

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

2023年度活動報告および2024年度活動計画

委員長：国土館大学理工学部 橋本 隆雄

1

研究小委員会組織及び活動概要

- ◆ 委員長：橋本隆雄（国土館大学） ◆ 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：前田和徳（岡部株）・岩津雅也（フリー工業株）
- ◆ 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：35名（2024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。

2

2023年度の活動(1)

1) 委員会・WG活動等

- ・ 第1回WG：4月12日 施工実験 8名参加（補強材削孔に関する検討）
- ・ 第2回WG：4月21日 施工実験 8名参加（補強材削孔に関する検討）
- ・ 第3回WG：5月17日 施工実験 10名参加（補強材削孔に関する検討）
- ・ 第4回WG：6月30日 オンライン(Zoom) 7名参加（横浜ブラフ、矢掛町に関する検討）
- ・ 第5回WG：7月17日 曲げ載荷実験 7名参加（矢掛町に関する検討実験）
- ・ 第6回WG：8月 1日 施工実験 8名参加（ウレタンに関する検討）
- ・ 第7回WG：8月 6日 現地検証 6名参加（**横浜ブラフ現地施工検証**）
- ・ 第8回WG：8月 9日 静的載荷実験 6名参加（矢掛町に関する検討実験）
- ・ 第9回WG：8月29日 現地検証 7名参加（**京都御蔭神社補強**に関する検討）
- ・ 第10回WG：8月30日 静的載荷実験 7名参加（矢掛町に関する検討実験）
- ・ 第11回WG：9月11日 静的載荷実験 7名参加（矢掛町に関する検討実験）
- ・ 第12回WG：9月19日～21日 **矢掛町現地試験施工** 12名参加（矢掛町に関する検討）

3

2022年度の活動(2)

- ・ 第13回WG：10月5日 対面+オンライン(Zoom) 9名参加（**岡山県旧野崎邸補強対策**に関する検討）
- ・ 第14回WG：10月16日 静的載荷実験 7名参加（矢掛町に関する検討実験）
- ・ 第15回WG：10月24日 矢掛町確認実験 5名参加（矢掛町に関する検討実験）
- ・ 第16回WG：10月27日 千代田C 6名参加（岡山県旧野崎邸_他補強対策に関する検討）
- ・ 第17回WG：10月30日 日測+オンライン(Zoom) 4名参加（岡山県旧野崎邸_他補強対策に関する検討）
- ・ 第18回WG：11月3日 オンライン(Zoom) 6名参加（岡山県旧野崎邸_他補強対策に関する検討）
- ・ 第19回WG：11月6日 静的載荷実験 6名参加（矢掛町に関する検討実験）
- ・ 第20回WG：11月13日 検証実験(国土館大学) 5名参加（補強対策に関する検討）
- ・ 第21回WG：11月14日 矢掛町施工検討会 7名参加（矢掛町に関する検討）
- ・ 第22回WG：12月4日 検証実験(国土館大学) 4名参加（補強対策に関する検討）
- ・ 第23回委員会：12月6日 対面+オンライン(Zoom)岡部(株)(委員会活動報告、今後の活動方針の打合わせ)
- ・ 第24回WG：12月6日 岡部(株) 8名参加（岡山県旧野崎邸_他補強対策に関する検討）

2022年度の活動(3)

- ・ 第25回WG：12月12日 検証実験(国士舘大学) 5名参加(補強対策に関する検討)
- ・ 第26回WG：12月19日 振動実験(国士舘大学) 10名参加(振動実験に関する検討)
- ・ 第27回WG：1月10日～13日 **振動実験(金沢大学)** 11名参加(補強対策に関する検討)
- ・ 第28回WG：1月23日 岡部(株) 削孔試験6名参加(矢掛町に関する検討)
- ・ 第29回WG：1月30日 現地検証 6名(**上野動物園補強**に関する検討)
- ・ 第30回WG：2月20日 上野動物園検討会 5名参加(上野動物園補強に関する検討)
- ・ 第31回WG：2月27日 オンライン(Zoom) 7名参加(金沢大学振動実験に関する検討)
- ・ 第32回WG：3月7日 事業計画検討会10名参加(今後の事業計画に関する検討)
- ・ 第33回WG：4月26日 現地検証4名参加(**早稲田大学内石積補強**対策)
- ・ 第34回WG：5月1日 施工検討会 8名参加(矢掛町に関する検討他)
- ・ 第35回WG：5月7日 補強対策検討会5名参加(北村邸補強に関する検討)

5

2023年度の活動(4)

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)：

岡山県矢掛(試験施工実験)旅費 45,500円

郡山(現地変状調査)旅費 11,460円

横須賀(ブ 7用擁壁変状調査)旅費 9,732円

金沢(大学実験・金沢城他地震被害調査)旅費 133,308円

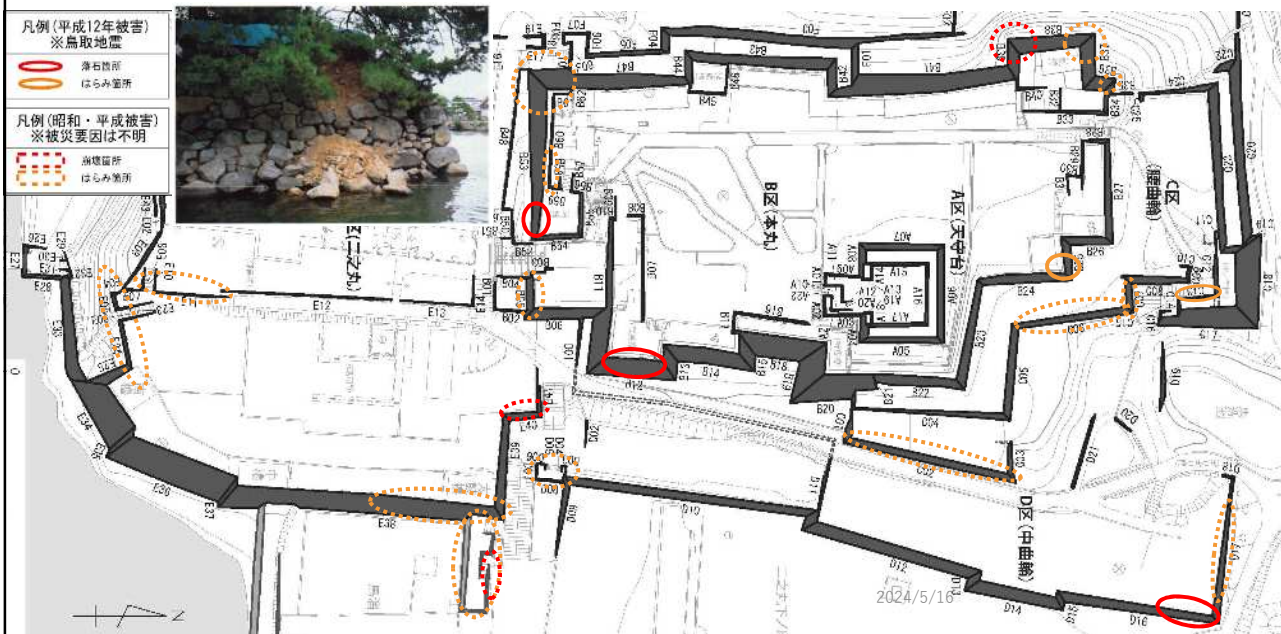
6

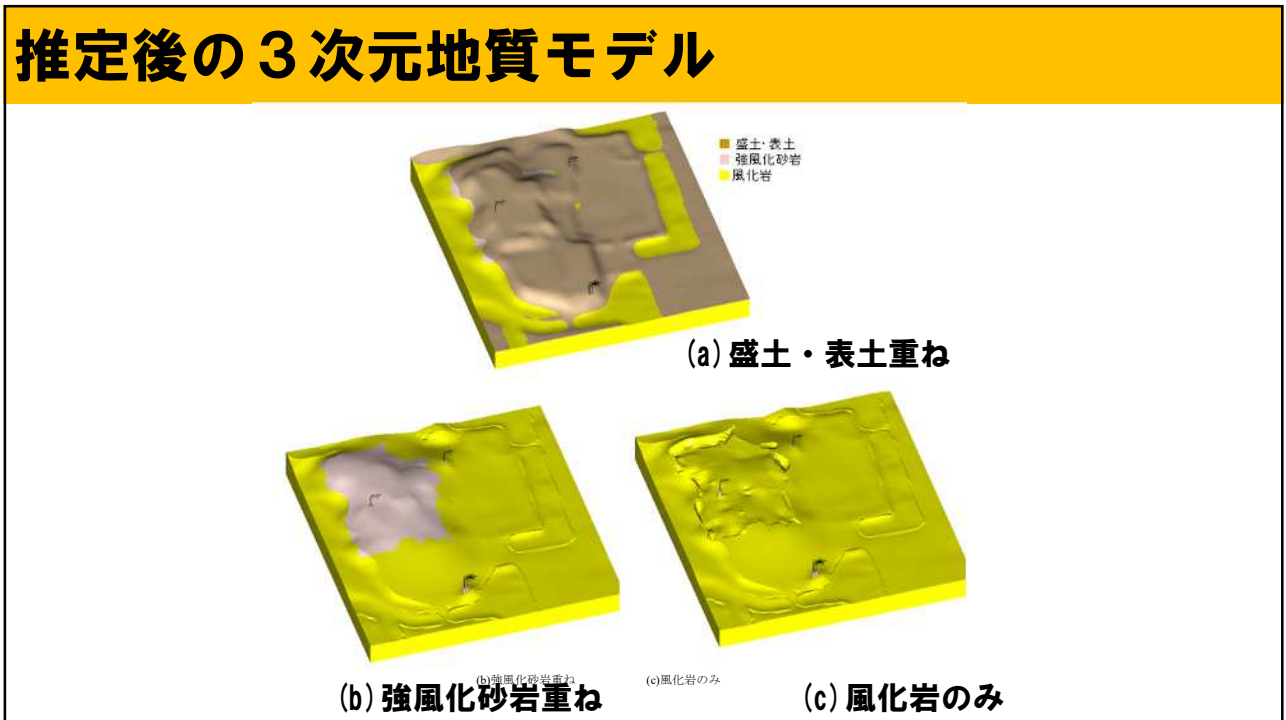
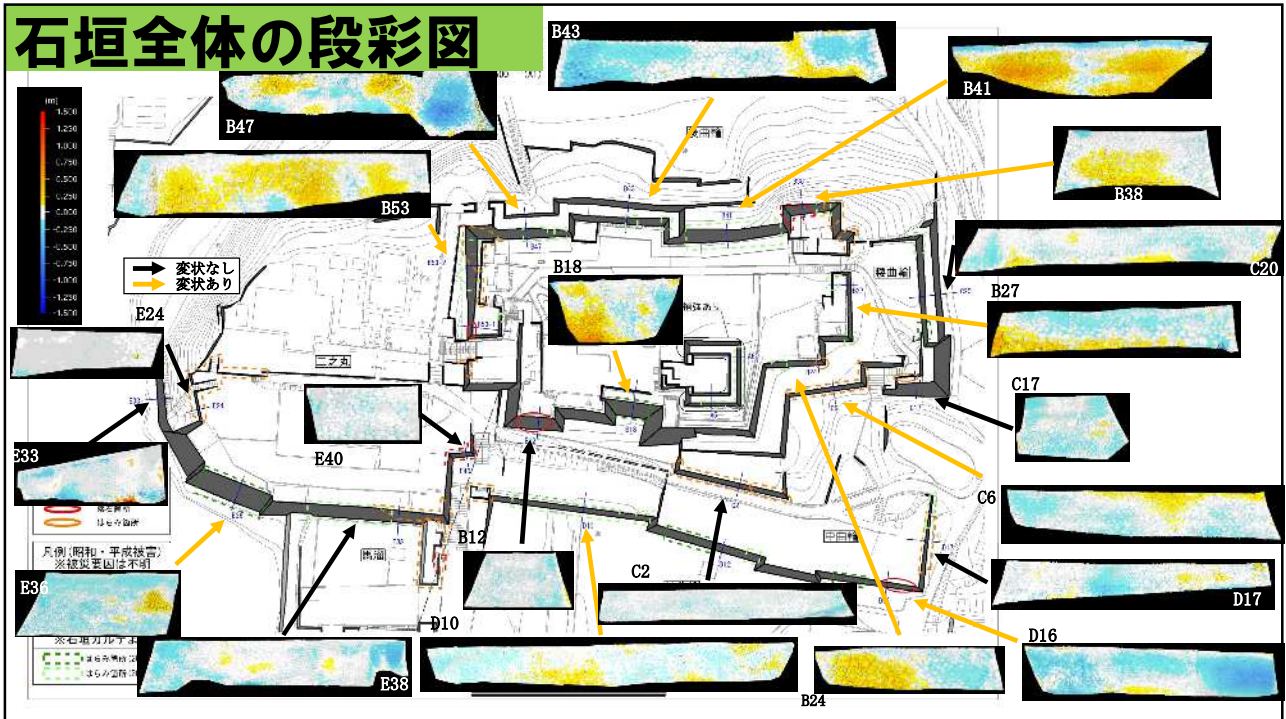


松江城石垣の変状調査及び動的FEM解析による被害分析

国土館大学理工学部特任教授 橋本 隆雄

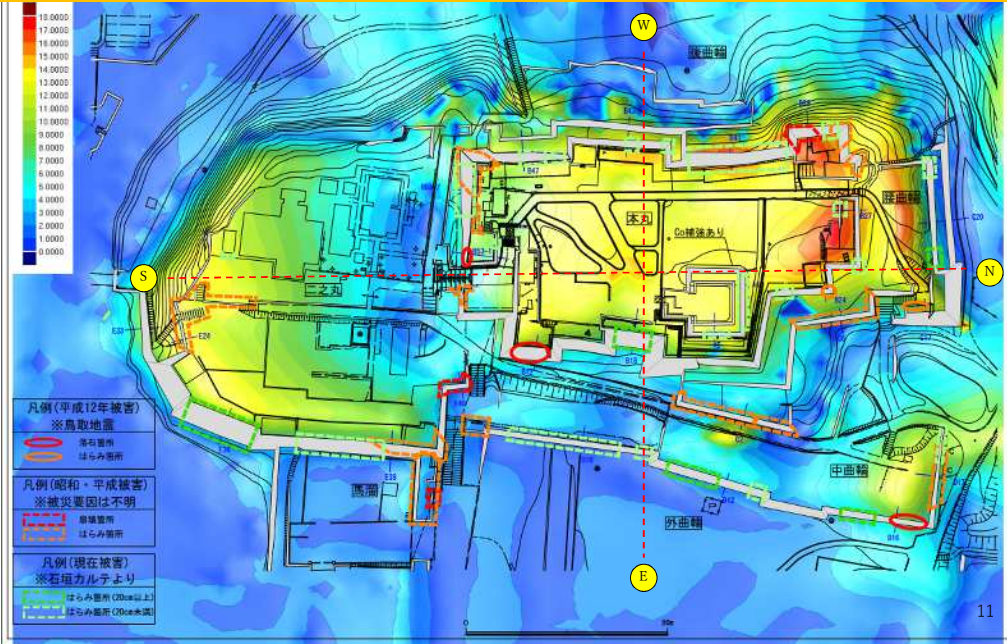
石垣の被害箇所





松江城の盛土・強風化厚さコンター図

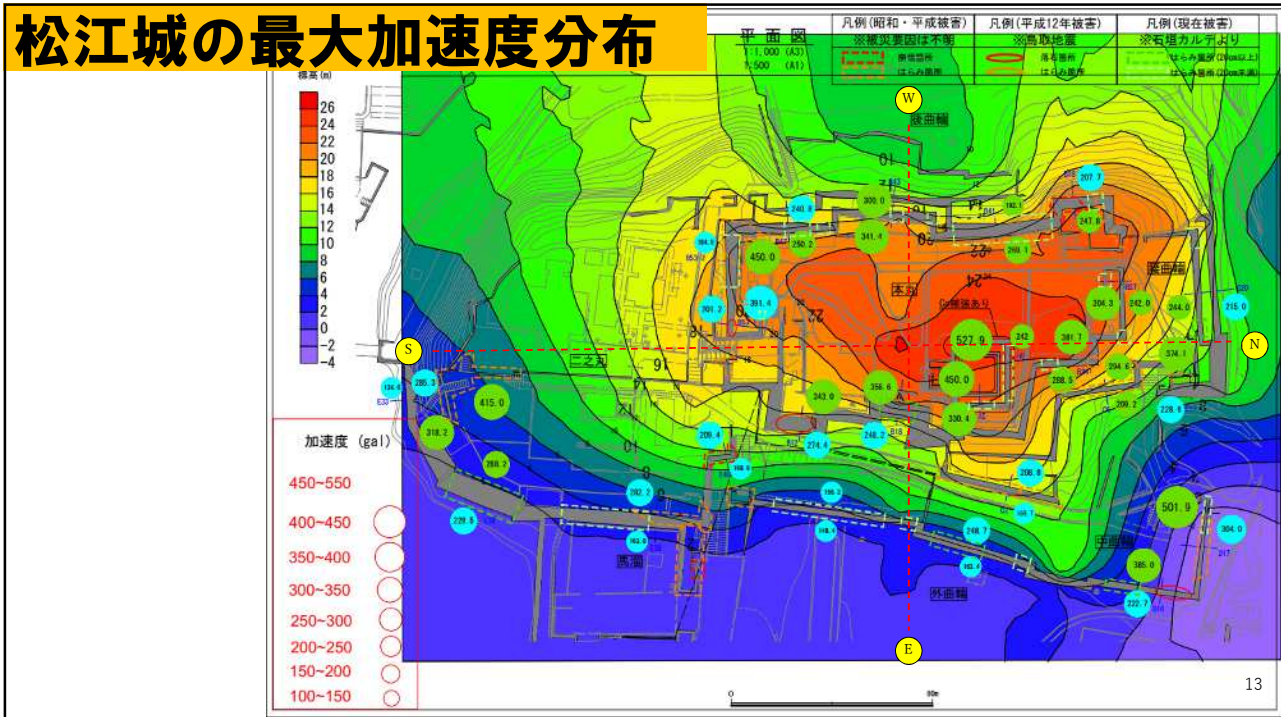
▶ 本丸や二之丸南側が盛土+強風化が厚くなっていることがわかる。



松江城の最大加速度分布



松江城の最大加速度分布



耐震補強工を施した擁壁の地震時挙動をFEMにより再現する試み

○群馬大学

地震工学研究所

国土館大学

ライフライン防災総研

金沢大学

大島吏貴有

須藤皓介

若井明彦

渡邊泰介

橋本隆雄

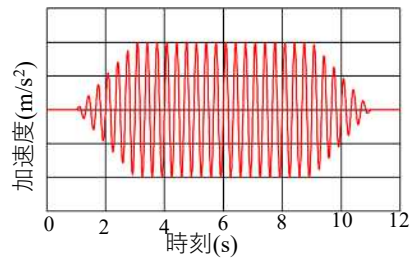
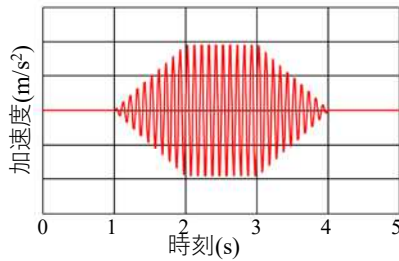
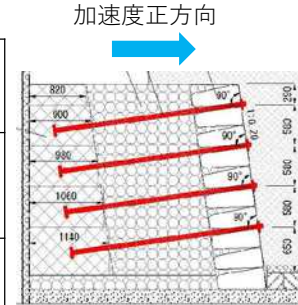
宮島昌克

池本敏和

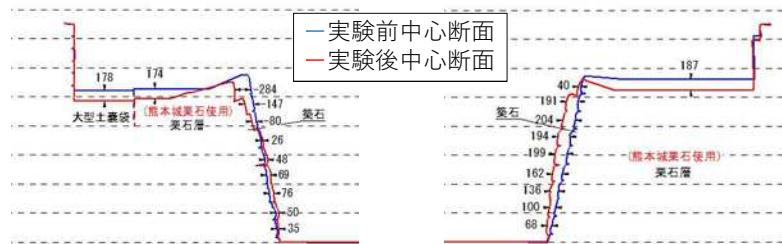
振動台実験概要 入力地震波

最大加速度1.0~6.5m/s²の正弦波30波を各モデルに順に加振

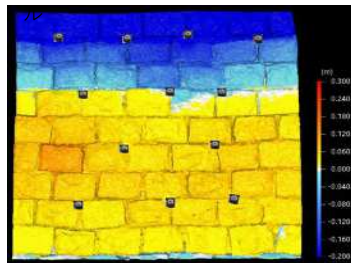
No.	1	2	3	4	5
目標最大加速度 [m/s ²]	1	3	4.5	6.5	6.5
加振波形	正弦波 10Hz			正弦波 3Hz	



振動台実験概要 変位(加振前後比較)



↑ 鉄筋挿入アンカー工法モデル



↑ 変状図(最終加振後)

↑ 無補強モデル



↑ 変状図(最終加振後)

無補強モデルと比較すると、鉄筋挿入アンカー工法モデルははらみ出しの抑制が確認できる。

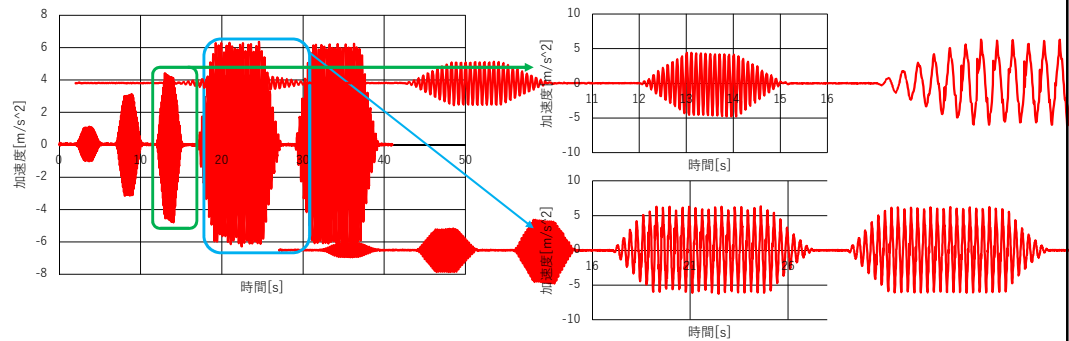
再現解析 解析手法

三次元的弾塑性FEM解析

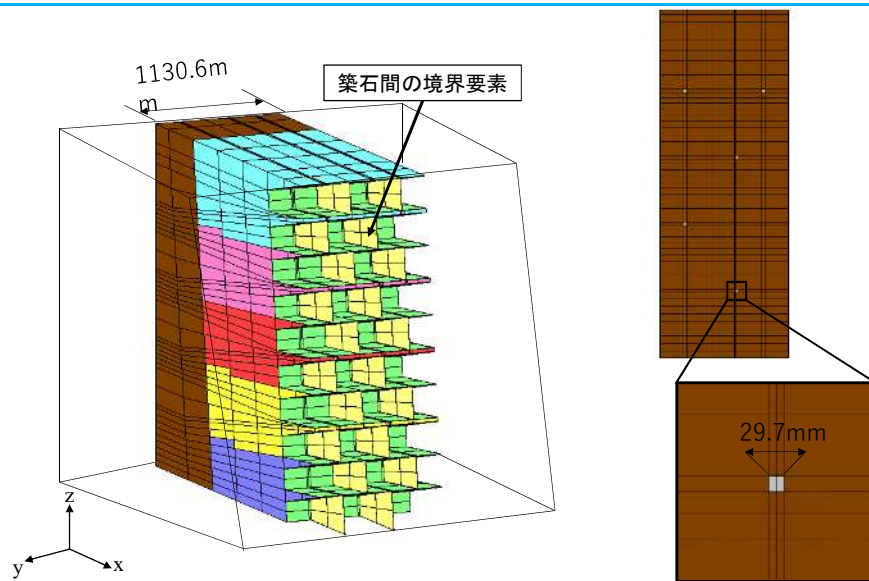
- ・弾塑性有限要素法
- ・材料構成則：MC-DPモデル
- ・加速度を入力した時刻歴応答解析

入力加速度波形

振動台テーブル部で水平加速度計を用いて観測された加速度波形を入力



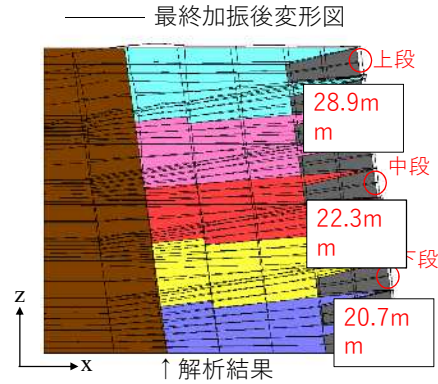
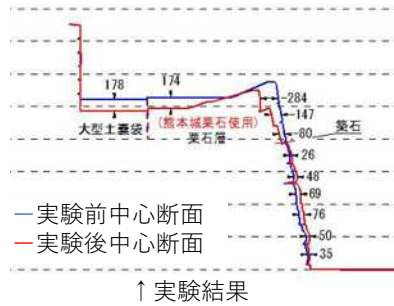
再現解析 有限要素分割図



- 計算負荷の軽減のため、加振直行方向に対し垂直に3分割した中央部を抽出
- 隣り合う築石の間に境界要素を設置

再現解析 残留変位量結果

変形図

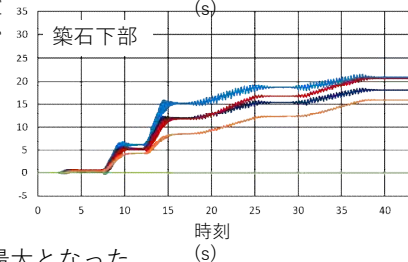
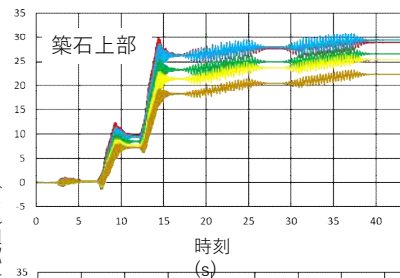
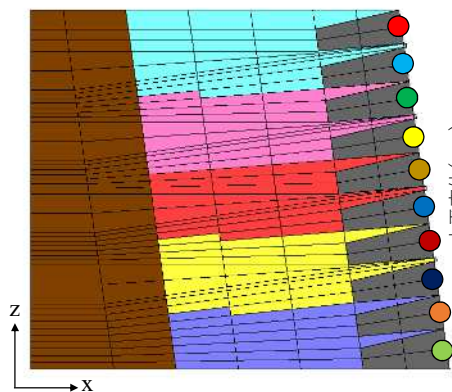


(mm)	上段	中段	下段
実験後残留変位量	-147.0	48.0	50.0
解析後残留変位量	28.9	22.3	20.7

- ・ 築石中段, 下段での変位量抑制効果の確認が出来た
- ・ 築石の上段での実験結果の様なたれかかる挙動は確認されなかった

再現解析 鉄筋挿入アンカー工法モデル 最大 6.5m/s^2 加振時

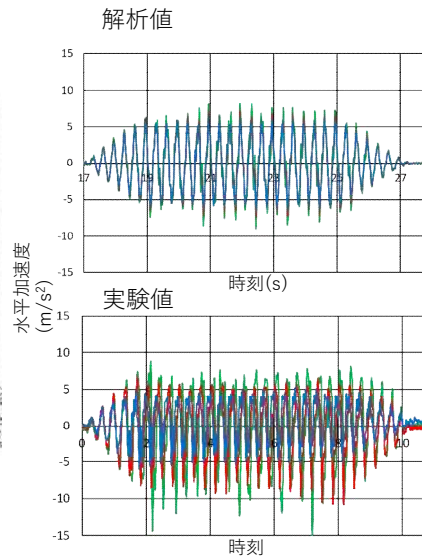
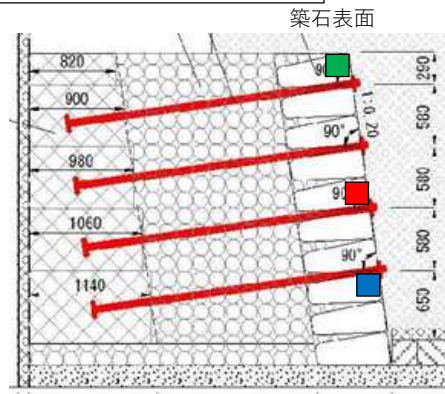
築石表面の水平変位時刻歴



- ・ 上から二番目の水平変位の値が最大となった。
- ・ 4.5m/s^2 加振時に水平変位の増加量が最も大きくなっている。

再現解析 鉄筋挿入アンカー工法モデル 最大 6.5m/s^2 加振時

代表点の水平加速度時刻歴



- ・解析結果は実験結果と比べて、加速度の増幅が小さい
- ・加速度の伝搬の再現が完全には為されていない

石垣の大型振動台実験に対する SPH-DEM解析シミュレーション

法政大学 張 宸千
法政大学 酒井 久和

対象実験の概要

③



振動台写真

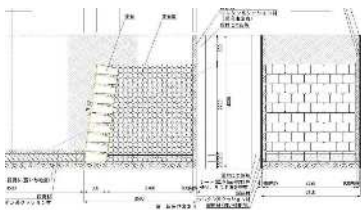
正弦波10Hzと3Hzの加速度
8ステップに分けて加振

実験ケース	説明
粒度調整栗石モデル	栗石に碎石を混入させ、密度の調整を行うことで、間隙部を粒径の小さい碎石等で充填し、栗石の他に碎石との摩擦を確保してインターロッキング効果を期待する工法
手積みモデル	手積みにより栗石層の空隙低減と噛み合わせ効果を期待する工法
ジオテキスタイル巻込みモデル	近代工法のひとつであるジオテキスタイルとアンカーが用いられた。築石表面に受圧板を設けアンカーにより連結して一体化な補強を図るものである
長石・押石補強モデル	押石と長石により石組み補強する工法
鉄筋挿入アンカー工法モデル	栗石背後地盤内にアンカー体を拡張して築石前面にアンカーの受圧板を設置して築石及び背後の栗石の沈下や側方移動を緊張により崩壊しないようにものである
筒状固結アンカー工法モデル	アンカー体をグラウト補強し、栗石間の隙間にウレタン注入かつ築石前面にアンカーの受圧板を設置して築石及び背後の栗石の沈下や側方移動を緊張により崩壊しないようにものである

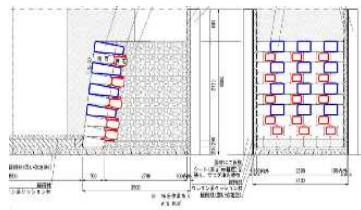
解析対象の概要

④

模型断面図:

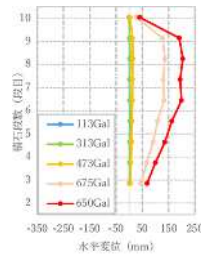
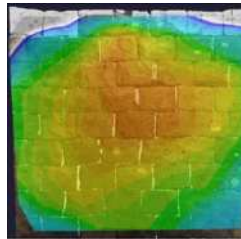


手積みモデル：
手積みより栗石層の空隙低減と噛み合わせ効果を期待する工法



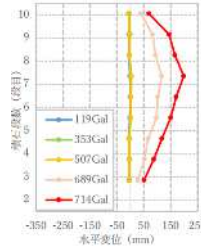
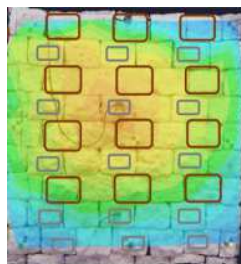
押石補強モデル：
押石と長石により石組み補強した工法

実験結果:



特徴:

- ◆ 壁側の築石よりも中央部が大きく孕み出し
- ◆ 最終の変位量が200mmを超えている

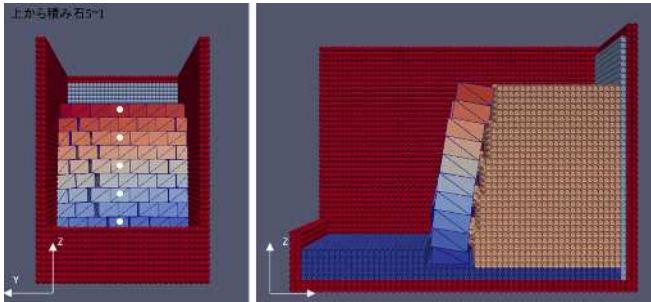


特徴:

- ◆ 壁側の築石よりも中央部が大きく孕み出し
- ◆ 長石がないところで手積みモデルよりも変位が小さくなっている
- ◆ 最終の変位量が150mmに抑制されている

無対策モデルの解析結果

⑩

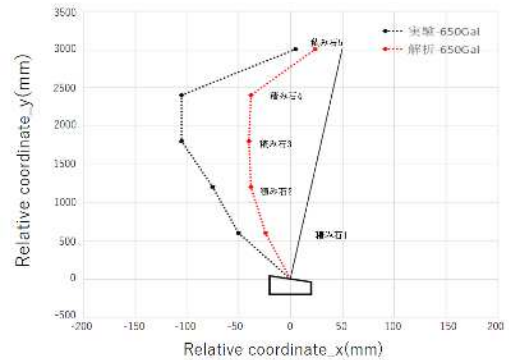


650Gal加振後

650Gal加振後：

- ◆ すべての築石の変位量が80mm以下
- ◆ 変位量は、解析が実験の約5割と過小評価
- ◆ 実験と変形モードがほぼ整合

積み石の番号	1	2	3	4	5
基準からの 変位(mm)	解析 34.0	58.6	70.5	78.2	26.5
	実験 64.0	91.0	147.0	153.0	45.0

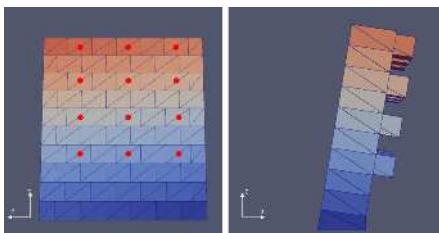


無対策モデル

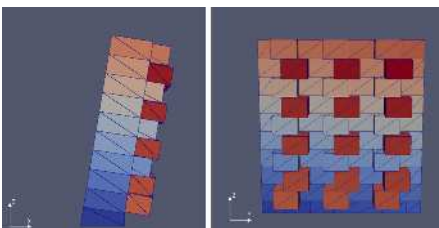
押石モデルの構築

⑪

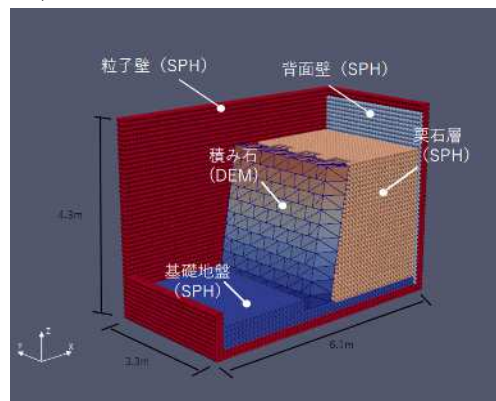
長石要素



押石要素



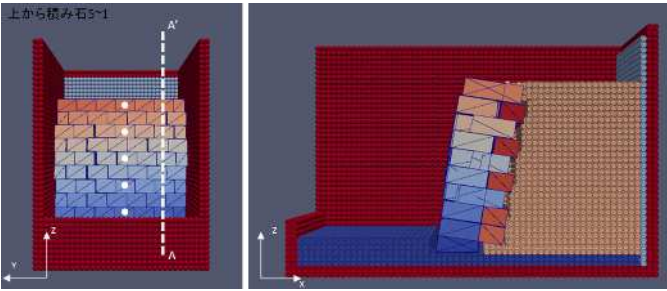
押石モデル



- ◆ 粒子間隔：0.1m
- ◆ 総粒子数：43,882個
- ◆ 境界条件：底面・側面固定
- ◆ 構成則：弾完全塑性モデル

押石モデルの解析結果

⑩

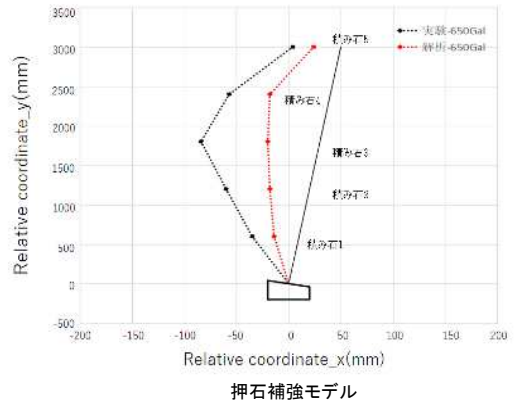


650Gal加振後

650Gal加振後：

- ◆ すべての築石の変位量が60mm以下
- ◆ 変位量は実験より過小評価
- ◆ はらみだし最大の積み石が若干異なる
- ◆ 最大変位量は、解析が実験の約5割

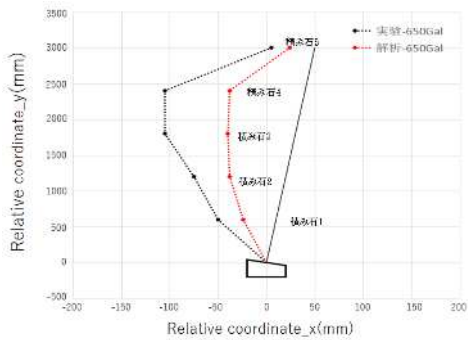
積み石の番号	1	2	3	4	5
解析	22.0	46.1	50.1	57.4	21.6
実験	48.0	70.0	101.0	94.0	42.0



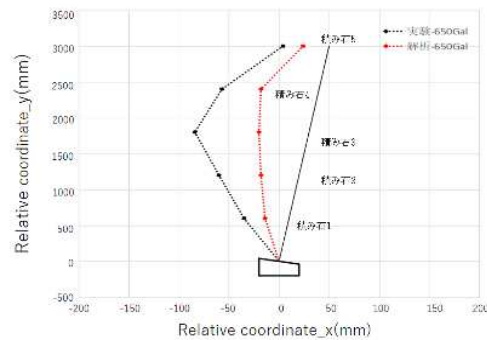
押石補強モデル

解析結果の比較

⑪



無対策モデル (650Gal加振後)



押石モデル (650Gal加振後)

		積み石の番号	1	2	3	4	5
解析	基準からの 変位 (mm)	無対策	34.0	58.6	70.5	78.2	26.5
		押石	22.0	46.1	50.1	57.4	21.6
実験	基準からの 変位 (mm)	無対策	64.0	91.0	147.0	153.0	45.0
		押石	48.0	70.0	101.0	94.0	42.0

解析 押石モデルが無対策モデルの変位量約7割
 実験 押石モデルが無対策モデルの変位量約6割



ほぼ同等な補強効果を得られた
 築石の孕み出し抑制効果を示す

模型振動台実験によるウレタンと地山補強土工法を用いた石積み擁壁補強工法の安定性評価

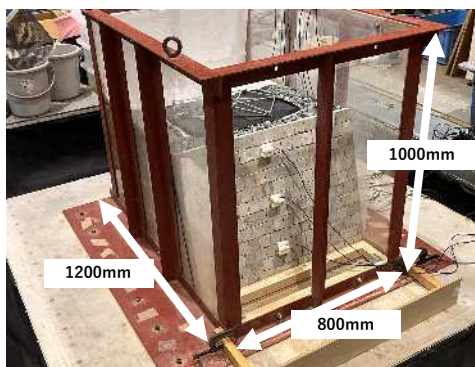
2023.7.13

文化財石垣・石積擁壁補強技術協会
 金沢大学(現パシフィックコンサルタンツ株式会社)
 金沢大学
 日鉄建材株式会社
 国土館大学

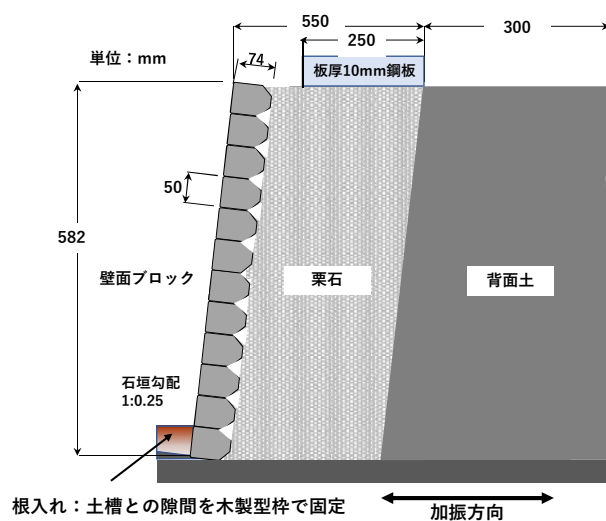
岩佐 直人
 西山 大貴
 池本 敏和
 堀 謙吾
 橋本 隆雄

3. 模型振動台実験概要

- スケール：1/6
- 高さ：582mm（12段）（実寸3.5m）
- 勾配：1:0.25



実験時状況



実験寸法

➤ 計測機器設置箇所

加速度

振動台
築石 3,7,11段目
栗石 3,7,11段目

土圧

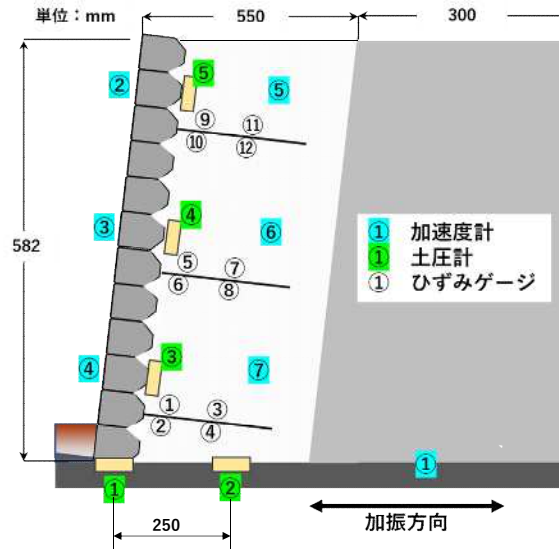
築石下
栗石下
築石裏 3,7,11段目

ひずみ

2,6,10段目のアンカー
ブロック側
背面土側

変位

3D計測
築石の水平変位
栗石の沈下量



加速度・土圧・ひずみは中央断面において計測

31

➤ 入力波

入力波

波形：正弦波
振動数：5Hz
振動時間：5sec

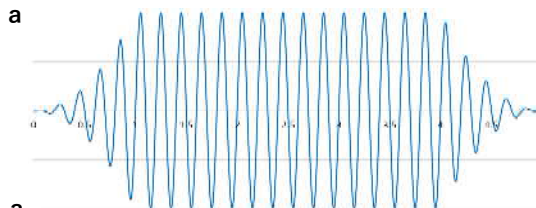
香川の相似則¹⁾：1/6スケール

実地震動

波形：正弦波
振動数：1.3Hz
振動時間：19.2sec

香川の相似則¹⁾(一部抜粋)

	実物	模型
スケール	1	1/λ
振動数	1	λ ^{3/4}
加速度	1	1

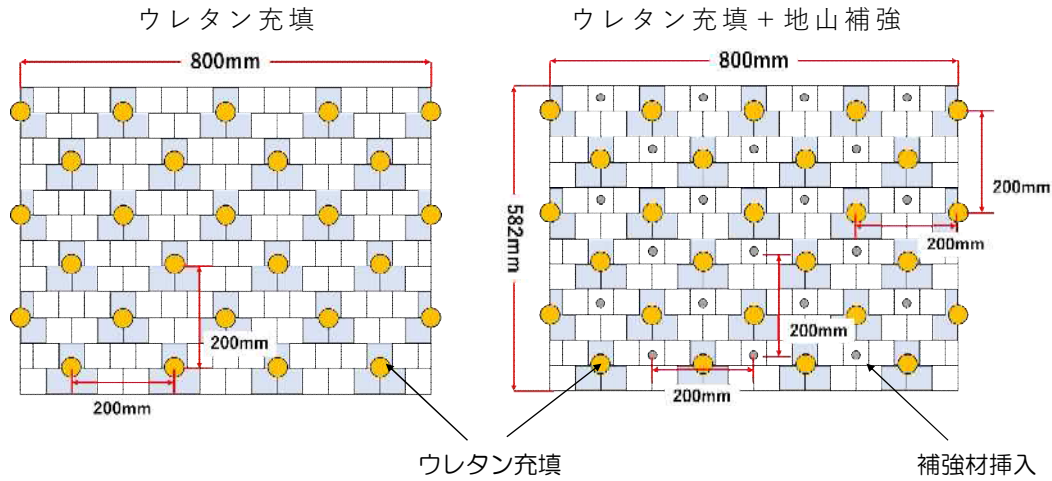


入力波 (a: 加速度振幅)

¹⁾香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集，No.275，pp.69-77，1978.

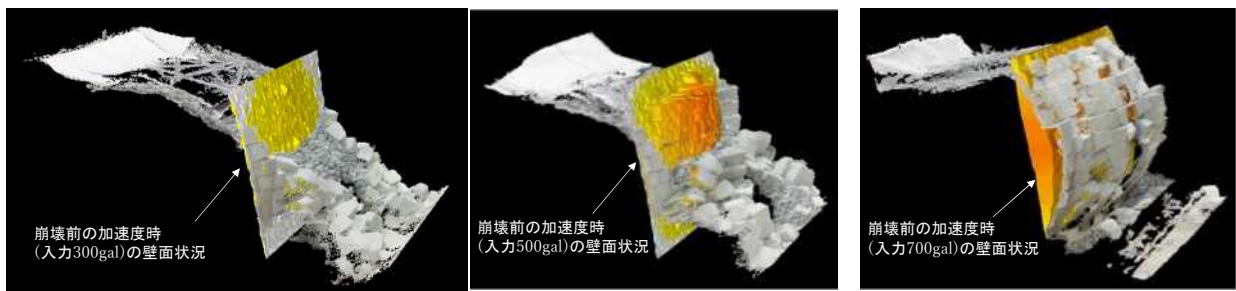
32

▶ 実験条件（ウレタン充填、補強材配置）



33

4. 模型振動台実験結果と考察



(a) 無対策（崩壊）

応答加速度357gal

(b) ウレタン充填のみ（崩壊）

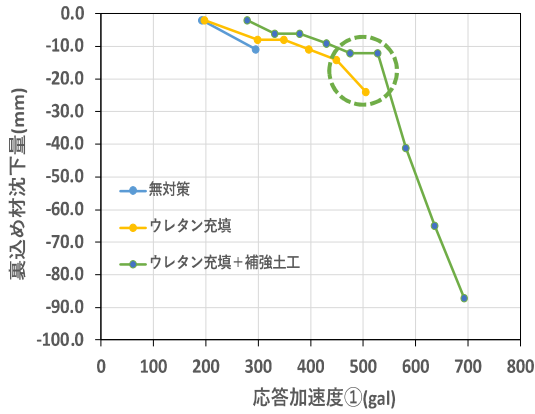
応答加速度574gal

(c) ウレタン充填+補強土工

応答加速度789gal

完全に崩壊に至らず、ウレタン
充填固結後のブロック落下

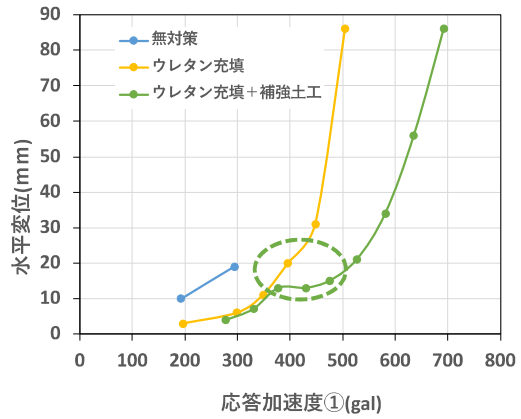
崩壊前及び崩壊加速度時における石積み擁壁の状況
(3Dレーザー計測)



応答加速度①と天端沈下量 (ブロック背後) の関係

応答加速度 0~400gal

応答加速度400~500gal



応答加速度①と水平変位 (ブロック下から6段目) の関係

天端沈下量、水平変位が同程度

ウレタン充填+補強土工の天端沈下量、水平変位が抑制



ご清聴ありがとうございました。