

数値解析による築石構造物の背面土に着目した力学的安定性評価

長崎大学大学院 ○学生会員 山口晃佑 長崎大学大学院 正会員 杉本知史  
 長崎大学大学院 正会員 大嶺聖 長崎大学大学院 フェロー会員 蔣宇静

1. はじめに

2016 年熊本地震によって熊本城石垣が被害を受けたことを契機に、城郭石垣の安定性に関する議論が加速している。我が国の城郭石垣は石垣石、栗石層、背面土から成る築石構造物であり、熊本地震では背面土から崩壊するケースが多数確認された(写真-1)。しかし、これまで栗石層に着目した安定性評価が中心に行われており、背面土による石垣の安定性への影響については明らかになっていない。本研究では、数値解析を用いて城郭石垣の動的挙動の再現を行い、背面土に着目した安定性評価を行う。また、背面土補強の有効性について検討する。



写真-1 背面土崩壊石垣の様子

2. 解析モデル

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、不連続構造物における局所的な変形が再現可能な個別要素法 (DEM: 解析コード UDEC) を用いて数値解析を実施した。UDEC は要素を剛体としてだけでなく変形体としても取り扱いができ、変形体については弾塑性体などの非線形材料モデルも選択できる。

図-1 に解析モデルの断面図を示す。石垣石、栗石層の控え長をそれぞれ 1.5m, 3m とした。栗石層は 0.4m 四方の要素に 0.12m の丸め長さを付与した剛体要素を敷き詰めたものである。モデル側面に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面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、側面境界を半無限地盤領域として評価でき、実際の基礎地盤領域を再現できる。

モデルに用いた各要素の入力物性値を表-1 に示す。動的解析を行うにあたり、実施前にモデルを平衡状態にする必要があるため、最初に鉛直下方に重力加速度を作用させた静的解析を行い、安定した初期状態を再現した。その後、モデル底面に周波数 2Hz、最大加速度約 200gal (震度 5~6 相当) の正弦波を 10 秒間作用させた。本研究では背面土が石垣の安定性に及ぼす影響について評価を行うため、無補強モデルと背面土補強モデルとの比較を行った。

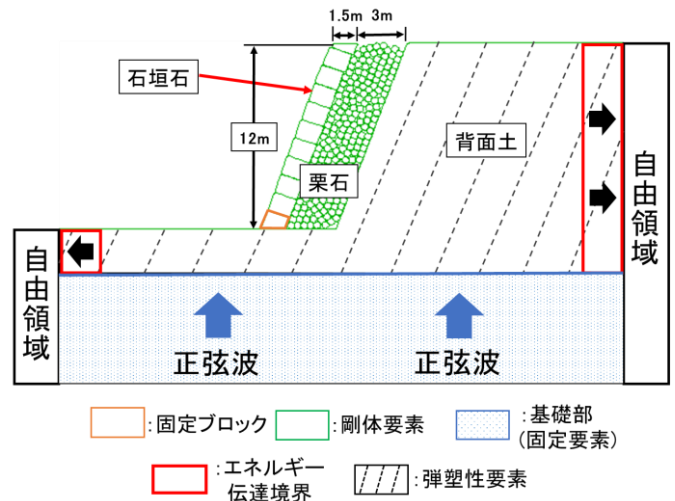


図-1 解析モデルの断面図

表-1 各要素の入力物性値

|                                | 石垣石               | 栗石                | 背面土                  |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| 密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.50              | 2.20              | 2.20                 |
| 弾性係数 E (MPa)                   | $50 \times 10^3$  | $50 \times 10^3$  | 50                   |
| ポアソン比 $\nu$                    | 0.25              | 0.25              | 0.3                  |
| 要素粘着力 c (kPa)                  | $7.0 \times 10^4$ | $7.0 \times 10^4$ | 5.0                  |
| 要素せん断抵抗角 $\phi$ (°)            | 45                | 45                | 30                   |
| 引張強度 $\sigma$ (MPa)            | 3.5               | 3.5               | $3.5 \times 10^{-3}$ |
| ジョイント粘着力 c (kPa)               | 0                 | 0                 | 0                    |
| ジョイントせん断抵抗角 $\phi$ (°)         | 15                | 15                | 15                   |

### 3. 解析結果

図-2 に無補強モデルの解析後のモデル断面図を示す。※は塑性破壊，○は引張破壊を表す。図より，背面土天端部の沈下，石垣石，栗石層の崩壊が確認できる。背面土にすべり破壊が見られることより，石垣石，栗石層の崩壊は背面土の主働土圧による影響が一つの要因であると考えられる。

この結果を踏まえ，すべり破壊が生じた箇所に図-3 に示すような補強要素を敷設し，解析を実施した。用いた補強要素はケーブル要素と定着材で構成され，ケーブル要素の軸剛性を節点間のバネで再現するほか，定着材と背面土界面のせん断剛性と付着強度をそれぞれバネとスライダで再現したものである。本研究ではジオグリッド引抜き試験結果<sup>2)</sup>からこれらのパラメーターを設定した(表-2)。

図-4 に補強モデルの解析後のモデル断面図を示す。図より，背面土に数か所の破壊が見られるがすべり破壊までには至らなかった。また，栗石層が石垣石中部・下部を押し出す形で石垣石，栗石層の崩壊が起きた。無補強モデルに比べ崩壊の程度は小さいが，背面土の変形によらず栗石層・石垣石の崩壊が起こることを確認した。この結果より，石垣の安定性は栗石層に依存していると考え，栗石層の表面せん断抵抗角を 20°に変更し，再度解析を実施した。図-5 に解析後のモデル断面図を示す。図より，石垣石，栗石層の崩壊は起こらなかった。また，背面土の破壊箇所が見られなかったことから，石垣石，栗石層が背面土に寄りかかることで背面土の変形が抑制されていると考えられる。このことから，栗石層の安定が石垣の安定性に大きく寄与することが期待できる。

### 4. まとめ

本研究では，数値解析を用いて城郭石垣における背面土に着目した力学的安定性評価を行った。背面土の変形は石垣の安定性に影響を及ぼすことを確認した。また，背面土補強モデル(背面土変形無し)で石垣石，栗石層の崩壊が生じたこと，栗石層のせん断抵抗力を上げたモデルで崩壊が確認されなかったことを踏まえると，石垣の安定性向上には栗石層の補強が望ましいことが分かった。

#### 参考文献

- 1) 勝田侑弥ら：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，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，III-015，pp.308-309，2019
- 2) 坂井晃ら：ジオグリッドを用いた補強土の変形解析法，土木学会論文報告集，vol.27，pp.147-155，1987

※：塑性破壊 ○：引張破壊

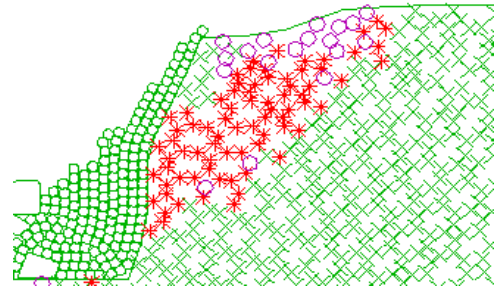


図-2 無補強モデルの変形の様子

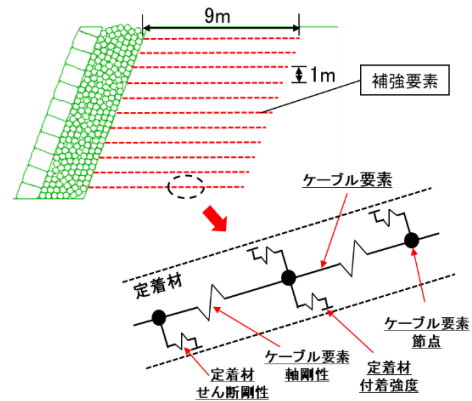


図-3 補強要素敷設イメージ図

表-2 補強要素の入力物性値

|        |                                |                      |
|--------|--------------------------------|----------------------|
| ケーブル要素 | 密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.45                 |
|        | 引張強度 $\sigma$ (MPa)            | $5.5 \times 10^{-2}$ |
|        | 弾性係数 E (MPa)                   | $3.75 \times 10^3$   |
| 定着材    | せん断剛性 (N/m/m)                  | $2.59 \times 10^7$   |
|        | 付着強度 (N/m)                     | $1.04 \times 10^5$   |

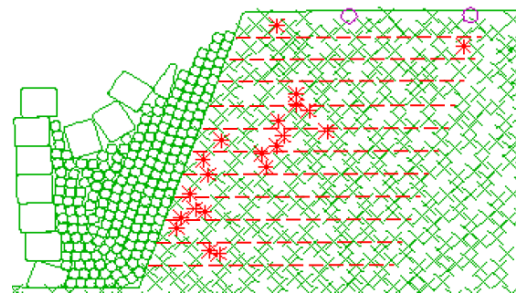


図-4 補強モデルの変形の様子

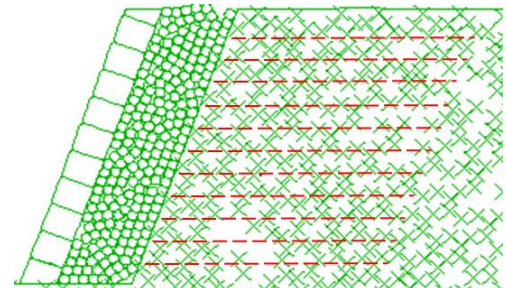


図-5 補強モデルの変形の様子

(栗石層表面せん断抵抗角 20°)