

高知城石垣部の個別要素法による自重および動的変形解析の試み

香川大学工学部 賛助会員○石井 裕, 香川大学工学部 正会員 山中 稔
香川大学大学院 正会員 小泉勝彦, 香川大学工学部 正会員 長谷川修一

1. はじめに

近世城郭石垣は歴史的に貴重な文化財であるが、築城からの老朽化により石垣に孕みや割れ等の変状が見られ、今後の地震時には石垣の変形や崩壊が懸念されている。一般に城郭石垣は地震に強いという認識が強いが、東日本大震災での仙台城や小峰白川城の石垣崩壊の事例があるように、地震動の大きさや老朽化の程度によっては石垣が崩壊する危険性が大きくなる。近い将来に発生が予想されている南海トラフ巨大地震により大きな地震動を受ける高知市に位置する高知城において、石垣部の被害が懸念されている。高知城の石垣部は全体的に変状が小さいものの、箇所によっては石垣中腹部の孕みや割れ等の変状が生じている箇所が確認できており、石垣部の地震時の大変形や崩壊の発生が懸念されている。

本研究では、高知城の石垣部を対象に数値解析である個別要素法を用いて、自重および動的変形解析を行い高知城石垣部の変形挙動を検討した。

2. 解析方法

本研究では個別要素法の解析ソフトウェアである UDEC を用いて変形解析を行った。

図 1 に、個別要素法による石垣部の解析モデル図を示す。現在変状が確認できる三の丸北側の石垣をモデル化した。前面にある高さ 10.8m の石垣石の背面には、幅 1m の栗石層を設けている。そして背後地盤は表層から盛土、風化土、地山となっている。これらの地盤構造は、現地での表面波探査の実施や、吉成の研究¹⁾等により設定した。

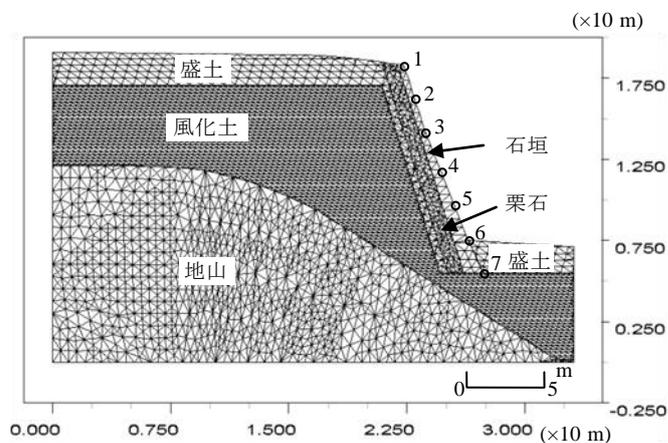


図 1 モデル化した断面図

表 1 に、解析に用いた入力物性値を示す。各物性値は、高松城石垣における既往研究²⁾等を参考にして、また各部位の値の大小を勘案して決定した。動的解析においては、中央防災会議が公表した高知城周辺地域にかかる南北方向の想定波形（想定東南海+南海地震波）をモデル図の底部に境界条件として入力した。

3. 解析結果

図 2 (a)～(c) に、自重解析の結果を示す。(a) 図の水平方向変位からは、いずれの箇所（箇所位置は図 1 の番号に対応）とも 0.5 秒程度で収束していることが分かる。(b) 図の変位ベクトル図および(c) 図の変形図からは、全体的に下方向へ変位していることが分かり、石垣部の最大変位は 4mm 程度と小さい。

表 1 個別要素法解析における各構成部材の物性値

構成部材	密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	せん断弾性係数 $G(\text{kN/m}^2)$	体積弾性係数 $K(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	垂直バネ剛性 $k_n(\text{kN/m}^3)$	せん断バネ剛性 $k_s(\text{kN/m}^3)$
石垣	1.960	2.55×10^7	3.82×10^7	50.1	3.57×10^8	1.11×10^7
栗石	1.380	2.55×10^7	3.82×10^7	39.1	3.57×10^8	1.11×10^7
盛土	1.708	4.78×10^4	1.08×10^5	33.8	3.60×10^7	3.60×10^7
風化土	1.732	1.92×10^5	4.14×10^5	35.0	5.40×10^7	5.40×10^7
地山	2.200	1.00×10^7	1.00×10^7	42.4	1.00×10^9	1.00×10^9

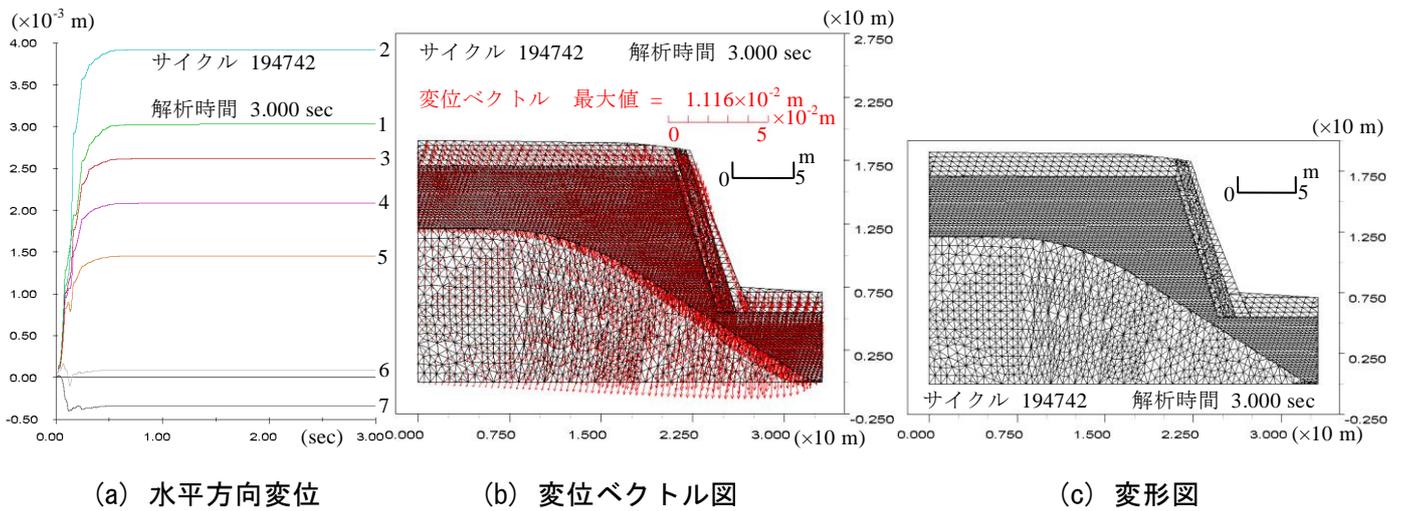


図2 自重変形解析結果

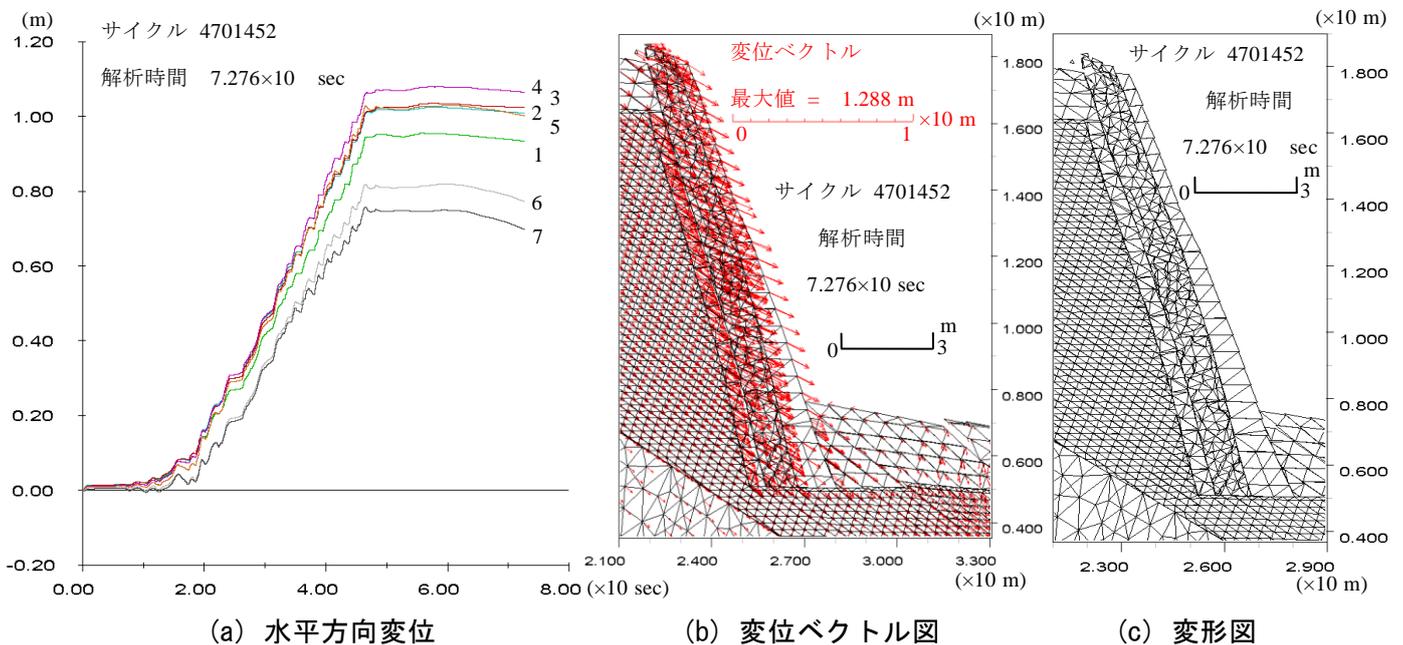


図3 動的変形解析結果

図3(a)～(c)に、動的解析の結果を示す。(a)図の水平方向変位からは、いずれの箇所（箇所位置は図1の番号に対応）とも15秒程度で変位はピークに達し、その後は収束傾向に向かっている。(b)図の変位ベクトル図からは、石垣部や盛土部分が右下方向（のり尻側）へ最大で1.3m程変位していることが分かる。(c)図の変形図からは、地表面から上の石垣が大きく変形し、孕みだしの形状があらわれたことが分かる。

4. まとめ

高知城の石垣部を対象に個別要素法による自重および動的変形解析を実施した結果、石垣は自重ではほとんど変形が発生しないが、地震動を加えると石垣全体がのり尻側に変位すると共に、石垣中腹部が孕み出す変状が発生することが確認できた。本研究の実施においては、高知県教育委員会事務局文化財課の中内勝氏に有益なアドバイスを頂き感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 吉成承三：高知城三ノ丸の発掘調査～石垣修築工事に伴う発掘調査成果～，第25回（平成19年度）高知県地盤工学研究会テキスト－講演要旨集－，pp.1-10，2008.
- 2) 井筒 大，山中 稔，長谷川修一，西田一彦：個別要素法による高松城天守台石垣の地震動変形解析事例，第47回地盤工学研究発表会平成24年度発表講演集，pp.1337-1338，2012.