

# 2016年熊本地震における熊本城内の石垣被害 および崩壊挙動解析

## DAMAGE AND BEHAVIOR OF THE COLLAPSE OF STONE RETAINING MASONRY IN THE KUMAMOTO CASTLE DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

恒川怜央<sup>1</sup>・池本 敏和<sup>2</sup>・宮島 昌克<sup>3</sup>・橋本 隆雄<sup>4</sup>

Reo Tsunekawa, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Takao Hashimoto

<sup>1</sup>金沢大学大学院 環境デザイン学専攻 (〒920-1192石川県角間町)

Master Course Student, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

<sup>2</sup>金沢大学講師 地球社会基盤学系 (〒920-1192石川県角間町)

Associate Professor, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

<sup>3</sup>金沢大学教授 地球社会基盤学系 (〒920-1192石川県角間町)

Professor, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

<sup>4</sup>国士館大学教授 まちづくり学系 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

Professor, Department of Urban Design and Landscape Architecture, Kokushikan University

The stone retaining masonry wall in the Kumamoto castle was subjected to severe damage during the 2016 Kumamoto earthquake. We investigated the damage and destruction mechanism and made that clear. In this study, a field investigation of the Kumamoto castle stone retaining masonry wall has been carried out while densely cooperating with the Kumamoto castle center. We had to assess the damage of the stone retaining masonry wall in the Kumamoto castle due to the strong ground motion of the earthquake. Furthermore, we performed numerical simulations for the collapse of a wall using two-dimensional Discontinuous Deformation Analysis (2D-DDA).

**Key Words:** Kumamoto earthquake, stone retaining wall, kumamoto castle, 2D-DDA

### 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<sup>1)</sup>。

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<sup>2)</sup>、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<sup>3)</sup>、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<sup>4)</sup>、田中・山田の石積み擁壁の安定性評価法の研究<sup>5)</sup>、田中らの石垣断面の3D-FEMによる数値解析実験<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>などが挙げられる。石積み擁壁の地震時の挙動に対する数値解析が鋭意進められている。例えば、有限要素法 (Finite Element Method : FEM) が用いられることが多いが、石積み擁壁に適用した場合<sup>8)</sup>、不連形の取り扱いに問題がある。そのため、個別要素法 (Distinct Element Method : DEM)<sup>10)11)</sup>、やSPH粒子による力学モデル法 (Smoothed Particle Hydrodynamics : SPH)<sup>12)13)</sup>の適用がある。このように、土木工学においても斜面崩壊など、大変形を取り扱う必要のある解析に使用される事例が増えつつある。また、岩盤の大変形、破壊現象を動的に数値解析する手法として、不連続変形法 (Discontinuous Deformation

Analysis : DDA、以下、DDA 法と称する) が提案され、広く用いられてきている<sup>14)17)</sup>。これまでに DDA 法を用いて石積擁壁の地震時挙動を解析した事例は多くはないが、間地石と栗石の個々の挙動は剛体挙動となるため、不連続な岩石集合体として考慮可能であることから DDA 法の適用について検証が行われている。

DDA法を用いて石積擁壁の地震時挙動を解析したものとして、森川<sup>16)</sup>らは仙台城の石垣の修復に際して石垣の安定性について、DDA法を用いた静的解析を実施している。また、橋本ら<sup>18)</sup>は石積擁壁の耐震性の評価を検証するために、模型実験を対象としてDDA法による動的解析を実施し、解析は実験と整合した結果が得られることを確認している。しかしながら、残留変位の大きさや変形については、実験と解析に差異が見られている。また、既往の研究において、実際の石垣対象に挙動解析をDDA法を適用した例は筆者が知る限り行われていない。

このため、(社)土木学会地震工学委員会「城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会(委員長：橋本隆雄)」の活動の一環として、城内において現地調査を2016年4月29日から数回に渡って行った。また、選定した石垣についてDDA法を用い、崩壊挙動の解析を行うことを本研究の目的とする。

## 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。熊本城と新堀橋は京町台地の南端に位置する。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<sup>19)</sup>。「慶長国絵図」<sup>20)</sup>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されている。

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」<sup>21)</sup>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地として東へは急に、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。天守・本丸の位置する丘陵をみると、被害には地形効果が関与していることも考えられたが、被害の多くは藩政期後に改築された石垣と一致していた。これは廃藩に伴い伝統的な修復ができる石工達を維持ができなくなり、かわりに軍が修理したことが影響しているものと考えられる。すなわち、石垣普請(工事)の専門家ではないものが築造を指示、施工したことが考えられる。

本丸御殿等を支える南側の二様の石垣の状況を写真-1 に示す。ここは後方に大天守、左に数寄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、注意深くみると後方にある石垣の出隅部にズレが生じており、孕みだしていることがわかる。

また、南側から赤外線センサーによる熱画像による石垣被害の調査結果を図-1<sup>22)</sup>に示す。同図、(b)には可視画像を示す。可視画像からは明確な被害状況が認められない。しかしながら、(c)カラー、(d)白黒による石垣における熱画像(2016年10月24日13:00~13:30)の赤丸部分には、石垣の被害が明瞭に表れており、特に白黒によるそれはカラー画像よりも鮮明に石垣下部の孕みだしの現象を見ることができる。以上のことは、広域に発生している石垣の被害状況調査に熱画像による判定手法が有効になるのではないかということを示唆している。横に観光のための通路が通っており、このような状況は安全とは言えない。他の石垣の修理が急務であるため、修復の優先順位は低くなっているものと考えられる。

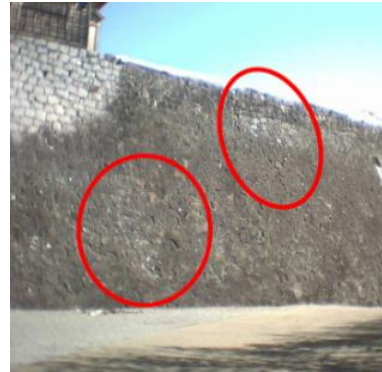
天守を東側から望むと写真-2 のような被害状況であった。写真-2 の左側が大天守、右側が小天守である。大天守と小天守が渡り廊下でつながっている箇所における石垣の崩落が見られる。天守は 1960 年に復元された RC 造、RC 杭に支えられている「昭和の名城」である。したがって木造の 3~5 倍程度の荷重を RC 杭(大天守: 8 本、小天守: 4 本)で支えて、周辺に石垣を施したことになる。天守の全荷重を石垣を有する基礎が支えていないことが特徴である。昭和に築造された城(名古屋、大阪等)のほとんどがこの形態である。平成になって金沢城を始めとする城が本格木造建築として築造され始めた。



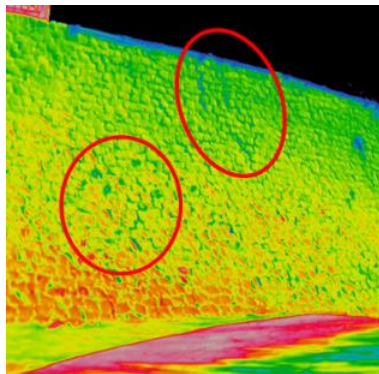
写真-1 二様の石垣の状況



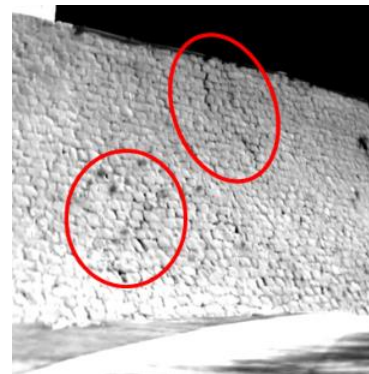
(a) 石垣の位置



(b) 可視画像



(c) 熱画像 (カラー)



(d) 熱画像 (白黒)

図-1 赤外線センサーによる二様の石垣南側の被害把握



写真-2 大天守と小天守の間の石垣の被害

支柱上にトップヘビーな構造物が立ち、石垣周辺に化粧材的に貼りつけた石垣の地震時挙動については十分な検討が行われていないが、地震時には化粧的構造の積石は振り落とされたものと考えられる。天守には大規模な崩壊がないことから、文化財としての城郭修復を議論するための貴重な資料が得られたと考えられる。写真-2の赤丸部分を拡大したものを写真-3とする。写真-3は石垣崩落の下部から撮影した天守の基礎部分を示す。写真よるとRC基礎梁が明瞭に確認できる。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ったことがわかる。

金沢城内の五十間長屋の復元（2001年完成）では、高剛性の木梁を基礎部に施している。水平剛性を上げることが地震時の城郭の耐震機能を高め、城郭の崩壊に対する軽減対策に期待できると考えたためである。

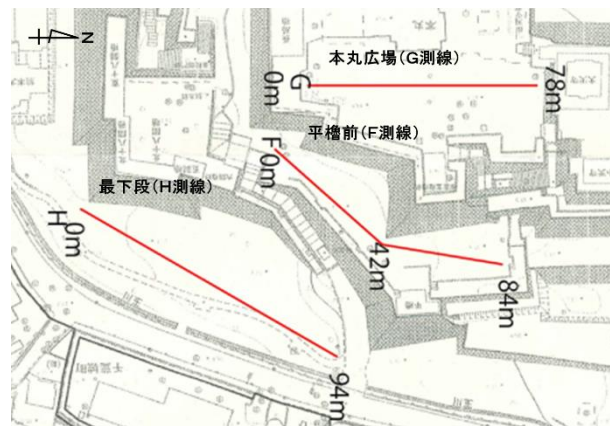
写真-4に天守周辺地盤では凹凸の状況がみられた。地震前に平坦な地形であったが、地震後には沈下が起こった理由を検討する。天守地盤の南北方向側線に沿い表面波探査がある<sup>23)</sup>。探査結果及び推定N値分布を図-2に示す。



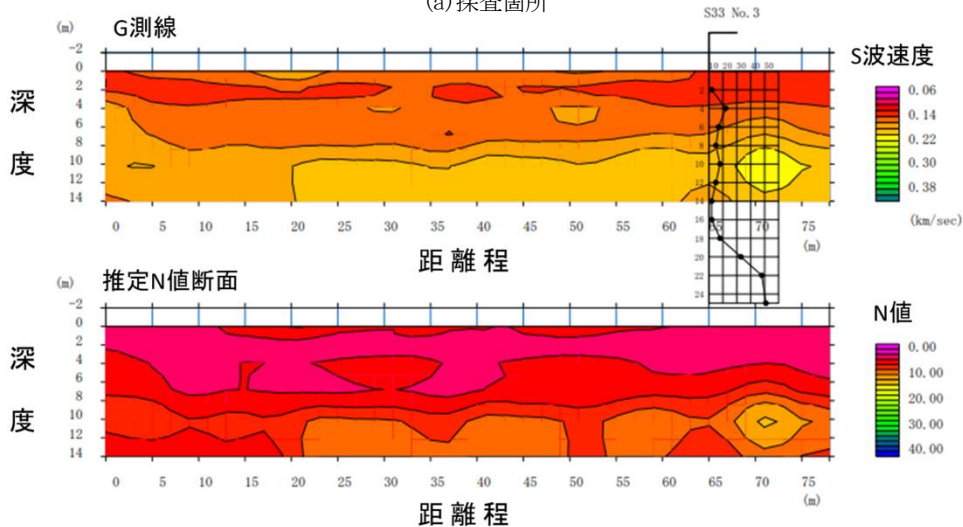
写真-3 天守の基礎部分のRC梁



写真-4 天守周辺地盤の凹凸現象



(a) 探査箇所



(b) G 側線沿い

図-2 表面波探査結果及び推定N値分布

表面波探査の結果によれば、せん断波速度が遅いことから本丸広場において緩い層が存在していることが分かる。また図-2右側のボーリングデータより  $N$  値が 10 以下の緩い層が 18m 存在していることも分かった。地表から 7m 程度は特に一様に柔らかく、天守閣のボーリング調査結果から同じ盛土層であると推定される。天守周辺地盤の地表面の変状が生じた理由は、本丸広場周辺が阿蘇山の 4 回目の火砕流が堆積した台地と盛土で比較的緩い層が深く分布していたために、地中の堆積変化を伴った凹凸のたわみ現象が現れたものと解釈できる。

以上のように、熊本城内の石垣の被害状況を調査した。数か所の被害については詳細に調べることができたが、復旧優先の現在では、さらに詳細な調査ができない状況にある。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を行う予定である。

#### 4. 石垣モデルを用いた DDA 解析

熊本城研究センターからいただいたデータより、解析を行う対象石垣の選定を行った。本研究では、熊本城内の百間石垣について崩壊挙動の解析を行う。

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次元の石垣モデルを用いた2D-DDA（不連続変形法）<sup>17)</sup>について説明する。

不連続変形法 (DDA : Discontinuous Deformation Analysis) は解析対象を要素ブロックの集合体として表し、ブロック内部の弾性変形とブロック間の接触、衝突等の大変形を可能にした手法である。DDAは弾性体・非弾性体動的大変形解析を行えることが特徴である。大小さまざまな石や裏込め石などで構成される石垣に適応できる。また、完全な運動学的理論に基づく式の誘導とその数値処理、正しいエネルギー損失機構、ブロック間の厳密な平衡条件の設定(力のつり合いとブロックの微小なくい込み量)などを行っている点がある。DDA解析では、特有のパラメータとしてペナルティ係数と時間刻み  $\Delta t$  がある。動的解析の場合、ペナルティ係数が小さいときはブロック同士が重なり、めり込んだ現象を現れ、大きくなるとブロック同士の反発力が大きくなり、過剰な跳躍運動となる。時間刻み  $\Delta t$  が小さいと、正確な解析が出来るが解析に要する時間がかかる。

解析の制御パラメータ及びモデルの物性値を表-1、2に示す。解析モデルに用いた解析制御パラメータと物性値は既往研究や既存資料による一般値<sup>17)24)</sup>を元に設定した。また、解析に入力した入力地震動について説明する。選定した百間石垣から東南東に約1.3km離れた熊本市消防局中央消防署の敷地内に設置された熊本市震度計での観測点の観測記録を用いた。地震応答解析により中央消防署から基盤への引き戻しを行い、百間石垣での表面波を推定した。また常時微動のH/Vスペクトルとも整合性がとられた。解析ではN-S方向の推定水平地震動を使用した。また自重解析を行った後、前震を30秒間、石垣に入力し応答解析を行い、その後5秒間おき、本震を30秒間を入力させた。入力波形（推定の前震と本震）を図-3に示す。

表-1 解析制御パラメータ

解析制御パラメータ	値
ペナルティ係数(kN/mm <sup>2</sup> )	0.00002
時間刻み(s)	0.001

表-2 モデルの物性値

	石垣	裏込め石	盛土	基盤
粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	0	0	10	49.8
内部摩擦角(deg)	40	40	20	40
単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	23	20	18	24
ヤング率(kN/m <sup>2</sup> )	$1.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	$3.0 \times 10^4$	$8.0 \times 10^7$
ポアソン比	0.25	0.25	0.45	0.25



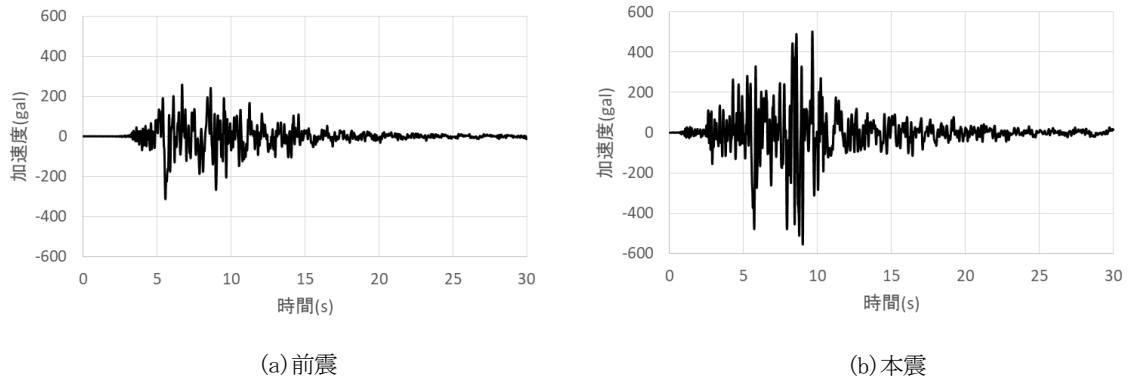


図-3 解析への入力波形（前震、本震）

熊本城・百間石垣の簡略化したモデルの作成にあたり、2次元の石垣基本モデル及び百間石垣の被災前後の写真及び熊本城研究センターから頂いたデータを参考に、解析するモデルの作成を行った。選定した百間石垣を図-4に、本解析モデルを図-5に示す。DDAは解析を行う際、地盤材料の粒形や形状に近いほうが実際の地盤の挙動を再現できるものと考えられるが、要素数が増えるほど解析結果が不安定なり、又解析時間が膨大となるということが分かっている。築石は現実のものに近い高さ方向が465mm、奥行き方向が663mmとしてモデル化した。裏込め石は石垣に接触する重要な要素のため、要素をできるだけ細かく設定した。裏込め石の要素は1辺が200mmの正方形とし、滑りを表現するために45°回転させて配置した。盛土は実際には裏込め石より細かいが、盛土の範囲が広い要素を大きくした。盛土の要素は1辺が500mmの正方形とし、裏込め石と同様に滑りを表現するために45°鉛直方向に回転させて配置した。

図-3(a)の入力に対する前震後までの、石垣の変形挙動を図-6に示す。解析後の変形挙動を保持したまま、本震を入力した石垣の崩壊挙動を図-7に示す。石垣内部の変形・崩落挙動や裏込め石と裏込め土（地山）の滑り、剥離の状況がみられる。

図-6の挙動変化では、振動に伴い石垣が大きく揺すられ、裏込め石が下方に沈下、締め固まると同時に、側方の石を押し出し、石垣が孕みだしていることがわかる。14日の前震後には石垣が孕んだ状態で残存したことがわかる。図-7の挙動変化では揺れ始めてから43.33秒時には中央付近の石垣の一部が飛び出して、支持力を保持できていないことがわかる。本震終了時には石垣の崩壊挙動が顕著に見られた。前震で石垣には孕み出し現象が起り、本震が起きると石垣は崩壊に至っていることが分かった。石垣の崩壊断面<sup>29)</sup>を写真-5に、石垣の崩壊断面図を図-8に示す。図-8は写真-5を元に作成した。

崩壊位置や硬盛土の崩壊等の詳細な崩壊挙動には違いがみられるものの、解析結果より図-7と図-8に近い傾向が見られた。

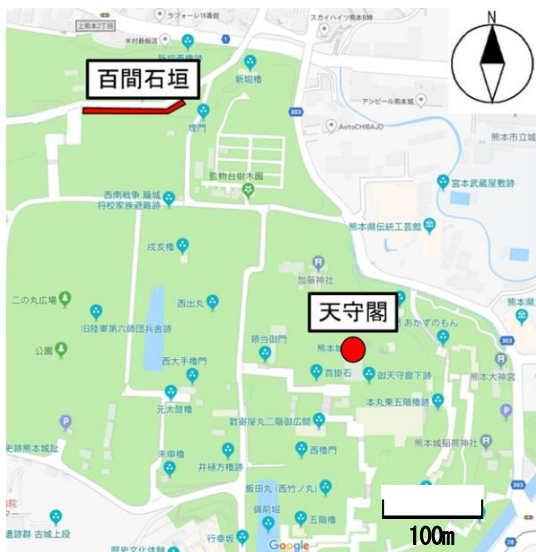


図-4 解析対象の石垣 (google マップより)

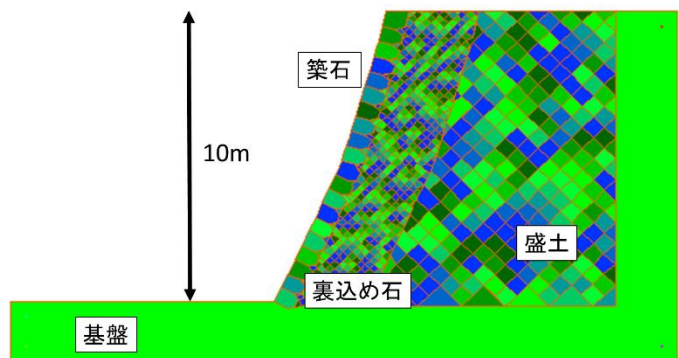


図-5 熊本城・百間石垣における解析モデル

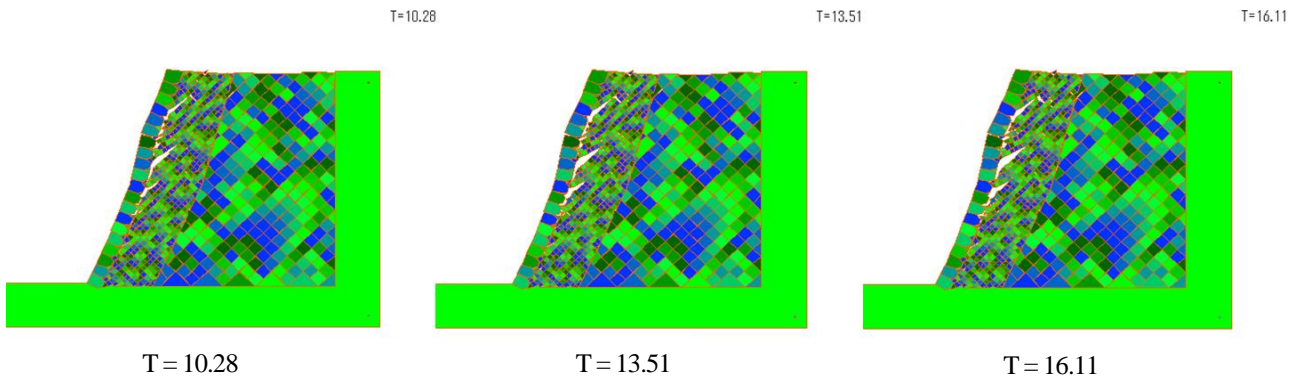


図-6 前震後までの石垣の変形挙動

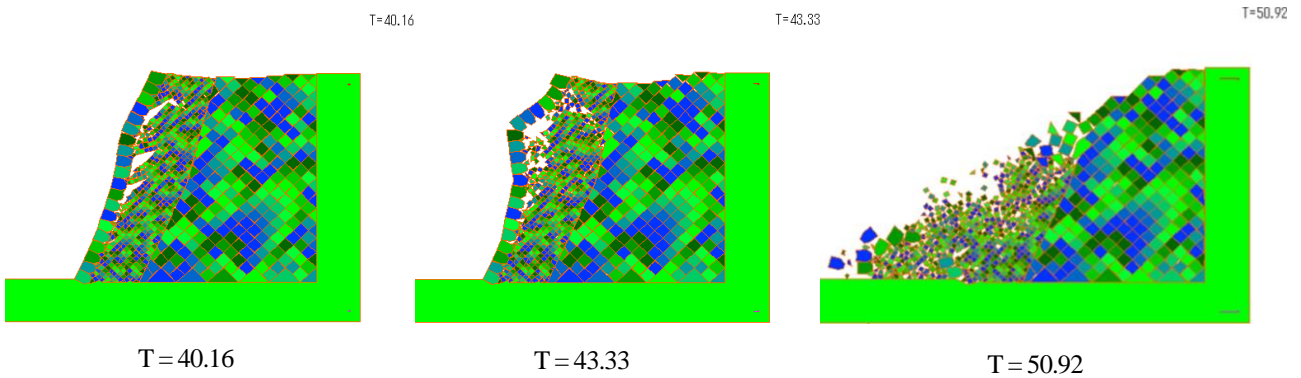


図-7 本震後までの石垣の変形挙動



写真-5 石垣の崩壊断面

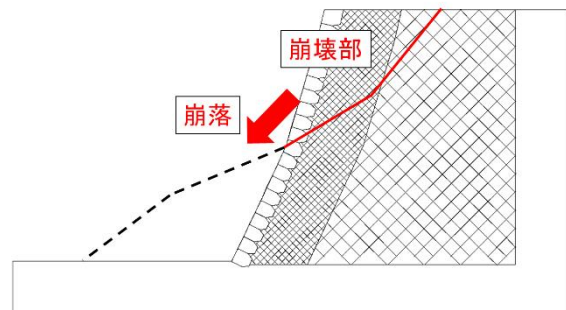


図-8 石垣の崩壊断面図

## 5. まとめ

本研究では、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被害状況調査を実施した。また、前震、本震と2度の水平地震動を作用させた2次元の不連続変形法による石垣モデルの数値解析を行った。

本研究で得られた石垣の被害状況及び解析結果は以下のようなものである。

- (1) 石垣の孕みだし、崩落の被害事例が多い。これは地震動の強さによる影響である可能性が高い。
- (2) 本丸広場における表明波探査の結果によれば、緩い層が存在していたため、天守周辺地盤の表面ではたわみのような現象がみられたものと考えられる。

(3) 2次元解析においては、14日の前震後には石垣がはらんだ状態で残存し、16日の本震によって、中央付近の石垣が飛び出て、支持力を保持できないため崩壊に至ったものと考えられる。  
今後、本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、熊本城内の種々の石垣の動的解析を行う予定である。

**謝辞：**本研究を実施するにあたり、熊本城調査研究センターの関係各位から多大な協力を賜った。また DDA の解析にあたり台湾の国立成功大学土木系教授の J. H. Wu 先生から協力を賜った。ここに謝意を表します。(社)土木学会地震工学委員会「城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会」の活動の一環であり、鹿島研究助成(橋本隆雄)及び JSPS 科研費 18H01526, 18H01677 の助成を得た。

## 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) 田中邦熙, 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) 田中邦熙, 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) Toki, K., Miura, H. and Oguni, Y.: Dynamic slope stability analyses with a non-linear finite element method, Earth-quake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, pp. 151-171, 1985.
- 9) 鶴飼恵三, 井田寿朗, 若井明彦:動的弾塑性 FEM 解析による地震時斜面のすべり解析, 日本地すべり学会誌, Vol. 32, No. 1, pp. 8-11, 1995.
- 10) 中川光雄・山田正雄:有限差分法・大変位解析による地すべりシミュレーションの適用性, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 6, pp. 377-384, 2007.
- 11) 伯野元彦:破壊のシミュレーション-拡張個別要素法で破壊を追う, 森北出版, 1997.
- 12) 越塚誠一:粒子法, 丸善, 2005.
- 13) 小野祐輔:SPH 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. I\_650-I\_660, 2013.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 森川誠司, 田部井和人, 礪岩和夫, 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.
- 17) 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.
- 18) 橋本隆雄, 宮島昌克, 池本敏和, 酒井久和:石積み擁壁の耐震性の実験及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 (地震工学論文集第 33 巻), pp. I\_991-I\_1003, 2014.
- 19) 熊本県地質業協会:熊本県地質図・解説書, 2008.
- 20) 国立国会図書館:慶長国絵図, 1604以降
- 21) 熊本県教育委員会:熊本県史料 近世篇第一, 1965.
- 22) 橋本隆雄, 鈴木彩加:赤外線サーモグラフィ法による熊本城石垣等調査, 第 2 回擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム講演論文集, pp. 75-91, 2017.
- 23) 橋本隆雄, 齊藤 猛:比抵抗 2 次元探査及び表面波探査による熊本城石垣等の地盤調査, 第 2 回擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム講演論文集, pp. 65-74, 2017.
- 24) ㈱高速道路総合技術研究所:設計要領 土工建設編, 2016.
- 25) 橋本隆雄, 石作克也:3次元レーザースキャナによる熊本城石垣等調査, 第 2 回擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム講演論文集, pp. 53-64, 2017.