

# 変状観測による熊本城の被災石垣の 安定性評価に関する研究

杉本 知史<sup>1</sup>・有津 享佑<sup>2</sup>・藤谷 久<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 長崎大学准教授 大学院総合生産科学域（工学系）システム科学部門（〒852-8521 長崎市文教町 1-14）

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

<sup>2</sup>非会員 元長崎大学学生 工学部工学科社会環境デザイン工学コース（現：北九州市役所）

<sup>3</sup>非会員 中央開発株式会社 ソリューションセンター ジオ・メンテナンス事業部

（〒332-0035 埼玉県川口市西青木 3-4-2）E-mail: fujitani@ckcnet.co.jp

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、地震により石垣に変状が生じたのか原因が定かではない中、変状程度の違いによる修復の要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形状の計測、遠隔モニタリングシステムを用いた天端築石の回転・移動に関する定常観測を行い、進行性変状の有無から安定性評価について検討した。さらに、加速度センサを用いた振動計測による、天端築石の定量的な不安定箇所抽出の可能性を検討した。

**Key Words:** Kumamoto Castle, damaged stone wall, Stability Evaluation, Remote Monitoring

## 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要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い、変状の大小を定量的に評価することを継続的に行っている。また、変状が顕著な箇所において、遠隔モニタリングシステムを用いた天端築石の回転・移動に関する観測を行い、経時的な変状の有無を監視している。これら石垣表面の定期的計測、天端築石の常時観測により、変状の進行性の有無を明らかにすることを目的としている。これらは、外観上の不安定さに基づき観測箇所を決定してきたが、定量的な評価を目指し、加速度センサを用いた振動計測により、新たな観測対象を抽出する手法を検討した。

## 2. 熊本城の石垣表面の計測

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<sup>1)</sup>の研究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を明らかにしていることから、この点に留意して以下計測を行った。

### (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(図-1 参照)。計測した斜距離と角度を基に各築石の鉛直方向・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<sup>2)</sup>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)。B-1 と I-1 の既往の計測データと 2022 年の計測データを比較したものを図-3 に示す。I-1 は、天端周辺に変状が確認された。今回計測した他の計測箇所では、B-1 のように変状は確認されなかった。

### (2) 石垣表面形状の 2 次元表現

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 次元的表现を図-4 に示すように、グラフツールにより行った。図の右に示す数値は、

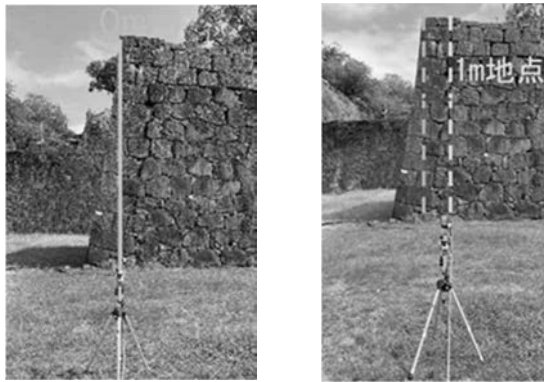


図-1 基準とした0m地点の例(茶櫓跡南面石垣)

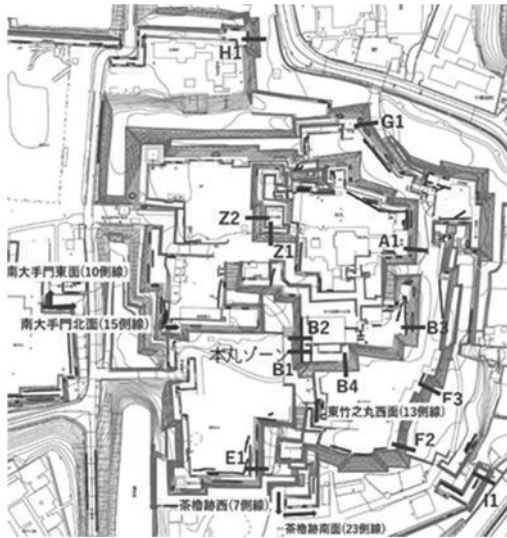


図-2 今回計測した箇所的位置図

石垣下端の奥行き方向を0mとした値を示す。石垣の勾配は、奥行き方向に次第に反る形状をとるので変状が少ない場合は石垣横幅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-6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。

### 3. 遠隔モニタリングシステムによる築石の挙動観測

#### (1) モニタリングの概要

前節の石垣表面形状の計測は、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。そこで、築石の回転挙動を常時監視できる遠隔モニタリングシステム(中央開発㈱製)を用いて、石垣のはらみ出しが確認されている城内複数箇所にて、傾斜計による2軸方向の角度変化(計測範囲 $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ 、分解能 $0.02^{\circ}$ )を記録している。ここでは、南大手門東面石垣の事例を述べる。

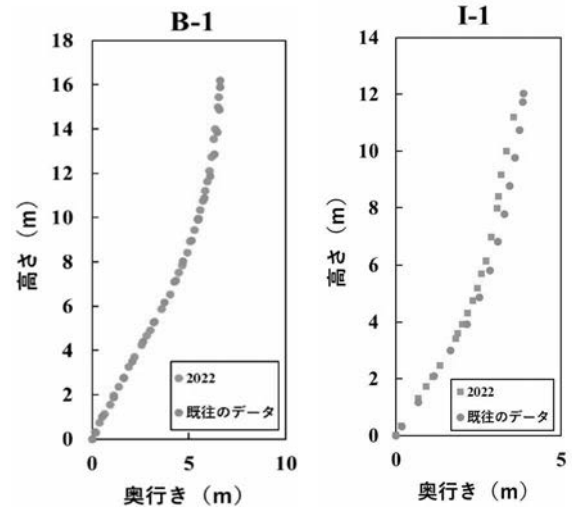


図-3 石垣表面形状の計測例

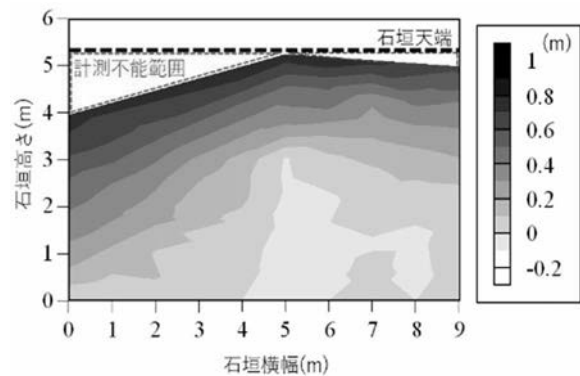


図-4 南大手門東面石垣の表面凹凸量



図-5 南大手門東面石垣の表面凹凸量

#### (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-7に示す。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-5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-4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相当する。両者のデータともに、初期値を $0^{\circ}$ とした場合、その後の約2年程度の推移は、最大で $1^{\circ}$ 程度の変化が確認できる。また、表-1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て変動していることも一つの可能性として考えられる。築石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。

#### 4. 不安定箇所特定のための天端築石の振動計測

前節の挙動観測は、外観上不安定とみられる箇所にモニタリング機器を設置しているが、約3年ほど観測を継続しているものの、顕著な変状が生じていない。そこで、定量的に不安定箇所を特定することを目指し、藤山

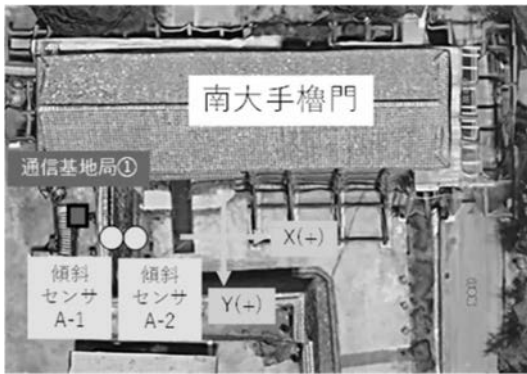


図-6 傾斜センサ設置位置図 (A地点)

表-1 年間を通じた傾斜角の季節変動

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

ら<sup>3)</sup>の研究を参考に、築石表面に一軸加速度センサを固定し、一定の打撃エネルギーを加え表面に垂直な方向の動的挙動を計測した。打撃は、ランマーを用いて落下高さ25mmの位置から与えて振動波形を計測した。固定したセンサから250mmと500mmの距離で打撃を数回与え加速度波形データを取得しフーリエ解析を行い、振動数と加速度振幅を求めた。計測箇所については、茶櫓跡向かい底部築石2箇所(地表面から高さ約1m)、茶櫓跡南西角底部築石2箇所(地表面から高さ約0.5m)、飯田丸南側天端築石6箇所の計10箇所を行った。

振動計測のセンサ設置状況と打撃位置を図-8に示す。地点①は茶櫓跡向かい底部の隅角部築石、地点②・③は飯田丸南側の天端築石である。地点①～③における打撃箇所～加速度センサ間250mmの結果を図-9に示す。底部築石と天端築石を比較すると明らかに天端築石が動きやすくかみ合わせが悪いことが分かる。また、2つの天端築石の加速度スペクトルを比較すると、②は、振動数が約190Hz、加速度振幅約4cm/s<sup>2</sup>でピークを示し、③は、振動数が約87Hz、加速度振幅約6cm/s<sup>2</sup>でピークを示した。②は、③と比較すると、振動数が高いことからかみ合わせがよく、振動しにくい様子が分かる。天端築石でも振動しやすい築石と振動しにくい築石に分かれる原因としては、築石同士のかみ合わせや形状、体積によるものと考えられる。そして、振動計測を行った計10箇所の打撃回数分のピーク値を算出し、平均値を求めプロットしたものを図-10に示す。底部築石は、加速度振幅がほぼ0cm/s<sup>2</sup>を表し、天端築石は箇所によってピーク値にばらつきがみられる。底部築石の加速度振幅がほぼ表れていない理由は、上載圧が作用しており相対的に振動が極めて小さいと考えられる。

#### 5. おわりに

本研究ではレーザー距離計による計測を行い、熊本城

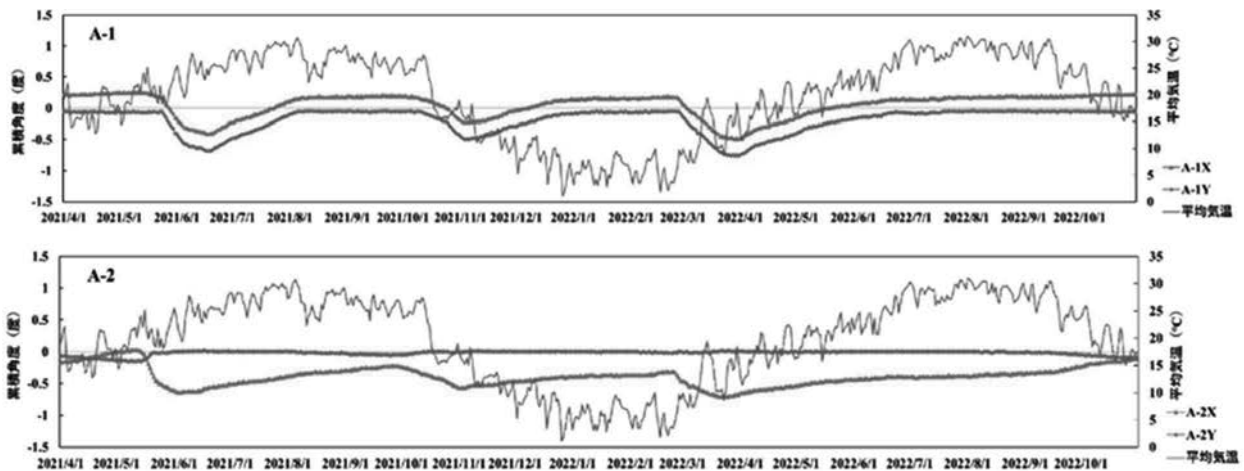


図-7 傾斜センサから得られた累積角度の経時変化



図-8 築石上の打撃位置例（地点①～③）

内各所の石垣に関し、地震後の変状の有無を確認した。また、特に変状が顕著とみられる石垣においては、遠隔モニタリングシステムにより経時的に築石の挙動を観測した。両手法による観測データにおいては、現状では石垣の不安定性は確認されなかった。また、振動計測による天端築石の不安定箇所の抽出の試みにおいては、相対的な動的挙動の差異から、定量的な抽出の可能性を明らかにし、今後広く適用する予定である。

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のご協力に謝意を表します。

## REFERENCES

- 1) 草野奈菜ら：熊本城の被災石垣の簡易の変状調査法の提案，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。[Kusano, N. et al.: A Simple Method of Investigating Deformation of Damaged Stone Walls in Kumamoto Castle, *Proc. of the Japan Civil Engineering Society Western Branch Research Conference*, pp.283-284, 2019.]

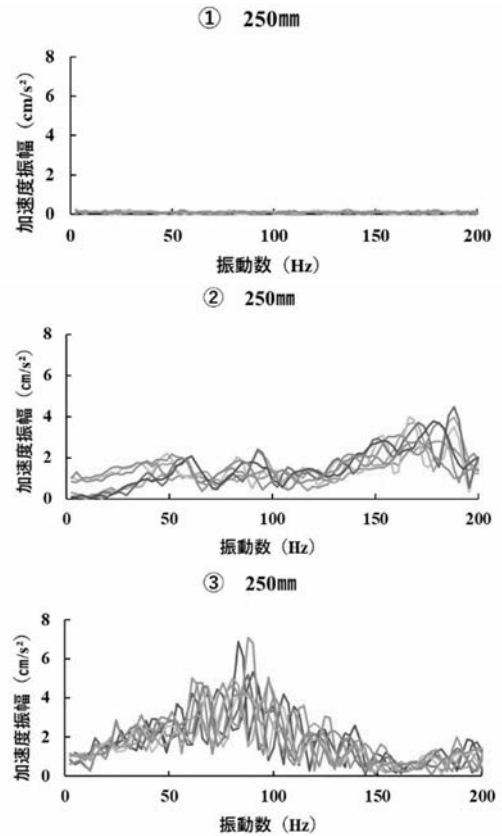


図-9 地点①～③の打撃位置250mmでの加速度スペクトル

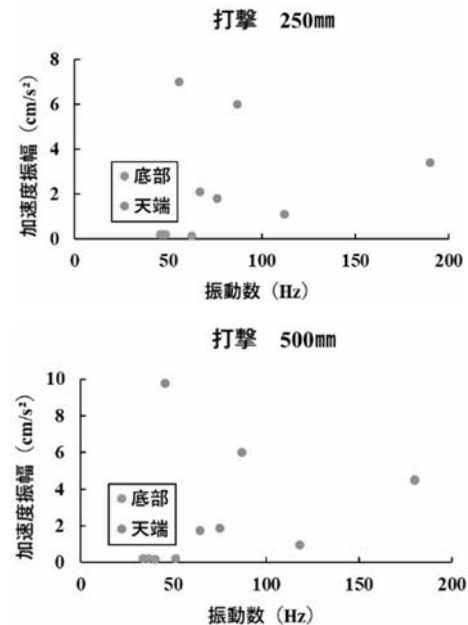


図-10 天端築石と底部築石の計測ピーク平均値の比較

- 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。[Kuwahara, K.: Stone wall slope of Kumamoto Castle, *Nippon Institute of Technology Research Report*, Vol.14, No.2, pp. 59-74, 1984.]
- 3) 藤山啓太ら：覆工表面ひび割れ分布と固有振動特性の相関について，トンネル工学研究発表会講演集，Vol.29 pp.1-8，2019。[Fujiyama, K. et al.: Correlation between Lining Surface Cracks Distribution and Natural Vibration Characteristics of Existing Tunnels, *Proc. of the Conference on Tunnel Engineering*, Vol.29 pp.1-8, 2019.]

(Received April 10, 2023)