

熊本城の築石構造物の被災状況調査と 再現解析に関する基礎的研究

勝田 侑弥¹・杉本 知史²・山中 稔³

¹ 学生会員 長崎大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

E-mail: bb52117502@ms.nagasaki-u.ac.jp

² 正会員 長崎大学大学院 工学研究科 システム科学部門 助教 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

E-mail: s-sugi@nagasaki-u.ac.jp

³ 正会員 香川大学工学部 安全システム建設工学科 教授 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: yamanaka@eng.kagawa-u.ac.jp

平成28年熊本地震においては、熊本城や多数の石橋群といった築石構造物に多大な被害が生じた。本研究では、熊本地震により被害を受けた熊本城の被害状況を、地盤工学会の調査団や熊本城調査研究センターなどによる調査結果をもとに、熊本城の石垣の現況を把握し崩壊形態や崩壊特徴を調べる。そして、それらの調査結果をもとに、動的数値シミュレーションに基づく計算プログラムにより石垣の形状をモデル化し、実際に地震動が発生した際の石垣の崩壊状態を再現することを目的とする。

Key Words : Kumamoto castle, Stonewall, earthquake, Distinct Element Method(DEM)

1. はじめに

わが国には歴史的に価値の高い築石構造物が数多く存在している。その歴史はとても古く、石垣は飛鳥時代の末期七紀後半に百済から伝えられ、石橋は紀元前 4000 年ごろにはすでに存在していたと言われている。築石構造物は現在も道路や水路として活躍しているだけでなく、多くは文化財などに指定され、一部では地域の観光資源としても重要な機能を果たしている。ほとんどの築石構造物が、築かれてから数百年が経過しているため、補修や保全といった維持管理が行われている。特に石橋・石垣に関しては工学的観点からの力学的定性の評価が困難なため、経験的手法により補修が行われている。しかし、熊本地震による熊本城被害のように災害に対する対策が遅れているのが現状である。そのため現在の形態や機能を後世に伝えていくために、石垣の維持管理の手法を確立させる必要がある。

本研究では、熊本地震により被害を受けた熊本城の被害状況を、地盤工学会の調査団や熊本城調査研究センターなどによる調査結果をもとに、熊本城の石垣の現況を把握し崩壊形態や崩壊特徴を調べる。そして、それらの調査結果をもとに、動的数値シミュレーションに基づく計算プログラムにより石垣の形状をモデル化し、実際に地震動が発生した際の石垣の崩壊状態を再現することを目的とする。

2. 熊本城の基礎地盤と築城過程

(1) 熊本城の概要

熊本地震によって被害を受けた熊本城は、日本三名城の一つと言われ、加藤清正が慶長 6 年(1601 年)に着工し、6 年の歳月をかけ完成した。広さは約 98 万 m²、周囲 5.3km の中に、天守 3、櫓 49、櫓門 18、城門 29 を有する規模で、加藤家 2 代(44 年間)、細川家 11 代(239 年間)の居城となった。明治 10 年(1877 年)西南の役で原因不明の失火で、宇土櫓他 12 棟を残し、天守閣などの大部分を焼失した。

(2) 熊本城周辺の地盤・地質構成

熊本城は、加藤清正により慶長 12 年(1607 年)に築城された。それまでは、図-1 に示す「茶臼山ト隈本城之絵図」に描かれている茶臼山と呼ばれる植木台地の先端が熊本平野に突出した丘陵にあった。



図-1 「茶臼山ト隈本城之絵図」の写し¹⁾

地質は溶結凝灰岩で崩壊しやすく、雨による浸食が進み急崖が多く形成されており、周辺には浸食谷が点在している。

図-2 は、熊本城内における過去のボーリング調査により得られた深度方向の地質構成ならびに想定断面図を表す。城内では、平成 28 年の震災発生時において、昭和 33 年ならびに平成 27 年にのみ調査が行われているにすぎず、天守閣北側の限られた範囲で計 12 本のデータに留まる。地表面より深さ 10m 程度までは、N 値が 10 前後の造成時の埋土や火山灰質砂・シルトで構成されている。深さ 50m までにおいては、N 値が 10~20 程度の火山灰質砂や風化が進行していると思われる凝灰角礫岩の層が存在する。さらに 50m 以深には、N 値 50 超の安山岩の基盤層が存在することが確認されている。

また、図-3 より平左衛門丸内の約 50m の区間に Aso4 や基盤層の急激な落ち込みが確認できることから、平成 27 年のボーリング調査の報告書³⁾において熊本城北側に存在するとされている立田川断層に起因する地質的不連続面の存在が指摘されている。これらのことから、城内敷地直下約 20m の範囲に

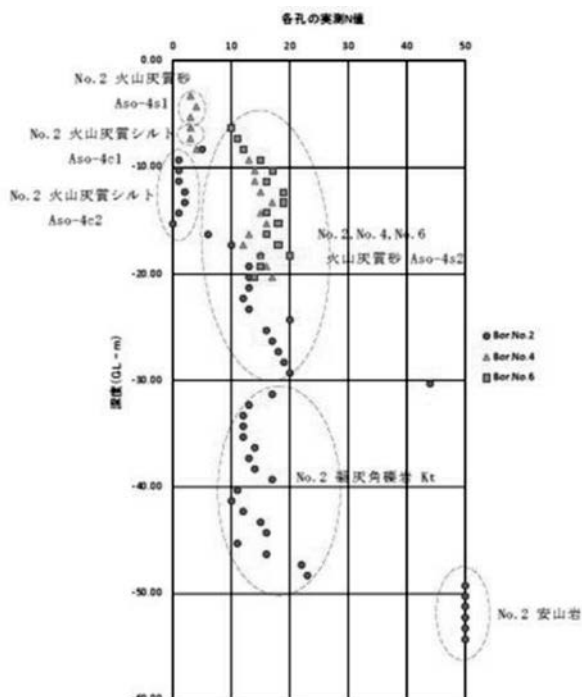


図-2 城内各所の深度と N 値の関係

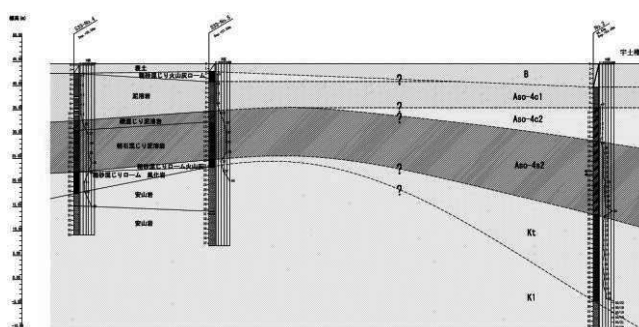


図-3 天守閣と宇土櫓に位置する平左衛門丸内の地質構成と想定断面図

存在する Aso4 主体の地質は比較的 N 値が低く、石垣などの重量構造物や表層付近の基礎地盤は地震に対する抵抗性も低いものと考えられるとともに、造成時の切盛境や地質構造上の不連続面の存在が推定されることから、地盤工学的、地質学的に検討を要するものと考えられる。

(3) 熊本城の築城過程

平成 19 年(2007 年)に築城 400 年を迎えた熊本城だが、熊本城の築城については大規模な城郭普請だったにもかかわらず、築城時期をめぐっては諸説ある。その原因は、築城に関する史料の少なさにも因るが、現在の熊本城と旧隈本城(現在の熊本医療センターと熊本県立第一高校一帯)の隣接した 2 つの城があったことが問題をさらに複雑にしている。

加藤清正は前任の佐々成政の居城である旧隈本城を改造し、「隈本御座所」とすると同時に天正 19 年から茶臼山に新城の計画を行った。文禄元年(1592 年)に本丸の石垣普請が進められた。2 年後の文禄 3 年には建築にかかり、矢倉・門をはじめ、小天守が工事中であり、小天守は三階に計画されていた。大天守は慶長 12 年(1602 年)には完成していたと思われるが、慶長 16 年(1611 年)に描かれた「肥後熊本城略図」(山口県文書館蔵)では小天守は見られず、その位置から不開門からの通路になっていた。また、その当時の熊本城には、本丸御殿はまだ存在せず、加藤清正の御殿は現在の古城に設けられていた。本丸御殿が造られ始めるのは、慶長 15 年からである。

その後、熊本城に大きな変化を与えたのは、「一国一城令」であり、肥後藩では慶長 17 年にすでに水俣城、宇土城、矢部城が破却されている。この期の熊本城の変化として、それまで閉鎖されていた石垣を開け、現在の西大手門、頼当御門を設けると同時に、耕作櫓御門脇が道路に改変された。

3. 熊本城の被災状況

(1) 地震の概要と被災状況

平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分、熊本県熊本地方でマグニチュード 6.5 の地震が発生し、熊本県の益城町で震度 7 を、玉名市、西原村、宇城市、熊本市で震度 6 弱を観測したほか、九州地方から本州の中部地方にかけて震度 5 強~1 を観測した。熊本地方では、4 月 16 日 1 時 25 分にも、マグニチュード 7.3 の地震が発生し、益城町と西原村で震度 7 を、南阿蘇村、菊池市、宇土市、大津町、嘉島町、宇城市、合志市、熊本市で震度 6 強を観測したほか、九州地方から東北地方の一部にかけて震度 6 弱~1 を観測した。これだけ短期間に同じ地域で震度 7 の地震が 2 回発生したのは、気象庁観測史上初めてのことである。

この地震により熊本城は、写真-1～3 に示すように、国指定重要文化財構造物である東十八間櫓等の倒壊、石垣の崩壊・孕み出し、石垣背面のクラック等が発生した。石垣は、崩壊に至らなかった箇所でも、孕み出し等の変状が数多く見られた。

(2) 被災状況調査の概要

本調査では、熊本城内の中で最も被害の多かった本丸エリアの約 660 箇所を対象とし、石垣石の崩落到達距離の推定が可能である石垣 60 箇所の崩落範囲と幅、石垣石の到達距離・方向を調べ、崩壊箇所



写真-1 戌亥櫓の石垣崩壊状況



写真-2 長局櫓前のクラック発生状況



写真-3 本丸東門横石垣の孕み出し状況

の被害状況を CAD により可視化した。また、石垣石の到達距離と方向から、熊本城内で起こった地震の特徴を検討した。

(3) 調査の結果と考察

図-4 より敷地全体にわたり石垣の崩落・孕み出しが発生している。また、石垣高さが高い箇所では石垣石も多く積まれているため、崩落範囲が非常に広いことがわかる。そして、これらのデータを崩落方向と最大到達距離の関係で表したグラフが図-5 である。この図より、東西方向の石垣石の崩落に比べて、南北方向の方が、件数が多いうえ最大到達距離が 10m を超えるものが多数存在することが確認できる。

次に図-6 は石垣高さと最大水平距離の関係を示す。この図の石垣高さ 4～6m と 8～12m に注目すると、北方向は他の方向より、崩落到達距離が長い箇所が多いことがわかる。その次に南方向成分が比較的多いことが分かる。以上のことから南北方向が東西方向より地震の揺れの影響を強く受けているのではないかと考えられる。そして、全体的傾向として石垣高さと最大到達距離は概ね線形関係にあることが伺える。しかし南北方向に比べ、東向き

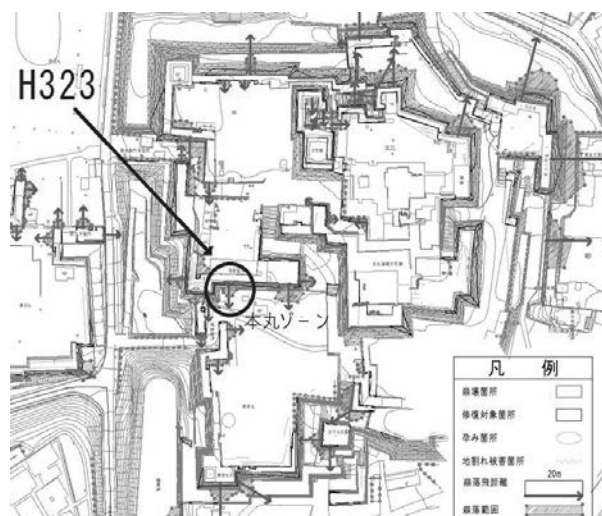


図-4 石垣石の崩落到達距離・方向、崩落範囲

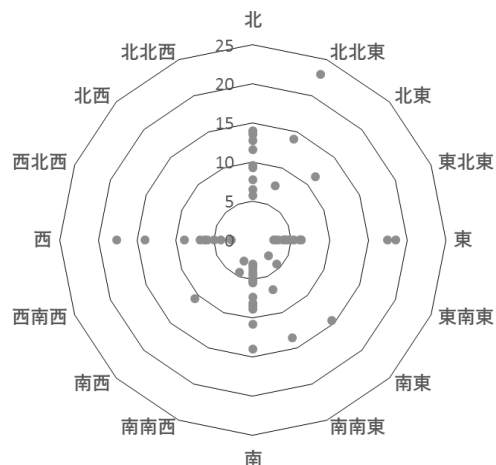


図-5 石垣石の最大到達距離と方向

は石垣高さが高くとも石垣の最大到達距離が小さい

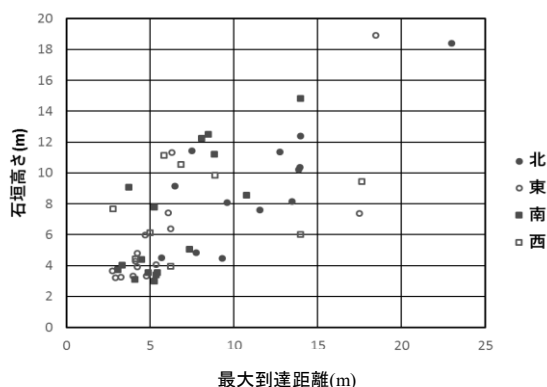


図-6 石垣石の最大到達距離・方向と石垣高さの関係

傾向にあるとも確認できる。以上のことから、石垣面の方向や区間延長、石垣高さなど様々な要因に依存すると考えられることから、一概には断定できないものの、概ね城内敷地を構成する石垣は石垣の崩れやすい方向、敷地直下の地盤の振動特性の影響があるのではないかと考えられる。

4. 動的シミュレーションによる再現解析

(1) モデルの選定

本解析で用いるモデルは、前章の熊本城の被災状



写真-4 H323 の被災前の様子



写真-5 H323 の被災後の様子

況調査で対象となった石垣 60 箇所から、以下の三つの条件に適している箇所を石垣モデルの対象として選定した。一つ目は、石垣高さが十数メートルと比較的高い石垣、二つ目は、石垣の中央部で崩壊が起きていること、三つ目は、過去の文献に石垣の形状が詳細に残っていること、以上より、箇所番号 H323 (図-4 参照) を検証の対象とした。写真-4 は対象箇所の被災前で、写真-5 は被災後である。これから、対象箇所の崩落の特徴として石垣上部のみが崩落しており、また全長幅約 60m ある石垣だが、実際に崩落した幅は 6~8m 程度と局所的に崩落している。H323 の形状モデルは、桑原文夫著「熊本城の石垣勾配」をもとに作成した。

(2) モデルの概要

図-7 に個別要素法における各部分の設定要素条件を示している。この設定は、背面土領域を弾塑性要素、石垣石と岩盤部を剛体要素、石垣間接面、石垣・背面土間をジョイント要素として各要素条件を設定した。また、観測点においては、図に示すように背面土部分は下端から 5m 間隔で置き、石垣石部分には任意に 6 点置いた。

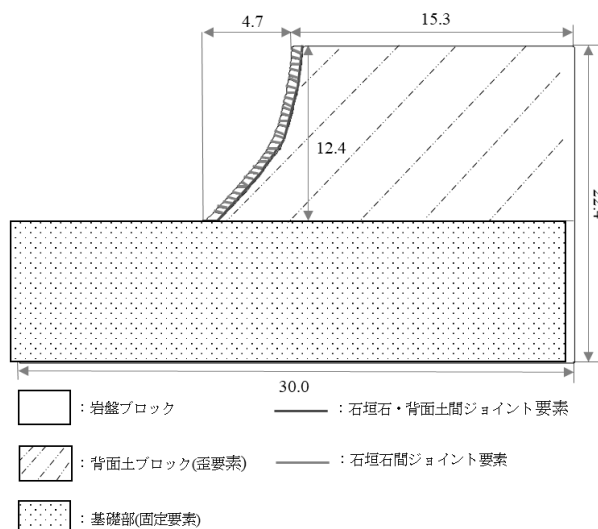


図-7 解析モデルと設定要素 (単位: m)

(3) モデルの境界条件

地震動を模擬した動的数値シミュレーションを行う場合、解析モデルの作成と同様に重要になるのが境界条件の設定である。本研究では、地下深部からの地震波の伝達を適切に再現するために図-8 に示す境界条件を設定した。個別要素モデル下端の境界面にダッシュポットを設け底面粘性境界とした。底面粘性境界はモデル底面より下方の半無限地盤を評価する境界条件であり、底面境界において逸散する波動エネルギーを吸収し、地震波の上昇波成分のみを入力することができる。これにより、地下深部からの地震波の伝達特性を満足することができる。個別要素モデル側方の両境界面では自由岩盤領域を設

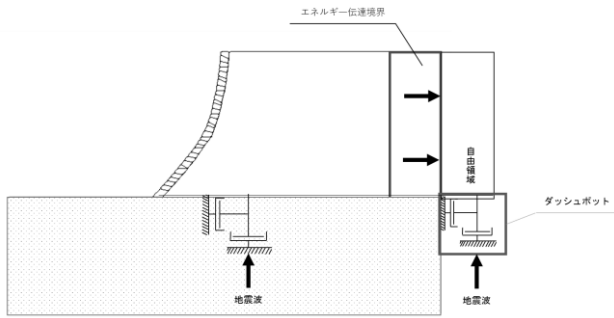


図-8 境界条件概要図

け、エネルギー伝達境界とした。エネルギー伝達境界によりモデル側方において逸散する波動エネルギーを伝達し、自由岩盤領域で吸収することができる。これにより、側方境界を半無限地盤領域として評価でき、実際の基礎岩盤領域を再現することができる。

(4) モデルの特性値の設定

本解析では、剛体ブロックの一部を弾塑性体として表現可能な個別要素法ソフトウェア「UDEC」(ITASCA 社製)を用いて計算を行っている。モデルの石垣石、背面土部の特性値は表-1 に示す。また、本研究の対象モデル H323 の崩壊形態が石垣上部の崩壊のためモール・クーロンの破壊基準線より鉛直方向の応力 σ は小さいものとし、せん断抵抗角 φ の影響は小さいものとする。よって本解析では背面土の粘着力のケースを表-2 に示す。

背面土内における地震動の減衰について、個別要素法の場合は力学的減衰とレイリー減衰を考慮する必要がある。力学的減衰とは完全物体内の内部摩擦によるエネルギー損失や接触面の沿った滑動により生じる減衰のことである。背面土部モデルの減衰は力学的減衰として、石垣・背面土間のジョイントの特性値の入力により決定される。レイリー減衰はモデル自体の減衰を定義するものである。砂質土における一般的な減衰率は 0.05~0.2%程度であることからレイリー減衰の減衰率を 0.1%とした。

表-1 ブロック部の特性値

項目	背面土 (弾塑性体)	石垣石 (剛体)
密度 ρ (g/cm ³)	2.50	2.75
弾性係数 E (MPa)	55.0	-
ポアソン比 ν	0.1	
粘着力 (kPa)	表-2 参照	
せん断抵抗角 φ (deg)	40	
引張強度 σ (kPa)	3.4	

表-2 背面土の粘着力の条件 (単位: kPa)

case1	case2	case3
0.0	15.0	50.0

(5) モデルに使用する地震動について

本解析の動的解析を行うために、解析モデル基盤面に入力する入力地震動を算出するための観測地震動を入手する必要がある。そこで、本研究では熊本地震の 6 月 16 日の本震の地震波特性を地震防災研究所の強震ネットワーク (K-NET) から入手した観測地震動を用いる観測地点として KMM006 熊本を選定した。図-9 に KMM006 熊本の観測地点を示している。

波形処理ソフト WAVENA3.0 を使用し、強震ネットワーク (K-NET) から観測地点 KMM006 熊本の速度波形データ (EW, NS, UD 成分) を読みとる。図-10 に観測地震動の速度波形図を図に示す。速度波形 NS 成分の最大速度は 61.6kine (cm/s)、速度波形 EW 成分の最大速度は 79.9kine (cm/s)、速度波形 UD 成分の最大速度は 27.0kine (cm/s) である。ここで、NS 成分とは地震波形の南北方向の波形、EW 成分は東西方向の波形、UD 成分は上下方向の波形を表している。

本研究では、石垣モデルの対象となった、箇所番号 H323 の石垣の向きが南向きよりせん断方向の速度成分を NS 成分、垂直方向の速度成分は UD 成分を用いることとした。また、最大波形が観測される 0.0~15.0s の 15 秒間を入力波形として用いた。



図-9 KMM006 熊本観測地点と震源、熊本城の位置関係

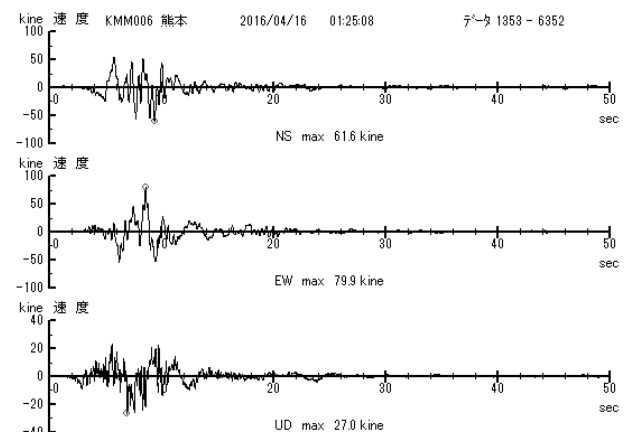


図-10 KMM006 熊本速度波形図⁶⁾

5. 解析結果

(1) 変位ベクトル

変位ベクトルについての解析結果を図-11～図-13に示す。すべての変位ベクトルの解析結果からすべての時間で石垣面外側(負の方向)への変位が見られた。粘着力 0kPa のときは石垣上部の背面土が地震発生直後に石垣側へ崩れており、その変位が大きい。

次に図-12の粘着力 15kPa は、4s の時は全体的に石垣側へ 5～8cm 程度の微小変位をしていたが、観測時間 7s での変位ベクトルは、石垣表面から 3～4m 程度後方の背面土が正の方向へ変位しており、一方でそれより石垣表面に近い背面土は石垣方向へ変位していた。それ以降は地震が負の方向へ振動した後の背面土の変位はすべて負の方向に向かっており、正の方向へ振動した後の背面土の変位はある境界を境に正と負のそれぞれの方向へ向かっていることが示された。

図-13の粘着力 50kPa のケースでは、粘着力 15kPa の場合と同様の変位特徴が見られた。どちらのケースでも背面土上部の表面に 0～13cm の鉛直上向きの変位が見られた。これは、正の方向の地震波の影響と、背面土上部の地表面を逸散状態である粘性境界に定義していないことが影響していると考えられる。最大変位

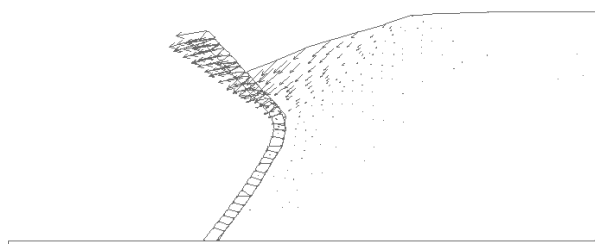


図-11 粘着力 0kPa 時の変位ベクトル分布
(最大変位 5.1m)

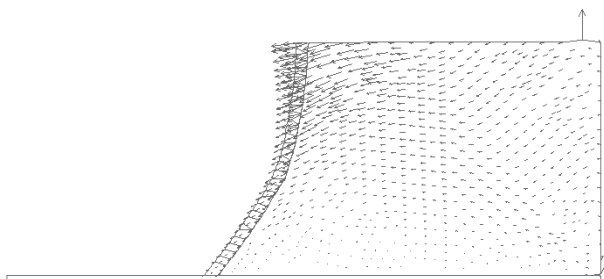


図-12 粘着力 15kPa 時の変位ベクトル分布
(最大変位 0.12m)

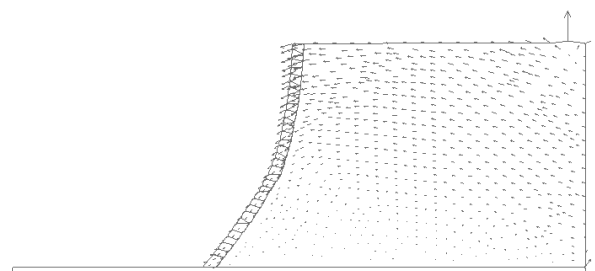


図-13 粘着力 50kPa 時の変位ベクトル分布
(最大変位 0.15m)

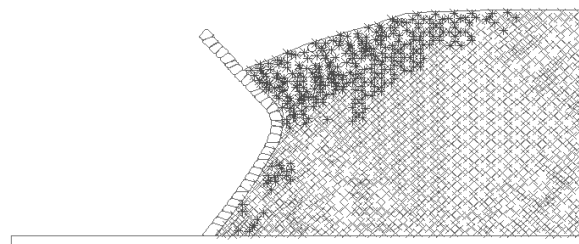
は、石垣上部のおおよそ水平方向に約 15cm という結果が得られ、実際に未崩壊の状態に残っている個所で確認されている変位規模と同程度であった。

(2) 塑性破壊分布

塑性破壊状況の解析結果を図-14、図-15、図-16に示す。この図で示される事象は、弾塑性モデルである背面土の崩壊状況を計算ステップごとに崩壊に至る過程が表現されている。＊が塑性破壊、○が引張破壊、×が過去の降伏箇所として表現され、×の箇所が多いほど、破壊領域が広いことを示す。

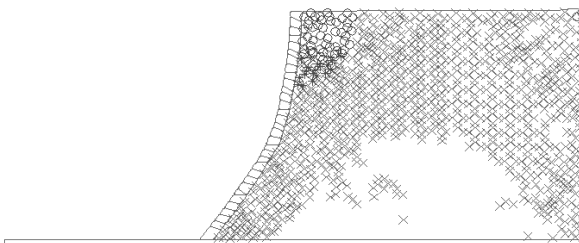
図-14の粘着力 0kPa のケースでは、計測開始 1s 後にすでに背面土全体で降伏した。そして、石垣上部の背面土から次第に全体に塑性破壊が同時に起こり、4s 時には引張破壊が生じ石垣とともに崩壊した。

次に、図-15の粘着力 15kPa のケースでは、1s の時は石垣裏の背面土表面がすでに破壊している。これは重力解析によって、石垣石の荷重を背面土表面部が受けたためと考えられる。その後、石垣下部の背面土から徐々に塑性破壊が発生、それと同時に背面土表面では引張破壊が発生している。7s 時に石



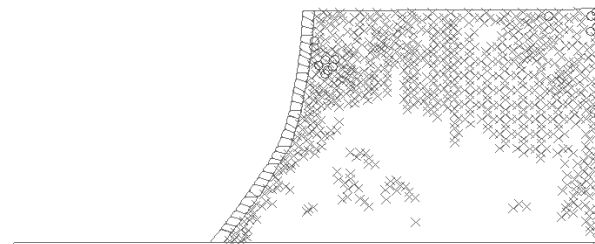
＊：せん断破壊 ○：引張破壊
×：過去の降伏

図-14 粘着力 0kPa 時の塑性破壊分布



＊：せん断破壊 ○：引張破壊
×：過去の降伏

図-15 粘着力 15kPa 時の塑性破壊分布



＊：せん断破壊 ○：引張破壊
×：過去の降伏

図-16 粘着力 50kPa 時の塑性破壊分布

垣上部の背面土で塑性破壊と引張破壊が同時に発生し、最も崩壊が発生した。

図-16 の粘着力 50kPa のケースでは、粘着力 15kPa のケースに比べ、崩壊範囲が狭い結果となった。また、7s 時まで背面土の深部は崩壊していなかったが、最大地震速度をすぎた 10s 以降は広範囲に崩壊箇所が見られた。しかし、×で示す降伏箇所が図-14 に比べると少ないことから、背面土への影響が相対的に小さいことが判断できる。

石垣の背面土内の崩壊メカニズムとして、石垣表面に近い背面土は塑性破壊によって崩壊が進んでいき、背面土上部の地表面では引張破壊によって崩壊が進んでいることが分かった。そして、石垣上部の背面土で塑性破壊と引張破壊が同時に発生して、主働土圧が発生した。この崩壊メカニズムにより背面土は地表面から徐々に破壊が進んでいき、ある程度破壊が進行すると、粘着力 0kPa 時のように大きく変位が発生し、石垣は背面土の変位によって崩壊したと推測される。

6. まとめ

本論文では、熊本地震により被害を受けた熊本城の被害状況を、地盤工学会の調査団や熊本城調査研究センターなどによる調査結果をもとに、熊本城の石垣の現況を把握し崩壊形態や崩壊特徴を調べた。それらの調査結果をもとに、石垣の形状をモデル化し、個別要素法に基づく動的数値シミュレーションにより、地震動が発生した際の石垣の崩壊状態を再現した。これらから、以下の知見を得た。

- (1) 石垣石の最大到達距離は、石垣が面している向きにより、南北方向の方が東西方向と比べ、件数・規模とも大きな差があることを確認した。
- (2) 石垣高さが高い箇所ほど崩落範囲は広く、最大到達距離もより大きいことを確認した。
- (3) 背面土の粘着力の大小により、石垣の動的崩

壊挙動に大きく影響を及ぼすことを確認した。

- (4) 背面土の降伏領域が一定範囲広がると、石垣の主働土圧によって石垣上部から崩壊しやすいことを確認した。

今後は、裏込栗石の有無、櫓等の上載荷重の有無、ならびに石垣石間の接触状況の条件を付け加え、より現実に近い状況を再現する解析を行い、崩落傾向の検証や実際の被害状況との比較を行う。

謝 辞

本研究は、一般財団法人大成学術財団の研究助成により行っていること、また現地調査や資料提供に関し、熊本城調査研究センターのみなさまにご協力いただいていることに対し、本紙面をお借りして謝意を表します。

参考文献

- 1) 戸塚誠司：熊本県下における近代橋梁の発展史に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科博士論文，p.90，1999
- 2) 国土地理院：都市圏活断層図，http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/active_fault.html
- 3) 熊本城 Facebook：
<https://www.facebook.com/KumamotoCastle/>
- 4) 熊本城調査研究センター：熊本城崩壊・修復箇所資料(カルテ)，2016
- 5) 大丸信章：歴史群像●名城シリーズ② 熊本城，学習研究社
- 6) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET），www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
- (7) 桑原文夫：熊本城の石垣勾配，pp201-209，日本工業大学研究報告第 14 巻第 2 号，1984

(2018.4.9 受付)

Reaserch and analysis of damaged stonewall structure in Kumamoto Castle

Yuya KATSUDA, Satoshi SUGIMOTO, Minoru YAMANAKA

Kumamoto Castle was constructed about 400 years ago, and now Cultural Affairs Agency of Japan treats as an important historical spot. The 2016 Kumamoto Earthquake was damaged a lot of stone-walls of this castle. Authors carried out field work and paper research on the condition of damaged stonewalls and backfill for about one year.

Authors also carried out making simulation model and calculation for evaluation of stonewalls stability by the distinct element method under the several conditions of stonewall shape and interface of materials. The failure area of stonewalls and backfill are estimated by these results of simulation, and it is discussed that these areas should be reinforced under repair of damaged stonewalls.