

平成 28 年（2016 年）熊本地震における 熊本城の城郭石垣の被害調査およびその分析

Damage Situation of Stone Walls in Kumamoto Castle Caused
by the 2016 Kumamoto Earthquake

関西大学 社会安全学部

小山 倫 史

Faculty of Societal Safety Science
Kansai University

Tomofumi KOYAMA

横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院

菊 本 統

Graduate School of Urban Innovation
Yokohama National University

Mamoru KIKUMOTO

京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻

橋 本 涼 太

Department of Urban Management, Graduate
School of Engineering, Kyoto University

Ryota HASHIMOTO

関西大学 社会安全学部

桑 島 流 音

Faculty of Societal Safety Science
Kansai University

Ryuto KUWAJIMA

SUMMARY

The authors investigated the damage situation of masonry structures caused by the 2016 Kumamoto earthquake. In this paper, the damage situation of stone walls in Kumamoto castle is reported and the mechanisms of failure and collapse of stones are discussed. The 3-D laser scanner was also applied to obtain the 3D geometry and the displacement/deformation of the stone walls was analyzed by comparing with the previous measurement results before the earthquake. The 3D laser scanning results clearly show the unnatural shape of the stone walls caused by the movement of the backfill. This unnatural shape of the stone walls can be observed even in the stone walls which avoid the collapse. In the future, the evaluation of the safety/stability of the masonry walls is important for the restoration and 3D digital data obtained by 3D laser scanning technique will be useful.

Key Words

2016 Kumamoto Earthquake, Kumamoto Castle, stone wall, laser scanning

1. はじめに

2016年4月14日21時26分、熊本県熊本地方を震央とする、震源の深さ11km、気象庁マグニチュード(Mj)6.5の地震(前震)が発生し、熊本県益城町で震度7を観測した。その28時間後の4月16日1時25分には、同じく熊本県熊本地方を震央とする、震源の深さ12km、Mj7.3の地震(本震)が発生し、熊本県西原村と益城町で震度7を観測した。14日の地震は日奈久断層帯の北端部の活動、16日未明の地震は布田川断層帯の活動によるもので、隣接する二つの断層帯が連動することで発生した連動型地震とみられており、気象庁から公表された前震・本震のメカニズム(CMT解)は、ともに南北に伸長軸、東西に圧縮軸をもつ横ずれ断層であることが示されている。

図1a, bは、調査対象およびJ-RISQで公開さ

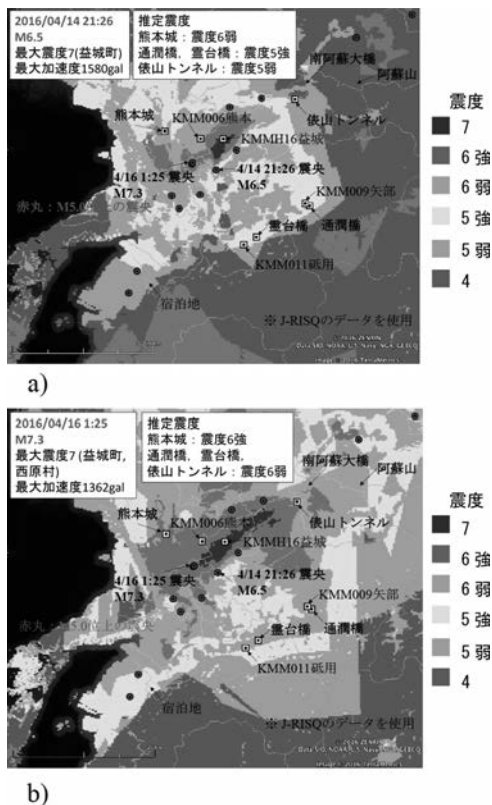


図1 推定地震動の分布, a) 前震, b) 本震

れた4月14日の前震時および4月16日の本震時の推定地震動の分布を示す。本図より、前震の震度6以上のエリアは本震に比べて限定的で、調査対象構造物の推定震度はいずれも1~2段階低くなっている。

本論文では、2016年4月29日に実施した石積みと地盤の複合構造物(城郭石垣・石橋)の被災状況の調査・分析のうち、熊本城の石垣の調査・分析結果について、前震と本震後の崩壊状況の違いを踏まえて考察する。

2. 熊本城石垣の被災状況

熊本城石垣の崩壊箇所を図2に示す。4月14日の前震で発生した崩壊は6箇所程度で、崩壊の程度も比較的軽微だったようであるが、4月16日の本震で、崩壊箇所が顕著に増加し、崩壊の程度も壊滅的だった。また、残存する石垣についても目視調査で明確な孕み出しが確認された石垣が多数あり、これらについては現状把握を進めるとともに、地震前の調査・点検データや石垣の伝統的な形状曲線との比較や地盤力学的な考察により力学的安定性の把握を試み、補修の必要性を明らかにすることが重要である。

図3に戌亥櫓の被災状況を示す。戌亥櫓はかろうじて角石によって支持されていることがわかる。なお、飯田丸五階櫓や西大手門、南大手門も同様の形式で残存している。出隅は直方体の角石の短辺と長辺を交互に積む算木積みと呼ばれる形式で、櫓の自重は出隅の反った曲線に沿う方向に角石が力を伝達して支えられていると考えられる。逆に、この力の伝達機構により角石間の摩擦強度が増して、出隅が崩壊を免れた可能性もある。東側の石垣は4月14日の前震で一部崩壊と報じられたが、4月16日の本震では完全に崩壊した。

図4に宇土櫓の被災状況を示す。宇土櫓の石垣は崩壊は免れたものの、特に西側において、



図 2 熊本城石垣の崩壊箇所



図 3 戊亥櫓の被災状況



図 4 宇土櫓の被災状況

不自然な形状や孕み出しが目視でも確認された。今後、健全性の評価および余震や降雨などにより変状がどのように進行していくのかについて、最大限の注意が必要であると考えられる。

図 5 に北十八間櫓の被災状況を示す。北十八

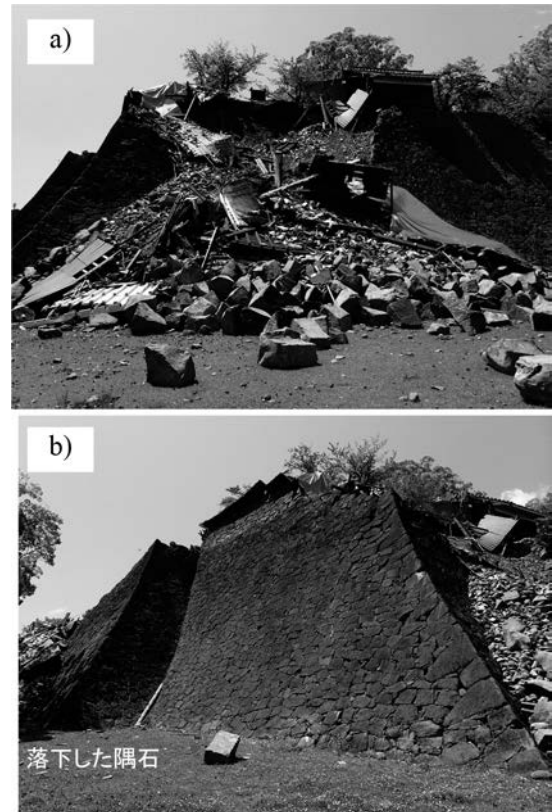


図 5 北十八間櫓の被災状況，a) 北石垣，b) 東石垣。

間櫓は北石垣（図 5a 参照）が完全に崩壊したものの、出隅と東石垣（図 5b 参照）は概ね原型を留めている。東西方向と南北方向で地震外力に違いがあったのか、崩壊は法面のどこからどのような機構で発生したのか、東石垣は健全であるか（再構築の必要はないかなど）、今後の分析により明らかにしていくことが重要であると考える。

図 6 に東十八間櫓の被災状況を示す。東十八間櫓の東側の石垣は完全に倒壊し、熊本城稲荷の社務所を押しつぶしている。本震発生は真夜中であり、石垣の崩壊による人的被害が発生しなかったことは不幸中の幸いと言える。

図 7a, 7b に百間石垣の被災状況を示す。百間石垣は 4 月 14 日の前震で一部が崩壊し、4 月 16 日の本震でさらに多数の箇所が崩壊した。角石と平石の目地開きは、程度の違いこそあれ多



図6 東十八間櫓の被災状況



図7 百間石垣の被災状況, a) 崩壊箇所, b) 崩壊を免れた箇所.

数の箇所で見受けられた。隙間なく緻密に角石を積んだ出隅と、間詰め石で隙間を埋めながら平石を積んだ法面の応答特性の違いに起因するものと考えられる。また、百間石垣の背面地盤では、石積みと地盤の相互作用を見て取れる。崩壊した石垣の背面地盤では、地表に石垣と平行な亀裂が複数生じ、側溝の蓋は軒並み落下し

ており、石垣の崩壊に伴って地盤内部にすべりが生じている可能性がある。一方、崩壊を免れた石垣でも近くに石材の小片が無数に落下しており、新鮮な断面をもつ欠片は地震時の繰返し载荷により平石が欠けて落下したものと考えられ、間詰め石の欠落により平石間の荷重伝達機構が変化している可能性がある。また、崩壊箇所の周辺では天端付近に明確な孕み出しが確認された(図7b参照)。

図8aに二ノ丸御門の被災状況を示す。二ノ丸御門の崩壊法面の側方では、石垣の破壊メカニズムを見て取ることができる。すなわち、石垣には明瞭に2つの破壊線が形成されており、急な角度の破壊線は地震動を繰返し受けたことによる石垣の剥離、緩い角度(約44°)の破壊線は石垣内部の地盤と連動した主動破壊と推察できる(図8b参照)。このような崩壊メカニズムは、石積みと地盤の力学的相互作用を評価できる手法により評価することが重要である。



図8 二ノ丸御門の被災状況, a) 全貌, b) 崩壊箇所の東側の側面.

3. 熊本城が受けた地震加速度

国立研究開発法人防災科学技術研究所により整備・運用されている強震観測網（K-NET）^[1]の観測点のうち熊本城に最も近い観測点（KMM006 熊本）における 4 月 14 日の前震および 4 月 16 日の本震の加速度をそれぞれ図 9、図 10 および図 11 にそれぞれ示す。なお、これらの図は東西（EW）方向の加速度に対する南北（NS）方向の加速度および東西（EW）、南北（NS）方向

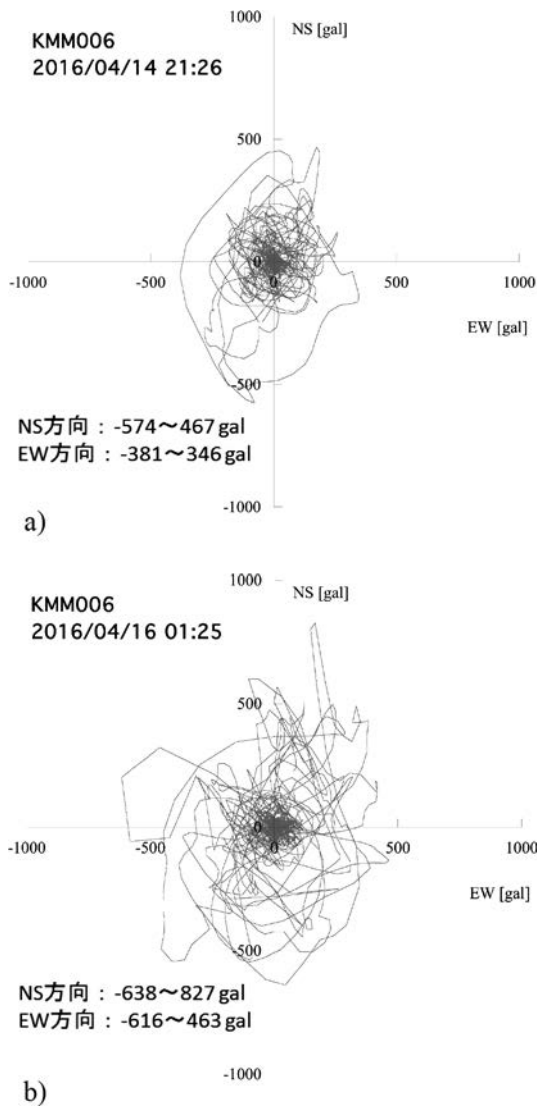


図 9 KMM006 熊本における東西（EW）方向の地震加速度に対する南北（NS）方向の地震加速度，a) 前震，b) 本震。

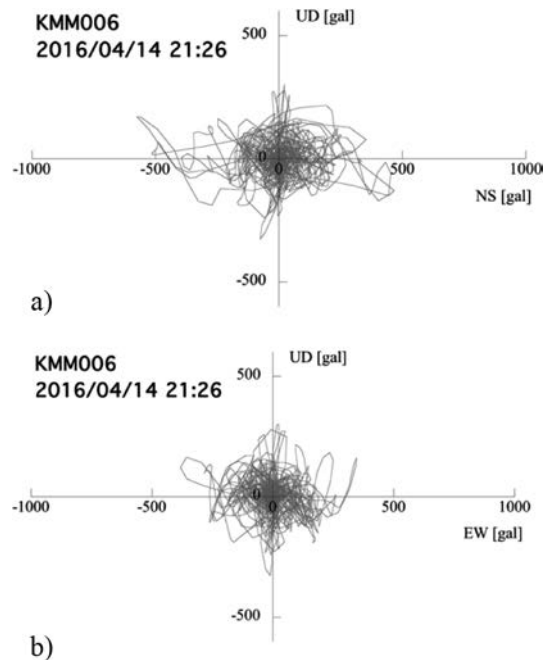


図 10 KMM006 熊本における 4 月 14 日の前震の鉛直方向の加速度，a) NS 方向，b) EW 方向

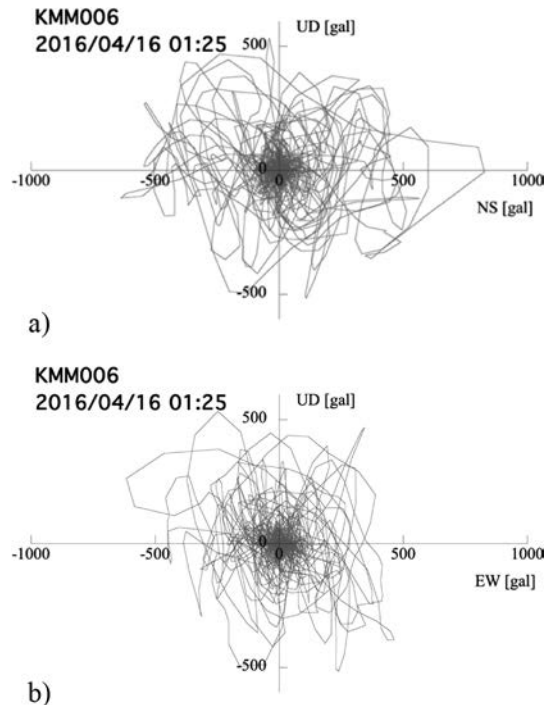


図 11 KMM006 熊本における 4 月 16 日の本震の鉛直方向の加速度，a) NS 方向，b) EW 方向

の加速度に対する鉛直方向（UD）の加速度をそれぞれ表している（ただし、観測点KMM006熊本は熊本城から100度方向に距離6.2kmとやや距離があることに留意する）。

これらの図より、本震の方が全方位の加速度は大きく、北向き加速度（本震で827gal）が顕著であることがわかる。北向きの石垣に被害が多いのはこのことが原因ではないかと推察される。また、本震時の鉛直上向き加速度が極めて大きく（本震で500galを超える）、このことが石垣の石材間の摩擦力を低減させ、石垣の崩壊が多数発生した原因であると推察できる。すなわち、摩擦性材料である石や土にとって鉛直上向きの加速度により、鉛直方向の拘束圧が失われ、浮き上がった状態になったところに水平方向の大きな加速度が作用することで崩壊に繋がったと考えられる。また、鉛直方向の拘束圧が小さい石垣の上部が崩壊していることもこのことで説明することができる。

4. 3D レーザースキャナによる石垣の計測

4.1 石垣の3次元形状取得

本調査では、目視や対象構造物の管理者・関係者への聞き取りと併せて、3D レーザースキャナによる計測を実施した。3D レーザースキャナは、方位と仰角を高速に変化させながら対象物までの距離をレーザー距離計により計測する機器で、計測器を原点として360度全方向の対象物の3次元座標を20分程度（ただし、解像度に依る）で数値化することができる。また、複数位置から計測してデータ処理することで、対象構造物の3次元形状を得ることができる。なお、本調査で用いたレーザースキャナはFARO製のFocus^{3D}X130（図12参照）である。

今回の調査でレーザースキャナによる計測を実施した構造物は、宇土櫓、櫓方三階櫓東石垣、平櫓北石垣、北十八間櫓石垣および百間石垣で



図12 3Dレーザースキャナ (FARO, Focus^{3D} X130)

ある。図13に3次元レーザースキャンにより取得した宇土櫓の石垣の点群データを例として示す。なお、計測は加藤神社鳥居前から実施した。境内の植生により計測範囲が限られたため、北石垣は法面左下の座標データは欠落している。下段の拡大図では、石垣の角石や平石が無数の座標点の集まりであることが確認でき、石の形状も明瞭に判別できる。点群の密度はスキャナと対象物の距離により変化するが、いずれの計測でも十分な密度で点群を取得できている。点群は膨大な数値データから成るが、石垣法面の下端ラインを座標軸として座標変換し、断面形状や表面形状を抽出する。ただし、「地震による変状」を特定するには被災前の形状データとの差分解析が必要になる。

4.2 石垣の変状分析

地震前と地震後の石垣の形状の変化を調べるため、桑原によって実施された熊本城の石垣勾配の計測結果^[2]と今回計測した3次元レーザー測量の結果を比較した。なお、本稿では、櫓方三階櫓東石垣および宇土櫓西石垣について、変状分析結果を示す。

(1) 櫓方三階櫓東石垣

櫓方三階櫓（加藤神社北東隅）東石垣は、崩壊を免れ、目視では明確な変状はないように見えたが、桑原が同石垣の中央の法面形状を計測・

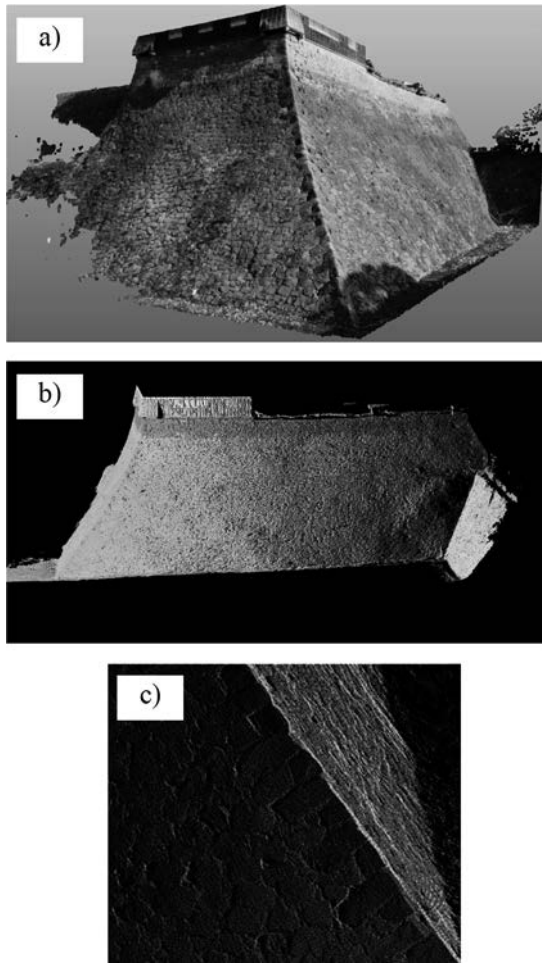


図 13 宇土櫓石垣の3次元点群データ, a) 全景, b) 西側の石垣, c) 角石, 平石の拡大図

報告している^[2]ことから、本調査で実施した 3D レーザースキャンの結果と比較することにより地震による変状を議論する。

まず、3次元の直交座標軸として、石垣下端に x 軸、水平外向きに y 軸、鉛直上向きに z 軸をとり、 x 軸に垂直な断面の石垣形状を求めた。図 14 に右図は計測により得た石垣中央の法面形状（図中の赤プロット）と桑原による計測結果^[2]の比較を示す。なお、図中の X, Y 軸は桑原が設定した座標軸で単位は m である。本図より、地震後の石垣法面は滑らかに反った形状であるが、桑原が計測した石垣形状に比べて上部がやや外側に位置していることがわかる。

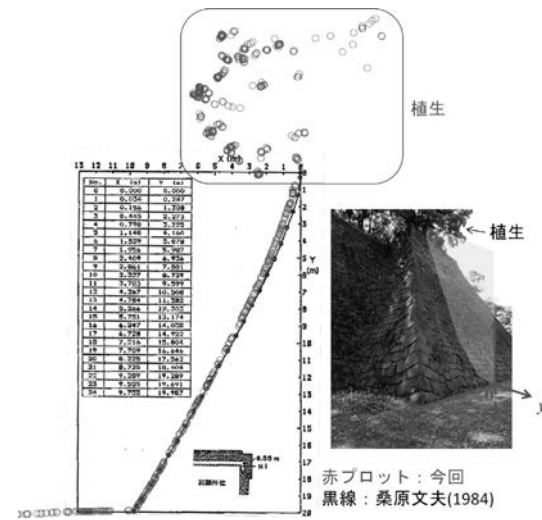


図 14 櫓方三階櫓東石垣における断面ごとの石垣形状 ($x=0.0m$, 中央断面)

限られた測点を一測線ずつ計測する従前の測量に対して、3D レーザースキャンは一回の計測で法面全面の座標を取得でき、あらゆる断面の石垣形状を求めることができる。櫓方三階櫓東石垣の左側 ($x>0$) の法面では、いずれも滑らかな形状が得られたが、地震前の計測値が無いため変状を特定するには至っていない。また、右側 ($x>0$) の法面においても地震前の計測値は得ていないが、中央から 6m の位置の断面では石垣勾配が上部で明確に不連続になっていることがわかった（図 15 参照）。この歪みが地震による影響であるか慎重に議論する必要があるが、少なくとも築造当初の形状からは何らかの変状が生じているものと予想される。

以上の結果をもとに、改めて現地での記録写真を詳しく観察すると、石垣の両側方において上部の角石と平石の間に幾らか目開きを生じていることがわかる（図 16 参照）。今後、このように 2016 年熊本地震前の計測値や建設当時の石垣曲線の記録と比較することにより、石垣の変状を注意深く特定していくことが極めて重要である。

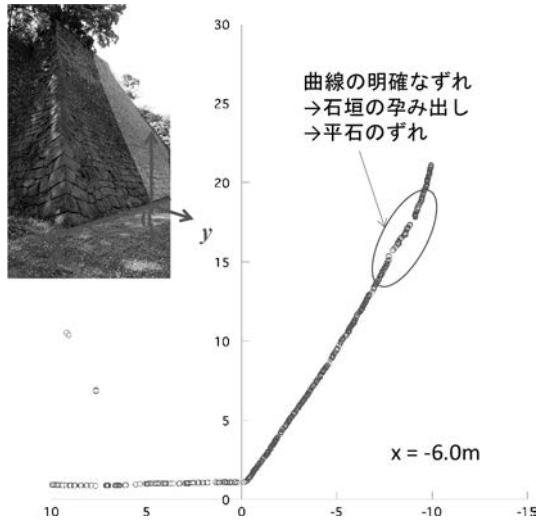


図 15 櫓方三階櫓東石垣における断面ごとの石垣形状 (x=-6.0m, 向かって右側)

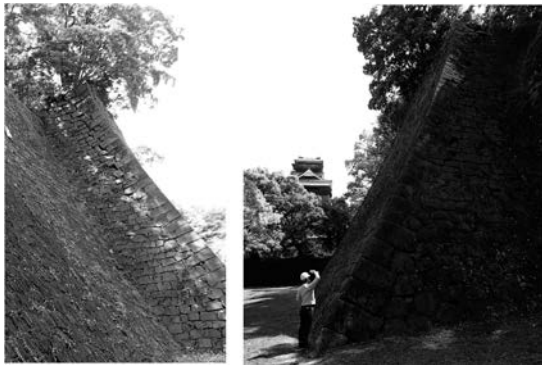


図 16 櫓方三階櫓東石垣を側面から見た様子

(2) 宇土櫓西石垣

図 17 に宇土櫓西石垣の中央の断面の石垣形状を示す。城郭石垣は法尻から直線的に打ち出し、天端で鉛直になるよう徐々に反りを持たせて構築されるが、計測では下部が不自然にふくらんだ石垣形状が得られた。

地震前からこのような石垣形状であったか、力学的な観点から見た補修の必要性、上部構造物（宇土櫓）の存在下での石垣補修の可能性といった点について、今後、精査する必要がある。

桑原は宇土櫓北西角から北向き、西向きの一測線で石垣形状を報告している^[2]。このうち西向きの測線は、本計測において $x = 13.3\text{m}$ の鉛

直断面で切り出した石垣断面に相当する。この断面での地震後の石垣形状と桑原の計測値^[2]の比較を図 18 に示す。地震後の石垣は全体的に外側に変形しており、その勾配は法尻（下端）から不連続に変化していることがわかる。なお、天端の外向き変位量は約 60cm だった。今後、北向きの測線や計測値が存在する他の石垣についても分析を進めるとともに、力学的安定性と補修の必要性について議論する必要がある。

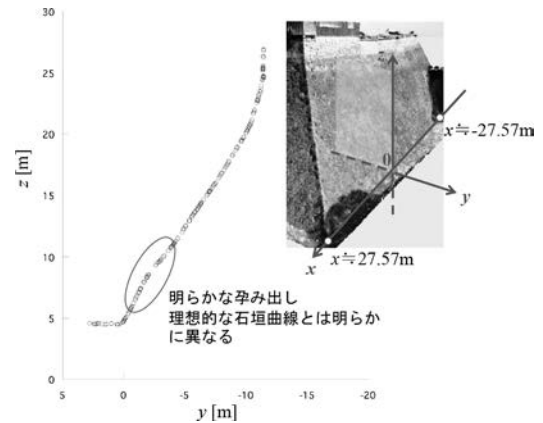


図 17 宇土櫓西石垣における断面ごとの石垣形状 (x=0.0m, 中央断面)

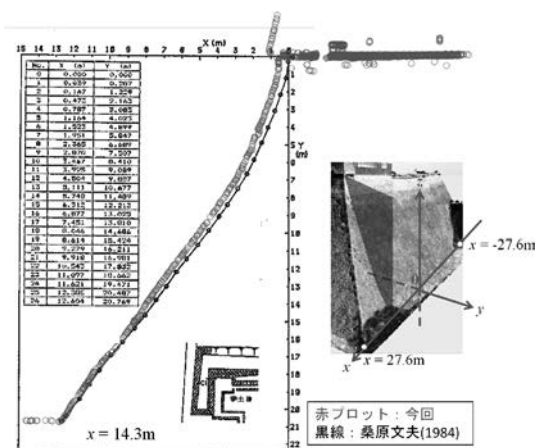


図 18 宇土櫓西石垣における断面ごとの石垣形状 (x=13.3m)

5. おわりに

熊本城内では、本震により多数の石垣の崩壊が発生し、石積みの剥離と合わせて内部の地盤も含むすべり破壊のメカニズムが確認されている。このような崩壊機構を解明するには石積みと地盤の力学的相互作用を考慮した評価手法が必要である。一方、崩壊を免れた石垣についても複数箇所では石垣の孕み出しや勾配の不自然な変化が認められ、今後の余震や降雨による更なる変状を防ぐための措置が早急に必要である。

また、補修の必要性の判断について、①伝統的な石垣曲線や地震前の計測値との更なる比較、および②力学的安定性の検討が必要である。

参考文献

- [1] 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET），
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- [2] 桑原文夫：熊本城の石垣勾配，日本工業大学
研究報告，第14巻，第2号，p.59-74, 1984.

（原稿受付日：2017 年 2 月 18 日）

（掲載決定日：2017 年 2 月 18 日）

