

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

池本 敏和¹・秦 吉弥²・宮島 昌克³・橋本 隆雄⁴・岩津 雅也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: miyajima@kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 国士館大学 理工学部 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

E-mail: thashimo@kokushikan.ac.jp

⁵正会員 フリーエ工業株式会社 (〒110-0015 東京都台東区上野 1-3-1)

E-mail: iwatsu@free-kogyo.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。著者らは昨年、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の調査を行った。同時に城内の常時微動観測を実施した。その結果、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による裏込め石の挙動の影響が高いと考えられる。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、熊本城内の石垣の動的解析を 2 次元不連続変形法を実施した。また石垣挙動の科学的検討から、被害対策や軽減対策の安全性確保の方向性を示すことができた。

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¹⁾。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、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 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⁸⁾、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)^{10,11)}、や SPH 粒子による力学モデル法 (Smoothed Particle Hydrodynamics : SPH)^{12,13)} 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^{14,17)}。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のとして、森川¹⁸⁾らは仙台北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¹⁹⁾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。

そこで著者らは、近傍にある観測点の観測記録を用いて入力地震動を推定した。調査した城内の常時微動観測点を図-1に示す。また、観測点45地点のH/Vスペクトルを図-2に示す。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。



図-1 熊本城内における常時微動観測地点

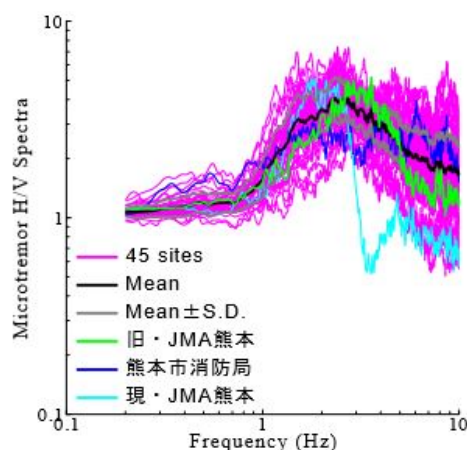


図-2 熊本城内における常時微動 H/V スペクトルの比較

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¹⁹⁾。「慶長

国絵図」²⁰⁾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」²¹⁾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。秦らの推定地震動による加速度応答スペクトル(図-2参照)は、ほぼ同程度の加速度応答スペクトル値である。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示唆されたが、被害の多く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。



写真-1 数奇屋丸二階御広間東側の石垣崩落

写真-1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(伝統的な石垣工事方法)では、出隅部に用いられる石の胴が長く、出隅から離れた箇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。出隅部より離れた箇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。

本丸御殿等を支える南側の二様の石垣の状況を写真-2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」

とされているように、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。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。百間石垣等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思われる。



写真-2 二様の石垣の状況

天守を東側から望むと写真-3 のような被害がみられる。大天守と小天守が渡り廊下でつながっている箇所に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。

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石は振り落とされても仕方がないものと考えられる。天守には大規模な崩壊がないことから、今後の城の修復を議論するのに貴重な資料が得られたと考えられる。例えば、写真-4 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。一方、金沢城内の五十間長屋の復元では、高剛性の木梁を基礎部に施して復元を行っている。このことが地震時の建物の耐震機能を高め、崩壊に対する軽減対策に期待できるかどうかを検討したいと考えている。



写真-3 大天守と小天守の間の石垣の被害



写真-4 天守の基礎部分の RC 梁



写真-5 天守周辺地盤の凹凸現象

写真-5 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、上下になった理由を検討する。天守地盤の南北方向側線に沿って表面波探査がある²²⁾。探査結果及び推定 N 値分布を図-3 に示す。

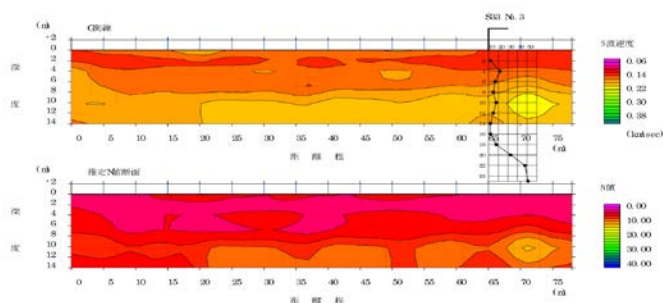


図-3 表明波探査結果及び推定 N 値分布

表明波探査の結果によれば、本丸広場における緩い層が約 14m ほど存在し、N 値も小さな値が同程度の深さにまで分していることがわかる。地盤変状が生じた理由は、本丸広場周辺は決して硬い層が分布していなく、比較的緩い層が深く分布していたために、天守周辺地盤の表面では、地中の堆積変化を伴った凹凸の現象（たわみ）がみられたものと解釈できる。

熊本城内の石垣の被害状況を調査した。いくつかのこと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ものの、熊本城調査研究センターと密に連携を取りながら、復興を行いながら情報収集に努めたいと考えている。

3. 石垣モデルを用いた 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次元の石垣モデルを用いた2D-DDA（不連続変形法）¹⁷⁾について説明するを行った。櫓の重量を推定し、等分布荷重としてモデルに载荷した。また、解析のパラメータ及びモデルの物性値を表-1、2 に。入力波形（推定の前震と本震）を図-4 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 モデルの物性値

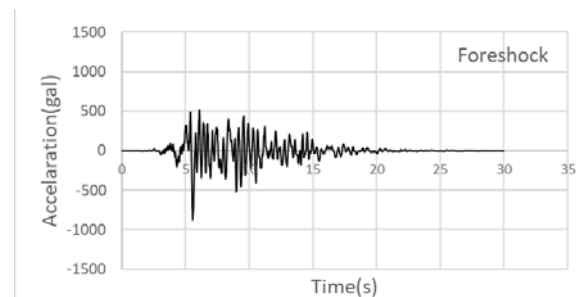
	石垣	裏込め石	硬盛土	基盤	櫓荷重
粘着力 (kN/m ²)	5	5	10	5	5
内部摩擦角 (deg.)	45	45	33	33	33
単位体積重量 (kN/m ³)	26	26	29	1	19
弾性係数 (kN/m ²)	1.0×10^7	1.0×10^7	3.0×10^4	8.0×10^7	8.0×10^7
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

古絵図から江戸当時の石垣状況を図-5 に、本解析モデルを図-6 に示す。図-4 のそれぞれの入力振幅に対する前震後までの、石垣の主要な変形挙動を図-7 に示す。その時の変形挙動を維持したまま、さらに本震を入力し、入力終了するまでの石垣の主要な崩壊挙動を図-8 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、剥離の状況がみられる。

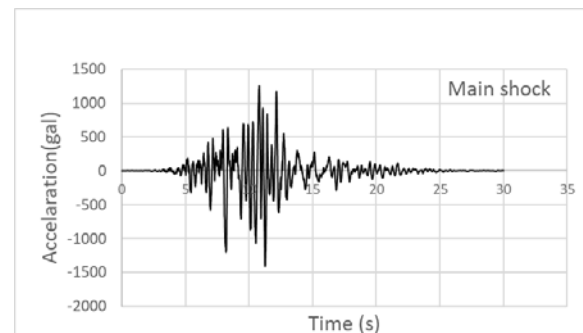
図-7 の挙動変化では、振動に伴い石垣が大きく揺すられ、裏込め石が下方に沈下、締め固まると同時に、側方の石を押出し、石垣がはらみだしていることがわかる。14 日の前震後には石垣がはらんだ状態で残存したことがわかる。16 日の本震時では、揺れ始めてから 9.85 秒後にかろうじて石同士が接続しあい、20.25 秒時には中央付近の石垣の一部が飛び出して、支

持力を保持できていないことがわかる。本震終了 30 秒時には石垣の崩壊挙動が顕著になり、上載されていた櫓ともども崩壊過程に至っていることが明らかである。崩壊石垣の斜面の様子を図-9 に、崩壊断面を写真-6 に示す。

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、概ね実際に近い解析結果を得ることができた。写真-6 をみると、崩壊した玉石などの落下、堆積により図-9 に示した崩壊石垣の断面はもう少し下方に位置していたのかもしれないと考えられる。



(a) 前震



(b) 本震

図-4 解析への入力波形（前震 本震）



図-5 古絵図による石垣状況

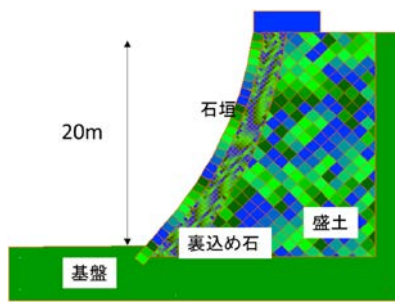


図-6 解析モデル

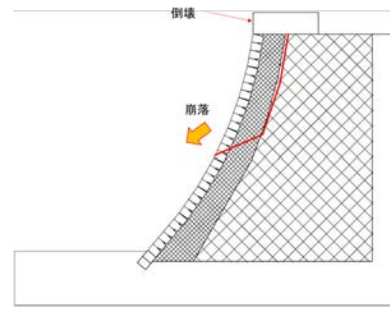


図-9 崩壊石垣の斜面の様子

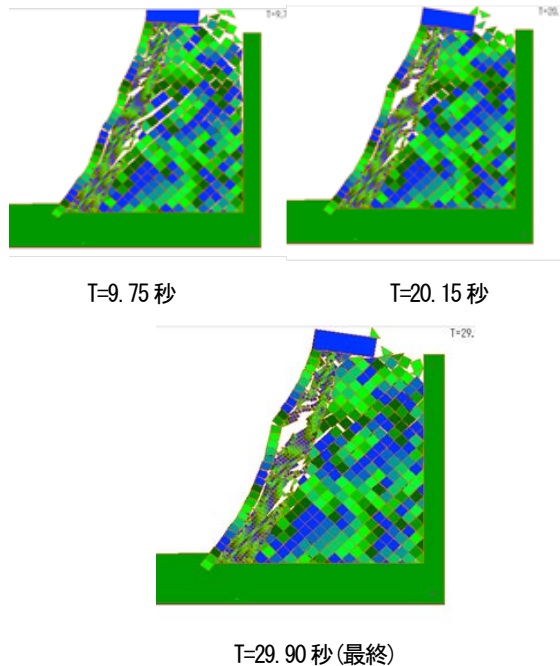


図-7 前震後までの石垣の変形挙動

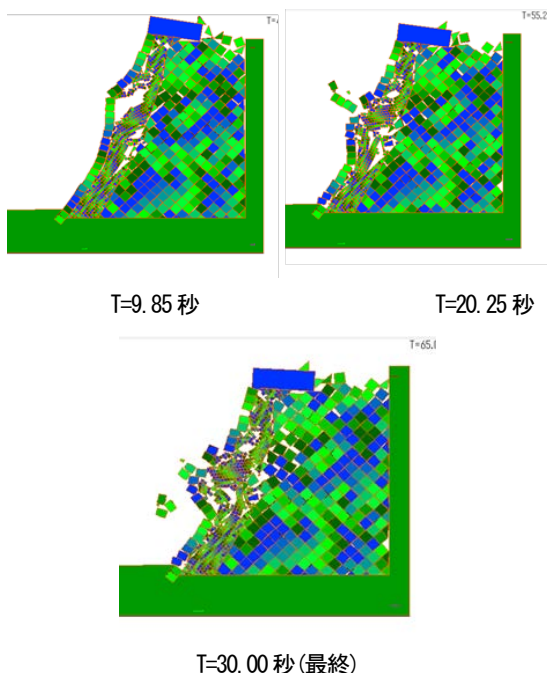


図-8 本震後までの石垣の崩壊挙動



写真-6 北面の崩壊断面

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。また、地山斜面と石垣部の滑り、分離が認められた。これは地震動の強さによる影響である可能性が高い。
- (2) 絶妙なバランスのもとで石垣の一部が残存し、建物を倒壊から守って石垣も存在している。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日の本震時によって、櫓ごと倒壊に至った現象を説明できたことは興味深い。

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。ここに厚くお礼申し上げます。また、(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、鹿島助成(橋本隆雄)及び JSPS 科研費 26303007-01(宮島昌克)の助成を受けたものです。

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) 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) 鵜飼恵三, 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, p.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, 磯岩和夫, 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, 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.

(2017.9.1 受付)

Damage and Behavior of the collapse of Stone Retaining Masonry in the Kumamoto Castle during the 2016 Kumamoto earthquake

Toshikazu IKEMOTO¹, Yoshiya HATA², Masakatsu MIYAJIMA³, Takao HASHIMOTO⁴ and Masaya IWAZU⁵

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 some damage and destruction mechanism and make it clear. In this study, a field investigation of the Kumamoto castle stone retaining masonry wall has been carried out while cooperating with the Kumamoto castle center densely. We have to consider damage condition of stone retaining masonry wall in the Kumamoto castle due to strong ground motion of the earthquake. we also performed the numerical simulation for collapse of a wall using two-dimensional Discontinuous Deformation Analysis (2D-DDA). The collapse mode based on the simulation agrees well with the damage of dray masonry wall in Kumamoto castle during the estimated input foreshock and main shock by the observed ground motion near site.