

熊本城の被災石垣の形状計測と動態観測

山口 晃佑¹・杉本 知史²・石塚 洋一³

¹ 学生会員 長崎大学大学院 工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

E-mail:bb52121505@ms.nagasaki-u.ac.jp

² 正会員 長崎大学大学院准教授 総合生産科学域システム科学部門 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

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

³ 非会員 長崎大学大学院教授 総合生産科学域電気・情報科学部門 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

E-mail:isy2@nagasaki-u.ac.jp

平成 28 年に発生した熊本地震により、熊本城の石垣の多くの箇所が崩壊・変状などの被害を受けた。再度自然災害による被害が懸念されている中、石垣の変状と力学的安定性との関係が明確ではないため、定量的な安定性評価基準の確立が必要とされている。本研究では、レーザー距離計による石垣表面の計測を行い、変状の進行の有無を定量的に評価する試みに取り組んだ。さらに変状石垣の継続的な監視を行う手法として、遠隔モニタリングシステムを用いた石垣石の挙動観測を実施し、その適用可能性について検討した。

Key Words: Kumamoto Castle, stone wall, deformation, Laser rangefinder, Remote monitoring system

1. はじめに

平成 28 年(2016 年)に発生した熊本地震により、熊本城の石垣の多くの箇所が崩壊・変状などの被害を受けた。重要文化財建造物 13 棟全ての建造物が被災し、中でも熊本城の北東に近接して位置する東十八間櫓、北十八間櫓は全壊した。その他にも復元建造物の 20 棟が全て被災し、石垣も大きな被害を受けた。現在も修復工事が進められているが、変状箇所が多く残っているのが現状であり、変状程度の違いによる修復の要否の検討が今後求められることが見込まれる。

過去に草野ら¹⁾、勝田ら²⁾は地震後の熊本城内の石垣表面形状の計測を行い、地震による変状に関する評価、考察を行った。本研究においても、レーザー距離計による石垣表面の計測を行い、桑原による平成 28 年熊本地震前の計測結果³⁾との比較による変状評価に加え、既往のデータが存在しない箇所での便宜的な変状評価の方法を提案し、今後の修復の要否の判断や復旧工事時の安全性評価への活用につなげることを目指している。

また、相対的に変状が大きく、石垣の力学的安定性に疑いがあると見込まれる箇所について、現在地すべり地帯の地盤変状に適用されている遠隔モニタリングシステム⁴⁾を応用した不安定石垣の挙動観測を実施し、特に進行性の変状の有無の確認を目的として、安全性確保のための安定性評価への適用性について検討した。

2. レーザー距離計による石垣表面形状の計測

(1) 計測概要

熊本城内の石垣表面をレーザー距離計を用いて計測し、過去データとの比較、同石垣での側線ごとの比較を行った。計測には、Leica Geosystem 社の DISTOD510 という可搬型レーザー距離計を使用した。主に土地区画や建物の形状計測に用いられるものであり、三脚に取り付けて使用した。

計測箇所については、2017 年～2019 年迄に計 352 箇所の計測を行ったのに加え、2021 年には図-1 に示す、南大手門 (10 側線)、東竹之丸西面 (13 側線)、茶櫓跡西面 (9 側線)、茶櫓跡南面 (24 側線)、A4、既往の研究で計測された 16 側線の計 73 側線の計測を行った。

計測対象の石垣隅角部直下に 0m の基準点を取りポールを設置し、基準点から石垣面に平行にメジャーを設置する。レーザー距離計を石垣面に垂直になるように設置し、垂直方向に各石垣石の距離と角度を計測する。これを 1m ごとに繰り返し、石垣表面全体を計測していく。計測後に距離と角度を基に各石垣石の鉛直・水平方向の座標を求め、断面をプロットする。

草野の研究¹⁾ではレーザー距離計と水平面をなす角が 45 度超えると約 0.3% 程度のばらつきが存在するという事を明らかにしていたが、今回の計測においては計測環境の条件から 50 度を超えるような場所での計測も必

要であった。その中でレーザー距離計が示す精度としては14m程度に対し、2.3mmの精度を補償するものであった。14mに対して2.3mmは約0.016%の誤差であるため、今回はこの条件でも計測を実施した。

(2) 同一面内での石垣表面形状の比較

変状傾向に特徴のあった東竹之丸西面石垣南側の基準点から0m地点、10m地点、13m地点（写真-1参照）の断面計測結果をプロットしたものを図-2に示す。10m地点の石垣は下部が膨らみ、上部が凹んでいるのがわかる。また、13m地点を見ると下部は基準と概ね一致しているが、上部は凹んでいるのがわかる。10m地点は隅角部の石垣に比べて実際に膨らんでおり、上部で上下の石垣石よりも明らかに前に出てきている石垣石がいくつか確認できた。東竹之丸西面の0m地点、10m地点、13m地点の断面について石垣隅角部の近傍で構造的に安定している0mを基準としたとき、2タイプの変状が確認される。13m地点は近傍で別の石垣と隣接しており、石垣面上は端の方だが、中央の石垣と構造的には変わらないため、変状が見られるものと考えられる。

(3) 石垣表面形状の2次元的表现

前項での計測結果を視覚的にわかりやすく表現するため、1m間隔で計測した石垣表面の2次元的表现を図-3に示すように、グラフツールにより行った。本報告では特に大きな変状を伴う、写真-2に示す東竹之丸西面石垣、南大手門東面石垣ならびに茶櫓跡西面石垣の3か所について示す。

図-3(a)の東竹之丸西面石垣の形状分布図より、10m地点付近では、隅角部の0m付近に比べて石垣の中央部が孕み出し、上縁部において凹むという面的な偏りを持つ形状が確認できる。図-3(b)の南大手門東面石垣の形状分布図においては、5m地点、6m地点付近で下部から中央にかけて大きく孕み出している形状が確認できる。また、図-3(c)の茶櫓跡西面石垣の形状分布図においても、これらと同様に2m、3m地点付近で、両端の隅角部に比べて石垣の中央部が膨らんでいる形状が確認できる。これは目視から分かる茶櫓跡西面の特徴と一致している。

(4) 既往のデータが存在する石垣における地震前後の形状の比較

次に、桑原による既往の計測箇所³⁾のデータと2021年の計測データを比較した結果のうち、特徴的な3箇所の結果を図-4に示す。既往の計測データと2021年の計測データを比較した結果では、地震前後でほぼ動きが見られないもの(F2)、変状しているもの(D3)、崩落してしまっているもの(E2)の主に3つのタイプに分類される。今回計測したデータのうち、崩壊はしていないが石垣石に

大きな挙動が見られたのはD3のみであった。また、地震前後でほぼ動きが見られない石垣の中には高さ20mを超えるものがあり、崩落している石垣でも下部は石垣石に動きがないものがあった（写真-3参照）。

(5) 隅角部表面形状を基準とした石垣の変状度の定量的評価

城内各所には、前項で述べたような未崩壊ながら変状が生じて不安定化した箇所が多数存在する。この変状の

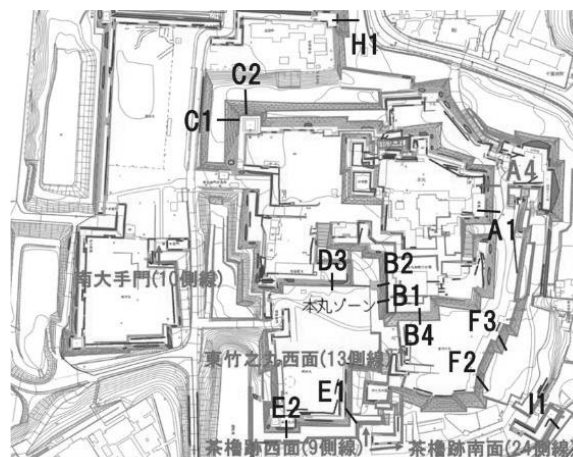


図-1 熊本城内の計測箇所



(a) 13m地点 (b) 10m地点 (c) 0m地点
写真-1 東竹之丸西面石垣での計測の様子

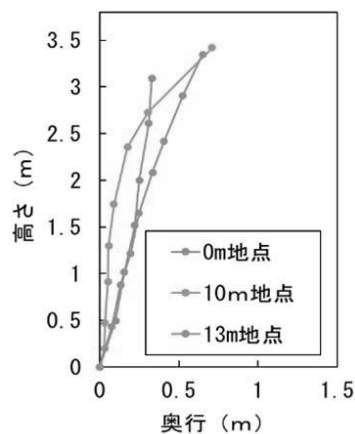
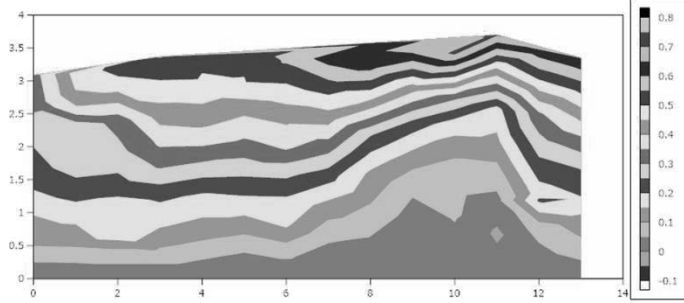


図-2 写真-1の石垣面の形状比較

度合いは各石垣で異なり、今後復旧を進める上で、修復の要否や力学的安定性の評価が必要と見込まれる中、石垣の変状度の定量的評価は大きな意味を持つものと考えられる。しかしながら、地震前もしくは初期の形状に関する情報がごく限られているため、前後の形状比較が困難である。そこで本研究では、隅角部は算木積みの構造により、石垣面の中で最も安定している状況が多く

確認されていることに着目し、同一石垣面内における隅角部近傍の測線を基準として、変状の大きな箇所との相対的な比較により、石垣の変状度を定量的に評価することを提案している。

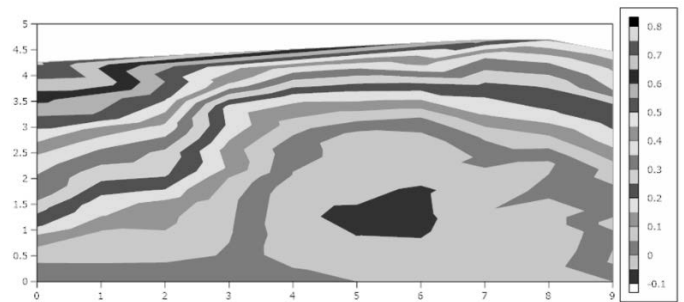
茶櫓跡西面では、石垣の中央に位置する2~5m地点で変状が大きかったため、変状の大きい4m地点と隅角部近傍の7m地点の比較を行い、一側線当たりの変状面積



(a) 東竹之丸西面石垣 (単位：m)



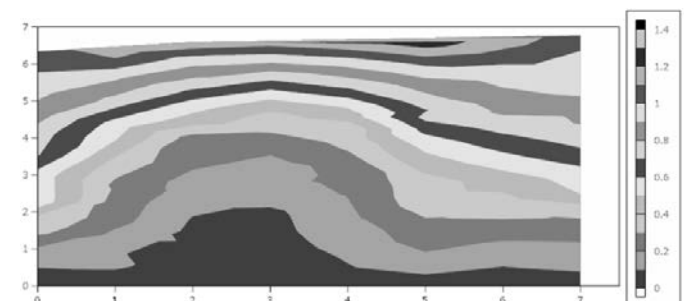
(a) 東竹之丸西面石垣



(b) 南大手門東面石垣 (単位：m)



(b) 南大手門東面石垣



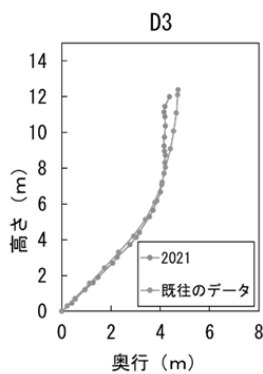
(c) 茶櫓跡西面石垣 (単位：m)



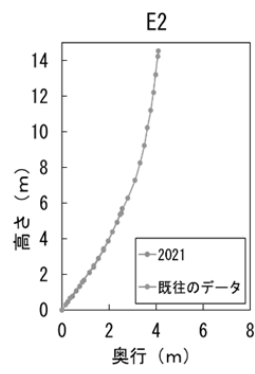
(c) 茶櫓跡西面石垣

図-3 石垣表面形状分布図

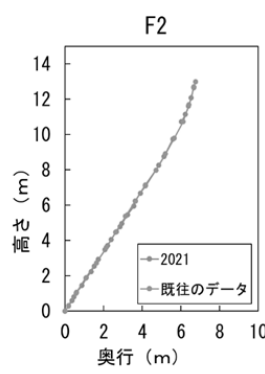
写真-2 石垣全景写真



(a) D3 地点



(b) E2 地点



(c) F2 地点



写真-3 飯田丸五階櫓の石垣の様子(E2地点)

図-4 桑原の計測結果との比較

を求めた。図-5に4m, 7m地点の測線位置を示す。

図-6の赤線が4m地点、黒線が7m地点の近似曲線である。求める際は、変状の大きい地点において近似曲線の変曲点となりうる点に分け、近似式を求めた。近似式を用いて図-6の①~①'''と②との間で囲まれる面積を変状面積として求めた。緑斜線を孕み出し面積、青斜線を窪み面積とする。計算の結果、孕み出し面積は2.611 m²、窪み面積は0.008165 m²であった。表-1に今回計測を行った箇所の変状面積と変状面積を高さで除した値を示す。また、この値から高さを1とした場合の変状量を示す。

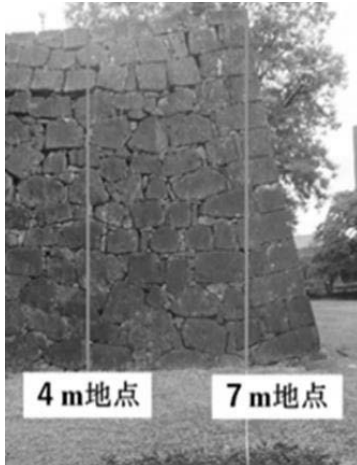


図-5 茶櫓跡西面石垣の測線

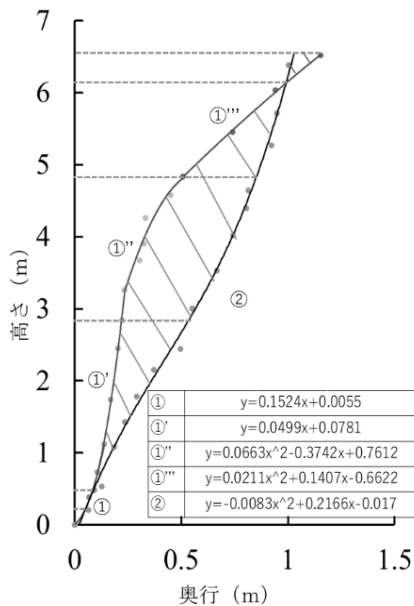


図-6 変状面積の算出例

表-1 変状面積の計算結果

	茶櫓跡西面(7m)	茶櫓跡南面(7m)	南大手門(6m)	東竹之丸西面(4m)
孕み出し面積(m ²)	2.611	0.04203	1.163	0.04054
窪み面積(m ²)	0.008165	0.3442	—	0.1607
孕み出し面積/高さ	0.4005	0.006457	0.2229	0.01313
窪み面積/高さ	0.001253	0.05288	—	0.05205

変状面積を求めたものについては茶櫓跡西面、南大手門の孕み出し面積が他の変状に比べて大きいことが確認できた。また、石垣が高いほど変状面積も大きい傾向にあることがわかった。しかし、地震前に計測されている既往のデータとの比較では、10m, 20mを超える石垣でも地震前後で石垣にはほぼ動きがないものが多数あったため、石垣の力学的安定性に影響を及ぼすものは高さに限らないものと考えられる。

3. 遠隔モニタリングシステムの力学的安定性評価への適用性の検討

(1) モニタリングシステムの概要

前節の石垣表面形状の計測は、変状量の評価には役立つものの、進行性のある変状や将来発生する地震前後の発生変状など、経時的な変化を把握するためには、その都度計測する必要がある。これらを自動的に監視する手法として、近年防災、維持管理などの分野で利用が広まりつつある無線センサを活用した遠隔モニタリングシステムが挙げられる。本研究では、地すべり地帯の地盤変状の監視実績のある中央開発(株)が開発したシステムを活用し、水平面内の2軸方向の角度変化の計測が可能な傾斜センサを、熊本城内の2地点の不安定石垣石に設置した。センサ部は約10cm角の大きさであり、写真-4に示すように型枠を用いて石膏により間接的にこれを固定した。同センサの測定範囲は-30° ~ +30°、分解能は0.02°であり、水平面内の直交方向の累積角度を10分間隔で計測、記録し、無線通信を介して親機へ、さらには携帯回線を通じてサーバーに送信することで、ブラウザ上でデータを閲覧することが可能である。

現在、図-7、図-8に示すA地点(南大手門東面石垣)に2か所のほかのほか4か所の計6か所で2019年11月24日から計測を継続している。これらセンサの設置箇所は、いずれも前節で示した石垣表面もしくは天端部が孕み出しや引き込みが確認されている箇所であり、長期的な変状進行による不安定化の状況を定量的に把握することを目的としている。本報告では、A地点の2か所の計測例について示し、石垣の安定性評価への適用性について考察を述べる。

(2) 観測結果と考察

計測開始時から2022年1月までの2か所での計測結果を図-9、図-10に示す。図-9は、10分間隔で取得した設置センサのx軸ならびにy軸方向の累積傾斜角の推移を示す。A-1とA-2は、それぞれ図-8に示すように石垣下部から約1m、約3mの高さに位置し、いずれも図-3(b)に示す変状分布図のおよそ中央付近の孕み出しが顕著に



写真-4 傾斜センサ設置時の様子

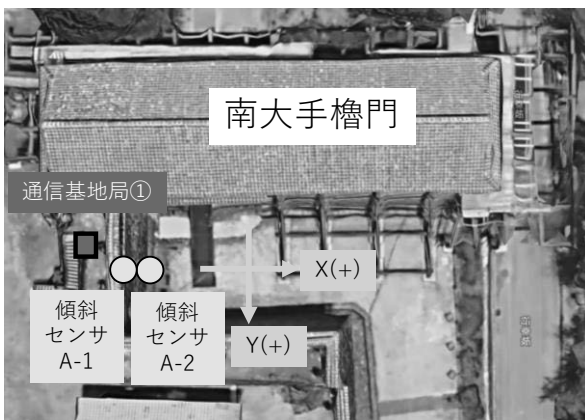


図-7 傾斜センサ設置位置図 (A地点)

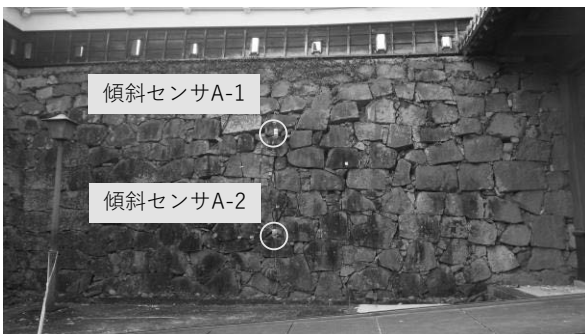
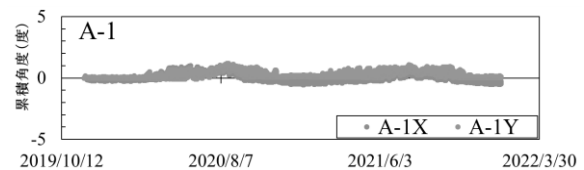


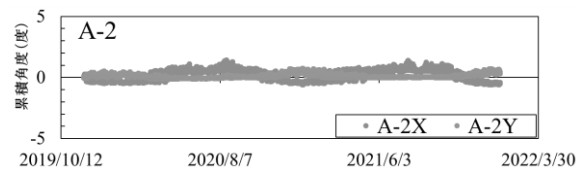
図-8 A地点石垣全景 (南大手門西面石垣)

表れている箇所に相当する。両者のデータともに、初期値を 0° とした場合、その後の約2年程度の推移は、最大で 1° 程度の変化が確認できるものの、季節的な変動と考えられることから、気温や日照によるデータの変化であると推定される。石垣の挙動としては、ほぼ変化がないと判断することが妥当と考えられる。

図-10は、図-9のデータを1か月ごとの変化に整理したうえで、傾斜センサの傾きをxy平面上に軌跡として示したものである。今回の計測データにおいては、やはり最大で 1° 程度の変化しか確認されていないため、石垣の動きと捉えたとしても、50cm程度の石垣石に対し、最大で約1cm程度の変位と推定される。図-3(b)に示した変状分布では、同一石垣面内の同じ高さにおける相対的な形状の凹凸差は、約30cm程度が確認されていることから、地震後の変位に対する計測期間中の変化は無視しうるものと推定される。今後、傾斜角の変化が累積的に生じれば、図-10のようなグラフ表現においては、原点からいずれかの方向に離れる動きが確認されると考えられ、石垣の安定性評価を行う上での根拠データの1つとなりうると考えられる。



(a) A-1 センサ



(b) A-2 センサ

図-9 傾斜センサから得られた累積傾斜角の経時変化

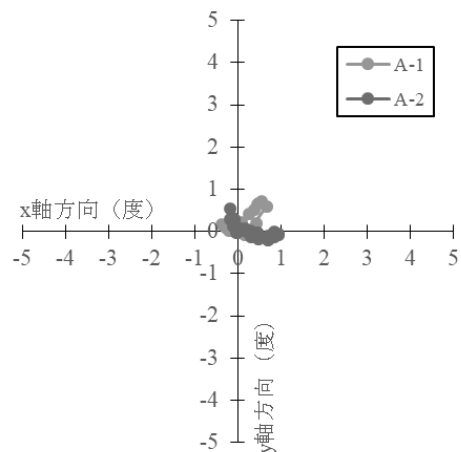


図-10 xy平面上の1か月ごとの軌跡

しかしながら現状では、安定性が低下したと判断する累積角度やその変化率に関する閾値は明らかとなっていないことから、石垣石の構造、形状を踏まえた判断の目安となるデータの蓄積とその分析が今後必要と考えられる。

4. おわりに

本研究では、レーザー距離計を用いた熊本城の石垣形状の計測を行い、断面図や形状分布図を用いて変状評価を行った。震災前後のデータを比較したところ、石垣下部においては比較的変状が小さいことを確認できた。地震前の計測データが存在しない箇所においては、石垣隅角部のデータを基準とし、変状量を定量的に表したところ、石垣高さの変状量との間に相関は確認されなかった。今後は、石垣の向きなど、評価項目を追加することで石垣の特徴と力学的安定性との関係を検討する。

また本研究では、遠隔モニタリングシステムを用いて城内の変状度の高い石垣の挙動観測を行い、経年的な変状進行の有無について確認した。現状、いずれの箇所でも進行性のある変状は確認されなかった。長期的に傾斜角度の記録を行い、データの蓄積とその分析を行うことで石垣の力学的安定性評価への適用が期待できる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費基盤研究(C)20K05030 の助成を受けて実施しています。また、モニタリングシステムを提供いただいている中央開発㈱ならびに熊本城内における研究活動に対しご理解いただいている熊本城調査研究センター、ならびに長崎大学大学院工学研究科シニアスタッフの岩崎昌平様、本年3月に長崎大学工学部を卒業した中尾雪音さんのご協力に謝意を表します。

参考文献

- 1) 草野奈菜ら：熊本城の被災石垣の簡易的変状調査法の提案，2019.
- 2) 勝田侑弥ら：熊本城の築石建造物の被災状況調査と再現解析に関する基礎的研究，土木史研究講演集，Vol.38, pp.141-147, 2018
- 3) 桑原文夫：日本工業大学研究報告 14(2), pp59-74, 1984.
- 4) 江藤亮太ら：斜面地盤の多点観測による変状傾向の定量的評価，2021.
- 5) 森本浩行：我が国における城郭石垣の形状および構造の歴史的変遷に関する土木史的研究，関西大学学術リポジトリ，pp.33-34, pp.51-52, 2005.
- 6) 山口晃佑ら：被災城郭石垣の変状評価と動的挙動の再現実験に関する研究，2021.
- 7) 田中邦熙，新谷洋二：日本の城郭石垣の変遷と現状，pp.101-110, 1997.

(2022. 4. 18 受付)