

形状計測と動態観測による熊本城の被災石垣の変状評価に関する研究

長崎大学工学部 学生会員 ○有津享佑 長崎大学大学院 正会員 杉本知史
 長崎大学大学院 フェロー会員 蔣宇静 長崎大学大学院 正会員 大嶺聖

1. はじめに

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では崩壊・変状などの被害を受けた。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可否の検討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、過去のデータとの比較を行った。同石垣面内において、変状の大小を定量的に評価することを目的とする。また、モニタリングシステムでは天端石垣石の変状に関するデータの分析を行い、経時的な安定性評価の可能性について検討した。

2. レーザー距離計による計測について

本研究では、主に土地区画や建物の形状を計測するのに用いられるレーザー距離計を使用した。草野らの研究¹⁾では計測機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ことが明らかにした。

3. 熊本城の石垣表面の計測

3. 1 計測条件と箇所

計測時にはレーザー距離計から石垣までの延長線と、計測する側線を含む石垣表面が垂直になるように三脚を設置し、隅角部を 0m 基準として 1m 間隔で石垣面を計測する(写真-1 参照)。計測した斜距離と角度を基に各石垣石の鉛直方向・水平方向の座標を求め、断面をプロットする。

計測箇所については、東竹之丸西面、南大手門東面・北面、茶櫓跡西面・南面、既往の研究²⁾で計測されていたうち計測可能な 13 側線の計 81 箇所の計測を行った(図-2 参照)。

3. 2 石垣表面形状の 2 次元的表現

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 次元的表現を図-3 に示すように、グラフツールにより行った。図-3 の右に示す数値は、石垣下端の奥行方向を 0m とした値を示す。石垣の勾配は、奥行方向に段々と反る形状をとるので変状が少ない場合は図-3 の石垣横幅 0m 地点のように色が層状になる。特に大きな変状を伴う、南大手門東面について示す。南大手門東面石垣の形状分布図

においては、図-4 に示す全景のように 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。

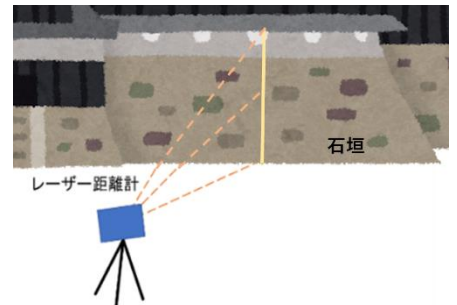


図-1 石垣表面計測のイメージ



写真-1 基準とした 0m 地点

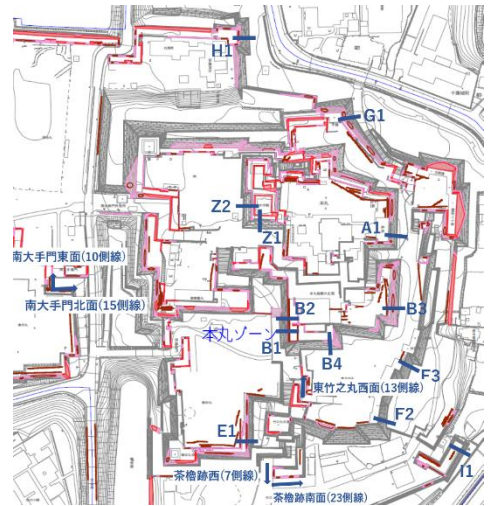


図-2 今回計測した箇所の全体図

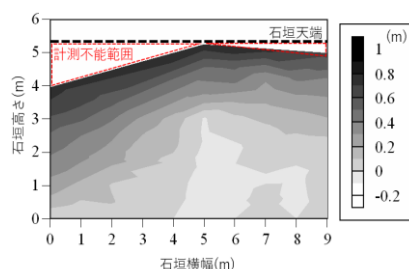


図-4 南大手門東面石垣の表面凹凸量

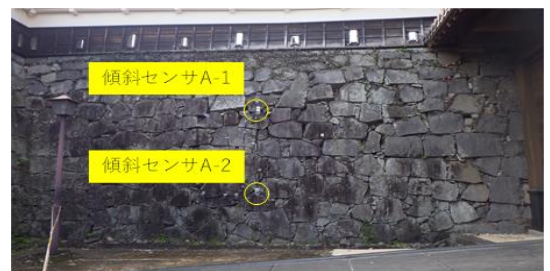


図-4 A 地点石垣全景(南大手門東面石垣)

4. 遠隔モニタリングシステムによる石垣の挙動観測

4. 1 モニタリングの概要

前節の石垣表面形状の計測は、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。当システムは水平面内の直交方向の累積角度などを10分間隔で記録し親機に送信することで、ブラウザ上で確認することができる。

4. 2 観測結果と考察

観測開始時から2022年10月までの平均気温と2か所での観測結果を図-6に示す。図-6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-4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表れている箇所に対応する。

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。また、図-7では春と秋、夏と冬のセンサA-1とA-2のx軸ならびにy軸の累積角度の差を算出することで、気温変化によるセンサの出力値の変化の影響が小さいことが分かる。季節的な気温の変化により、センサの温度特性の影響が表れているものと考えられるが、一方で石垣の背面地盤が季節的に膨張と収縮を繰り返し変動していることも一つの可能性として考えられる。石垣の挙動は、ほぼ累積変化はないと判断することが妥当と考えられる。

5. 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、形状分布図を用いて視覚的に中央部の孕み出しなどの変状が生じていることを確認した。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。また熊本城調査センターならびに中央開発(株)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，平成30年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.283-284，2019。2)桑原 文夫：熊本城の石垣勾配，日本工業大学研究報告14(2)，pp.59-74，1984。

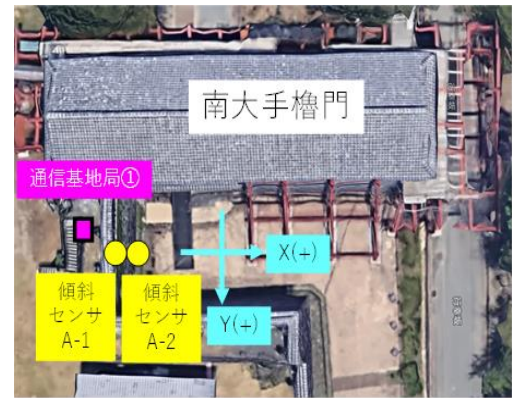


図-5 傾斜センサ設置位置図 (A地点)

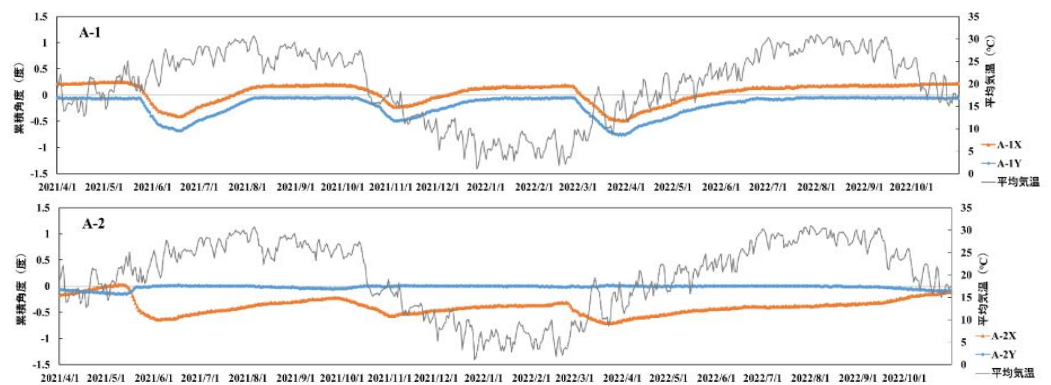


図-6 傾斜センサから得られた累積角度の経時変化

年/月/日(季節)	A-1X	A-1Y	A-2X	A-2Y
2021/5/1(春)	0.08	-0.13	-0.12	-0.08
2021/11/1(秋)	0.21	-0.05	-0.17	-0.08
累積角度の差異	-0.13	-0.08	0.05	0
年/月/日(季節)	A-1X	A-1Y	A-2X	A-2Y
2021/8/1(夏)	-0.35	-0.65	-0.65	-0.04
2022/2/1(冬)	0.45	-0.09	0.51	-0.49
累積角度の差異	-0.8	-0.56	-1.16	0.45

図-7 春夏秋冬の累積角度の差異