

粒状要素法による城郭石垣の孕み出しに関するシミュレーション

前橋工科大学工学部 学生会員 ○大塚 久史
前橋工科大学工学部 正会員 土倉 泰

1. はじめに

日本に現存する城郭石垣は築造後400年ほど経過しており、老朽化や震災等により崩壊の危険性があるものが数多く存在している。そのような石垣のなかには、崩壊の予兆ととらえてもおかしくないような孕み出しが生じた場合であっても、図1の岡山城本丸の石垣⁶⁾のように、孕み出したまま安定しているものも存在する。石垣の修復には多大な経費を要することから、どの程度孕み出した石垣の危険性が高いのかを評価する必要が生じる。本文においては、石垣の危険性評価に資することを想定して、粒状要素法を用いた不連続体解析を行うために必要となる石垣のモデル化についてまとめている。



図1 岡山城本丸 孕み出した石垣⁶⁾

2. 孕み出し量と石垣崩壊との関係についての過去の研究

孕み出しとは、石垣が崩壊する前には石垣の中央より下方部が外側へ丸く迫り出し上方部は後ろへ下がる現象がみられることをいう。過去に天野光三氏らによって行われた研究¹⁾によれば、孕み出し度を評価指標にできる。孕み出し量 δ は、石垣の断面に対して最大孕み出しを長さで表す。そして、孕み出し度 D は孕み出し量 δ を石垣の高さ h で除した値を百分率で表した値で式(1)のように表すものである。

$$D = \delta / h \times 100 \text{ [%]} \dots \dots (1)$$

D : 孕み出し度 (%)

δ : 孕み出し量 (cm)

h : 高さ (m)

森本博之氏らの研究²⁾において孕み出し度 D と N 値との関係を参考に表したのが図3である。これは、当時の石垣の断面形状の参考として「後藤家文書」の設計手法をもとに、甲府城、名古屋城、安土城、伊賀上野城、大阪城、岸和田城、姫路城、和歌山城、丸亀城、の城郭石垣を計測して孕み出し量を算出した結果である。この図3より、孕み出し度 D が6.5%を超える石垣が存在しないことがわかる。このことから孕み出し度 D が6.5%を超えると崩壊することが推察される。

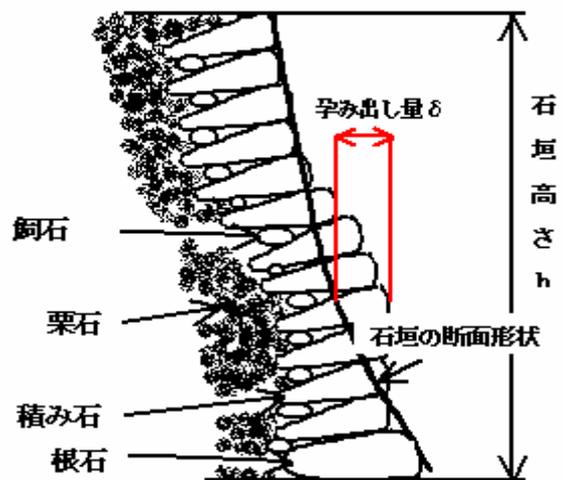


図2 孕み出し量²⁾

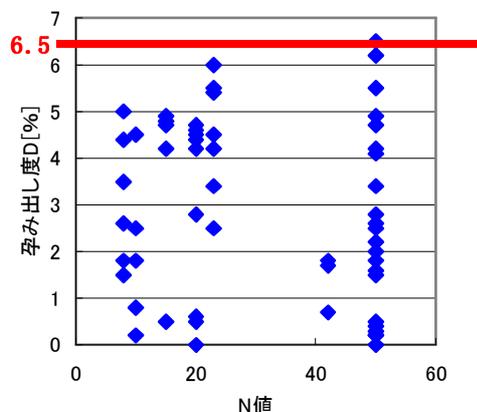


図3 孕み出し度 D と N 値との関係²⁾

キーワード 城郭石垣 孕み出し 粒状要素法

〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1 TEL027 (265) 7305

メールアドレス:tsuchi@maebashi-it.ac.jp

3. 粒状要素法とその適用法

粒状要素法³⁾は個別要素法の一つであり、剛体集合体の挙動を解析する手法である。また、大きい変形を扱うのが可能である。本文では、円を貼り合わせて石の形状を表現し、2次元解析を考える。石の重心はモデル化した積み石ごとに式(2)により算出した。

$$(x_g, y_g) = \frac{1}{S} \iint_D (x, y) dx dy, \quad S = \iint_D dx dy. \quad (2)$$

4. 石垣構造法と設定モデル

石垣において、構築当時の設計や石積みの独得な技術が記載されている資料はほとんど残っていない状況である。そこで現在明らかにされていることを踏まえて、大阪城天守北面の石垣の一部を再現することにした。石垣の高さは13.4m、斜面の長さは14.2m、傾斜角は既往の研究⁴⁾を参考にした。これらの値は「後藤家文書」などの構築手法による形状から大きく外れてはいない。また、積み石の控えの長さは2m~2.5m、一辺の長さは、0.8m~1mとした。表面の一辺の長さとの比が1:2.5~3になっている。「後藤家文書」によると控えの長さは石垣が孕み出した場合に控えの長さが長ければ力学的に良いと考えられる。石積みに使う石は花崗岩とする。密度は通

常の平均値である2.75g/cm³と仮定する。次に石積みをつみ上げていく過程⁵⁾は図4に示した。まず基礎となる地盤を固め石垣背後の斜面を成形する。根石を据え付ける。この段階で角度は付けずにしっかりと固定する。次に積み石を積み上げていく。この時積み石と積み石の間に飼石を安定と角度を付けるために間からまかせて積み上げていく。石積みの背後には栗石と呼ばれる小さく砕いた石を隙間なく敷き詰めていく。これは石垣背面の土圧を軽減させ、内部に浸透した水を排水させる機能がある。栗石の幅が厚いほど石垣が頑丈になると考えられる。当時の石垣は5m前後も栗石を詰めたとされ、石垣のモデルにも5m敷き詰めた。以上の条件を元に粒状要素法を用いるため円を貼り合わせた要素を作り、組み合わせて石垣モデルを作成したのが図5である。石垣モデルを使い孕み出し量6.5%以上にし、石垣が崩壊するかどうかを計算する。

5. おわりに

既往の研究⁴⁾では孕み出しが下方部に起こることが報告されている。本研究ではモデルの下方部を人為的に孕み出させる。孕み出し量6.5%に相当する石垣変位量は87.1cmであることに着目しながら解析を進めていきたい。

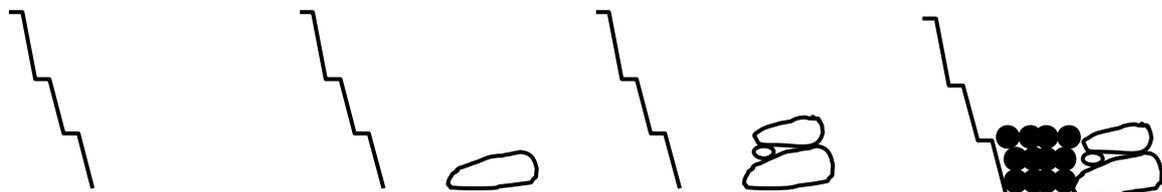


図4 石垣構造法

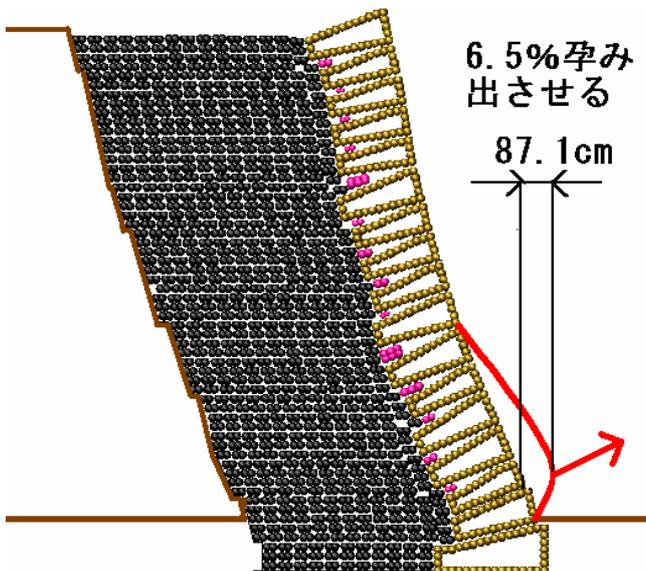


図5 石垣モデル

参考文献

- 1) 天野光三、西田一彦、渡辺武、玉野富雄、中村博司：徳川期大阪城城郭石垣構造の土木史的研究, 土木学会論文集, No. 660, pp101-110, 2000.
- 2) 森本浩行、西田一彦、西形達明、玉野富雄：城郭石垣の安定性に影響する各種要因の検討, 土木史研究, 講演集, vol. 24, pp. 255-260, 2004.
- 3) 土倉泰：自然石の形状をモデル化した粒状要素解析, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 615-622, 2006.
- 4) 西田一彦、西形達明、玉野富雄、森本浩行：城郭石垣断面形状の設計法とその数式表示に関する考察, 土木学会論文集, No. 750, pp. 89-98, 2003.
- 5) 三浦正幸：図説・城造りのすべて, 学習研究社出版, pp. 42-63, 2006.
- 6) 三浦正幸：城のつくり方図典, 株式会社小学館出版, pp. 44-80, 2005.