

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

山口 晃佑¹・杉本 知史²・山中 稔³・山口 真歩⁴

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 工学研究科

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

3 正会員 香川大学教授 創造工学部 環境デザイン工学領域 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

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

4 学生会員 長崎大学大学院 工学研究科

E-mail:bb52120509@ms.nagasaki-u.ac.jp

2016年に発生した熊本地震により、熊本城石垣の多くの箇所では崩壊・変状などの被害が生じた。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。また、同石垣面内において、変状の大きさを定量的に比較する手法を提案した。また、石垣模型を用いた動的遠心载荷模型実験において振動を加え、石垣石、栗石、背面地盤間の土圧の推移から、地震動による崩壊・変形の原因を検討した。

Key Words : Kumamoto Castle, Kumamoto Earthquake, Laser Rangefinder, Centrifugal Loading Experiment

1. はじめに

平成28(2016)年の熊本地震は、4月14日21時26分に発生したマグニチュード(以降、M)6.5・最大震度7の前震、4月16日1時25分に発生したM7.3・最大震度7の本震が連続した、観測史上例のない地震とされる。この地震の影響により、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る。過去に桑原¹⁾がプリズム反射鏡と光波タキオメーターを用いて熊本地震発生前の石垣表面形状計測を行った。これは、熊本地震前に計測された唯一のデータである。それをふまえ、草野ら²⁾、勝田ら³⁾は地震後の石垣表面形状計測を行い、地震による変状に関する評価を行ってきた。

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。また、同石垣面内において、変状の大きさを定量的に比較する手法について提案する。また、個別要素法による数値シミュレーションの妥当性を示すことを目的として、石垣を含む築石構造物の模型を作製して動的遠心载荷模型実験を行い、加振前後の模型内の土圧の推移から、崩壊・変形の原因を検討した。

2. 熊本城石垣表面形状計測

(1) 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、崩壊・変状の原因を検討した。また、同石垣面内において、変状の大きさを定量的に求めた。計測箇所については、2017年~2019年迄に計299箇所の計測を行ったのに加え、2020年には図-1に示す、東竹の丸石垣西側、茶櫓跡西側、南側、南大手門、計53測線の計測を行った。

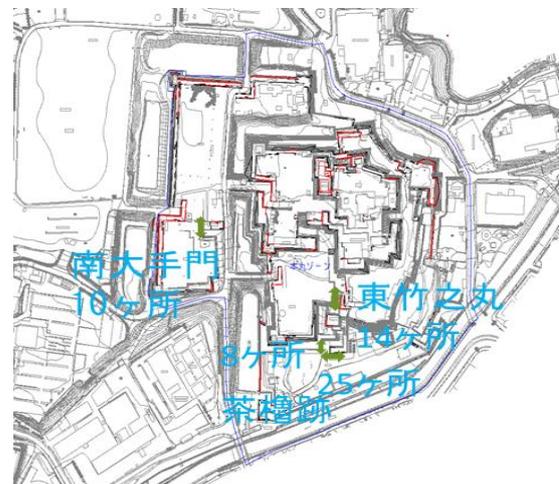


図-1 熊本城内における計測箇所

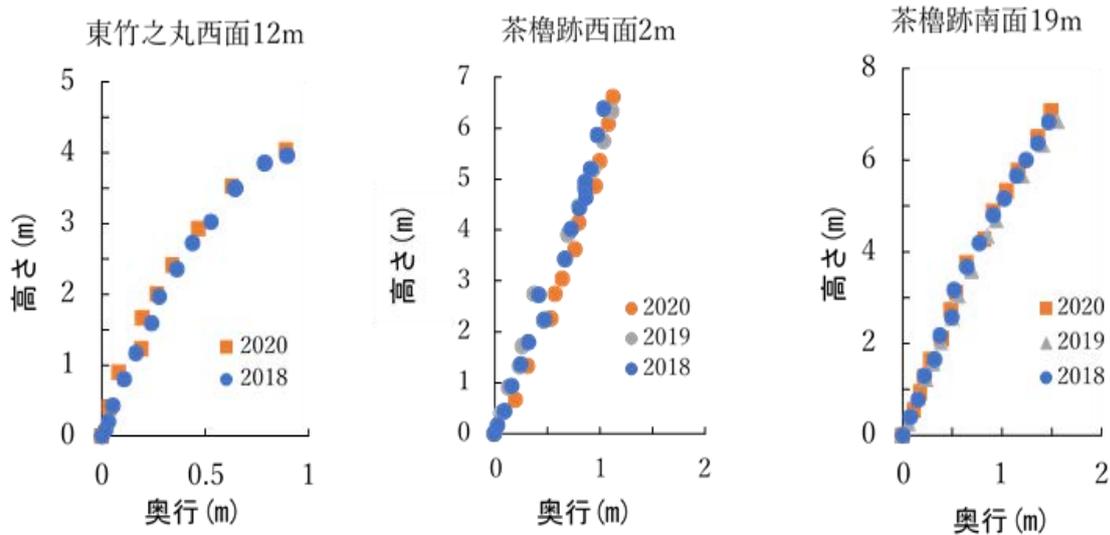


図-2 石垣表面形状に関する過去データとの比較

(2) レーザー距離計による計測

計測にはLeica Geosystem社のDISTOD510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可搬型レーザー距離計であり、直線距離や仰角の計測が容易に行える。計測精度は、標準測定公差が±1.0mm/10m、標準測定範囲が0.05-200mの精度を有する。計測する際はレーザー距離計を三脚に固定した。

計測方法は、はじめに三脚にレーザー距離計を設置する。次に、過去に計測された基準点上に三脚を設置し、三脚とレーザー距離計の接地面が地表面に対して水平になるように調整する。次に、基準点から石垣石まで、石垣面と直行するようにメジャーを設置する。次に、設置したメジャーと直行するように石垣石付近にメジャーを設置し、固定して、石垣面を計測する。また、このときに直行する点を0m地点とする。レーザー距離計から石垣までの斜距離、水平面とレーザーとのなす角度を計測し、レーザー距離計からの水平距離、鉛直距離を求めた。

(3) 既往の計測データとの比較

2018、2019年に茶櫓跡西面、南面、東竹之丸西面石垣を計測していたため、今回計測したデータと比較した。過去のデータと今回の計測結果を比較したものを図-2に示す。図-2より各計測地点において、経年的な明確な変化は確認されなかった。

(4) 変状面積の算出と考察

同一石垣面内における変状の少ない箇所を基準として、変状の大きな箇所の相対的な比較を行うこととした。例えば、茶櫓跡西面石垣では、変状が大きい箇所と小さい箇所があり、計測の基準点から0m、7m地点(石垣端)では変状が比較的小さく、石垣の中

央に位置する2-5m地点では変状が大きかった。これは隅角部付近では、図-3に示す算木積み構造により、石垣が交差しているため、中央付近に比べ、変状が小さいと考える。茶櫓跡西面石垣の4m地点と7m地点ほか、写真-1に示す計4か所における計測結果を比較し、一測線当たりの変状面積を求めた。ここで、図-4中の青線を変状の大きい地点、赤線を変状の小さい地点の石垣断面形状とすると、青線と赤線で囲まれた面積(図-4中の斜線部)を「変状面積」と定義する。また、図-4中の緑斜線を「孕み出し面積」、青斜線を「窪み面積」と定義する。

例えば、図-5(a)の赤線が変状の大きい地点(4m地点)、黒線が変状の小さい地点(7m地点)である。面積を求める際は、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(図-5中、高さ3.87m)により、3つの区間(高さ:0-3.87m, 3.87-6.37m,)に分け、相関係数が0.99以上となる近似式を求めた。さらに、曲線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。高さ6.31mまでは、石垣石に向かって手前側に1.532m²、高さ6.31mより上側では後方に0.02731m²変形していた。これは熊本地震により、石垣石に対し栗石が外側に押し出すように主働土圧状態が生じたこと、栗石内の間隙が減少し栗石全体の体積も減少したことが要因と推測される。同様に、図-5(b)~(d)についても計算を行った。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。これらの断面に限れば、高さが高いほど変状量が大きい傾向が確認できた。このような値により、今後城内各所の変状石垣の評価を行うことにより、変状規模の分類が可能であると考えられる。

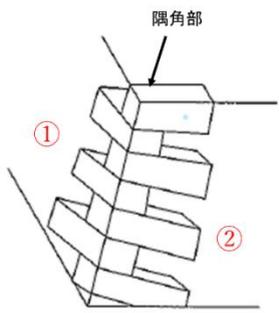


図-3 算木積みのイメージ

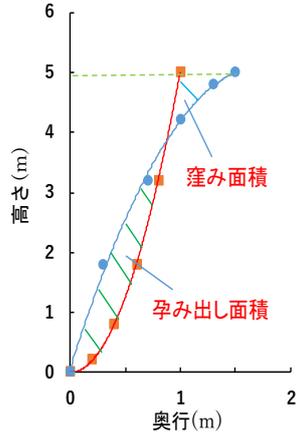
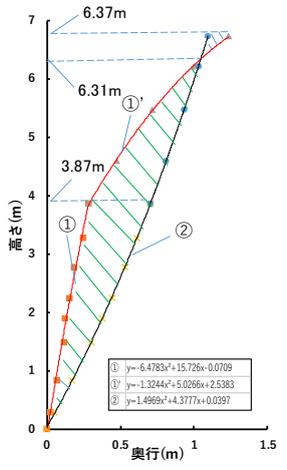


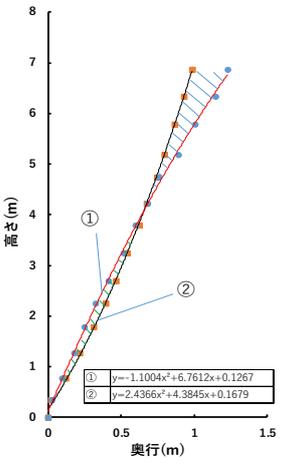
図-4 窪み面積と孕み出し面積



(a) 茶櫓跡西面



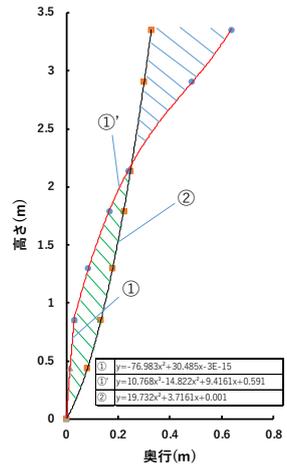
(a) 茶櫓跡西面 4m,7m



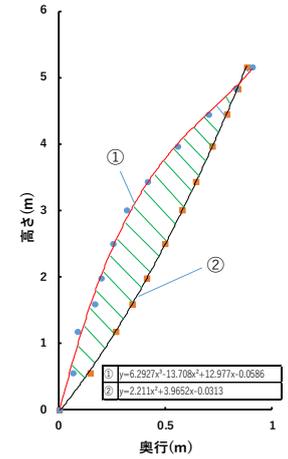
(b) 茶櫓跡南面 0m,8m



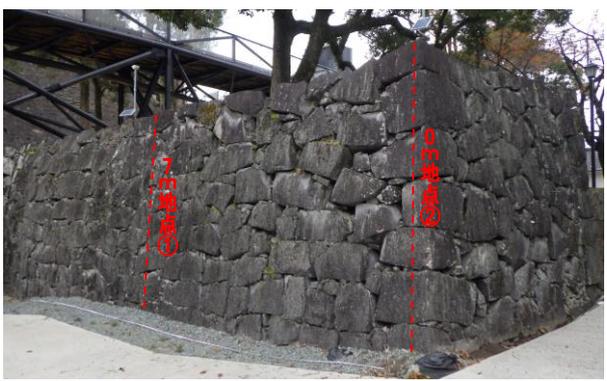
(b) 茶櫓跡南面



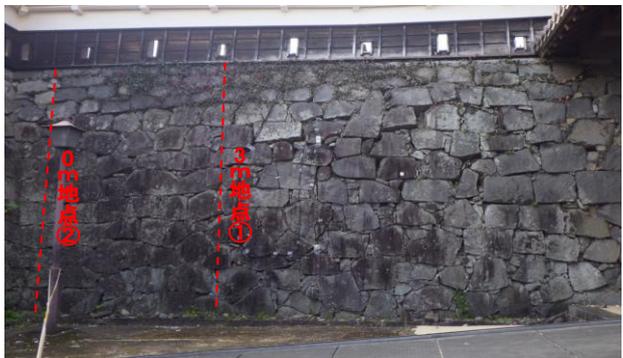
(c) 東竹之丸石垣西面 0m,7m



(d) 南大手門 0m,3m



(c) 東竹之丸石垣西面



(d) 南大手門

図-5 各石垣断面における変状面積

表-1 変状面積の比較

	茶櫓跡西面(高さ7m)	茶櫓跡南面(7m)	東竹之丸西面(4m)	南大手門(6m)
孕み出し面積(m ²)	1.532	0.1461	0.1382	0.7917
窪み面積(m ²)	0.02731	0.305	0.1603	0.006391
孕み出し面積/高さ	0.2189	0.02087	0.03455	0.132
窪み面積/高さ	0.003901	0.04357	0.04008	0.001065

図-6 計測箇所の石垣の状況

3. 築石構造物を再現した動的遠心载荷模型実験

(1) 概要

2016年に発生した熊本地震により熊本城石垣の多くの箇所が崩壊・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る。地震による崩壊・変形の原因を検討し、耐震・補強の度合いについて明らかにする必要がある。現在、個別要素法による築石構造物の動的数値シミュレーションを行っている⁷⁾が、これらの結果の妥当性検証の必要もあることから、本研究では、城郭石垣を想定した築石構造物の模型を作製し、これに遠心力を作用させることで、遠心力を作用させた上で、地震動に相当する振動を加え、石垣石、栗石、背面地盤に作用する土圧の推移から、実寸大の石垣における地震動による崩壊・変形の原因を検討した。

(2) 模型作成方法

本実験では、石垣模型の背面地盤に真砂土、栗石に伊勢砂利、石垣石にアルミブロックを使用した。模型土槽



写真-1 模型作製途中の様子

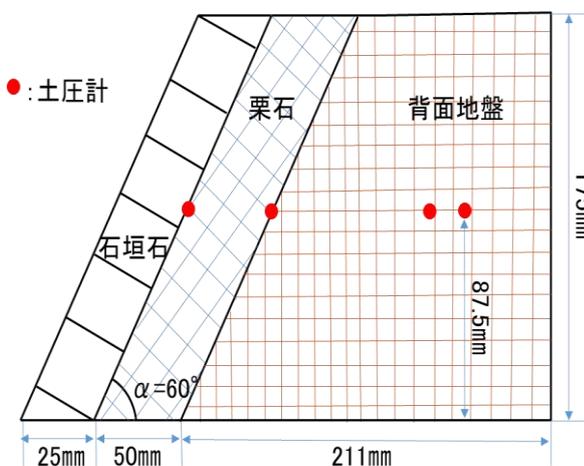


図-7 石垣勾配 60° の模型寸法と土圧計設置位置

全体に真砂土を高さ 4 cm になるように入れ、突き固めを行い、模型の土台となる地盤を作製する。次に、土槽内半分に真砂土を入れ、4 層に分けて突き固めを行い、高さ 17.5 cm の背面地盤を作成する。この際、2 層目と 3 層目の間に土圧計を鉛直土圧と水平土圧を計測できるように設置する。次に、作成する石垣の角度に合わせて背面地盤を削る。次に、アルミブロックを 1 段並べ、アルミブロックと真砂土の間に厚さ 4 cm となるように伊勢砂利を詰めていき、真砂土と同じ高さになるまで詰めていく(写真-1)。この際、高さ 9 cm 付近の真砂土、伊勢砂利間、また、伊勢砂利、真砂土間に土圧計を設置する。最終的に図-7 のような模型を作製した。

(3) 土圧計設置位置

図-7 中の赤点に土圧計の設置位置を示す。背面地盤中の 87.5mm の位置に土圧計を鉛直方向土圧、振動方向の水平方向土圧を計れるように設置する。また、背面地盤栗石間の 87.5mm の位置に受圧面を背面地盤に向けて斜面に沿って土圧計を設置する。また、栗石石垣石間の 87.5mm の位置に受圧面を栗石に向けて斜面に沿って土圧計を設置する。これらは、遠心力载荷後の加振前後の地盤内の土圧の推移から崩壊や変状が生じる際の力学的挙動を明らかにすることを目的としている。

(4) 実験条件

本実験では、加振条件として模擬的に正弦波を使用しており、周波数：50Hz、繰り返し回数 300 回(6 秒間)、振幅：1mm、石垣勾配 60°、80° の 2 ケース、遠心加速度：50G の条件で行った。

(5) 石垣勾配 60° 時の実験前後の模型形状比較

写真-2 に石垣勾配 60° の振動前模型断面写真、写真-3 に振動後模型断面写真を示す。振動前後で、栗石の栗石の高さが低くなっていることがわかる。また、中腹部付近の石垣石が前方に押し出されていることがわかる。栗石に関しては、振動により栗石間の間隙が減少したからだと考えられる。石垣石に関しては、振動による水平方向への力に加え、栗石間が狭まったことにより、主動土圧が作用した影響ではないかと考えられる。背面地盤の形状変化は見られなかった。



写真-2 振動前模型断面 (勾配 60°)



写真-3 振動後模型断面 (勾配 60°)

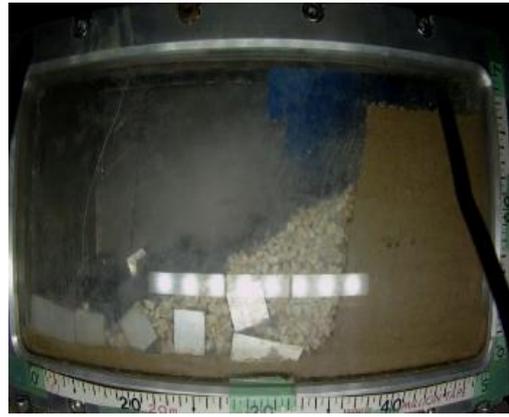


写真-5 振動後模型断面 (勾配 80°)

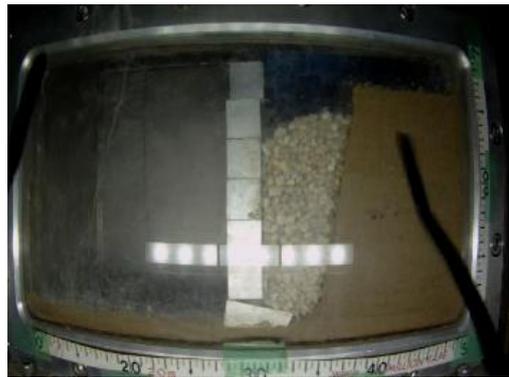


写真-6 模型崩壊直前の様子

(6) 石垣勾配 80° 時の実験前後の模型形状比較

写真-4 に石垣勾配 80° の振動前模型断面写真, 写真-5 に振動後模型断面写真を示す。また, 写真-6 に模型崩壊直前の写真を示す。振動前後で, 石垣石, 栗石が崩壊したことがわかる。しかし, 石垣勾配 60° 同様, 背面地盤の形状変化は見られなかった。写真-6 より, 栗石間の間隙が減少し, 栗石による水平方向の土圧により, 石垣石が押し出されていることがわかる。石垣勾配 60° のケースでは, 石垣石の一部の形状変化が見られたが, 80° のケースでは, 石垣石が一体となり前方に倒れるような崩壊が生じた。これは, 60° に比べて角度が大きく, 石垣石の自重の斜面方向成分が大きいので, 石垣石間の摩擦力が大きくなったためと考えられる。

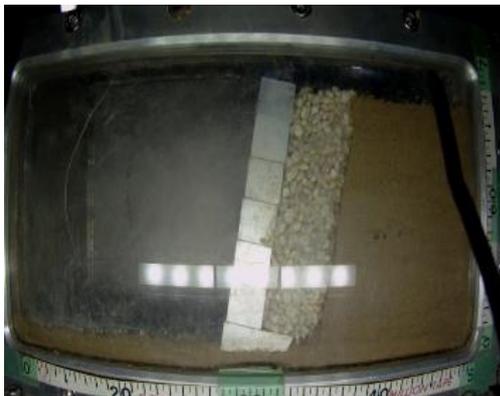


写真-4 振動前模型断面 (勾配 80°)

(7) 石垣勾配 60° 時の加振後の土圧推移

図-8 に石垣勾配 60° における振動台変位の推移を示す。実験開始後 236 秒で振動が開始し, 244 秒で振動が終了していることがわかる。図-9 より, 栗石石垣石間の栗石による水平方向土圧が, 振動開始と同時に急激に増えていることが伺える。これは振動による力に加え, 栗石の間隙が減少することにより, 主動土圧が作用したためと考えられる。同様に, 背面地盤栗石間の土圧も急激に増えると考えられるが, 実際には振動と同時に急激に下がり, 最終的に 0 に近い値になった。これは, トンネルに生じるアーチ効果と同様な現象が栗石内で起こり, 高さ 87.5mm 付近の背面地盤側の栗石が, 上からの栗石の重さを円弧上の圧縮力に換えて受け止めているためと考えられる。実際にアーチ効果が作用しているかを確認するために, 今後は, 栗石石垣石間の土圧計の位置を再検討して計測する必要がある。

(8) 石垣勾配 80° 時の加振後の土圧推移

図-10 に石垣勾配 80° における振動台変位の推移を示す。実験開始後 243 秒で振動が開始し, 252 秒で振動が終了していることがわかる。本ケースでは, 245 秒付近で石垣石, 栗石の崩壊が生じた。図-11 より, 栗石石垣石間の栗石による水平方向土圧が振動開始と同時に急激に増え, 崩壊と同時に減少していることが伺える。これは, 60° のケースと同様崩壊直前までは, 振動の力に加

え、栗石の間隙が狭まることによる主動土圧の作用により値が大きくなり、崩壊と同時に栗石の水平方向の土圧が作用しなくなったためと考えられる。背面地盤栗石間に関しては、振動と同時に土圧計の値が下がり、最終的に0に近い値になっている。これは、崩壊前まで作用していた栗石の圧力が崩壊と同時に作用しなくなったからである。60°、80° 両ケースとも、振動と同時に栗石

垣石間の水平方向土圧が急激に増えている。このことから、背面地盤の変状がない場合、城郭石垣の変状・崩壊は栗石の水平方向土圧の影響が大きいのではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究では、レーザー距離計による石垣形状の計測を行い、熊本城内の石垣において変状の小さな箇所と大きな箇所での断面形状の比較を行い、熊本地震による変状量を定量的に評価した。また、城郭石垣の模型を用いた動的遠心載荷実験において模擬的に地震動を加え、石垣石、栗石、背面地盤にそれぞれ設置した土圧計より得られる実物大に作用するのと同等の土圧の推移から、石垣における地震動による崩壊・変形時の力学的挙動を明らかにし、栗石の水平方向の作用土圧による影響が大きいことを述べた。今後は、土圧計の位置、振動数、使用材料などについて異なる実験条件を加え、既往のデータとの比較を行い、本実験の妥当性を検証していく必要がある。

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。また熊本城調査研究センターのご協力に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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，pp.59-74，1984。
- 2) 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。
- 3) 勝田侑弥：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，土木史研究講演集，Vol.38，pp.141-147，2018。
- 4) 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の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。
- 5) 長野寛大：動的遠心載荷模型実験による築石構造物の力学挙動の基礎的研究 平成30年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.309-310，2019。
- 6) 岡村未対・竹村次郎・上野勝利：遠心模型実験 -実験技術と実務への適用-，土と基礎，Vol.52，No.10，pp.37-44，2004。
- 7) 山口真歩：熊本城の被災石垣の変状計測と力学的安定性評価に関する基礎的研究，土木史研究講演集，Vol.40，pp.17-23，2020。

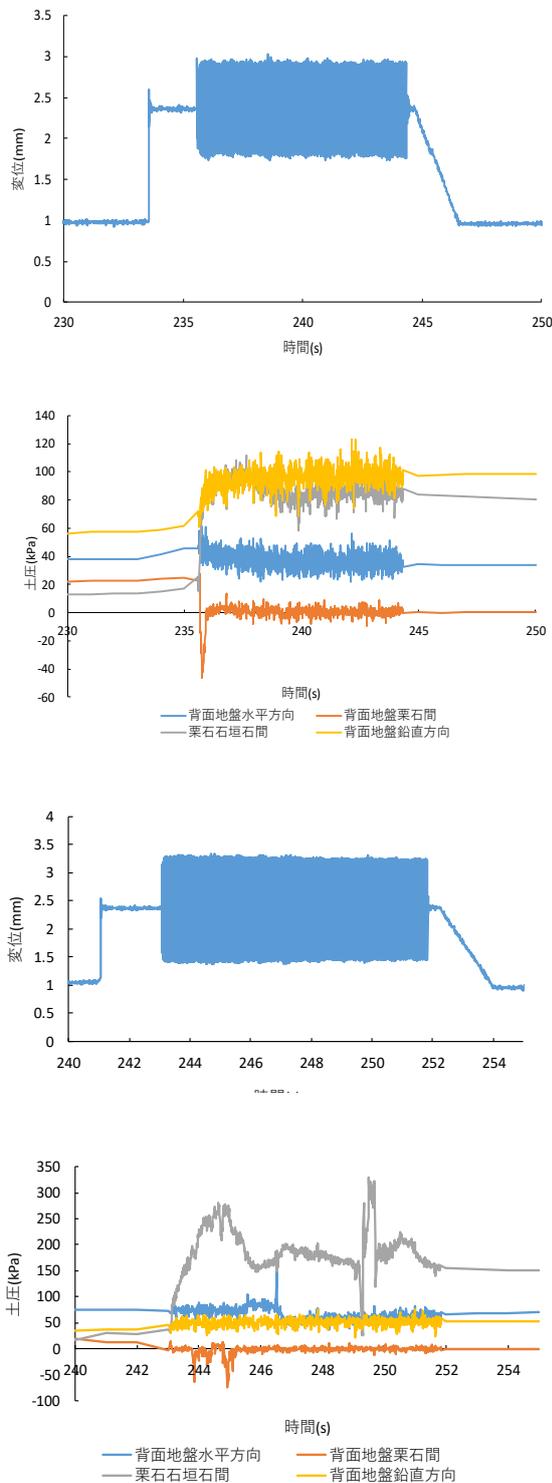


図-11 石垣勾配80°時の土圧推移

(2021.4.19 受付)