

### 平成 28 年熊本地震における熊本城石垣の変状調査に関する研究

長崎大学大学院 学生会員 ○勝田 侑弥  
 長崎大学大学院 正会員 杉本 知史  
 香川大学工学部 正会員 山中 稔

#### 1. はじめに

平成 28 年(2016 年)熊本地震により、熊本城は建造物や石垣などの地盤構造物に甚大な被害が生じた。建造物では、国指定重要文化財の東十八間櫓、北十八間櫓や五間櫓などが崩壊した。また、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などが発生した。熊本城は建立後に何度も地震被害を受けているが、1889 年(明治 22 年)の金峰山地震(M6.3)では、飯田丸五階櫓台や頬当門正面の石垣等が崩壊している<sup>1)</sup>。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 2 回の強震を受けたことにある。熊本城石垣は、前震では変形を免れたものの、本震により大変形や崩壊に至ったケースが多く見られる(写真-1, 2 参照)。今後大規模地震が予測されている中、歴史的遺産である城郭石垣の崩壊メカニズムの解明は急務である。そこで本研究では栗石の有無と栗石同士の噛み合わせが石垣に影響するか検討するために、個別要素法による解析をするとともに、遠心載荷試験による模型実験での再現を目的とする。



写真-1 石垣の孕み出し



写真-2 石垣の崩壊



図-1 モデルの対象箇所

#### 2. 個別要素法 (DEM) による動的数値シミュレーション

##### 2.1 モデルの選定と概要

本解析で用いるモデルは、被災状況調査で対象となった石垣 60 箇所から、以下の三つの条件に適している箇所を石垣モデルの対象として選定した。一つ目は、石垣高さが十数メートルと比較的高い石垣、二つ目は、石垣の中央部で崩壊が起きていること、三つ目は、過去の文献に石垣の形状が詳細に残っていること、以上より、箇所番号 H323(図-1)の対象とした。

図-2 に個別要素法における各部分の設定要素条件を示している。この設定は、背面土領域、石垣石領域、栗石領域を平面歪要素、石垣間接触面、石垣・背面土間をジョイント要素として各要素条件を設定した。ブロック要素とジョイント要素の物性値については表-1、表-2 に示す。そして、表-3 に石垣裏栗石間の粘着力の条件を示す。本研究では、石垣の有無を比較するために case3 では栗石無しとし、case1, 2 では栗石の噛み合わせを表現するために栗石間を粘着力で表す。噛み合わせが悪いケースを case1 の粘着力 0kPa、噛み合わせが良好のケースを過去の実績に基づき case2 の粘着力 15kPa とした。

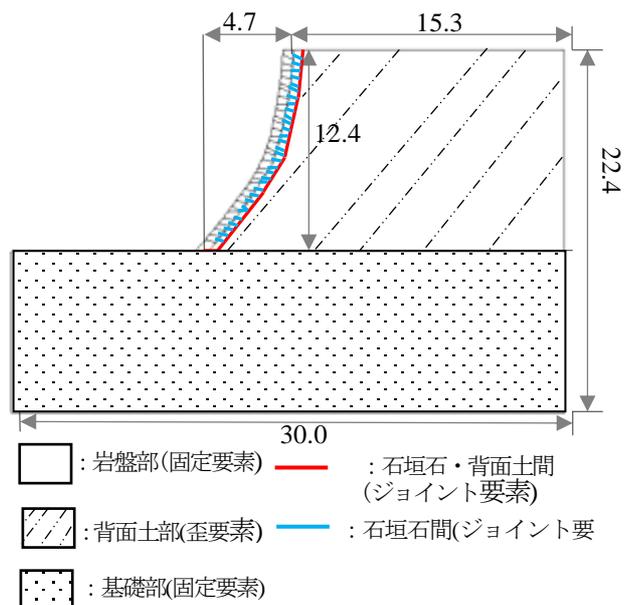


図-2 モデル要素設定 (単位: m)

キーワード: 地震, 城郭石垣, 個別要素法 遠心載荷試験

連絡先: 〒852-8131 長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学工学部社会環境デザイン工学コース TEL095-819-2626

2.2 モデルに適用する地震速度波形

本研究で用いる地震速度波形は、地震防災研究所の強震ネットワーク(K-NET)から入手した熊本地震の6月16日の本震の地震波特性を用い、観測地点として熊本城に最も近いKMM006熊本を選定した。本解析で用いたモデルの石垣の向きが南向きよりせん断方向の速度成分をNS成分、垂直方向の速度成分はUD成分を用いることとした。最大波形が観測される0.0~15.0sの15秒間を入力波形として用いた。

2.3 結果と考察

本解析結果を図-3に示す。栗石が噛み合わせ良好としているcase2は15秒間の動的解析では崩壊しなかった。一方で、噛み合わせが悪いcase1は解析開始から3.0秒で崩壊し、栗石無のcase3は2.75秒で崩壊した。この結果から栗石の噛み合わせは崩壊に寄与していると考えられる。また、case1とcase3を比較すると、栗石有のcase1が崩壊に時間を要したので、栗石の存在が石垣石に対する揺れの伝搬に対して影響があると考えられる。今後は噛み合わせが良好な栗石中に悪い箇所を部分的に設定することで変状の傾向の特徴を検討する予定である。

3. 石垣模型の遠心载荷模型実験の試み

遠心载荷模型実験は実物の1/nの模型を重力加速度のn倍の遠心加速度場において、実物と同様の破壊挙動を再現できることが期待される。本実験では石垣高さ10m相当の遠心力を载荷することで、石垣の変状を再現することを目指している。栗石はふるい分け試験で9mm以上の粒度の砂利を用い、石垣石は岩石と同程度の密度であるアルミ板材を加工したものを用いた。また、今回は試験的な意味で行うため簡易的に背面土にパテを用いた。

写真-3は50Gの遠心力载荷後の模型を示す。今回は、試みとして作成模型の遠心力場での安定性を確認したところ、静的環境下では特異な変状は見られなかったことから、今後は動的環境下で石垣模型の回転や栗石周辺の土圧の計測、地震動による変状分析を行う予定である。

4. まとめ

石垣崩壊の再現解析を行った結果、栗石の存在が石垣石の揺れの伝搬に影響があると考えられ、栗石の噛み合わせは崩壊に寄与していると考えられる。一方で石垣模型の遠心载荷模型実験の試みについては、遠心場での静的環境下では問題ないことを確認した。

参考文献

- 1) 木下泰葉：熊本城修復史，熊本城調査研究センター定期講座第15回熊本城学，講演資料，2018.1
- 2) 熊本城調査研究センター：熊本城崩壊・修復箇所資料(カルテ)，2016

表-1 ブロック要素の物性値

項目	背面土	石垣石	栗石
密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.5	2.75	2.75
弾性係数 E (kPa)	55	$5.5 \times 10^4$	$5.5 \times 10^4$
ポアソン比 $\nu$	0.1	0.2	0.2
粘着力 c (kPa)	0	70	表-3 参照
せん断抵抗角 $\phi$ (deg)	40	45	45
引張強度 $\sigma$ (MPa)	350	$7.0 \times 10^6$	$7.0 \times 10^6$

表-2 ジョイント要素の物性値

項目	石垣石・背面土間	石垣石間
粘着力 c (kPa)	35	350
内部摩擦角 $\phi$ (deg)	35	40
引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	350	35

表-3 栗石間の粘着力

粘着力 (KPa)	case1	case2	case3
	0.0	15.0	栗石無

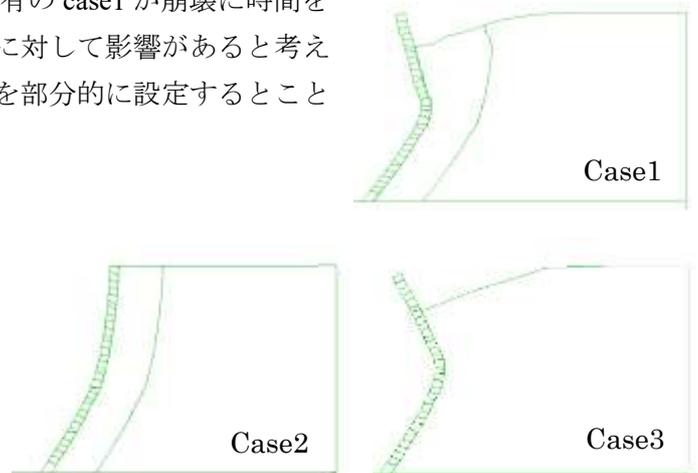


図-3 解析結果

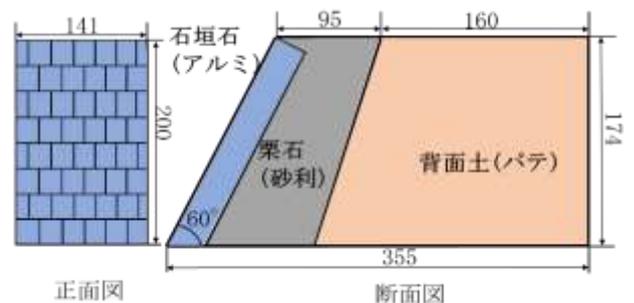


図-4 石垣模型 (単位: mm)



写真-3 実験後の模型断面の様子