

# 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

山口 真歩<sup>1</sup>・杉本 知史<sup>2</sup>・蔣 宇静<sup>3</sup>・山中 稔<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 長崎大学大学院 工学研究科 システム工学専攻 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)  
E-mail:bb52120509@ms.nagasaki-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 長崎大学大学院准教授 工学研究科 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

<sup>3</sup> フェロー会員 長崎大学大学院教授 工学研究科 システム科学部門 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)  
E-mail:jiang@nagasaki-u.ac.jp

<sup>4</sup> 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

熊本地震によって熊本城は重要文化財建造物13棟すべての建造物が被災した。その中でも最も被害を受けたのが石垣である。変形が生じた石垣は、今後修復工事の実施や適切な管理が検討されるが、元々変状がある石垣なのか、地震の影響で変状を生じたのか判別することは非常に困難である中、変状度合いから修復の優先順位を検討する必要がある。本研究では、簡易的な手法で石垣の変状を定量的に計測し、表面形状分布図を作成することで変状箇所の抽出を試みた。これらの結果は、現在並行して試験的に行っている変状石垣の遠隔モニタリングの対象箇所の選定に有用であると考えられる。また、個別要素法(解析コード：UDEC)を用いて石垣モデルを作成し、動的挙動を再現する数値解析を実施し、各種条件における崩壊パターンの比較をすることによって、石垣石に変状を与える力学的要因を基礎的に検討した。

**Key Words :** *Kumamoto Castle, Kumamoto earthquake, stone wall, laser distance meter, individual element method*

## 1. はじめに

平成 28 年熊本地震により、熊本城では建造物や石垣などの地盤構造物に甚大な被害が及んだ。さらに、熊本城内の多数の石垣は崩壊や孕み出しが生じるとともに、背面盛土には引張りクラック等が発生した。平成 28 年熊本地震の特徴は、熊本城が前震で震度 5 強、本震で震度 6 強の被害を受けた点にある。熊本城石垣は、前震では変形を免れたものの、本震により変形・崩壊に至ったケースが多く発見されており、変形が生じた石垣は、今後修復工事の実施や適切な管理が検討される。しかしながら、元々変状がある石垣なのか、地震の影響で変状を生じたのか判別することは非常に困難である。したがって変状度合いから修復の優先順位を検討するうえで管理者が日常的に簡易に計測を行うことが求められている。また、将来的に、再度の大規模地震の発生が想定される中で、同じような被害が二度と起こらな

いたためにも石垣の崩壊のメカニズムを解明すべきである。

本研究では、簡易的な手法で石垣の変状を定量的に計測するとともに、遠隔モニタリング対象箇所の選定の根拠となるためのデータ収集と個別要素法(解析コード：UDEC)を用いて既往の研究を元に、石垣モデルの構築を行う。そして動的挙動の数値解析を実施し、各種条件における崩壊パターンの比較をすることによって、石垣石に影響を与える要因を検討した。

## 2. 可搬型レーザー距離計による計測

### (1) 概要

Leica Geosystem社のDISTO D510は、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、図-1のように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1.0mm/10m容易に行える。計測精度は、標準測定1.0mm/10m、標準測定範囲が0.05-200mの精度を有する。さらに、計測器と水平面をなす角度が45度を超えると、約0.3%程度のばらつきが存在することが示されている。したがって、本研究では可搬型レーザー距離計（DISTO D510）を三脚に固定し、鉛直距離と水平距離を計測するとともに、形状計測の際には計測角度が45度の範囲内で計測を行うことを条件とした。

## (2) データ整理方法

データの整理方法として、計測した石垣断面において上端基準、下端基準の2種類の方法でまとめる。上端基準とは、最上段の石垣をX軸、Y軸の原点として、下端基準とは、最下段の石垣をX軸、Y軸の原点として計測したデータをそれぞれプロットしてまとめたものである。基準を設けることで、石垣表面形状に変化が生じた場合、石垣の変形・崩壊の特性を判断しやすくなることから場合分けを行う。また、石垣最下部を基準とし、計測した横方向の位置、高さ、奥行きをグラフ描画ソフトに入力し、形状分布図を作成する。

図-1に示すように、計測対象となる石垣前に三脚に固定したレーザー距離計を設置し、垂直方向に各石垣石の距離と角度を計測する。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。

石垣が造られている地盤に傾斜がある場合、通常通り計測すると、正確な表面形状分布図を作成することが困難である。したがって、計測を行う際に、傾斜の最下部の箇所を座標軸の原点とし、段差がある箇所は2つのポールを用いて計測することとした。2つのポールを用いることでポール間の距離が分かる。従って、各測線にポール間の距離を追加することで、基準が統一され表面形状分布図を作成することができる。写真-1にポールを用いた計測の様子を示す。

## (3) 計測方法

- ① 計測対象の石垣の面と平行にメジャーを設置する。この際、左右どちらかの端を計測の

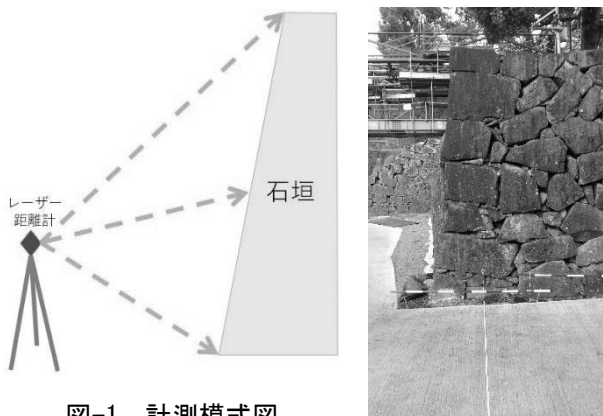


図-1 計測模式図

写真-1 ポールを用いた計測の様子

原点と設定する。

- ② 今後計測を行う際に比較がしやすいように、原点と設定した点にマーカーを設置する。
- ③ 石垣面の長さ、大きさに応じて、測線の間隔を決定する。
- ④ 計測する測線が決まったら、石垣面と平行に設置したメジャーと垂直に交わるようにメジャーを設置する。
- ⑤ 三脚に可搬型レーザー距離計（DISTO D510）を設置し、計測箇所を測定する。この際、測線上にある石垣1つにつき1点測ることとし、石垣中心部を測定することとする。
- ⑥ 測線上の各石垣石を測り終えたら、Excel形式のデータとしてPCに保存する。
- ⑦ 計測対象の石垣面において、④～⑥を繰り返す。

## 3. 熊本城の石垣表面形状計測

### (1) 概要

計測対象となる石垣前方に可搬型レーザー距離計を設置し、垂直方向に各石垣石の距離と角度を計測する。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。今回は、1984年、2018年の計測データを比較対象に用いた。1984年のデータは、熊本地震発生前に桑原により計測されたデータの中で最も新しいデータである。計測箇所の選定に際し、過去に計測された箇所に加え、変状が大きい箇所については新たに計測を行った。これまでに8回に分けて計測を行っており、茶櫓跡石垣西面、同南面、西出丸石垣、東竹の丸石垣西面、同南面、二様の石垣、長局石垣南面、同東面、南大手門石垣、東十八間櫓石垣、飯田丸五階櫓石垣西面、同南面、数寄屋丸石垣、飯田丸石垣、田子櫓石垣、計150箇所の計測を行った。

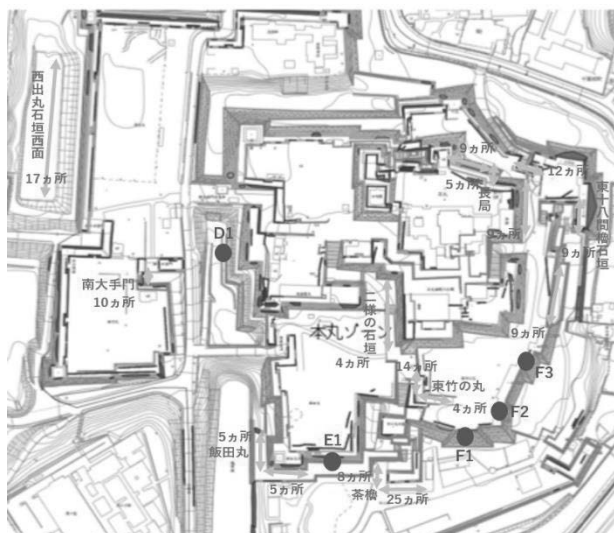


図-2 計測箇所全体図

## (2) 計測結果

### A) 茶櫓跡石垣西面

熊本城内の南側に位置する石垣で、石垣の背面は栗石で構成されている。写真-2は、茶櫓跡石垣西面の全景である。1m間隔で計8測線計測を行った。

図-3に茶櫓跡石垣西面の表面形状分布図を示す。5m付近で、表面形状に孕み出しが生じている。考えられる理由として、石垣後部に堆積している栗石が振動等の外力の影響で動くことにより、栗石の間隙が小さくなったために生じている現象ではないかと考えられる。実際に、石垣の天端に堆積している栗石に窪みがみられる箇所と変状が生じている箇所が対応していることが確認できた。この変状は、地震時に石垣中央部で主働土圧状態となった結果を反映しているとみられる。

### B) 西出丸石垣

熊本城内の北西に位置している石垣である。5m間隔で計17測線計測を行った。熊本地震の影響で、写真-3のように石垣の崩壊が生じた箇所が存在する。図-4の通り、石垣下部付近で孕み出しがみられるが、他の石垣にみられる変状と異なる傾向があるため、経年劣化や背面土の影響が高いと考えられる。

### C) 南大手門石垣

南大手門石垣は、背面が栗石の石垣で、地震の影響を受けたと推測される。この箇所は地震後の工事の影響で、これまで計測を行うことができなかった箇所である。南大手門石垣の全景を写真-4に示す。表面形状計測は左端の最下部を基準とし、右向き、



写真-2 茶櫓跡石垣西面

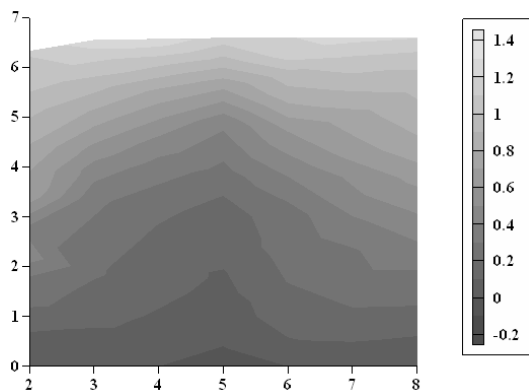


図-3 写真-2の表面形状分布図 (単位:m)



写真-3 西出丸石垣

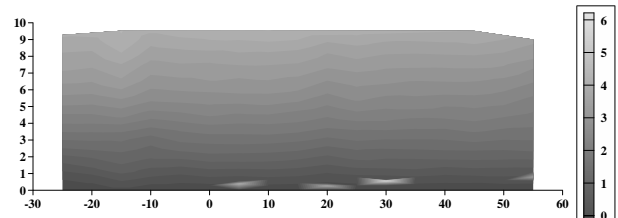


図-4 写真-3の表面形状分布図 (単位:m)



写真-4 南大手門石垣

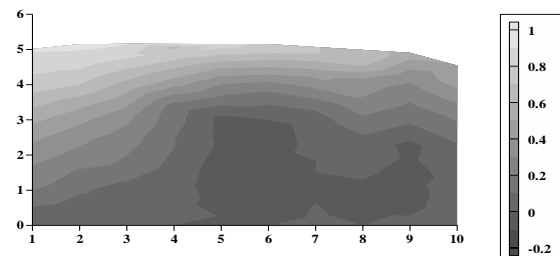


図-5 写真-4の表面形状分布図 (単位:m)

上向きを正とした。また、測線の間隔は1m間隔とし、計10測線計測を行った。図-5の通り、5m~9m付近の石垣中央部で孕み出しがみられた。この地点においても、A)の茶櫓跡と同様の変状傾向が確認された。

## 4. 石垣の種類について

熊本城の石垣は、石垣の内部構成によって大きく三種類に分けることができる。本研究では、三種類の形状は文献を参考に「石塁タイプ」、「半石塁タイプ」、「無石塁タイプ」と名称した。表-1に三種類の内部構成、形状の特徴、構成材料を示している。

石塁タイプは高さが低い石垣のため、門が造られた周辺に多く作られている。半石塁タイプは戌亥櫓

表-1 各石垣タイプの特徴

| 石垣タイプ | 石畳タイプ  | 半石畳タイプ        | 無石畳タイプ   |
|-------|--------|---------------|----------|
| 基本形状  |        |               |          |
| 実際の写真 |        |               |          |
| 構成材料  | 石垣石と栗石 | 石垣石, 栗石, 背面地盤 | 石垣石と背面地盤 |
| 高さ    | 低い     | やや高い          | 高い       |
| 勾配    | 急      | やや緩い          | やや緩い     |

や空堀周辺の石垣や本丸内に多く作られている。北西部は山沿いではないため、背面地盤と栗石による石垣が多く作られたのではないかと考える。無石畳タイプは熊本城の南から南東にかけて多く作られている。これは南東が茶臼山の山沿いの為、急勾配の斜面に石垣石を積んでいくことが可能だったためと考える。

## 5. 石垣の動的解析

3種類の石垣タイプのうち石畳タイプを個別要素法プログラム（解析コード：UDEEC）によってモデル化し、動的解析を行った。本研究では石垣石や栗石の個々の動きを再現するために、石垣や石橋などの不連続な構造物の解析を行う上で非常に適している個別要素法（解析コード：UDEEC）を使用している。石畳タイプは栗石と石垣石のみで構成されており、3つのタイプの中で最も被害が大きく全体の半分以上が崩壊している。2次元モデルであるので奥行は単位幅とする。

### (1) 解析モデルの概要

図-6に石垣勾配70°の石畳タイプの解析モデルを示す。石畳タイプは背面地盤がない場所に造られるため既往の文献と同様、左右に石垣石を積み上げ、内部を栗石ブロックで詰めた。そして石垣下部には弾塑性要素で表される砂質地盤を設置し、実際の石垣では、下部石垣は地盤内に埋められているので、下部三段を基礎部として固定した。

### (2) モデルの境界条件

本研究では、地下深部からの地震波の伝達を適切に再現するために図-6に示す境界条件を設定した。個別要素モデル下端の砂質地盤の境界面にダッシュポットを設け底面粘性境界とした。底面粘性境界はモデル底面より下方の半無限地盤を評価する境界条件であり、底面境界において逸散する波動エネルギーを吸収し、地震波の上昇波成分のみを入力することができる。これにより、地下深部からの地震波の

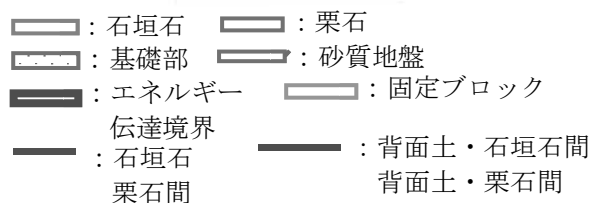
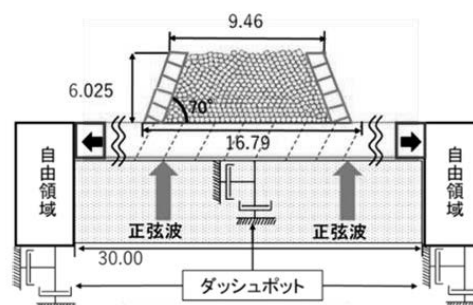


図-6 勾配70°の石畳タイプの解析モデル(m)

伝達特性を満足することができる。個別要素法モデル側方の両境界面では自由岩盤領域を設け、エネルギー伝達境界とした。エネルギー伝達境界によりモデル側方において逸散する波動エネルギーを伝達し、自由岩盤領域で吸収することができる。これにより、側方境界を半無限地盤領域として評価でき、実際の基礎岩盤領域を再現することができる。

### (3) モデルの物性値

モデルの石垣石、栗石の特性値は表-2に示し、各ブロックの表面の特性値は表-3に示し、各ジョイントの特性値を表-4に示す。本研究では、最も被害の大きかった石畳タイプに着目して解析を行った。既往の文献と比較するために、特性値の値は既往の研究と同じ値で解析を行った。

### (4) モデル作成方法

図-7に石垣勾配70°の石畳タイプの作成図を示す。左図は栗石をカットする前のモデルである。石垣内部に二つ、石垣上部に一つのブロックを作成し、ブロックを40cm四方にカットした。ブロックを一つ作って落とすよりも分けて落とした方が隙間がで

きにくいため分けてブロックを作成した。実際の構築手順に近づけるため、栗石を一定の高さで作成し、自由落下させて石垣内部に詰めた。既往の研究の反省点をふまえ、自由落下させるだけでは石垣内部の隅部に隙間が発生している為、石垣石および基盤を固定した状態でモデルに対し任意の方向に加速度を作用させた。これにより、右図で示すように、栗石は十分に詰まっていることを確認できる。

表-2 各ブロックの物性値

| 項目                             | 石垣石  | 栗石   |
|--------------------------------|------|------|
| 密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.5  | 2.2  |
| 弾性係数 E (kN/m <sup>2</sup> )    | 50   | 50   |
| ポアソン比 $\nu$                    | 0.25 | 0.25 |
| 粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )     | 70   | 70   |
| せん断抵抗角 $\phi$ (°)              | 45   | 45   |
| 引張強度 $\sigma$ (MPa)            | 3.5  | 3.5  |

表-3 各ブロックの表面の物性値

| 項目                                 | ケース 1 | ケース 2 |
|------------------------------------|-------|-------|
| 垂直剛性 (N/mm)                        | 3000  | 3000  |
| せん断剛性 (N/mm)                       | 3000  | 3000  |
| 粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )         | 0     | 0     |
| せん断抵抗角 $\phi$ (°)                  | 15°   | 30°   |
| 引張強度 $\sigma$ (MN/m <sup>2</sup> ) | 0     | 0     |

表-4 各ジョイントの物性値

| 項目                  | 石垣石・栗石間 | 石垣石・砂質地盤間 | 栗石・砂質地盤間 |
|---------------------|---------|-----------|----------|
| せん断抵抗角 $\phi$ (°)   | 15      | 15        | 15       |
| 引張強度 $\sigma$ (MPa) | 0       | 0         | 0        |

表-5 解析で用いた地震波形

| 波形  | 周期 (Hz) | 振幅 (m/sec) | 加振時間 (sec) |
|-----|---------|------------|------------|
| 正弦波 | 10      | 1.0        | 2.0        |

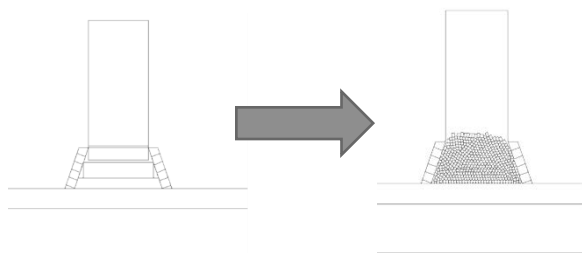


図-7 石罫タイプの作成図  
(左：栗石カット前 右：栗石カット後)

## (5) 個別要素モデルにおける地震動入力方法

個別要素モデルにおける地震動は、遠心载荷試験による模型実験と同等の地震波形を用いるために、遠心载荷機器で入力している正弦波を用いる。表-5に入力波形を示す。入力波形は周波数 10Hz、振幅 1m/sec、加振時間 2 秒間とし、その後、1 秒間の重力解析を実施する。入力地震動は個別要素モデル底面に与えることで模擬することができる。

## 6. 動的挙動解析の結果

### (1) 石垣高さによる比較

まずは、石垣高さによる比較をするため、各ブロックの物性値の条件は変えずに、高さのみを既往の研究の半分の値とした。既往の研究で用いた石垣の高さは12.05m、本研究で用いる石垣の高さは6.025mである。図-8に石垣勾配70°各ブロックの表面のせん断抵抗角15°の12.05mと6.025mの解析モデルを示す。

図-9に高さ12.05mのモデルと高さ6.025mのモデルの変形時の変位ベクトルを示している。石垣の高さが低くなることによって同じ条件でも崩れ方に違いが現れた。石垣の高さの違いにより、すべり面の傾きが異なる。これは、高さが12.05mの場合、石垣の高さが高い分、土被り圧が相対的に小さいことから地震動の慣性力によって作用する水平方向の力が土被り圧より大きくなるため、すべり面の傾きが急に

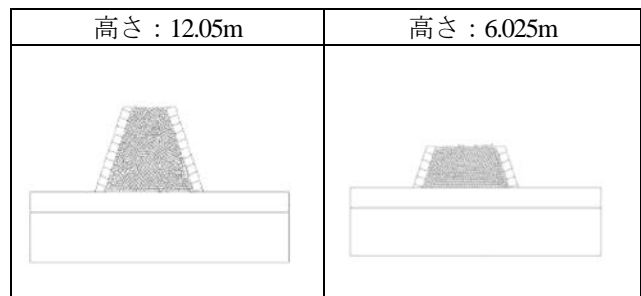


図-8 12.05mと6.025mの解析モデル

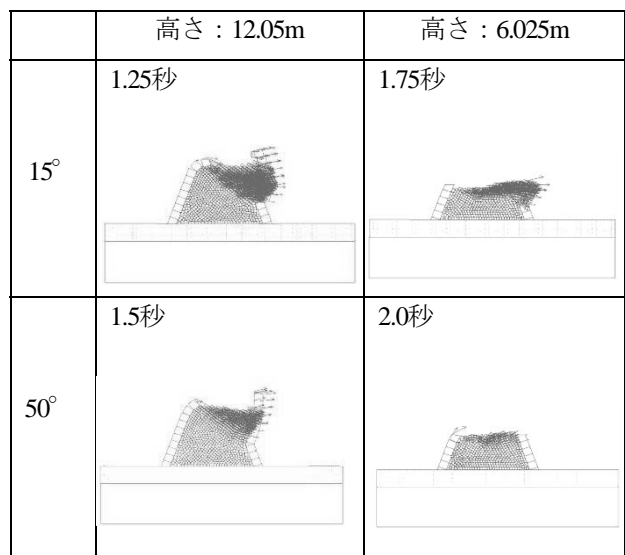


図-9 12.05mと6.025mの変形後の変位ベクトル

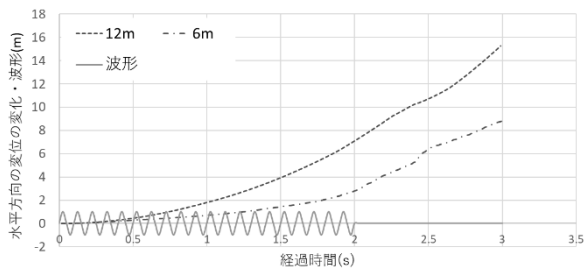


図-10 天端の水平方向の変位と高さの比較

なっていると考えられる。高さが6.025mの場合、石垣の高さが低い分、土被り圧の作用している力が場所によってあまり変わらず土被り圧より地震動によって作用する水平方向の力の方が大きくなるため、すべり面の傾きが緩やかになっていると考えられる。

図-10に地震動を加えた場合の天端の石垣石の水平方向の変位を、高さを基準に比較したものを示す。高さが12mの場合は高さが6mの場合に比べて水平方向の変位は大きく表れた。これはどちらも石垣は崩壊しているが、高さが高い分、石垣石の上段のほうが下段のほうに比べて不安定になっており栗石の影響を受けやすかったのではないかと考えられる。また、栗石の詰まり方によっても上段の動きに差が現れると考えられる。

## (2) せん断抵抗角の大きさによる比較

次に表-3より石垣勾配70°で高さ6.025m、各ブロックのせん断抵抗角の値がそれぞれ30°、15°のケース1、ケース2の変形図を図-11に示す。ケース1とケース2を比較すると高さが同じでもせん断抵抗角が異なることによってすべり面の傾きが異なることがわかった。せん断抵抗角が大きくなるほど、石垣が崩れにくくなることを個別要素法を用いて示すことができた。

図-12に地震動を加えた場合の天端の石垣石の水平

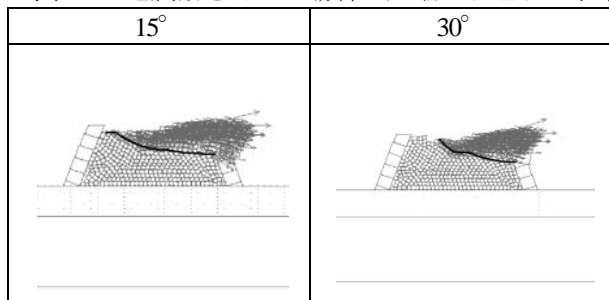


図-11 せん断抵抗角15°と30°の比較

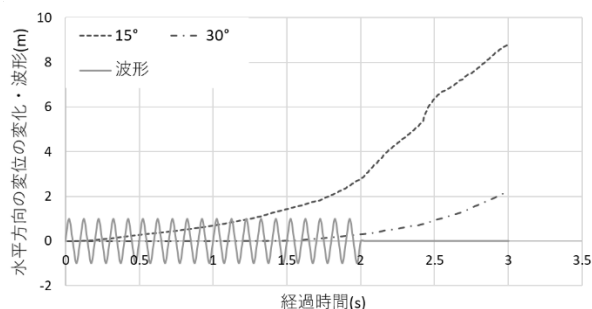


図-12 上段の水平方向の変位とせん断抵抗角の比較

方向の変位をせん断抵抗角の値を基準に比較したものを示す。せん断抵抗角が15°のときは振動開始0.25秒から上段の石垣石に変位が生じているのに対し、せん断抵抗角が30°のときは振動開始1.75秒から変化がみられる。これはせん断抵抗角が大きいほど地震動が加わった際に抵抗しようとする力が大きくなり上段の石垣まで力が伝わりにくくなったのではないかと考えられる。

## 7. まとめ

本研究では、簡易的な手法で石垣の変状を定量的に計測するとともに、遠隔モニタリング対象箇所を選定の根拠となるためのデータ収集と石垣タイプの石垣に焦点をあて、個別要素法（解析コード：UDEC）によって動的解析を実施し、石垣の崩壊挙動を再現した。以下に本研究で得られた結果および考察を述べる。

- 1) 可搬型レーザー距離計を用いて、熊本城内各所の石垣表面形状の計測を簡易的に行った。高さが5m程度の石垣において、背面の栗石が石垣石を押し出したとみられる変状が多く確認された。地震動による一時的な主働土圧状態が生じたと推定される。3D計測の結果との整合性を検証する必要があるものの、簡易な計測手法であるものの、表面形状の特徴を定量的に把握することが可能と言える。
- 2) 石垣の高さごとの被害状況は、高さ12mの場合が全ケースで崩壊した。一方で高さを半分の6mにした場合では、石垣石・栗石のせん断抵抗角15°の場合では崩壊がみられなかった。このことから、石垣の勾配だけでなく、石垣石の高さも崩壊の原因に寄与していることが確認できる。
- 3) 石垣石の高さが高ければ高いほど孕みが大きく、高さが低くなるとすべり面の傾きが緩やかになることがわかった。
- 4) 栗石が構成されている石垣タイプの崩壊要因は、地震によって栗石が崩れることで発生する主働土圧であることが分かった。しかし、栗石のせん断抵抗角がある一定以上の値であると石垣を崩壊させるほどの主働土圧が発生しないことが確認された。
- 5) 同じ高さのモデルでも、せん断抵抗角の値が違えば、振動を加えた場合の上段での石垣石の変位は異なっている。これはせん断抵抗角が大きいほど地震動が加わった際に抵抗しようとする力が大きくなり上段の石垣まで力が伝わりにくくなったのではないかと考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 勝田侑弥：平成 28 年度熊本地震における熊本城の被災築石構造物に関する研究，長崎大学工学部卒業論文，2017
- 2) 山本浩之ら：城郭石垣における石材の摩擦特性と間詰め効果に関する一考察，第 8 回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 127-132, 2008
- 3) 西村毅ら：個別要素法を用いた城郭石垣の安定性解析による振動台実験の変形挙動の検討，土木学会第

- 66 回年次学術講演会, pp. 325-326, 2011
- 4) 笠博義ら：城郭石垣における間詰石の安定性向上効果についての実験的検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, pp. 467-468, 2007
  - 5) 山本浩之ら：城郭石垣における石材の内部摩擦角推定法の一提案, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, pp. 465-466, 2007
  - 6) 勝田侑弥：城郭石垣の動的挙動の数値解析によるモデル化と定量的評価, 長崎大学工学部修士論文, 2019
  - 7) ITASCA : UDEC4.0 user's guide
  - 8) 土木学会：土木学会論文集和文原稿作成例, 土木学会誌, Vol.81-1, pp.90-92, 1996.
  - 9) 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.
  - 10) 桑原文夫：日本工業大学研究報告第 14 巻第 2 号熊本城の石垣勾配, 1984
  - 11) 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.
- 謝辞：長崎大学技術職員の岩崎昌平様、本年 3 月に長崎大学を卒業した秦翔真君対し、研究活動に尽くしていただいたこと、また、熊本城調査研究センターの関係者の方々のご協力にそれぞれ謝意を申し上げます

(2020. 4. 20 受付)

## DEFORMATION MEASUREMENT AND MECHANICAL STABILITY EVALUATION OF DAMAGED STONE WALL IN KUMAMOTO CASTLE

Maho YAMAGUCHI, Satoshi SUGIMOTO, Yujing JIANG and Kiyoshi OMINE

The Kumamoto earthquake, Kumamoto Castle damaged all 13 important cultural property buildings. The most damaged of these was Ishigaki. It is very difficult to determine if the deformed stone wall is a stone wall that originally had a deformation or if the deformation occurred due to the earthquake, although restoration work and appropriate management will be considered in the future. It is necessary to consider the priority of restoration based on the degree of middle and deformation. In this study, the deformation of the stone wall was quantitatively measured by a simple method and the location of the deformation was easily extracted by using the surface shape distribution map. It is considered to be effective to use the surface shape distribution map created by the same method including other stone walls as a material for selecting the target site for remote monitoring. Moreover, the Ishigaki model is constructed based on the past research using the distinct element method (analysis code: UDEC). Then, numerical analysis of dynamic behavior was carried out, and factors affecting the stone wall were examined by comparing collapse patterns under various conditions.