

2022年2月22日城壁の耐震診断・補強に関するシンポジウム

実物城郭石垣の動的挙動に関する実験的研究

金沢大学・理工学域・地球社会基盤学系
金沢大学・理工学域・地球社会基盤学類
国士館大学・理工学部・まちづくり学系
前田工織(株)営業推進部技術・設計グループ
石川工業高等専門学校・建築学科
静岡理科大学・理工学部・土木工学科
東日本旅客鉄道株式会社・東京工事事務所

池本敏和、宮島昌克
水野 薫
橋本隆雄
大山謙吾
小川福嗣
中澤博志
池本宏文

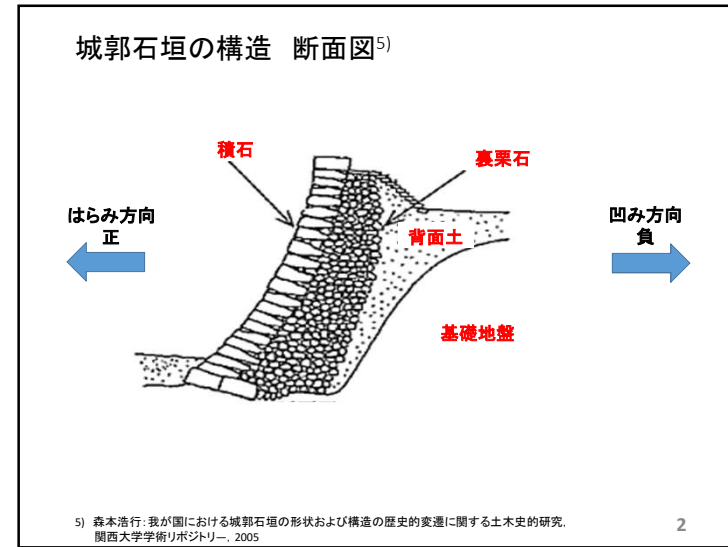
経年劣化による崩壊の危険性、
地震災害時に崩壊被害が発生

城郭石垣の地震時における変形・動的挙動の解明
↓
複数の補強工法を施した実物大石垣模型を用いた
振動台実験実施



熊本城 公式HP <https://castle.kumamoto-guide.jp/galleries/> 参照 2021/04/20

1



実物大石垣模型の振動台実験の概要

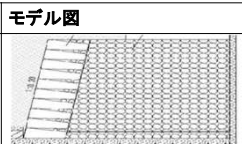
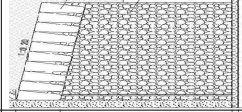
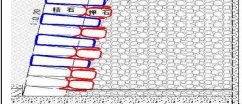
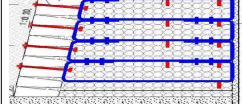
実験場所: 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 つくば本所
実験内容: 下記の種類の石垣を再現し、振動台にて石垣の変形・動的挙動を確認する。

西(B面)	東(C面)
手積みモデル (石畳タイプ)	粒度調整栗石モデル (石畳タイプ)
ジオテキスタイル巻込みモデル (アンカーあり・手積みモデル)	押石補強モデル (粒度調整栗石使用)

測定項目

1. 積石水平変位 2. 裏栗石鉛直変位
3. 水平方向応答加速度 4. 鉛直方向応答加速度

3

モデル	特徴	モデル図
手積みモデル	熊本城の標準として想定した無対策のモデル	
粒度調整栗石モデル	栗石の間隙部を粒径の小さい碎石等で充填したモデル	
押石補強モデル	積石背面に押石により石組み補強したモデル → 胴長効果を期待	
ジオテキスタイル巻込みモデル	ジオテキスタイルとアンカーで積石と裏栗石の一体化な補強を図るモデル	

4

入力地震動 東西方向の1軸方向加振

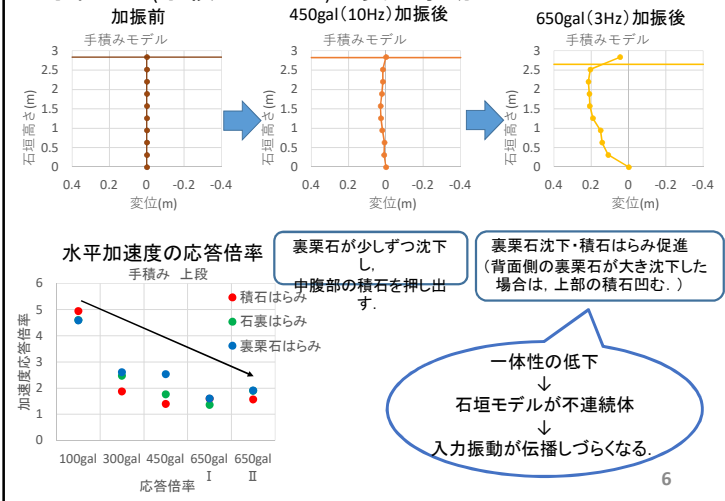
- **正弦波10Hz**: 石垣の固有振動数付近
波数: 30波
前後にテーパ波を10波ずつ設定
- **正弦波3Hz**: 石垣に大きな変位を与えるため
波数を30波
前後にテーパ波を6波ずつ設定
- **ホワイトノイズ波**: 試験体の固有振動数の確認
周波数の範囲: 0.05~30Hz
加振時間: 40秒
目標の最大加速度: 30gal

表 加振ステップ

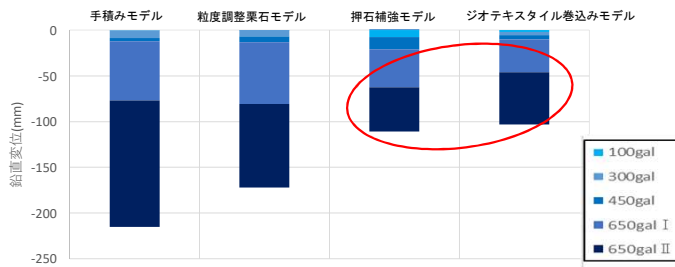
No.	加振波形	目標加速度 (gal)
1	正弦波10Hz	100
2	正弦波10Hz	300
3	正弦波10Hz	450
4	正弦波3Hz	650
5	正弦波3Hz	650

5

無対策石垣(手積みモデル)の変形挙動



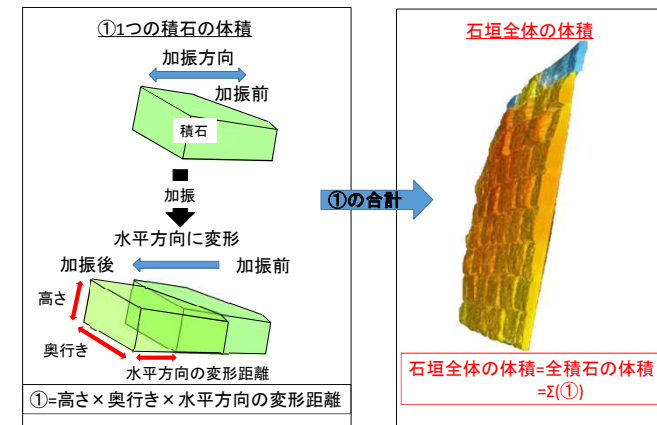
石垣モデル別の裏栗石の沈下(鉛直変位)量

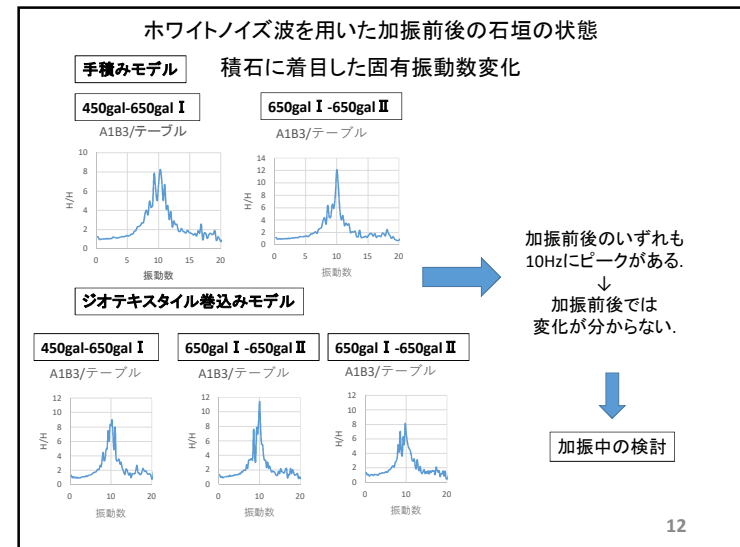
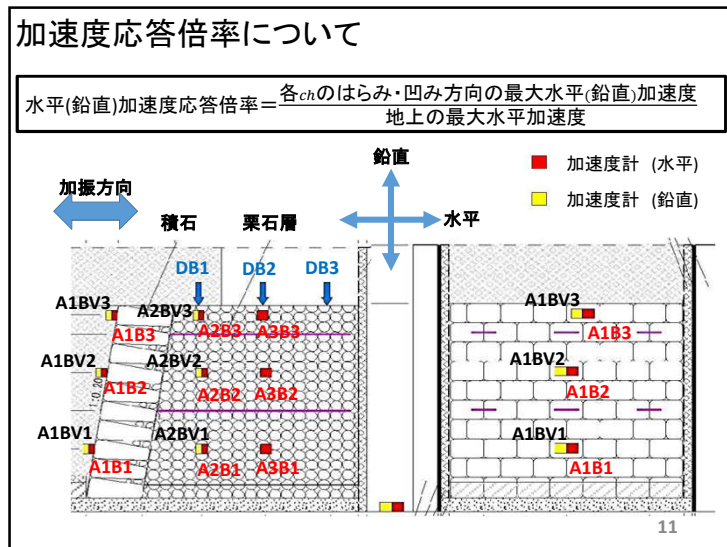
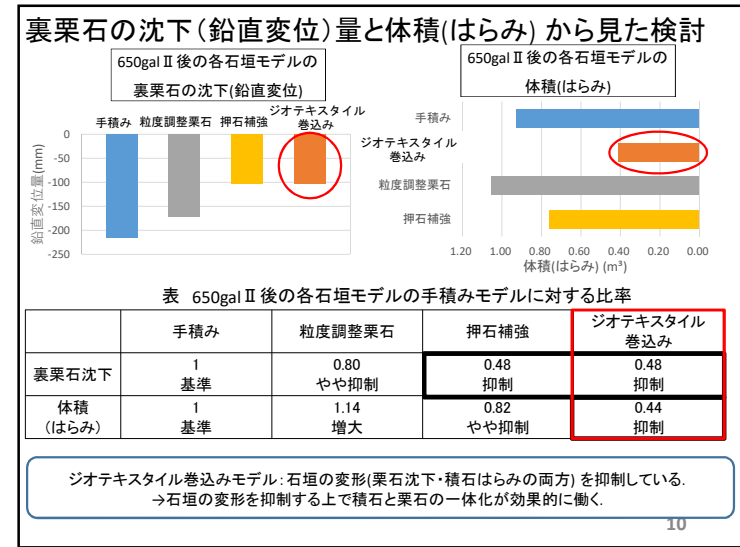
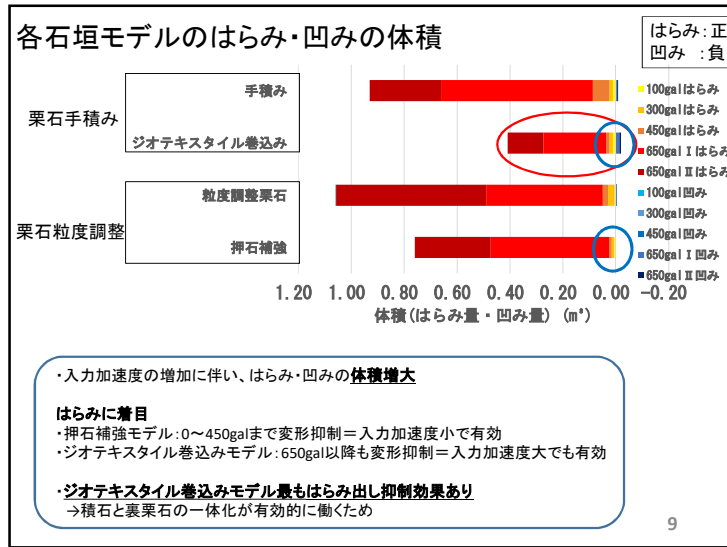


- 入力加速度の増加に伴い、裏栗石の沈下促進
- 押石補強モデル・ジオテキスタイル巻き込みモデル
→ 入力加速度650gal時 → 顕著に沈下抑制効果発揮
→ 胴長効果、積石と裏栗石の一体化が効果的に働いたため

7

積石の変形量 = (はらみ)体積の定義





加振中における石垣の状態変化

650gal II, 積石上段, 1次固有振動数

波形の区切り方(手積みモデル)と時間の例

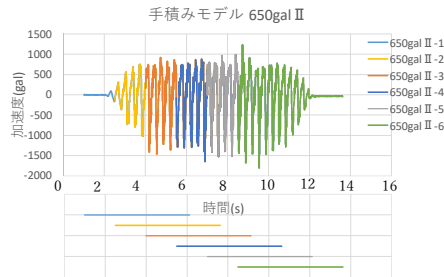


表 区切り名称と時間の区切り方

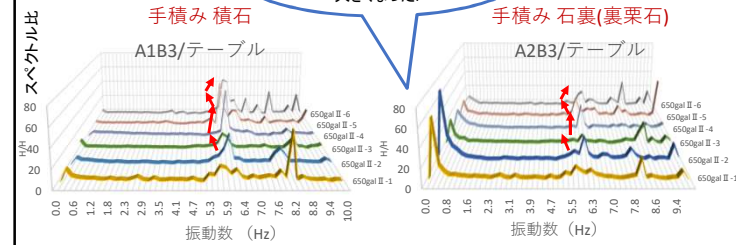
区切り名称	時間 (s)
650gal I 中-1	1~6.12
650gal I 中-2	2.5~7.62
650gal I 中-3	4~9.12
650gal I 中-4	5.5~10.62
650gal I 中-5	7~12.12
650gal I 中-6	8.5~13.62
650gal II 中-1	1~6.12
650gal II 中-2	2.5~7.62
650gal II 中-3	4~9.12
650gal II 中-4	5.5~10.62
650gal II 中-5	7~12.12
650gal II 中-6	8.5~13.62

13

加振中における上段・中段の積石・裏栗石

固有振動数変化

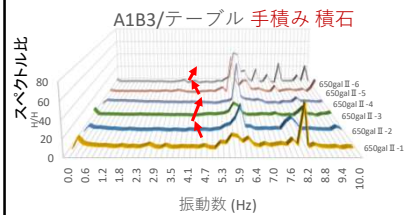
650gal II-1, 650gal II-6
地震波形がない部分のスペクトル比が
大きくなった。



材料	積石	裏栗石
変化	静止時よりfの低下 → ゆらぎ (f:固有振動数)	
考えられる 石垣挙動	はらみ挙動 → f低下; 変形した状態での挙動 中 → 状態が僅かに変化 → ゆらぎ	栗石沈下中 → f低下 栗石堆積 → 締固め → f上昇

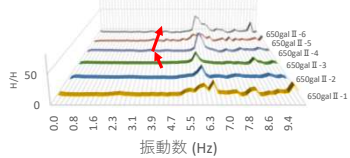
14

石垣モデルごとの1次固有振動数変化



加振中盤・後半
f減少 → f上昇
サイクル2回

A1B3/テーブル
ジオテキスタイル巻き込み 積石



加振中盤
f減少 → f上昇
サイクル1回

15

石垣モデルごとの固有振動数変化

加振時間	加振中盤 f低下 → f上昇	加振後半 f低下 → f上昇
積石の f が変化した 石垣モデル	手積みモデル ジオテキスタイル巻き込みモデル	手積みモデル

ジオテキスタイル巻き込みモデル

石垣状態の変化が少ないため、加振後半には石垣状態の変化が起こらず、
加振中盤と同程度の石垣状態が続いている。

16

まとめ

実物城郭石垣の変形および動的挙動に関する実験的研究を実施した。

特に、振動時の

- ・石垣のはらみ(体積),
- ・裏栗石の沈下,
- ・水平加速度応答振幅の変化,
- ・加振前後の石垣の固有振動数,
- ・加振中における石垣の状態変化(時間別のスペクトル比)

等を考察することで、

石垣の変形挙動、動的挙動を検討することができた。

謝辞:本研究はJSPS科研費 18KK0129(宮島昌克), 21H01595(橋本隆雄)の助成を受けたものです。

17

参考文献

- 1) 学校法人 国士館 国士館大学:熊本城石垣施工実験及び振動実験業務報告書, pp.1-151, 2019.
- 2) 影山亮太:ジオテキスタイルを用いた城郭石垣の耐震性向上に関する実験的研究, 令和1年度論文, pp.1-116, 2019.
- 3) 熊本市:熊本城公式HP <https://castle.kumamoto-guide.jp/galleries/>
アクセス日2021/04/20
- 4) 野間康隆, 山本浩之, 他:城郭石垣の地震時変形と安定性評価に関する研究, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.69, No.4, pp.444-456, 2013.
- 5) 森本浩行:我が国における城郭石垣の形状および構造の歴史の変遷に関する土木史的研究, 関西大学学術リポジトリ, 2005.

18

ご清聴ありがとうございました。

19