

高松城天守台石垣の個別要素法による安定解析 ～自重変形に及ぼす杵工の効果～

香川大学工学部 学生会員 ○井筒 大 香川大学工学部 正会員 山中 稔
香川大学工学部 国際会員 長谷川修一 関西地盤環境研究センター 正会員 西田一彦

1. はじめに

高松城天守台石垣は老朽化対策として 2007 年より解体修理工事が実施されており、2011 年度末には積み直し工事が終了する予定である。一般的に城郭石垣は高い安定性を有していると言われるが、石垣面のはらみ出しや根石の移動等の局所的な自重変位量についての定量的な評価により、その安定性が議論されていると言いが難しいのが現状である。さらに、高松城天守台石垣の工事では石垣構造物の安定性を向上させる目的で杵工が設置された。

本研究は、石垣の局所的な変形量が解析可能な個別要素法を用いて、高松城天守台の自重による変形挙動解析を行い、修復された高松城天守台の安定性を評価するとともに、新たに設けられた杵工の石垣変形低減効果を検証するものである。

2. 杵工について

高松城に設置された杵工は、石垣を取り囲むように地盤に木杭を打ち込んで杵を作り貫で連ね、一体化させ杭の間に栗石、土砂などを詰めた構造を有している。今回の工事では、長さ 3m、直径 25cm の松杭を 1.4m 間隔で正三角形に配置し、杵内に栗石・割石を敷き詰めて構築した。杵工の効果は、杭を貫で連結することによる地盤の拘束一体化する効果や、杭間に敷き詰めた栗石・割石荷重による地盤の側方流動を低減させる効果が考えられている¹⁾。この杵杭打設により、地盤が締め固められN値の上昇が確認されている²⁾。

3. 解析方法

解析においては、解析対象を円形や多角形の要素の集合体としてモデル化し、要素間にバネを与えることにより解析対象の自重や外力による変形挙動を再現する手法である個別要素解析を用いた。

表-1 に、個別要素解析に必要となる各部材の物性値の一覧を示す。密度、せん断・体積弾性係数および内部摩擦角の各値は、実測値³⁾を参考に設定した。一方、法線・せん断バネ剛性は各部材の値を変化させた試算を繰り返し、定性的な判断のもと設定した。

図-1 に、用いた解析モデルを示す。解析モデルは石垣石、裏込め栗石、内部盛土の 3 つの部材から構成されている。個々の石垣石の形状は長方形に単純化し、石垣石前面の線形は築城当時を想定した形状とした。実際の杵工部は複雑な構造を有するが、解析では単純化し物性値を変化させるのみとした。解析は石垣の変形が収まるまで約 34 万 cycle、実時間で 20 秒であった。

表-1 高松城天守台の各部材の物性値

各部材	密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	せん断弾性係数 $G(\text{Pa})$	体積弾性係数 $K(\text{Pa})$	内部摩擦角 $\Phi(^{\circ})$	法線バネ剛性 $k_n(\text{Pa/m})$	せん断バネ剛性 $k_s(\text{Pa/m})$
前面石垣	1.96	2.55×10^{10}	3.82×10^{10}	50.1	3.57×10^{11}	1.11×10^{10}
裏込め栗石	1.38	2.55×10^{10}	3.82×10^{10}	39.1	3.57×10^{11}	1.11×10^{10}
内部盛り土	1.63	2.32×10^{10}	5.67×10^7	32.0	3.6×10^{10}	3.6×10^{10}
直下地盤	1.63	2.32×10^{10}	5.67×10^7	32.0	5.4×10^{10}	5.4×10^{10}
杵工部	1.96	2.55×10^{10}	3.82×10^{10}	39.1	3.57×10^{11}	1.11×10^{10}

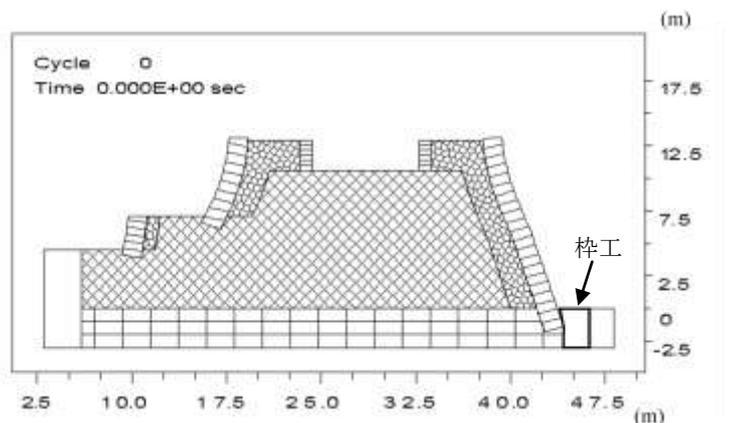


図-1 高松城天守台石垣を想定した解析モデル

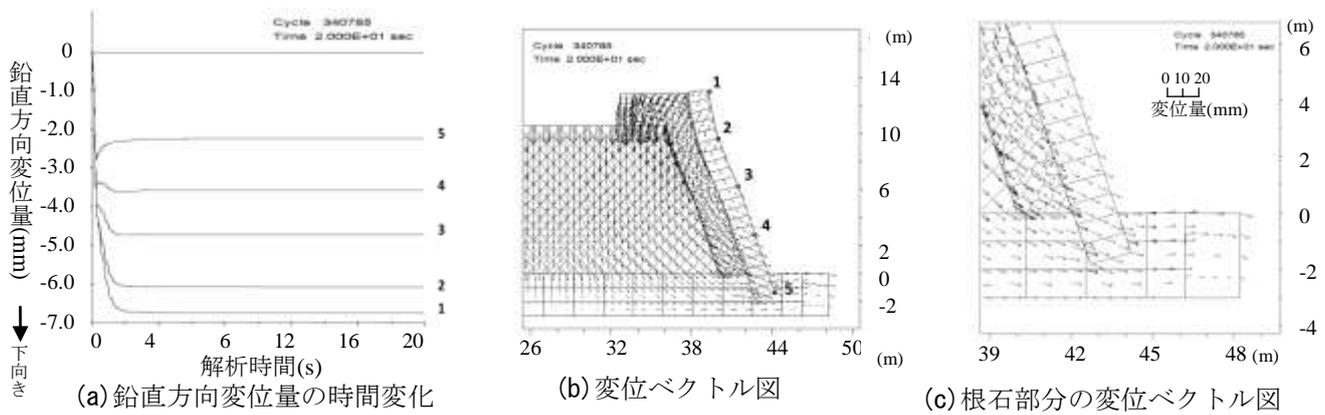


図-2 自重変形解析結果（枠工なし）

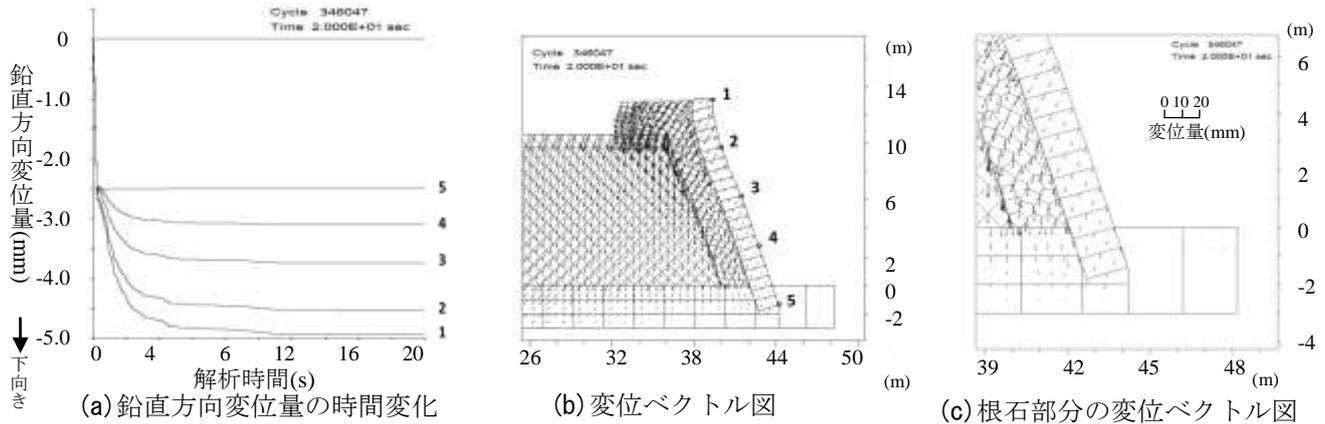


図-3 自重変形解析結果（枠工あり）

4. 自重による変形解析結果

図-2 に、枠工なしの場合の自重変形解析結果を示す。(a) 図の鉛直方向変位量の時間変化から、どの点でも 3 秒時点で変位量は一定の値になっており、石垣全体の鉛直方向への変位は収まっていることが分かる。(b) 図及び(c) 図の変位ベクトル図から、石垣の上部は内側に沈み込み、下部は外側にはらみ出していることが分かる。これは内部盛土が上部石垣により圧縮され、下部で外側への圧力が生じ、外側へはらみ出しが生じたものと思われる。実際の高松城天守台の修復前の変形形状でも、本解析結果と同様の変形形状を示している。

図-3 に、枠工ありの場合の自重変形解析結果を示す。(a) 図の鉛直方向変位量の時間変化から、石垣の根元にあたる No. 5 の変位は枠工なしの場合と比べて急激に停止している。枠工により石垣の根元が固定された影響だと考えられる。(b) 図及び(c) 図の変位ベクトル図から、石垣は枠工なしの場合と比べ全体が内側に沈み込み、上部は水平方向への変位が大きい。

図-2 及び図-3 の(c) 図の比較から、石垣下部の変位は、枠工なしの場合には外側方向であるのに対し、枠工ありの場合には内側もしくは下方であることから、枠工の石垣変形低減効果が働いていることが分かる。

5. まとめ

本研究では、高松城天守台の自重による変形挙動を個別要素法により解析した結果、変位量は全体的に小さいことが判明した。さらに枠工設置による変位量を比較したところ、枠工は石垣変形を低減させ得ることが評価できた。本研究の遂行にあたり、有益なご助言を頂いた高松市教育委員会教育部文化財課の大嶋和則氏および高上拓氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西田一彦, 大嶋和則, 玉野富雄, 金岡正信, 北園和則, 山中 稔, 白石 建: 高松城天守台解体時の力学調査と保全工法, 土木史研究講演集, 土木学会, Vol. 29, pp. 235-242, 2009.
- 2) 石川照久, 山中 稔, 長谷川修一, 上田篤司: 高松城天守台地盤の杭打設による締め固め効果について, 土木学会四国支部第 15 回技術研究発表会講演概要集, 土木学会, pp. 151-152, 2010.
- 3) 山中 稔: 高松城及び屋島城の石垣盛土構造物の調査研究, 平成 21 年度地域貢献推進経費による研究報告書, 香川大学, pp. 1-10, 2010.