

## 城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会

2020年度活動報告および  
2021年度活動計画

**委員長：国土館大学理工学部 橋本 隆雄**

※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。

1

## 研究小委員会組織及び活動概要

- ◆ 委員長：橋本隆雄    ◆ 副委員長：宮島昌克
- ◆ 幹事長：池本敏和    ◆ 副幹事長：岩津雅也
- ◆ **オブザーバー：文化庁文化資源活用課震災対策部門 文化財調査官他**
- ◆ 委員数：57名（2021年3月31日時点）
- ◆ 期 間：2017年4月～2022年3月（5年0ヶ月：コロナ禍のため1年延長）

### ◆活動概要

城郭石垣の研究者及び技術者を集めて、熊本城をモデルとして、過去の崩壊履歴も含めた大規模な崩壊跡の現場調査から崩壊メカニズムを把握し、調査（探査）・実験・解析により具体的な耐震診断方法及び耐震補強対策の策定を行う。WGは調査（探査）、実験、解析、施工の4つあり、委員会で情報交換しながら活動している。

2

## 委員会活動の目的

- ▶熊本地震では、熊本城の全石垣面積の約7万9,000平方メートルのうち、全体の約3割に当たる50カ所の約2万3,600平方メートルで石垣が崩落等を生じた。
- ▶しかし、熊本城壁石垣の修復は、元の通りに復元することが重視されているため、修復箇所が地震により再崩落する恐れがある。今後の大地震が危惧される中、文化・歴史遺産である城壁の外観を損なわずに耐震性を向上させる補強を行うことが必要である。



- ▶そこで、城郭石垣の研究者及び技術者を招集し、熊本城をモデルとして、過去の崩壊履歴も含めた大規模な崩壊跡の現場調査からメカニズムを把握し、探査・実験・解析により具体的な修復方法及びマニュアルの策定を行う。

3

## 2020年度の活動(1)

### 1) 委員会・WG活動等

※印は、見学ならびに合同もしくは他WGに参加した活動

- ・第1回WG：4月30日 オンライン(Zoom)8名参加（熊本城百間石垣補強対策に関する検討）
- ・第2回WG：5月12日 検証試験 7名参加（伝建地区石垣補強対策）※
- ・第3回WG：5月18日 オンライン(Zoom) 4名参加（熊本城地盤解析に関する検討）
- ・第4回WG：6月4日 オンライン(Zoom)12名参加（文化庁石垣調査・補強に関する検討）
- ・第5回WG：6月10日 検証試験 7名参加（伝建地区石垣補強材料試験）※
- ・第6回WG：6月15日 オンライン(Zoom) 4名参加（熊本城地震動解析打合せ）
- ・第7回WG：6月16日 オンライン(Zoom) 12名参加（熊本城構造WG打合せ）
- ・第8回WG：6月22日 オンライン(Zoom)8名参加（伝建地区石垣補強材料試験結果打合せ）※
- ・第9回WG：7月2日 検証試験 20名参加（石垣補修・補強技術協会について）※
- ・第10回WG：7月10日 オンライン(Zoom) 4名参加（熊本城地震動解析打合せ）
- ・第11回WG：7月13日 検証試験 8名参加（伝建地区石垣補強注入材検証）※
- ・第12回WG：7月16日 国士舘大学検証試験10名参加（伝建地区石垣補強注入材再検証）

## 2020年度の活動(2)

※印は、見学ならびに合同もしくは他WGに参加した活動

- ・第13回WG：7月17日 オンライン(Zoom) 12名参加(熊本城構造WG打合せ)
- ・第14回WG：7月20日 オンライン(Zoom) 4名参加(熊本城地震動解析打合せ)
- ・第15回WG：7月31日 松本城現地調査 10名参加(松本市・文建協・国土館打合せ)
- ・第16回WG：8月12日 オンライン(Zoom) 5名参加(熊本城示力線解析)
- ・第17回WG：8月14日 オンライン(Zoom) 5名参加(熊本城示力線解析結果)
- ・第18回WG：8月16日 オンライン(Zoom) 6名参加(伝建地区石垣補強現場施工計画) ※
- ・第19回WG：8月19日 オンライン(Zoom) 6名参加(熊本城構造WG打合せ)
- ・第20回WG：8月24日 日鐵建材 8名参加(防災科研報告打合せ)
- ・第21回WG：9月1・2日 松本城現地調査 10名参加(松本市・文建協・国土館打合せ)
- ・第22回WG：9月3日 オンライン(Zoom) 幹事会議 4名参加  
(委員会開催及び活動方針に関する審議)
- ・第23回WG：9月5日 オンライン(Zoom) 幹事会議 8名参加(静岡県焼津市花沢地区施工実験打合せ) ※
- ・第24回WG：9月14日～16日 現地調査 7名参加(彦根城, 静岡県焼津市花沢地区)
- ・第1回委員会：9月9日 オンライン(Zoom) 18名参加(委員会開催及び活動方針に関する審議)

5

## 2020年度の活動(3)

※印は、見学ならびに合同もしくは他WGに参加した活動

- ・2020年度熊本城構造WG会議10月12日 オンライン(Zoom) 参加  
(熊本城診断指針・解析結果に関する審議)
- ・第25回WG：10月13日～15日 現地施工1 (静岡県焼津市花沢地区) ※
- ・第26回WG：10月29日～30日 現地施工2 (静岡県焼津市花沢地区)
- ・第27回WG：11月5日 日鐵建材 5名参加(静岡県焼津市花沢地区施工実験結果打合せ) ※
- ・第28回WG：11月18日 オンライン(Zoom)8名参加(模型実験報告, 浜松城対応打合せ) ※
- ・第29回WG：11月30日 オンライン(Zoom)7名参加(解析WG：防災科研実験構造解析)
- ・第30回WG：11月30日 日鐵建材6名参加(静岡県焼津市花沢地区施工実験結果打合せ) ※
- ・第31回WG：12月2日 国土館大学 6名参加(模型実験・打合せ) ※
- ・第32回WG：12月5日 国土館大学 4名参加(模型実験・打合せ) ※
- ・2020年度熊本市合同会議12月9日 オンライン(Zoom)15名参加(熊本城復旧指針の審議)
- ・第33回WG：12月17日 日鐵建材(静岡県焼津市花沢地区施工実験結果打合) ※
- ・第34回WG：12月18日 オンライン (zoom) 14名参加(解析WG 打合)

6

## 2020年度の活動(4)

※印は、見学ならびに合同もしくは他WGに参加した活動

- ・第35回WG：12月9・10日 現地調査（三重県城郭石垣調査・打合）※
- ・第36回WG：12月20・21日 （静岡県浜松城調査・打合）予定 → 延期
- ・2020年度熊本城構造WG会議12月24日 オンライン(Zoom)（熊本城診断指針に関する審議）
- ・第37回WG：2月15日 オンライン（zoom）5名参加（石垣補強施工試験打合）※
- ・第38回WG：2月19日 （石垣試験施工見学）※
- ・第39回WG：2月22日 オンライン(zoom)(熊本城，静岡県焼津市花沢地区，三重県城郭石垣・調査対応打合せ)※
- ・第40回：3月5日 オンライン(zoom) 4名参加(熊本城石垣被害要因解析)
- ・第41回：3月8日 オンライン(zoom) 5名参加(熊本城石垣被害要因解析)
- ・第42回WG：3月10日 日鉄建材(石垣試験施工見学)※
- ・2020年度43回WG：3月12日 オンライン(zoom) 4名参加(熊本城石垣耐震性能の検証)
- ・第44回WG：3月17日 日鉄建材(石垣試験施工見学)※
- ・第45回WG：3月30日 オンライン(zoom)7名参加(姫路城，静岡県焼津花沢地区，三重県城郭石垣・調査対応打合せ)

7

## 2020年度の活動(5)

### 2) 行事等

特になし

### 3) 出版物等

特になし

### 4) 小委員会活動補助費決算報告

配分額：200,000円

支出報告（使途，支出額）

使途：彦根城及び静岡県焼津市現地視察交通費精算（若手中心），支出額：198,339円

8

## 2021年度の活動計画

### 1) 委員会・WG活動等の予定

委員会2-3回/年，WG随時，

8月下旬ごろ：金沢大学動的振動台実験見学予定

9月中旬ごろ：松本城見学会の開催予定（若手中心に現地視察交通費補助予定）

### 2) 行事等の予定

行事名：「城郭石垣等の耐震診断・補強に関するシンポジウム」

開催時期：2022年3月頃予定

開催場所：土木学会大講堂（オンライン含む）

9

## 研究内容

### (1) 被害調査WG

石垣の**地震被害事例の調査・分析**

### (2) 非破壊探査WG

石垣の**非破壊検査手法の確立**

### (3) 実験WG

各種補強対策を施した石垣の**モデル実験による検証**

### (4) 解析WG

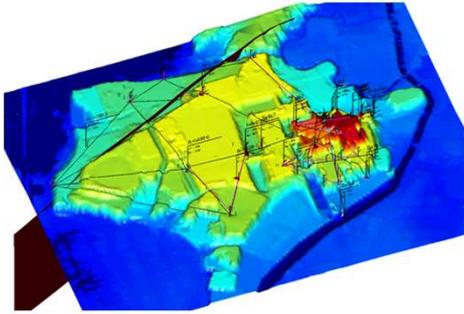
被害事例及び各種補強対策を施した石垣の**解析による検証**

### (5) 施工WG

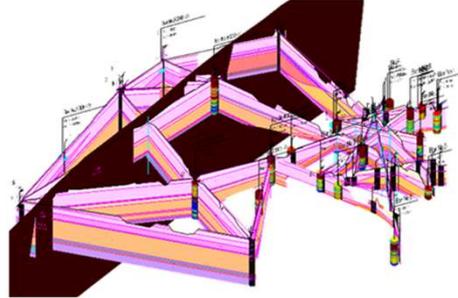
石垣の**補修・補強対策の開発**

10

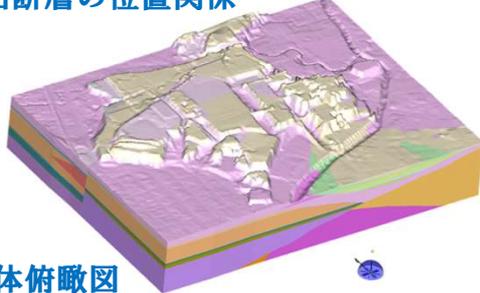
## 熊本城地盤の3次元空間の推定



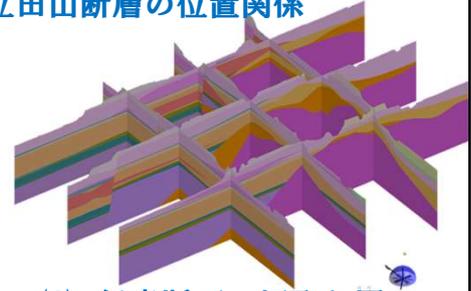
(a) 地形図と立田山断層の位置関係



(b) 地層分布と立田山断層の位置関係

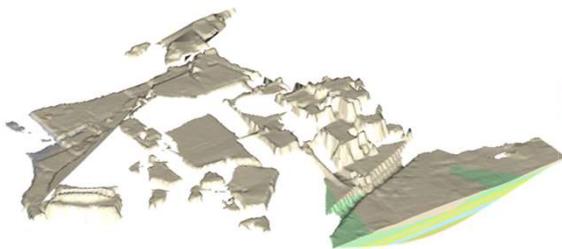


(c) 3次元全体俯瞰図

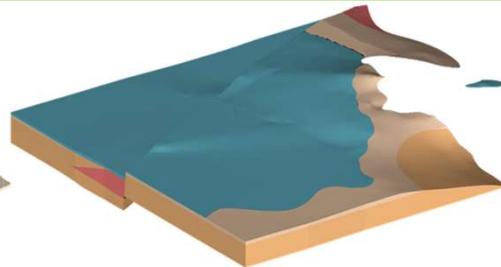


(d) 任意断面の切取り図

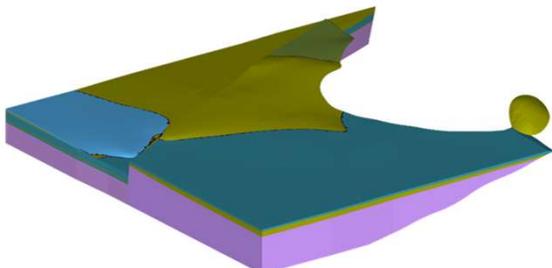
## 地層分布図



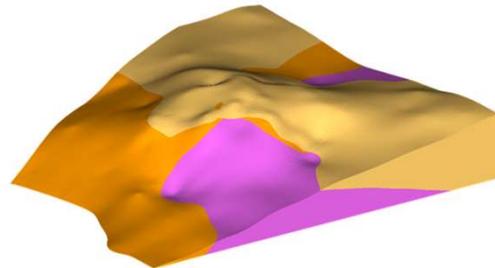
(a) 完新統の地層分布図



(b) 阿蘇3火砕流堆積物の地層分布図



(c) 砥川溶岩および洪積層の地層分布図

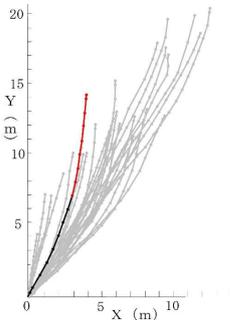


(d) 金峰山古期火山噴出物の地層分布図

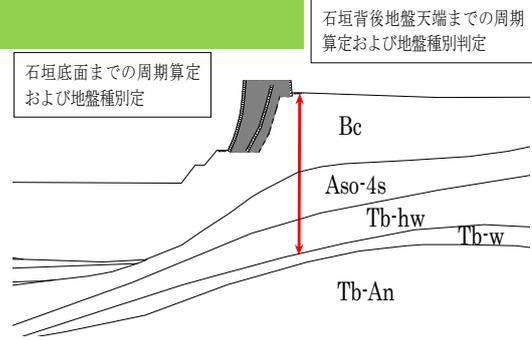
# 飯田丸五階櫓の解析条件



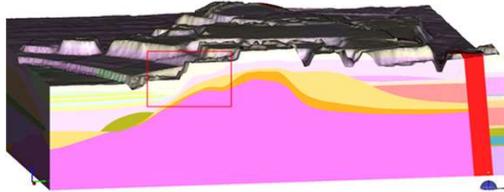
(a) 飯田丸五階櫓の被害状況



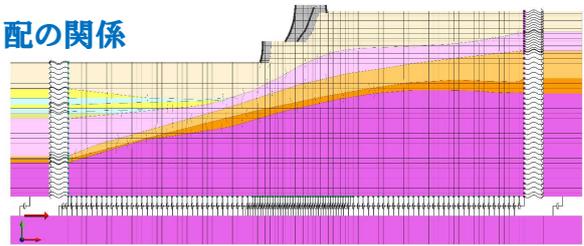
(b) 石垣の高さと勾配の関係



(c) 解析用工学的基盤面の位置



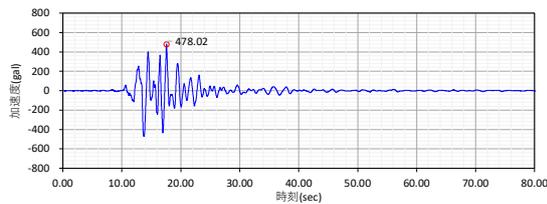
(d) 3次元地質モデルからの切取り断面



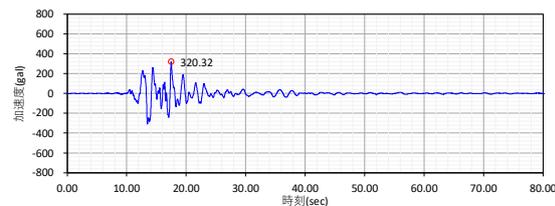
(e) 解析メッシュ図

13

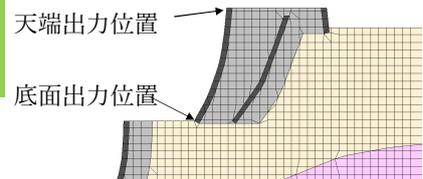
# 飯田丸五階櫓の応答加速度分布



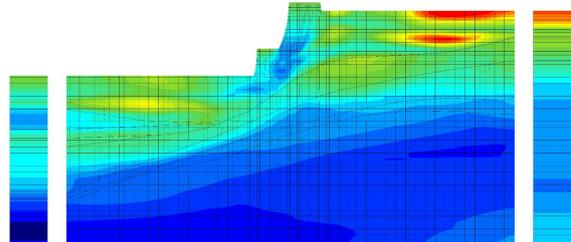
(a) 石垣天端の時刻歴応答加速度結果



(b) 石垣底面の時刻歴応答加速度結果



(c) 応答結果出力位置図



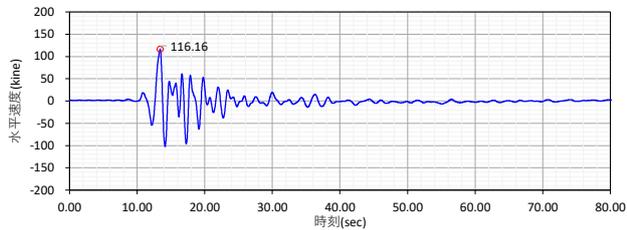
Fill Contour  
X方向加速度 2.4379 4.6168 6.7958

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

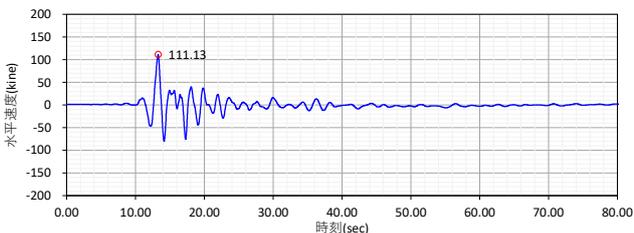
(d) 最大水平速度分布図

14

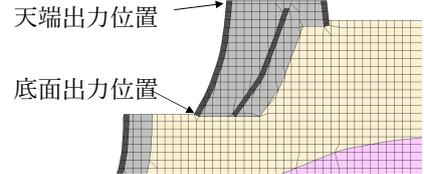
# 飯田丸五階櫓の応答速度分布



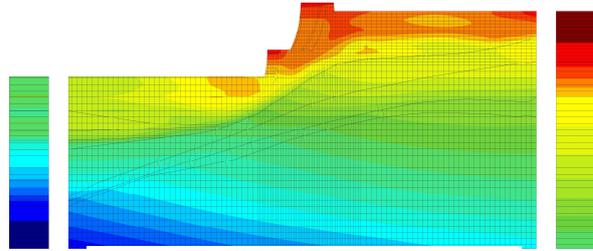
(a) 石垣天端の時刻歴応答速度結果



(b) 石垣底面の時刻歴応答速度結果



(c) 応答結果出力位置図

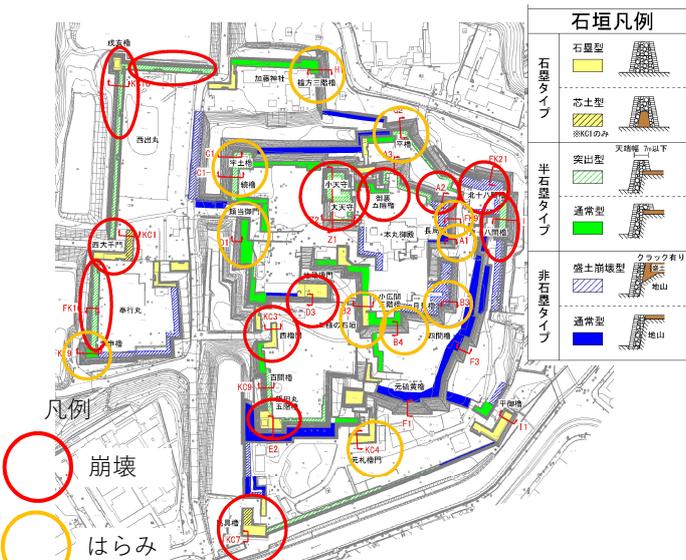


×方向速度 0.7273 0.9488 1.1702

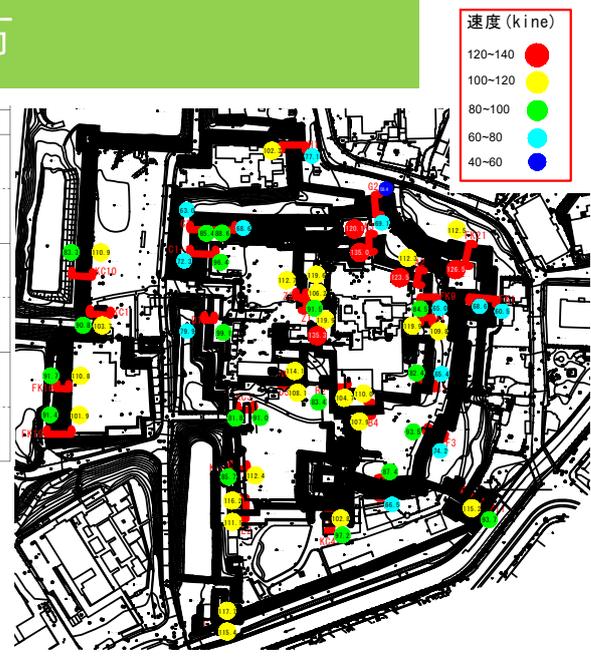
天端最大速度 (kine)	116.2
底面最大速度 (kine)	111.1
天端最大速度/底面最大速度	1.05

(d) 石垣における応答速度分布結果

# 熊本城石垣の応答速度分布

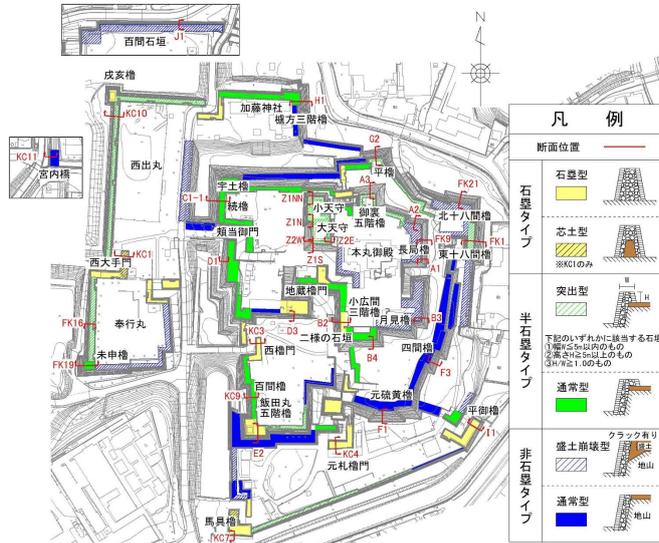


(a) 熊本地震による石垣崩壊状況

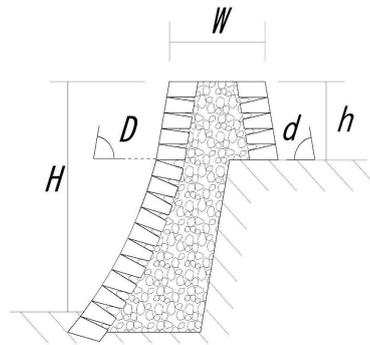


(b) 石垣における応答速度分布結果

# 熊本城の石垣タイプと形状



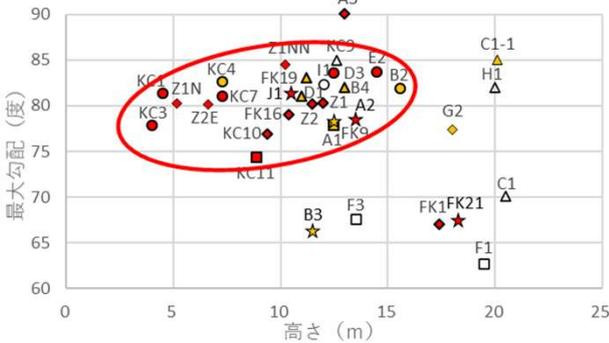
(a) 全石垣の断面位置



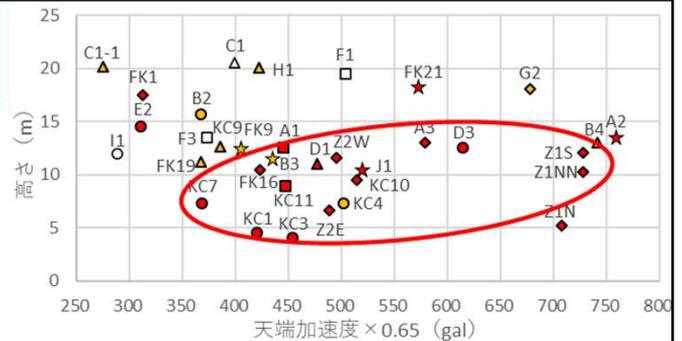
D:上部勾配 d:背後勾配 H:高さ  
h:背後高さ W:天端幅

(b) 石垣の各測定箇所 17

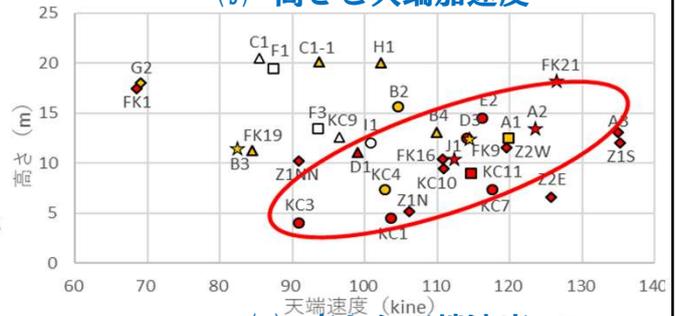
# 全石垣の被害分析結果



(a) 最大勾配と高さ

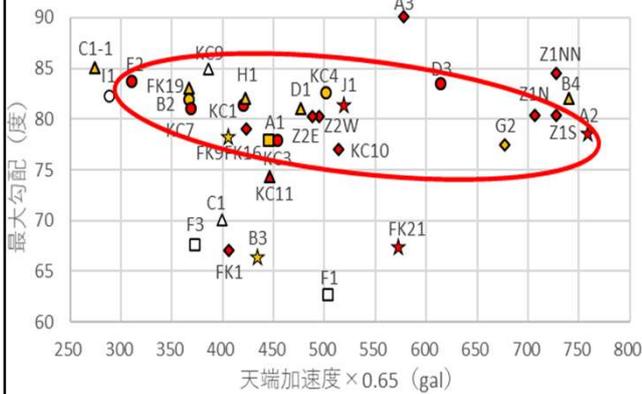


(b) 高さ と天端加速度

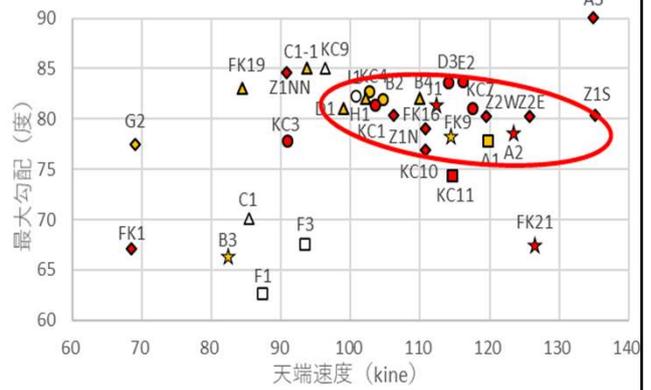


(c) 高さ と天端速度

# 全石垣の被害分析結果(2)

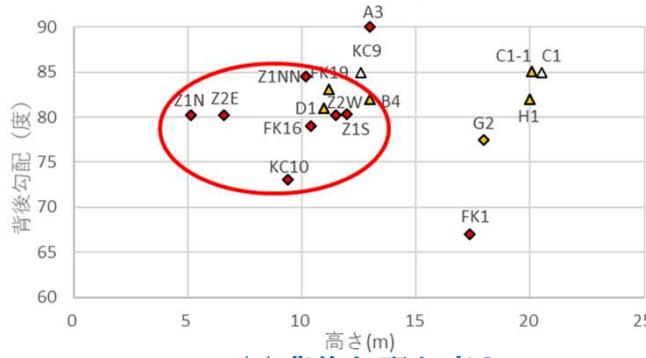
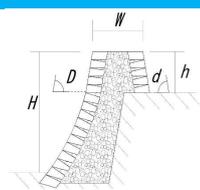


(d) 最大勾配と天端加速度

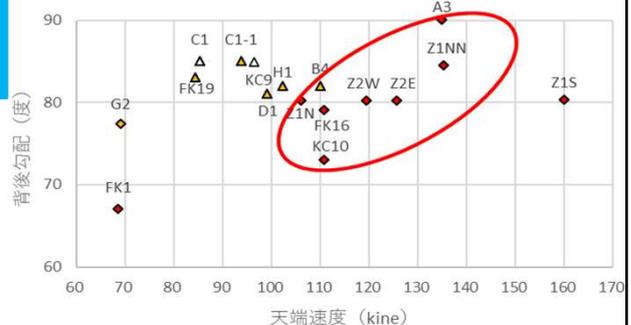


(e) 最大勾配と天端速度 <sup>19</sup>

# 半石塁の被害分析結果



(a) 背後勾配と高さ

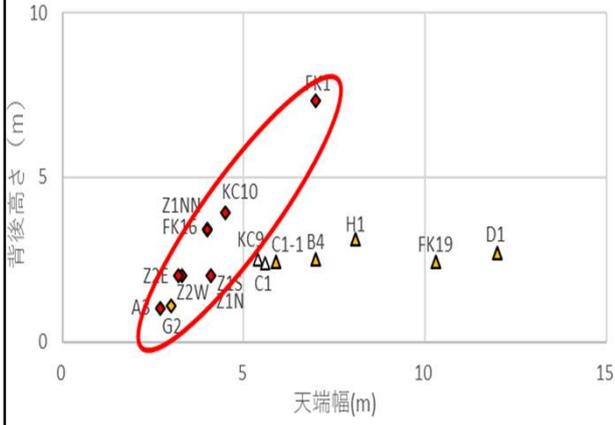
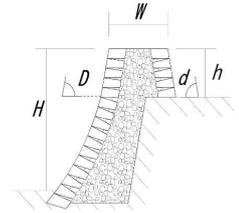


(b) 背後勾配と天端速度

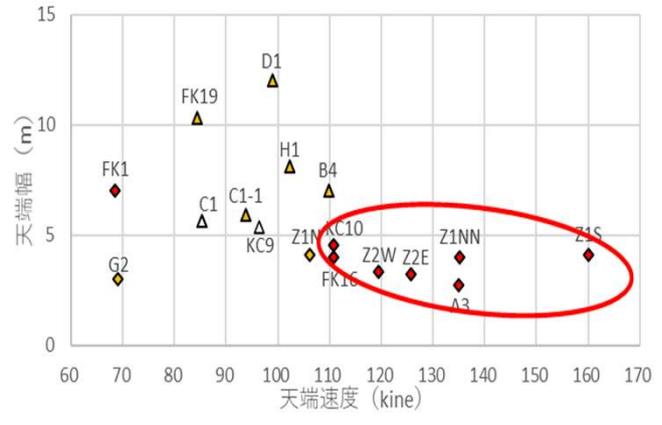


(c) 上部勾配と天端幅 <sup>20</sup>

# 半石塁の被害分析結果(2)



(d) 背後高さと天端幅

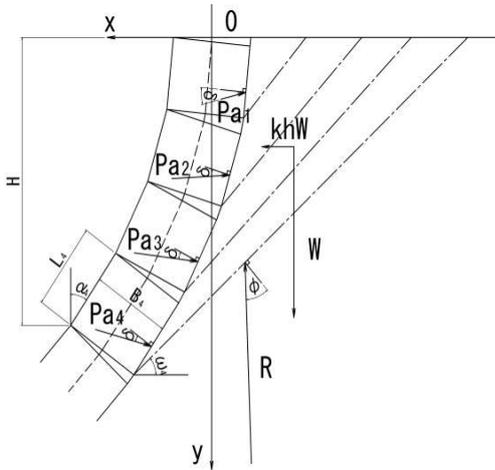


(e) 天端幅と天端速度

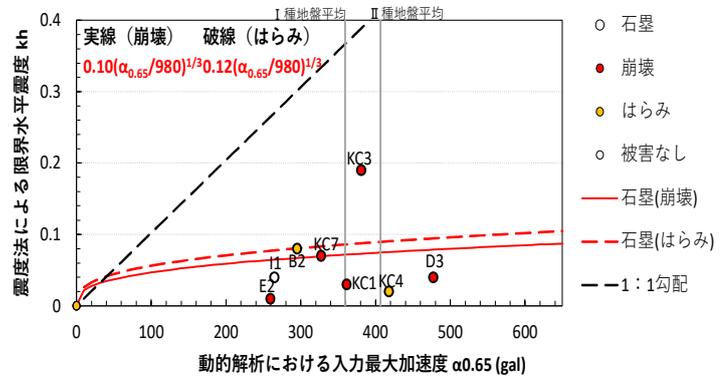
21

# 累積示力線法によるkhとgalの関係 石塁タイプ

石塁凡例	
石塁型	
芯土型	
※KC1のみ	



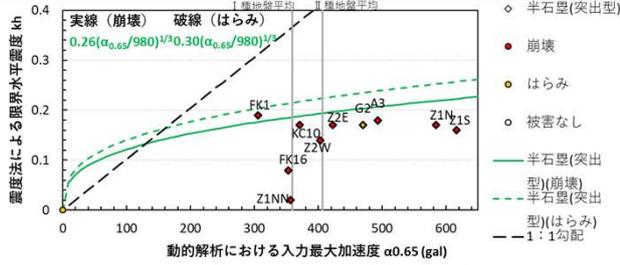
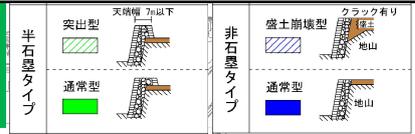
(a) 累積示力線法の計算方法



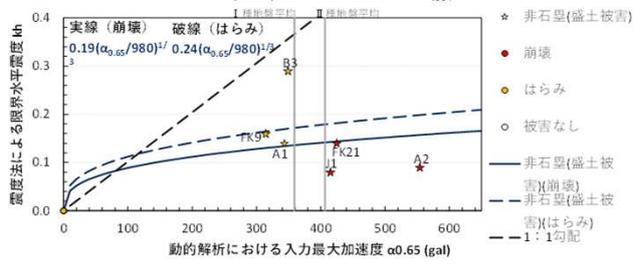
(b) 石塁タイプ石塁型

22

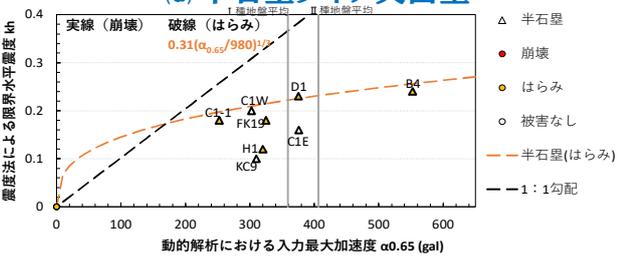
# 累積示力線法によるkhとgalの関係 半石罫・非石罫タイプ



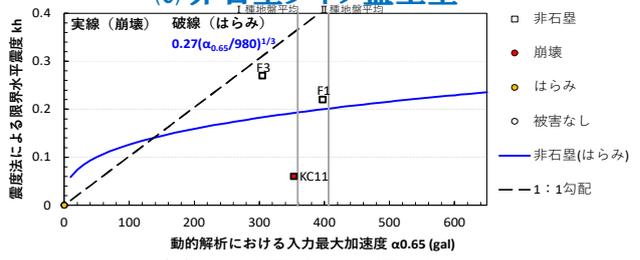
(a) 半石罫タイプ突出型



(c) 非石罫タイプ盛土型

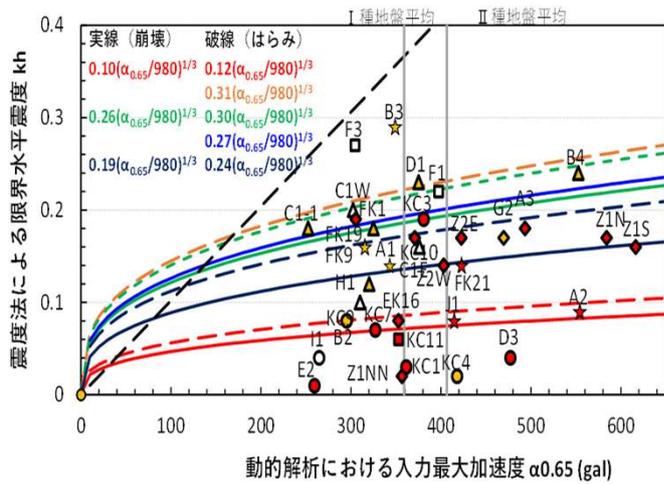


(b) 半石罫タイプ通常型



(d) 非石罫タイプ通常型

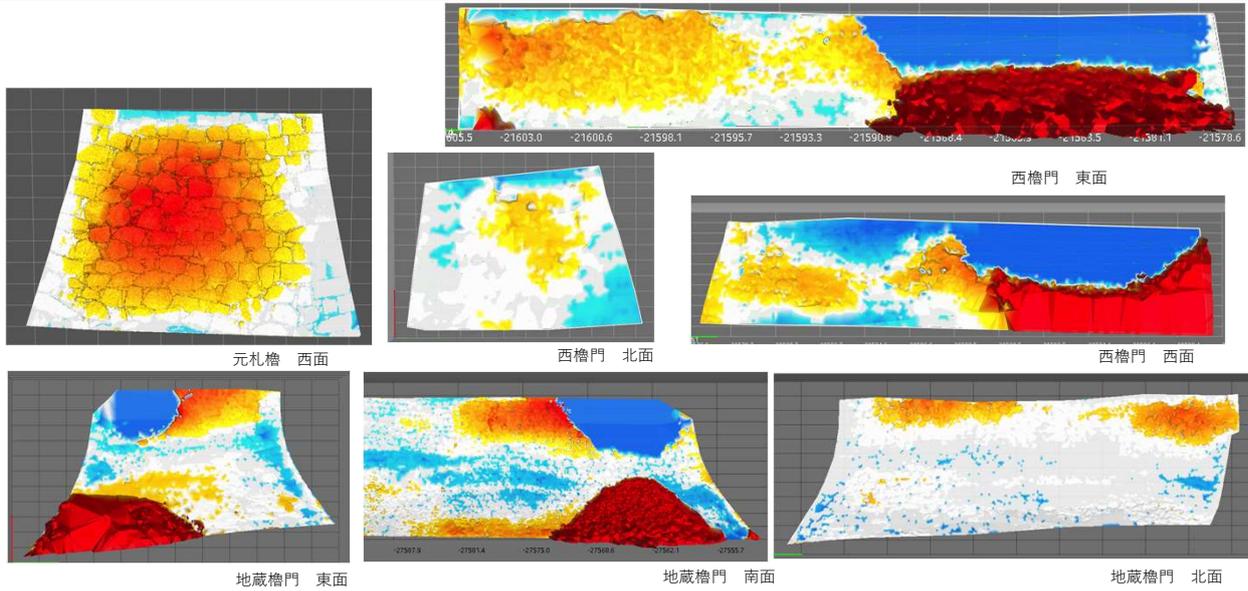
# 熊本城全域の累積示力線法によるkhとgalの関係



- 石罫
- △ 半石罫
- ◇ 半石罫(突出型)
- 非石罫
- ☆ 非石罫(盛土被害)
- 崩壊
- はらみ
- 被害なし
- 石罫(崩壊)
- - 石罫(はらみ)
- - 半石罫(はらみ)
- 半石罫(突出型)(崩壊)
- - 半石罫(突出型)(はらみ)
- - 非石罫(はらみ)
- 非石罫(盛土被害)(崩壊)
- - 非石罫(盛土被害)(はらみ)
- - 1:1勾配

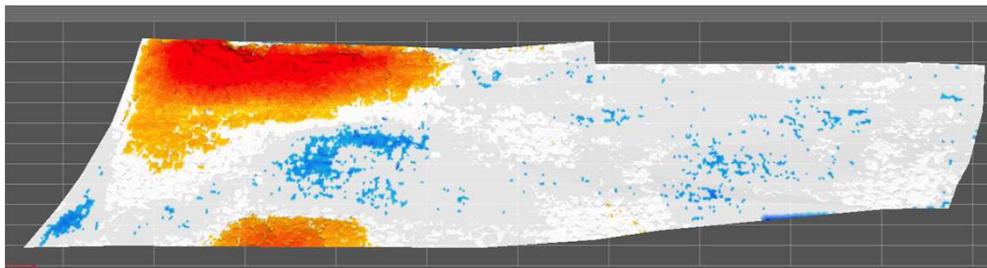
石垣凡例	
石罫タイプ	石罫型
	芯土型
半石罫タイプ	突出型
	通常型
非石罫タイプ	盛土崩壊型
	通常型

## 石墨タイプの変状解析

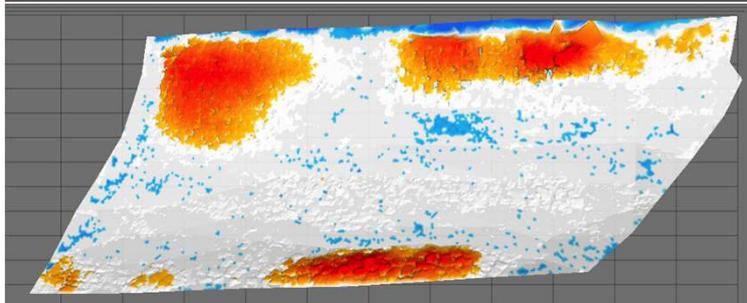


⇒石墨タイプは、全体的に孕みが大きく見られた

## 半石墨タイプ(突出型)の変状解析



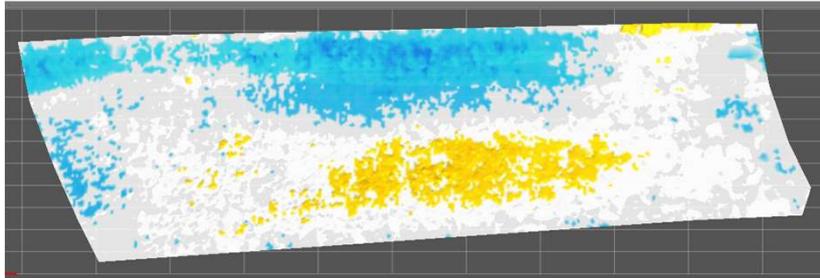
飯田丸平櫓



御裏五階櫓東側

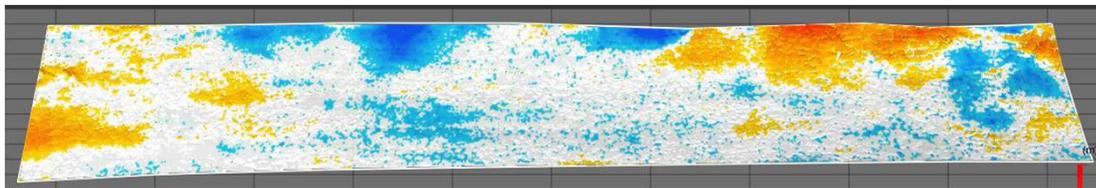
⇒通常型と比べより顕著に突出部分の孕みが確認された

## 非石墨タイプ(通常型)の変状解析



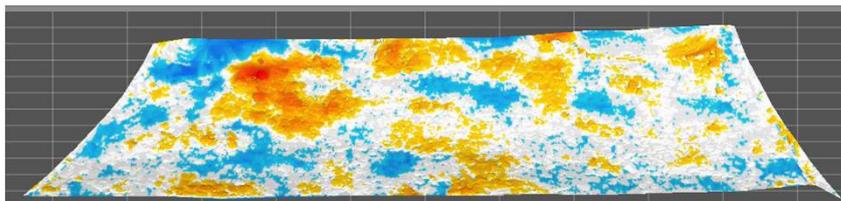
西竹之丸三階櫓

⇒上部が凹み下腹部に少し孕みが見られる  
宇土櫓の右側は、上の段に石垣があるため、影響を受けたのではないかと考えられる

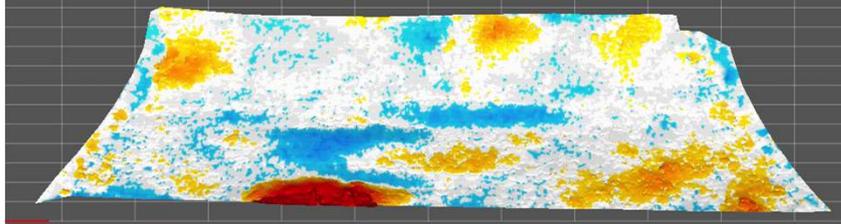


宇土櫓 北側

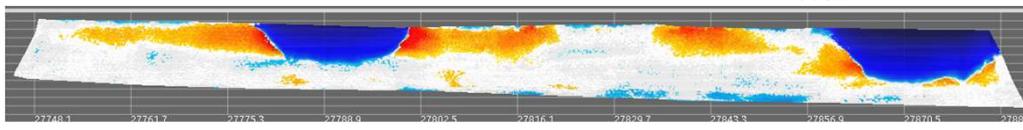
## 非石墨タイプ(盛土崩壊型)の変状解析



本丸御殿南東側



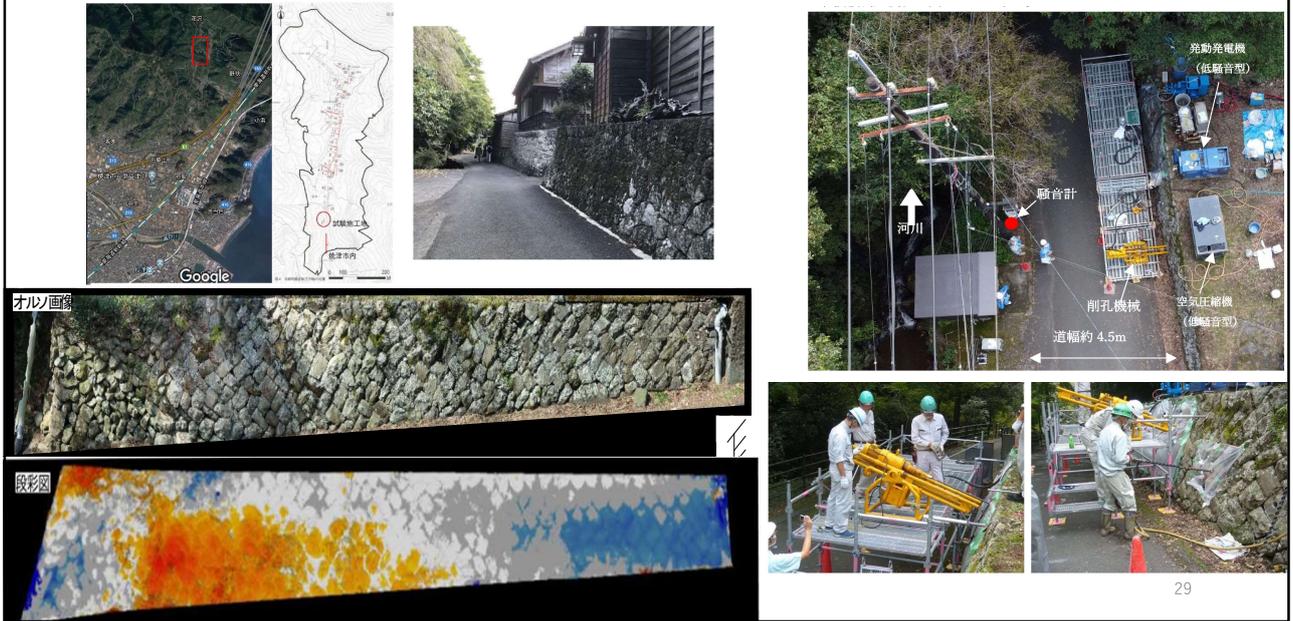
長局櫓



百間石垣

⇒本丸御殿南東側と長局櫓では、石垣全体に孕みが点在している  
百間石垣はすでに崩壊しており、上部に孕みが多く見られる結果となった

# 焼津市花沢伝建地区の補強対策施工実験



29



30