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

恒川　怜央[1]・池本　敏和[2]・宮島　昌克[3]・橋本　隆雄[4]

[1]学生　金沢大学大学院　自然科学研究科　環境デザイン学専攻（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail: tunekawa1018@gmail.com

[2]講師　金沢大学　理工研究域　地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

[3]教授　金沢大学　理工研究域　地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

[4]教授　国士館大学　まちづくり学系（〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1）
E-mail: thashimo@kokushikan.ac.jp

災害大国である日本では，地震災害時での城郭石垣の崩壊被害は少なくなく，多くの城郭石垣が崩壊，損壊を受けている．そこで著者らは，石垣の被害と破壊のメカニズムに注目した調査を行った．本研究では，城郭石垣の特徴と相似則を考慮した模型を製作し，振動台を用いた動的模型実験を行った．また対策工法を用いた石垣モデルの動的模型実験を行うことで対策工法の効果を検討する．

Key Words: *Earthquake，　Stone retaing wall，　Vibration experiment*

1.　はじめに

古来より日本では伝統的に擁壁として石垣が利用されている.美しい曲線や安定した構造の城郭石垣の中には，価値の高いと評価されているものもある．この城郭石垣は世界に類を見ない価値の高い建設文化の遺産であるといえる．今後もこの伝統的構造物を維持管理するためには，城郭石垣の構造的安定性を適切に評価することが重要であるといえる．

災害大国である日本では，地震災害時での城郭石垣の崩壊被害は少なくない．1998 年兵庫県南部地震をはじめ，2011 年東北地方太平洋沖地震など，多くの土木財産に被害をもたらした地震発生に伴い，数多くの城郭石垣が破壊や大きな変形に至った．2016 年熊本地震では，震度 7 の地震が 2 度活動するという過去に例を見ない災害により，熊本城内における多くの城郭石垣が甚大な被害を受けた．地震時における城郭石垣の安定性に関する研究事例は僅少である．様々な構造物の耐震補強が進む中，城郭石垣については地震時における不安定化のメカニズムが不明であるため，耐震補強対策が未着手の状態ある．よって，そのような城郭石垣の地震時における変形挙動の解明と対策工法の提案が急務である．

崩壊に至った城郭石垣の中で，上載荷重が少なく分析のしやすい石垣を研究対象モデルとして，無対策のものと耐震工法を用いた動的模型実験を行った．計測方法として模型側面を動画計測し，動画解析を行った．これより，耐震工法を適応した石垣と無対策な石垣を比較し，耐震工法の性能を検討する．

2. 地震による石垣被害の一例

地震による石垣被害の一例として，2016 年熊本地震の地震被害を説明する．2016 年の熊本地震は，4 月 14 日 21 時 26 分に発生した M6.5・最大震度 7 の前震，4 月 16 日 1 時 25 分に発生した M7.3・最大震度 7 の本震が連続した、観測史上例のない地震であった．震源は布田川・日奈久断層帯で震源の深さが 10km 程度と浅かったため，地上の激しい揺れを惹き起こしたとされる．この地震によって，熊本城内にあった重要文化財建造物 13 棟全ての建造物が被災した．今回の地震で最も大きく被害を受けたのが石垣である．熊本地震前震・本震の被害を**表-1** に示す．また熊本城の地震被害状況を**図-1** にまとめる．中でも熊本城の北東に近接して位置する東十八間櫓，北十八間櫓は全壊した．北十八間櫓の被災状況を**図-2** 示す．北十八間櫓は北石垣が完全に崩壊したものの，東西方向と南北方向で地震外力に違いがあったのか，出隅と東石垣は概ね原型を留めている．

復元建造物（昭和 35 年に再建された天守閣など，史料を活かして史実に基づいて復元された建造物）の 20 棟も全て被災した．塀のほとんどは倒壊し，飯田丸五階櫓，戌亥櫓など 7 棟は，建物下の石垣が部分崩落しているために倒壊のおそれがある．天守閣は鉄筋コンクリート建造物であったため，建物自体の損傷は少ないが，大天守最上階の瓦はほとんどが落ちて破損している．

戌亥櫓の被災状況を**図-3** 示す．戌亥櫓はかろうじて角石によって支持されていることがわかる．なお，飯田丸五階櫓や西大手門，南大手門も同様の形式で残存している．出隅は直方体の角石の短辺と長辺を交互に積む算木積みと呼ばれる形式で，櫓の自重は出隅の反った曲線に沿う方向に角石が力を伝達して支えられていると考えられる．逆に，この力の伝達機構により角石間の摩擦強度が増して，出隅が崩壊を免れた可能性もある．

図-1 熊本城石垣の崩壊箇所

図-2 北十八間櫓石垣の被害状況

図-3 戌亥櫓石垣の被害状況

表-1 熊本地震前震・本震の被害 [6)]

○前震：平成28年4月14日21時26分，M6.5

種類／被害	重要文化財構造物	復元建物	石垣
数量	10棟	7棟	崩落6箇所
内容	長塀80m崩壊、9棟は瓦・外壁落下	天守閣瓦、壁ひび、塀崩壊など	膨らみ、緩み多数

○本震：平成28年4月16日1時25分，M7.3

種類／被害	重要文化財構造物	復元建物	石垣	
数量	13棟	7棟	要修復箇所517面※	崩落個所229面※
内容	倒壊2棟、一部倒壊3棟 屋根・壁破損多数	倒壊5棟、他は下部石垣崩壊、 屋根・壁破損等	約23600m^2 （全体の29.9%）	約8200m^2 （全体の10.3%）

※熊本城跡全体の石垣：973面/約79,000m^2，熊本城跡の面積：約512,000m^2

3. 相似則を用いた石垣モデルの振動台実験

3.1 模型実験の概要

城郭石垣は，主に積石，裏込め石，背面土，基礎地盤で構成されている．熊本地震で崩壊した宇土櫓石垣を研究モデルとして，寸法や周辺状況を参考に，石垣模型を作成した．本研究ではおよそ 1/7.5 スケールのモデルとし，香川の相似則の考え方を参考に振動実験を行った．また，振動台上の積載荷重を軽減し，大きな加速度を模型に作用させるために背面土をスポンジに置換した．**図-4** の右に側面図を，左に正面図を示す．このように，土槽内をアクリル板により 2 つに分け，積石配置の異なる 2 つの石垣を同時に加振できるようにした．また，作成した模型の側面図を**図-5** に示す．

3.2 入力地震動

入力振動においては，模型の縮尺を 1/7.5 スケールにしたため，香川の相似則[2)] を考慮した地震動波形を入力すべきである．今回は実際の地震動ではなく，裏込め石の沈下の挙動を明確にするため，石垣模型の相似則を考慮した正弦波を作成し入力した．また入力した加速度は 9Hz，200gal~700gal の正弦波 6 波である．正弦波は最大加速度時間を約 2 秒とし，その前後にテーパーをかけ，1 波 3.5 秒の入力地震動とした．作成した入力地震動の 200gal を**図-6** に示す．

3.3 対策工法について

対策工法として，積石を胴長に置換することで耐震性能の向上を図る対策法を検討する．石垣の破壊には「転倒モード」や「孕み出しモード」があり，入力される加速度や周辺の状況により破壊機構が異なる．ここで，胴長積石を置換する箇所を全面に施すことは経済的にも非効率といえ，現実的ではない． ここで，胴長積石の配置位置を 1 つのパラメータとして実験を行う．胴長積石に置換することで，積石間の接地面積の向上によりせん断抵抗力の向上効果や，胴長が長くなるため物理的に裏込め石の沈下を妨げる効果が見込まれる．そこで，石垣の破壊機構に着目し胴長積石の置換箇所の違う石垣を 2 パターンに決定した. 破壊機構に着目しパラメータ分けし，比較検討を行う．積石の寸法と配置位置を**表-2** に示す．パターン 1 では，石垣破壊の原因となる，裏込め石の沈下を抑制することを目的に，胴長積石を段違いに置換した．パターン 2 では，石垣破壊の「転倒モード」の破壊に対して，積石間のせん断により抵抗するために上部に胴長積石を置換し，積石間のせん断により抵抗するために孕み出し始める中腹部を中心として胴長積石を置換した．

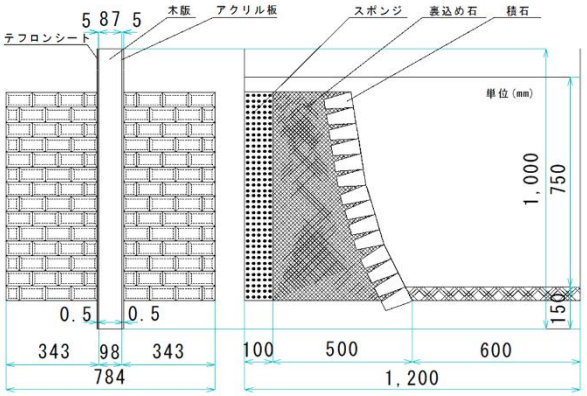

図-4 振動台模型設計図

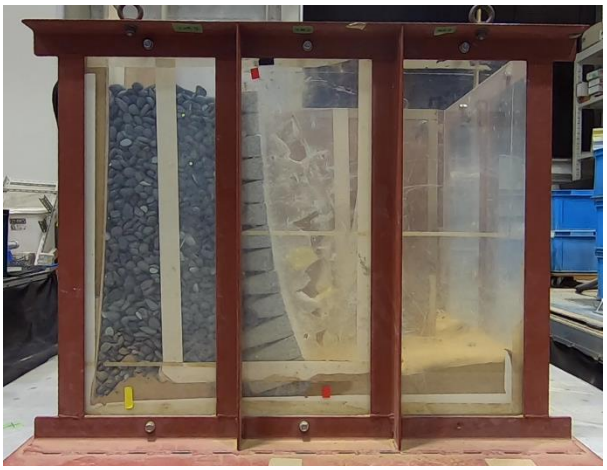

図-5 振動台模型側面図

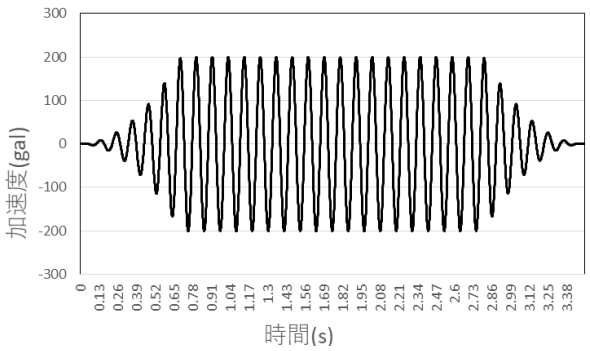

図-6 200gal 入力加速度

表-2 積石の寸法と配置位置

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

3.4 実験結果

無対策と胴長の積石を用いた対策ありの石垣を同時に加振し，対策効果を検討した．このとき，3 方向（模型側面×2，正面）からビデオ撮影を行い，挙動を計測した．無対策モデルの 700gal 加振後の図を**図-7** に，パターン 1,2 の 700gal 加振後の図を**図-8** に示す．また各モデルの水平変位量のグラフを**図-9, 10, 11** にそれぞれ示す．

積石の胴長が石垣の応答に与える影響を見てみる．無対策のモデルは，裏込め石の沈下が大きく石垣の中上部から孕み出てほぼ崩壊に至った．水平変位から見るに，600gal の地震波が来た時に無対策の石垣は大きく被害を受けると考えられる．パターン 1，2 の胴長の積石を配置することで，無対策モデルと比べ遥かに小さい変位量に落ち着いた．

パターン 1 と無対策モデルの裏込め石の沈下量を比較する．パターン 1 の積石配置することで無対策モデルの裏込め石の沈下量が 40.8%抑えることが出来た．石垣の中上部に段組みに胴長積石を配置することによって，一番変位の大きい中上部石垣裏の裏込め石の沈下を物理的に抑えることが出来た．600gal，700gal と大きい加速度になると石垣の「転倒モード」より，下段の積石を含め，全体的に裏込め石が沈下し，孕み出す結果となった．

次にパターン 2 と無対策モデルの裏込め石の沈下量を比較する．パターン 2 の配置により，無対策モデルの裏込め石の沈下量が 55.0%抑制することが出来た．胴長積石にした 7，8，11，12 段目の積石は，積石間のせん断に抵抗された，または沈下した裏込め石が入り込むほど変位しなかったため，水平変位量が小さかった．しかし，胴長積石ではない 9，10 段目の積石部分に沈下した裏込め石が集中してしまい，崩壊はしなかったが水平変位量が大きくなってしまい，パターン 1 よりも大きな水平変位量が計測された．

図-7 700gal 加振後側面図（無対策モデル）

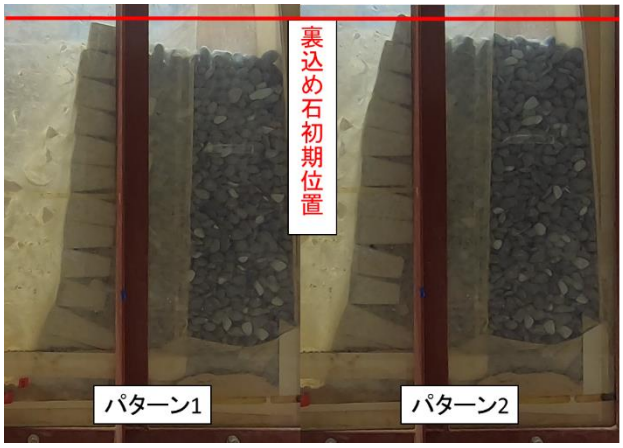

図-8 700gal 加振後側面図（パターン 1.2）

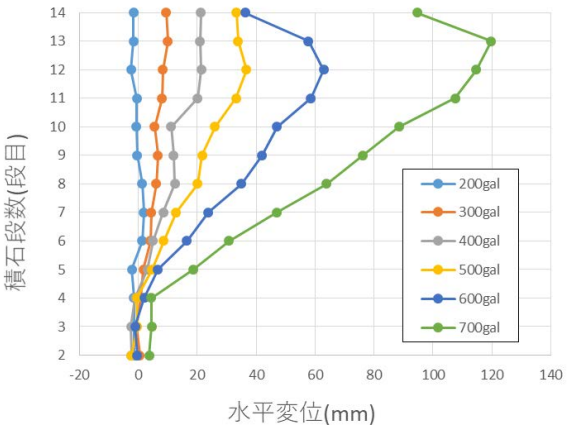

図-9 無対策モデル, 水平変位量

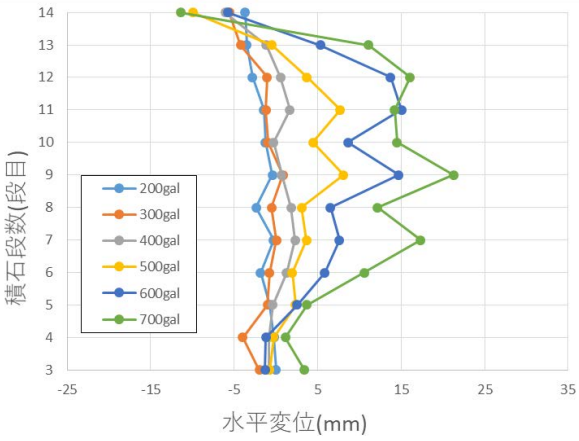

図-10 パターン 1, 水平変位量

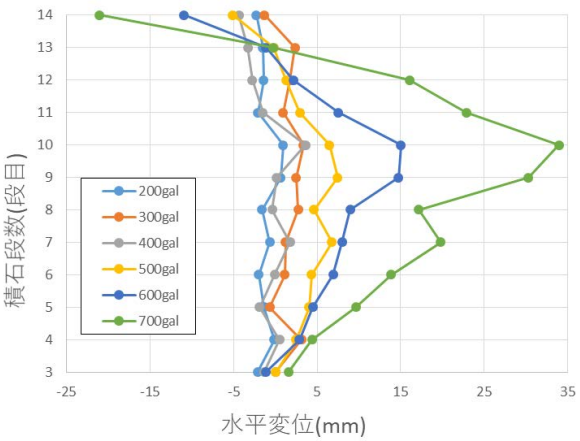

図-11 パターン 2 水平変位量

4. まとめ

本研究では災害大国である日本の，地震災害時の城郭石垣の崩壊被害を調査し，対象モデルを熊本地震で崩壊した宇土櫓石垣として，動的模型実験を行った．実験でのまとめを以下とする．

・無対策モデルでは 600,700gal ほどの大きさの加速度で崩壊に至る．これは過去の地震時の石垣被害の例と近しい結果であった．

・パターン 1 の対策工法では，裏込め石の沈下量が 40.8%抑えることが出来，600,700gal の加速度でも崩壊には至らず，積石の孕み出しを無対策モデルよりとても小さくすることが出来た．

・パターン 2 の対策工法では，無対策モデルの裏込め石の沈下量が 55.0%抑制することが出来たが，胴長ではない積石に沈下した裏込め石が集中してしまい，その部分が大きく孕み出る結果となった．

今度の展望として，よりよい対策工法の検討及び実験，また 2D-DDA による解析で対策工法の妥当性や，石垣んの実スケールでの対策工法を用いた解析を行っていきたいと考えている．

謝辞：本研究を実施するにあたり，公益財団法人大林財団，2018 年度奨励研究助成を得た．

参考文献

1) 池本敏和，北浦　勝，宮島昌克：城址公園における石垣の耐震安全性の調査と解析，構造物の安全性・信頼性に関するシンポジウム(JCOSSAR2000), pp. 277-284, 2000. 11
2) 西山哲，大西有三，大津宏康，西村浩史，梁川俊晃，亀村勝美，関文夫，池谷清次：不連続変形法（DDA）による石積み擁壁の安定性に関する研究，地盤工学会，第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1631-1632, 2003.
3) 小山倫史，赤尾悟史，大西有三，西山 哲：岩盤斜面の地震応答解析における不連続変形法（DDA）の適用に関する研究，土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 3, pp. 644-662, 2009.
4) 森川誠司，田部井和人，礒岩和夫，田口勝則，高橋峰雄，石川典男，西本元男，宮城重道，二階堂聡：不連続変形法による城郭石垣の地震時安定性に関する検討，第 38 回地盤工学研究発表会， pp. 1633-1634, 2003.
5) 大西有三，佐々木猛, Gen-Hug Shi：日本計算工学会編 不連続体変形法（DDA），丸善, 2005.
6) 思いを馳せ，そして楽しむ 文化遺産の世界 The World of Cultural Heritage：嘉村哲也，Vol.32 熊本地震による熊本城の被害と復旧，https://www.isan-no-sekai.jp/feature/201711_09，2019/7/20 閲覧

(2019. 9. 10 受付)

Dynamic model experiment on earthquake protection method for stone retaing wall.

Reo Tsunekawa，Toshikazu Ikemoto，Masakatsu Miyajima and Takao Hashimoto

Japan is one of the disaster-prone country and a lot of stone retaing wall are collapsed or damaged by earthquakes.
We focused on the mechanism of stone retaing wall damage and destruction.
In this study, we created models considered the characteristics of the stone retaing wall and Similarity law and conducted dynamic model experiments using a shaking table.
We also experiment using models that adopted Methods for Counter　measure against earthquake and evaluate the effect of them.