

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

長崎大学大学院 学 ○勝田 侑弥 正 杉本 知史 F 蔣 宇静 正 大嶺 聖
香川大学工学部 正 山中 稔

1. はじめに

平成 28 年(2016 年)熊本地震により、熊本城は建造物や石垣などの地盤構造物に甚大な被害が生じた。熊本城内の多数の石垣は崩壊や孕み出しが生じるとともに、背面盛土には引張りクラックなどが発生した。平成 28 年熊本地震の特徴は、熊本城が前震で震度 5 強、本震で震度 6 強の 2 回の強震を受けたことにある。熊本城石垣は、前震では変形を免れたものの、本震により大変形や崩壊に至ったケースが多く見られる(写真-1, 2 参照)。今後大規模地震が予測されている中、歴史的遺産である城郭石垣の崩壊メカニズムの解明は急務である。そこで本研究では個別要素法による数値解析で石垣内部の動的挙動の分析を行う。



写真-1 石垣の孕み出しの様子 写真-2 石垣の崩壊の様子

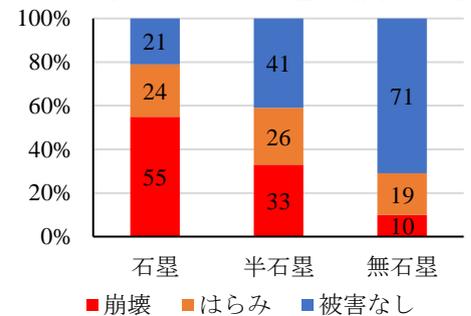


図-1 各タイプの崩壊状況

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)による数値解析を実施した。

熊本城は大きく分けて三種類の石垣のタイプに分かれており、石罫タイプ、半石罫タイプ、非石罫タイプと本研究では呼んでいる。各タイプの構成及び特徴は、石罫タイプは栗石と石垣石のみで構成されており、高さが低く勾配が急な為、崩壊している箇所が多い。半石罫タイプは栗石、石垣石と背面地盤で構成されており、高さが高く勾配がやや緩いため、孕み出しを生じているものが多い。非石罫タイプは石垣石と背面地盤のみで構成されており、高さが高いが勾配が緩いため崩壊している箇所が少ない。図-1 に各タイプの崩壊状況を示す。石罫タイプは半分以上が崩壊しているが、無石罫タイプは 1 割程度しか崩壊していない。石罫タイプは門や通路沿いの石垣に多く使われている為、城内でも重要箇所となる。そこで、本研究では石罫タイプに焦点を当て、石垣内部の栗石の動きを再現して崩壊メカニズムを解明する。

図-2、表-1 にモデル条件を示す。解析モデルは形状の影響も考えて、石垣勾配を 60°, 70°, 80°の三ケースを作成した。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。実際の石垣では、下部石垣は地盤内に埋められているので、本研究では下部三段を固定した。

解析では、安定するまで加振はせず、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。この値に設定した理由は別途実施している遠心載

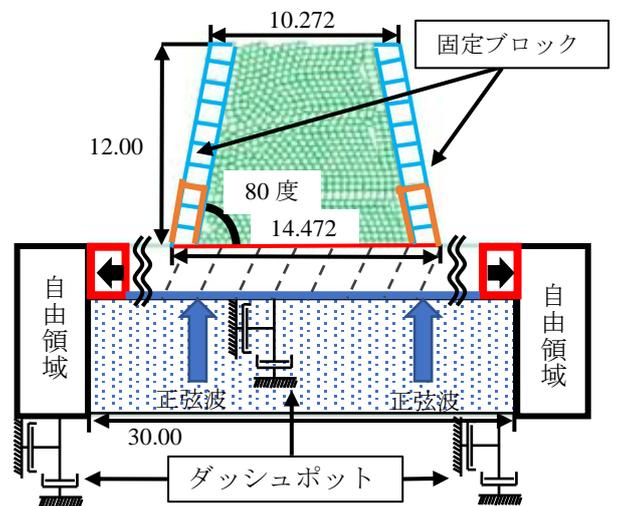


図-2 解析モデル(石垣勾配 80°) (単位: m)

表-1 各ブロックの物性値

項目	石垣石	栗石
密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	2.50	2.20
弾性係数 $E(\text{MPa})$	50×10^3	50×10^3
ポアソン比 ν	0.25	0.25
粘着力 $c(\text{KPa})$	7.0×10^4	7.0×10^4
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	45	45
引張強度 $\sigma(\text{MPa})$	3.5	3.5

荷試験による模型実験の条件と同等にするためである。入力物性値については、石垣石と栗石の表面形状が受動土圧へ大きく寄与していると考え、石垣石間と栗石間の摩擦角を表-2に示すケースで実施した。

表-2 各ブロック表面の摩擦角

石垣石	15°	35°	50°
栗石	15°	45°	—

3. 解析結果

図-3に形状80°で異なる条件の3ケースの最終ステップ後の変形図を示す。右図から、栗石の摩擦角が石垣石の摩擦角より崩壊形態に大きく起与している。栗石の摩擦角が15°の場合、下から5,6段目で押し出される形で崩壊している。2.5秒時の最大変位量は6.144mであった。一方で、栗石の摩擦角が45°の場合、すべての非固定ブロックが3,4段目の接点を軸として外側に倒れるように崩壊している。2.5秒時の最大変位量は3.975mである。この崩壊形態の違いの要因として、栗石内部でのすべり面の違いが挙げられる。栗石の摩擦角15°, 45°ともにすべり面の角度が摩擦角と同等となっている。そのため、崩れた栗石が石垣石を押し出す範囲に差が生じ、栗石の摩擦角15°の時は5,6段目が集中的に押し出され、この地点での変位量が最大になったと考える。

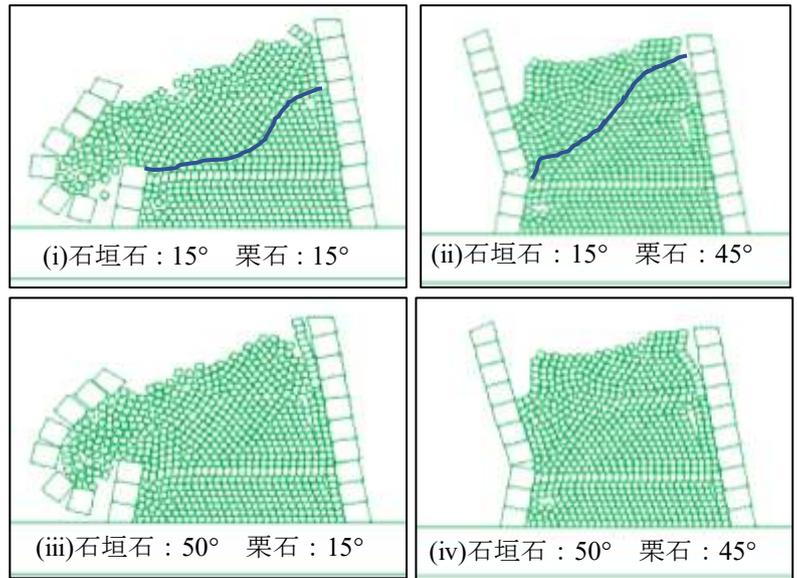


図-3 解析モデル(石垣勾配80°)

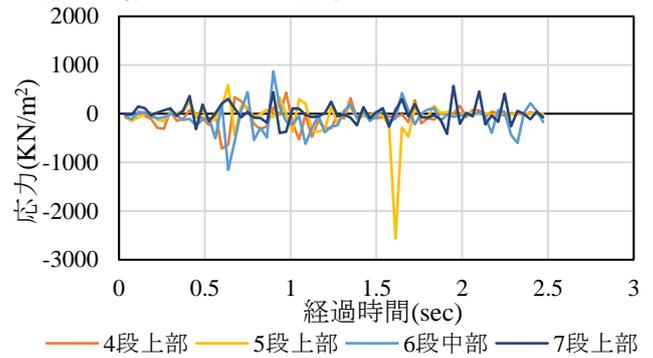


図-4 石垣石15°, 栗石15°時石垣石にかかる水平方向の応力

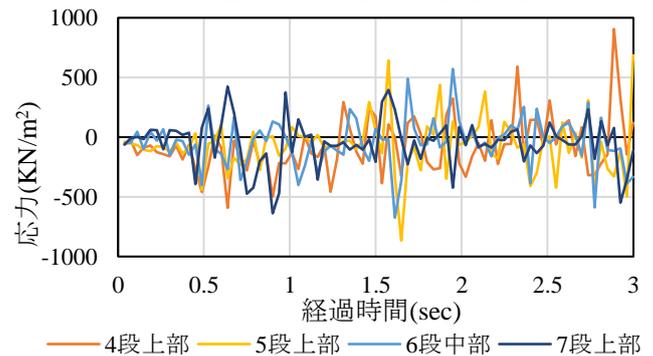


図-5 石垣石15°, 栗石45°時石垣石にかかる水平方向の応力

図-4, 5に図-3の(i)(ii)での各石垣石にかかる応力を示している。今回は、解析結果から左部石垣の4から7段目の石垣石に加わる水平方向の応力を計測した。栗石15°の場合、1.6秒時に5段上部が最大応力の荷重を受けている。また、序盤の0.6秒付近では6段目が大きく荷重を受けている。栗石45°の場合でも、1.6秒時に5段上部で大きく荷重を受けている。しかし、崩壊までは至っていないため、2.9秒付近での4段目が最大応力を受けていた。このグラフから、石垣は上部石垣石から順に栗石の荷重を受けていくことが分かった。これは上部の栗石は鉛直荷重が小さいため、せん断抵抗も小さくなると考えられる。

4. まとめ

本研究では、石垣タイプの石垣による崩壊の再現を実施した。崩壊形態には栗石の摩擦角が大きく起因していることが分かった。また、今回のモデルでは5段目の石垣に最大応力が作用しているので、これが崩壊のきっかけとなったのではないかと考える。

謝辞：本研究は、大成学術財団の研究助成により実施しています。また、熊本城調査研究センターの関係者の方々のご協力に謝意を申し上げます。

参考文献

- 1)山本浩之ほか：城郭石垣における石材の摩擦特性と間詰効果に関する一考察，pp127-132，第8回地盤改良シンポジウム論文集，2008年
- 2)西村毅ほか：個別要素法を用いた城郭石垣の安定性解析による振動台実験の変形挙動の検討，pp325-326，土木学会第66回年次学術講演会，2011年