2016 年熊本地震における熊本城百間石垣の被害 状況および 2D-DDA を用いた石垣崩壊挙動解析

恒川 怜央1·池本 敏和2·宮島 昌克3·橋本 降雄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

2016年の熊本地震では、これまでにないような熊本城の石垣に甚大な被害を及ぼした. 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、熊本城研究センターから得られた石垣状況を基に、熊本城の被害状況の調査を行った. また熊本地震の激しい地震動によって崩壊、損傷を受けた熊本城、百間石垣の詳細な被害状況を調べた. さらに、2次元不連続変形法(2D-DDA)を用いて百間石垣の崩壊過程に至る数値シミュレーションを行った.

Key Words: Kumamoto earthquake, stone retaing 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¹⁾.

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 3D-FEM 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. 石積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 擁壁に適用した場合®,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) 9)10), や SPH 粒子による力学モデル法(Smoothed Particle Hydrodynamics: SPH) ¹¹⁾¹²⁾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 ¹³⁻¹⁶. 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 ¹⁵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 ¹⁷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。既往の研究において、実際の石垣を対象に DDA 法を適用した挙動解析は行われていない。

本研究では、(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ている. そこで著者らは、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.

2. 熊本城の地形と被害状況

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、古く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18.

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、文化庁建造物課と密に連携を取り ながら情報収集を行っている.

熊本城研究センターから頂いたデータより,百間石垣の被害状況を説明する。百間石垣の位置状況を図-1に示す。百間石垣の崩壊挙動は,前震後には石垣がはらんだ状態で残存し,本震によって,中央付近の石垣が飛び出て,支持力を保持できずに崩壊したことが判明した。石百間石垣の崩壊断面を写真-1に,百間石垣の崩壊断面図を図-2に示す。

3. 石垣モデルを用いた DDA 解析

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)¹⁷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 Δt 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 Δt が小さいと、正確な解析が出来るが解析



図-1 解析対象の百間石垣(google マップより)



写真-1 百間石垣の崩壊断面

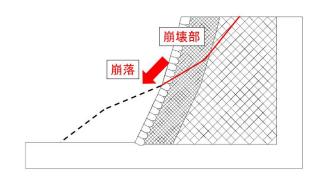


図-2 百間石垣の崩壊断面図

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 ¹⁶⁾⁻²⁰⁾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.

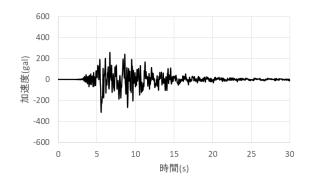
選定した百間石垣から東南東に約1.3km離れた熊本市 消防局中央消防署の敷地内に設置された熊本市震度計で の観測点の観測記録を用いた. 地震応答解析により中央 消防署から基盤への引き戻しを行い, 百間石垣での表面 波を推定した. また常時微動の H/V スペクトルとも整合 性がとられた. 解析では N-S 方向の推定水平地震動を使 用した. また自重解析を行った後, 石垣に前震を 30 秒間 入力し応答解析を行い, その後 5 秒間おき, 本震を 30 秒 間入力させた. 入力波形(推定の前震と本震)を図-3 に 示す.

表-1 解析制御パラメータ

解析制御パラメータ	值	
ペナルティ係数(kN/mm²)	0.00002	
時間刻み(s)	0.001	

表-2 解析モデルの物性値

	石垣	裏込め石	盛土	基盤
粘着力(kN/m²)	0	0	10	49.8
内部摩擦角(deg)	40	40	20	40
単位体積重量(kN/m³)	23	20	18	24
ヤング率(kN/m²)	1.0 × 10 ⁷	1.0 × 10 ⁷	3.0 × 10 ⁴	8.0 × 10 ⁷
ポアソン比	0.25	0.25	0.45	0.25



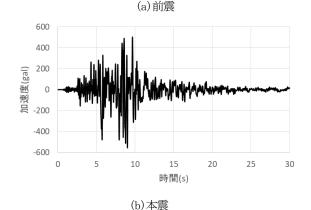


図-3 解析への入力波形(前震,本震)

熊本城・百間石垣の簡略化したモデルの作成にあたり、 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、解析モデルの作成を行った.解 析モデルを図-4 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 いため要素を大きくした. 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.

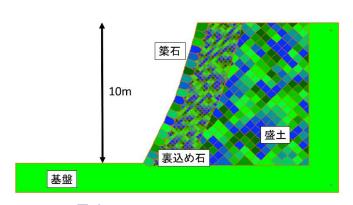


図-4 熊本城・百間石垣における解析モデル

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-5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-6に示す.石垣内部の変形・崩落挙動や裏込石と裏込土(地山)の滑り,剥離の状況がみられる.

図-5 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、締め固まれると同時に、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-6 の挙動変化では揺れ始めてから43.3 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.

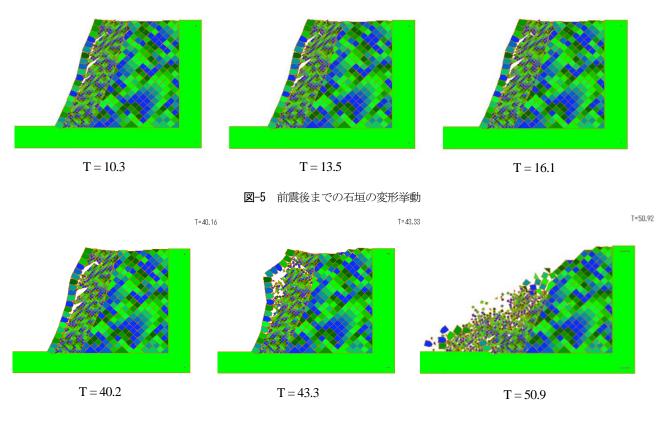


図-6 本震後までの石垣の変形挙動

4. 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 基礎資料の収集するために城内石垣の被害状況調査を実施した。また、2016年熊本地震の前震、本震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百間石垣モデルの数値解析を行った。

本研究で得られた百間石垣の被害状況及び解析結果は 以下のようである.

- (1) 石垣の孕みだし、崩落の事例が多い. これは地震動の強さによる影響である可能性が高い.
- (2) 2次元解析においては、14日の前震後には石垣が 孕んだ状態で残存し、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,熊本城調査研究センター及び文化庁と連携をは 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
- 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, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, pp. 151-171, 1985.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.

- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 熊本県地質業協会: 熊本県地質図·解説書, 2008.
- 19) 熊本県教育委員会: 熊本県史料 近世篇第一, 1965.
- 20) ㈱高速道路総合技術研究所 : 設計要領 土工建設編, 2016.

(2018.8.31 受付)

Damage situation of Kumamoto Castle Hyaken Ishigaki in the 2016 Kumamoto Earthquake and Behavior Analysis of Ishigaki Collapse Using 2D-DDA

Reo Tsunekawa, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Takao Hashimoto

In the Kumamoto earthquake of 2016, it caused enormous damage to the stone wall of Kumamoto castle which has never been seen. Therefore, the authors conducted a survey focusing on the mechanism of the damage and destruction of Ishigaki. In this research, we investigated the damage situation of Kumamoto Castle based on the stone wall situation obtained from Kumamoto Castle Research Center. We also investigated detailed damage situation of Kumamoto Castle, Hyaken Ishigaki which collapsed, damaged due to the severe earthquake motion of the Kumamoto earthquake. In addition, a numerical simulation leading to the collapse process of Hyaken Ishigaki was carried out using the two-dimensional discontinuous deformation method (2D-DDA).