

2019年5月13日土木学会地震工学委員会第1回研究会

城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会

2018年度活動報告及び2019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

委員名簿(1)

委員長 橋本 隆雄 国土館大学
幹事長 池本 敏和 金沢大学

副委員長 宮島 昌克 金沢大学
副幹事長 岩津雅也 フリー工業

委員職区分	氏 名	氏名ふりがな	勤務先名称	勤務先所属部署	委員職区分	氏 名	氏名ふりがな	勤務先名称	勤務先所属部署
特別委員	西岡 聡	にしおか さとし	文化庁	文化庁文化財部参事官(建造物担当) 震災対策部門 文化財調査官	委員	久保 幹男	くぼ みさお	エターナルプレザード株式会社	代表取締役
特別委員	清永 洋平	きよなが ようへい	文化庁	文化庁文化財部参事官(建造物担当) 修理企画部門 文化財調査官	委員	倉持 欣史	くらもち よしふみ	アキレス株式会社	開発営業部
委員長	橋本 隆雄	はしもと たかお	国土館大学	理工学部 まちづくり学系教授	委員	小林 光夫	こばやしみつお	雄測量設計株式会社	
副委員長	宮島 昌克	みやじま まさかつ	金沢大学	理工研究域環境デザイン学系 教授	委員	近藤 和仁	こんどう かずひと	共和コンクリート工業㈱	技術部長
幹事長	池本 敏和	いけもと としかず	金沢大学	理工研究域環境デザイン学系 講師	委員	齊藤 猛	さいとう たけし	㈱ジオフィール	会長
副幹事長	岩津 雅也	いわつ まさや	フリー工業㈱	建材事業部 技術部長	委員	酒井 英男	さかい ひでお	富山大学	大学院理工学研究部(理学)地球生命環境系教授
委員	勝路 一雄	あとし かずお	中村建設株式会社		委員	酒井 久和	さかい ひさかず	法政大学	デザイン工学部 都市環境デザイン工学科教授
委員	池本 宏文	いけもと ひろふみ	東日本旅客鉄道株式会社	JR東日本研究開発センター	(学生)	篠崎 将也	しのざき しょうや	法政大学	4年
委員	石作 亮也	いしつり かつや	㈱日 測		(学生)	堀井 将佳	ほりい えりか	法政大学	M2
委員	岩佐 直人	いわさ なおと	日産住宅建材㈱	土木商品事業部門	(学生)	大塚 颯	おおつか おさむ	法政大学	M2
委員	伊 元彪	い 元彪	㈱新紀元総合コンサルタンツ	代表取締役	(学生)	伊吹 竜一	いぶき りゅういち	法政大学	M2
委員	大角 恒雄	おおすみ つねお	(研)防災科学技術研究所	社会防災システム研究部門	(学生)	西村 駿吾	にしむら しゅんご	法政大学	4年
委員	大山 謙吾	おおやま けんご	前田工機㈱	補強土排水推進部 主査	(学生)	森田 大成	もりた たいせい	法政大学	4年
委員	小野 祐輔	おの ゆうすけ	鳥取大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻	委員	境 吉彦	さかい よしひこ	鹿島建設株式会社	東北支店 土木部 技術設計グループ
委員	アイデン オイル	アイデン オイル	琉球大学 工学部	環境建設工学科 教授	委員	清水 敏孝	しみず としたか	メインマーク アクアテック株式会社	代表取締役
委員	金子 恵太	かねこ けいた	株式会社 アートコーポレーション	取締役 営業本部長					
委員	金田 学	かねた まなぶ	中村建設株式会社	土木工事部 シビルデザイングループ長					

2

委員名簿(2)

委員職区分	氏 名	氏名ふりがな	勤務先名称	勤務先所属部署	委員職区分	氏 名	氏名ふりがな	勤務先名称	勤務先所属部署
委員	清水 浩之	しみず ひろゆき	鹿島建設株式会社	土木設計本部	委員	堀 謙吾	ほり けんご	日曜住宅建材㈱	土木商品開発部
委員	末富 岩雄	すえとみ いわお	株式会社 エイト日本技術開発	東京支社 防災保全部 耐震・保全グループ	委員	前田 和徳	まえだ かずのり	岡部㈱	技術開発部 土木グループ 土木開発グループ 部長
委員	杉本 年也	すぎもと としや	九条コンクリート工業(株)	品質保証部 部長	委員	松尾 拓	まつお たく	㈱日 測	測量部
委員	鈴木 彰加	すずき さやか	㈱アミック	主任	委員	松原 伸之	まつばら のぶゆき	平和コンクリート工業㈱	営業部技術課
委員	鈴木 誠	すずき まこと	岡部㈱	土木事業部 技術部 課長	委員	茂木 正敏	もぎ まさとし	株式会社構造計画研究所	エンジニアリング営業1部
委員	竹中 一	たけなか はじめ	前田工機㈱	東京営業部 営業課長	委員	望月 秀洋	もちづき ひでひろ	雄測量設計株式会社	
委員	田中 弘栄	たなか ひろしげ	アキレス株式会社	開発営業部 課長	委員	本橋 俊之	もとはし としゆき	(株)大阪防水建設社	東京支店 技術部
委員	直井 賢二	なおい けんじ	エターナルプレザープ株式会社	セールスエンジニアリング 課長	委員	山中 稔	やまなか みのる	香川大学	工学部安全システム建設工学科
委員	長岡 康之	ながおか やすゆき	㈱アミック	代表取締役社長	委員	吉田 雅穂	よしだ まさほ	福井工業高等専門学校	環境都市工学科 教授
委員	名倉 光俊	なくら みつとし	㈱文化財保存計画協会		委員	若井 明彦	わかい あきひこ	群馬大学	理工学研究院環境創生部門 教授
委員	萩原 育夫	はぎはら いくお	サンコーコンサルタント(株)	技術本部 技術管理部	(学生)	板東 直哉	ばんどう なおや	群馬大学	大学院
委員	横ヶ谷直之	はしがや なおゆき	アサヒエンジニアリング株式会社	営業部長	委員	渡辺 高志	わたなべ たかし	株式会社構造計画研究所	防災・環境部
委員	横本 光男	はしもと みつお	職業能力開発総合大学校	名誉教授	委員	渡邊 尚	わたなべ ひさし	一般財団法人 砂防フロンティア整備推進機構	研究第二部 主任研究員
委員	福島 康宏	ふくしま やすひろ	株式会社 エイト日本技術開発	東京支社 防災保全部 耐震・保全グループ					

2名文化庁（オブザーバー）+ 57名委員の協力

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。

研究内容

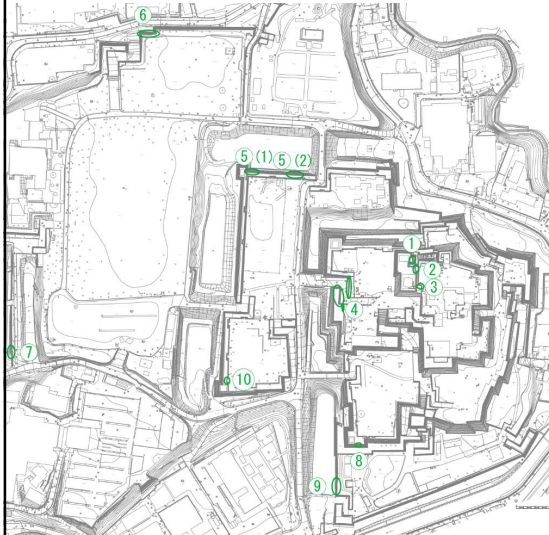
- (1) 被害調査WG :
石垣の**地震被害事例の調査・分析**
- (2) 非破壊探査WG :
石垣の**非破壊検査手法の確立**
- (3) 実験WG : 各種補強対策を施した石垣の
モデル実験による検証
- (4) 解析WG : 被害事例及び各種補強対策を
施した石垣の**解析による検証**
- (5) 施工WG : 石垣の**補修・補強対策**

5

■被害調査WG :
高い石垣がなぜ壊れなかったの？

6

熊本地震による石垣の被害状況

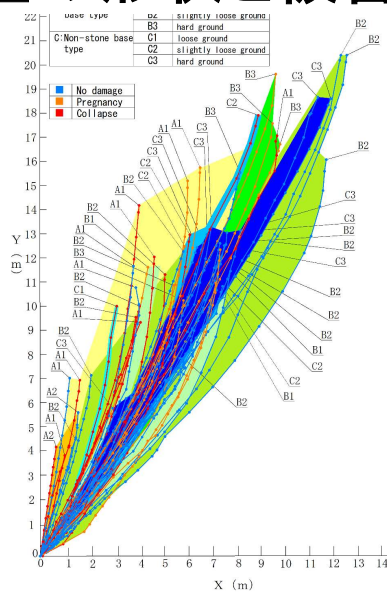


(a) 前震

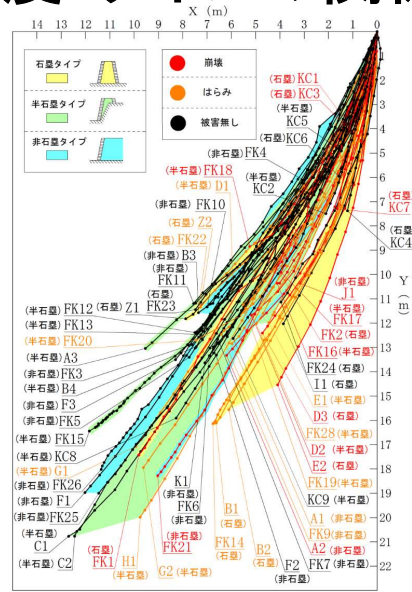


(b) 本震

石垣の形状と被害程度・タイプの関係



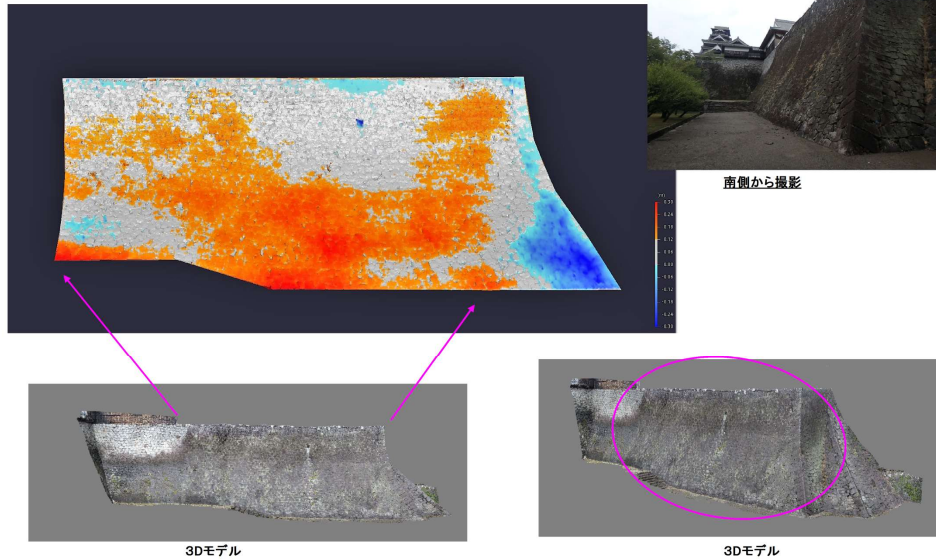
(a) 法尻からの形状



(b) 法肩からの形状

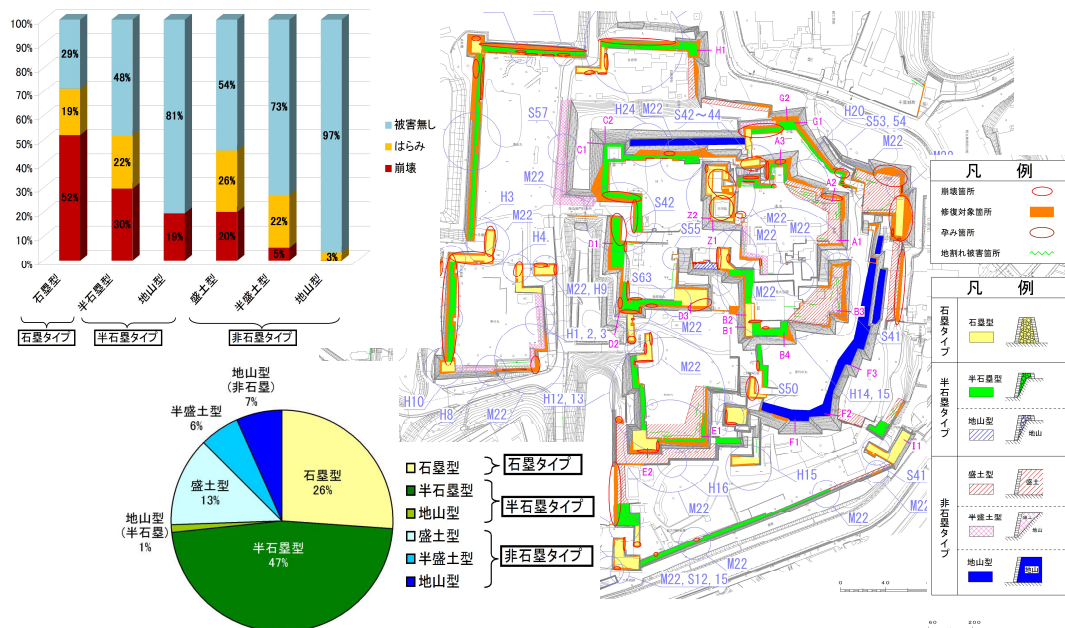
二様の石垣孕み分析図(段彩図:S59比較)

二様の石垣(段彩図:S59桑原データ比較)



9

詳細な石垣タイプ毎の被害程度



10

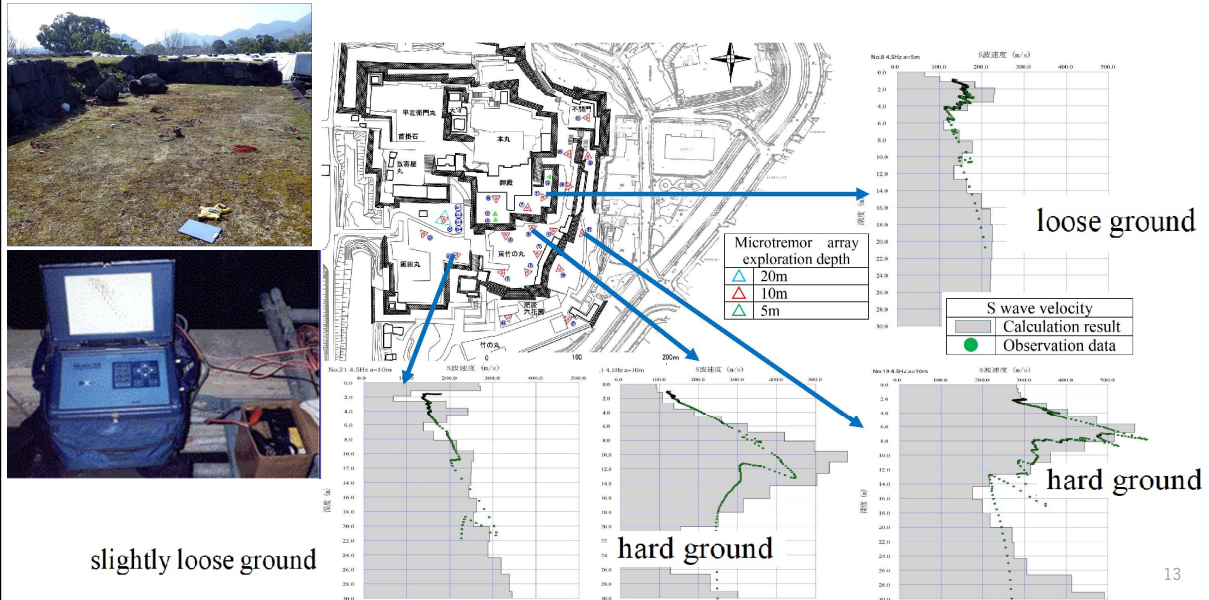
■非破壊探査WG： 石垣の地盤はどうか？

11

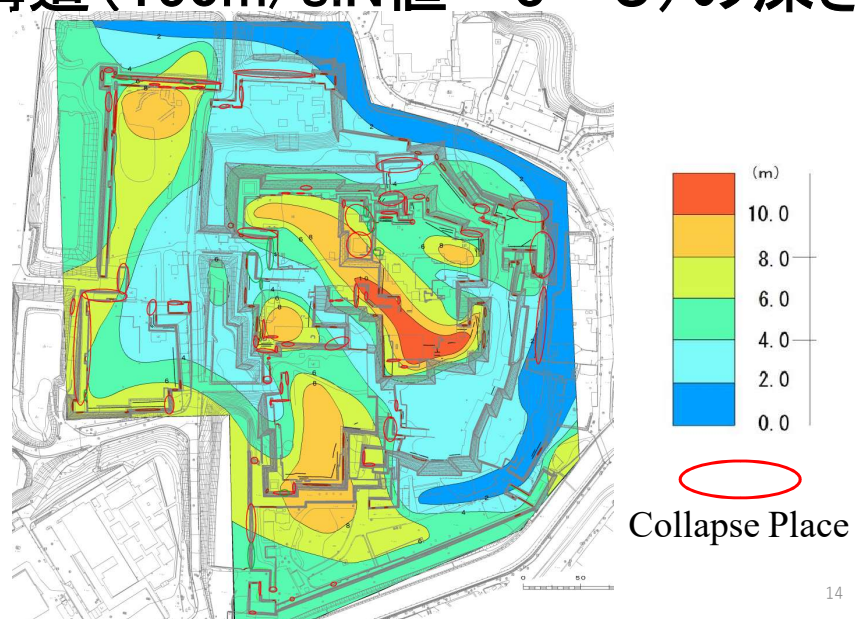
表面波探査結果



微動アレイ探査結果



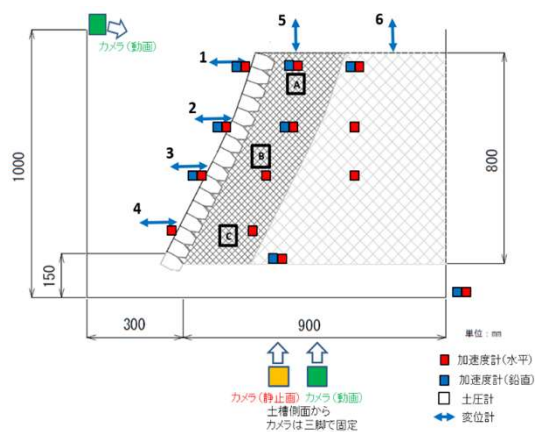
S波速度構造(150m/s:N値=3~5)の深さ



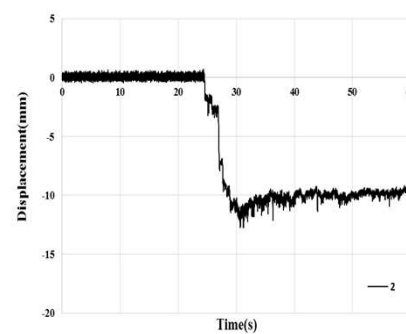
■ 実験WG： 複雑な構造の石垣について実験で再現できる？

15

石垣模型の振動台実験の状況



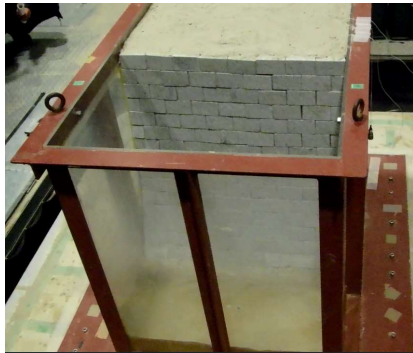
(a) 計測機器配置図



(b) 土圧の計測結果

16

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

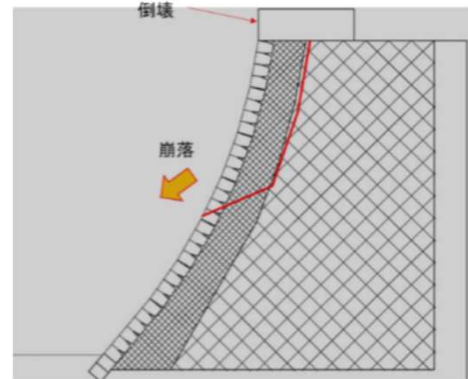
17

■解析WG：

複雑な構造の石垣について解析で再現できる？

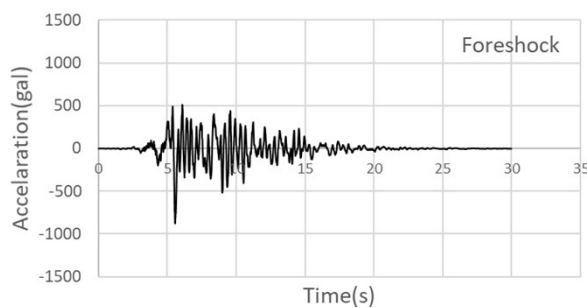
18

北十八間櫓の石垣崩壊の様子

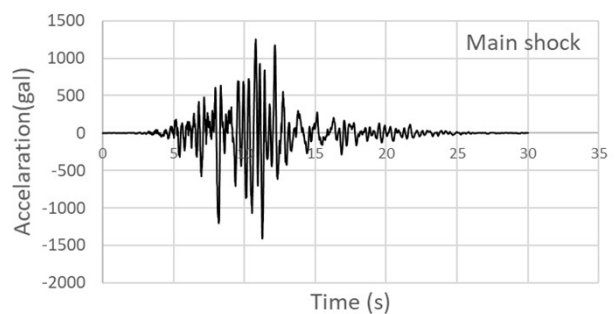


21

DDA解析法による崩壊シミュレーション



(a) 前震

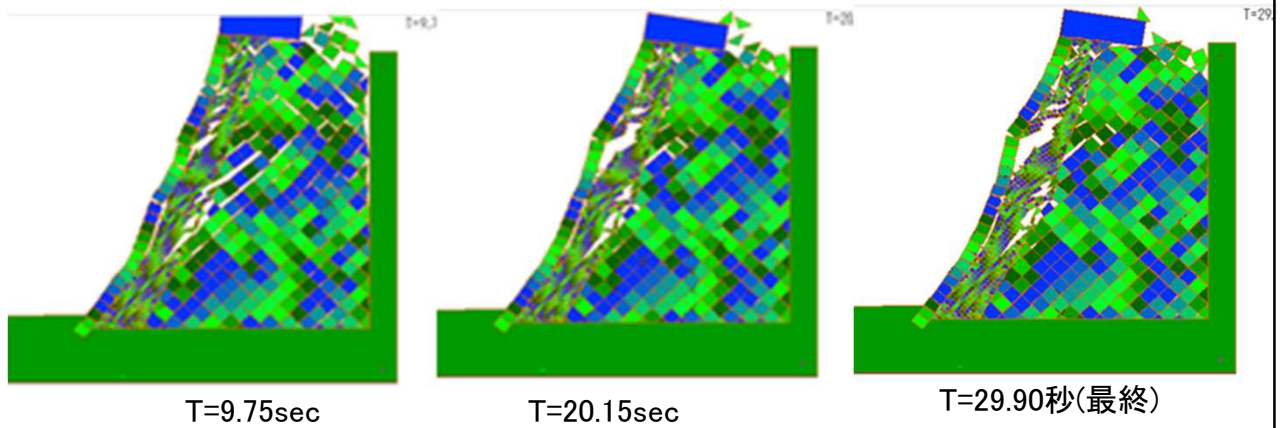


(b) 本震

解析モデルへの推定水平入力波形(前震, 本震)

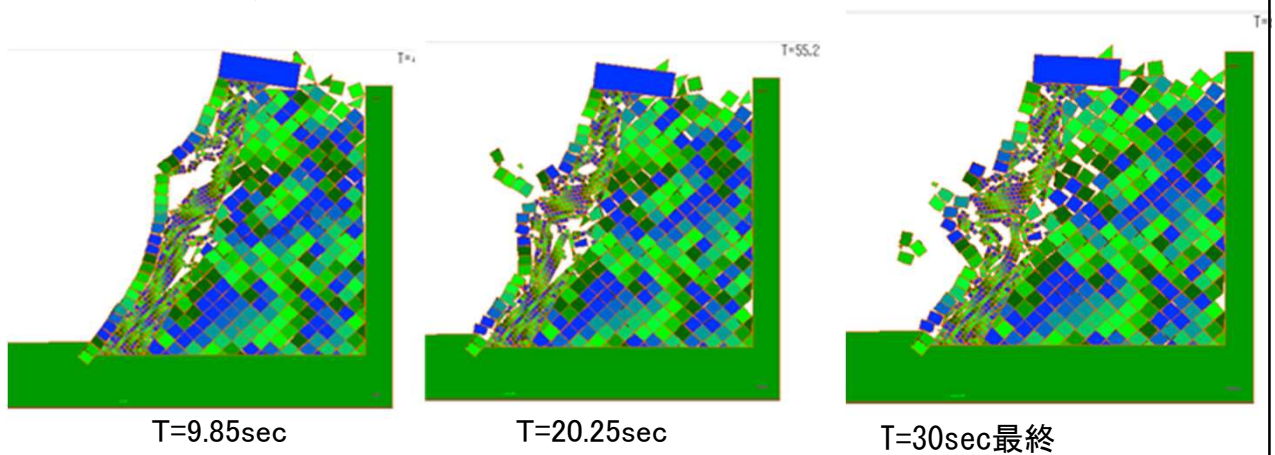
22

前震後までの石垣の変形挙動



23

本震後までの石垣の変形挙動



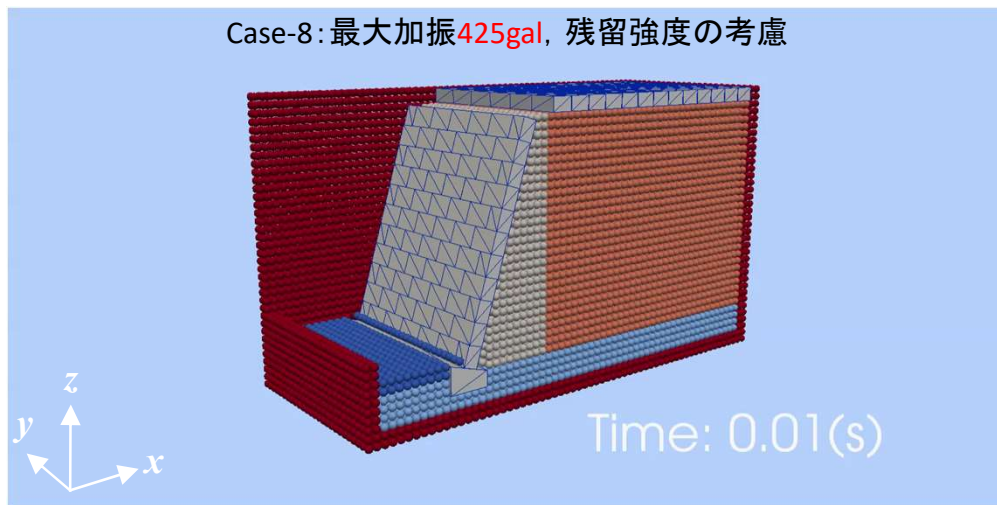
24

5. 3次元SPH-DEM解析

解析結果 Case-8 (425gal加振)

16/21

Case-8: 最大加振425gal, 残留強度の考慮



残留強度の考慮によって擁壁が大きく変形 → 崩壊には至らない (Case-7も同様)

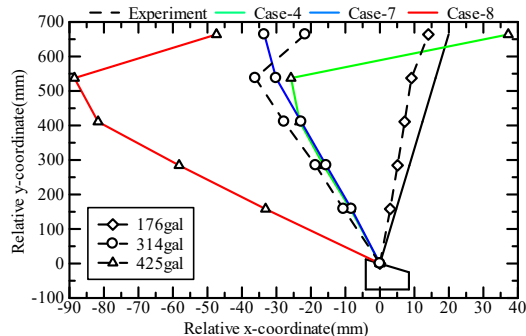
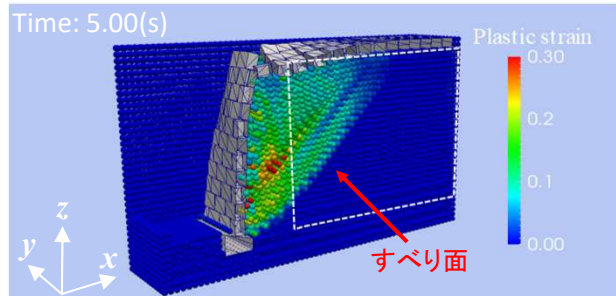
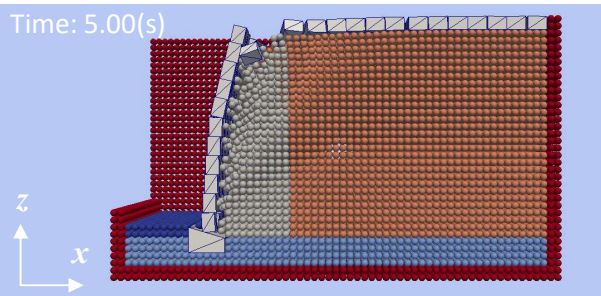
314gal加振

25

5. 3次元SPH-DEM解析

解析結果 Case-8 (425gal加振)

17/21



Case-7: 擁壁の変位量・変形形状が実験と概ね一致

314gal加振

Case-8: 擁壁の変形形状を定性的に再現

425gal加振

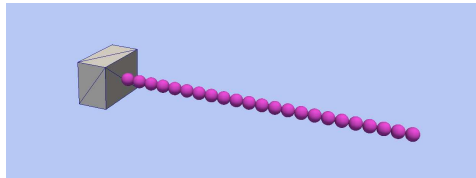
・崩壊時の加振レベルは再現できなかった
→ 加振前の初期状態における安定性を過大評価

5. 3次元SPH-DEM解析

補強工法の考慮

18/21

◆ 地山補強材のモデル化



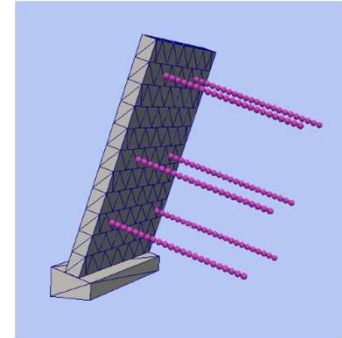
DEM粒状要素を23個連結

	実験種類	入力加速度
Case-9	振動実験	759gal加振
Case-10	振動実験	822gal加振

補強材を考慮した擁壁モデル



★:補強材モデル

実験と同様の6箇所²に補強材を設置

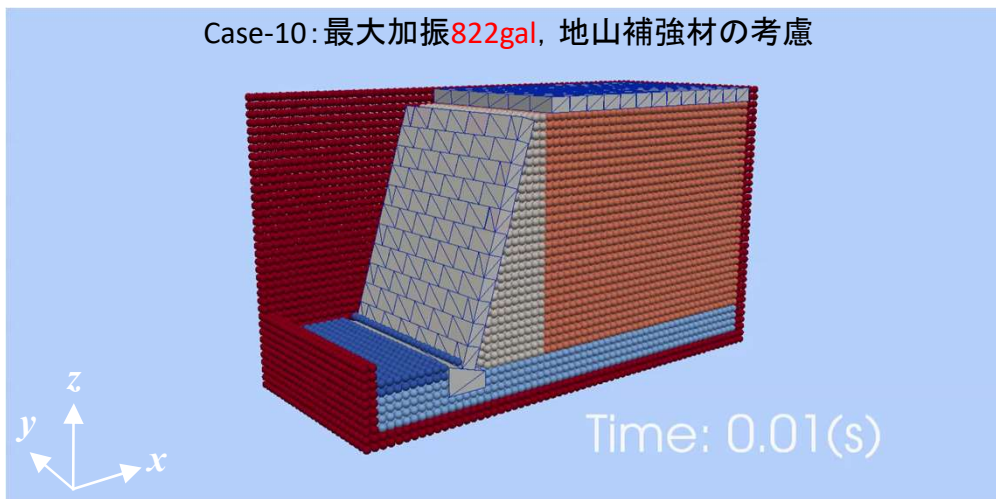
27

5. 3次元SPH-DEM解析

解析結果 Case-10(822gal加振)

19/21

Case-10: 最大加振822gal, 地山補強材の考慮



補強材によって擁壁全体の崩壊・背面地盤の変形が抑制

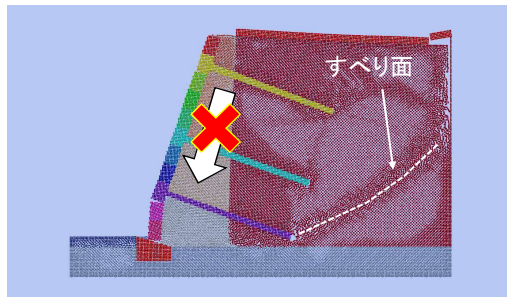
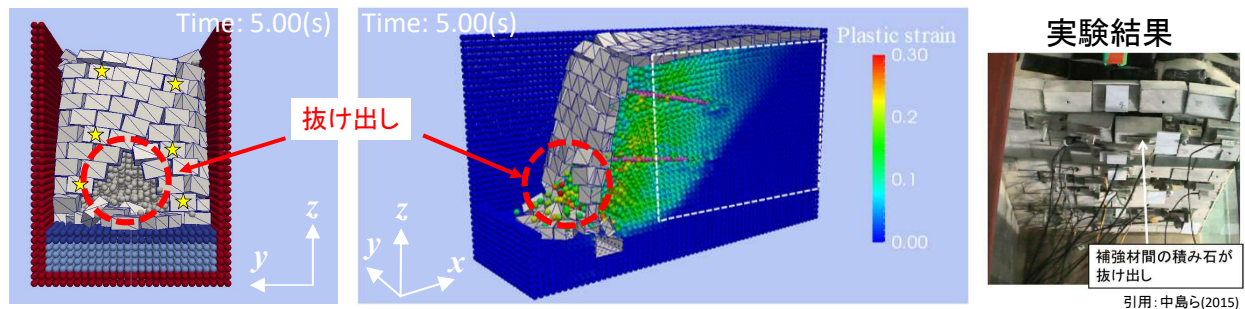
補強材の効果を定性的に再現

28

5. 3次元SPH-DEM解析

解析結果 Case-10(822gal加振)

20/21



補強材間の積み石が抜け出す挙動を再現

→実験: 上部 解析: 下部

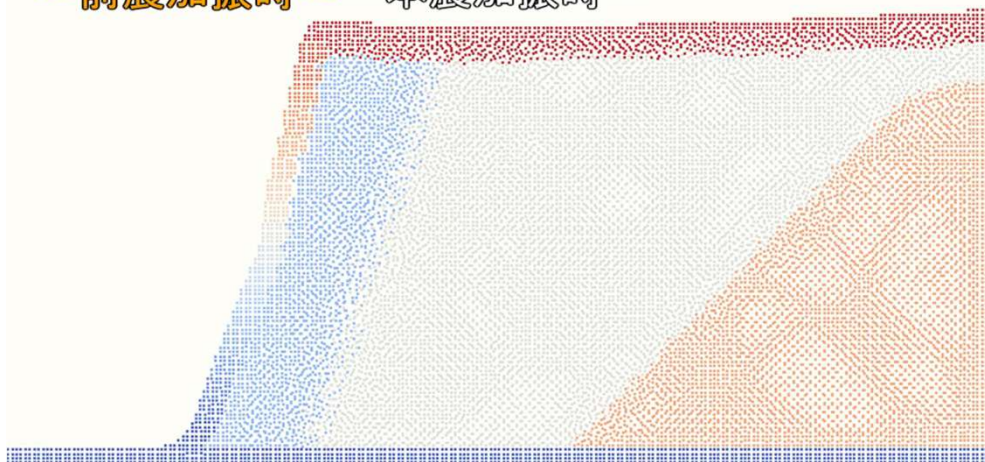
→自重解析時に補強材と背面地盤が一体化

3次元解析では栗石層の変形

→2次元解析より適切に地山補強材の効果を再現

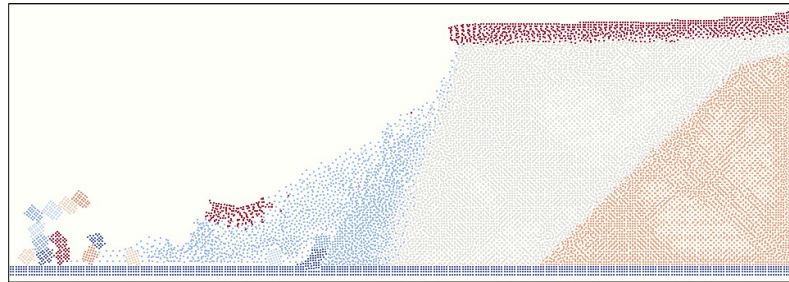
百間石垣に対するSPH-DEM法による崩壊シミュレーション

～前震加振時～～本震加振時～

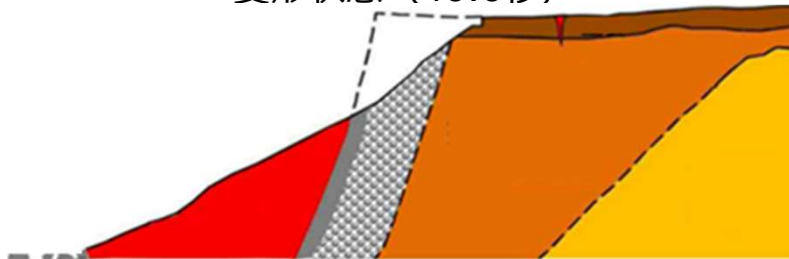


前震加振時間帯に積み石の孕み出しを確認
 本震加振時間帯に石垣が崩壊した。

動的解析と実際の被害と比較



変形状態（40.0秒）



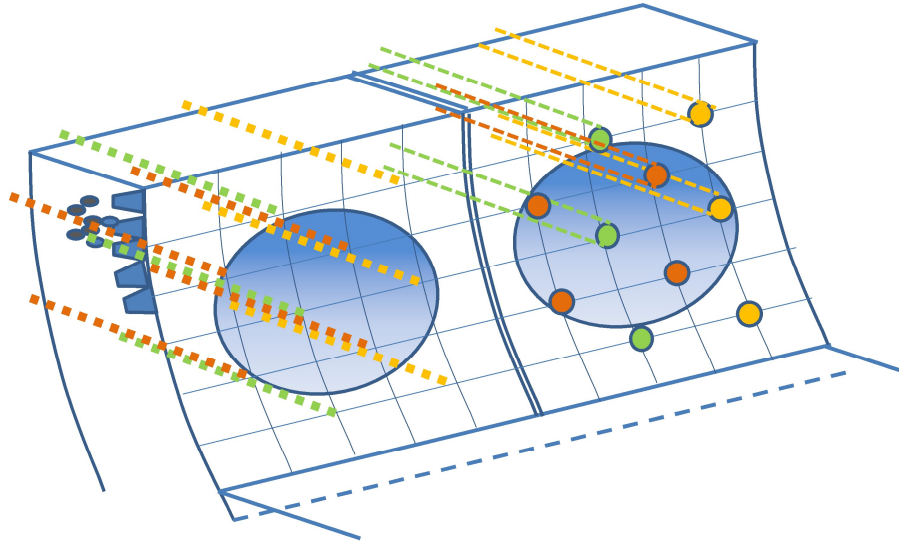
百間石垣断面図

31

■施工WG：
石垣の補強はどうするの？

32

孕み部分の補強イメージ



33

孕み部分の補強方法(ウレタン)



(a) 布無し (1.5 k g)



(b) 布有り (1.5 k g)



(c) 布無し (2.0 k g)



(d) 布有り (2.0 k g)

34

平成30年度の活動報告(1)

1) 委員会・WG活動等

- ◆H30 6月13日：第1回小委員会 土木学会会議室 28名参加（キックオフ会，活動方針に関する審議）
- ◆H30 6月18日：第1回対策WG 国土館大学 7名参加（対策WGの活動方針に関する審議）
- ◆H30 6月22日：文化庁建造物課との勉強会文化庁 7名参加（文化庁4名）（顔合わせ＆これまでの成果報告）
- ◆H30 6月25日：第1回解析WG 土木学会会議室 10名参加＋学生4名（解析を進める上での活動方針，実験班との分担等）
- ◆H30 7月4日：文化庁，熊本市への報告会 文化庁 参加者数不明（小委員会として橋本委員長が呼ばれ，熊本市への成果報告）
- ◆H30 8月23日：第2回対策WG 国土館大学7号館 4名参加（WGの活動計画，実験計画打合せ）
- ◆H30 9月18日：第2回小委員会 土木学会講堂 37名参加（文化庁2名）（各WGの活動報告，対策WGの実験案の検討）
- ◆H30 10月23日：国土館大学7号館地下実験室 25名参加（学生8名）（実験供試体の制作）
- ◆H30 11月6日：国土館大学7号館地下実験室 20名参加（供試体への強度評価，活動方針に関する審議，合同委員会（文化庁3名，熊本城研究センター2名，文健協2名，本委員会）

35

平成30年度の活動報告(2)

1) 委員会・WG活動等

- ◆H30 12月18日：文化庁実験打合せ 対策WG・実験WG・解析WGの合同委員会
- ◆H31 1月7日：岡部総合実験センター及び国立法人防災科学研究所での研究打合せ 6名参加
- ◆H31 1月18日：文化庁 実験説明会及び合同会議 23名参加
- ◆H31 2月6日：土木学会 実験模型の検討会議 3名参加
- ◆H31 2月26日：文化庁 熊本城委員会の事前打合せ会議 18名参加
- ◆H31 3月5日：熊本城委員会 各種事項の報告及び実験模型，方法についての説明と討議 40名以上参加
- ◆H31 3月20日：解析WG報告会 8名参加（学生5名）
- ◆H31 3月20日：第3回小委員会 国土館大学7号館7201室（文化庁2名，熊本城研究センター2名，文健協2名，本委員会）
- ◆H31 4月4日：施工WG報告会 千代田コンサルタント会議室 10名参加
- ◆H31 4月12日：文化庁 熊本城委員会の事前打合せ会議 18名参加
- ◆H31 4月17日：国土館大学7号館会議室 施工実験の今後の予定・準備 10名参加

36

令和元年度の活動計画

1) 委員会・WG活動等の予定

✓委員会2-3回/年

✓WG随時

✓5/中旬-9/中旬 岡部(株)での石垣施工実験及び見学会の開催予定

✓8/4-10/14防災科学研究所つくばでの石垣実験及び見学会の開催予定

2) 行事等の予定

委員会中間報告会

3) 出版物等の予定

特になし

37



38