

## 変状進行中の城郭石垣のモニタリングと崩壊危険度評価手法の提案

長崎大学 ○杉本 知史\*  
香川大学 山中 稔\*\*  
長崎大学 石塚 洋一\*

城郭石垣 災害調査 変状計測  
遠隔モニタリング 安定性評価 数値解析

### 研究の目的

平成 28 年熊本地震では熊本城が甚大な被害を受け、被災した多くの石垣の背面盛土には無数のクラックが生じ、崩壊の危険性が高く非常に不安定な状態にあるものが、今現在数多く存在する。地震により割れやはらみ出し等の変状を受けた石垣は、石垣石同士のかみ合わせ力が低下していることから、今後、段階的かつ急激に変形が進むことが予想される。

申請者らは、震災直後より熊本城の築石構造物について、地盤工学的観点より被災状況の調査に取り組んだ。このような経緯から本研究では、被災石垣の変状計測手法の提案と傾向の分析、個別要素法に基づいた数値計算による石垣ならびにその周辺地盤の力学的安定性の評価手法の提案、変状石垣の安定性評価のためのモニタリングシステムの導入と適用性評価についてそれぞれ検討を行い、不安定状態にある築石構造物の今後の復旧の工学的検討に資する手法の提案を行った。

### 研究の内容・成果と知見・今後の予定

#### ①熊本城の被災石垣の簡易調査手法の提案と変状分析に関する研究

本研究では、管理者自身が石垣の形状計測や形状分布図の作成を容易に行える方法として、可搬型レーザー距離計の適用について提案を行うとともに石垣の変状の程度を定量的に分析した。

Leica Geosystem 社製の DISTO D510 は、主に土地区画や建物の形状計測に用いられるレーザー距離計であり、直線距離や仰角の計測が容易に行える。計測精度は、標準測定公差が $\pm 1.0\text{mm}/10\text{m}$ 、標準測定範囲が 0.05-200m の精度を有する。本研究ではこれを三脚に固定し、鉛直距離と水平距離を計測することとした。事前調査により、計測器と水平面をなす角度が 45 度を超えると、約 0.3%程度のはらつきに収まることを明らかにしたうえで、熊本城内の石垣群について、8 回にわたり計 112 か所の計測を行った。

図-1 に茶櫓跡西側石垣面の計測例を示す。図より、石垣面中央付近が両端と比べ前面に孕み出している様子を確認できる。この個所では 1m 毎に計測を行ったことから、

相対的に細かい間隔で計測を行った結果であるが、変状の規模に応じて間隔を調整することで、変状に伴う凹凸を容易に明らかにすることが可能である。

また図-2 は、森本らによる後藤家文書、石垣秘伝之書ならびに石塙書といった石垣構築に関わる古文書に記された設計の考え方を数式化したものを用いて、推定される石垣の初期形状からの変状量の推定を試みた結果の例である。この結果は、図-1 の石垣の変状が相対的に過大な箇所の計測結果と、推定される初期形状を比較している。このように表面形状の凹凸の程度を定量的に推定することで、被災度の評価につながると期待されるが、個々の石垣においては極端に形状が異なる事例もあり、今後さらなる検討を要する。

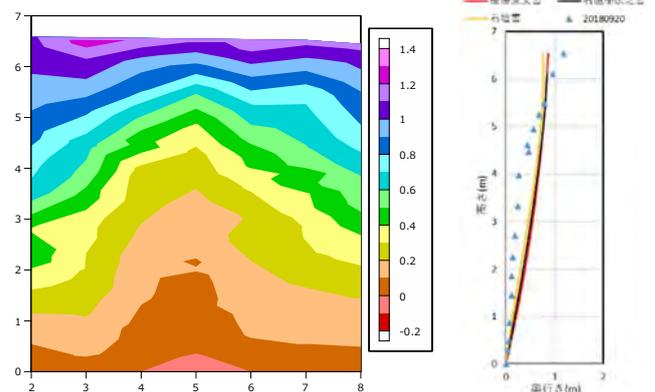


図-1 石垣形状分布例 (単位: m) 図-2 変状量の推定  
②城郭石垣の動的挙動の数値解析によるモデル化と定量的評価

本研究では、熊本城内にある石垣を三種類の石垣タイプに分け、個別要素法(解析コード: UDEC)によるモデル化を行うとともに、動的挙動の数値解析を実施し、石垣の崩壊結果から城郭石垣の崩壊傾向を考察した。

熊本城の石垣は、石垣の内部構成によって大きく三種類に分けることができる。本研究では、三種類の形状は文献を参考に「石塁タイプ」、「半石塁タイプ」、「無石塁タイプ」と称した。表-1 に三種類の内部構成、形状の特徴、構成材料を示している。計算例の代表として、以下半石塁タイプについて述べる。図-3 に半石塁タイプのモデルを示す。図-4 に半石塁タイプの勾配 70°における変位

ベクトルを示す。両者はそれぞれ栗石表面のせん断抵抗角を 15°、45°と異なる条件を与えた結果である。栗石 15°で崩壊が確認されているが、栗石 45°では上部の小さな変位のみしか確認されず、栗石が動的挙動によって下方向に密になる形で変位している様子が伺える。このことから、栗石の形状や表面粗さが挙動に影響を与えることを

表-1 各石垣タイプの特徴

石垣タイプ	石畳タイプ	半石畳タイプ	無石畳タイプ
基本形状			
実際の写真			
構成材料	石垣石と栗石	石垣石、栗石、背面地盤	石垣石と背面地盤
高さ	低い	やや高い	高い
勾配	急	やや緩い	やや緩い

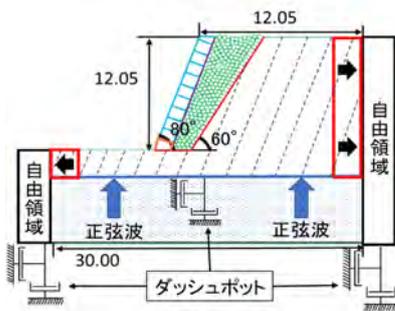


図-3 半石畳タイプのモデルの概要 (単位 : m)

表-2 各ブロックの物性値

項目	背面土	石垣石	栗石
密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.2	2.5	2.2
弾性係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	50	$50 \times 10^3$	$50 \times 10^3$
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.25	0.25
粘着力 c(kN/m <sup>2</sup> )	100	$7.0 \times 10^4$	$7.0 \times 10^4$
内部摩擦角 $\phi$ (°)	30	45	45
引張強度 $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	0	3.5	3.5

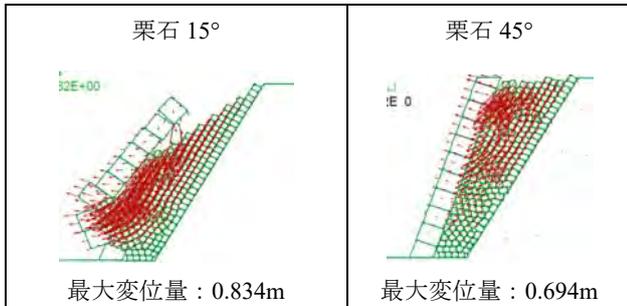


図-4 勾配 70° (半石畳) の変位ベクトル

確認した。この他、石畳タイプ、無石畳タイプともに再現解析を行い、石垣石表面の粗さや石垣勾配など種々の条件下での力学的特徴を明らかにした。

### ③熊本城内における変状発生石垣の遠隔モニタリングシステムの構築

本研究は、築石構造物表面の石垣の変状をモニタリングするため、電子・通信・情報工学分野の立場から、不安定化したとみられる石垣石各所に MEMS 型 3 軸加速度センサーを搭載した通信モジュールを取り付け、継続的にモニタリングすることで変位の経時変化を測定し、個々の石垣石またはその周辺の石垣石の力学的安定性の評価に役立てることを目的としたシステム構築を行った。

図-5 に本研究で構築したモニタリングシステムの模式図を示す。本システムは、端末、中継機、親機の三つで構成されている。端末より得られる出力電圧を、無線ネットワークを介し親機に定期的に通信し、LTE 回線を通してブラウザ上で通信状況の確認やデータのダウンロードが可能である。図-6 は、2018 年 4~11 月における熊本城内のある石垣石の加速度の経時変化であり、安定して計測することが確認できている。今後は、これらのデータから石垣石の回転量や規模の大きな地震時の影響を定量的に評価することにつなげる。



図-5 モニタリングシステムの概要

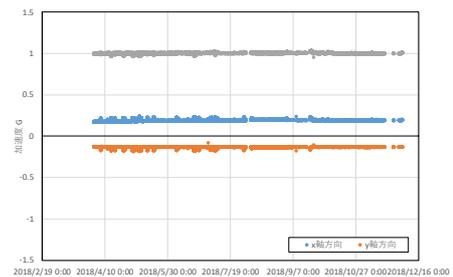


図-6 3軸加速度データの経時変化例

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、(一財)大成学術財団の研究助成を受け、以上の成果を得ることができたことに対し謝意を表しますとともに、熊本城調査研究センターならびに(株)富士通研究所の各関係者様のご支援に感謝を申し上げる次第です。

\*長崎大学大学院 工学研究科

\*\*香川大学 工学部

\*Graduate school of Engineering, Nagasaki University

\*\*Faculty of Engineering, Kagawa University