

城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会

令和3年度活動報告および活動終了報告

委員長：国士舘大学理工学部 橋本 隆雄

※文化庁及び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。

研究小委員会組織及び活動概要

- ◆ 委員長：橋本隆雄（国士舘大学） ◆ 副委員長：宮島昌克（金沢大学）
- ◆ 幹事長：池本敏和（金沢大学） ◆ 副幹事長：岩津雅也（フリー工業）
- ◆ **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。

2021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19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2回WG：4月23日 オンライン(Zoom)12名参加 (文化庁+熊本市熊本城構造WG打合せ)
- ・第3回WG：5月12日～13日 **熊本地震擁壁被害復旧対策現地調査**
5名参加 (現地調査+益城町・南阿蘇市打合せ)
- ・第4回WG：5月31日 オンライン(Zoom) 4名参加 (文化庁+熊本市熊本城構造WG打合せ)
- ・第5回WG：6月25日 国土館大学 模型実験6名参加 (ウレタン材料強度試験) ※
- ・第6回WG：6月29日 **横浜市ブラフ擁壁**打合せ※
6名参加 (横浜市ブラフ擁壁の補修・補強対策について) ※
- ・第7回WG：7月7日～8日 **静岡県焼津市花沢地区非破壊調査**※
10名参加 (伝建地区石垣補強のための3Dスキャン及び表面波探査+打合せ) ※
- ・第8回WG：7月14日 **横浜市ブラフ擁壁現地視察 6名参加 (横浜市と現地変状視察)** ※
- ・第9回WG：7月16日 オンライン(Zoom) 12名参加10名参加
(ウレタン試験検証試験打合せ) ※
- ・第10回WG：7月21日 日鐵建材+オンライン(Zoom) 8名参加 (伝建地区石垣補強対策打合せ) ※

2021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11回WG： 8月2日 オンライン(Zoom) 6名参加 (金沢大学模型実験計画打合せ) ※
- ・ 第12回WG： 8月3日 オンライン(Zoom) 4名参加 (ウレタン試験検証試験打合せ) ※
- ・ 第13回WG： 8月4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14回WG： 8月7日 オンライン(Zoom) 4名参加 (文化庁アンケート)
- ・ 第15回WG： 8月11日 オンライン(Zoom) 4名参加 (文化庁アンケート)
- ・ 第16回WG： 8月17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17回WG： 8月12日 オンライン(Zoom) 8名参加 (文化庁+熊本市熊本城構造WG打合せ)
- ・ 第18回WG： 8月17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19回WG： 8月20日 オンライン(Zoom) 6名参加 (金沢大学模型実験計画打合せ) ※
- ・ 第20回WG： 8月20日 オンライン(Zoom) 3名参加 (熊本城地盤解析に関する検討)
- ・ 第21回WG： 8月27日 オンライン(Zoom) 4名参加 (文化庁アンケート)
- ・ 第22回WG： 8月23～25日 横浜市ブラフ擁壁現地調査 6名参加 (横浜市現地変状調査) ※
- ・ 第23回WG： 9月2日 日鐵建材 8名参加 (伝建地区石垣補強対策打合せ) ※

2021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

- ・第24回WG：9月4日 オンライン(Zoom) 3名参加 (文化庁アンケート)
- ・第25回WG：9月6日 **松本城現地調査結果 10名参加 (松本市・文建協・国土館打合せ)**
- ・第26回WG：9月27日 オンライン(Zoom) 3名参加 (文化庁アンケート)
- ・第27回WG：9月27日 オンライン(Zoom) 4名参加 (文化庁WG打合せ)
- ・第28回WG：9月30日 オンライン(Zoom) 3名参加 (横浜市ブラフ擁壁調査打合せ) ※
- ・第29回WG：9月30日 オンライン(Zoom) 3名参加 (文化庁アンケート)
- ・第30回WG：9月30日 日鐵建材+オンライン(Zoom) 8名参加 (伝建地区石垣補強対策打合せ) ※
- ・第31回WG：10月7日 金沢大学+オンライン(Zoom) 8名参加 (金沢大学模型実験計画打合せ) ※
- ・第32回WG：10月13・14日 **岡山県倉敷矢掛町本陣石垣変状調査 10名参加 (矢掛町打合せ) ※**
- ・第33回WG：10月22日 オンライン(Zoom) 5名参加 (金沢大学模型実験中継視聴)

2021年度の活動(4)

- ・第34回WG：10月22日 オンライン(Zoom) 3名参加 (文化庁アンケート：3城資料整理・打合せ) ※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：10月25日 岡部 5名参加 (伝建地区住民説明会打合せ) ※
- ・第36回WG：10月30日 オンライン(Zoom) 5名参加 (伝建地区石垣補強対策打合せ) ※
- ・第37回WG：11月3日 **静岡県花沢伝建地区石垣補強対策住民説明会 40名参加**※
- ・第38回WG：11月15日 **松本城現地調査結果 10名参加 (松本市・文建協・国土館打合せ)**
- ・第39回WG：11月16・17日 岡山県倉敷矢掛町本陣石垣測量調査 5名参加※
- ・第40回WG：11月29日 オンライン(Zoom) 8名参加 (横浜市ブラフ擁壁実験打合せ) ※
- ・第41回WG：12月2日 **松本城及び牛伏フランス式石垣現地視察会 20名参加 (松本市打合せ)**
- ・第42回WG：12月3日 土木学会小委員会 12名参加 (シンポジウム打合せ)
- ・第43回WG：1月6日～8日 ブラフ擁壁振動実験 (金沢大学模型実験)
- ・第44回WG：1月24日 **ブラフ擁壁振動実験結果：8名参加 (金沢大学模型実験打合せ)**
- ・第45回WG：2月9日 オンライン(Zoom) 3名参加 (文化庁小峰城地盤解析打合せ) ⁶

2021年度の活動(5)

※印は、見学ならびに合同もしくは他WGに参加した活動

- ・ 第46回WG： 2月14日 日鐵建材+オンライン(Zoom) 8名参加 (伝建地区石垣補強対策打合せ)
- ・ 第47回WG： 2月17日 オンライン(Zoom) 2名参加 (伝建地区調査結果打合せ)
- ・ 第48回WG： 3月 9日 日鐵建材7名参加 (伝建地区石垣補強対策打合せ)
- ・ 第49回WG： 3月17日 **岡部9名参加 (石垣背面補強実験、打合せ)**
- ・ 第50回WG： 3月18日 オンライン(Zoom) 4名参加 (文化庁小峰城地盤解析打合せ)
- ・ 第51回WG： 3月23日 オンライン(Zoom) 4名参加 (文化庁小峰城地盤解析打合せ)

※印は、見学ならびに合同もしくは他WGに参加した活動

2021年度の活動(5)

2) 行事等 (オンラインを含む)

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2月22日

開催場所：土木学会大講堂およびオンライン

3) 出版物等

「城郭石垣等の耐震診断・補強に関する研究小委員会活動報告」 論文集

4) その他の企画等 (見学ならび合同含む)

静岡県焼津市花沢地区石垣補強対策住民説明会：11月3日※

松本城WG視察：12月2日

松江城WG視察：12月6日

松山城WG視察：12月14日

小峰城WG視察：1月17日

全国伝統的建造物群保存地区協議会研修会 (静岡県焼津市花沢地区)：12月16日

金沢大学ブラフ擁壁振動台実験：12月22・23日, 1月6・7日 (横浜市参加)

2021年度の活動(6)

5) 小委員会活動補助費執行状況報告

配分額：798,486円

**支出報告（使途、支出額）：198,486円 松本城及び牛伏フランス式石垣現地視察会旅費
：600,000円 「城郭石垣等の耐震診断・補強に関する研究小委員会活動報告」論文集
印刷及び関係 機関配布**

◆ 研究成果

・シミュレーションによる石垣崩壊メカニズムの把握や老朽化した石垣補強に関して具体的な対策を提案するに至る。

・**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2月22日

開催場所：土木学会大講堂およびオンライン

・**「城郭石垣等の耐震診断・補強に関する研究小委員会活動報告」論文集作成**

・**静岡県花沢伝建地区石垣補強対策住民説明会 40名参加：11月3日**

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

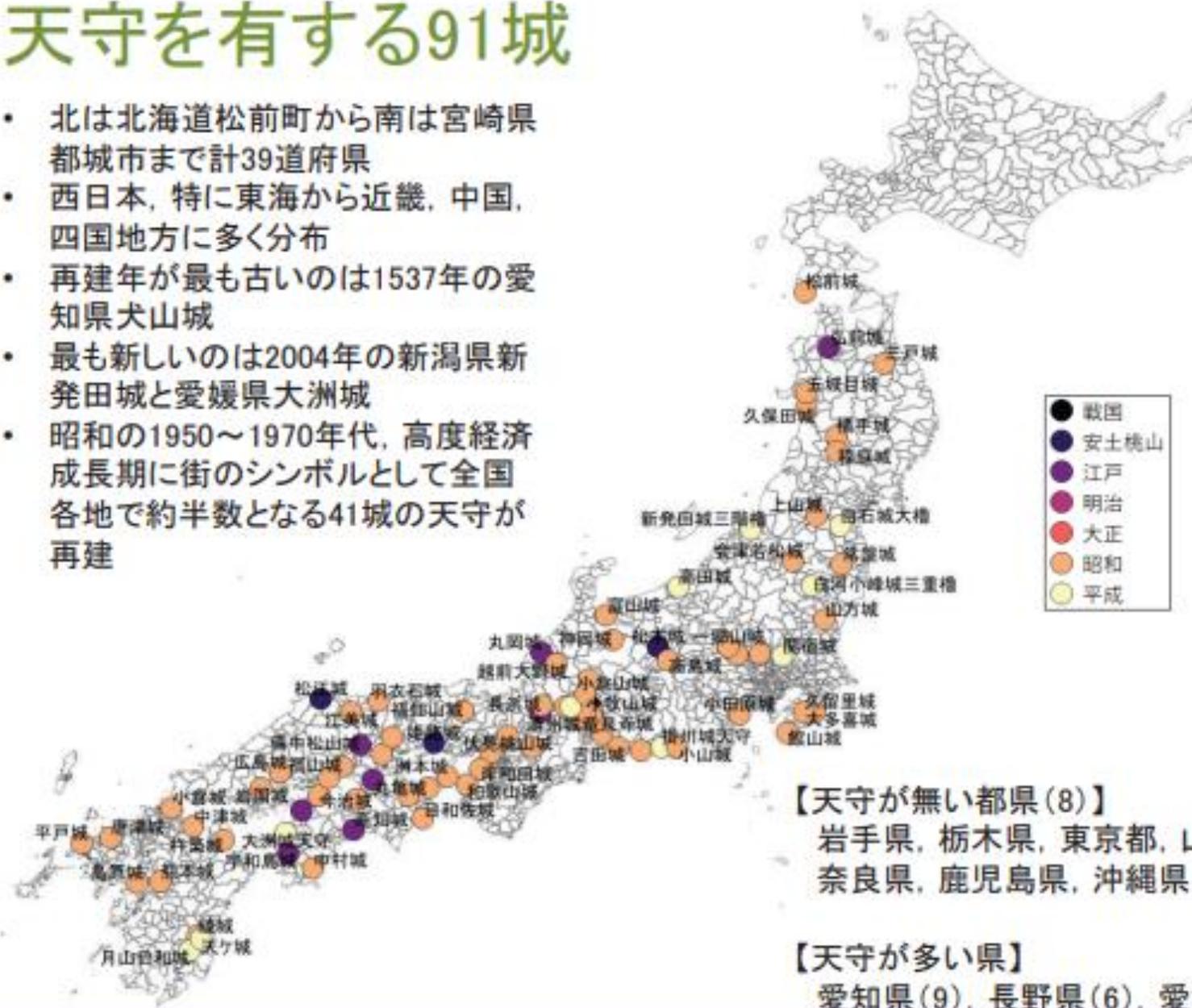
被害事例及び各種補強対策を施した石垣の**解析による検証**

(5) 施工WG

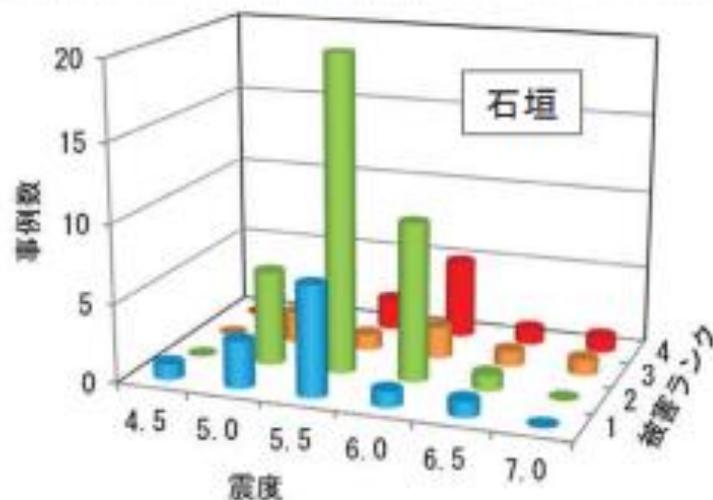
石垣の**補修・補強対策の開発**

天守を有する91城

- 北は北海道松前町から南は宮崎県都城市まで計39道府県
- 西日本, 特に東海から近畿, 中国, 四国地方に多く分布
- 再建年が最も古いのは1537年の愛知県犬山城
- 最も新しいのは2004年の新潟県新発田城と愛媛県大洲城
- 昭和の1950~1970年代, 高度経済成長期に街のシンボルとして全国各地で約半数となる41城の天守が再建



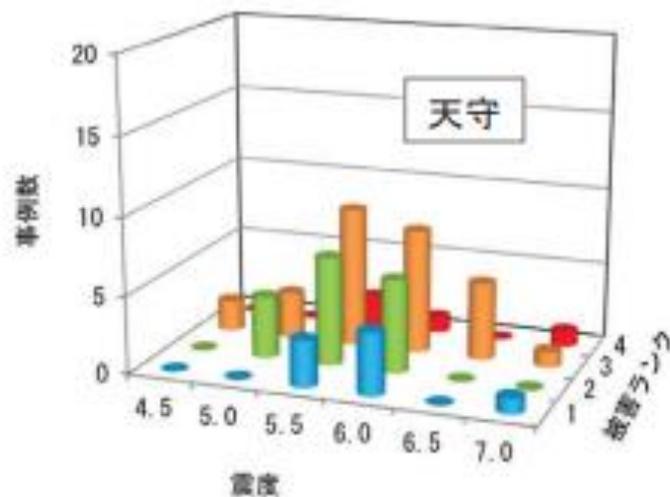
震度と被害ランクの関係



- 震度5.0(5強)以上で被害が発生し始める。
- 破損や崩れ等のランク2の被害は震度5.5(6弱)を境に増大



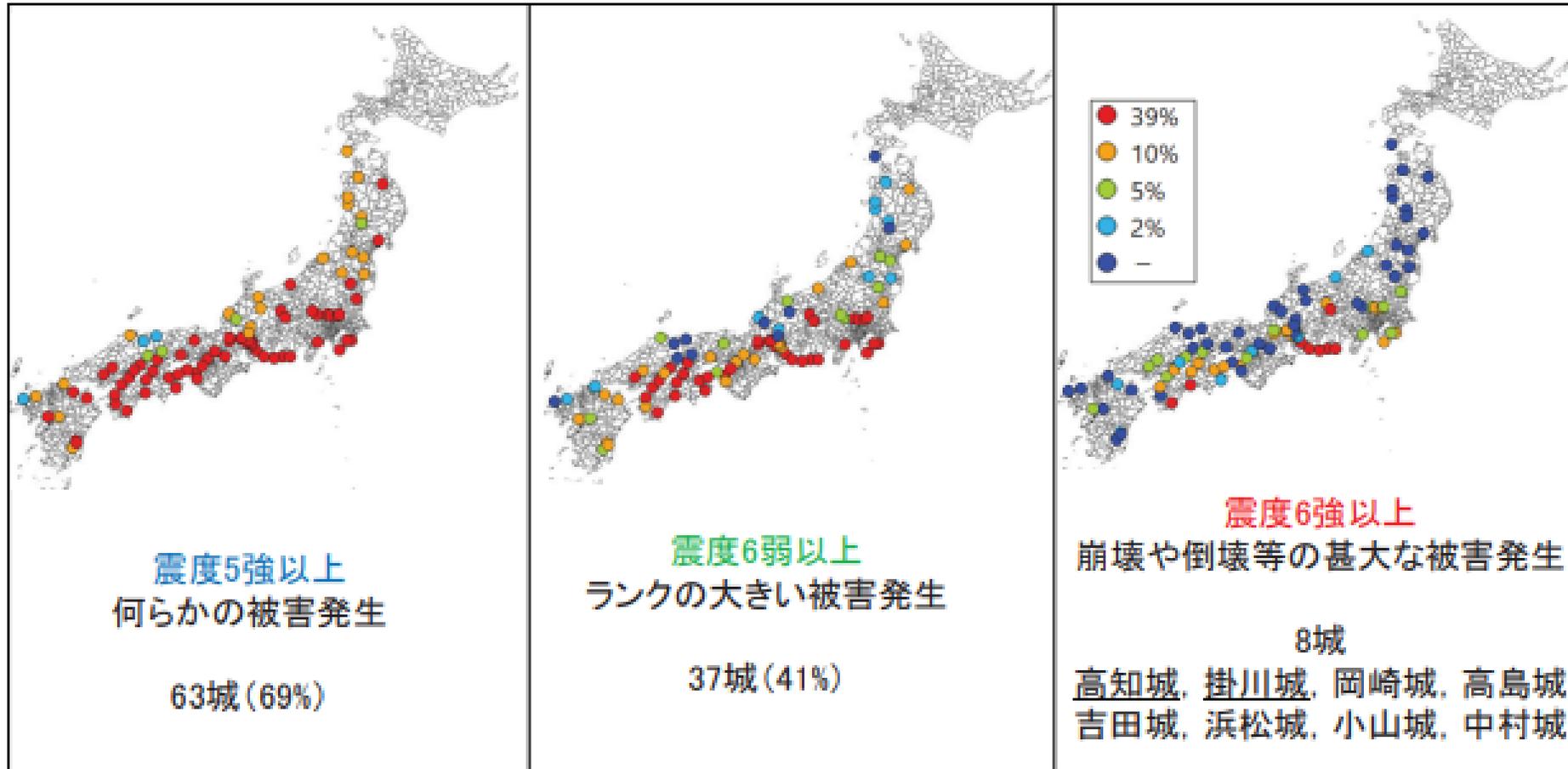
地震リスク評価では**震度5強**と**震度6弱**を閾値として使用



5弱	4.5 - 4.9
5強	5.0 - 5.4
6弱	5.5 - 5.9
6強	6.0 - 6.4
7	6.5以上

被害ランク	1	2	3	4
石垣	所々、多少 孕み、狂い	破損、崩れ	多し	悉く、残らず 大破
天守	所々、瓦落ち ひび割れ	破損、傾き 崩れ、潰れ	多し	悉く、全壊 大破

地震ハザード



確率論的地震動予測地図(2019年, 全ての地震, 平均ケース)において今後50年以内に任意の震度以上になる確率が2%, 5%, 10%, 39%となる城を色分けし, 再現期間101年に相当する39%の城●に着目

地震リスク

今後50年以内に
39%の確率で見舞
われる震度



● ランク1
● ランク2
● ランク3

ランク	1	2	3
震度	5弱以下	5強	6弱以上
リスク	被害なし	何らかの被害発生	ランクの大きい被害発生
該当数	28城	26城	37城

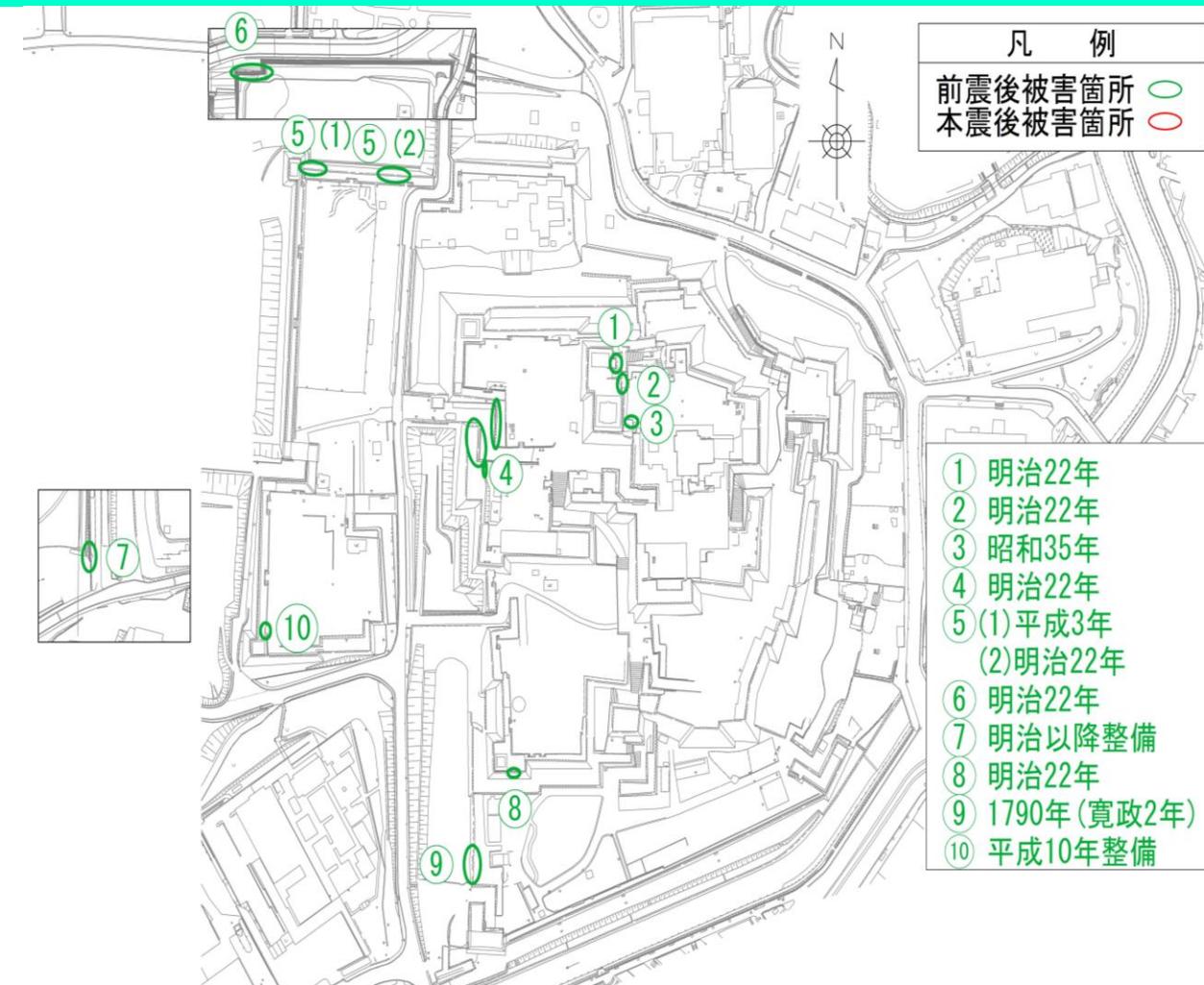
表層地盤増幅率



ランク	1	2	3
表層地盤増幅率	1.4未満	1.4以上2.0未満	2.0以上
リスク	やや低め	中程度から高め	高め
該当数	67城	19城	5城

- 両指標共にランク3は、大垣城、岡崎城、騎西城、墨俣城、館山城の5城で、昭和期に再建されたRC造ではあるが、想定される地震は震度6弱以上、表層地盤増幅率が2を上回るため被災する可能性は低い
- 木造である現存天守12城のうち5城が震度のランクが3で、かつ表層地盤増幅率がランク2となる高知城と彦根城が特に地震リスクが高い

熊本地震による石垣被害状況

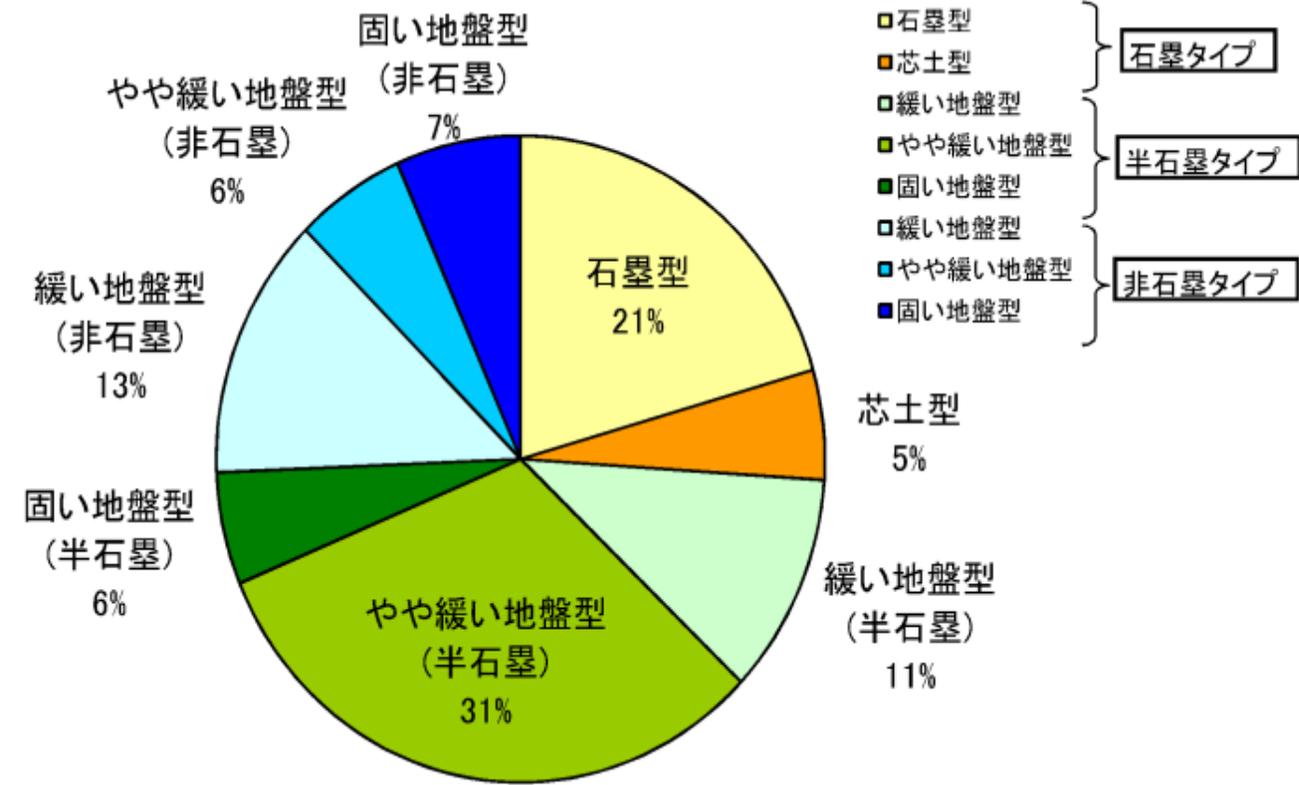


(a)前震

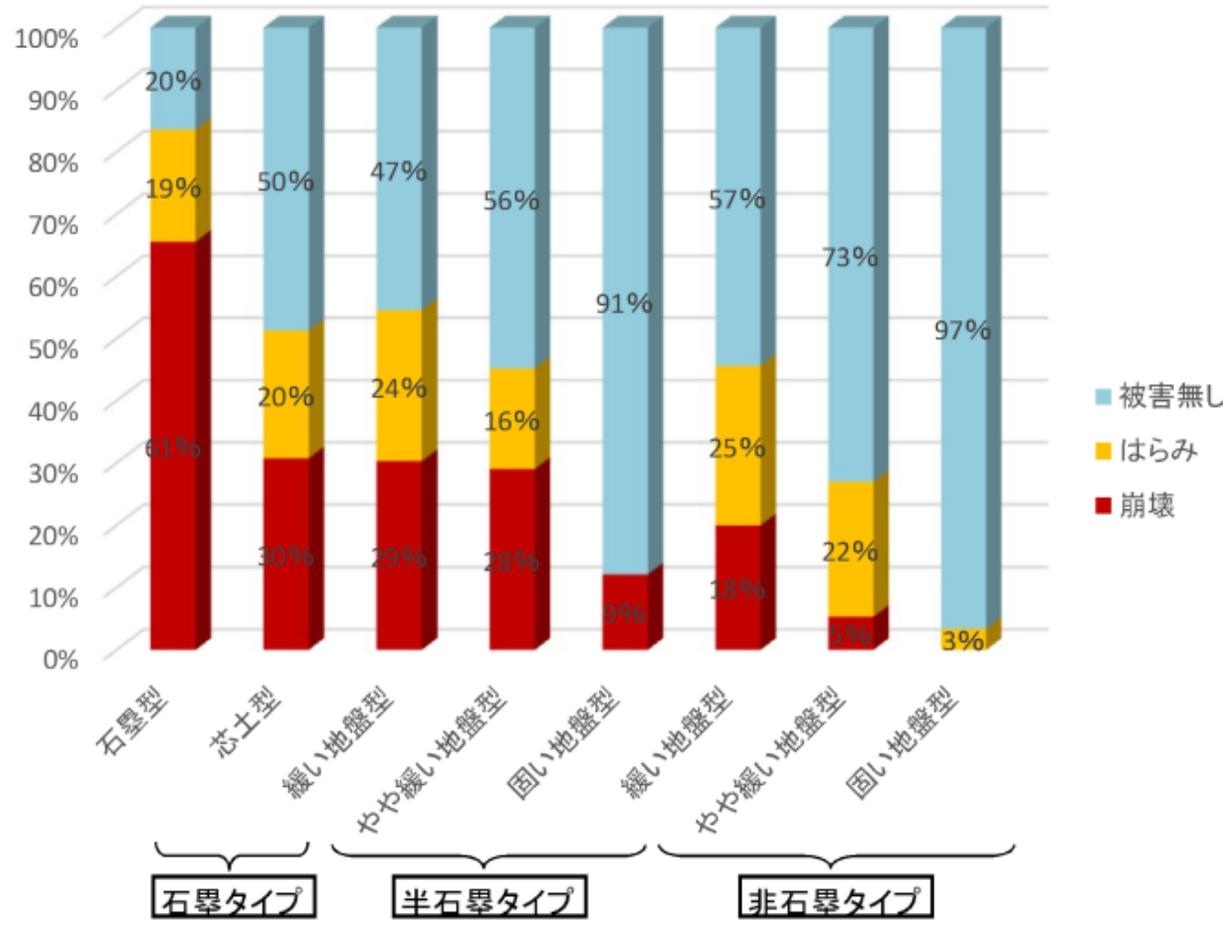


(b)前震+本震

石垣タイプ毎の被害程度の分析

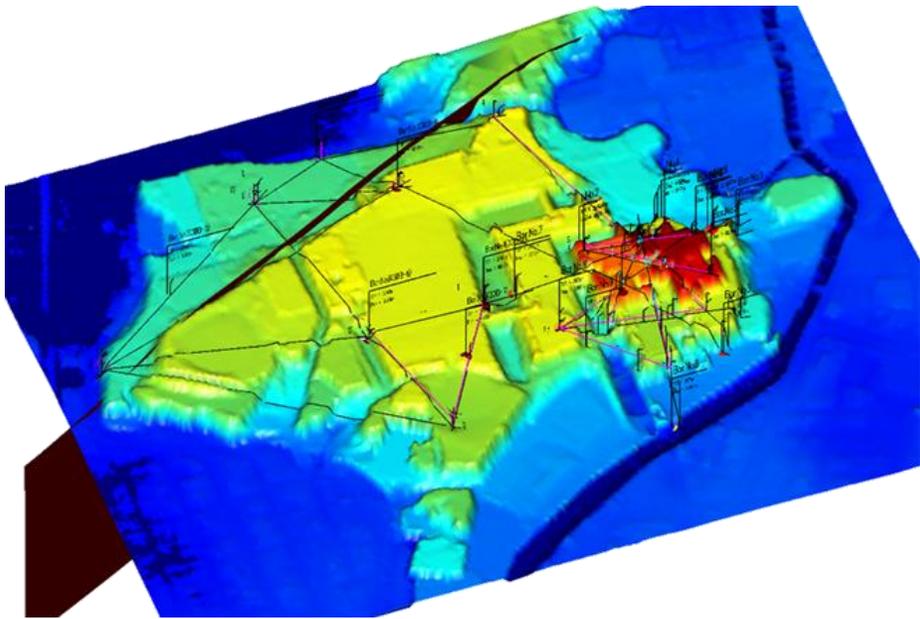


■ 石垣タイプ毎の分類

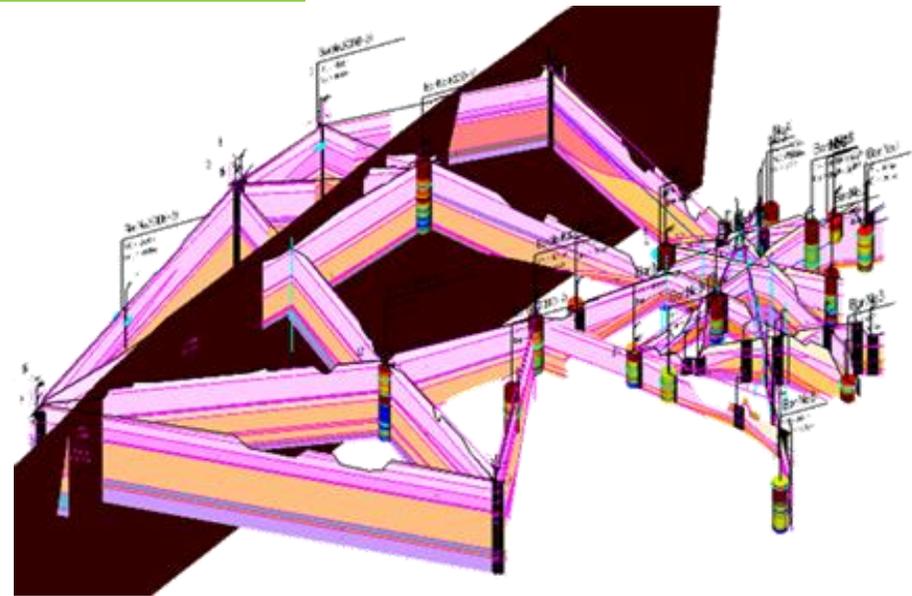


■ 石垣タイプ毎の被害程度の割合

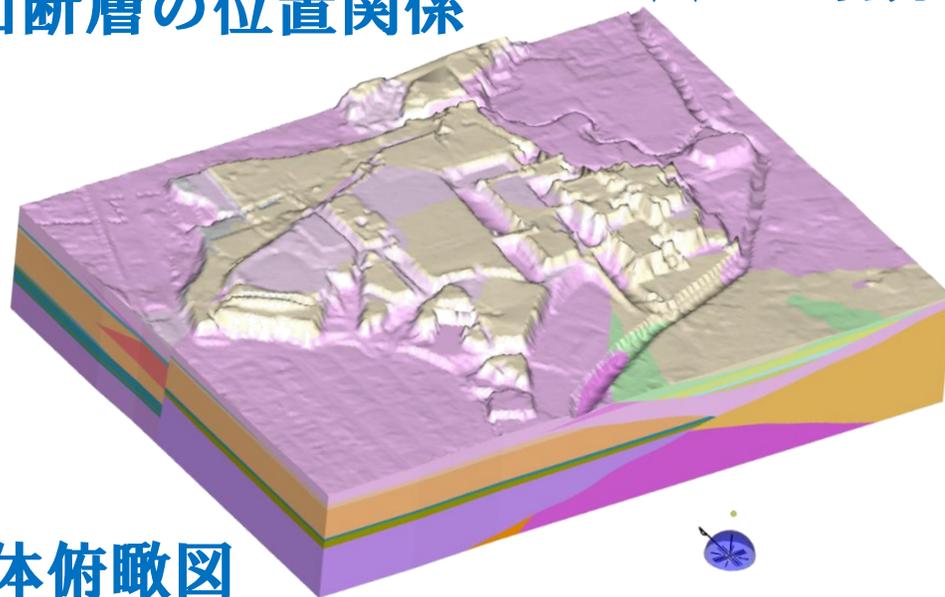
熊本城地盤の3次元空間の推定



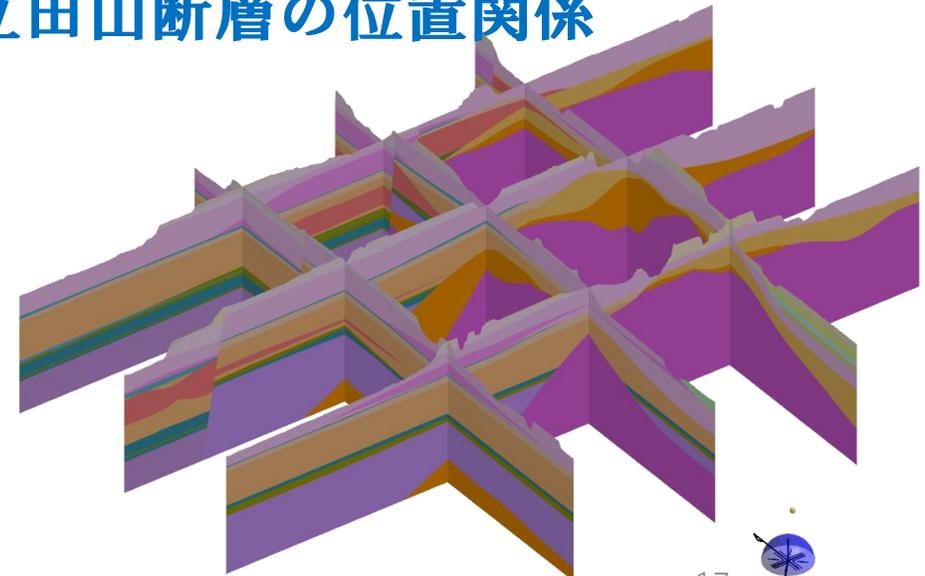
(a) 地形図と立田山断層の位置関係



(b) 地層分布と立田山断層の位置関係

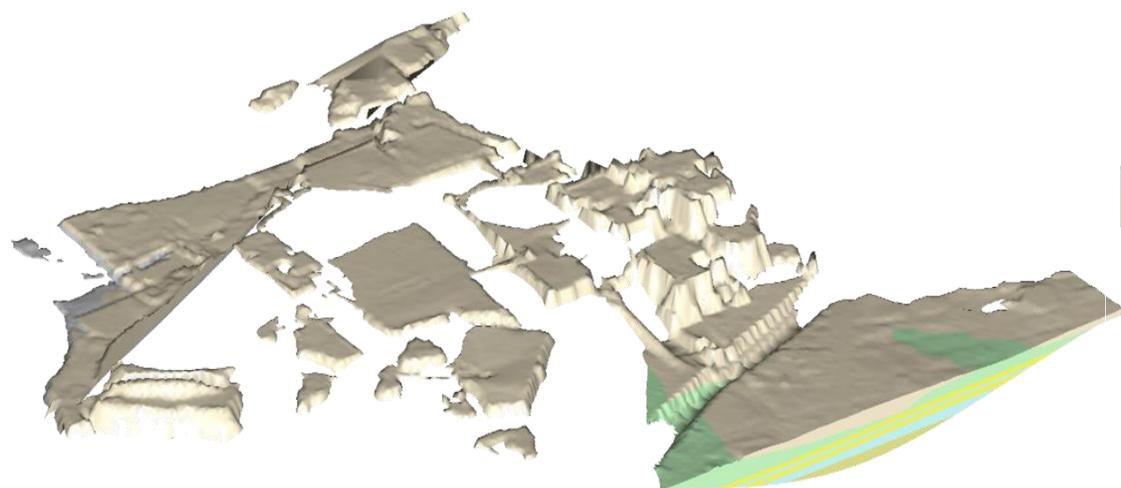


(c) 3次元全体俯瞰図

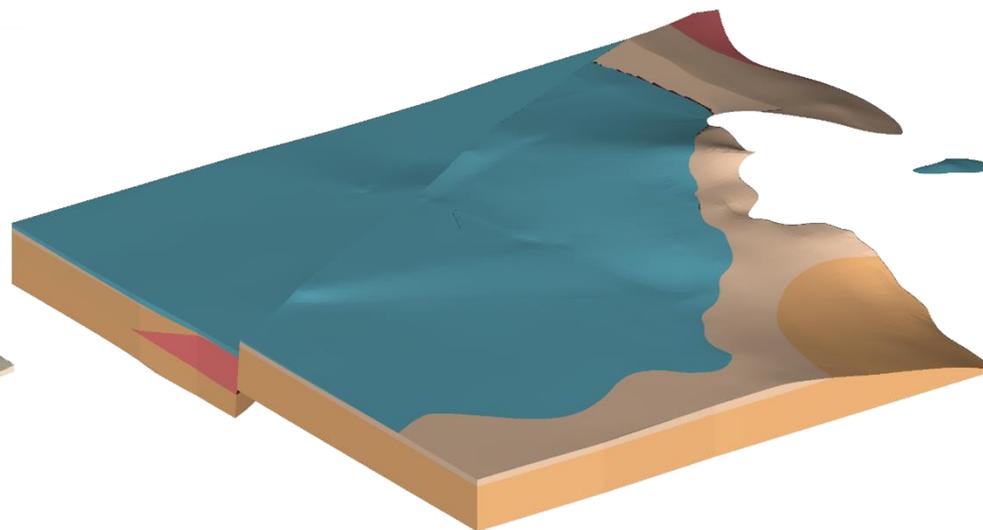


(d) 任意断面の切取り図

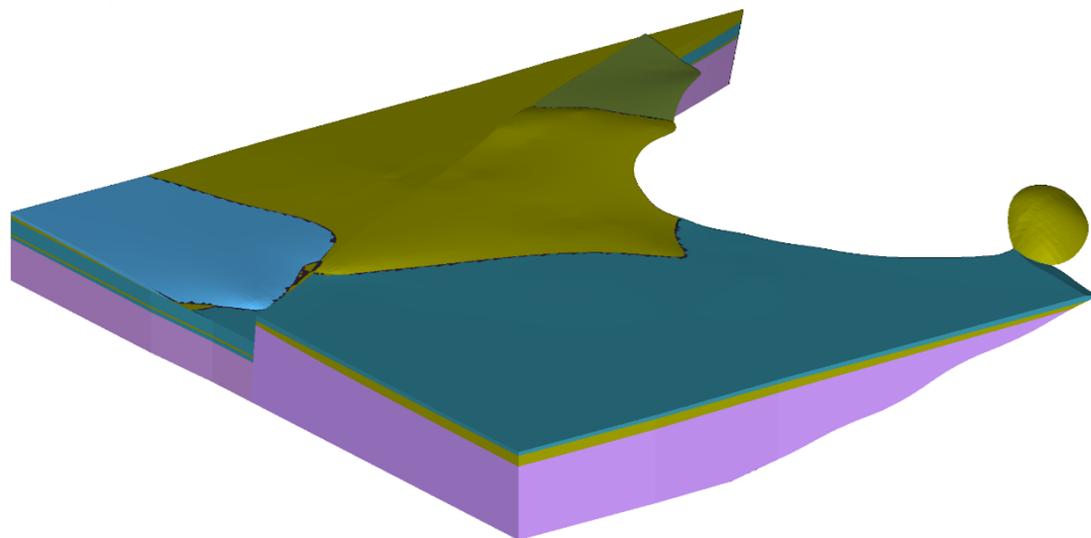
地層分布図



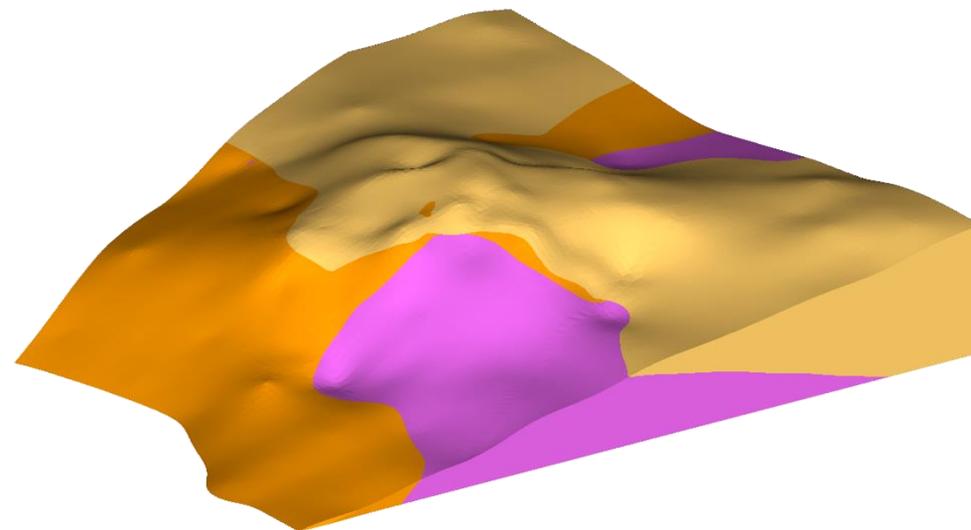
(a) 完新統の地層分布図



(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

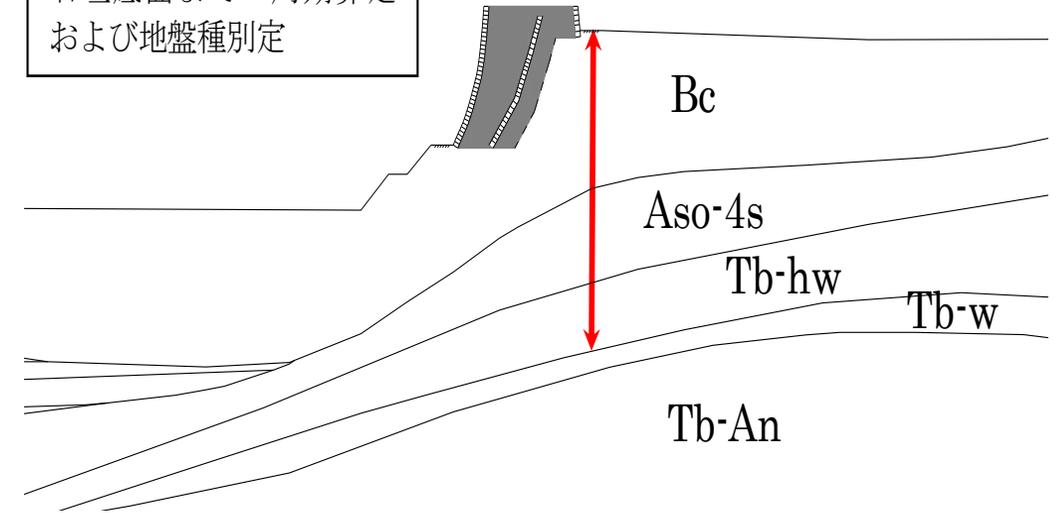
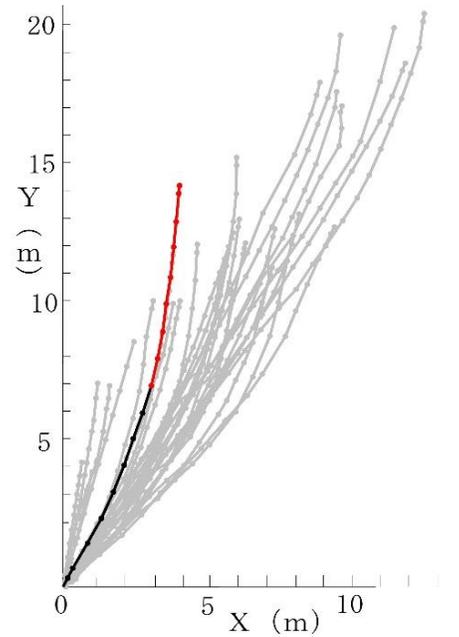


(d) 金峰山古期火山噴出物の地層分布図

飯田丸五階櫓の解析条件

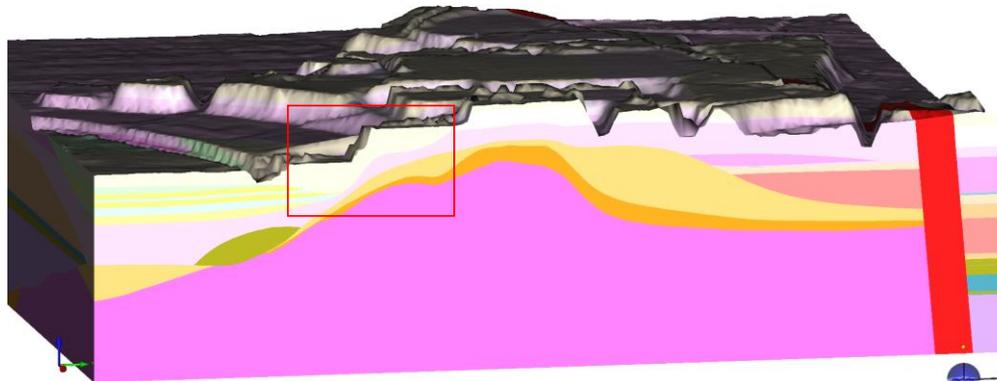
石垣背後地盤天端までの周期算定および地盤種別判定

石垣底面までの周期算定および地盤種別判定

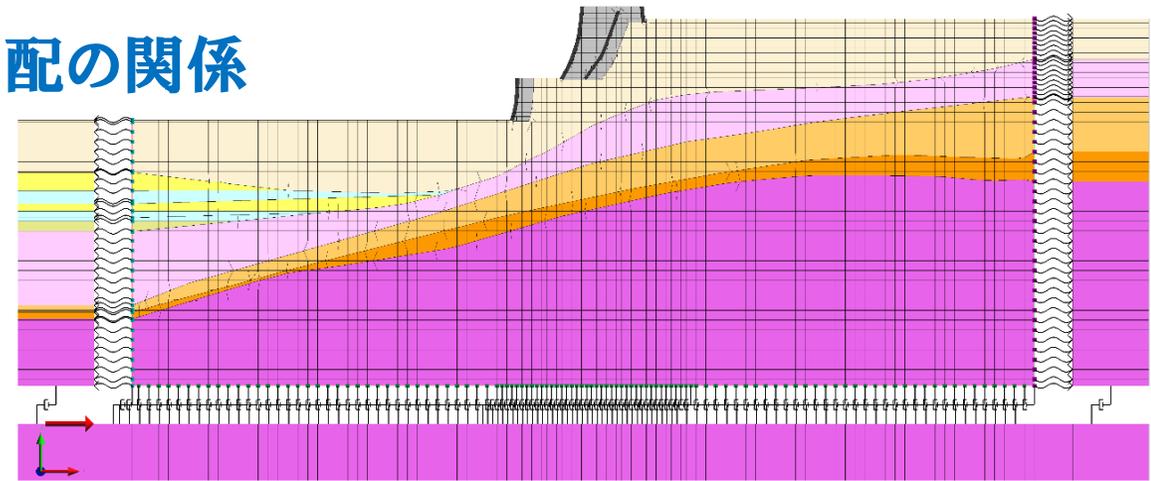


(c) 解析用工学的基盤面の位置

(a) 飯田丸五階櫓の被害状況 (b) 石垣の高さと勾配の関係

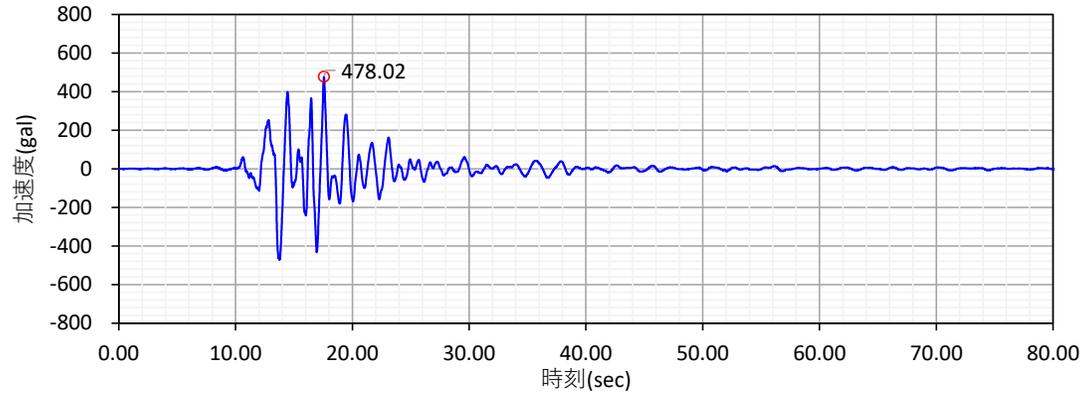
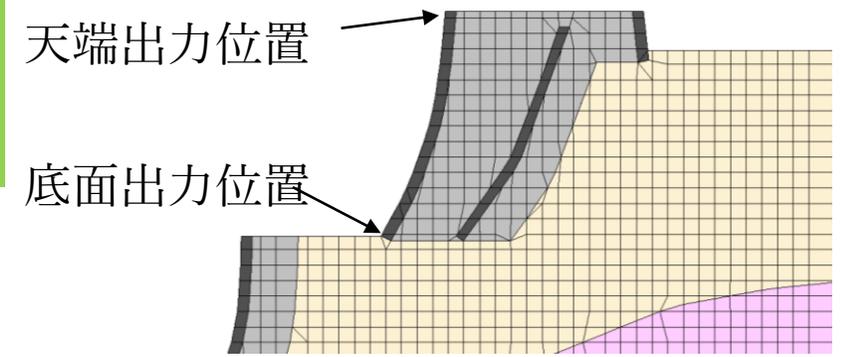


(d) 3次元地質モデルからの切取り断面

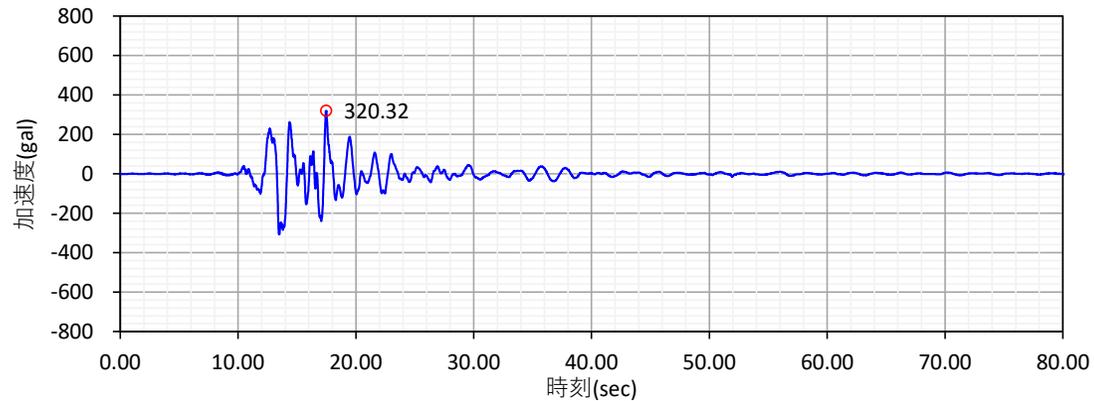


(e) 解析メッシュ図

飯田丸五階櫓の応答加速度分布

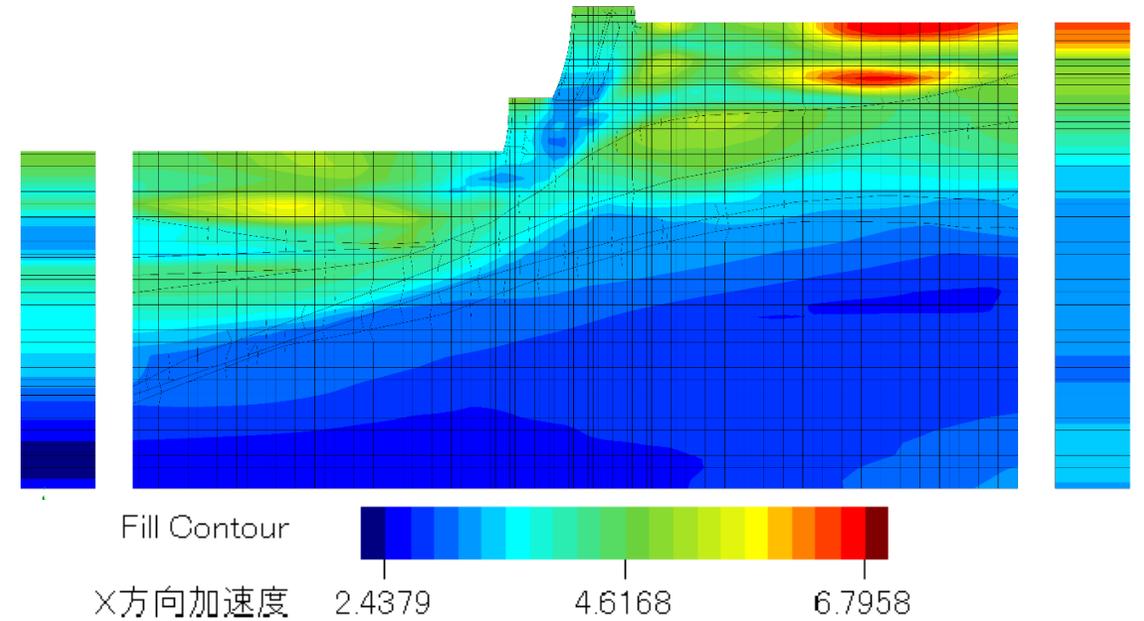


(a) 石垣天端の時刻歴応答加速度結果



(b) 石垣底面の時刻歴応答加速度結果

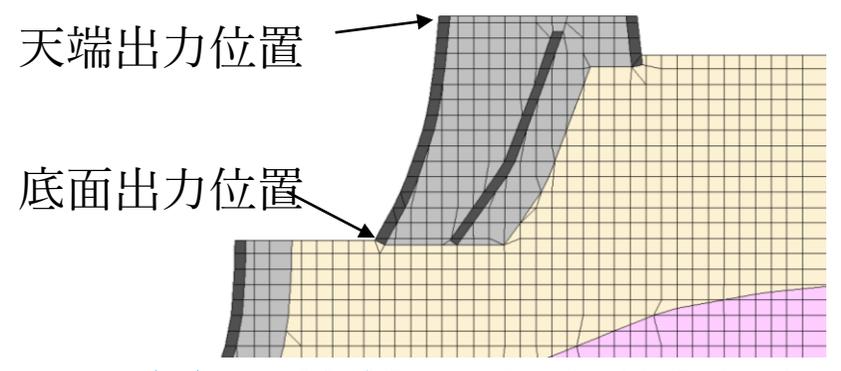
(c) 応答結果出力位置図



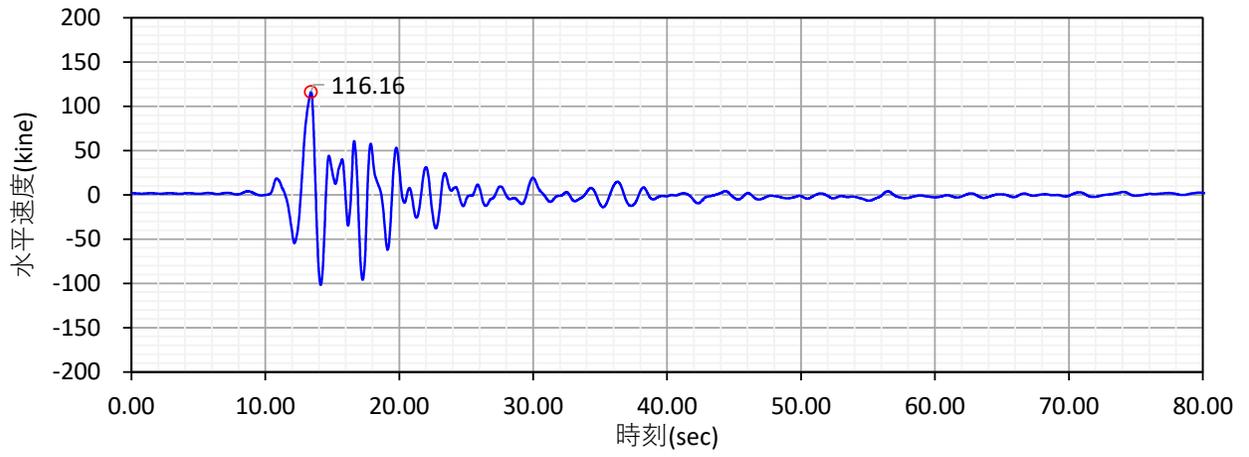
天端最大加速度 (gal)	478.0
底面最大加速度 (gal)	320.3
天端最大加速度/底面最大加速度	1.49

(d) 最大水平速度分布図

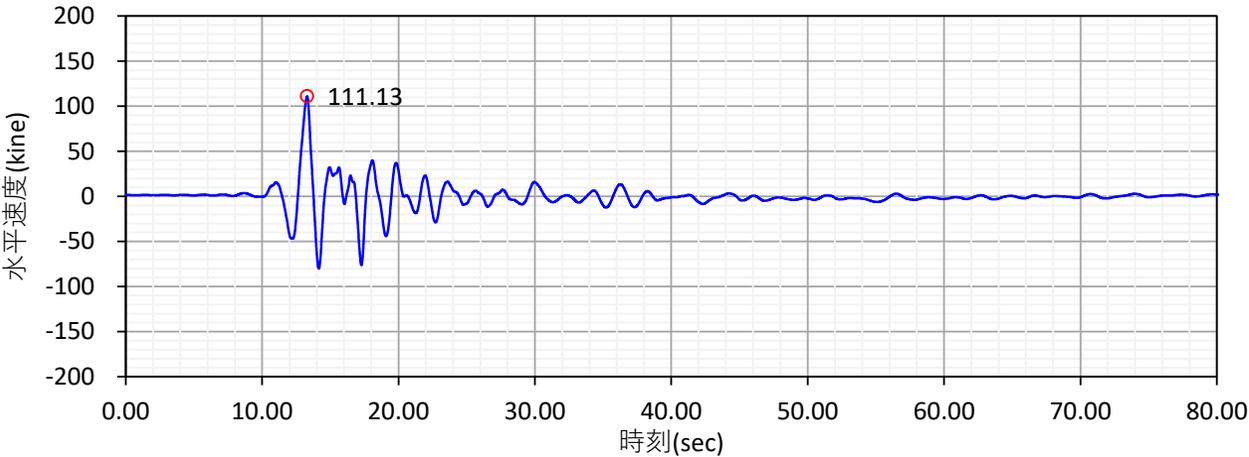
飯田丸五階櫓の応答速度分布



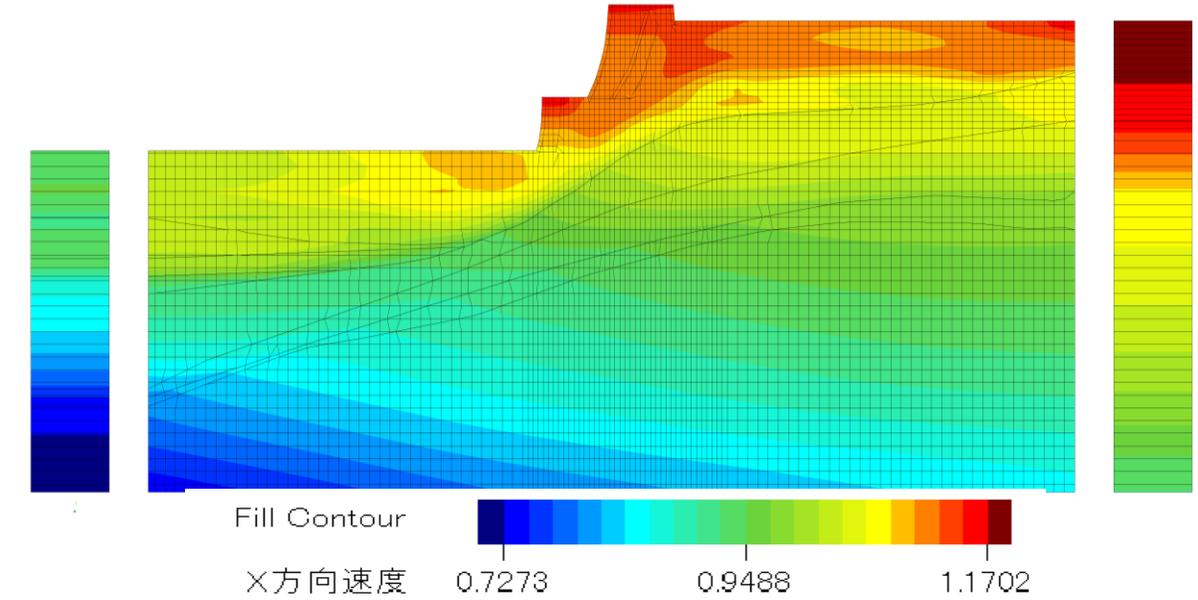
(c) 応答結果出力位置図



(a) 石垣天端の時刻歴応答速度結果



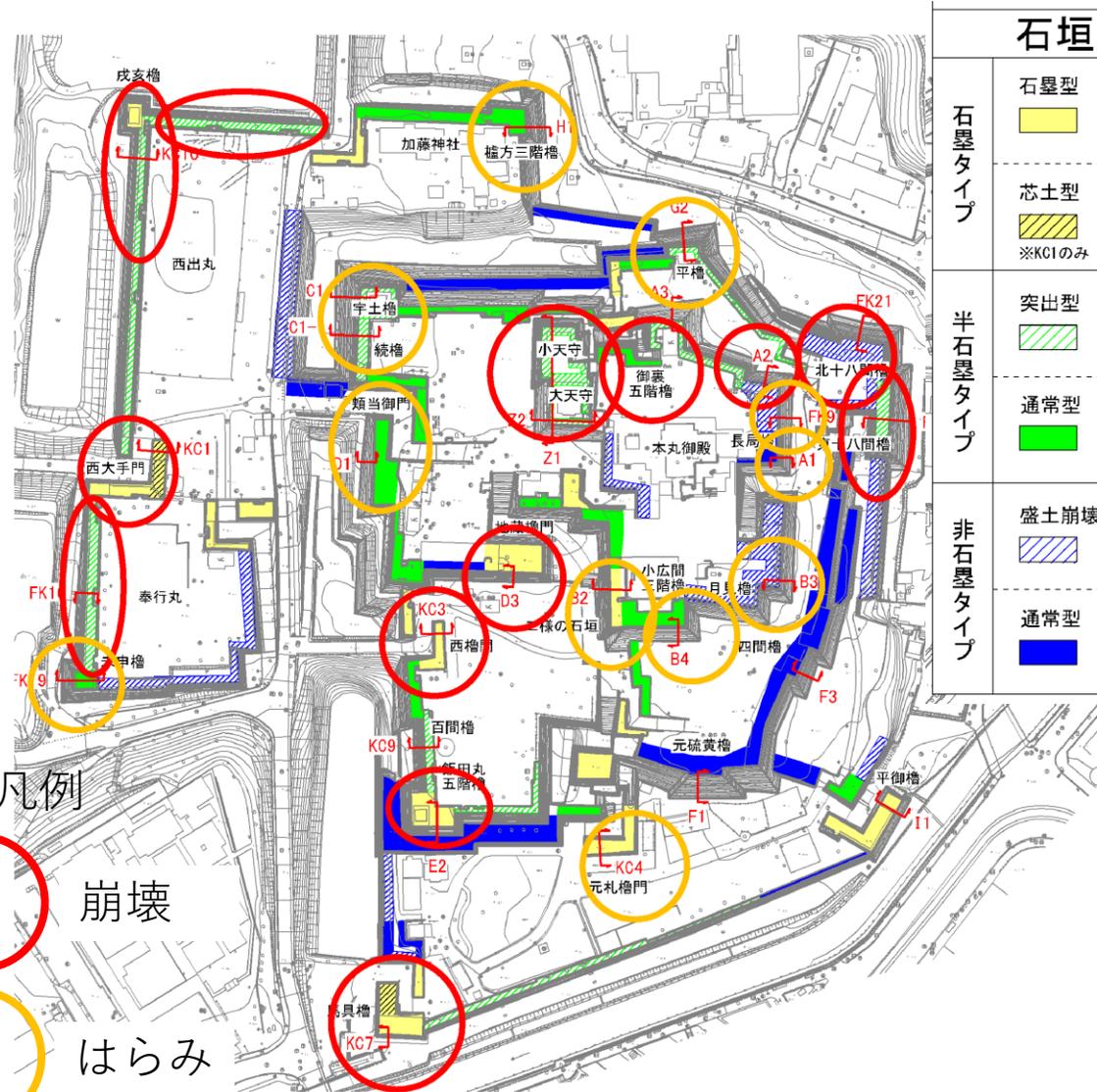
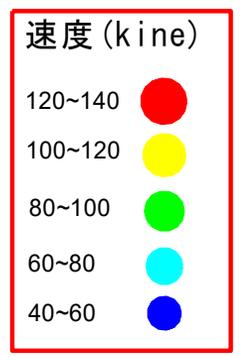
(b) 石垣底面の時刻歴応答速度結果



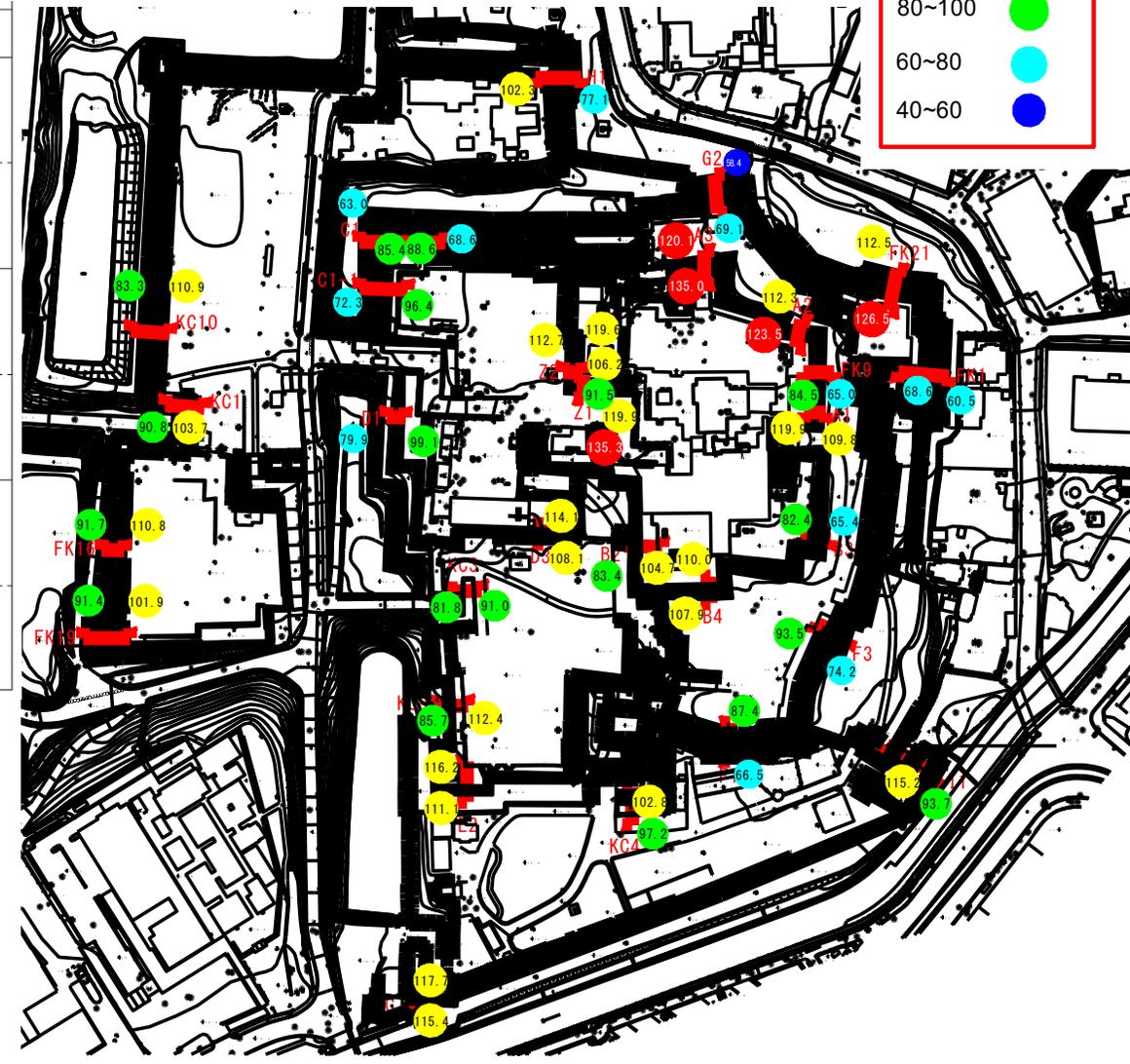
天端最大速度 (kine)	116.2
底面最大速度 (kine)	111.1
天端最大速度/底面最大速度	1.05

(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



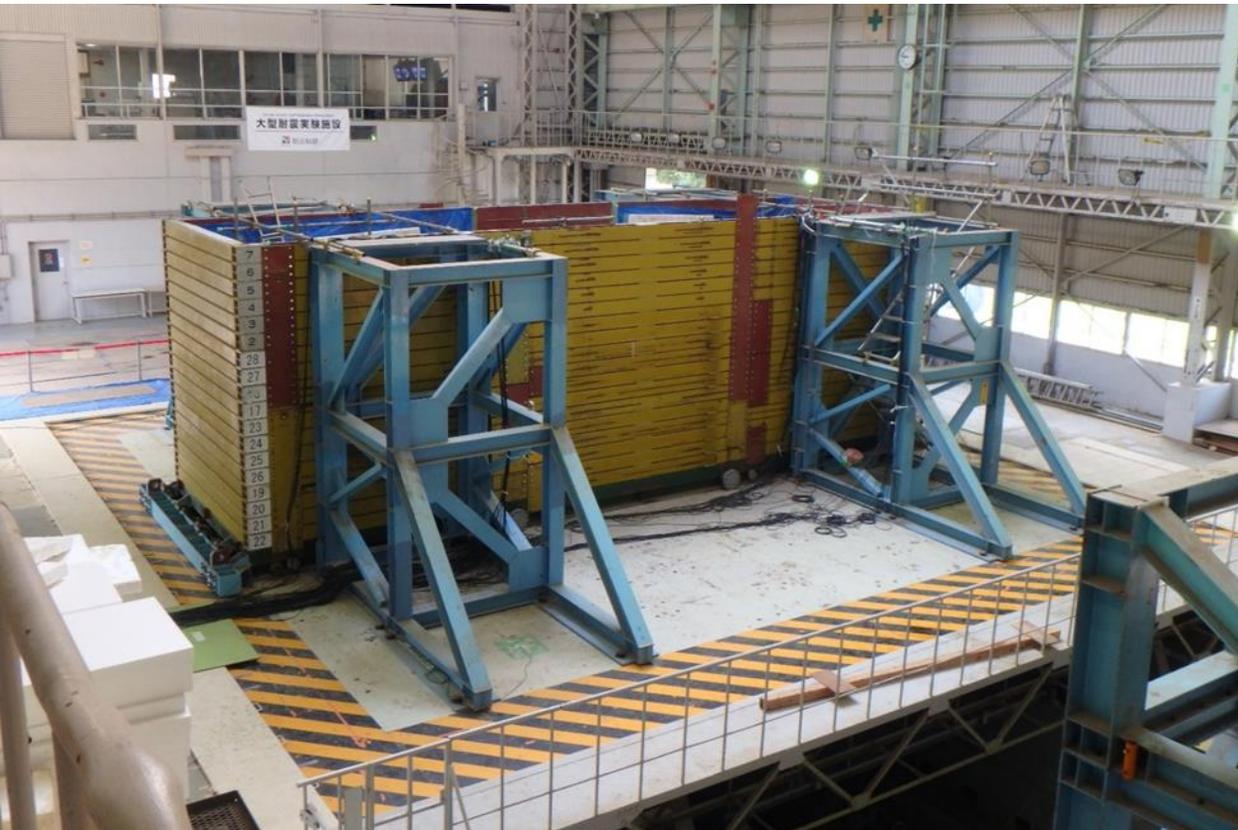
(a) 熊本地震による石垣崩壊状況



(b) 石垣における応答速度分布結果

防災科学技術研究所の振動台の様子

- 振動台の大きさは、 $20\text{m} \times 15\text{m}$ で、実験に用いる箱型で高さ 4.0m 、内径幅 3.1m 、奥行き長さ 11.5m である。



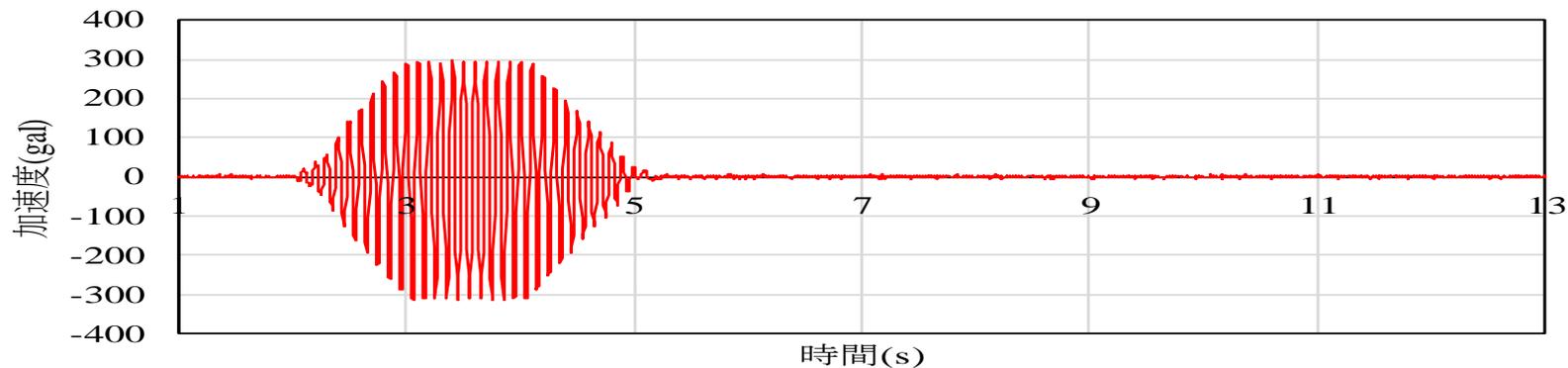
(a)振動台の様子



(b)実験前の箱型内の様子

入力地震動

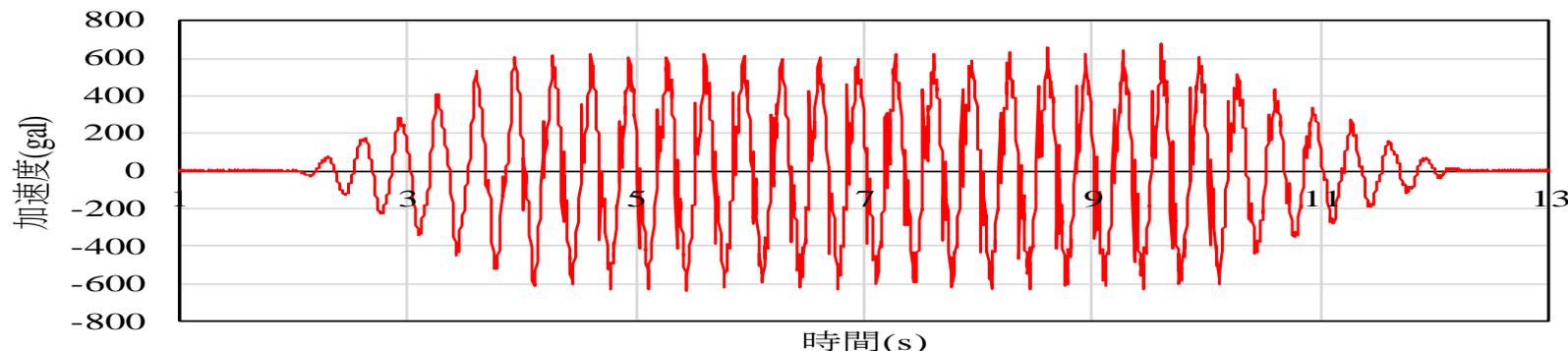
sin10Hz



(a) 正弦波10Hz

全波数を30波とし、そのうち前後にテーパ波を10波ずつ設定

sin3Hz

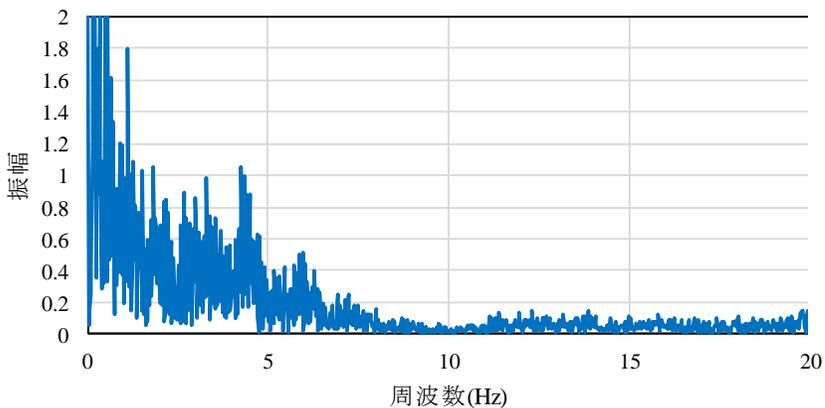


(b) 正弦波3Hz

全30波のうち、前後にテーパ波を6波ずつ設定

ホワイトノイズ

テーブルFFT

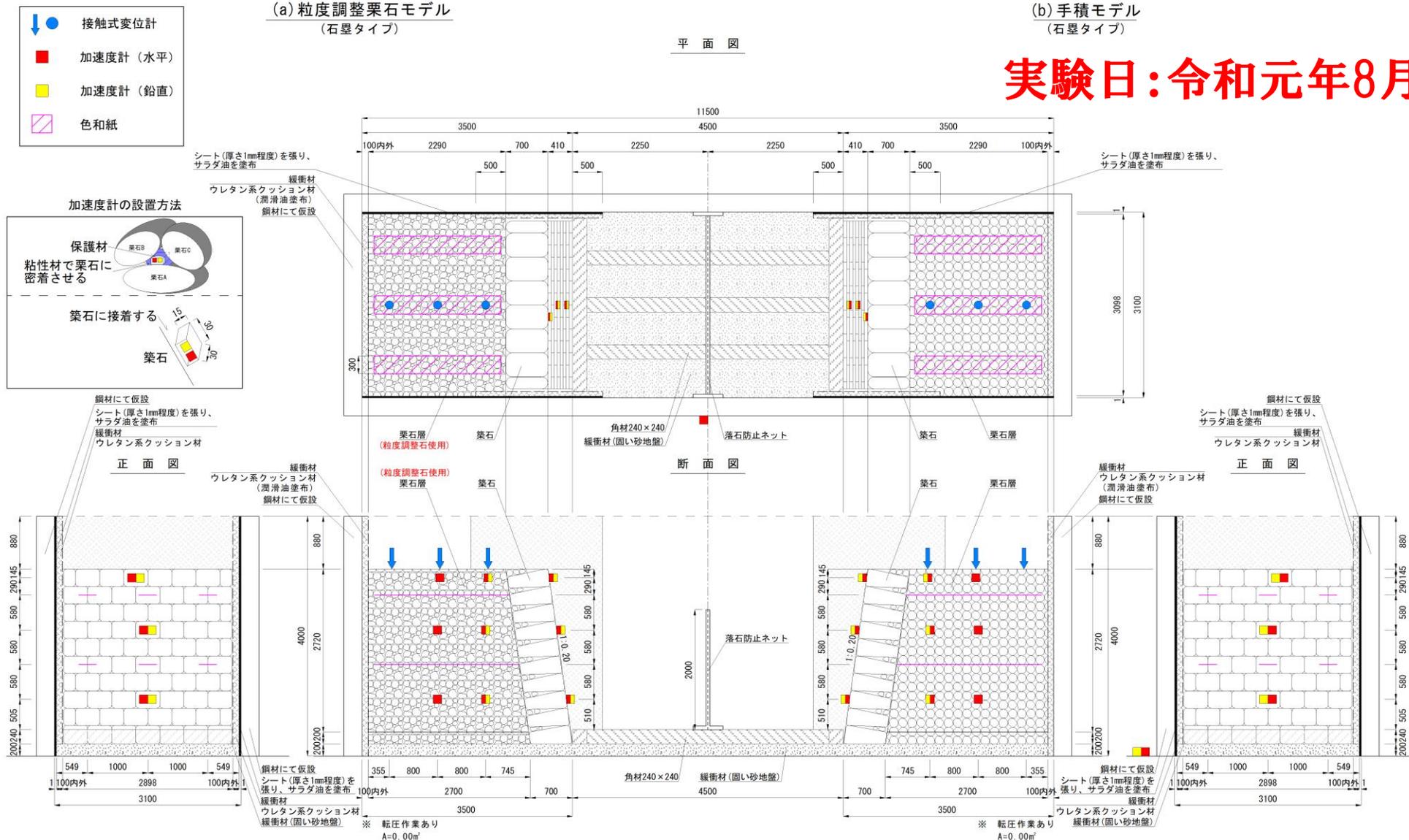


(c) ホワイトノイズ波

周波数の範囲を0.05~30Hzとし、加振時間は40秒、目標の最大加速度は30gal

防災科研大型振動台実験(石畳タイプ)

実験日: 令和元年8月24日



(a) 粒度調整碎石モデル

(b) 手積モデル

防災科研大型振動台実験結果(石畳タイプ)

実験日: 令和元年8月24日

加震前



加震後



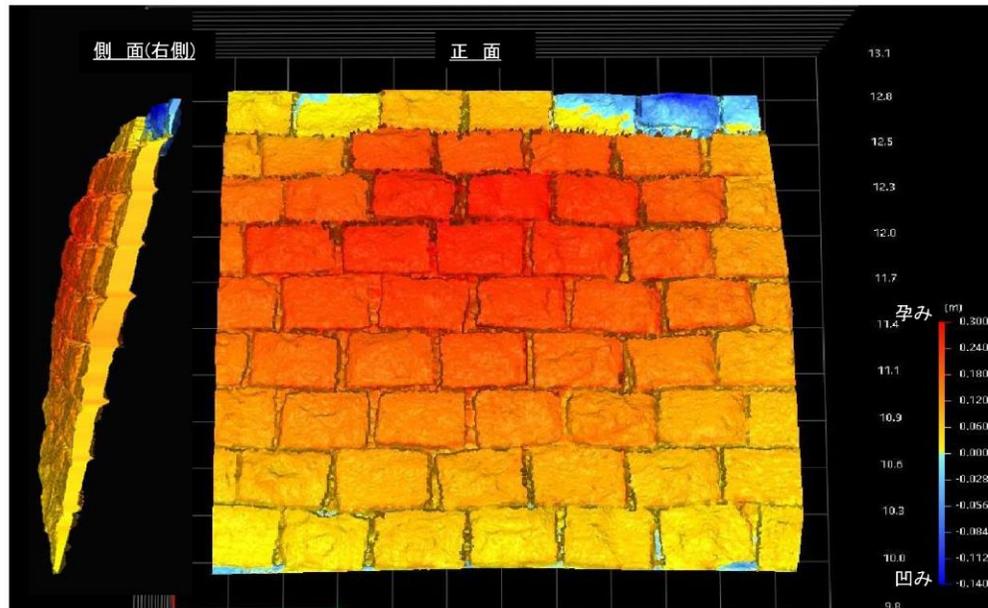
加震前



加震後

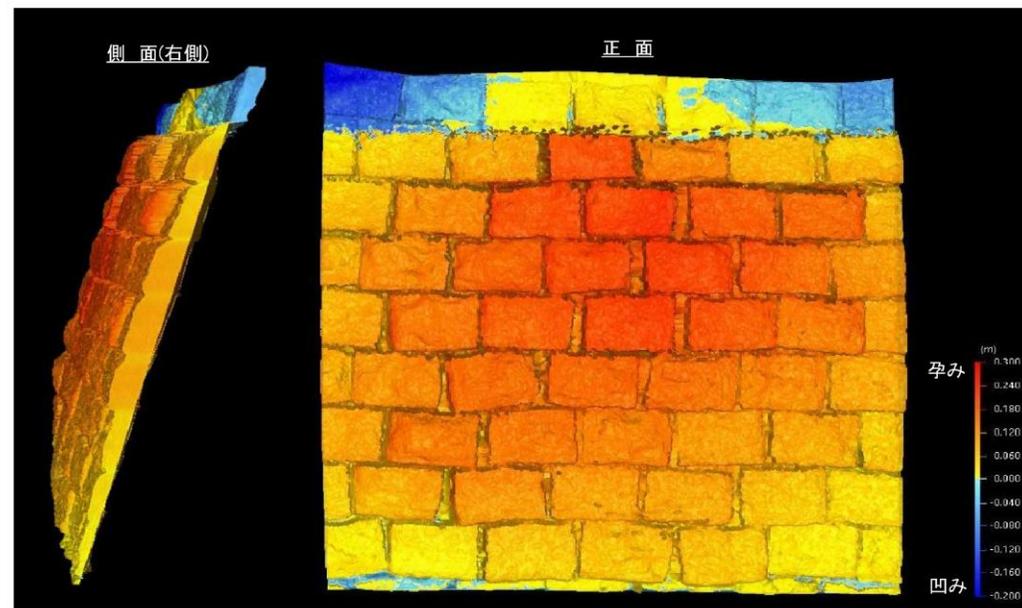


段彩図(加振前後比較)



(a) 粒度調整碎石モデル

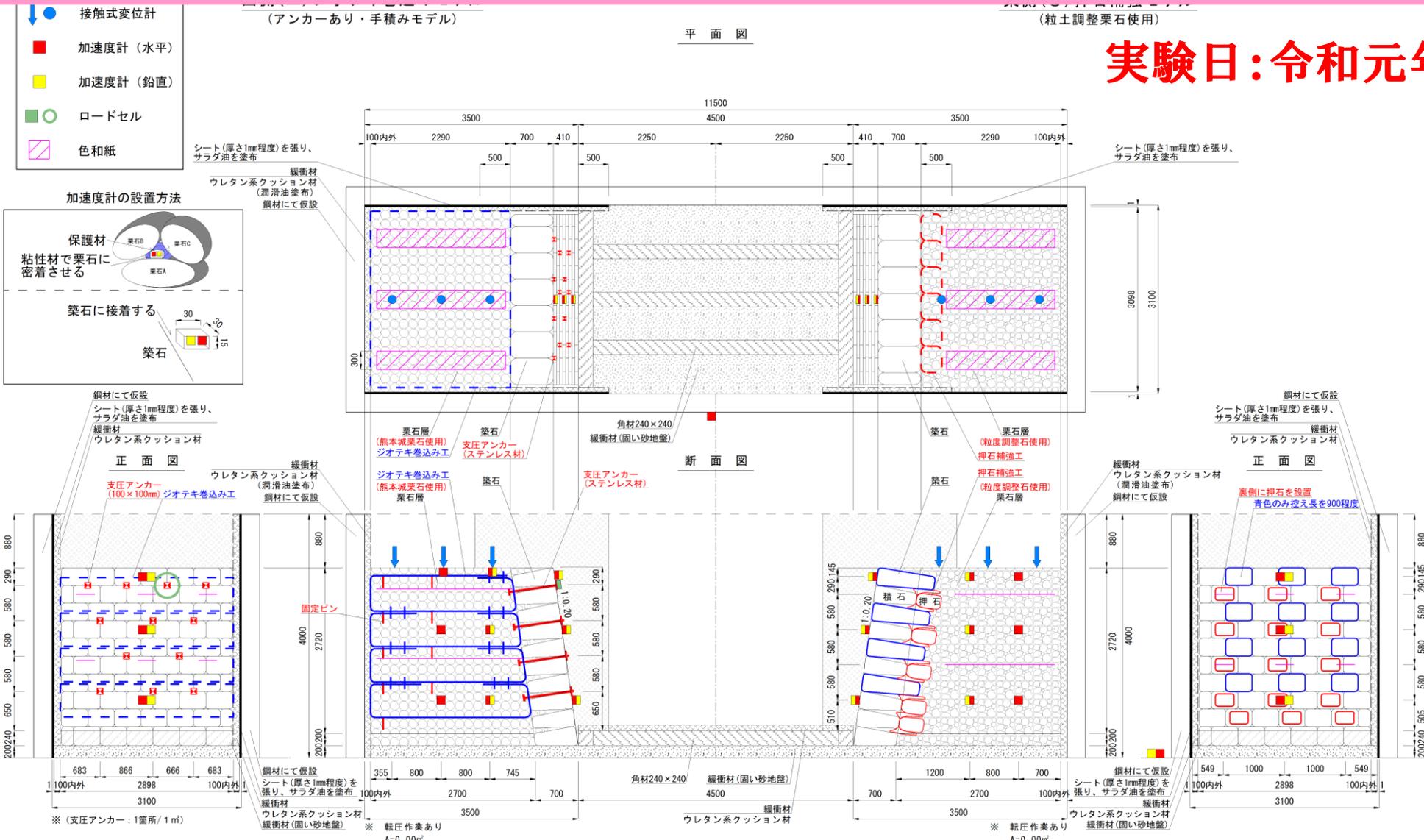
段彩図(加振前後比較)



(b) 手積モデル

防災科研大型振動台実験(石墨補強タイプ)

実験日: 令和元年9月7日



(c) ジオテキスタイル巻き込みモデル

(d) 押石補強モデル

防災科研大型振動台実験(石塁補強タイプ)

実験日: 令和元年9月7日

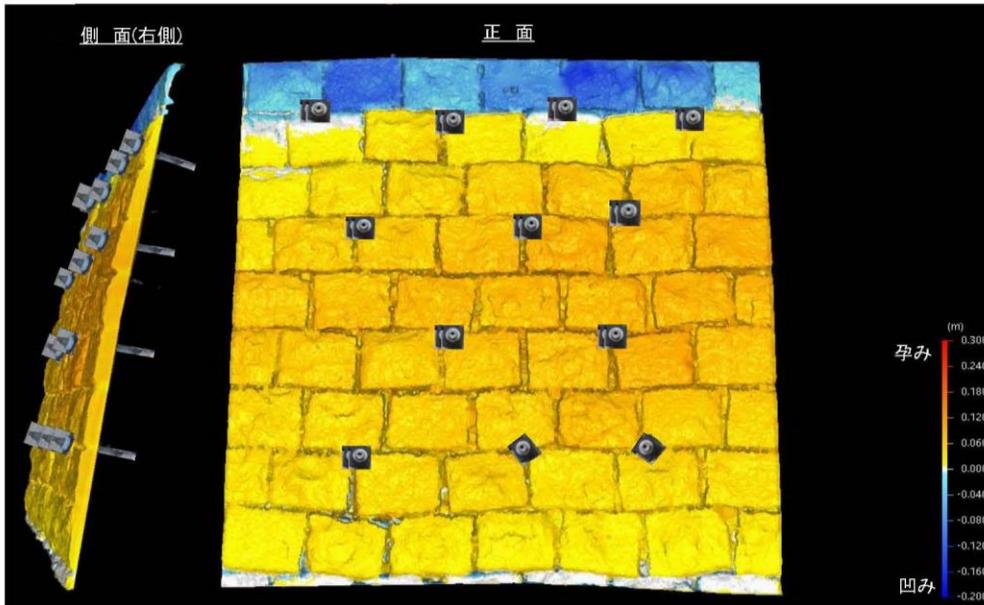
加震前



加震後

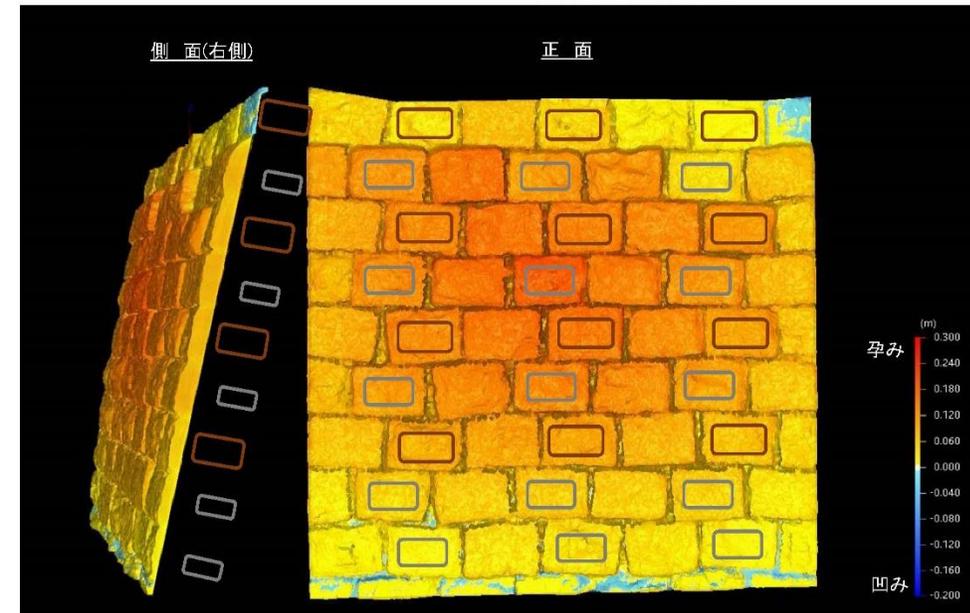


段彩図(加振前後比較)



(c) ジオテキスタイル巻込みモデル

段彩図(加振前後比較)

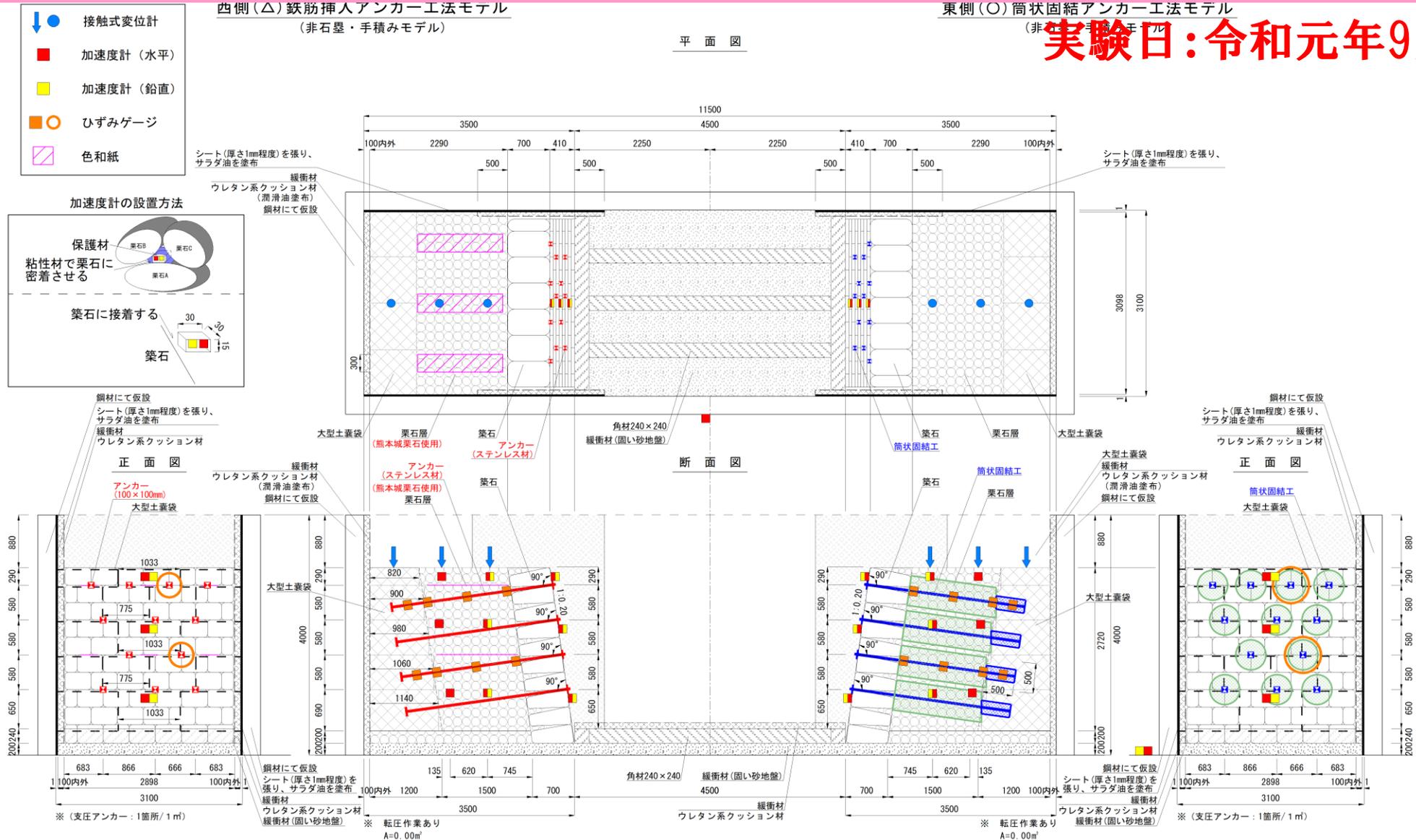


□ : 長築石 □ : 押石

(d) 押石補強モデル

防災科研大型振動台実験(非石墨補強タイプ)

実験日: 令和元年9月30日



(e)鉄筋挿入アンカー工法モデル

(f)筒状固結アンカー工法モデル

防災科研大型振動台実験(非石墨補強タイプ)

加震前



加震後



加震前

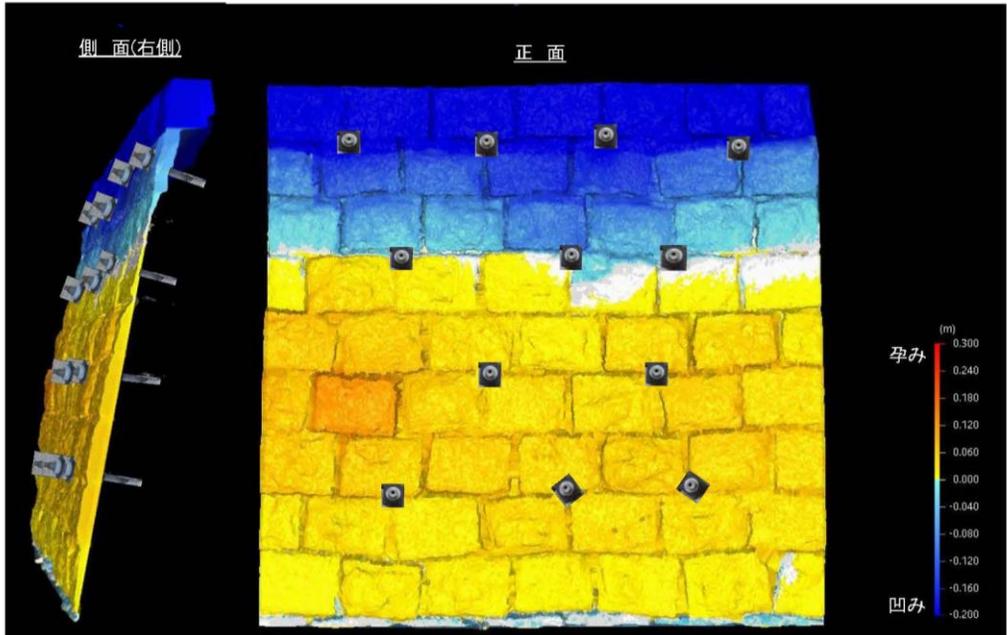


加震後



実験日:令和元年9月30日

段彩図(加振前後比較)



(e)鉄筋挿入アンカー工法モデル

段彩図(加振前後比較)

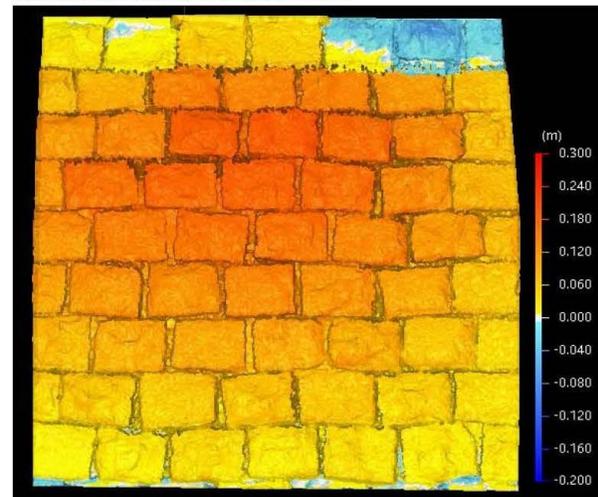


(f)筒状固結アンカー工法モデル

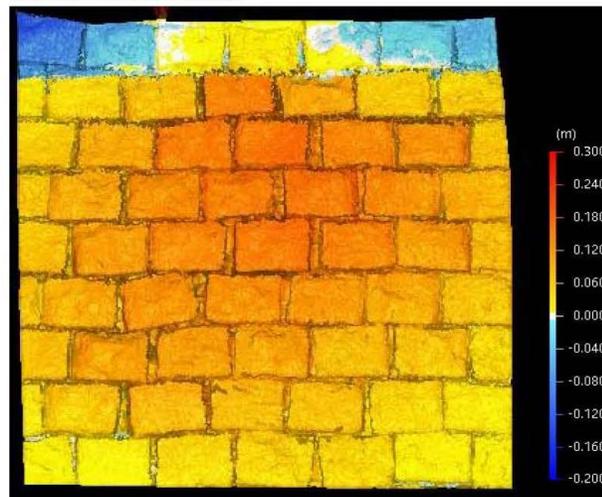
変状図 (各モデル「加振前-最終加振後」比較)

2019/8/27 「加震前-最終加震後」比較

『粒度調整栗石モデル』西△

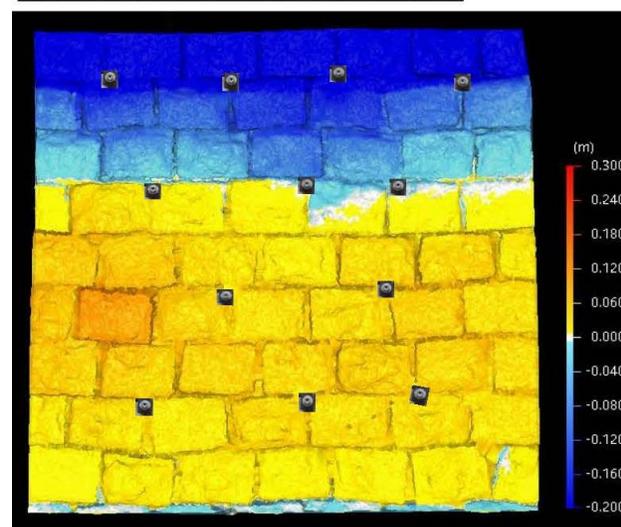


『手積モデル』東○



2019/9/30 「加震前-最終加震後」比較

『鉄筋挿入アンカー工法モデル』西△

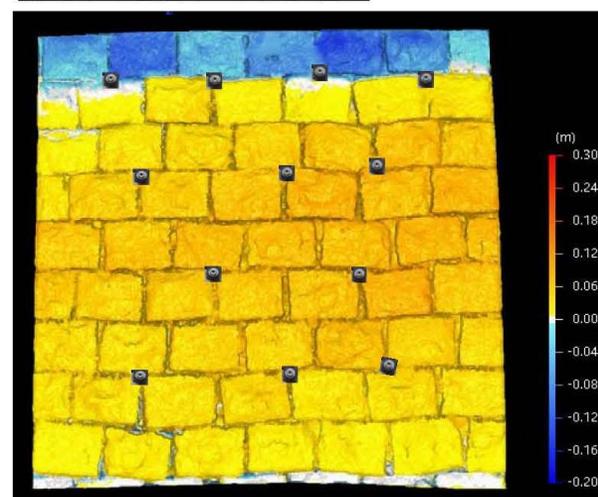


『筒状固結アンカー工法モデル』東○

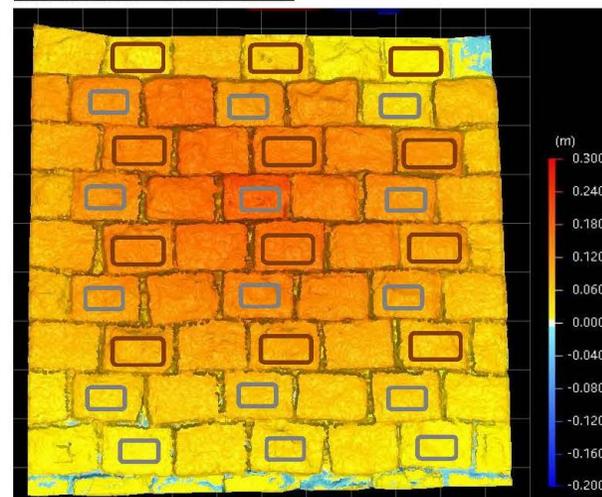


2019/9/12 「加震前-最終加震後」比較

『ジオテキ巻込みモデル』西△



『押石補強モデル』東○

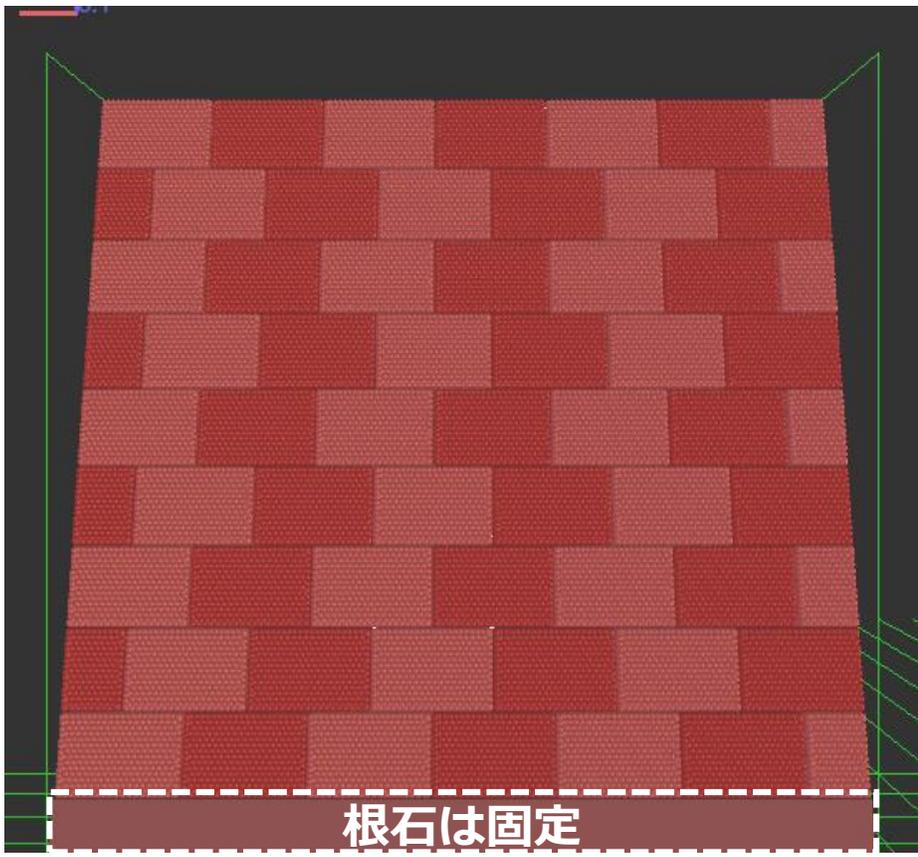


○ : 長築石 □ : 押石

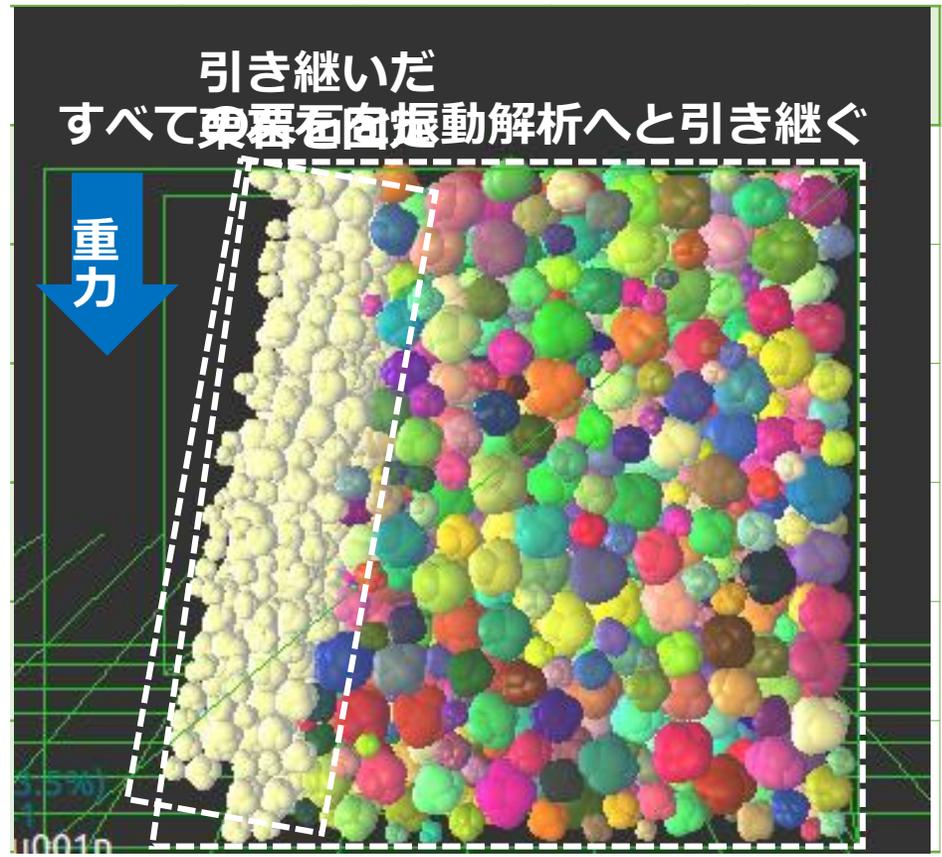
解析モデルの構築シミュレーション

一度の充填では実験の栗石層の初期状態を再現できないため
築石隙間付近・残りの背面部の2回に分けて充填解析を実施

築石モデルの配置



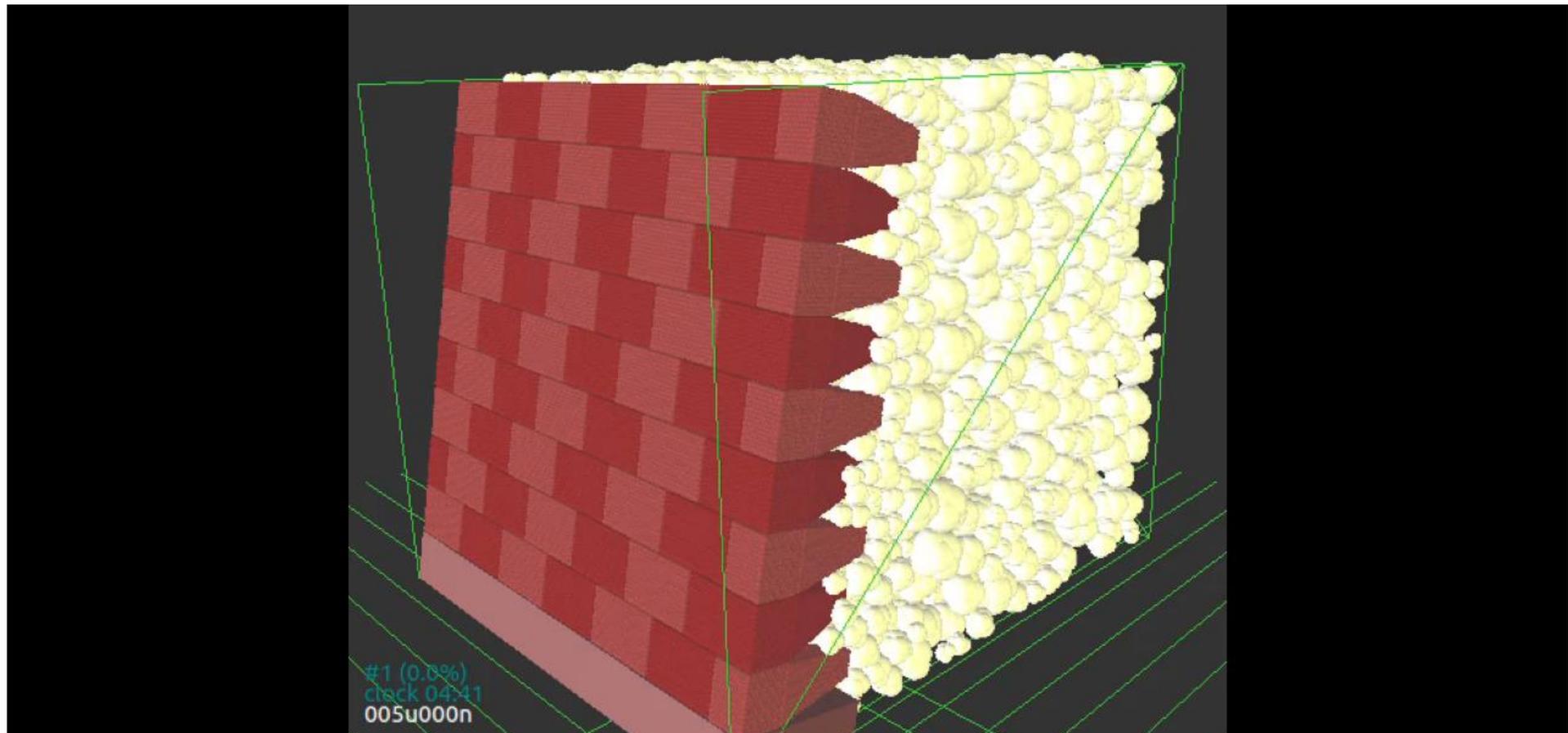
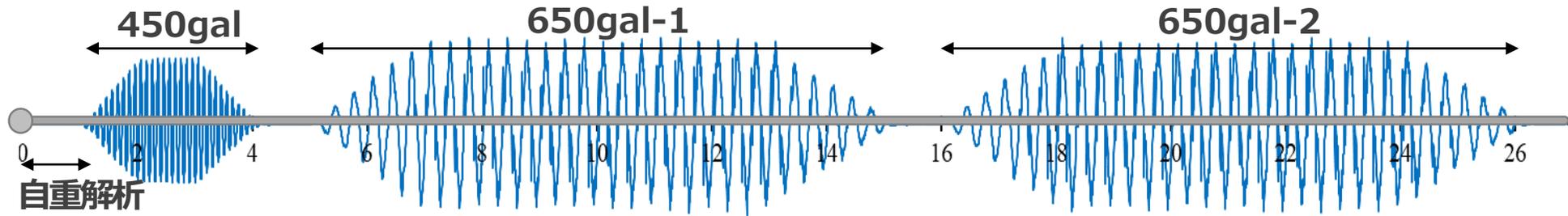
栗石層の充填



内部摩擦角:40度 サイズ:100~200mm

振動シミュレーション (27秒間)

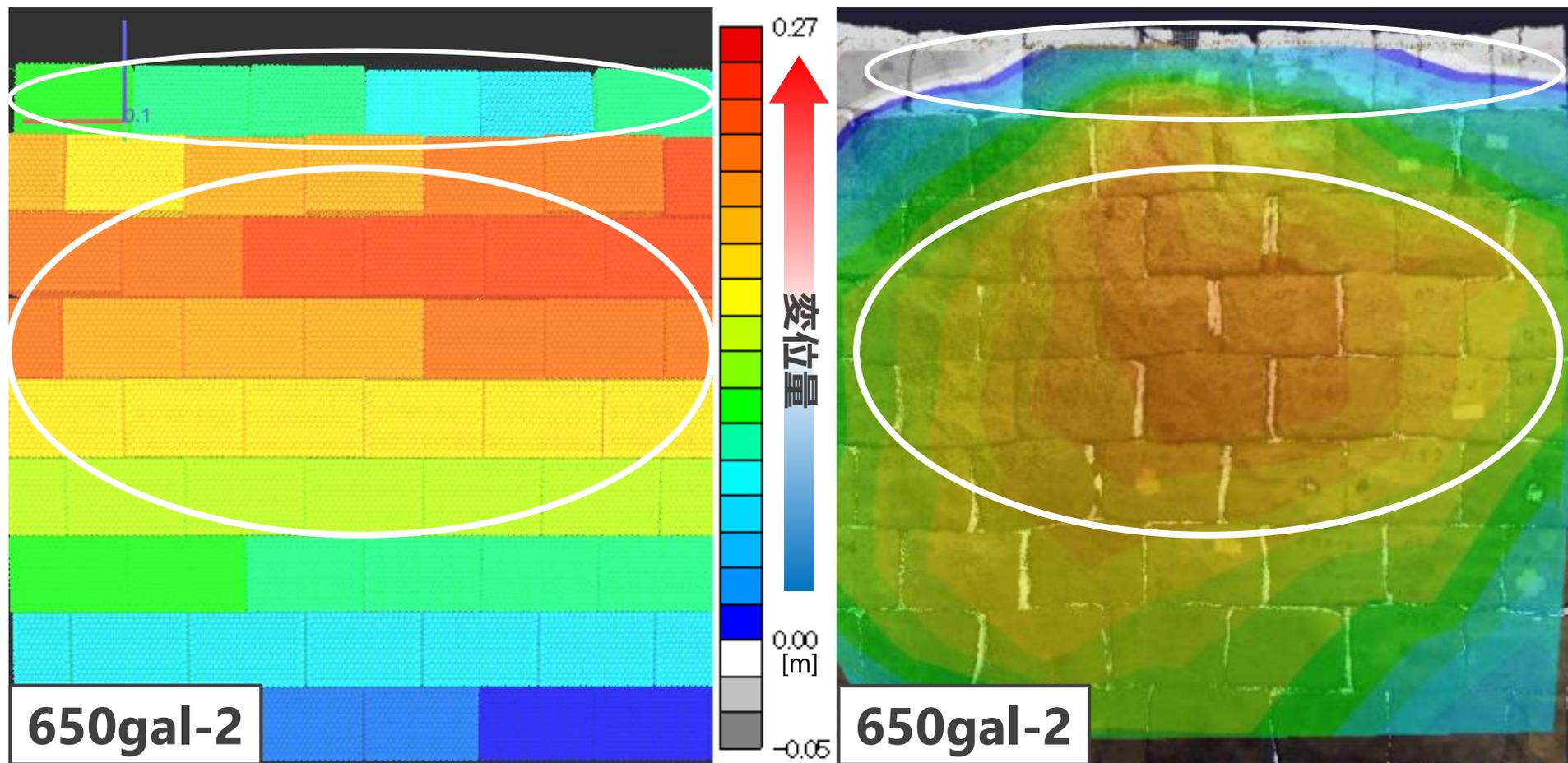
実験の築石の変状に影響を与えた加振ステップを連動



全加振後の築石の累積変位コンター

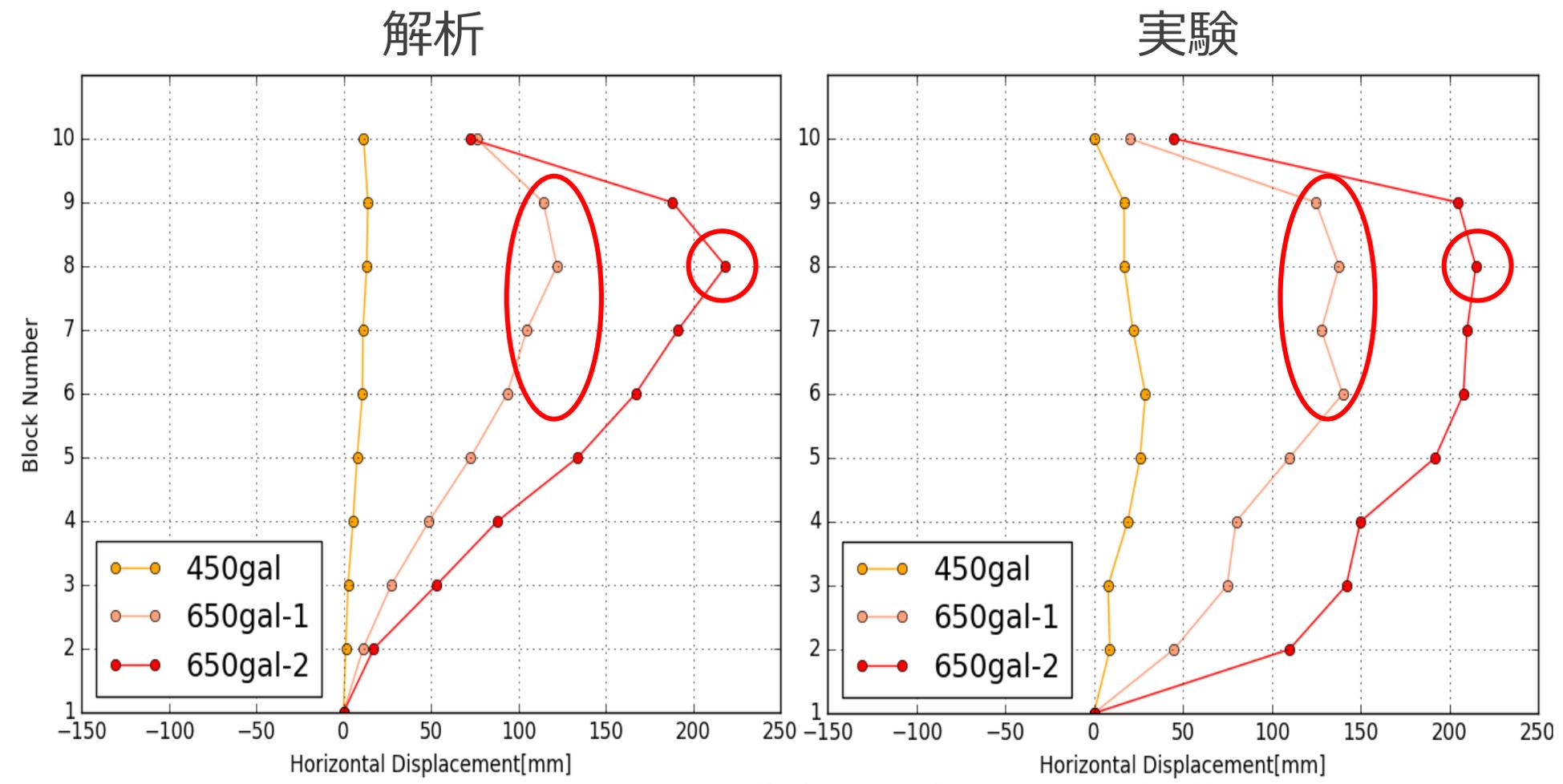
解析

実験



両壁側の築石も孕み出しているが
全体的な変動状態を精度良く再現

築石中央部の各加振ステップの累積変位量



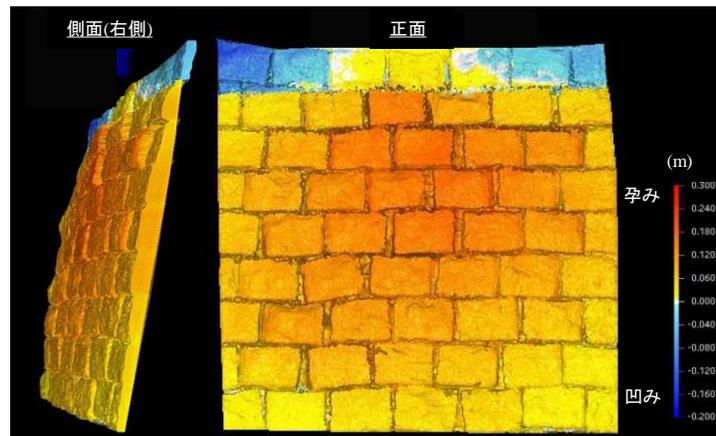
450galにおいて変位量が50mm未満
650galの強振動において最大変位量を高精度で再現した

振動台実験

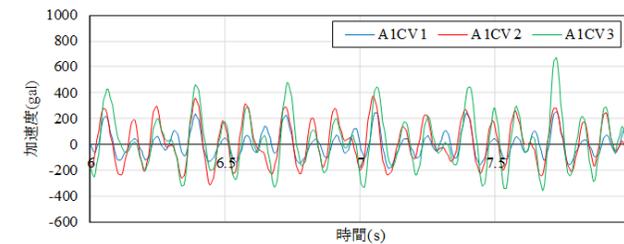
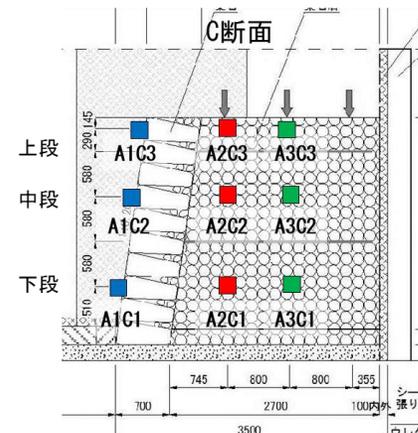
大型振動台施設と熊本城の城壁材料を用いた補強工を有する城壁の振動台実験



振動台実験の様子



加振前後の変状図

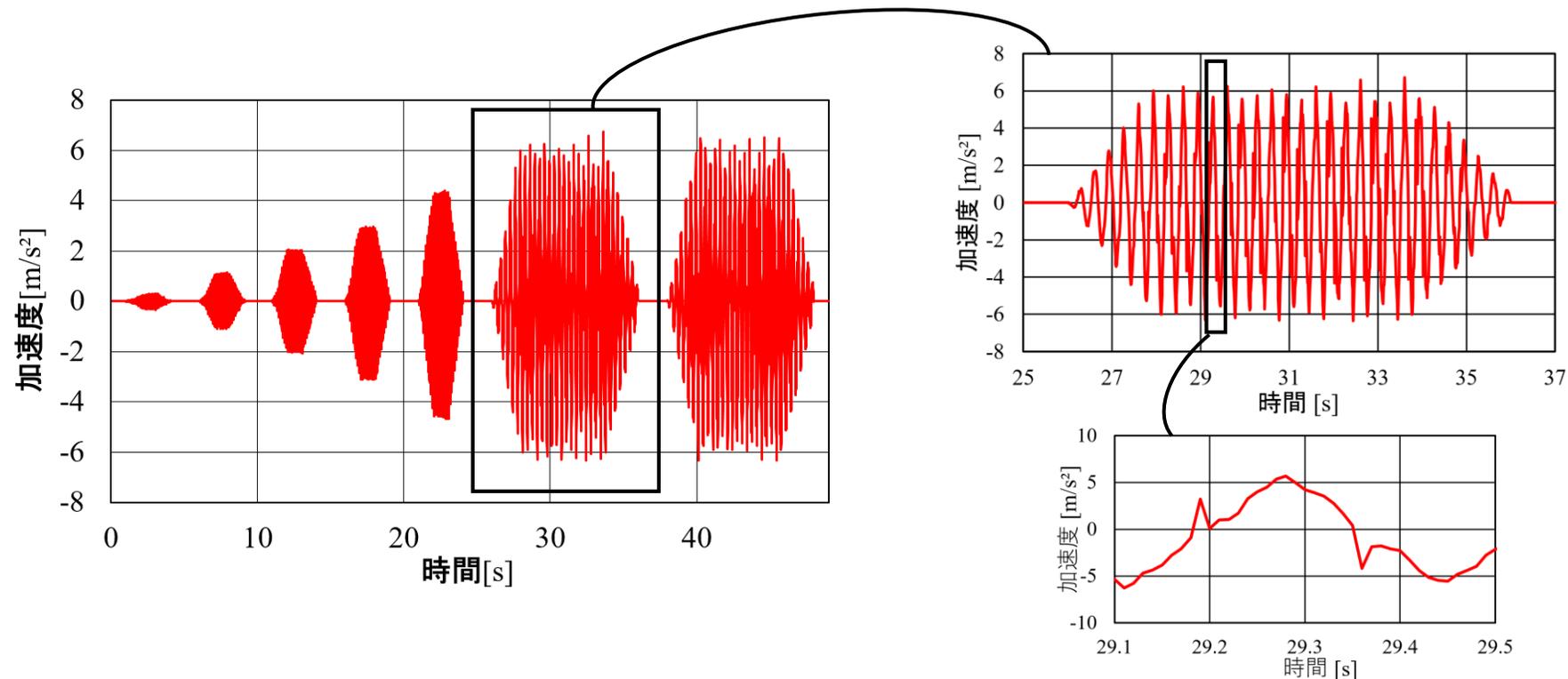


加振中のそれぞれの位置での加速度

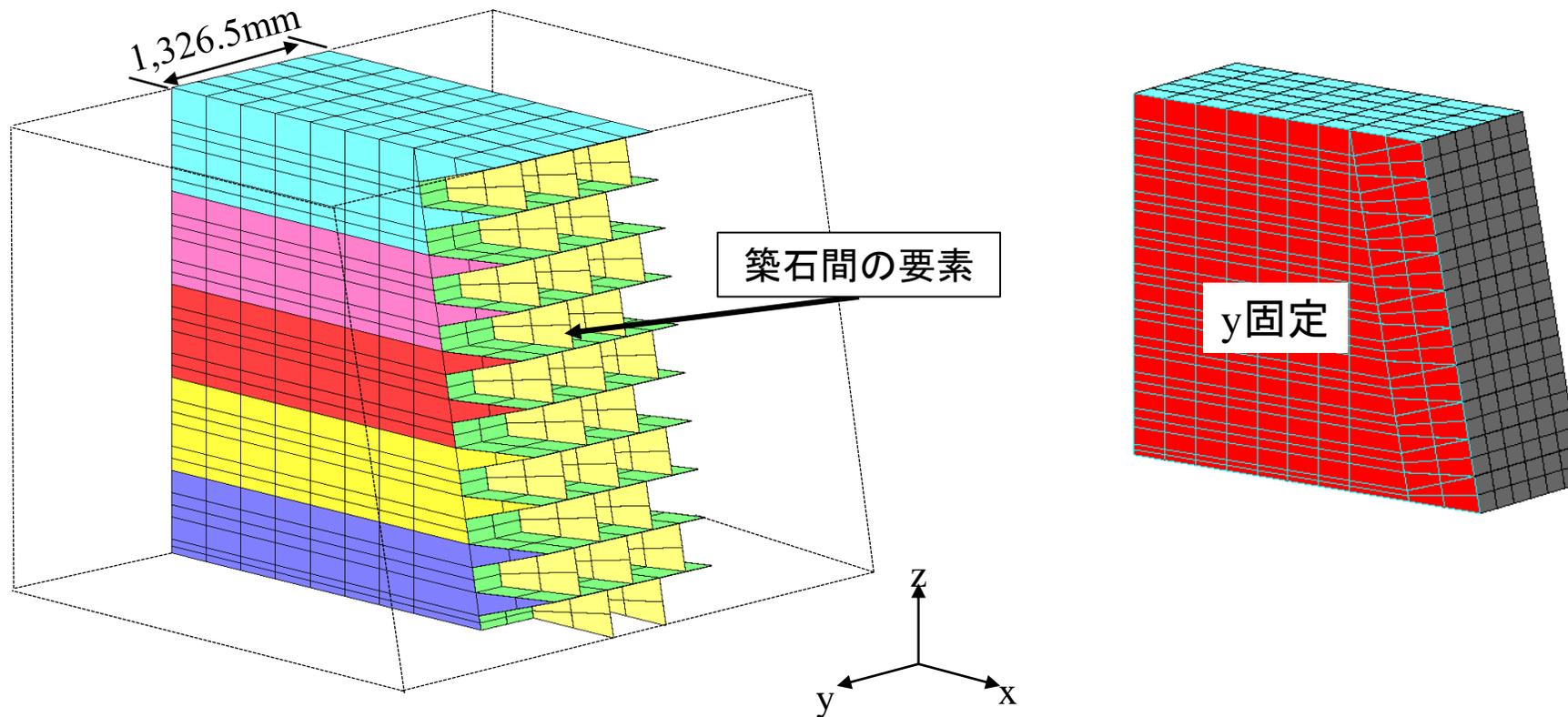
三次元動的弾塑性FEM解析

- 弾塑性有限要素法
- 材料構成則：MC-DPモデル
- 加速度を入力した時刻歴応答解析

入力加速度波形：振動台テーブル部で観測された加速度波形を入力

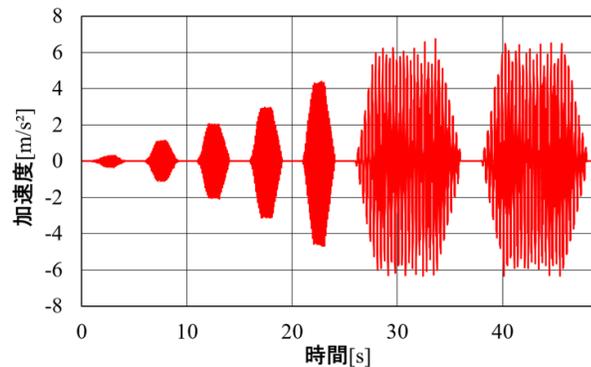


手積みモデル



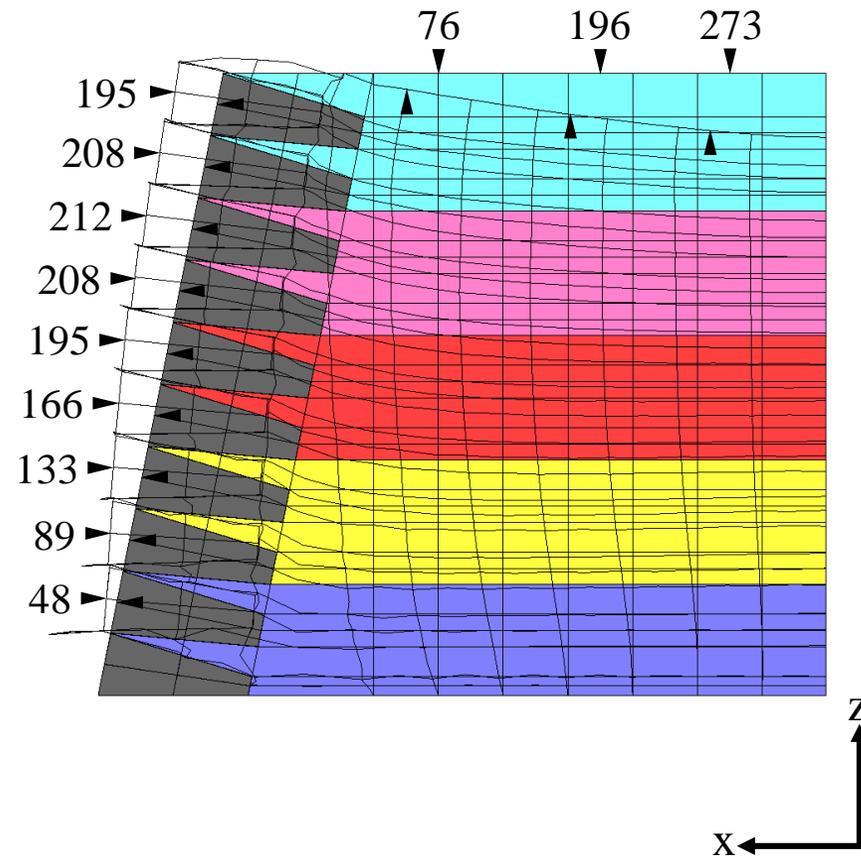
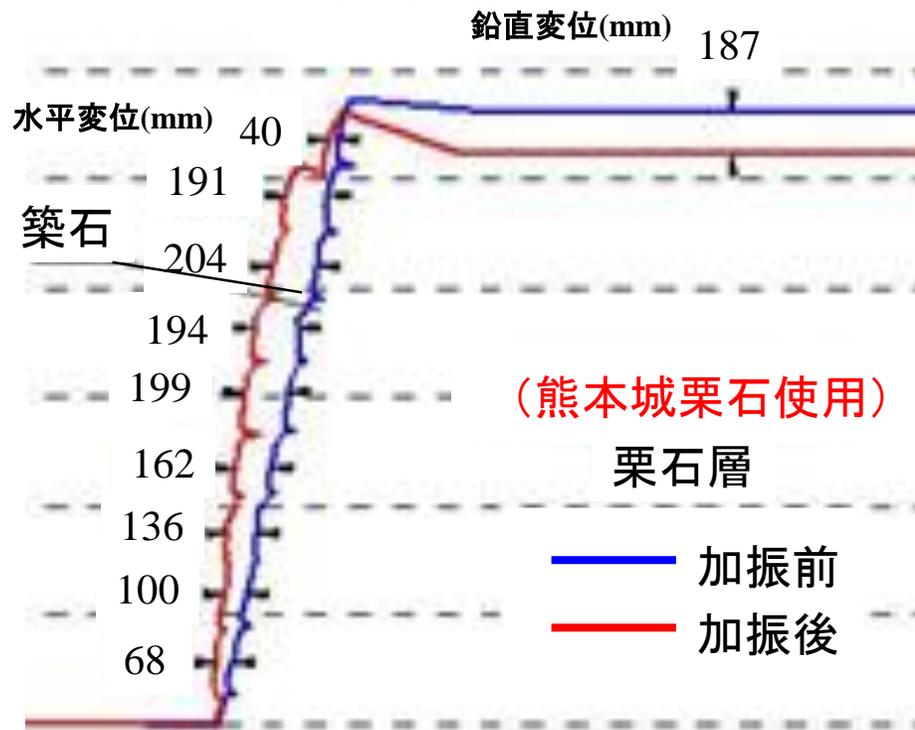
- 計算負荷軽減のため、実験のモデルを加振直行方向に対し垂直方向に3分割
- 隣り合う築石の間に要素を設置

再現解析 変位 (全地震波加振後)



実験結果

解析結果



2022年度：新小委員会の立ち上げ

城郭石垣及び石積擁壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会

- ◆ 委員長：橋本隆雄 ◆ 副委員長：宮島昌克
- ◆ 幹事長：池本敏和 ◆ 幹事：岩津雅也，前田和徳
- ◆ 委員数：32名（2022年4月27日時点）
- ◆ 期 間：2022年4月～2025年3月（3年0ヶ月）

◆活動概要

城郭石垣及び石積擁壁の研究者及び技術者を集めて、過去（熊本城や仙台城等）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。



ご清聴ありがとうございました。