

数値解析による築石構造物のモデル化と力学的安定性評価

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

1. はじめに

平成 28 年の熊本地震によって熊本城の石垣は大きな被害を受けた．将来的に再度，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，個別要素法による既往の研究を元に¹⁾石垣モデルの構築や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，石垣石の安定性に影響を与える要因を検討することを目的とする．

2. 解析モデル

2. 1 解析モデルの作成

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体モデルに基づく解析手法である個別要素法(解析コード：UDEC)によるモデル化を行った．熊本城は大きく分けて三つの石垣のタイプに分かれており，石塁タイプ，半石塁タイプ，非石塁タイプと本研究では呼んでいる．石垣石，栗石，背面地盤で構成されており，高さが高く勾配がやや緩い半石塁タイプに着目した．

モデル作成は，安定するまで加振はせず，左右，鉛直下方に重力のみを作用させた静的解析を行い，安定した初期状態を作り出した．また，最下段は地中に埋まっていると仮定し固定ブロックとして設定する．

2. 2 解析モデルのモデル条件

図 1 にモデル概要，表 1 にモデル条件を示す．高さは一定の 12m に設定した．入力加速度を表 2 に示す．各ブロックの物性値の条件は変えずに勾配のみを 60°と 80° に変更したものを比較した．次に栗石部分の厚さによる比較をするため，各ブロックの物性値の条件，石垣勾配は変えずに，栗石部分の奥行方向の厚さのみを 3m と 7m のものを比較した．最後に石垣石と栗石の表面の物性値が主動土圧の発生に大きく寄与していると考え，石垣石と栗石の表面のせん断抵抗角の値を表 3 に示すケースで実施した．

3. 解析結果

図 2 に栗石表面ならびに石垣石表面のせん断抵抗角 30°の場合の石垣勾配 60°，80°の 2 ケースの変形図を示す．既往の研究や実際の被害状況から石垣勾配が大きいほど崩れやすいていたが，今回の結果ではどちらも崩壊が見られなかった．この結果から石垣勾配だけでなくほかの要因も崩壊に影響を与えていることがわかる．図 3 に石垣勾配 80°，栗石の部分の厚さが 3m と 7m の 2 ケースの変形図を示す．用いた栗石表面のせん断抵抗角は石垣石・栗石ともに 15°である．右図から，栗石の厚さが 3m

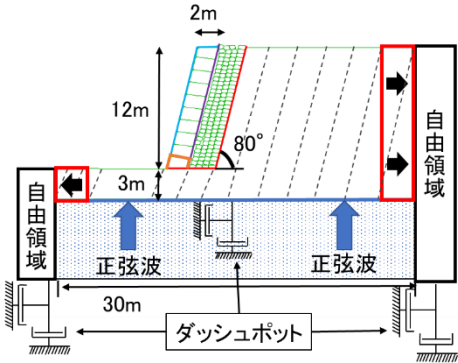


図 1 モデルの概要

表 1 各ブロックの物性値

垂直剛性(N/mm)	3000
せん断剛性(N/mm)	3000
粘着力 c(kN/m ²)	0
せん断抵抗角 φ(°)	15°
引張強度 σ(MN/m ²)	0

表 2 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

表 3 石垣石，栗石表面のせん断抵抗角の条件

石垣石 (°)	5	15	30	45
栗石 (°)	5	15	30	45

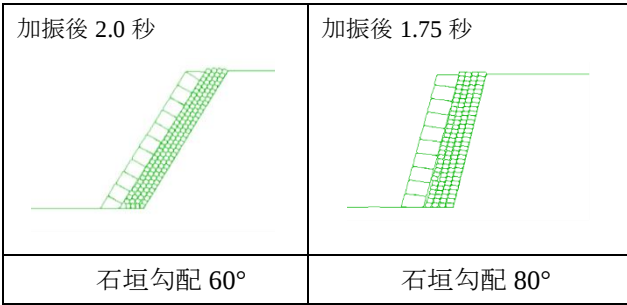


図 2 異なる勾配での加振後の石垣形状の比較

の場合は、振動を与えても崩壊が見られなかった。一方、栗石の厚さが 7m の場合は、振動開始 1.5 秒の時点から崩壊が見られた。各モデルの丸印で表している箇所の垂直応力の値の変化を見ると図 4 のように変化している。このグラフから、1.5 秒までは厚さが 3m の場合も 7m の場合もほとんど変わらない値になっているが、1.5 秒以降は石垣厚さ 7m の場合がより大きな力を受けていることがわかる。これは、栗石の厚さが厚い分、栗石が石垣石を押し出す力が強くなっているのではないかと考えられる。また、栗石厚さ 3m の場合、ほとんど動いていないように見えるが実際に垂直応力の値を調べると大きな力が働いていることがわかった。

図 5 に栗石の厚さ 7m、石垣石・栗石の表面のせん断抵抗角の値が 30°、45°の時のケースを示す。どちらのケースの場合も崩壊が見られたが、せん断抵抗角の値が大きくなるほど崩壊しにくいという結果が得られた。

図 6 に栗石の厚さ 3m、石垣石・栗石の表面のせん断抵抗角の値が 5°、15°の時のケースを示す。厚さが 3m の場合は表面のせん断抵抗角が 5°の時は崩壊がみられたが、15°以上の時は崩壊がみられなかった。せん断抵抗角の値が 5°の場合は栗石が滑り落ちるような変形がみられた。

4. まとめ

本研究では、半石畳タイプの石垣に焦点を当て崩壊をモデル化し、各種条件の比較を実施した。既往の研究では石垣石の勾配も崩壊の要因と考えられていたが、栗石の厚さ次第では勾配が急になっても崩壊が見られなかった。栗石の層が厚くなればなるほど崩壊しやすいことがわかった。また、せん断抵抗角の大きさを変えることによって同じモデルでも崩れ方に变化がみられた。今後、研究を進めていくうえで実際の石垣に近い栗石の厚さを想定し、モデル化を行い、どのような変化が現れるのかを検討していきたい。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費基盤研究所(C)20K05030 の助成を受けて実施しています。

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) 熊本地震災害記録誌～創造的復興に向けて～，2019.3.31

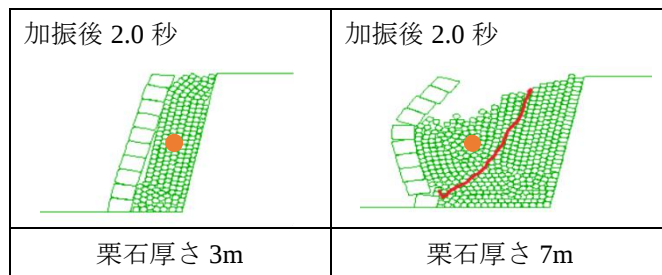


図 3 異なる栗石厚さでの形状の比較

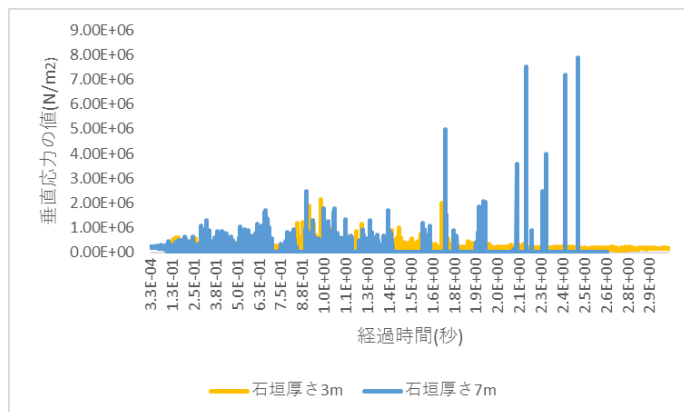


図 4 垂直応力の値の変化の比較

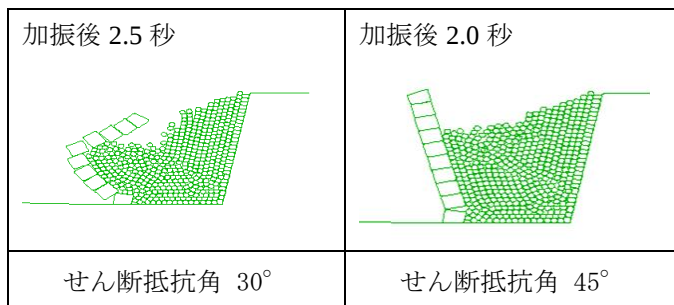


図 5 ブロック表面のせん断抵抗角の値による比較①

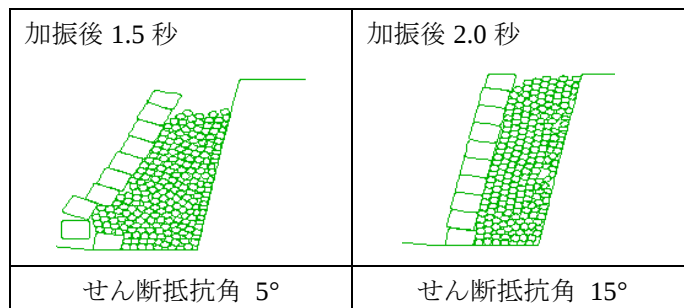


図 6 ブロック表面のせん断抵抗角の値による比較②