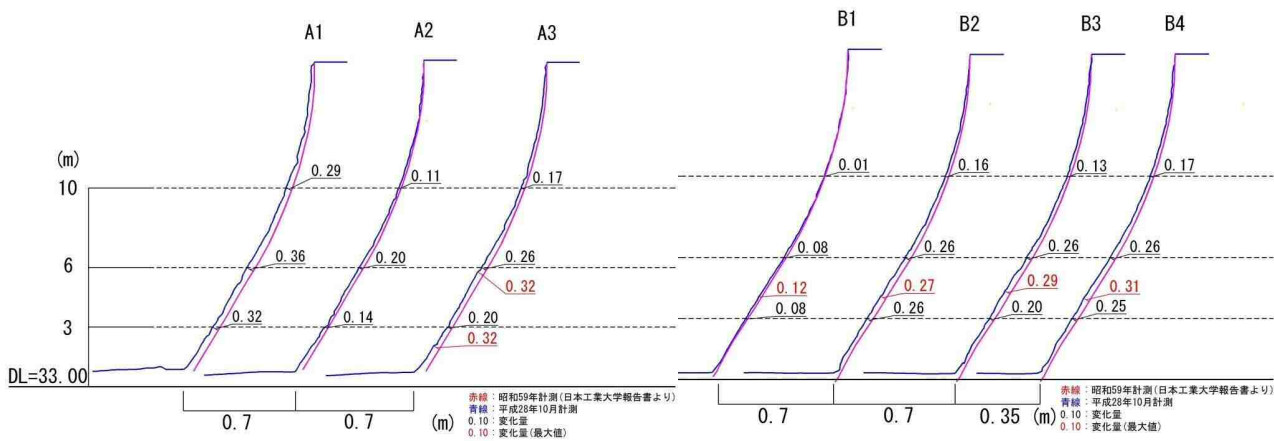
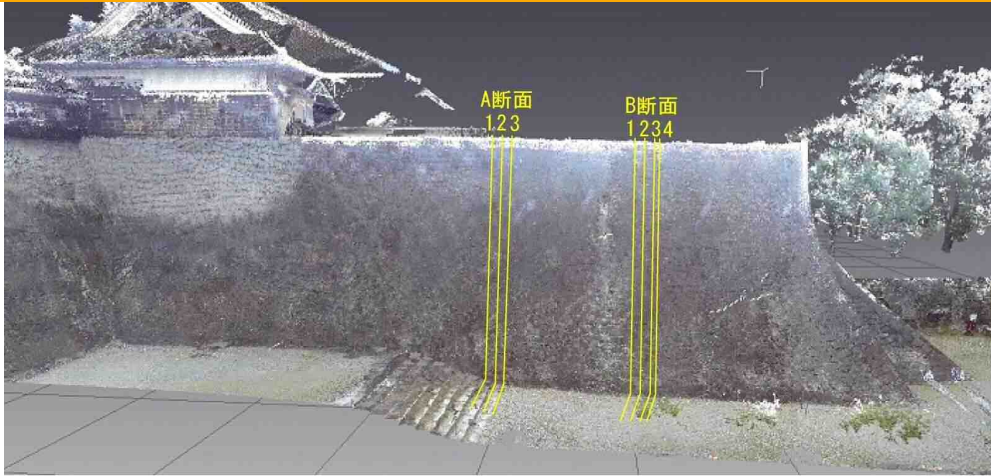


(e) 月見櫓跡西側 B2



(d) 月見櫓跡西側 B1

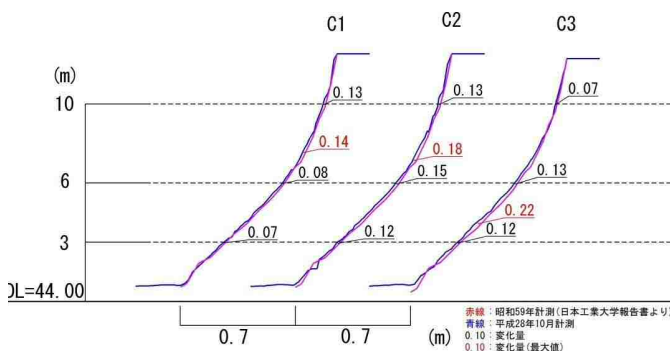
# 二様の石垣勾配比較図



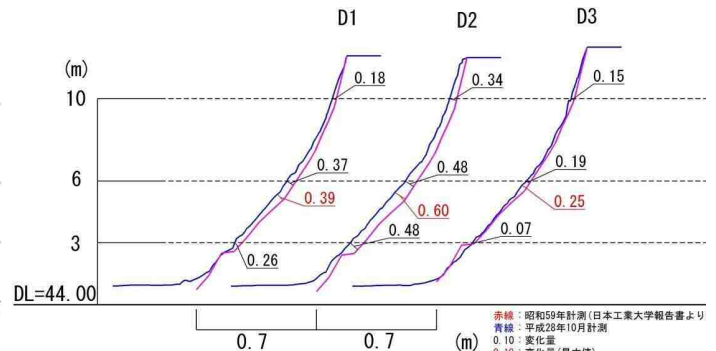
# 天守閣(南西側)の石垣勾配比較図



(南側)

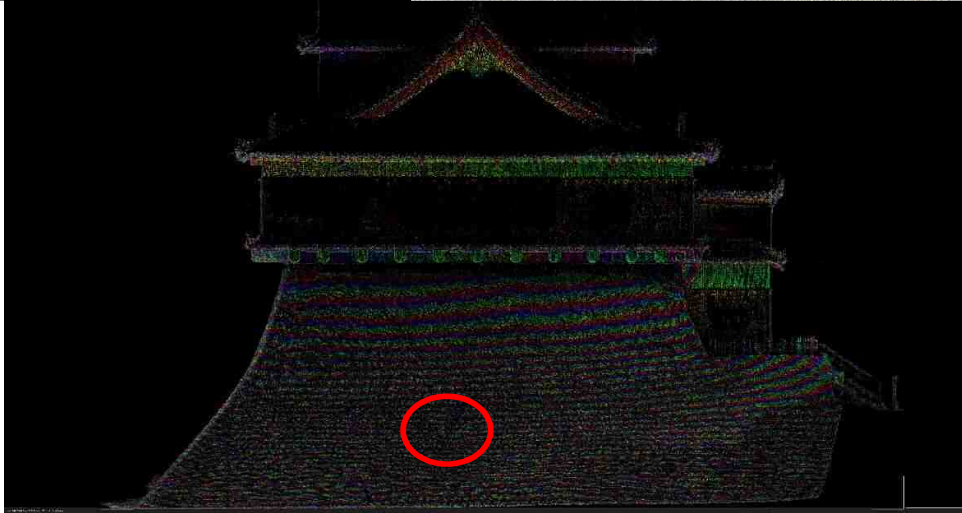


(西側)





# 天守閣南側石垣の段彩図

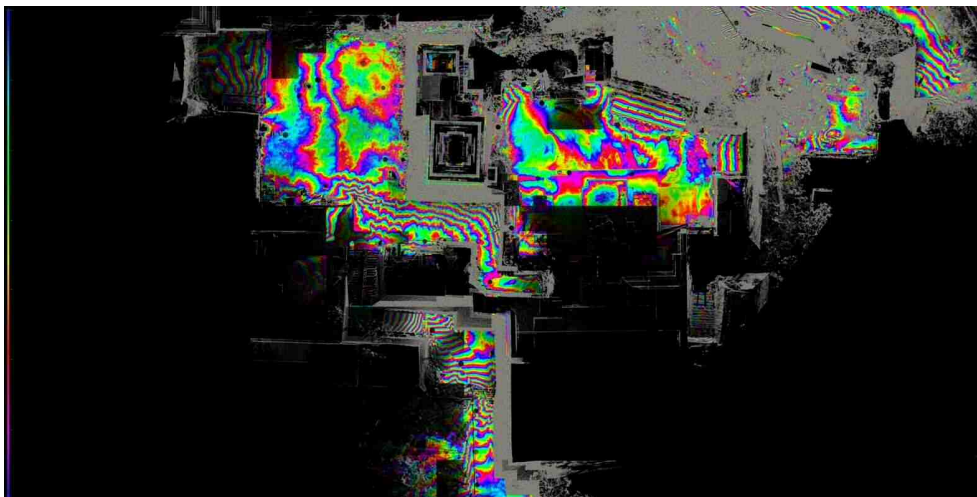


49

# 天守閣周辺地盤の段彩図



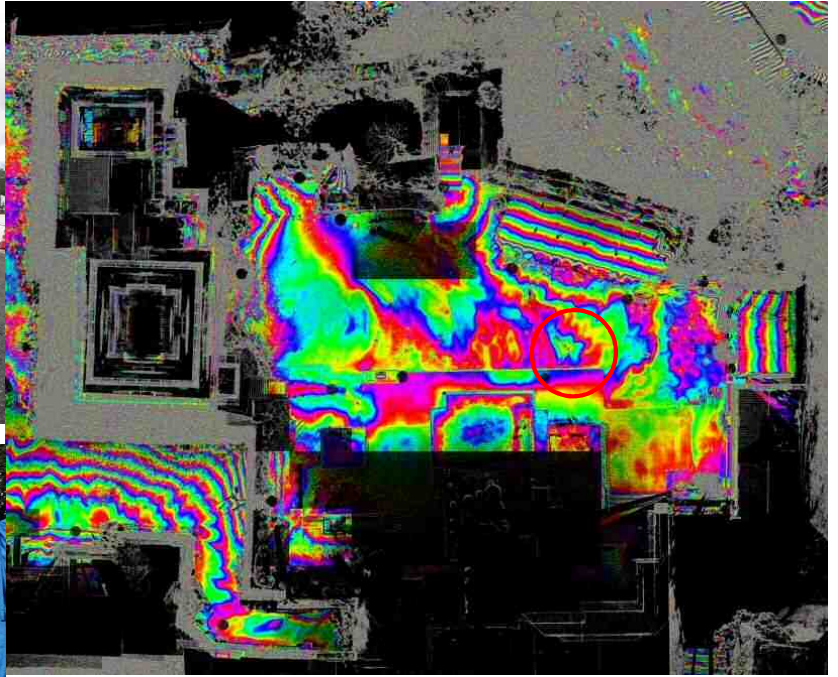
➤ 段彩図とは、標高値を高度の段階毎に分け、その段階毎に色付けを行う表現方法である。



➤ 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。

50

# 天守閣周辺地盤の段彩図



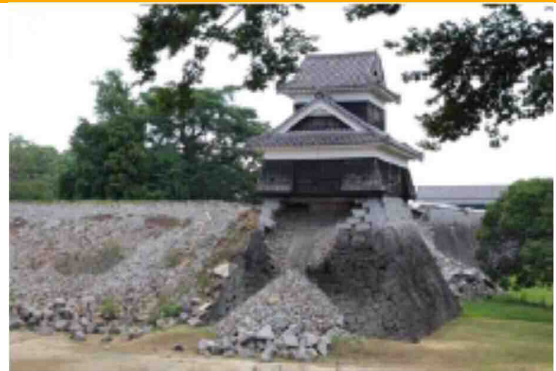
✓ 3Dレーザスキャナで石垣の孕(はら)みや地盤の変状把握できることが明らかとなった。

51

# 石垣の裏込材が石材のみの被害



飯田丸櫓台石垣(隅石の算木積みは健全)



成亥櫓の石垣(隅石の算木積みは健全)



加藤神社内石垣



馬具櫓の石垣

✓ 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。

52

# 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の可能性がある。
- ✓ 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。
- ✓ 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。
- ✓ 石垣の中詰め材が石材のみの場合は、崩壊する可能性が高い。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。

53

## 2. 石橋の被害

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。

54

# 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

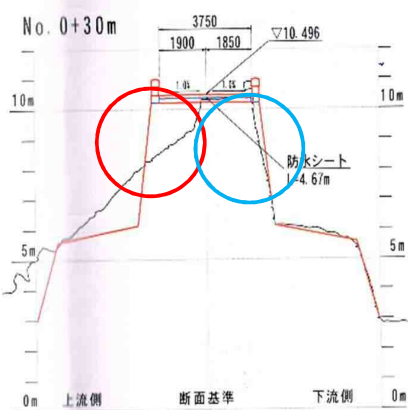
## 八勢(やせ)橋の被害状況



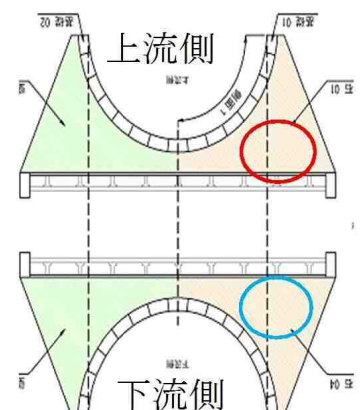
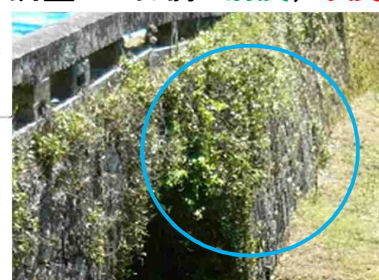
(a) 昭和 63 年の壁石崩壊

(b) 本震後の壁石崩壊

(c) 昭和 63 年の補修状況



壁石崩壊部の断面図



崩壊部に礫詰め補修の場合は、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

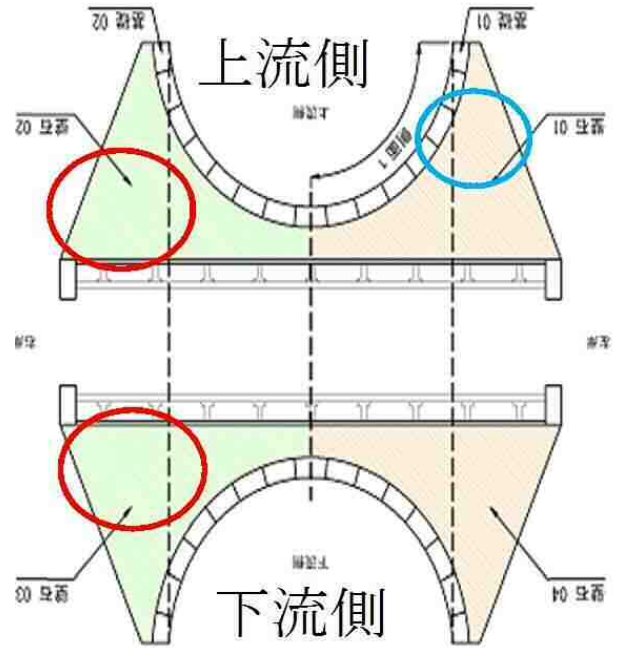
# 梅木橋の被害状況



調査した石橋と前震，本震位置



石材のみの中詰め



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



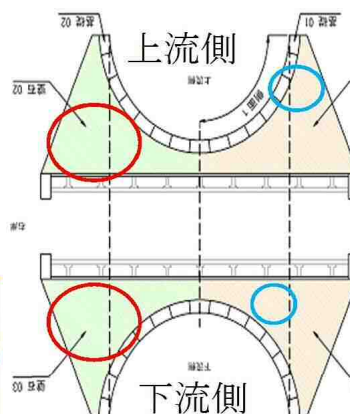
(a) 地震前右岸上流側壁石の孕み



(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



壁石の崩壊(赤丸)または孕みだし(青丸)の位置

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。

# 銭瓶（ぜにがめ）橋の壁石崩壊状況



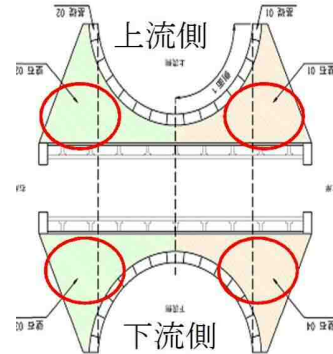
(a) 下流側



(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)



安見下鶴橋(橋軸直角水平方向に開く)



(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

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。

61

## 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。

62

## 2. 宅地擁壁の被害

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。

63

### 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)

64



# 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)

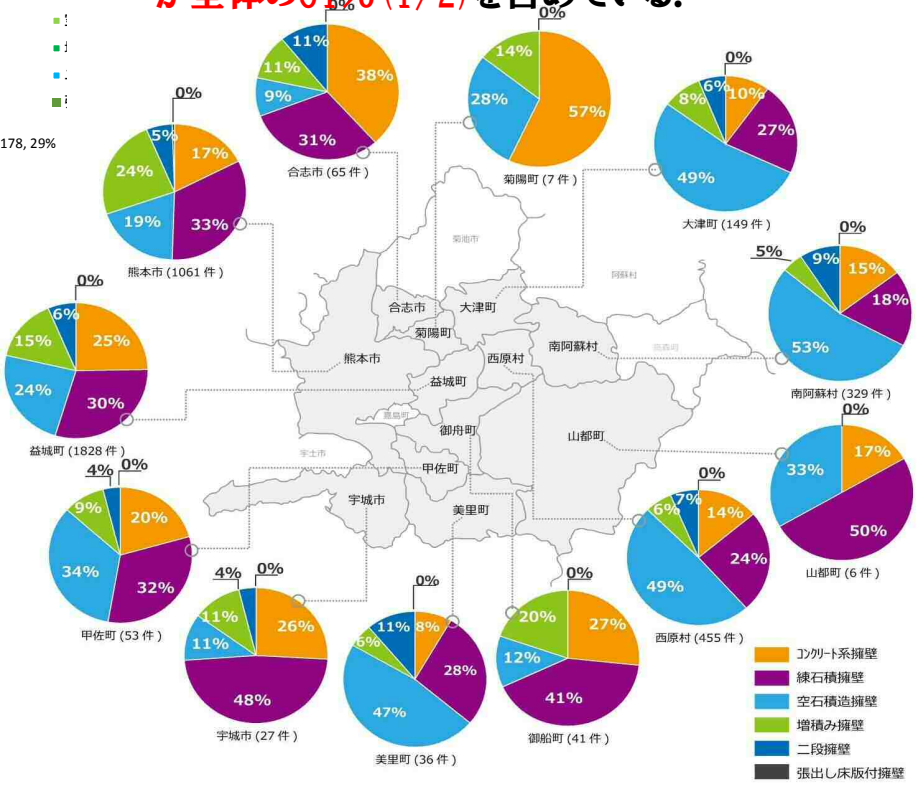
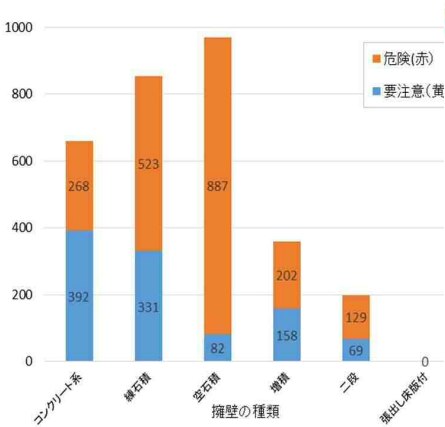
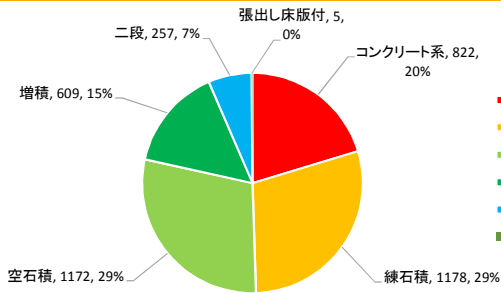


(h) L型擁壁の倒壊(南阿蘇村)

65

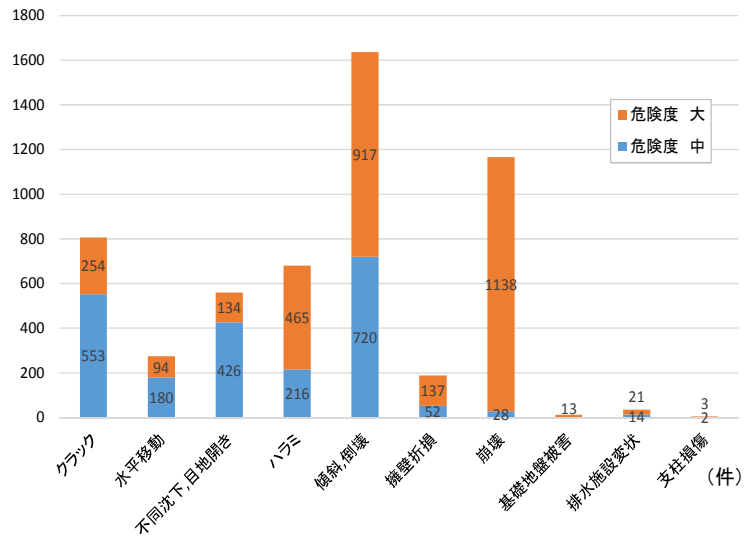
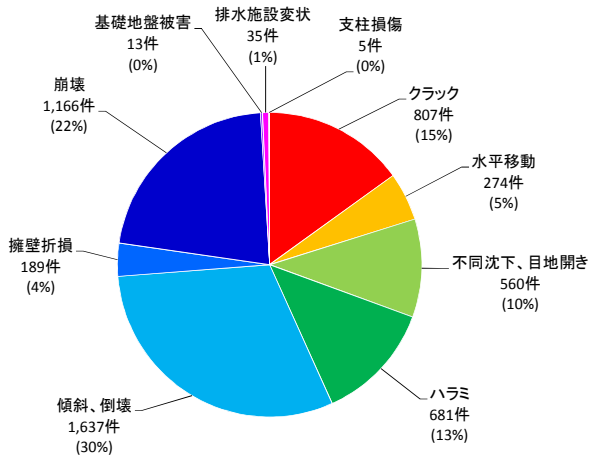
# 被災宅地擁壁の種類

✓ 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。



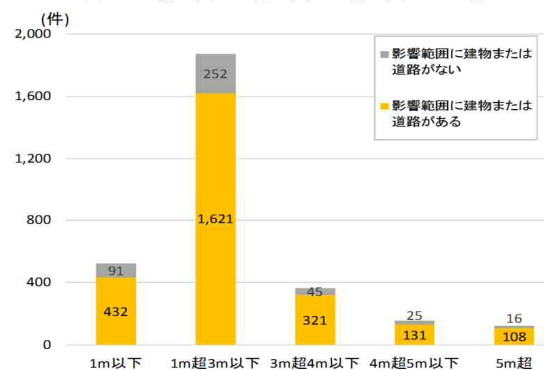
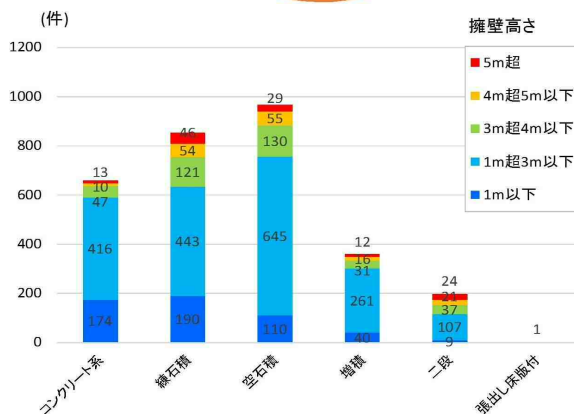
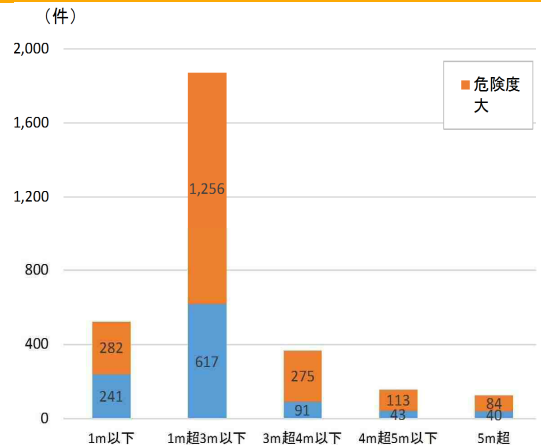
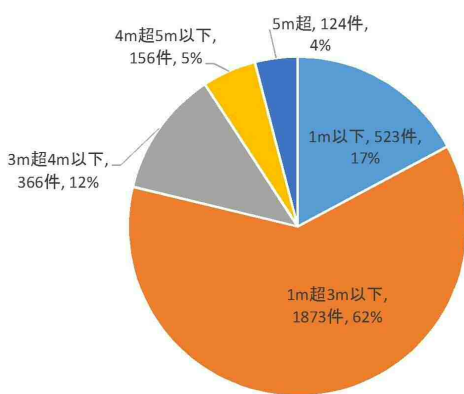
66

# 被災宅地擁壁の分類



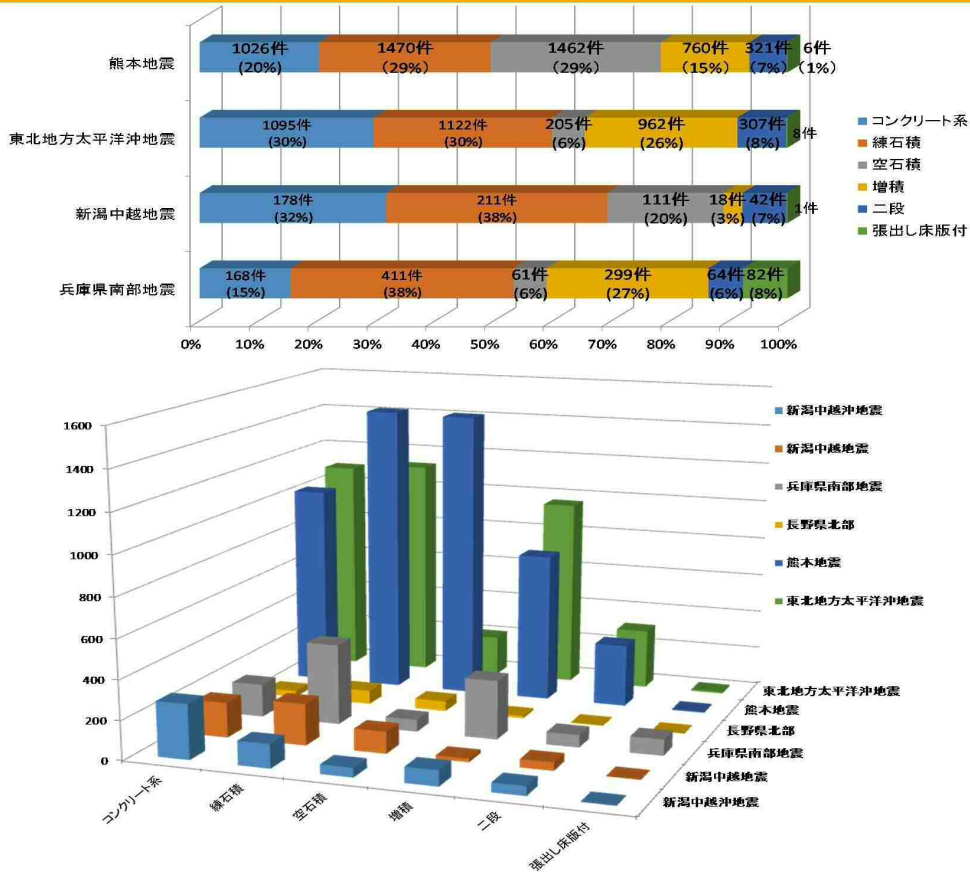
✓ 被災宅地擁壁の分類では、地震動が大きかったことと空石積擁壁が非常に多いことから**傾斜・倒壊及び崩壊の被害が非常に多く**なっている。

# 被災宅地擁壁の高さ



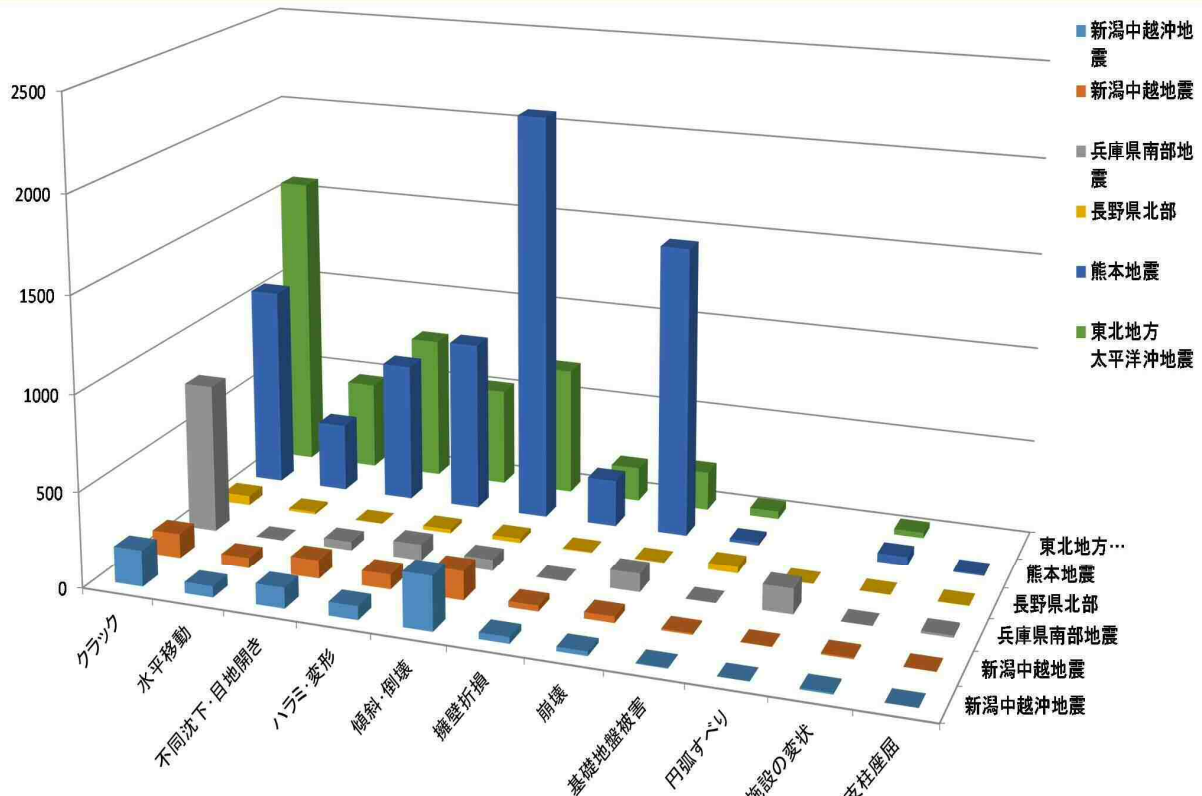
✓ 被災宅地擁壁の高さは、全体的に3m以下の擁壁79%が被害を受けており、**高さ1mを超えると危険度大のものも多くなっている。**

# 熊本地震と過去の地震との比較



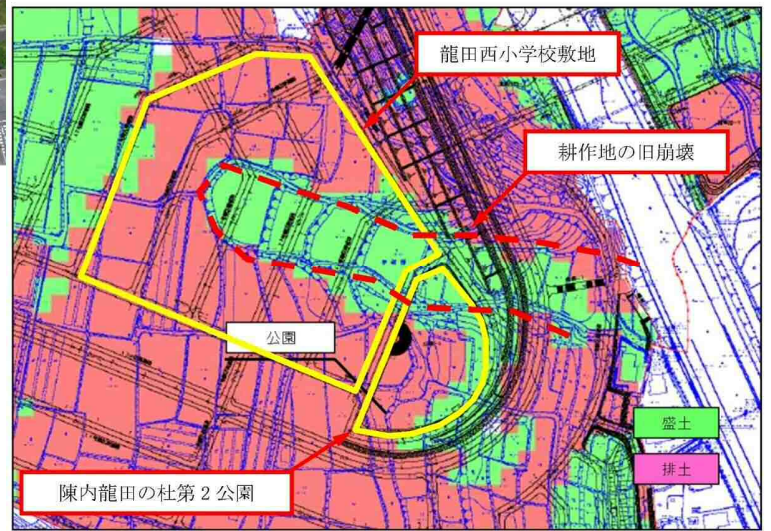
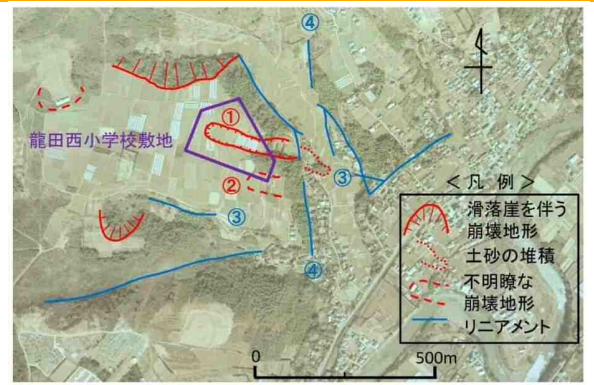
✓ 熊本地震と過去の地震の比較では、**空石積擁壁が非常に多い**。

# 被害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**。

# 大規模な石積擁壁被害の事例



71

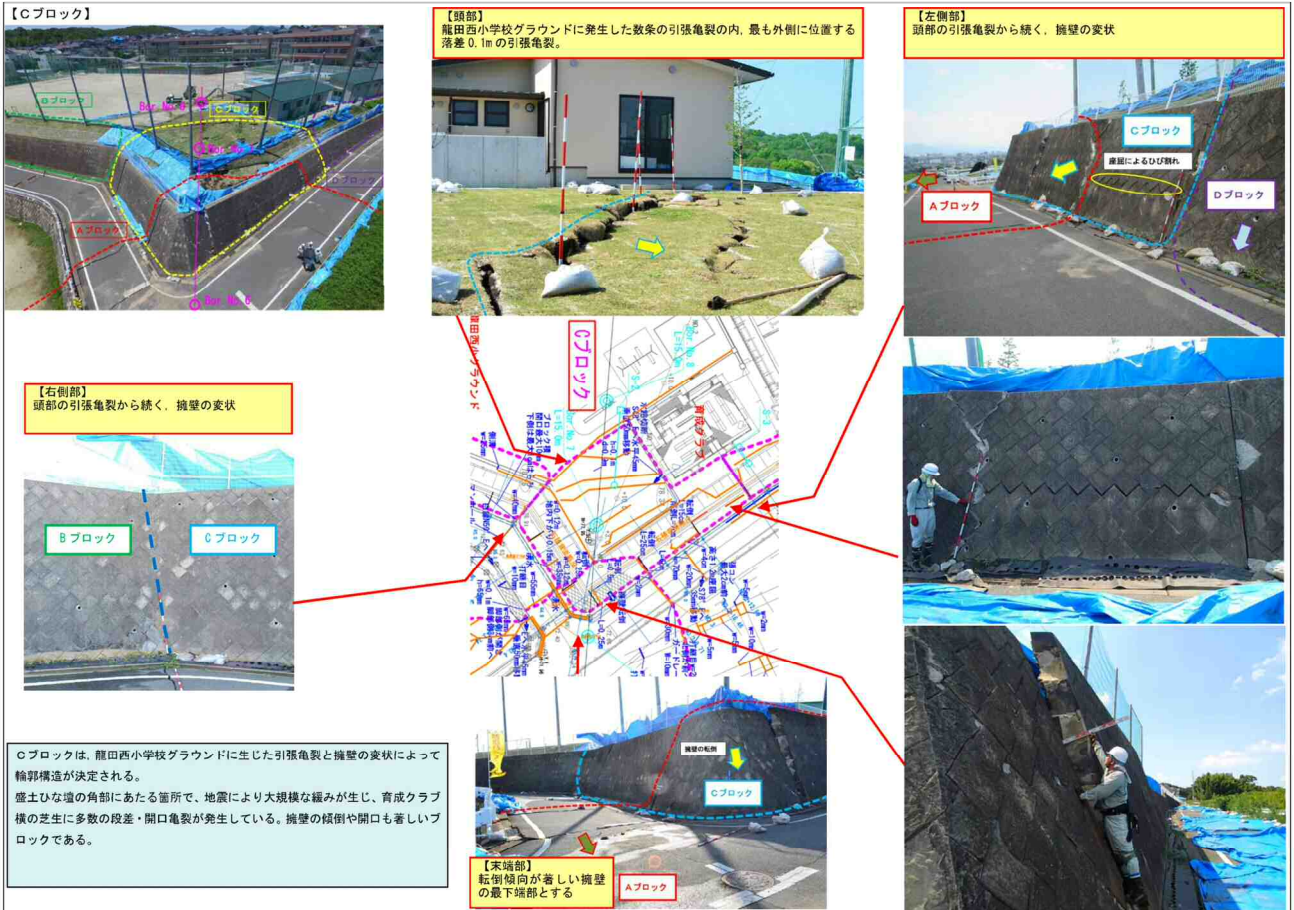
## Bブロックの踏査平面図

【Bブロック】

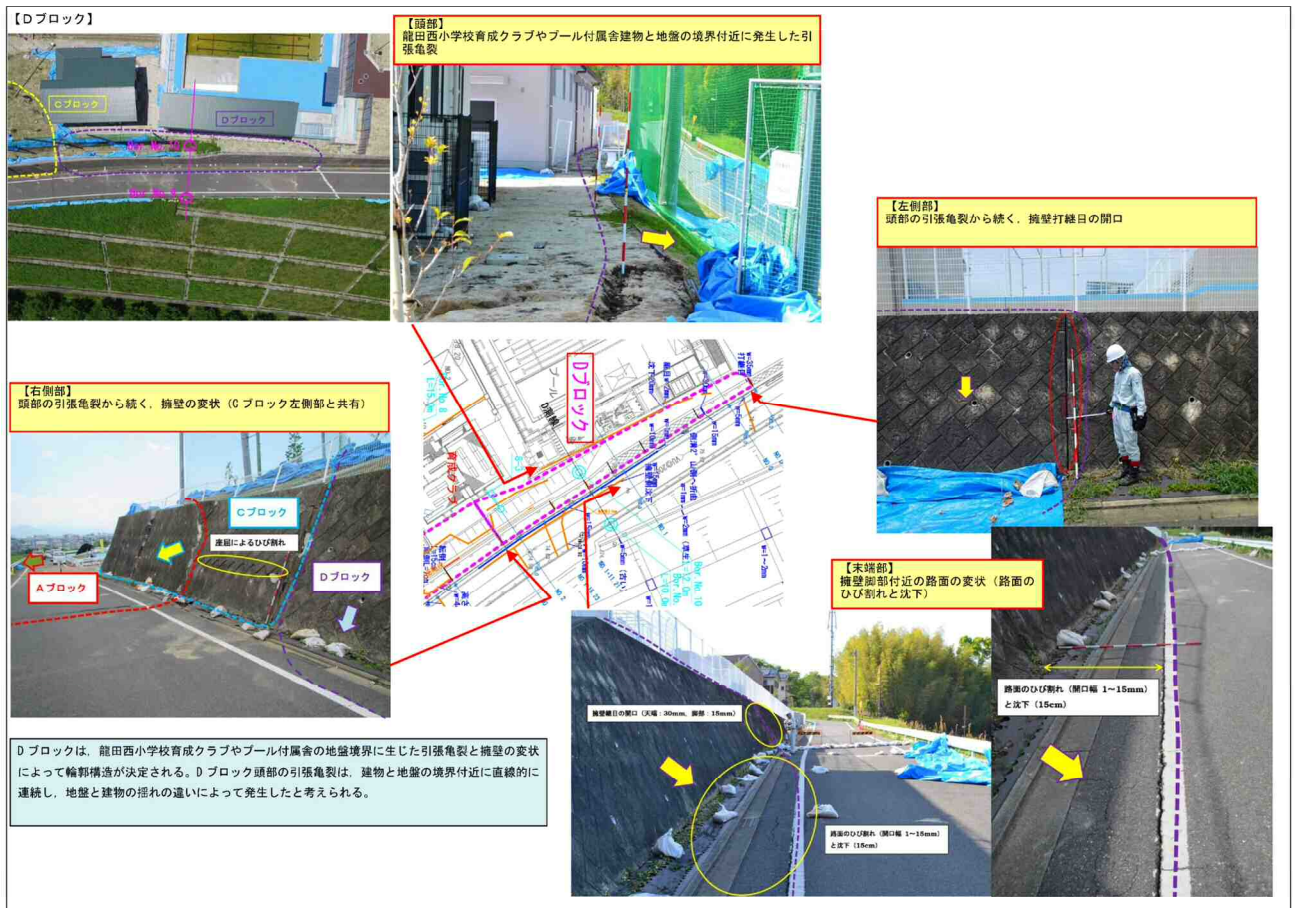
Bブロックは盛土ひな壇の緩みを生じたブロックであり、擁壁背面土の緩みにより肩部フェンス工の変状、擁壁目地の緩み、間知ブロックの緩みおよびクラックが確認されるブロックである。

72

# Cブロックの踏査平面図



# Dブロック踏査平面図



## 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。

