

2016 年熊本地震における熊本城内の石垣被害

池本 敏和¹・秦 吉弥²・村田 晶²・宮島 昌克⁴・橋本 隆雄⁵

¹正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県角間町)

E-mail: tikemoto@kanazawa-u.ac.jp

²正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県角間町)

E-mail: E-mail: murata@kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県角間町)

E-mail: E-mail: miyajima@kanazawa-u.ac.jp

⁵正会員 (株) 千代田コンサルタント復興・防災本部防災対策室 (〒114-0024 東京都北区西ヶ原 3-57-5)

E-mail: E-mail: t-hashi@chiyoda-ec.co.jp

2016 年熊本地震は、熊本城内における石垣に甚大な被害を与えた。著者らは、地震時における石垣挙動の解明における基礎資料の収集および教訓を得るために調査を行った。同時に城内の常時微動観測を実施した。その結果、従来からみられる石垣の孕みだし、崩落の被害事例、地山斜面と石垣部の滑りや分離は地震動の強さによる影響である可能性が高い。丘陵形状の地形効果のような石垣被害の方向性を検討することができた。また、絶妙なバランスのもとで石垣の一部が残存し、櫓の倒壊を軽減したことは興味深い。本調査結果をもとに熊本城調査研究センターとの連携を密にしながら、熊本城石垣の動的解析実施、石垣の耐震安全性を考慮した復旧・復興を行う必要があるとの結論を得た。

Key Words: kumamoto earthquake, kumamoto castle, stone masonry, microtremor measurement

1. はじめに

2016 年熊本地震では、大地震が間をおいて活動するという特殊な現象により、熊本城内における石垣は過去に例を見ないほどの甚大な被害であった¹⁾。このため、(社)土木学会地震工学委員会「石積擁壁の耐震補強対策に関する研究小委員会(委員長：橋本隆雄(株)千代田コンサルタント)」の活動の一環として、短い時間ではあるが城内において現地調査を行った。

これまで石垣における研究には、池本らの剛体ばねモデルによる石垣の耐震安定性に関する研究²⁾、岡松・新谷の旧江戸城石垣の崩壊および復旧に関する研究³⁾、森本らによる城郭石垣の隅角部形状とその数値評価法の研究⁴⁾、田中・山田の石積み擁壁の安定性評価法の研究⁵⁾、田中らの石垣断面のFEM-3Dによる数値解析実験⁶⁾及び山中らの高松城天守台石垣の解体修理に関する研究⁷⁾などが挙げられる。

また間知ブロック積擁壁に関する研究には、橋本らの石積擁壁の耐震性の実験および解析に関する研究⁸⁾、太田らによる石積壁の地震時変形メカニズムに関する

実験的研究⁹⁾などがある。

2016年熊本地震によって熊本城内の数多くの石垣が崩落、損壊を受けた例は極めて僅少である。そこで著者らは、地震時における石垣挙動の解明における基礎資料の収集および教訓を得るために城内の調査を実施した。しかし本調査時期は城内のいたる箇所において被害の復旧期間でもあることから、熊本城調査研究センターの許可、同行のもと実施された。このとき、城内の常時微動観測を同時に実施した。常時微動観測に関しては大阪大学・秦らの協力を得ている。常時微動の観測点を図1に示す。また、観測点45地点のH/Vスペクトルを図2に表す。図2から、数か所の振動数にピークは見られるが、サイトによる差はあまり認められない。このことは城内丘陵地における城郭の多くは同様な動特性を有する地盤に建てられていると考えられる。

本研究の現地調査結果に基づいて得られた成果については、熊本市に還元するとともに、今後の「熊本城内の石垣等修復・復興計画の策定」等に役立つことを目的、期待するものである。



図1 熊本城内における常時微動観測地点

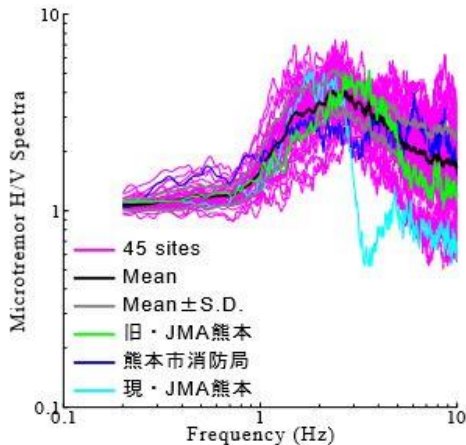


図2 熊本城内における常時微動H/V スペクトルの比較

2. 熊本城周辺の地形・地盤

京町台地の先端は、現在の新堀橋付近で東西幅が狭くなり、古来から茶臼山とも呼ばれていた独立丘陵状であり、平面地形は扇形である。京町台地の特徴的な崖地形が随所に見られ、崖面に基盤の Aso-4 火砕流堆積土の非溶結凝灰岩露頭が見られる。崖面の形成は、河川によって削られたものだが、熊本城築城時、白川も茶臼山に接して流れていたとされている¹⁰⁾。「慶長国絵図」¹¹⁾ などをもとに、現在熊本城跡の南を流れる白川が、世継橋から北側へ大きく蛇行し、市役所付近で坪井川と合流していたものを、加藤清正が 17 世紀初頭に白川を直線化し、現在の流路に付け替えたと言われている。

築城前の旧地形を知る資料としては、「茶臼山ト隈本之古図」¹²⁾ がある。築城前の地形が独立丘陵状に描かれ、築城前の土地利用状況を表している。旧地形は、現在の本丸付近を最高所として東へは急に、西へは緩やかに下がる地形であった。

3. 熊本城石垣の被害状況

熊本城の石垣の大半は輝石安山岩である。また、熊本城における常時微動観測および地震動推定は秦らがやっている¹³⁾。ここではその成果を加味しながら各地

点における石垣の被害状況を考察する。写真 1 に熊本城東側・熊本大神宮付近の被害状況を示す。この場所は、前震によって北・東十八間櫓（重要文化財）を支えている東側斜面地盤の崩落が起こったため、上部の櫓群が崩落したものと考えられる。既に崩壊後であったことから、石垣が孕みだしたかどうか把握できない状況である。

また、写真 2 は熊本城東側・稲荷神社付近の被害状況である。この場所は北・東十八間櫓（重要文化財）と 5 つの櫓群の間にある斜面部分である。十八間櫓群に連動して崩落したのかは定かではないが、抑えの石垣が十分に機能しなかったほど強い地震動であることが推察される。

次に、南側の長堀の被害状況をみる。写真 3、4 に被害のない堀と被害のある長堀を示す。写真のように石柱に支えられて立っている堀であるが、東側の部分で写真 4 のような倒壊が約 100m 間発生した。



写真 1 熊本城東側・熊本大神宮付近の被害状況



写真 2 東側・稲荷神社付近の被害状況



写真3 南側・長塀（無損傷区間）



写真5 南側 残存する方形型の石垣



写真4 南側・長塀（損傷区間：東側）



写真6 中央南面 数奇屋丸二階御広間東横の石垣崩落

城内東側の地盤が若干弱い可能性があるが、損壊に至っていない石垣も存在していることから、さらに詳しい調査を要する場所であると考えている。ちなみに熊本市職員の証言では、城内の東西方向に被害が多いような感じを受けているとのことであった。本稿には掲載していないが、秦らの推定地震動による加速度応答スペクトルには、ほぼ同程度の加速度応答スペクトル値が得られている¹³⁾。そこで改めて、天守・本丸の位置する丘陵を概観してみると、南北に長く、東西に短くなっていることから、被害には地形効果に関与していることも示唆される。

南側に残存する方形型の石垣を写真5に示す。この場所では、石垣の被害状況は大きいものではなく、若干の孕みやずれにとどまっている。石垣自身はそれほど大規模な高さを有せず、櫓などの荷重が上載されていなかったことが石垣被害を最小にとどめたと考えられる。

飯田丸五階櫓は大きな被害を受けている。現時点では、熊本城調査研究センターから被害写真の掲載とコメントを控えてほしいと言われているので、この石垣については割愛する。

写真6は城内中央に位置する数奇屋丸二階御広間東横の南面における石垣の崩落状況である。同写真から出隅部横の石垣が上部より崩落した。崩落箇所は長方形敷地の長辺の先端部にあたる。このような場所では、裏込めの状況に左右される場合が多い。石垣普請では、出隅部に用いられる石の胴が長く、出隅から離れた個所における石垣内部の裏込め石は小さく、十分な厚さがないことが多い。出隅部より離れた個所は石垣の弱点になる場合が多く、孕みだした後に崩落に至るケースが考えられる。

内部・本丸御殿を支える南側の二様の石垣の状況を写真7に示す。ここは後方に大天守、左に数奇屋二階御広間を見ることができる場所に位置する。「武者返し」と言われているように、石垣下部は30度ほどの緩やかな勾配を呈しているが、上にいくほど勾配がきつくなり、上部・天端のそれは75度の絶壁となる。一見被害がないようにみえるが、注意深く観察すると後方にある石垣の算木積部分にズレが生じており、孕みだしていることがわかる。横に通路が通っており、このような状況は安全とは言えないが、他の場所と比較して被害程度が軽微なこと、修復にはすべての高石垣を積み直さなければならないこと、を考えると修復の優先順位は低くなっているものと思われる。



写真7 二様の石垣の状況



写真8 西側 戌亥櫓東側の被害



写真9 西側 戌亥櫓に続く石垣状況（東側）

次に、西側の被害を注目する。ここでは戌亥櫓までを想定し、二の丸跡等は検討箇所から除外した。戌亥櫓東側の被害状況を写真8に、西出丸の西側、すなわち戌亥櫓に続く石垣状況を写真9に示す。

写真8、9ともに東側の状況を表している。戌亥櫓東側の石垣は比較的低いものの被害が発生しているが、これに続く石垣は櫓から十数メートルまでは被害が認められるものの、距離を離れれば、石垣には損傷が認められなかった。一方、写真を掲載できないが、戌亥櫓西側の石垣の崩落は著しく、北北東に残った隅石だけで櫓を支えている。この被害は飯田丸五階櫓石垣を彷彿させるものである。このような現象の被害事例を見たことがない。おそらく櫓程度の荷重を支えている石垣特有の現象かもしれない。絶妙な荷重バランスのもとに形成される石垣被害なのかもしれない。石垣を力学的に研究する者にとっては、今後、貴重なサンプル

ルになると考えられる。

最後に天守の被害に注目する。天守を東から望むと写真10のような被害がわかる。大天守と小天守が渡り廊下でつながっている箇所石垣の崩落が見られる。天守は1960年に復元されたRC造、RC杭に支えられている昭和の名城である。したがって木造の数倍の荷重はRC杭で支えて、周辺に石垣を施したことになる。天守の全荷重を石垣を有する基礎が支えていないことが特徴である。昭和に築造された城（名古屋、大阪等）のほとんどがこの形態である。平成になって金沢城を始めとする城が本格木造建築として築造され始めた。

詳細なことは不明ではあるが、支柱にトップヘビーな重りである構造物の周辺に石垣を化粧材的に貼りつけた城の地震時挙動については検討されておらず、いくつかの仮定のもとで築造当時の設計法に頼っている場合が多い。今後、城の復旧、復元に関与する重要な資料が得られることが考えられる。また写真11に石垣崩落の下部から撮影した天守の基礎部分を示す。写真よりRC梁がはっきりとみえる。基礎梁は城の水平床剛性を上げており、城の倒壊防止に役立つものであることがわかる。金沢城の場合、基礎部を木梁でかなり高剛性に復元したと聞いている。



写真10 大天守と小天守の間の石垣の被害



写真11 天守の基礎部分のRC梁



写真 12 天守周辺地盤の凹凸現象

写真 12 に天守周辺地盤の凹凸の状況を示す。地震前に平坦な地形であったが、地震後には、このような地盤変状が生じた。この地盤変状は何であろうかを推測する。地震工学の分野では液状化現象に伴ない大規模な側方流動が発生する。一方、地盤工学の分野では斜面の亀裂と呼んでいる。いずれにせよ大規模な地盤の堆積変化を伴った現象である。しかしながら硬い丘陵地形にも小規模な堆積変化に伴った凹が天守周辺地盤に現れた。あるいは強震動による地盤が締め固まったために発生した凹かもしれない。この現象を解明するためには詳細な測量が必要である。

熊本城石垣の被害を雑見した。多くは予測の範囲を超えていないが、復旧優先の今は詳細な調査ができない状況にある。出来るだけ、熊本城調査研究センターと密に連携を取りながら、情報収集に努めるとともに、一日でも早く詳細調査が開始できるように考えている。

3. 石垣の基本モデルを用いた DDA 解析

本章では、石垣の安定性だけでなく、崩壊後の挙動を検討するために、2次元の石垣基本モデルを用いた 2DDA（不連続変形法）について説明する。

一般的な木造 2 階建ての重量である $0.17\text{N}/\text{cm}^2$ を等分布荷重としてモデルに載荷した。また、解析のパラメータを表 1、2 に、入力波形（20Hz の正弦波）を図 3 に示す。

表 1 解析パラメータ

パラメータ	値
ペナルティ係数 (kN/mm^2)	10000
時間刻み (s)	0.0001
粘性係数	0.1

表 2 モデルの諸物性値

	石垣	裏込め栗石	裏込め土
粘着力 (kN/m^2)	0	0	19
内部摩擦角 (deg)	30	30	33
単位体積重量 (kN/m^3)	23	19	19
弾性係数 (kN/m^2)	1×10^7	1×10^7	3×10^4
ポアソン比	0.3	0.39	0.3

基本解析モデルを図 4 に示す。基本モデルに対して、図 3 の入力振幅に対する石垣の変形挙動を図 5 に示す。さらに基本モデルの 2 倍の高さの石垣に対して、1000gal の入力振幅の解析結果を図 6 に示す。石垣の変形挙動、すなわち石垣の崩落や裏込め石と裏込め土（地山）の滑り、剥離が明瞭に表されていることが明らかである。今後、基本モデルをさらに改良し、武者返しの勾配、現地での諸物性値を調査し、解析に反映させていることを考えている。

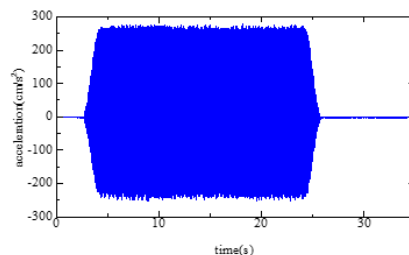


図 3 解析への入力波形 (20Hz, 正弦波)

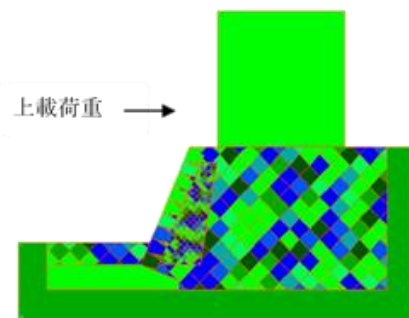


図 4 基本解析モデル

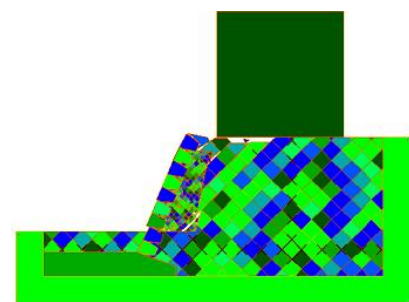


図 5 図 3 の入力波形に対する石垣の変形挙動

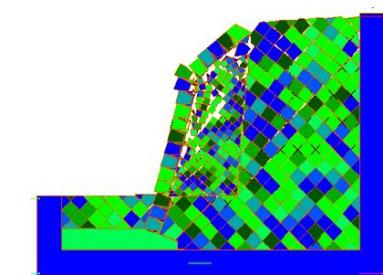


図 6 入力波形 (1000gal) に対する石垣の変形挙動

2次元の不連続変形法(2DDA)による数値シミュレーションを行った。基本石垣モデルを用いたため、入力振幅 400gal では、若干変形モードが異なるが石垣の中部、下部の応答変位は同等な性状を示す結果が得られたことは興味深い。

4. まとめ

本調査研究では、地震時における石垣挙動の解明における基礎資料の収集及び教訓を得るために城内石垣の調査を実施した。しかし本調査時期と城内の復旧期間が重なることから、熊本城調査研究センターの許可、同行のもとに調査が実施された。

本調査研究で得られた石垣の被害状況は以下のようである。

- (1) 従来からみられる石垣の孕みだし、崩落の被害事例が多い。また、地山斜面と石垣部の滑り、剥離がみられた。これは強震動の影響が考えられる。
- (2) 城内の広域に被害が分布していること、被害の有無の事例が多数存在している。特に、丘陵形状の地形効果の影響から石垣被害を検討できるような被害であった。
- (3) 絶妙なバランスのもとで石垣の一部が残存し、櫓の倒壊を軽減したことは興味深いことである。

また、本調査成果をもとに熊本城調査研究センターと連携をはかりながら、熊本城の石垣の詳細調査および動的解析の必要性があるとの結論を得た。

謝辞：本調査は、熊本城調査研究センターの関係各位のもとに実施された。ここに謝意を表します。また本研究は、(社)土木学会地震工学委員会石積擁壁の耐震補強対策に関する研究小委員会(委員長：橋本隆雄)の活動の一環であり、文部省科学研究費基盤B(研究代表者：宮島昌克(26303007-01))の助成を得ている。

参考文献

- 1) 山尾敏孝：熊本城跡および石橋の被害，土木学会西部支部「熊本地震」地震被害調査報告会資料，2016.5
- 2) 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
- 3) 岡松康弘，新谷洋二：旧江戸城石垣の崩壊および復旧に関する研究，土木史研究，第18号，pp.513-520，1998.5
- 4) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の隅角部形状とその数値評価法，土木学会論文集，No.666/III-53，pp.159-168，2000.12
- 5) 田中国熙，山田清臣：石積み擁壁の安定性評価法，土木学会論文集，No.541/III-35，pp.9-20，1996.6
- 6) 田中国熙，新谷洋二，小林善勝，木村真也，谷 優作：石垣断面のFEM-3Dによる数値解析実験，土木史研究，第23号，pp.401-408，2003.6
- 7) 山中 稔，池田 敦，長谷川修一，大嶋和則，西田一彦：高松城天守台石垣の解体修理工事に伴い実施した各種地盤調査について，擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム発表論文集，pp.12-19，2012.11
- 8) 橋本隆雄，宮島昌克，池本敏和，酒井久和：石積擁壁の耐震性の実験および解析に関する研究，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.4，pp.991-1003，2014.4
- 9) 太田直之，杉山友康，岡田勝也，鳥井原誠，山本 彰，山田祐樹：間知石による石積壁の地震時変形メカニズムに関する実験的研究，土木学会論文集F，Vol.62，No.2，pp.213-225，2006.4
- 10) 熊本県地質業協会：熊本県地質図・解説書，2008.3
- 11) 国立国会図書館：慶長国絵図，1604以降
- 12) 熊本県教育委員会：熊本県史料 近世篇第一，1965.
- 13) 秦 吉弥，村田 晶，池本敏和，橋本隆雄，宮島昌克：サイト増幅特性置換手法に基づく2016年熊本地震における熊本城での強震動の評価，土木学会地震工学研究発表会，2016.10(投稿済)

(2016.9.2 受付)

DAMAGE ON STONE RETAINING MASONRY IN THE KUMAMOTO CASTLE DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Toshikazu IKEMOTO, Yoshiya HATA, Akira MURATA, Masakatsu MIYAJIMA and Takao HASHIMOTO

There severe damage on stone retaining masonry wall in the Kumamoto castle during the 2016 Kumamoto earthquake. The earthquake is also giving many lessons to us in a castle stone retaining masonry wall. We investigate the destruction mechanism and make it clear. In this study, As a result, Slipping and separation in the natural ground slope and stone retaining masonry wall part have a high possibility which is influence due to the greate earthquake motion. A dynamic analysis of Kumamoto-castle stone retaining masonry wall is carried out under the a few investigation results, while cooperating with the Kumamoto castle research center densely. We have to consider safety due to strong earthquake of stone retaining masonry wall in the Kumamoto castle.