

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に関する研究

長崎大学大学院 工学研究科 社会環境デザイン工学コース 学生会員 山口真歩

1. 研究背景と目的

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．中でも最も被害を受けたのが石垣である．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，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い数値解析を実施した．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．石塁タイプは栗石と石垣石のみで構成されており，三つのタイプの中で一番被害が大きく全体の半分以上が崩壊している．そこで本研究では石塁タイプに焦点を当てた．

図 1 に石垣勾配 70°の石塁タイプのモデルを示す．左図は栗石をカットする前のモデルである．モデル作成は，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．また，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左右，鉛直下方に重力を作用させた．これにより，図 1 で示すように，隅部への栗石の充填が確認できた．

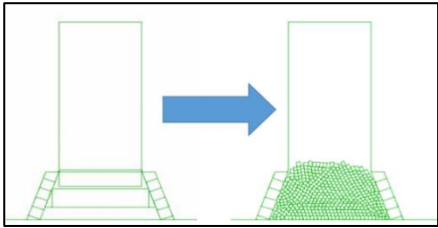


図 1 石塁タイプの作成図

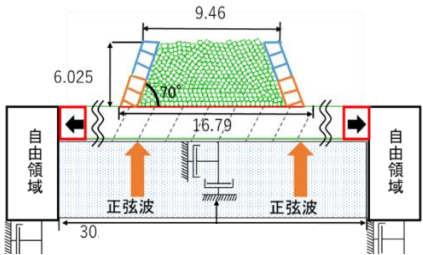


図 2 モデルの概要(単位：m)

2. 2 解析モデルのモデル条件

図 2，表 1 にモデル条件を示す．解析では，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．その後の入力加速度を，表 2 に示す．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．次に石垣石と栗石の表面の物性値が受動土圧の発生に大きく寄与していると考え，モデルの高さを 6.025m の場合の石垣石と栗石のせん断抵抗角の値を表 1 に示すケースで実施した．

表 1 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 ²)	0	0
せん断抵抗角 ϕ (°)	15°	30°
引張強度 σ (MN/m ²)	0	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

3. 解析結果

図 3 に石垣勾配 70°，各ブロックの表面のせん断抵抗 15°で高さの異なる 2 ケースの変形図を示す．右図から，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，(i)の条件では，石垣の高さが高い分，土被り圧が相対的に大きいことか

キーワード：築石構造物，地震，個別要素法

連絡先（〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14 E-mail:

@nagasaki-u.ac.jp)

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な
 っていると考えられる。(ii)の条件では、石垣の高さ
 が低い分、栗石が水平方向に横滑りをする形で崩壊
 し、すべり面の傾きが緩やかになっている。

図4に石垣勾配70°で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
 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5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。

図6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。

4. 結論

本研究では、石塁タイプの石垣に焦点を当て崩壊をモデル化し既往の研究との比較を実施した。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。
 また、高さだけでなく、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変化がみられ
 た。今後、研究を進めていくうえで実際の石垣に近い物性値でモデル化を行い、解析で用いた地震波形の値
 を変えてどのような変化が現れるのかを検討していきたい。

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

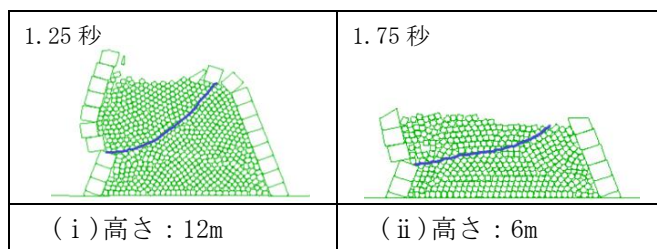


図3 解析モデル 高さの比較

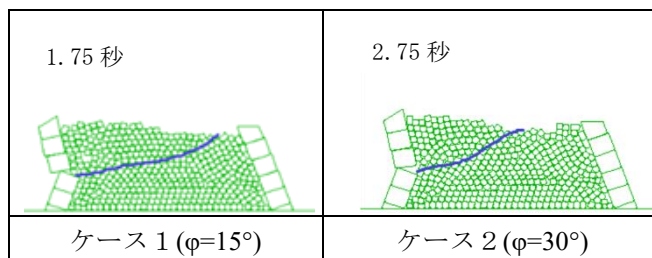


図4 解析モデル せん断抵抗角の比較

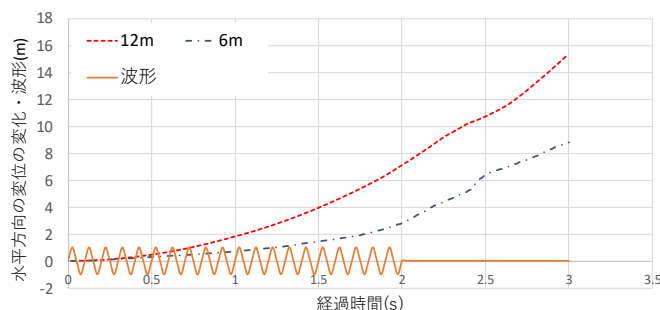


図5 上段の水平方向の変位 高さの比較

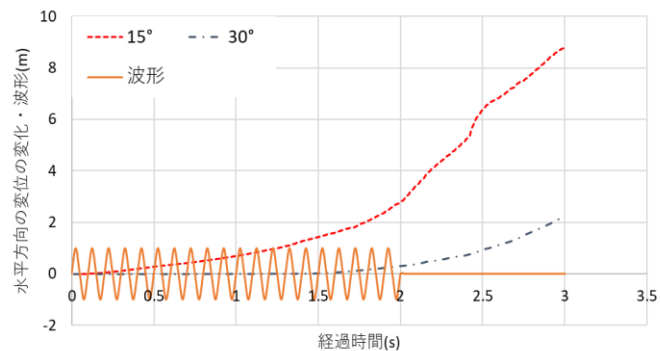


図6 上段の水平方向の変位 せん断抵抗角の比較