

## 報告

## 三次元レーザ測量を利用した城郭石垣の安定性評価

Stability assessment of castle stone walls using three-dimensional laser scanning technology

小林 泰三 (こばやし たいぞう)

立命館大学 理工学部 教授

e-mail: kobat@fc.ritsumei.ac.jp

安井 伸顕 (やすい のぶあき)

(株)計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部

家村 享明 (いえむら たかあき)

(株)計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部

西村 正三 (にしむら しょうぞう)

(株)計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部

キーワード：三次元測量、点群データ、城郭石垣、安定解析

## 1. はじめに

一説によると、日本には、かつて2万5千以上の城があったという。江戸時代の「一国一城令」や明治時代の「廃城令」、さらにその後の戦争によって多くの城は失われたが、城跡を含め、全国に現存する城郭石垣の数は相当な数になる。2016年の熊本地震で大きく崩壊した熊本城の石垣の姿は記憶に新しいが、地震や豪雨による崩壊が危惧される城郭石垣は全国に多数存在する。現存する城跡石垣の大半は、築造から400年以上経過しており、築石（つきいし）の抜け出しやはりみ出しなどの劣化が進行して修復・維持管理が課題となっている石垣も少なくない。

歴史的価値をもつ文化財としての城郭石垣を長期的に保存・活用していくために、近年、構造物としての健全性や安定性の評価、補修・修復技術に関する工学的研究が多く行われるようになった。特に最近では、写真測量やレーザスキャナ等の普及により、石垣の三次元データを活用した調査技術や修復技術の実用化が進んできている。

著者らは、兵庫県豊岡市の出石（いずし）重要伝統的建造物群保存地区防災計画<sup>1)</sup>の策定プロジェクトに参画する機会を得て、地区内に現存する出石城石垣（図-1）の安定性に関する調査研究を行った。本調査では、レーザスキャナによる出石城全域の三次元測量を行い、得られた三次元データに基づいて築石の安定性と石垣構造の地震時安定性評価を行った。以下に、その概要を報告する。



図-1 兵庫県豊岡市出石城の石垣全景

## 2. 出石城の三次元レーザ測量

調査を行った出石城は、1604年（慶長9年）、当時の出石藩主であった小出吉英（こいで よしふさ：豊臣秀吉のいとこの長男）によって築かれた。江戸時代、但馬地方唯一の城であり、その城下町は、但馬地方の政治・経済の中心地として栄えた。同地区には、江戸時代の町割をはじめ近世後期における城下町の歴史的風致が色濃く残っており、2007年に国の重要伝統的建造物群保存地区に選定された。出石城は、明治時代の廃城令で取り壊されたが、鼓楼（時を知らせる太鼓を打てる建物）、堀、石垣などが現存するほか、櫓や橋の一部が復元され、一帯は河川公園として整備されている。

出石城の石垣は、4段の曲輪（くるわ）で構成されており（図-2）、築造された時期や修復歴によって勾配や高さに差異は見られるが、隅角部以外は、大きさが統一されていない自然石を積み上げた「野面積」である。

る(図-3)。本調査では、レーザスキャナ搭載型 UAV (Matrice600Pro/DJI 社+Hovermap/Emesent 社) とモバイルレーザスキャナ (ZEB-HORIZON/GeoSLAM 社) を用いて測量を行い、それぞれのデータを合成して出石城全域の三次元点群データを生成した(図-4)。本調査では、得られた三次元点群データに基づいて、「築

石の安定性」と「石垣全体構造としての地震時安定性」の二つの観点から健全性を評価した。図-1~4 に示すように、石垣の場所や向き、構造の違いに応じて城内の石垣を 14 面に区分化し、それぞれに A~N の記号を付して評価を行うこととした。

### 3. 築石はらみ出しの面的評価

出石城の石垣を踏査すると、築石のはらみ出しや背面の空洞化が進んでいる箇所が多く観察された。形状や大きさに統一性のない自然石が用いられていることもあり、少ない接点でかろうじて安定性を保っているような箇所も見受けられた。築石のはらみ出しは、石垣の崩壊を招く素因のひとつであり、程度によっては修復・積み直しが必要となる。本調査では、西田ら<sup>2,3)</sup>が提案した「はらみ出し指数」の考え方に基づいて、レーザ測量で得られた三次元データから、はらみ出しの程度(築石の安定性)を面的・定量的に評価することとした。

はらみ出し指数とは、構築当時の石垣断面形状に対して、現況の石垣断面形状中の「最大のはらみだし量(cm)」を「はらみ出しが生じている区域の高さ(m)」で除した値として定義されており、この指数が 6 度以上にある石垣は、豪雨や地震による崩壊の危険性が大きい<sup>2,3)</sup>と言われている。出石城石垣の構築当時の正確な断面形状は不明であるが、隅角部を除いて大きな反り(曲率)はなく、平面的な石垣として普請されたことが外観から推察された。このことから、本調査では、取得された点群から平面の基準面を導出し(図-

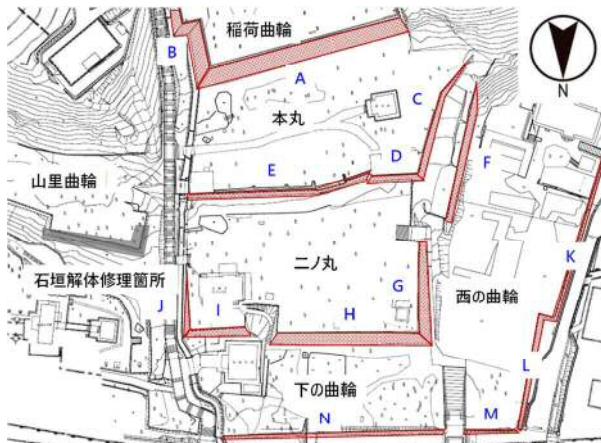


図-2 出石城平面図(一部加筆)



図-3 野面積による石垣(二の丸曲輪)

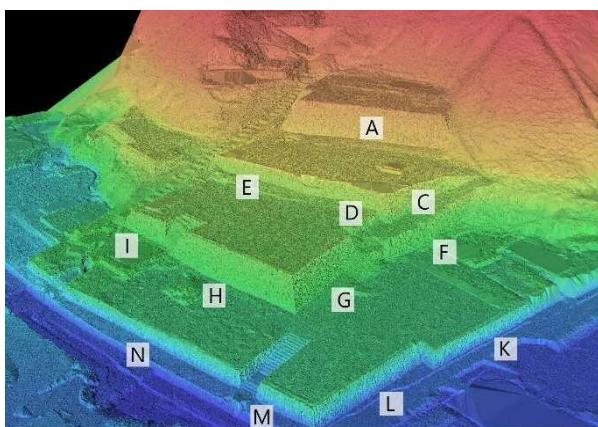


図-4 三次元レーザ測量によって得られた点群データ  
(建物・樹木等を除去した DEM 標高段彩図)

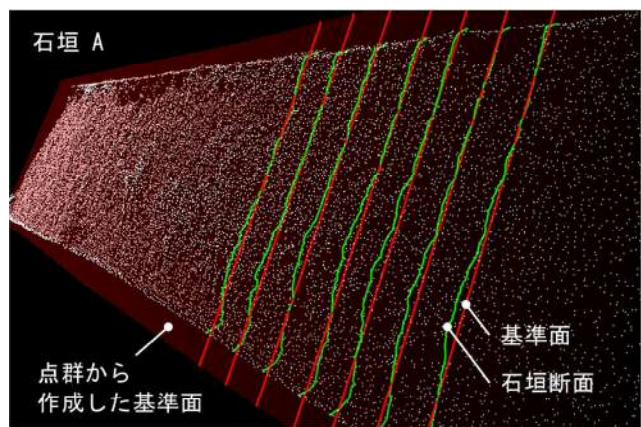


図-5 石垣点群と基準面の重畳

5), 基準面と石垣面の点群の水平方向差分量をはらみ出し量 $\delta$  (cm)とした。また、西田らの提案では、「はらみ出しが生じている区域の高さ (m)」を分母にとるが、ここでは「石垣高さ $H$  (m)」を分母にとった。このように、西田らの方法とは若干異なる点があるため、本稿では「はらみ出し比 $Q$ 」と呼ぶことにする。

算出結果を代表して、A面およびH面のはらみ出し比 $Q$ の段彩図を図-6に示す。例えばA面では、右側半分にはらみ出しの傾向が強く、さらに下方に特に大きな変状が生じていることが分かる。これまで断面測量にトータルステーションを用いることが多く、任意の断面でしか評価ができなかつたが、本調査のように三次元データを活用することで、面的・空間的なはらみ出しの可視化が可能となる。さらに、各石垣面における $Q$ の最大値の抽出(図-7)や、一定のはらみ出しを生じている領域の面積算定が可能になるなど、三次元データを活用することによって変状の実態を可視化できる部分は少なくない。

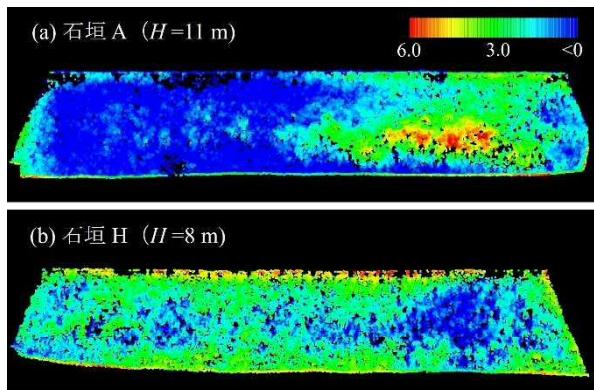


図-6 はらみ出し比 $Q$ の段彩図の一例

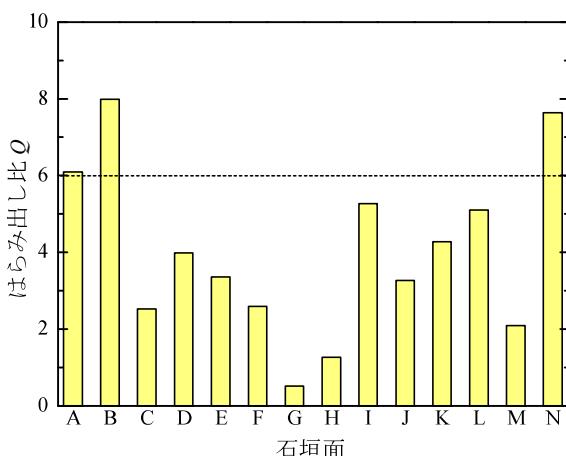


図-7 代表断面のはらみ出し比

## 4. 地震時安定性評価

出石城の石垣も然り、我が国の伝統的な石垣は、漆喰やモルタルなどによって築石同士を接着させない空積み構造が多い。空積み構造は、築石同士のかみ合わせと摩擦力のみで安定性を保つので、地震には脆弱である<sup>4,5)</sup>。本調査では、前述した築石のはらみ出し評価に加え、構造的な地震時安定性を評価するための力学モデルを構築し、三次元データから抽出した任意断面について、断面毎の耐震性を評価する手法を提案した。

ここでは、図-8に示すように、石垣天端から任意高さ $h$ の位置までの築石が一体化して挙動すると仮定した。一体化したブロック体には、物体力としてブロック自重 $W_s$ と水平地震慣性力 $k_h W_s$ が作用し( $k_h$ は水平震度)，外力として背面から地震時主働土圧 $P_a$ が作用すると考え、その下端(築石間の仮想断面)に作用する滑動力 $S$ と抵抗力 $R$ をそれぞれ計算する。ここに、仮想断面は、築石の傾斜を考慮して水平から角度 $\alpha$ 傾いた面とする。仮想断面に作用する滑動力 $S$ は、上述した $W_s$ ,  $k_h W_s$ ,  $P_a$ の仮想断面に対する接線方向成分の総和として、また、抵抗力 $R$ は、 $W_s$ ,  $k_h W_s$ ,  $P_a$ の垂直方向成分の総和に築石間の摩擦係数を乗じたものとして算出する(計算の詳細は、文献6)を参照されたい)。任意高さ $h$ を変化させて計算することにより、図-9に示すように、高さに対する $S$ と $R$ の分布図を得ることができる。同図は、石垣A面の代表断面を事例とした計算結果であるが、抵抗力 $R$ は高さに対してほぼ直線的に増加する一方、滑動力 $S$ は曲線的に増加することが分かる。滑動力 $S$ が抵抗力 $R$ を上回る高さで、理論

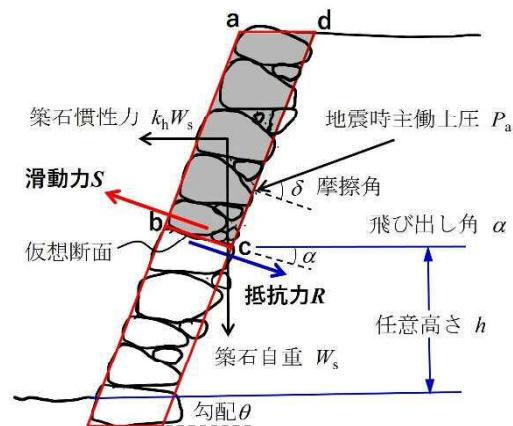


図-8 石垣構造の地震時安定性

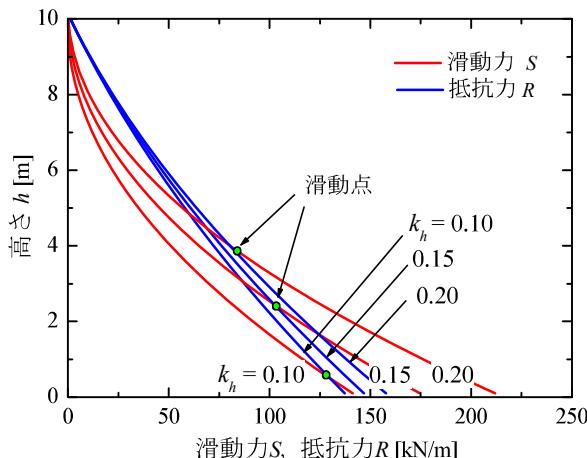


図-9 仮想断面に作用する力（石垣Aの代表断面）

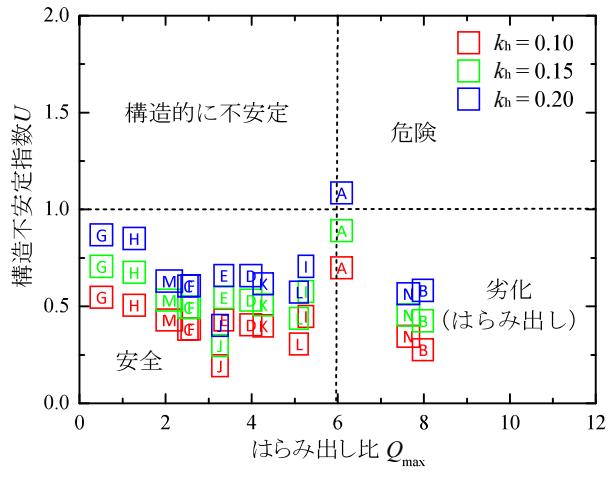


図-11 Q-U評価図

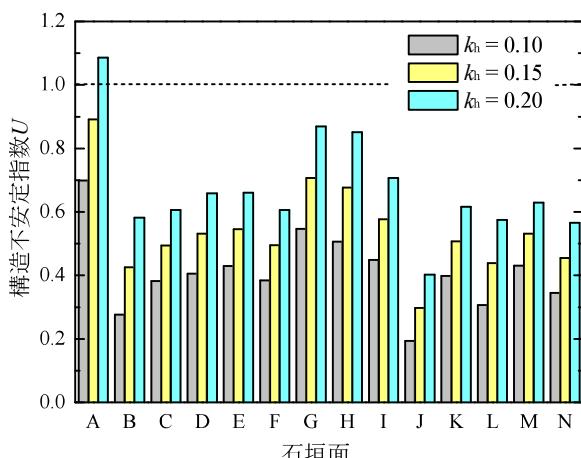


図-10 代表断面の構造不安定指数

上、築石の飛び出しが発生することを意味する。本調査では、石垣の地震時安定性を評価するための指標として、構造不安定指数  $U$  を次式で定義した。

$$U = \int_0^H Sdh / \int_0^H Rdh \quad (1)$$

ここに、 $H$ ：石垣全高、 $h$ ：任意高さである。

構造不安定指数  $U$  は、図-9 の x-y 軸と滑動力  $S$  で囲まれた面積を抵抗力  $R$  の同面積で除したものである。 $U$  の値そのものの物理的な意味は不明瞭ではあるが、「 $U$  が大きいほど地震に弱い」ということが言えそうである。図-10 は、各石垣面において、はらみ出し比  $Q$  の最も大きかった断面の構造不安定指数  $U$  を示したものである。この図のように、構造不安定指数  $U$  を用いることで、どの石垣断面がどれくらいの地震力に対して危険なのかを定量的（相対的）に評価できるようになる。図中、A 面が最も高い  $U$  の値を示しているが、出石城跡で最も高い石垣面（全高  $H = 11$  m）である。

構造不安定指数  $U$  は、前述したはらみ出し比  $Q$ （築石自体の安定性）とは別の観点で、高さや勾配などの構造体としての安定性を評価するものと言える。

図-11 は、各々の石垣代表断面で算出された  $U$  と  $Q$ について、 $U$  を縦軸、 $Q$  を横軸にプロットしたものである。この図において、右上にプロットされる石垣は、はらみ出し（劣化）が進行し、かつ構造的にも不安定であると言うことができる。逆に、左下にプロットされる石垣は、築石は健全な状態にあり、かつ耐震性の高い石垣と言える。図-11 から、石垣 B 面と N 面は、水平震度  $k_h = 0.20$  を想定しても構造的に安定であるが、劣化が顕著であること、また、A 面は劣化が進行しており、かつ、地震にも脆弱であることなどが視覚的に読み取れる。

ここに提案した  $Q$ 、 $U$  は、経験値や多くの仮定に基づいて計算される理論値であり、崩壊現象を直接予測するものではないが、著者らは、これらの評価指標を用いることで、複数の石垣の健全性を相対的に比較評価できるようになると想定している。例えば豪雨や地震の後、あるいは定期的に三次元測量と安定性評価を行い、その結果を  $Q$ - $U$  図にプロットしてその点の動態を監視することで、注視すべき箇所の検出や修復の判断支援に役立てられる可能性があると考えている。

## 5. おわりに

文化庁監修の「石垣整備のてびき<sup>7)</sup>」によると、石垣には「歴史の証拠」と「安定した構造体」という二つの本質的価値があり、それら両者を保存するのみなら

ず、理解して活用するとともに、築造技術や伝統を継承していくことが重要とされている。

本稿で紹介した調査・評価手法は、簡単な差分解析や安定計算に基づく一提案に過ぎないが、三次元データが取得できたからこそ実現できた部分が多い。近年では、レーザ測量や画像解析技術を駆使して個々の築石の三次元形状や位置を把握し、詳細な石材の配置シミュレーションが行える石垣修復支援システム<sup>8)</sup>なども実用化されている。「伝統」と「革新」は対義語で語られることが多いが、築城当時にはなかった現代のICT（情報通信技術）を用いることで明らかにされる「秘伝」や受け継ぐことのできる「匠の技」もあるはずである。三次元測量技術をはじめとするICTは今後の石垣の修復・維持管理には欠かせないツールになるだろう。

## 謝辞

本検討は、立命館大学歴史都市防災研究所が受託した兵庫県豊岡市・出石重要伝統的建造物群保存地区防災計画策定プロジェクトの一環として実施したものである。現地調査に協力・支援を頂いた豊岡市出石振興局および立命館大学歴史都市防災研究所、ジャパンインターフラウエイマーク社の関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 豊岡市ホームページ：豊岡市出石伝統的建造物群保存地区防災計画、入手先<  
<https://www.city.toyooka.lg.jp/1019810/1019854/1019859/1001420/1001469/1020934.html>>（参照 2022.5.27）
- 2) 天野光三・西田一彦・渡辺 武・玉野富雄・中村博司：徳川期大坂城城郭石垣構造の土木史的研究、土木学会論文集、No.660/IV-49, pp.101-110, 2000.
- 3) 西田一彦・玉野富雄・西形達明・森本浩行：城郭石垣断面形状の設計および構築に関する考察、土木史研究、21巻, pp. 317-324, 2001.
- 4) Kobayashi, T., Zen, K., Yasufuku, N., Nagase, H., Chen, G., Kasama, K., Hirooka, A., Wada, H., Onoyama, Y., and Uchida, H. : Damage to residential retaining walls at the Genkai-Jima Island induced by the 2005 Fukuoka-Ken Seiho-Oki Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 46, No.6, pp.793-804, 2006.
- 5) 安福規之・和田 弘・小林泰三・内田 宏・小野山裕治：玄界島における急傾斜地・宅地地盤擁壁の被害とその特徴、福岡県西方沖地震における被害調査報告、福岡県西方沖地震地盤工学会調査団、地盤工学会、pp.7-26, 2005.
- 6) 山元遼太・三反畠 慶・安井伸頤・西村正三・小林泰三：城郭石垣の地震時安定性評価手法の構築に向けた基礎的検討、Kansai Geo-Symposium 2021 論文集、地盤工学会関西支部, pp.120-125, 2021.
- 7) 文化庁文化財部記念物課監修：石垣整備のてびき、同成社, 2015.
- 8) 木本 聖・若松盛示・山内裕之・木本啓介・西村正三：3次元シミュレーション技術を活用した唐津城石垣再築整備工事、測量、Vol. 70, N. 6, pp. 27-27, 2020.

（原稿受理 2022.5.31）