

実務利用に向けた城郭石垣の2次元個別要素法モデル

環境防災研究室 修士2年 衛藤 修平
主査 大塚 悟
副査 宮木 康幸 杉本 光隆 福元 豊

1. はじめに

日本各地には、文化遺産として価値の高い城郭が点在し、それらの多くは城郭石垣によって構成されている。しかし、それらは構築後400年程度経過していることから、老朽化が著しく、孕み出し等の変状が目視で確認されるものも多い。さらに、災害大国の日本では、地震が多発することから崩落の危険性が高まることが懸念されている。しかし現状では、変状・崩落に関する力学的メカニズムに不明な点が多く理論的知識が不足している。石垣構造の安定性の工学的評価を行い、補修を必要とするか否かの判断を求められる事例も少なくない。

現状の石垣構造の安定性評価の手法としては、孕みだし指数や試行くさび法による安定計算などがある。しかし、これらは石垣の不連続性を考慮しない検討手法であることから、石垣の不連続性を考慮した検討手法の確立が重要である。そこで本研究では、個別要素法 (Distinct Element method : DEM) による方法を提案している。これは、粒子の運動を物理学の基本原則に従って追跡することから、石垣の不連続性を考慮することが出来る。さらに、石積構造物を構成する石垣、栗石層、背面地盤を1つの手法でモデル化することが出来るのも特徴である。

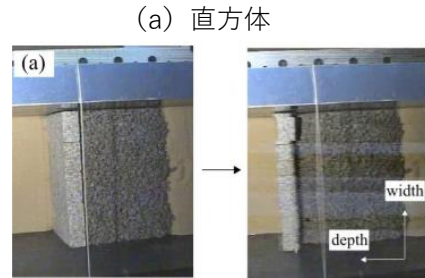
石垣構造の一般的な内部断面情報は、地中レーダ探査によって得られ、石垣の断面寸法や栗石層の分布状況などが把握できる。しかし、探査範囲が浅いことや3次元データの取得が困難であることが欠点として挙げられる。3次元データが取得できたとしても、DEMで3次元的に築石の初期配置を作成することは簡単ではなく、計算コストも非常に高い。そこで実務利用に向けて、比較的簡単に検討することができる2次元解析モデルの高度化に注力した。

そこで本研究では、まず、既往研究¹⁾で行われた遠心模型実験結果と背面地盤までを考慮した2次元DEMモデルの解析結果の比較を行った。そこで得られた知見を用いて、実在する城郭石垣を調査断面にもとづいて再現し、静的・動的条件の両面から地震時安定性評価を行った。静的条件の解析結果と試行くさび法の計算結果、動的条件の解析結果と実際の被災状況を比較した。

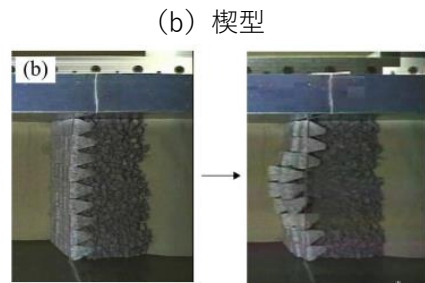
2. 遠心模型実験との比較

(1) 遠心模型実験結果

遠心模型実験の結果を図-1に示す。これは、試験体を上面から観察しており、直方体の築石を積み上げた試験体と楔型の築石を積み上げた試験体の2種類で耐震性能の比較を行っている。直方体の試験体では、200 gal, 2 Hz, 30 waves×3で崩落しているのに対して、楔型の試験体では、370 gal, 2 Hz, 30 waves×3で崩落に至る結果となった。また、直方体の試験体では、築石が一体化して転倒するように変位していったのに対して、楔型の試験体では、築石の中間部の中段に大きな変位



(a) 直方体
200 gal, 2 Hz, 30waves × 3



(b) 楔型
370 gal, 2 Hz, 30waves × 3

図-1 遠心模型実験結果¹⁾

表-1 入力パラメータ

入力パラメータ	築石	栗石	背面地盤
単位体積重量 (kg/m ³)	26.5	22.0	17.5
法線ばね定数 (N/m)	1.0 × 10 ⁸	1.0 × 10 ⁸	2.0 × 10 ⁷
接線ばね定数 (N/m)	2.5 × 10 ⁷	2.5 × 10 ⁷	5.0 × 10 ⁸
法線粘性定数 (N/m)	2.0 × 10 ⁵	3.0 × 10 ⁴	3.0 × 10 ⁴
接線粘性定数 (N/m)	1.0 × 10 ⁵	1.5 × 10 ⁴	1.5 × 10 ⁴
時間増分 (sec)	5 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁷
粒子間摩擦係数	1.00	1.00	0.84
転がり抵抗係数	-	ペア要素	転がり摩擦

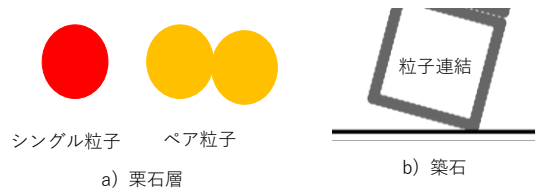


図-2 栗石層と築石のモデル化手法

また、直方体の試験体では、築石が一体化して転倒するように変位していったのに対して、楔型の試験体では、築石の中間部の中段に大きな変位

が見られ孕み出すように変位していった。

(2) DEM モデル

本研究で使用した DEM 解析の入力パラメータは、表-1 に示すように築石、栗石、背面地盤にそれぞれについて設定した。円要素のまま地盤材料らしい強度を再現する方法として、栗石層ではペア要素を考慮し、背面地盤では転がり摩擦を導入した。図-2 には栗石層と築石のモデル化方法について示す。モデル化した円形粒子を 2 つずつ連結されたものを

ペア要素（黄色の粒子がペア粒子、赤色の粒子がシングル粒子）と定義し、ペア粒子とシングル粒子の割合を 4:1 で設定した。築石は半径 0.02m の粒子を連結させ、四角形と楔形の形状を作成した。

(3) 背面地盤までを考慮した 2 次元 DEM 解析結果

遠心模型実験で使用された地震と同条件の波形を用いた。最大振動加速度を 10gal 刻みで増加させていき、崩落に至る荷重を求めた。図-3 に背面地盤までを考慮した 2 次元 DEM 解析結果を示す。四角形モデルでは 180gal で、楔形モデルでは 390gal で崩落に至る結果となった。また、直方体モデルでは築石が一体化して転倒するように変形し、楔形モデルでは築石の最上段から 2 段目の築石が膨れ上がり孕み出すように変位した。よって、2 次元 DEM 解析で築石形状による耐震性や変形モードの違いが確認された。背面地盤の長さを様々に変えた検討も実施したが、地盤領域の強度を適切に表現することができれば、10m 程度の長さで十分であることもわかった²⁾。このことから、遠心模型実験結果と比較を行うと、崩落に至る荷重と変形モードに関して提案モデルが定量性を持つことが示された

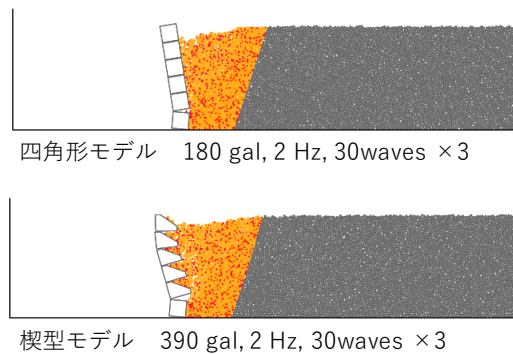


図-3 背面地盤を考慮した場合の遠心模型実験との比較

3. 実構造物への適用

(1) 実構造物の対象断面

本研究では、地震によって石垣構造の櫓に変形が生じた実在する城郭石垣の断面を解析対象とした。被災状況で櫓が築石と逆方向に転倒したことから、築石背面の栗石層の沈下が原因だと考えられる。地中レーダ探査の結果をもとに作成された断面情報と栗石層の分布状況を 2 次元 DEM モデルで再現した。

(2) 静的解析

本研究では、静的な地震荷重を用いた条件のことを静的解析と定義する。静的解析では、水平震度を徐々に一定値まで上げていき、そこからは水平震度を一定値に固定した波形を入力波形とした。図-4 に静的解析の結果を示す。既存の計算では、試行くさび法での水平震度 0.20 の場合の安全率は 1.63 と算出された。このことより、試行くさび法の計算結果と一致する結果であるといえる。

(3) 動的解析

本研究では、動的な荷重の解析のことを動的解析と定義する。動的解析では、実際の地震観測波を入力波形として用いた。図-5 に動的解析の結果を示す。最終状態の 2 次元 DEM 解析と初期状態から最終状態までの変位量を表した図を示している。栗石層の 0.2m 程度沈下が認められ、それに付随して築石が一体化して起き上がるような挙動を示した。変形量は大きくなく安定な状態だといえる。静的解析と類似した結果となった。この結果と実際の被災状況を比較すると、栗石層が沈下していることから、実現象と類似した結果だといえる。

4. まとめ

本研究では、まず、既往研究で行われた遠心模型実験結果と背面地盤までを考慮した 2 次元 DEM モデルの解析結果の比較を行った。その結果から、崩落に至る荷重と変形モードに関して提案モデルが定量性を持つことを示した。そこで得られた知見を用いて、実在する城郭石垣を調査断面にもとづいて再現し、静的・動的条件の両面から地震時安定性評価を行った。静的解析結果と試行くさび法の計算結果、動的解析結果と実際の被災状況を比較することで、提案する数値解析手法が石垣の安定性評価の 1 つとして貢献できる可能性を示した。

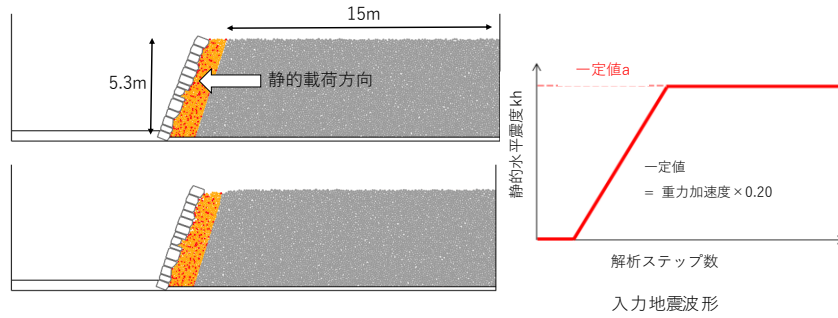


図-4 静的解析結果

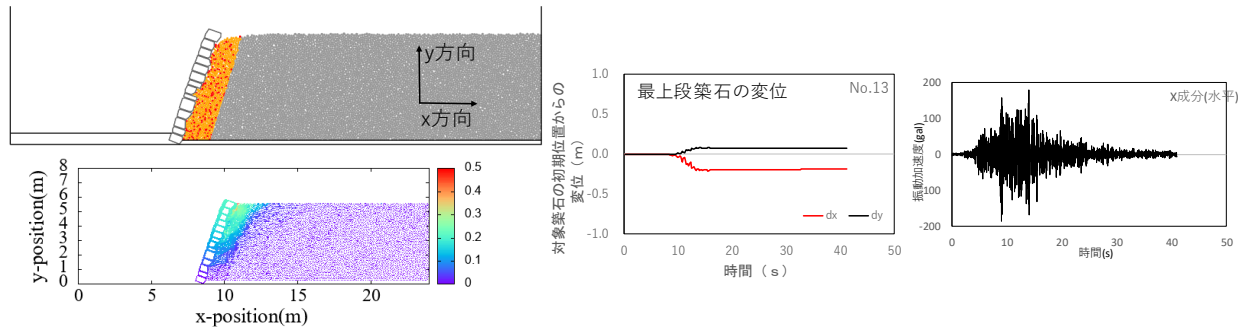


図-5 動的解析結果

参考文献

- 1) Yutaka Fukumoto, Jun Yoshida, Hide Sakaguchi, Akira Murakami: The effects of block shape on the seismic behavior of dry-stone masonry retaining walls: A numerical investigation by discrete element modeling, *Soils and Foundations*, Vol.54, No.6, pp.1117-1126, 2014.
- 2) 衛藤修平, 福元豊, 大塚悟: 背面地盤の変状を考慮した石積構造物の2次元DEMモデル, 日本地すべり学会研究発表会, Vol.58, KKR 熊本ホテル, 2019