

二次元粒状体個別要素法(DEM)を用いた石垣構造の静的安定性に関する検討

ハザマ 正会員 ○野間 康隆, 西村 毅, 山本 浩之, 笠 博義
 関西大学 正会員 西形 達明

1. はじめに

城郭の石垣構造は長年の歳月を経てなお現存する我が国の貴重な文化財である. このような石垣構造の維持管理を目的とした保護方針の立案や崩壊に対する安全性の評価を行う際には, 石垣構造の安定性が問題となる.

石垣構造は, 築石, 栗石, および地盤から構成される複雑な構造であり, 安定した状態で建設時から現在にまでその姿を残しているものも多いが, 石垣構造の安定性に関するメカニズムは十分に解明されているとはいえない. このような問題を解決するためには, 解析的研究が有効と考えられる. 石垣構造の解析的研究には, 不連続体を解析対象とした手法が用いられている. 中でも, 元々Cundall et al¹⁾によって粒子の挙動を評価するために提案された粒状体個別要素法(以下, DEM)は, 石垣構造の安定性評価において頻繁に使用されている²⁾. これらの研究における解析は, 二次元であることが多い.

一方, 実際の築石の積み方には, 三次元的な構造により安定性を保っている算木積みやさまざまな形状・寸法の自然石を組み合わせることで安定性を確保する野面積みといった技法も存在する. そこで, 本検討では, 二次元の断面を使用する DEM を用いて, 上述のような技法により発揮される石垣構造における三次元的安定効果を評価することを試みた.

2. 解析概要

三次元的安定効果により成り立っている石垣構造の静的安定性を検討するため, 不連続体の挙動を取り扱う DEM による解析を実施した. DEM では, 解析対象物を円形要素あるいはこの円形要素の集合体で表現する. これらの要素の接触に基づき作成した運動方程式を陽的に解くことで, 各要素の移動量を算出する解析を行うことができる. 本検討で実施した解析では, 汎用の二次元 DEM 解析コード ITASCA 社製の PFC2D を使用した.

図-1 には, 本研究で使用した石垣構造の解析モデル図を示している. 石垣構造の各材料の物性値は表-1 に示している. 築石部は, 石材の形状に円形要素を配置しモデル化している. 築石部に関しては, 実際の石材を模した形状となっており, 解析中この形状は変化しない.

実際の石垣構造の各材料の粒子間には, 付着力は存在しないと想定されるが, 本検討では石垣構造の三次元

表-1 物性値一覧

		築石部	栗石部	地盤部
要素形状		築石を模した形状	円形	円形
寸法 (mm)		長辺で 500~1500 程度	粒径 100~300	粒径 50~100
密度 (kg/m ³)		2650	2650	2650
ばね定数 (N/m)	法線方向	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
	接線方向	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
摩擦係数		5	5	1

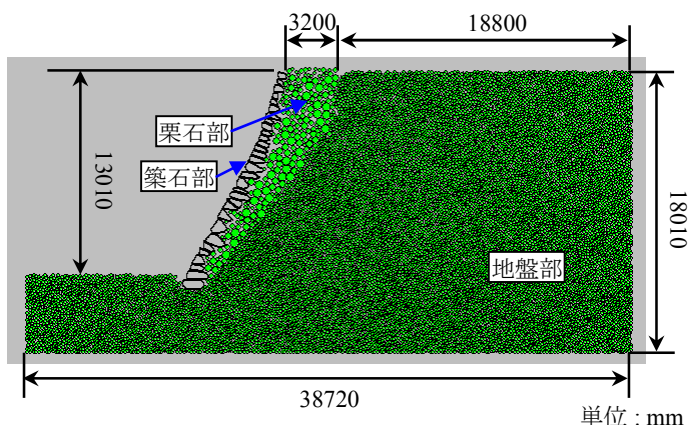


図-1 解析モデル図

キーワード 石垣構造, 三次元的安定効果による静的安定性, 二次元粒状体個別要素法(DEM)

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 ハザマ 技術研究所 TEL029-858-8813

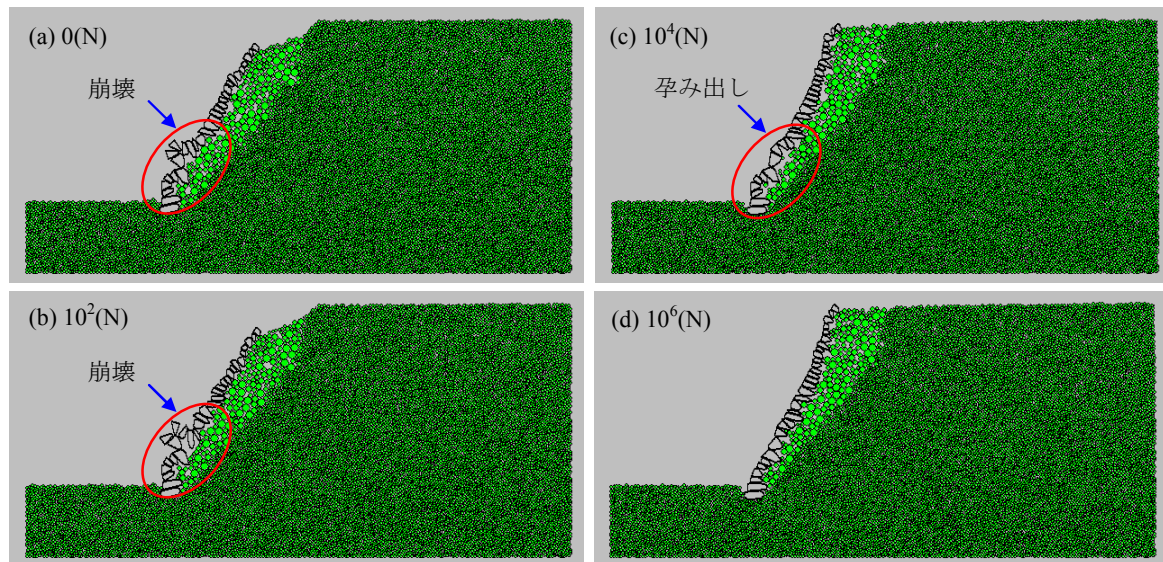


図-2 石垣構造の全体挙動

的安定効果を粘着力(N)で擬似的に表現することを試みた. 各材料の要素の粘着力(N)を 0 , 10^2 , 10^4 , 10^6 (N)と変化させたケースを設け, 重力のみが作用した場合の石垣構造の静的安定性について検討することにした.

3. 解析結果

(1) 石垣構造の全体挙動

図-2 には, 各材料の粘着力を変化・付加させた場合の石垣構造の経過時間 10(s)後の全体挙動図の変化を示した. 粘着力が 0 , 10^2 , 10^4 (N)のケースでは, 築石部の崩壊や孕み出しといった石垣構造の不安定な現象が確認できる. 一方, 粘着力が 10^6 (N)のケースでは, 上記のような変状は見られず, 石垣構造の安定性が確認できた.

(2) 孕み出し指数による検討

築石部の変状を定量的に評価する手法としては, 孕み出し指数による検討が挙げられる³⁾. 図-3 には, 本解析中の築石の孕み出し指数の履歴を示している. 孕み出し指数は, 築石の全高さに対する孕み出し量の百分率であり, ここでの孕み出し量は, 下段から数えて 9 段目の築石の最も左下に位置する要素の変位量とすることにした. 粘着力が 0 , 10^2 (N)のケースでは, 孕み出し指数が 5(%)前後で急に大きくなる領域が確認できる. これらのケースの築石部では, 図-2(a), (b)に示すように経過時間 10(s)後で崩壊といった不安定な挙動を呈している. 粘着力が 10^4 (N)のケースでは, やや孕み出し量の増加が伺えた. これらのケースに比べ, 粘着力が 10^6 (N)のケースでは, 孕み出しの量が小さい. この孕み出し指数を用いた評価からも, 粘着力が 10^6 (N)のケースでは, 築石部の変状が顕著でなく静的な安定性が高いことが示唆された.

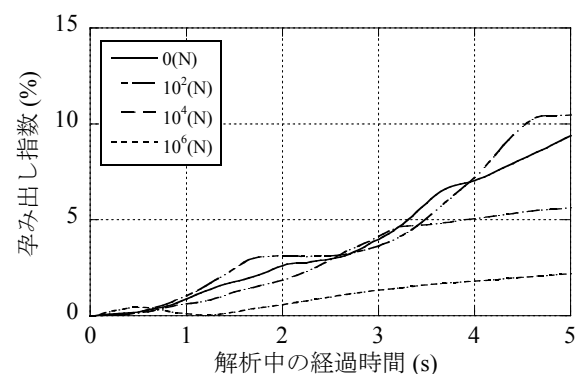


図-3 孕み出し指数の履歴

4. まとめ

本検討から, 二次元 DEM を用いた解析において石垣構造の解析を実施する場合, 各要素に粘着力を付与することで三次元的な安定効果を擬似的に表現し, 重力のみによる築石部の崩壊・孕み出しを抑制し, 石垣構造の静的安定性を再現できる可能性を示した.

参考文献

- 1) Cundall, P. A. et al : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp. 47-65, 1979.
- 2) 笠 博義ら: 個別要素法による城郭石垣の安定性解析の試み, 土木学会土木史研究論文集, Vol.27, pp. 45-51, 2007.
- 3) 西田 一彦: 「石垣修理と土木工学」—石垣の現状把握と安全な修理工事のために—, 全国城跡等石垣整備調査研究会資料集, pp. 1-12, 2010.