城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会

2019年度活動報告および
2020年度活動計画

委員長：国士舘大学理工学部　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。

委員名簿

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

委員

跡路　一雄・金田　学　　中村建設
石作　克也・松尾 拓　日測
岩佐 直人・堀 謙吾　日鐵住金建材
池本　宏文　　東日本旅客鉄道
藍檀 オメル　琉球大学
尹 元彪　　新紀元総合コンサルタンツ
大山 謙吾・竹中　一　前田工繊
小野　祐輔　　鳥取大学大学院
金子　恵太　　アートコーポレーション
久保　幹男　　エターナルプレザーブ
田中　弘栄・倉持 欣史　　アキレス
小林　光夫・望月　秀洋　雄測量設計
近藤　和仁　　共和コンクリート工業
斉藤　猛　　ジオフィール
酒井 久和　　法政大学
酒井 英男　　富山大学

41名の委員の協力

西岡　聡・清永 洋平・番 光　文化庁（オブザーバー）
清水 浩之・境　吉彦　鹿島建設
清水　敏孝　　メインマーク　アクアテック
末冨 岩雄・福島 康宏 エイト日本技術開発
鈴木　誠　　岡部
杉本 年也　　全国宅地擁壁技術協会
長岡 康之・鈴木　彩加　アミック
橋本 光男　　東北大学
名倉　光俊　　文化財保存計画協会
野間　康隆　　安藤ハザマ
萩原　育夫　　サンコーコンサルタント
橋ヶ谷直之　　アサヒエンジニアリング
茂木　正敏・渡辺　高志　構造計画研究所
本橋　俊之　　大阪防水建設社
松原 伸之　　平和コンクリート工業
山中 稔　　香川大学
若井 明彦　　群馬大学
渡邊　尚　砂防フロンティア整備推進機構
吉田 雅穂　　福井工業高等専門学校

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

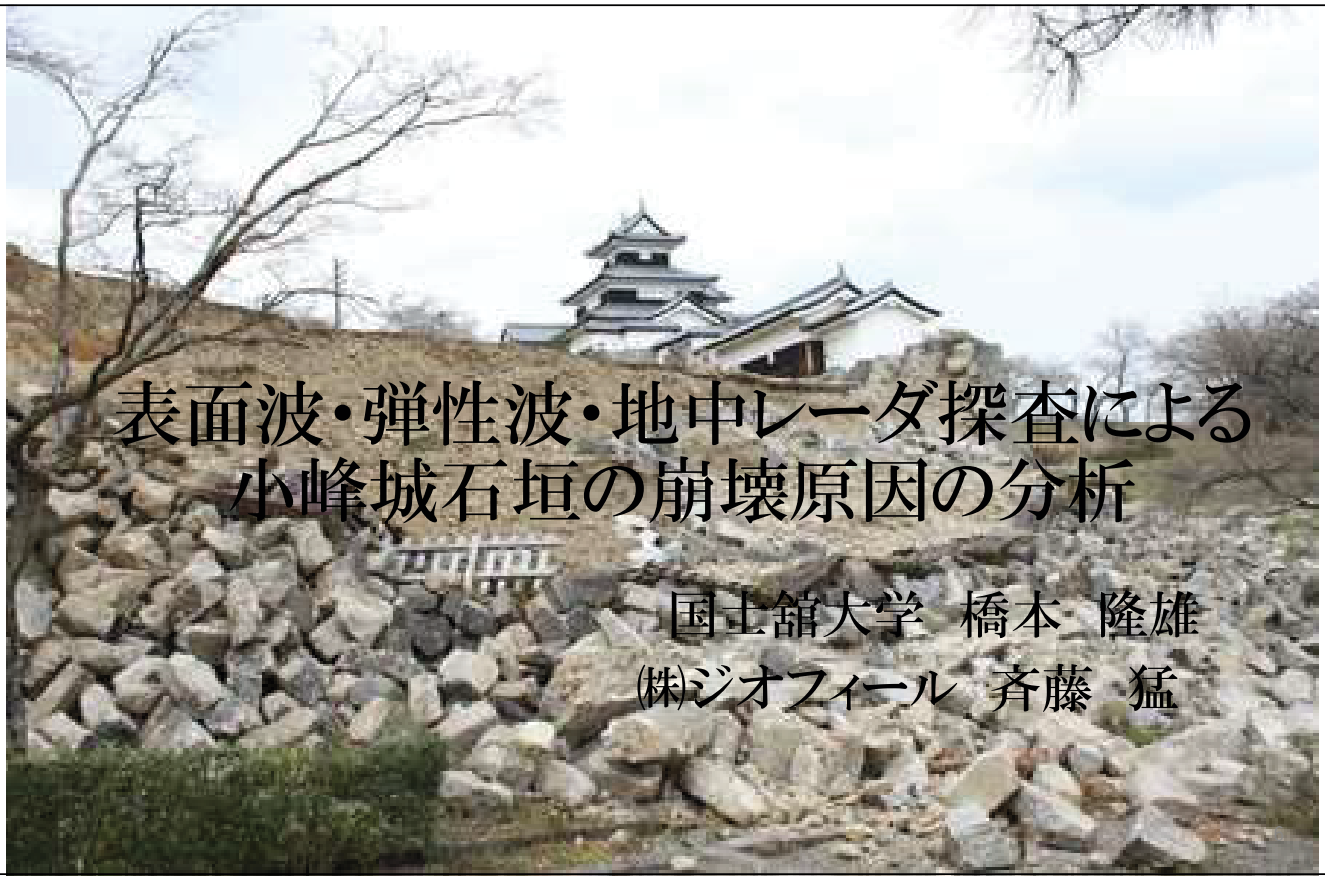
被害事例及び各種補強対策を施した石垣の解析による検証

(5) 施工WG

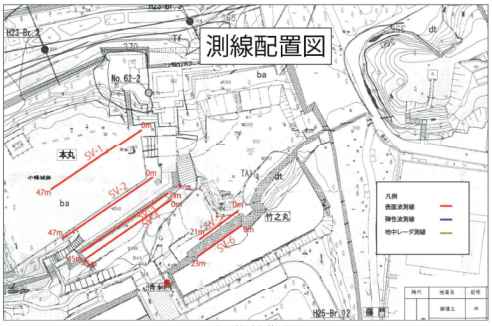
石垣の補修・補強対策の開発

被害調査ＷＧ
非破壊探査ＷＧ

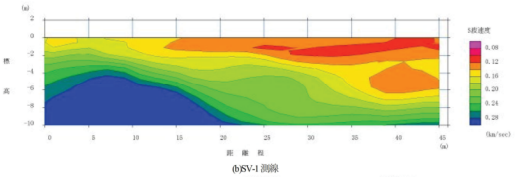
地盤・石垣の状態を可視化

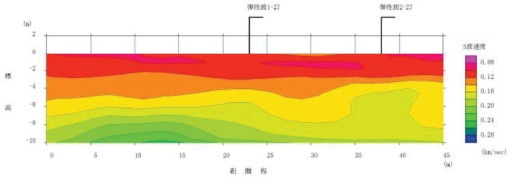


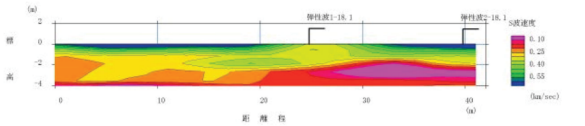
表面波探査結果（横断図）

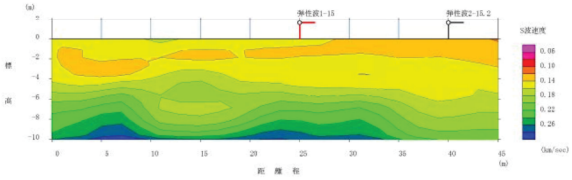


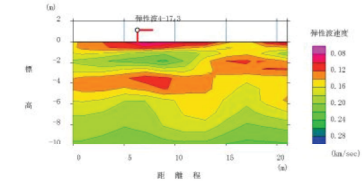
(a)表面波探査測線配置図


(b)SV-1 測線


(c)SV-2 測線


(d)SV-3 測線


(e)SV-4 測線


(f)SV-5 測線

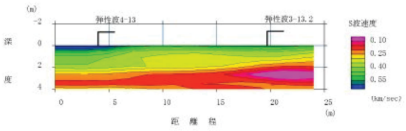
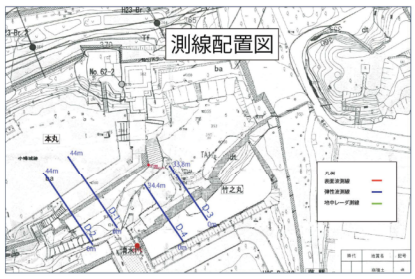
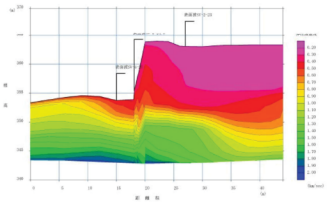

(g)SV-6 測線

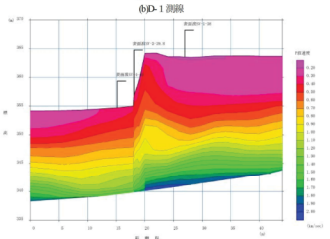
図-14　各側線の表面波探査結果

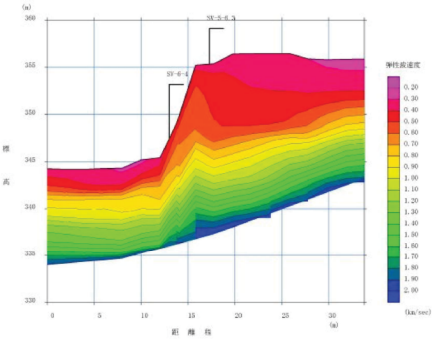
表面波探査結果（縦断図）



(a)弾性波探査測線配置図


(b)D-1 測線


(c)D-2 測線


(d)D-3 測線

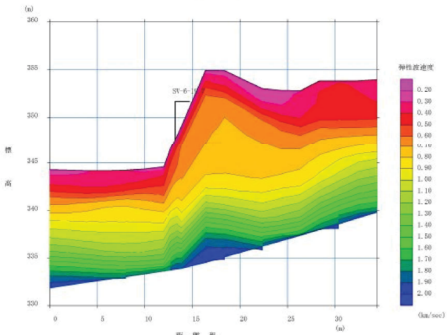
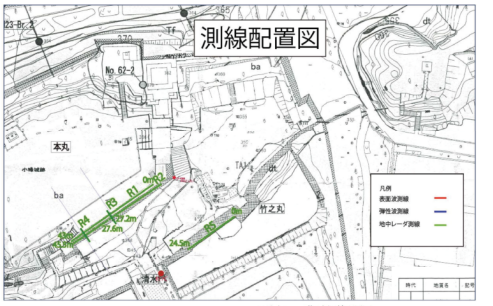
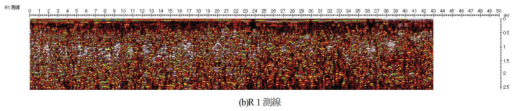

(e)D-4 測線

図-15　各側線の弾性波探査結果

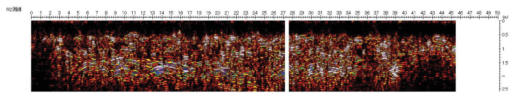
地中レーダー探査（横断・縦断図）



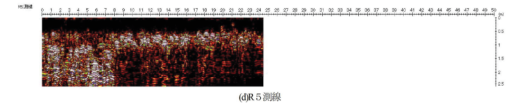
(a)地中レーダ探査測線配置図



(b)R 1 測線

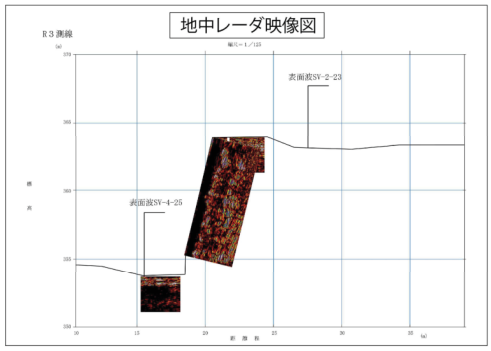


(c)R 2 測線

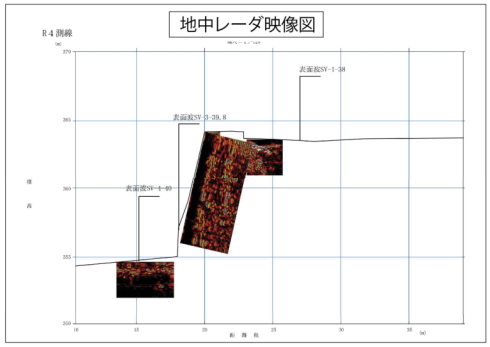


(d)R 5 測線

図-16　石垣横断方向における各側線の地中レーダ探査結果



(a)R 3 測線

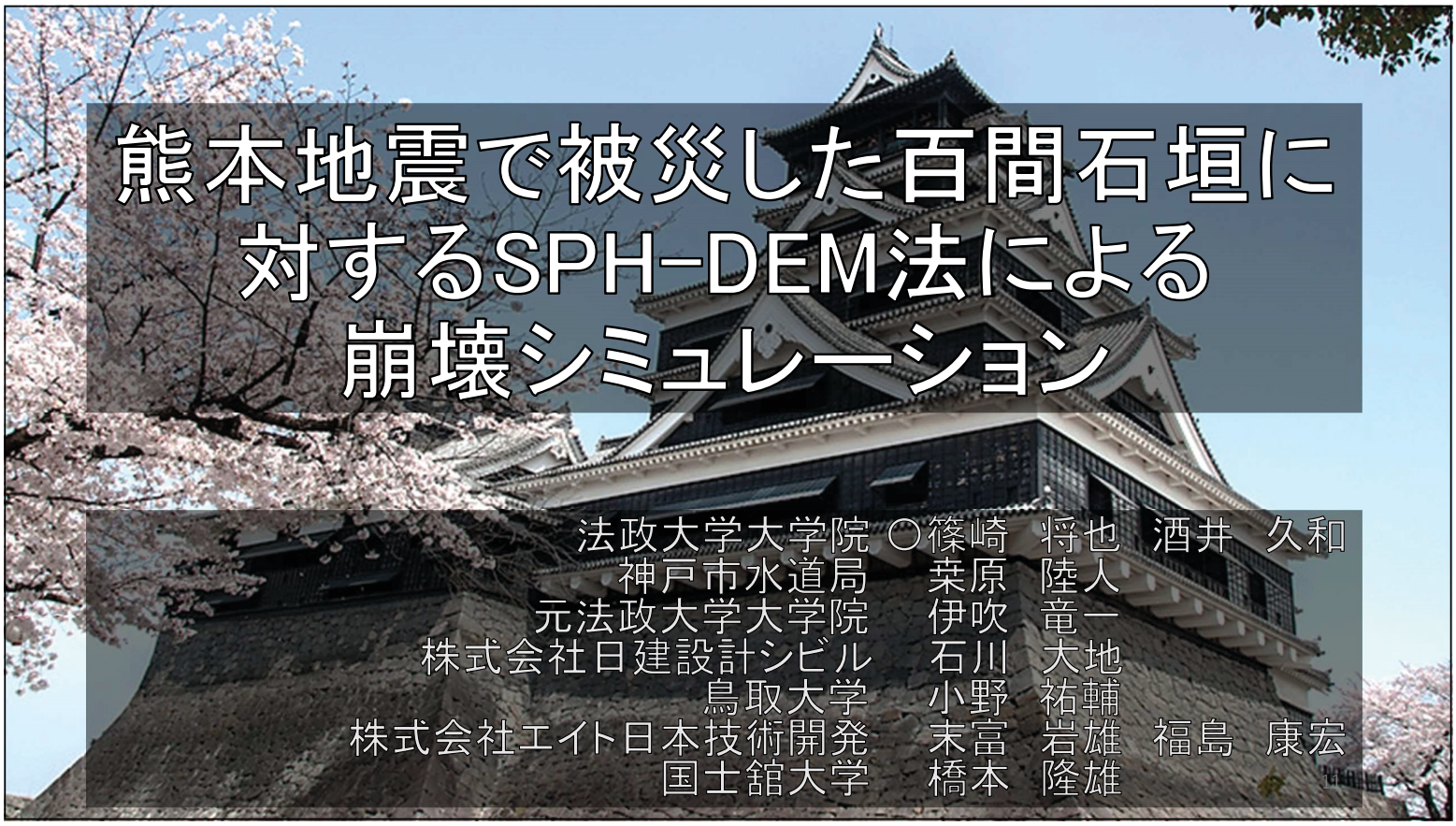


(b)R 4 測線

図-17　石垣横断方向における各側線の地中レーダ探査結果

解析WG

複雑な構造の石垣について解析で再現する



熊本地震で被災した百間石垣に対するSPH-DEM法による崩壊シミュレーション

法政大学大学院　○篠崎　将也　酒井　久和
神戸市水道局　　菜原　陸人
元法政大学大学院　伊吹　竜一
株式会社日建設計シビル　石川　大地
鳥取大学　小野　祐輔
株式会社エイト日本技術開発　末富　岩雄　福島　康宏
国士舘大学　橋本　隆雄

研究の背景

石積み擁壁は様々な構造物に適用されているが
地震に対して脆弱な構造をしている
2016年熊本地震では熊本城の石垣が甚大な被害を受けた

修復方法

熊本城は多くの人が訪れる場所
安全性を確保しなければいけない

ジオテキスタイルやアンカー等を
用いた対策工が必要



研究の目的

始めに 城郭石垣は文化遺産なので原状復帰を基本とするため，補強を行うには有効性を示す必要がある．

しかし 地震時の崩壊を精度よく再現する手法や耐震性向上に対して十分に評価できる手法は確立されていない．

そのため 熊本城百間石垣の熊本地震時の崩壊シミュレーションを実施し，手法の妥当性を検討する．

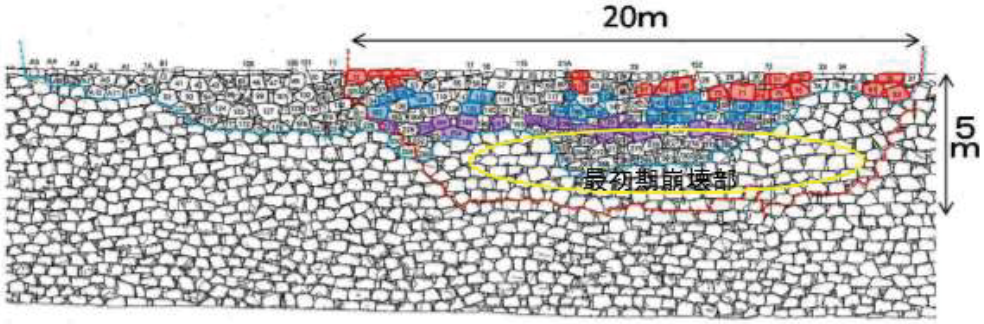
解析の対象構造物

熊本城 百間石垣

熊本市二の丸の北側に位置する石垣
全長136mの直線石垣で高さが7.6mある

熊本地震で3箇所の合計約62mが崩れ落ちた
崩壊は本震時に起きたと報告されている





熊本城調査研究センター

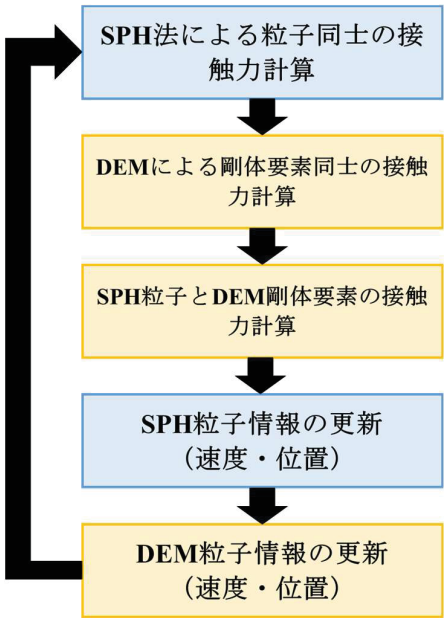


熊本城調査研究センター

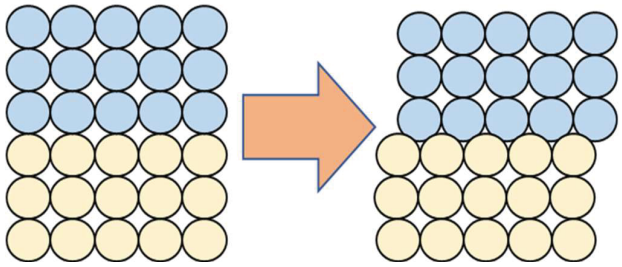
解析手法

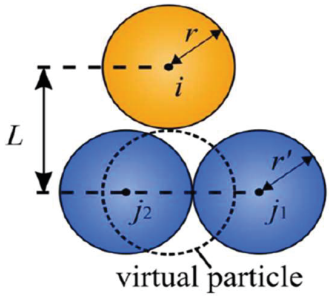
15

SPH-DEM法



仮想粒子を用いた接触力算定手法





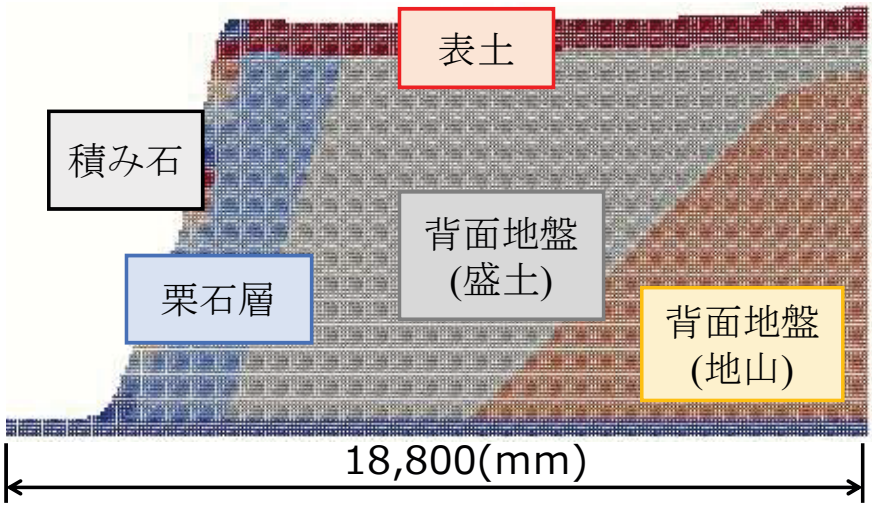
ブロックの噛み合わせにより過度な摩擦力が生じる

↓

ブロック内部に他ブロック粒子が侵入しないように仮想粒子を発生させる

数値解析モデル

16



SPH法

表土・栗石
背面地盤(盛土・地山)

DEM

積み石(18段)
根石

解析条件

粒子間隔：0.1m
粒子数：17,772個

材料パラメータ

SPH法

	密度 (t/m^3)	ヤング率 (MN/m^2)	粘着力 (kN/m^2)	内部摩擦角 (°)
背面地盤（盛土）	1.31	66.3	17.2	27.7
背面地盤（地山）	1.57	157	39.5	33.7
表土	1.53	56.7	30	24.3
裏込め層（栗石）	2.00	40.0	0	43.0

DEM

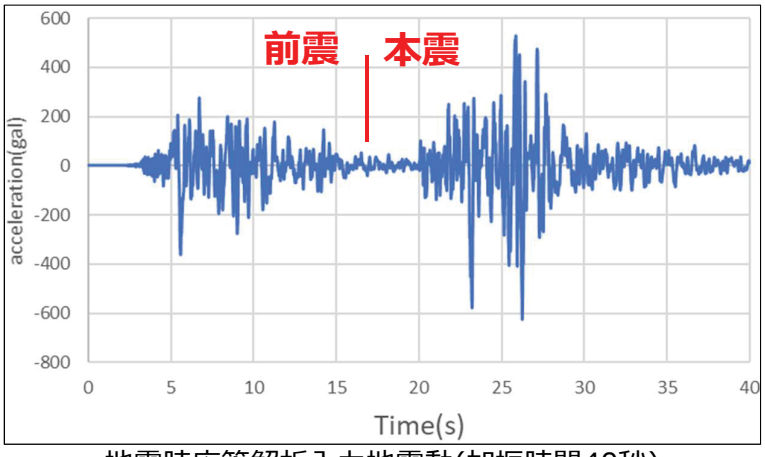
密度 (g/cm^3)		2.7	
		DEMとDEM	DEMとSPH
ばね係数 (N/m)	法線方向	1.0×10^8	1.0×10^8
	接線方向	1.0×10^7	1.0×10^7
減衰係数 (N・s/m)	法線方向	1.0×10^3	1.0×10^3
	接線方向	1.0×10^3	1.0×10^3

設定

ボーリング調査結果，トレンチ調査・表面波探査より地盤種類を推定
摩擦係数は機械工学便覧より石と石0.6，石と土0.3とする

入力条件

入力地震動



地震時応答解析入力地震動(加振時間40秒)

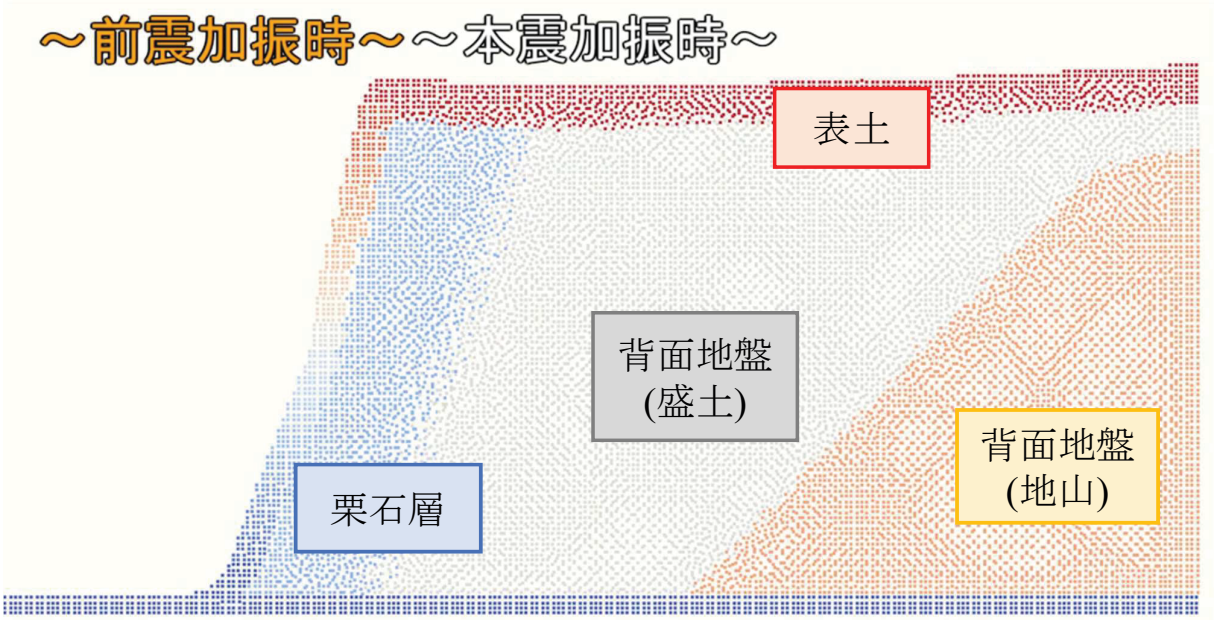
観測波のNS成分の主要動を抽出したもの
最大加速度はそれぞれ364gal，627gal

解析実行パラメータ

積分時間間隔		1.0×10^{-5} 秒
解析ステップ数		4500000
解析時間		45 秒
影響半径		0.13m（粒子間隔の1.3倍）
拘束条件		底面と側面の粒子を固定
人工減衰係数	η	1
	ξ	2

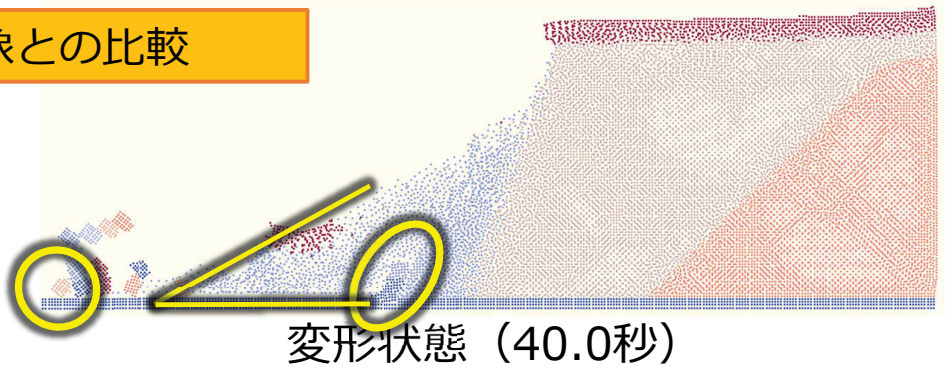
解析結果

崩壊シミュレーション

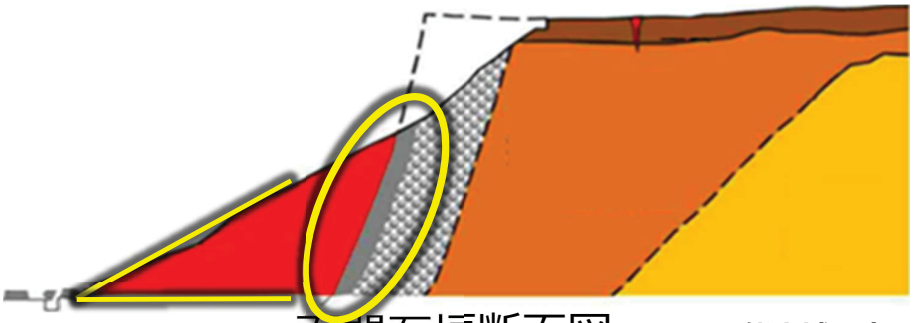


解析結果

実現象との比較



変形状態（40.0秒）



白間石垣断面図

熊本城調査研究センター

結論

- DEMの接触力の算定において仮想粒子を用い，**過度な摩擦力**の発生を軽減した.
- SPHの計算において**人口粘性を導入**し，解の安定化を図った.
- 熊本市の調査報告結果と整合する変形状態を十分な精度で表現できた.

実験WG

複雑な構造の石垣について実験で再現

地震時における城郭石垣の対策工法に関する動的模型実験

金沢大学　恒川　怜央
金沢大学　池本　敏和
金沢大学　宮島　昌克
国士舘大学　橋本　隆雄

研究の背景

城郭石垣



熊本城(熊本地震)



白河小峰城(東北地方太平洋沖地震)



明石公園(兵庫県南部地震)

日本：古来から擁壁として石垣を利用
・曲線を有している独自の構造をもつ
・価値の高い建設文化遺産

対策工法の検討・提案が急務

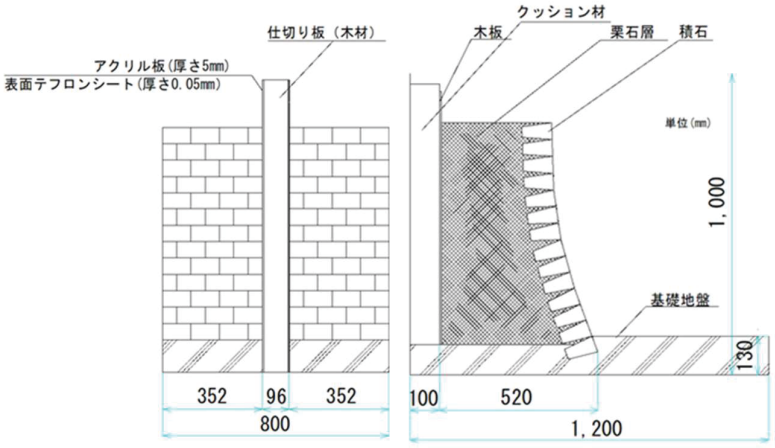
振動実験の概要

城郭石垣の模型を製作

・熊本地震で崩壊した20mほどの高さのものをモデルとする.

→1/7.5スケール（相似則より）

・2つのパラメータの異なる石垣を同時に加振できるように設計



石垣模型設計図（正面図・側面図）

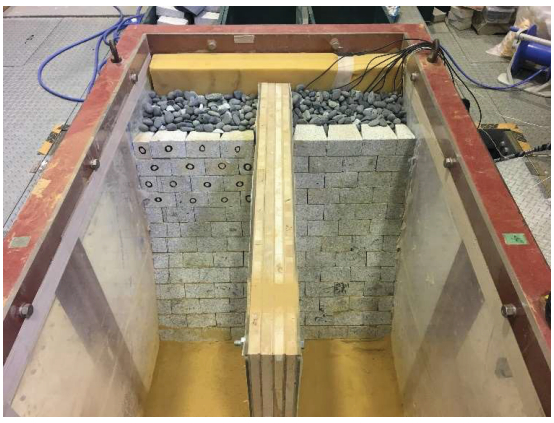
振動実験の概要

城郭石垣の模型を製作

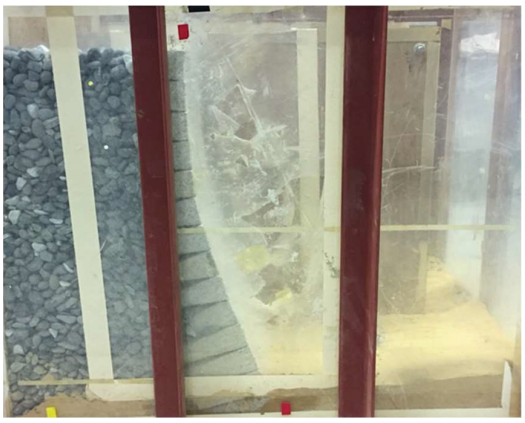
・熊本地震で崩壊した20mほどの高さのものをモデルとする.

→1/7.5スケール（相似則より）

・2つのパラメータの異なる石垣を同時に加振できるように設計



石垣模型　正面図



石垣模型　側面図

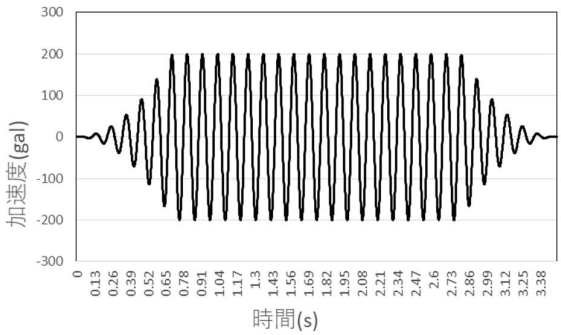
入力地震動

・水平方向の一軸方向の加振

・200～700galの正弦波を入力（裏栗石の沈下挙動を明確）

2Hz，15sの正弦波 → 9Hz，3.5秒の正弦波

相似則



200gal 正弦波

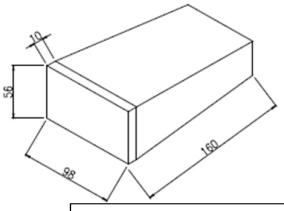
振動台実験対策工法案







全積石に対する
胴長積石の置換率
パターン1
21.4%
パターン2
28.6%



胴長160mm積石

段数	パターン		
	0（無対策）	1	2
13-14	100mm	100mm	100mm
12	100mm	160mm	160mm
11	100mm	100mm	160mm
10	100mm	160mm	100mm
9	100mm	100mm	100mm
8	100mm	160mm	160mm
7	100mm	100mm	160mm
5-6	100mm	100mm	100mm
1-4	160mm	160mm	160mm

振動台実験結果

無対策モデル：700gal 加振後



側面写真



正面写真

振動台実験結果



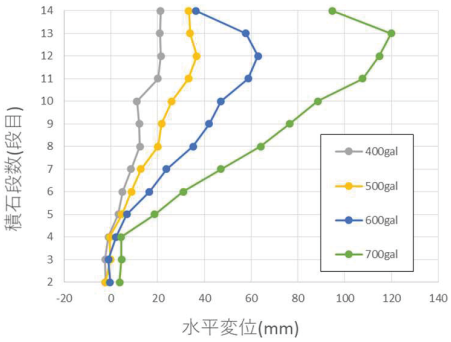
パターン1：700gal 加振後



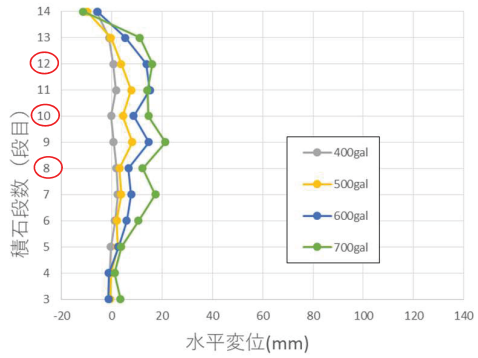
パターン2：700gal 加振後

振動台実験結果

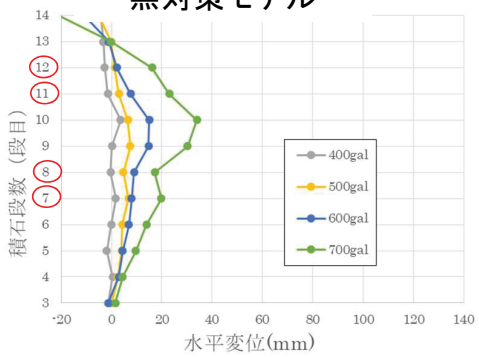
・パターン1では，水平変位量は無対策モデルと比べ，約75%抑制された．
・パターン2でも同様に，約66%の水平変位量が抑制された．



無対策モデル



パターン1



パターン2

まとめ

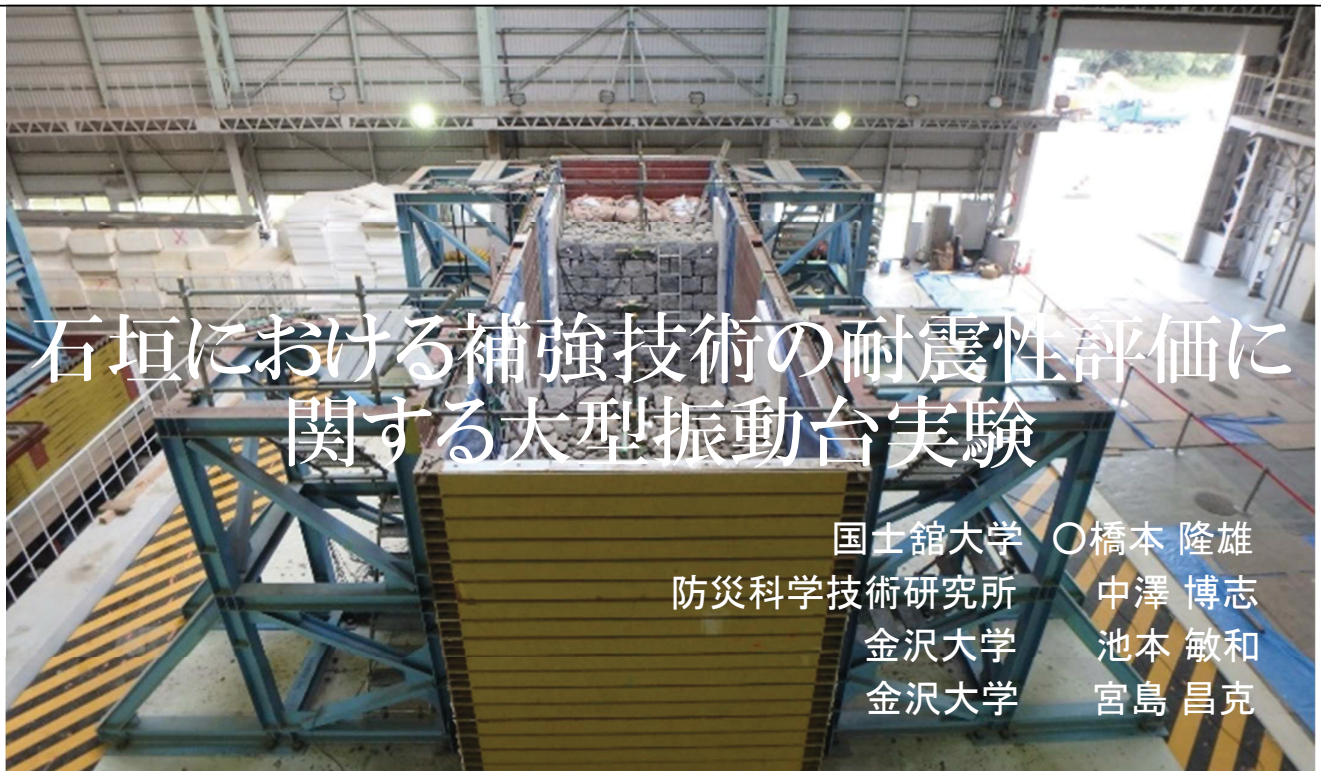
振動台実験及び動的解析によって胴長積石の有効性の検討を行った．

【実験】
・配置位置に関わらず無対策石垣と比較し，耐震効果が見込まれる．
→せん断抵抗力の向上　＋　裏栗石の沈下抑制

・段違い配置の仕方により，異なった水平変位量が計測された．
→段違い方法によって裏栗石のすべり面の形成が異なった．

【解析】
・実験結果に近しい解析結果を得られた．

・動的解析では裏栗石の沈下の表現が難しく，改良の余地あり．

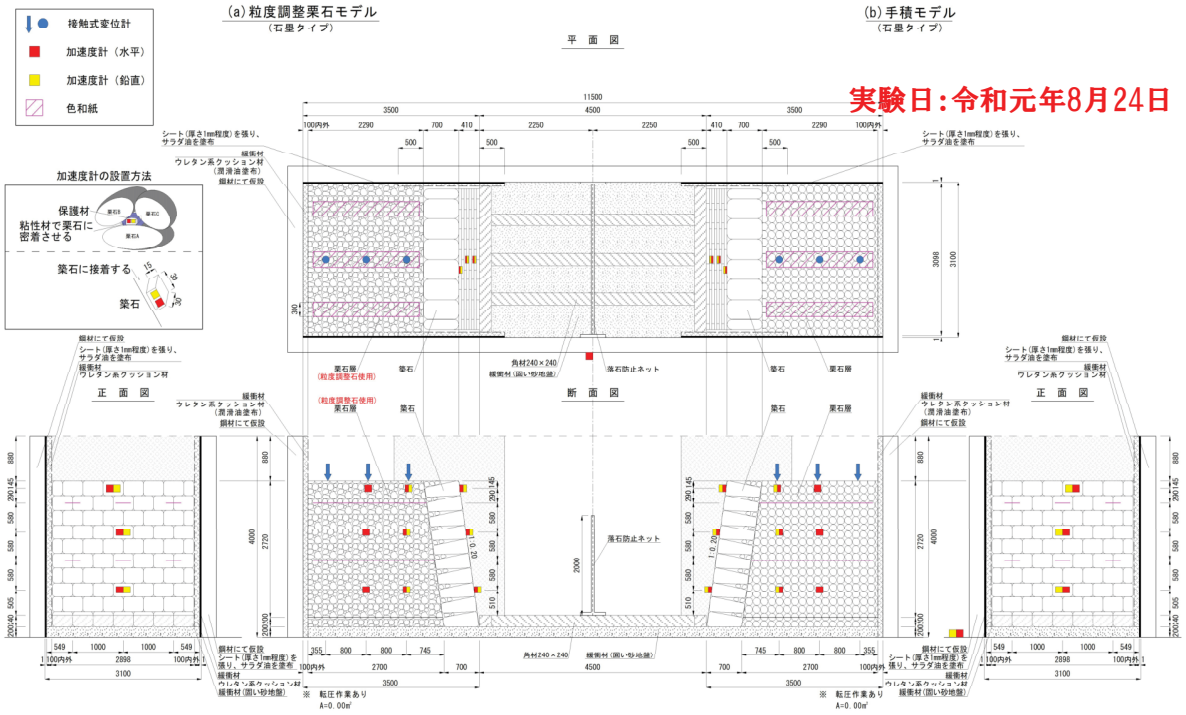


石垣における補強技術の耐震性評価に関する大型振動台実験

国士舘大学　○橋本 隆雄
防災科学技術研究所　中澤 博志
金沢大学　池本 敏和
金沢大学　宮島 昌克

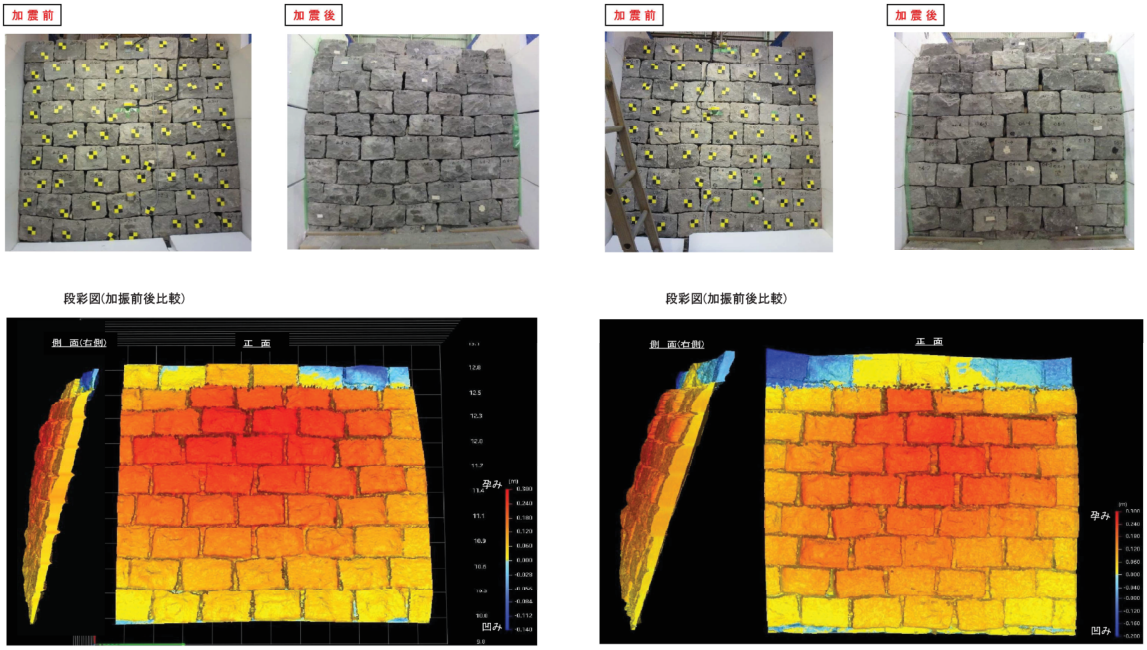
※本研究の実験は、熊本市経済観光局熊本城総合事務所から（公財）文化財建造物保存技術協会が受託した資金を使用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

防災科研大型振動台実験（石墨タイプ）



(a) 粒度調整砕石モデル　(b)手積モデル

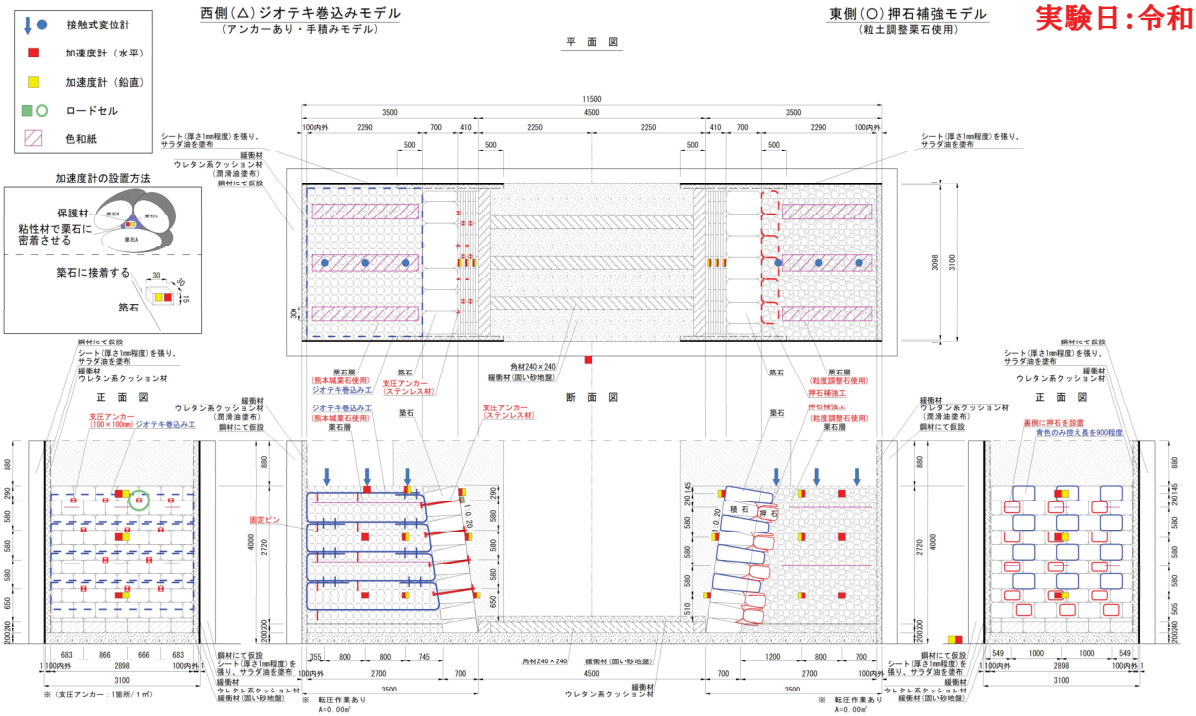
防災科研大型振動台実験結果（石墨タイプ）



(a) 粒度調整砕石モデル　　(b)手積モデル

防災科研大型振動台実験（石墨補強タイプ）

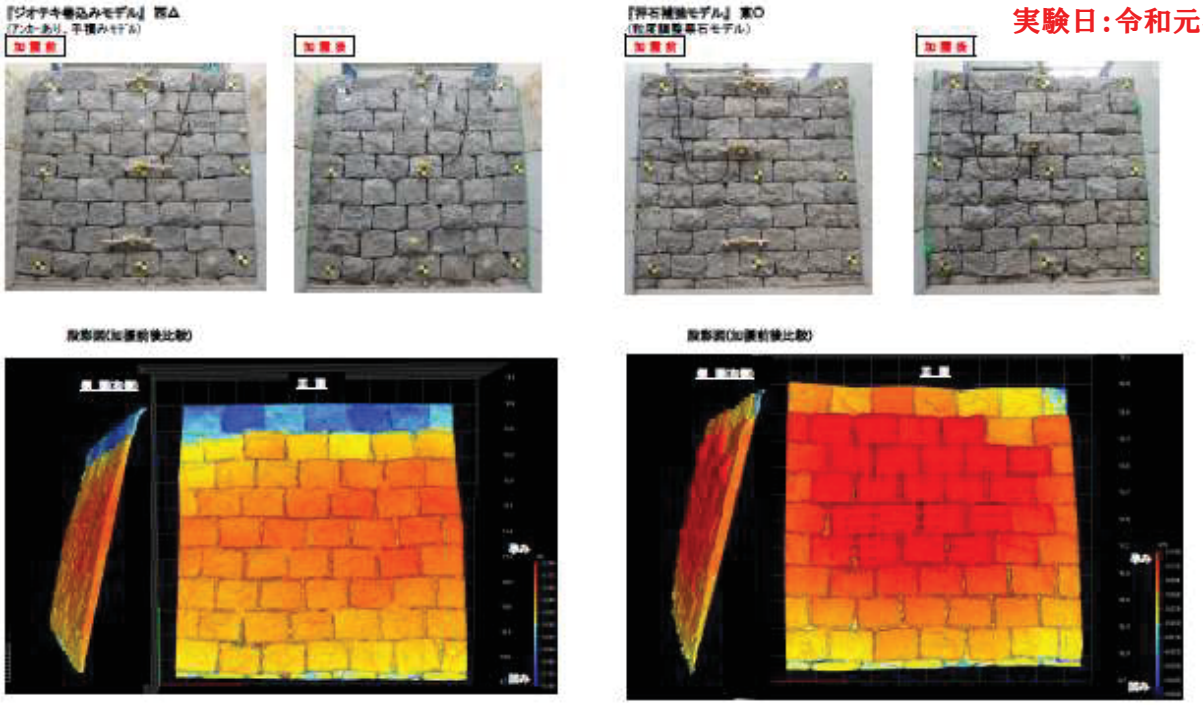
実験日：令和元年9月7日



(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）

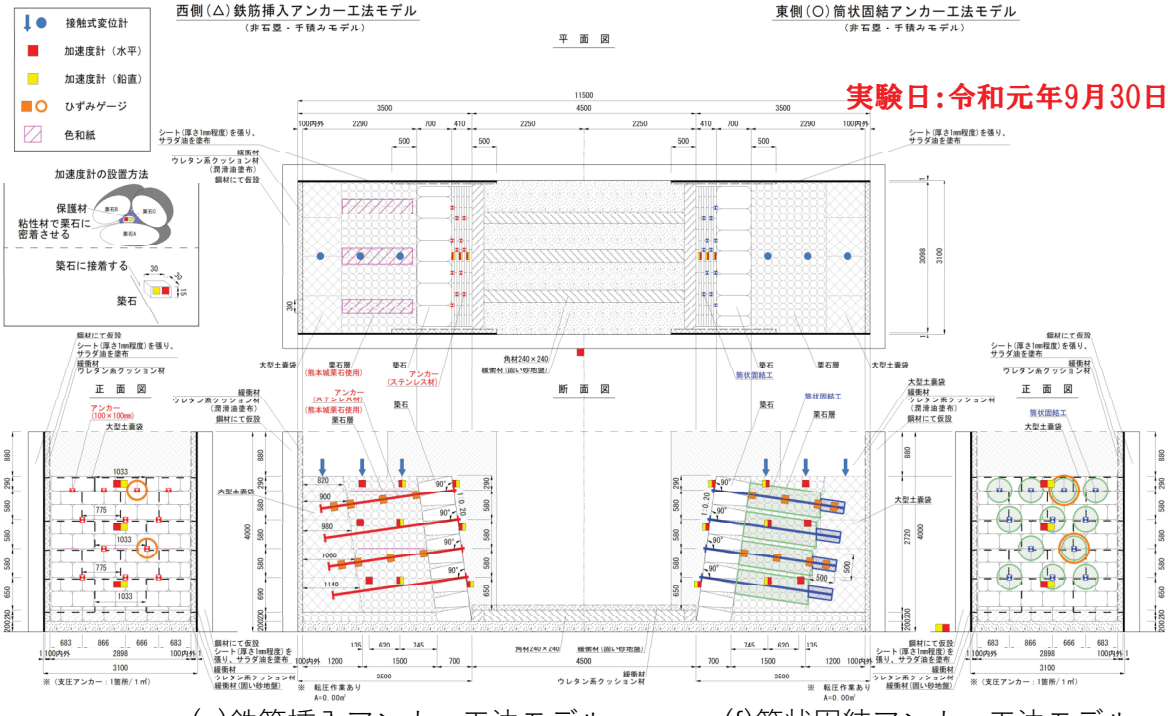
実験日：令和元年9月7日



(c)ジオテキスタイル巻込みモデル　　(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）

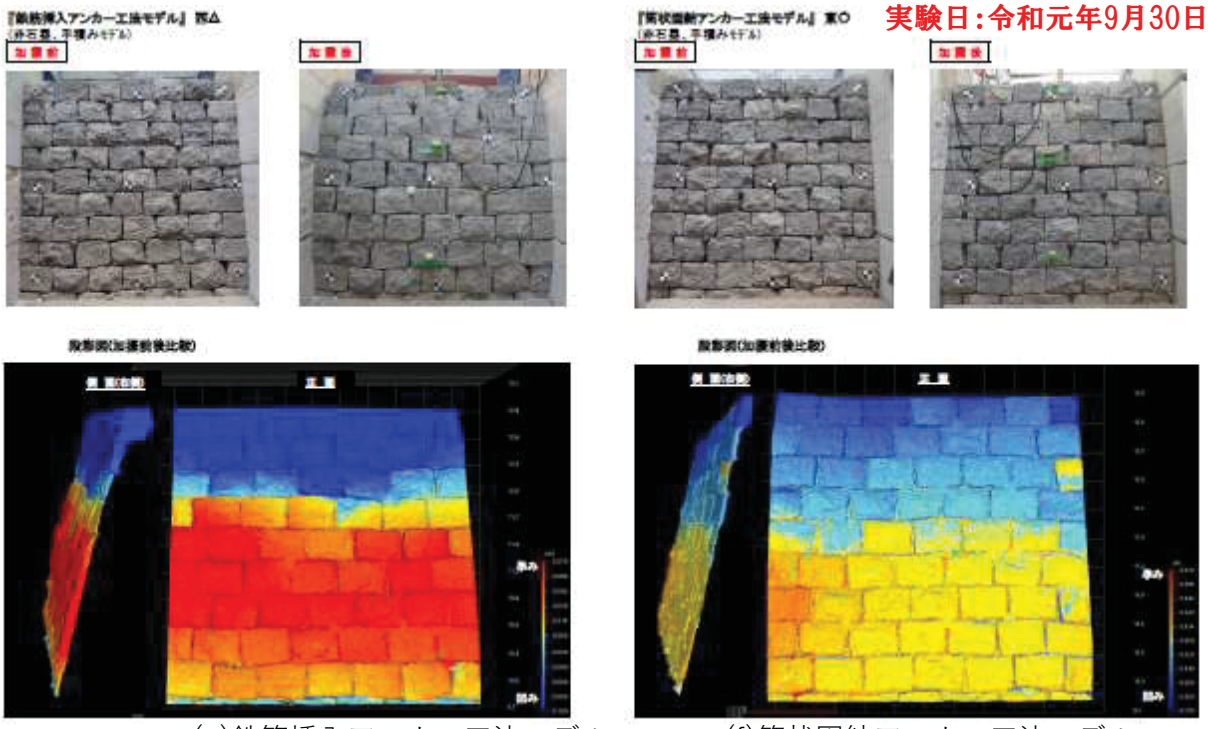
実験日：令和元年9月30日



(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）

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

施工WG
新たな補強工法の開発

石垣現場施工実験

橋本 隆雄　国士舘大学
岩津 雅也　フリー工業㈱
前田 和徳　岡部㈱
大山 謙吾　前田工繊㈱
田中 弘栄　アキレス株式会社
岩佐 直人・堀 謙吾　日鐵住金建材㈱
石作 克也・松尾 拓　㈱日測

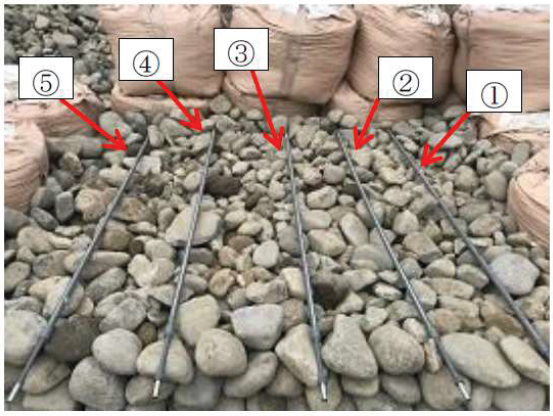
第1回現場施工実験

- 日程：2019年7月24日（水）
- 場所：岡部㈱総合実験センター
- 茨城県下妻市半谷1045-1
- 目的

① ゲルタイム及び注入量の確認試験
② 発泡倍率の確認試験
③ 事前固結体アンカー挿入実験

(1)ゲルタイム及び注入量の確認試験

- 流速5kg/minにてウレタン注入し、栗石を撤去してウレタンの充填状況を確認する。
- 注入量とゲルタイムをパラメータにして最適な注入割合を決める。



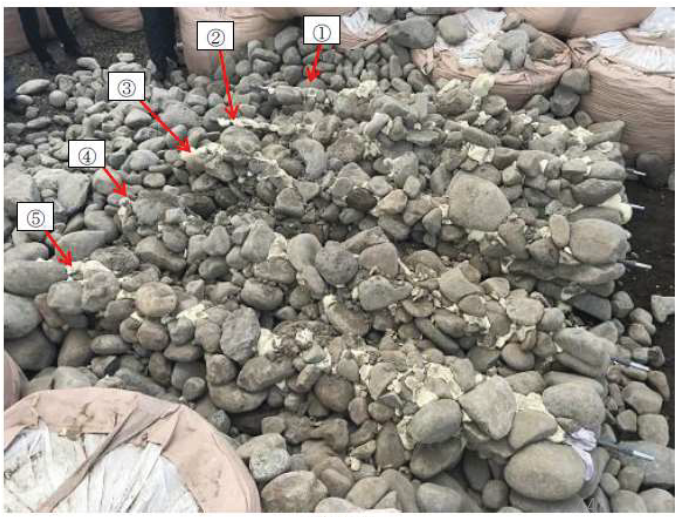
注入管設置


栗石埋め戻し完了

ゲルタイム及び注入量の試験結果

- ゲルタイム早い①と②は、固化が速すぎて奥まで充填ができなかった。
- ゲルタイム遅い③④、⑤は、いずれも奥まで充填できたが、④が充填ボリューム（直径30～40ｃｍ程度）と均一性に一番優れていた。


注入完了



充填状況

(2) 発泡倍率の確認試験

- 事前確認試験で充填状況が良好だったゲルタイム及び注入量を選定する。
- 発泡倍率が違う３パターンのウレタンを注入し、充填状況の違いを目視にて確認する。



注入ホース取付け



注入作業状況

(3) 事前固結体アンカー挿入実験報告

- 削孔機械はインバーターチゼルIC-2WD を用い、回転のみで所定長（2.5m 程度）を挿入する。
- 削孔機械及び性能を表1に示す。

表1 削孔機械スペック

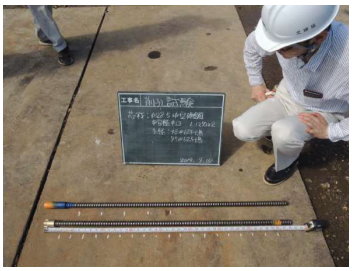
性能	規格値	性能	規格値
回転数	0～80rpm	空気圧力	10～24kg/cm²
回転トルク	24kgf･m	打撃数	800～1400 回/min
フィード力	500 kgf	重量	200 kg



削孔機械

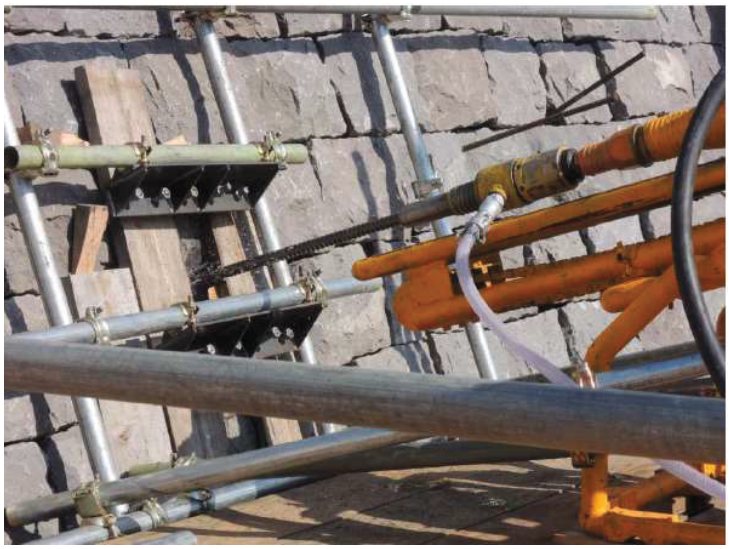
削孔材検査状況







削孔試験日：2019年9月10日（火）



2019年度の活動（1）

1)　委員会・WG活動等の予定

・R1幹事会：4月9 日　防災科研つくば　6名参加（契約，実験打合せ・場所）
・R1調査WG：4月11日　国士舘大学　5名参加（実験計画の打合せ）
・R1合同WG：4月12日　文化庁4F　JSCE，熊本城委員会，文建教，熊本市，文化庁＝計18名参加（実験計画・場所）
・R1対策WG：5月15日　国士舘大学　5名参加（実験計画・計測の打合せ）
・R1対策WG：5月17日　国士舘大学　5名参加（変状図作成他の打合せ）
・R1解析WG：5月20日　法政大学　9名参加（計測パラメータ変状図作成他の打合せ）
・R1合同WG：5月27日　文化庁4F　JSCE，熊本城委員会，文建教，熊本市，文化庁＝計18名参加（実験計画・場所）
・R1対策WG：6月3日　防災科研つくば　5名参加（実験の方針他の打合せ）
・R1対策WG：6月13日　千代田コンサル　5名参加（実験の方針他の打合せ）
・R1対策WG：6月27日　田中システム　5名参加（変状図の打合せ）
・R1第1回委員会：7月1日　土木学会講堂　35名参加（活動方針に関する審議）
・R1対策WG：7月3日　防災科研つくば　5名参加（実験設備の打合せ）
・R1対策WG：7月8日～岡部㈱実験センター　15名参加（施工実験石垣造築開始）
・R1対策WG：7月15日　防災科研つくば　8名参加（計測打合せ実験設備の打合せ）
・R1対策WG：7月16日　岡部㈱実験センター　8名参加（施工実験内容検討と日程確認）
・R1対策WG：7月24日　岡部㈱実験センター　文化庁5名，文建協3名，土木学会6名＝14名参加（施工実験（削孔、ウレタン注入試験））

2019年度の活動（2）

・R1対策WG：8月2日～3日　金沢大学　10名参加（石垣振動実験）
・R1対策WG：8月8日　岡部㈱実験センター　6名参加（拡径アンカー事前試験と施工方法打合せ）
・R1対策WG：8月9日　熊本城内熊本城委員会　50名参加（実験内容の確認）
・R1合同WG：8月19日～21日　防災科研つくば　30名参加（本実験準備）
・R1調査WG：8月24～26日　防災科研つくば　5名参加（石垣モデル加振前3D計測）
・R1合同WG【第１回振動実験】：8月27日　防災科研つくば　熊本復興委員6名　熊本市3名　文化庁8名　市3名　文建協3名　土木学会27名　防災科研5名合計55名参加（第1回大型振動台実験及び打合せ）
・R1施工WG：8月28日　岡部㈱実験センター　文建協1名　土木学会5名（ウレタン注入充填確認）
・R1調査WG：8月30日　防災科研つくば　5名参加（築石3D計測）
・R1調査WG：9月2日　田中システム　5名参加（石垣変状図の打合せ）
・R1解析WG：9月3日　防災科研つくば　4名参加（現場調査）
・R1対策WG：9月5日　岡部㈱実験センター　10名参加（ウレタン実験）
・R1調査WG：9月9日　防災科研つくば　4名参加（第2回加振実験前の3D計測）
・R1対策WG：9月10日　岡部㈱実験センター　文化庁1名，文建協2名，JSCE4名＝10名参加（石垣削孔、土砂混入ウレタン充填確認の施工実験）

2019年度の活動画（3）

・R1合同WG【第2回振動実験】：9月12日　防災科研つくば　熊本復興委員2名　文化庁１名　市１名　文建協3名　土木学会30名　防災科研5名合計42名参加（第2回大型振動台実験及び打合せ）
・R1対策WG：9月13 日　熊本城内熊本城委員会　50名参加（実験結果の説明）
・R1調査WG：9月28日　防災科研つくば　6名参加（第3回振動実験加振前の3D計測）
・R1合同WG【第3回振動実験】：9月30日　防災科研つくば　熊本復興委員2名　文化庁10名　市4名　文建協3名　土木学会24名　防災科研5名合計48名参加（第3回大型振動台実験及び打合せ）
・R1調査WG：10月2日　防災科研つくば　3名参加（振動実験後のウレタン部3D計測）
・R1解析WG：10月9日　土木学会　3名
・R1対策WG：10月30日　岡部㈱実験センター文化庁1名，文建協1名，JSCE6名＝8名参加（ウレタン引抜試験の施工実験）
・R1【第2回JSCE小委員会】：11月28日　国士舘大学　35名参加（活動方針に関する審議）
・R1熊本城合同打ち合わせ：12月9日　国士舘大学　熊本市4名　文化庁2名　文建協2名　土木学会10名＝18名参加（実験結果報告及び審議）
・R1対策WG：12月25日　熊本城内熊本城委員会　50名参加（実験結果報告）
・R1対策WG：1月7日　千代田コンサルタント　10名（実験結果と今後の課題を協議）
・R1熊本城合同構造委員会：1月31日 文化庁3名　文健協3名　大林組2名　熊本市4名　熊本城構造委員会委員3名　土木学会4名（実験成果に基づく対策工法の検討）
・R1対策WG：2月17日 国士舘大学　文化庁2名　国士舘大学2名　土木学会7名（今後の方針）
・R1研究打合せ　2月18日　防災科学技術研究所1名　土木学会4名（研究上の整理・分析）
・R1対策WG：3月10､11 日　熊本城内　6名参加（石垣等視察及び調査･計測）
・R1対策WG：3月24日　千代田コンサルタント　9名（今後の方針）

2020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、見学会等の開催予定6月、10月実験

2)　行事等の予定

　2021年3月頃シンポジウムを開催予定

3)　出版物等の予定

　シンポジウム論文集の発行

