

## 不連続変形法を用いた石垣の崩壊挙動解析

(株) オリエンタルコンサルタンツ ○中西 一仁  
金沢大学 理工研究域 池本 敏和  
金沢大学 理工研究域 宮島 昌克

### 1. はじめに

2016年熊本地震では、前震と本震の2度にわたり、震度7の地震が活動した。このような過去に例を見ない現象により、熊本城内における石垣は甚大な被害を受けた。石垣がどのように崩壊したのかを解明することにより、石垣修復の際、効果的な地震対策を施すことができると考える。そのため本研究では、熊本城にみられる武者返しの石垣について、2次元不連続変形法(DDA)を用いた石垣の崩壊挙動の解明を行った。

### 2. 不連続変形法(DDA)の概要<sup>1)</sup>

不連続変形法(DDA: Discontinuous Deformation Analysis)は、解析対象を要素ブロックの集合体として表し、ブロック内部の弾性変形とブロック間の接触、衝突等の大変形を表現できる手法である。以下にDDAの特徴を述べる。

- 有限要素法(FEM: Finite Element Method)<sup>2)</sup>と同じく、ポテンシャルエネルギーの最小化原理を利用する手法であり、解の唯一性が保証されている。
- 任意形状の個々の要素ブロックにおける重心点で定義する、ひずみ、剛体変位、剛体回転を未知数としており、要素内ではひずみ一定(線形要素の場合)としてFEMと同様に連立1次方程式を解く。
- 個々の要素ブロックの幾何形状、荷重条件、材料定数とブロック接触部での合成や強度定数及び接触時の反発係数を与える。ブロックの接触点では、ペナルティ法による貫入量制御を行うことにより、ブロックの応力、ひずみ、運動、ブロック間のすべりと接触力を計算する。

以上の手順を、時間ステップを追って解析を進めるため、ブロックに非線形構成則を導入することが容易である。

### 3. 武者返しの石垣の解析モデル

熊本城内の現地調査や被害を受ける前の石垣の写真等を参考に、武者返しの石垣のモデルを作成した。ここで、DDAによる解析では要素数が増えるほど解析結果が不安定になるため、要素数が必要最小限になるよう留意した。解析モデルを図1に、モデルの各物性値を表1に示す。また、モデルの詳細を以下に示す。

- 築石は高さ750mm、奥行1000mmとした。
- 裏込め石は石垣に接触する重要な要素であるため、要素をできるだけ細かく設定した。裏込め石の要素は1辺が300mmの正方形とし、滑りを表現するために45°回転させて配置した。
- 盛土は実際には裏込め石より細かいが、盛土の範囲が広いので要素を大きくした。盛土の要素は1辺が1000mmの正方形とし、裏込め石と同様に滑りを表現するために45°鉛直方向に回転させて配置した。
- 石垣上部の櫓は等分布荷重を与えるブロックとして表現した。高さ方向2000mm、奥行方向6000mmとした。

また、入力地震動として、秦ら<sup>3)</sup>による常時微動観測点から推定された、2016年4月16日の熊本地震本震における熊本城内の推定地震動のE-W方向の地震波を入力する。入力地震波を図2に示す。

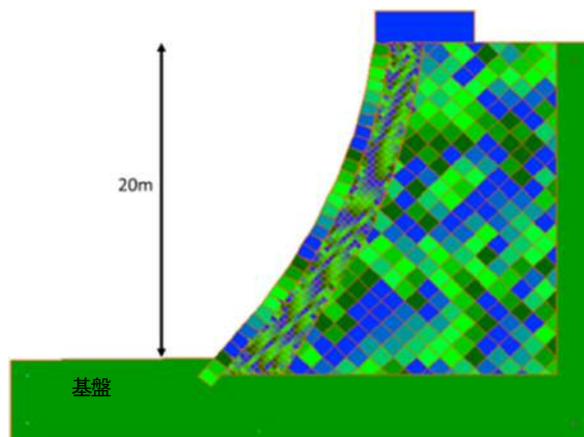


図1 解析モデル

表1 解析モデルの各物性値

	石垣	裏込め石	盛土	基盤	載荷物
粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	5	5	100	5	5
内部摩擦角 (deg.)	45	45	33	33	33
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	2.6	2.6	1.9	1.9	1
ヤング率 (kN/m <sup>2</sup> )	1.0×10 <sup>7</sup>	1.0×10 <sup>7</sup>	3.0×10 <sup>4</sup>	8.0×10 <sup>4</sup>	8.0×10 <sup>4</sup>
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

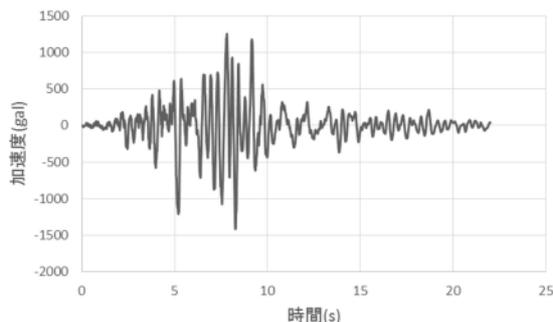


図2 入力地震動

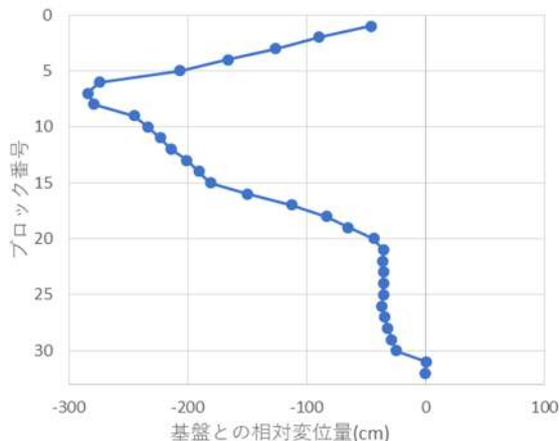


図4 築石と基盤との相対変位量

#### 4. 武者返しの石垣の崩壊挙動解析及び考察

築石を石垣上部から順に1~32とする。解析結果を図3に、築石と基盤(図1参照)との相対変位量を図4に示す。

解析結果より、次のような崩壊挙動が考えられる。

- 作用する加速度が小さい場合には、築石の変形量は小さく、また背面の裏込め石及び盛土と一体となった連続体として挙動するため、築石は直線状に変形する。
- 築石に作用する加速度が増加すると築石と裏込め石は不連続体としての挙動を示し、築石が前方に変形したときに築石と裏込め石の間に隙間が生じる。
- 築石が前方に変形したことのできた隙間を埋めるように裏込め石が下方に移動するため、裏込め石の上面は沈下する。
- 一度前方へ移動した築石は背面に移動した裏込め石の影響により、もとの位置には移動できないため、築石の中央部付近において築石が前面にはらみだす現象が生じる。

一方、石垣下部の築石は石垣上部の築石と同様に前方へ変位することが明らかとなった。これは今回の解析モデルは20mの高石垣であることから、石垣下部にかかる築石や裏込め石、盛土の応力が大きく増大したためだと考えられる。

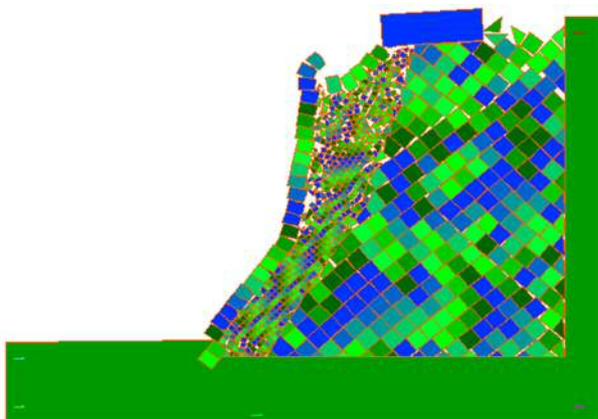


図3 解析結果

#### 5. おわりに

本研究では、熊本城にみられる武者返しの石垣について、2次元不連続変形法(DDA)を用いた石垣の崩壊挙動の解明を行った。その結果、熊本地震の本震を入力とした石垣の崩壊挙動が明らかとなった。今後は具体的な地震対策案の検討を行っていく。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、熊本城調査研究センターの関係者には多大な協力を得た。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi: 計算力学レクチャーシリーズ⑥不連続変形法(DDA), 丸善, pp. 9-57, 2005.
- 2) 鶴飼恵三, 井田寿朗, 若井明彦: 動的弾塑性FEM解析による地震時斜面のすべり解析, 日本地すべり学会誌, Vol.32, No.1, pp.8-11, 1995.
- 3) 秦 吉弥, 村田 晶, 池本敏和, 橋本隆雄, 宮島昌克: サイト増幅特性置換手法に基づく2016年熊本地震における熊本城の強震動の評価, 土木学会論文集A1, Vol.73, No.4, 2017.3.