

被災地築石構造物の数値解析によるモデル化と評価

長崎大学工学部 学生会員 ○山口 真歩

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

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。その中でも最も被害を受けたのが石垣である。将来的に、再度の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、石垣タイプ、半石垣タイプ、非石垣タイプと本研究では呼んでいる。石垣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垣タイプに焦点を当てた。

図-1 に石垣勾配 70° の石垣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込んだ。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。

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は、周波数 10 Hz、振幅 1m/s の正弦波をモデル底面の境界に 2 秒間作用させた。まずは、既往の研究と比較するために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。

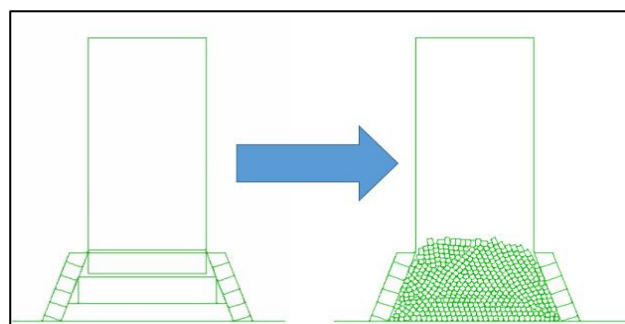


図-1 石垣タイプの作成図

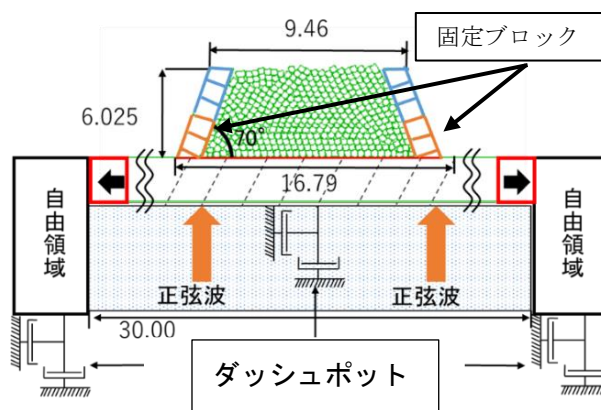


図-2 モデルの概要 (単位: m)

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 (KPa)	0	0
せん断抵抗角 ϕ (°)	15°	30°
引張強度 σ (MPa)	0	0

3. 解析結果

図-3 に石垣勾配 70°, 各ブロックの表面の摩擦角 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ていることがわかる。石垣の高さの違いにより、すべり面の傾きが異なる。(i)より石垣の高さが高い分、土被り圧が相対的に小さいことから地震動の慣性力によって作用する水平方向の力の方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)より石垣の高さが低い分、土被り圧の作用している力が場所によってあまり変わらず土被り圧より地震動によって作用する水平方向の力の方が大きくなるため、すべり面の傾きが緩やかになっていると考えられる。

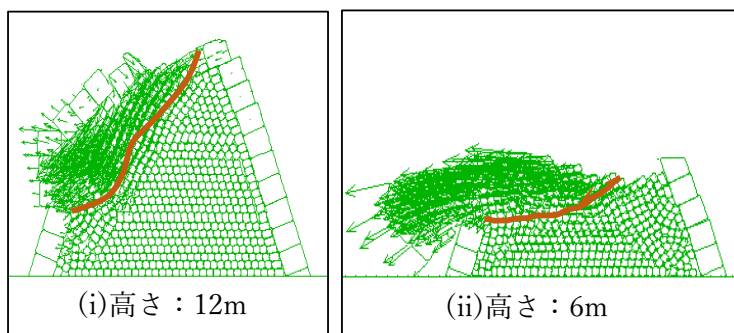


図-3 解析モデル(石垣勾配 70°)高さの比較 (単位: m)

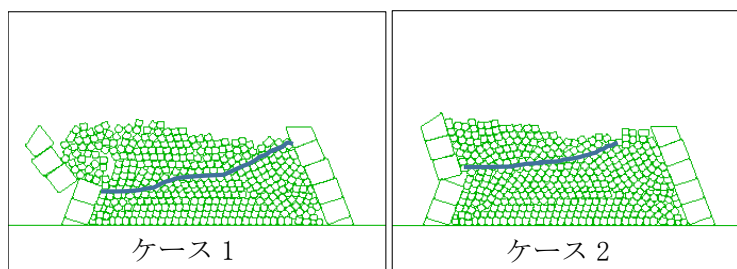


図-4 解析モデル(石垣勾配 70°)摩擦角の比較 (単位: m)

図-4 に石垣勾配 70° で各ブロックの表面の摩擦角の値がそれぞれ 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表面の摩擦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。表面の摩擦角が大きくなるほど、石垣が崩れやす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上段の石垣石の水平方向の変位の変化を示す。高さが 6m の場合は高さが 12m 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、下から伝わる地震動が上段に達するまでに減衰し、上段まで伝わりにくかったと推測される。また、栗石の詰まり方によっても上段の動きに差が出てくると考えられる。

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

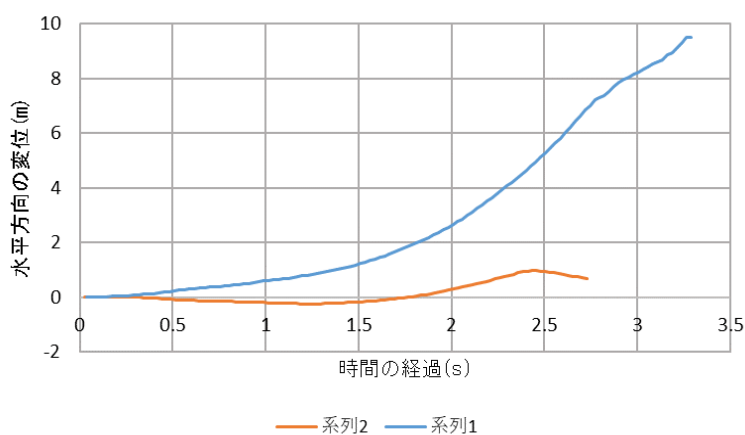


図-5 上段の水平方向の変位の変化

4. おわりに

本研究では、石垣タイプ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分かった。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検証していきたい。

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