

レーダ探査を活用した城郭石垣の健全度評価

応用地質株式会社 ○中静 美波, 高瀬 尚人, 小林 恵, 竹内 幸輝
盛岡市 佐々木 亮二

1. はじめに

近年、地震や台風・集中豪雨等の自然災害により、石垣の不安定化が進み、崩落等が各地で発生している。

文化庁は、大地震等の災害で人命に重大な影響を与えないことを目標として「石垣耐震診断指針(案)」を策定し、診断手法の検討を進めている。その診断を行っていく上で、石垣の形状・性状把握や石垣背面の構造調査結果を用いることを挙げている。

本稿では、石垣の背面構造を推定する非破壊調査手法として石垣のレーダ探査を紹介し、レーダ探査による石垣調査が耐震診断指針の健全度評価の基礎データになり得ることを報告するものである。

2. 文化庁の石垣耐震診断指針

(1) 石垣耐震診断指針とは

石垣耐震診断指針は、石垣の耐震対策を進めるにあたって推奨される標準的な手順や方法と、補強を行うにあたって取り得る補強方法や留意点をまとめ、外力に対する工学的な検討と対策方法について示したものである。対象は、主に特別史跡・史跡に指定されている中・近世城郭の石垣、及び国宝・重要文化財(建造物)の基礎となっている石垣のうち、石垣の最も高い部分が高さ1m以上かつ天端、下端長さがいずれも3m以上の石垣である。診断の流れは図-1の通りであり、耐震診断は「予備診断」、「基礎診断」、「専門診断」の三段階からなる。

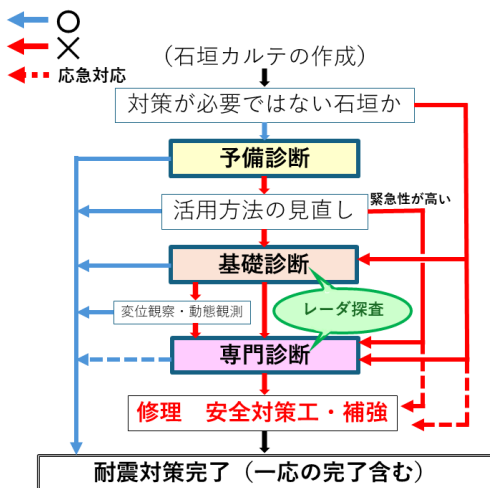


図-1 石垣耐震診断指針の簡略フロー¹⁾

(2) 石垣調査の手法に関して

石垣耐震診断指針の診断では、「基礎診断」において『(非解体による)石垣の形状・性状把握』、「専門診断」において『石垣背面の構造調査』を挙げている。その詳細な調査手法などは現在文化庁において検討が進められ

ているところであるが、我々は非破壊による石垣の形状・性状および石垣背面の構造調査の手法としてレーダ探査が有用であると考えている。そこで石垣におけるレーダ探査の例として、盛岡城石垣の調査事例を紹介する。

3. 盛岡城における石垣背面構造調査

(1) 探査概要

レーダ探査の概要を図-2に示す。

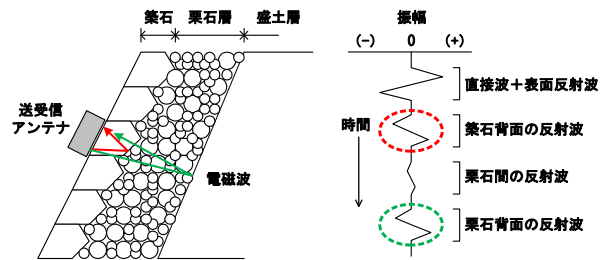


図-2 石垣背面の探査状況と波形模式

石垣表面に配置した送信アンテナから放射した電磁波は拡散・減衰しながら内部を伝播し、築石や栗石層の背面など異なる物質の境界で反射し、それらの反射波が受信アンテナで捉えられる。この築石や栗石層の厚さは伝播時間に電磁波速度を乗じて求められ、また石垣背面や栗石中に生じた空洞は、電磁波の反射振幅の大小から推定することができる。

盛岡城では、築石および栗石の層厚を連続断面として測定する『連続測定』、空隙・空洞位置を推定する『深度スライス解析』、築石の控え長を測定する『個別測定』を実施した。

レーダ探査の測定装置は SIR System 3000 (米国・GSSI社製)を用いた。連続測定では、中心周波数400MHzのアンテナを使用し、調査用に製作した台車にアンテナを固定してロープで石垣上端と下端にかけゆっくりと移動させながら測定を行った(写真-1)。



写真-1 盛岡城石垣における測定状況²⁾

また個別測定では、分解能が高い900MHzのアンテナを使用することで、築石控え長の計測精度を向上させている。

(2) 石垣背面断面推定結果(連続測定)

レーダ探査の記録と、石垣積み直し時の発掘調査結果を図-3に示す。

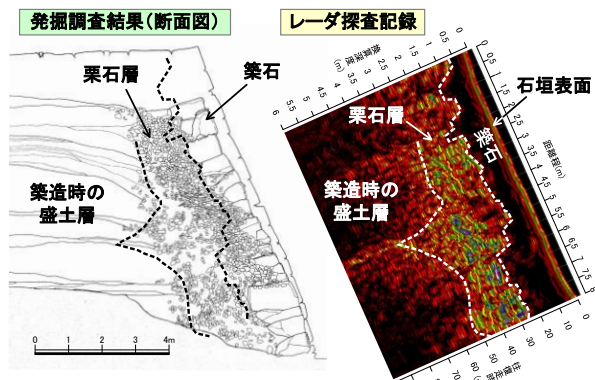


図-3 発掘調査結果とレーダ探査記録²⁾

レーダ探査記録において、換算深度0mの反射面が石垣表面であり、深部に向かって石垣背面が続く。石垣表面直下の反射振幅が弱い範囲(黒く抜けている部分)が築石石材であり、その下の反射振幅が強くなる境界面が築石石材と栗石層の境界を示している。栗石層は礫が集中して不均質であり、背後の地山や盛土と比べて強い反射として捉えられている。

当該石垣におけるレーダ記録では、築石、栗石層、盛土層が捉えられており、発掘調査結果と比較しても、その層厚や形状がよく整合していることがわかる。栗石層の厚さや盛土層の形状が分かると、石垣の不安定化が背面の構造に起因しているのか推察することができる。また、石垣築城当時の施工方法の推察にも活用でき、積み直しが必要になった際の検討材料にもなる。

(3) 深度スライス解析結果(連続測定)

石垣のレーダ探査においては、道路上や平坦地と同様に深度スライス解析を行う事ができる。盛岡城では測線間隔を1mに設定して深度スライス解析を行った。石垣表面から1.5m-2.5mの深度スライス解析結果を図-4に示す。

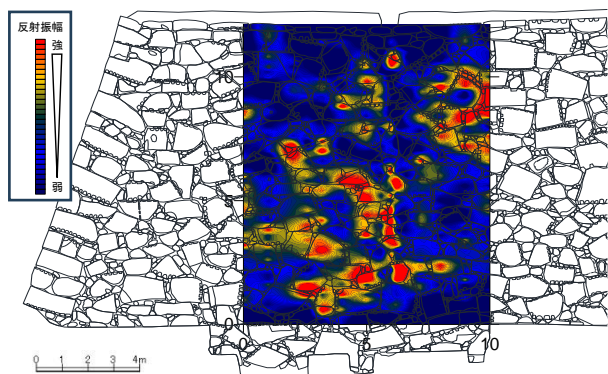


図-4 深度スライス解析結果(1.5m-2.5m)²⁾

石垣表面から1.5m-2.5mは盛岡城では築石から栗石

層に相当する。反射振幅の強い部分は石垣背面が不均質になっている箇所である。石垣背面の栗石の落ち込みなどにより空隙、空洞ができていている可能性を示している。

このように石垣背面の性状を深度スライス解析によって把握することで、今後雨や地震などの外的要因によって石垣背面がさらに不安定になる恐れがある箇所を抽出することができる。

(3) 築石の控え長測定結果(個別測定)

個別測定の一例を図-5に示す。

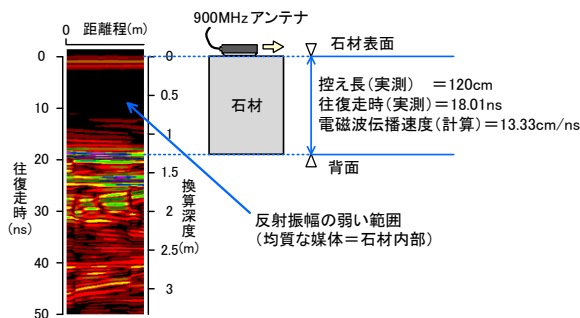


図-5 発掘調査結果とレーダ探査記録²⁾

連続測定と同様に、反射振幅の弱い範囲は均質な媒質であり、ここでは石材の内部を示している。個別測定では、築石の控え長が実測可能な隅石で背面までの往復走時を計測することにより、石材の電磁波伝搬速度を算出できる。これにより個々の築石の控え長を推定することができる。

ただし、石材の岩質等によっては築石背面からの反射が明瞭でない場合もあるため注意が必要である。

4. まとめ

城郭石垣のレーダ探査では、目的に応じた探査手法や解析方法を用いることにより、栗石層の厚さや盛土層の形状、石垣背面の不均質(空隙、空洞)箇所の抽出、築石の控え長等を把握することができる。

非破壊・非解体で石垣の形状・性状把握や石垣背面の構造を把握することができるレーダ探査は、石垣の健全度評価において有効である。今後は文化庁石垣耐震診断指針の健全度評価の基礎資料としての活用も見込まれ、さらにその必要性が高まると言える。

《引用・参考文献》

- 1) 文化庁「文化財石垣 耐震診断指針(案)」p.4の「図2診断の流れ」をもとに筆者作成
- 2) 盛岡市公園みどり課提供