

3D レーザースキャナデータを用いた城郭石垣の形状解析

サンコーコンサルタント株式会社 正会員 ○萩原 育夫
 サンコーコンサルタント株式会社 保坂 俊明
 石川県金沢城調査研究所 富田和気夫

1. はじめに

国内に現存する城跡は地域を代表する歴史的・文化的資産であり、城跡を中核に据えた様々な事業が進められている。城跡の主要要素である石垣は土木構造物としての側面を有し、各種事業においては石垣の工学的な安定性を評価し適切に維持管理していくことが求められている。本発表では、金沢城跡における石垣保全の取り組み事例と、石垣の変形箇所抽出を目的として検討した三次元形状解析手法について報告する。

2. 金沢城跡における石垣保全整備の概要

金沢城の築城は 1580 年頃から始まったとされ、藩政期を通じて前田家の居城であった。廃藩置県後は戦後まで陸軍所管となり、その後は金沢大学のキャンパスとして利用され、平成 8 年度から都市公園としての整備事業が進められている。金沢城の石垣は、総面積＝約 30,000 m²で、石垣面数＝471 面を数え、安政 2 年(1855)の地震など、数多くの災害を経て断続的に築造・修理を繰り返してきた。

3. 石垣の点検管理

図 3.1 に石垣の点検管理の概念図を示す。

(1) 日常点検・詳細調査：日常的な点検として、全域に関する目視点検（クラックゲージ等の簡易計測を併用）によって、変状の有無や程度等の現況を監視している。また孕み出しが顕著な箇所等においては、ボーリング調査・小型カメラによる石垣内部観察・レーダ探査等によって石垣並びに周辺地盤を調査するとともに、孔内傾斜計観測、定点観測、変位計測等の計器観測によって定量的な変状の監視を実施している。

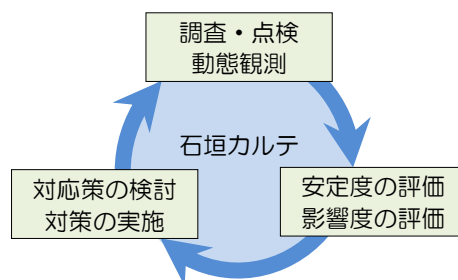


図 3.1 城郭石垣の点検管理の概念図

(2) 安定性評価・影響度評価：安定性や影響度の評価では、点検結果、石垣の形状特性や地盤特性、石垣の立地条件（園路等との位置関係）等に基づいて現状の安定性を評価するとともに、詳細調査箇所については安定解析（有限要素法・不連続変形法等）によって、変状メカニズム及び安定度を評価している。

(3) 対応策の検討・対策の実施：安定度並びに影響度の評価結果に基づき、伐採や排水処理等の日常的な対処のほか、石垣近傍への立ち入り制限、石垣の解体修築といった対応を実施している。

(4) 石垣カルテ：文化財調査として実施されたレーザ測量成果、写真測量成果（石垣立面図等）、石垣の来歴調査、技術特性調査等の成果があり、石垣の点検管理の最も基礎的な資料として運用している。

4. 三次元形状解析方法の検討

石垣の点検管理を実施する際の課題の一つは、孕み出し等の変状の適確な把握である。断面図では捉えにくい石垣変状の立体的な範囲及び規模を確実に把握し、現状評価と対策検討に資するため、三次元形状解析手法を検討した。金沢城調査研究所では、平成 18 年度以降地上型 3D レーザースキャナを利用した石垣の三次元計測を継続的に実施しており、この点群データを活用して石垣の変形程度に関する各種の指標を算出した。三次元形状解析の解析フローを図 4.1 に示し、解析手順を以下に示す。

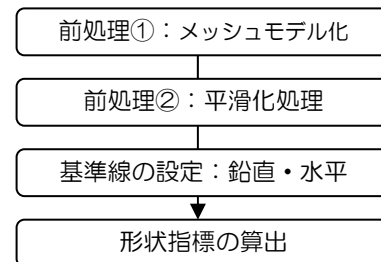


図 4.1 形状解析フロー

キーワード：城郭石垣、歴史的土木構造物、安定性、三次元形状解析、接峰面図

連絡先：〒136-0071 東京都江東区亀戸 1-8-9

サンコーコンサルタント株式会社

TEL. 03-3683-7111

〒920-0918 石川県金沢市尾山町 10 番 5 号

石川県金沢城調査研究所

TEL. 076-223-9696

(1)前処理:3D レーザースキャナで得られる数 mm 間隔の点群データは、築石の輪郭や表面の微細な凹凸を把握できる反面、孕み出し等の石垣面の全体的な変形が把握し難いといった側面を有する。このため形状解析の前処理として、点群データから 10 cm 間隔のメッシュモデルを作成し、さらに地形解析で用いられる接峰面図の考え方になって、水平断面における築石の凸部に着目した平滑化処理を施した(図 4.2)。

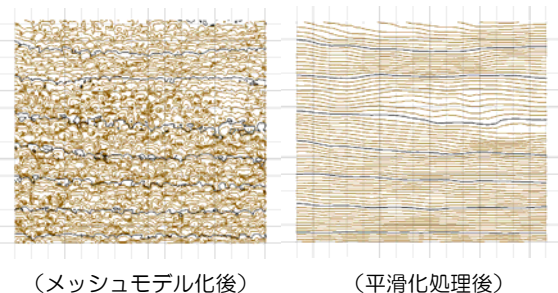


図 4.2 前処理の例(等高線表示)

(2)基準線の設定:現地状況並びに平滑化処理後のデータをもとに最も変状が少ない箇所を選定し、鉛直方向の基準線を設定した。さらに城郭石垣の特徴である輪取り構造を考慮して水平方向の基準線を設定し、これらの基準線の組み合わせによって石垣の当初形状を三次元的に推定した。

(3)変形指標の算出:石垣の変状に関する指標として、石垣面の傾斜角度のほか、基準線と現況石垣形状との差としての孕み出し量(D)、高さが異なる石垣間における変形比較に着目した孕み出し指数(D/H)、すべり破壊におけるすべり面位置に着目した歪み($\Delta D/\Delta H$)を算出した(図 4.3)。

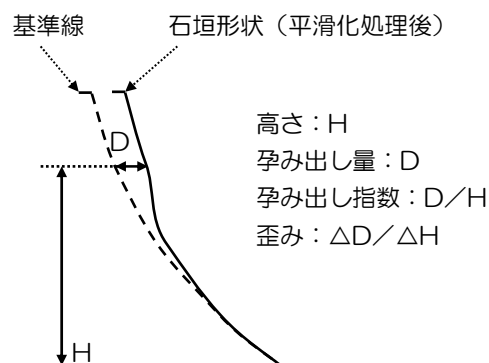


図 4.3 石垣変形の指標(概念図)

(4)解析結果:図 4.4 に解析結果図例を示す。三次元解析による定量的な変形指標を段彩図等に出力することによって、変形の範囲や量をより視覚的に捉えられることが確認された。一方、出隅部では、壁面の反りをより強めて構築した事例が認められることから、本来の勾配変化に起因して、見かけの孕み出し量が算出されるケースがあった。石垣本来の形状特性や修築履歴等を踏まえて、解析結果を評価することが重要である。

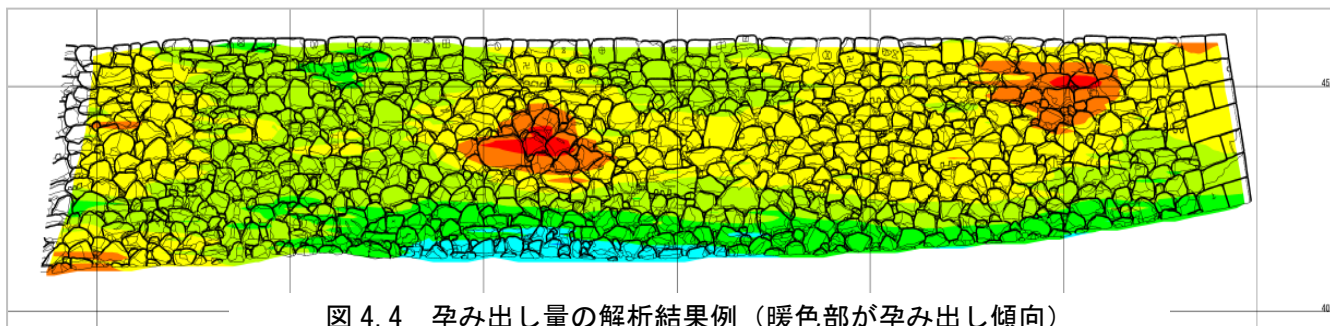


図 4.4 孕み出し量の解析結果例(暖色部が孕み出し傾向)

5. 検討結果の評価

今回の検討結果から、石垣に対する三次元形状解析は、石垣の変形範囲・量を定量的・視覚的に把握することを可能とし、詳細調査箇所(緊急度)や調査位置・手法の選定等をより客観的に行う上で有用と考えられる。また、今回の検討結果は石垣の変形解析に対する 3D レーザースキャナデータの有用性を示すものでもあり、今後、異なる年次に取得された 3D レーザースキャナデータを比較することによって、変状の進行状況がより詳細に捉えられるものと期待される。近年は大規模な地震が多発し、各地で城郭石垣の変形・崩壊の被害をもたらしていることから、事前に 3D レーザースキャナ計測等を実施して石垣の現状を客観的かつ高精度に記録し解析しておくことは、石垣を長期的に保全する上での基礎資料として、極めて重要と考えられる。

6. おわりに

本発表内容は石川県教育委員会(石川県金沢城調査研究所)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 西田郁乃: 史跡金沢城跡の石垣現況調査、第 14 回全国城跡等石垣整備調査研究会資料、p.26-38、2017
- 2) 文化庁文化財部記念物課: 石垣整備のてびき、p.225、2015
- 3) 石川県金沢城調査研究所: 金沢城跡石垣保存実態調査報告書 I、p.265、2016