

城郭石垣の工学的な研究－石垣の調査技術－

笠 博義^{*1}

近年、自然災害により城郭石垣に甚大な被害が生じる事例が増えている。また、築城後の老朽化が進む中で石垣を解体・積み直しせざるを得ない事例も多い。一方で、石垣の定量的な健全性評価技術は確立しておらず、学識者等による経験的な評価に頼らざるを得ないのが実情である。こうした背景において、筆者らは20年以上に渡って城郭石垣の工学的な研究に取り組んできた。本報告では、この一連の研究の中で、特に健全性調査技術についてその概要と適用事例について紹介する。具体的には、石垣の形状測量およびレーダー探査による石垣背面の探査技術に関する技術についてこれまで得られた知見を取りまとめて報告する。

キーワード： 城郭石垣、健全性評価、測量、レーダー探査

1. はじめに

我が国には多数の城郭・城跡が現存しており、そのほとんどが観光資源として活用されると同時に、歴史的・文化財的な側面を有している。こうした城郭においては、天守をはじめとする建造物とその象徴として扱われることが多かった。近年はそうした建造物を支える土台としての石垣にも注目が集まり、各種メディアで取り上げられることも増えてきている。

日本の城郭石垣の構築技術は戦国時代に急速に発達した。現在、全国各地で目にすることができる城郭石垣の大半は、安土桃山時代から江戸時代初期にかけてのおおよそ80年の間に構築されており、築城後400年以上が経過する中での環境変化や自然災害などの影響による老朽化が顕著になってきている。また、近年は東日本大震災や熊本地震などの大規模地震や台風等の豪雨による石垣の崩壊が頻発しており、石垣の安定性を評価する技術に対する関心が急速に高まっている。

こうした状況において、土木建造物としての石垣の工学的な研究については、天守などの建造物に対するものと比較して限定されており、その安定性を評価する方法や設計手法は確立していないのが現状である。この要因としては、伝統的な石垣は漆喰やモルタルなどにより石材を一体化しない「空積み」によるものであることと、こうした建造物の工学的な安定性を正確かつ簡便に評価できる手法が確立していないことが最大のものと考えられる。

上記のような背景を受けて、筆者らは石垣の維持管理および積み直し時に必要となる、調査技術、安定性評価技術、設計技術等の開発に20年以上に渡り取り組んでおり、その成果は実際の工事において、継続的に活用されてきた。本報告では、文化財として価値を有する石垣

について、その特徴について整理した後に、これまでの研究成果の中でも、石垣の調査技術について紹介するものとする。すなわち、石垣形状の測量技術と内部構造を探査する技術について整理するものとする。

なお、石垣の構造的な安定性、特に地震時の安定性評価技術と解体修理および補強に関する技術については、改めてとりまとめる予定である。

2. 城郭石垣の特徴

日本の石垣が、ピラミッドや万里の長城などの他の国々に見られる巨大石造構造物と最も異なる点は、日本の石垣が立体的な曲面構造からなることである。具体的には、我が国の石垣は、その傾斜を決める「法（のり）」に加えて、勾配自体が途中で変化して断面が曲面となる「反（そり）」を有している縦断形状を示していることと、石垣を横断面でみた場合も両端の角部に比較して中央部が凹となる「輪取り（わどり）」が見られる場合も多く、石垣全体として3次元的な曲面構造から構成されている。写真－1に「法」、「反」により構成される石垣の事例を示した。



写真－1 見事な「反り」を見せる名古屋城天守台石垣

*1 技術研究所



写真-2 石垣の三層構造

また、構造面では、石垣が築石（つきいし）と呼ばれる前面の石材と、栗石およびその背後の土砂からなる三層構造を有していることも大きな特徴である。写真-2に石垣の内部構造がわかる事例を示した。前述のように、これらの部材はセメントや漆喰等の接着剤によって接合されておらず、いわゆる「空積み」となっている。このため、石垣は部材間の摩擦力により一体化が図られており、これも構造的には大きな特徴の一つとなっている。なお、昭和以降の文化財石垣の補修においては、石材間にモルタル等を利用した例もあるが、現在においては、こうした近代工法による補修は、原則として行われていない。

日本の城郭石垣は、戦国時代に日本各地で城郭が構築された約80年間に急速に発達したものであることは前述したが、これ以前にも中世山城や古代の水城（みずき）などのように、石材を積み上げた構造物は存在していた。しかし、これらにおいては、日本の城郭石垣の特徴とした曲面構造や三層の内部構造などは見られないこともあり、一般的には城郭石垣と分けて考えられている。このため、本報告においても検討の対象は、戦国時代以降の天正年間（1570年代）以降とする。

城郭石垣の構築技法は、歴史的に古い順に、天然石をそのまま利用する「野面積み（のづらづみ）」、天然石を割ることで整形した石材を用いる「打ち込み接ぎ（うちこみはぎ）」、その加工精度を向上させた「切り込み接ぎ（きりこみはぎ）」に分類される（写真-3）。このうち、野面積みは高度な石材の加工技術は必要としない反面、個々の石材の組み合わせに高い技能が必要である。これに対して、石材の加工度合いが最も高い切り込み接ぎは石材の大きさや形状が規格化され、個々の石材の噛み合わせ



野面積み 打ち込み接ぎ 切り込み接ぎ

写真-3 石積み技術の分類

表-1 石垣の構築技術の変遷¹⁾

年代		16世紀			17世紀		18世紀
元号		天正以前	天正	文禄	慶長	元和 寛永 正保	慶安~化政
加工状態	野面積み	---				→	
	打ち込みはぎ			---		→	
	切込みはぎ				---		→
断面形状		反り					→
工学的 特長	安定 要素	石材間の摩擦	大				小
		アーチ効果 ^{4), 11), 12)}		小			大
	構造体	不連続体の一体化の度合い	小				大

よりは、構造体を一体化することで安定性を確保するものである。打ち込み接ぎは、この二つの中間に位置付けられる。表-1に年代による石材の加工状況および構造体として特徴をまとめた¹⁾。この表からわかるように、城郭石垣は年代により構築法が変遷しており、対象となる石垣の築城年代を知ることは、石垣修理においては、その石垣の存在する地域の特徴と合わせて非常に重要である。

なお、徳川幕府が一国一城令を発布した慶長20年（1615年）以降は、大規模な築城はなくなり、石垣普請は、部分的な修理や改築などの規模の小さな石積みが主体となり、石垣構築の技術については、むしろ停滞・低下するようになる。このことは、ある技術は実際に利用される場面が減ると、その水準を維持することが難しいことを示しているものと考えられる。

3. 石垣の形状調査

城郭石垣の現況把握においては、従来は写真測量による図化手法が広く用いられてきた。その成果は図-1に示したような立面図として整理され、合わせて一定間隔で縦断面図として表現されることが一般的である。従来は、通常地上測量や写真測量が広く用いられてきたが、水堀に面した石垣や急斜面に面した山城石垣など、条件が厳しいところも少なくないことから、ラジコンヘリなども用いられてきた。これに対して、近年のレーザー測量や3次元モデリング技術の急速な進化に伴い、こうした

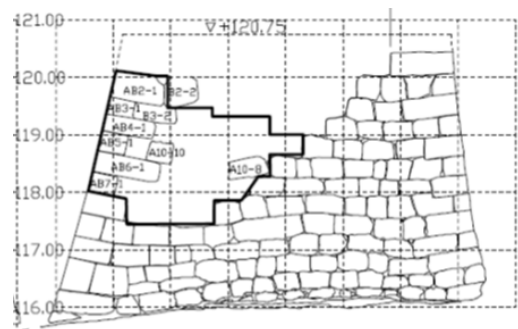


図-1 石垣修理における立面図の例



写真-4 UAVによる山城石垣の写真²⁾



図-2 UAV撮影画像による3次元モデル²⁾
白線の範囲が写真-4の石垣部分

最先端技術が用いられる機会も増えてきた。こうした技術は3次元形状を正確に把握することが可能であり、曲面形状からなる城郭石垣の正確な形状を知る上では極めて有効である。さらに、近年ではUAVの普及により、より簡便に石垣全体のモデル化ができるようになってきた。UAVにより撮影した山城石垣の写真と、それを用いた3次元モデルの事例を写真-4および図-2に示す²⁾。なお、写真-4で示した石垣は図-2からもわかるように、急峻な斜面に面しており、この石垣の全体像を正面から俯瞰することは、UAVによる低空からの写真以外には極めて困難である。また、この事例では、写真撮影の時期は、樹木の葉がなく降雪の影響がない季節に限定された。こうしたことから石垣の外観調査においては、対象となる地点の地形や気候などの地理的な条件にも十分考慮した計画を立案する必要がある。

なお、上述したように、測量や3次元モデリング技術による調査は、一般的な石垣の調査・設計のみならず、地震や豪雨により被害を受けた石垣の実態把握や災害復旧工事などで広く活用されている。

4. 石垣の内部構造の調査技術

これまででは石垣の形状把握の技術について述べてきたが、石垣の内部構造を知ること、安定性を評価する上で重要である。一方で、石垣自体が文化財であるために破壊を伴うボーリング調査が大きく制限されていることも

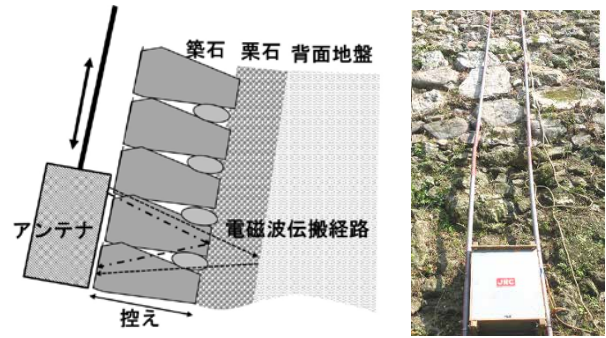


図-3 地中レーダーによる石垣背面探査の概要
左：探査概要 右：レーダー探査の状況

表-2 比誘電率と電磁波伝搬速度

物質	比誘電率 ($\epsilon \gamma$)	伝搬速度 (m/s)	物質	比誘電率 ($\epsilon \gamma$)	伝搬速度 (m/s)
空気	1	3×10^8	平均的表土	16	7.5×10^7
乾燥した砂	4~6	$1.2 \sim 1.5 \times 10^8$	花崗岩	5~8	$1.1 \sim 1.3 \times 10^8$
淡水飽和砂	30	5.5×10^7	石灰岩	7	1.1×10^8
淡水飽和シルト	10	9.5×10^7	コンクリート	5~10	$0.9 \sim 1.3 \times 10^8$
淡水飽和粘土	8~12	$8.7 \sim 11 \times 10^7$	アスファルト	2.7	1.8×10^7
ローム	30~36	$5 \sim 5.5 \times 10^7$			

あり、石垣の内部について正確に知ることは難しいのが実情である。こうしたことから、筆者らは地中レーダーによる探査を試み、これまでに基礎的な実験^{3),4)}などを経て、複数の城郭石垣の内部構造の評価に適用してきた^{5),6)}など。以下にその概要を示すこととする。

4.1 地中レーダーによる石垣背面調査の概要

地中レーダーは、埋設管や地下空洞の探査を目的に開発された探査法で、送信アンテナより特定周波数の電磁波を発信し、探査対象からの反射波を受信アンテナで受信することで、その深度を把握するものである(図-3)。通常、送・受信アンテナは一体化されており、このアンテナユニットを移動させながら送受信を行うことで、地中の断面構造を知ることができる。このとき、反射面までの距離は反射波の到達時間(t)と電磁波伝搬速度(c)から求められるが、地中の電磁波伝搬速度は電磁波が透過する媒質の比誘電率($\epsilon \gamma$)に依存することとなる。この比誘電率は、真空中における電磁波の誘電率に対する媒質の誘電率のことであり、主な媒質の標準的な値を表-2に示した。

石垣の調査の場合は、求めるものが築石の控え(石材の長さ; 図-3参照)や築石背面の空洞の有無である場合は、築石の岩種により比誘電率を決定するが、栗石層の厚さや栗石層と背面地盤との境界を求めたい場合は、土砂の値を用いたほうがよい場合もあるので、比誘電率



写真-5 レーダー探査実施箇所（地点①）



写真-6 築石（野面石および打ち込み接ぎ）

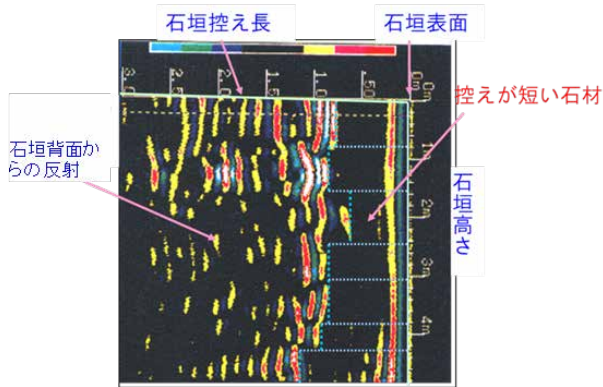


図-4 築石での電磁波の反射概要と地点①の築石



写真-7 レーダー探査箇所（地点②）

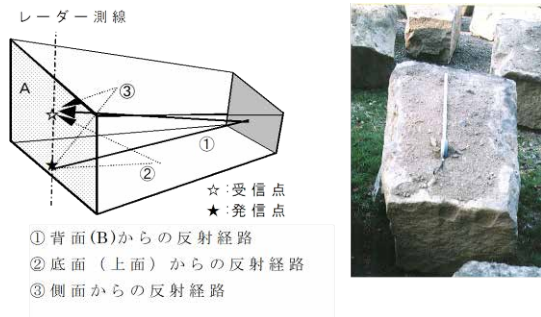


図-5 レーダー探査結果（地点①）

の値は探査目的に応じて決定する必要がある。

4.2 築石の控えの調査 - 探査精度の検討 -

地中レーダーによる石垣背面調査の精度について検討するために、解体積み直しが予定されていた石垣で事前に探査を行い、解体後に実際の築石の控えを測定し、両者を対比した³⁾。調査対象石垣を写真-5に、その結果の例を図-4に示した。

写真-5に示した石垣は、築石の形状が図-5（右）に示すように、直方体に近い間知石による石垣である。ここで、築石に向けて発信された電磁波は、図-5（左）に示したように、図中の②、③の経路で側面や上下面においても反射するが、背面からの反射（経路①）が最も

強くなる。この結果、図-4に示した反射画像では、石垣表面からの反射波に次いで最初に見られる強い反射が背面からの反射となり、この位置が築石の控えに相当することとなる。ここで、石材内部を伝搬した電磁波の一部は、築石の背面からさらに背後の栗石中にも到達することから、控えの背後に見られる弱い反射波も注意深く判読することで、背面構造を推定することができる。ただし、図-5において、「控えが短い石材」の直上の築石の背面には、繰り返し強い反射波が出現するが、このように一定周期で見られる反射波は同一反射面（この場合は石材背面）から繰り返し反射された多重反射である可能性があるため、判読においては注意が必要である。

一方で、写真-6に示したような野面積みに用いられるような天然石に近い築石では、控え自体が不明瞭であり、築石の側面や上下面と背面からの反射強度の差が小さくなるため、探査精度も当然のことながら低下することが予想される。このことを検証するために、地点①に比較して加工度合いが低い築石が多い地点②（写真-7）において、同様の探査を行った。両者の結果を比較したものが図-6である⁴⁾。

この図からわかるように、探査精度は石材の加工度合いより大きく異なることがわかる。すなわち、地点①のように、加工度合いが高く反射面が明瞭である石材については、一部で誤差が大きくなるものの、概ね±5cm程

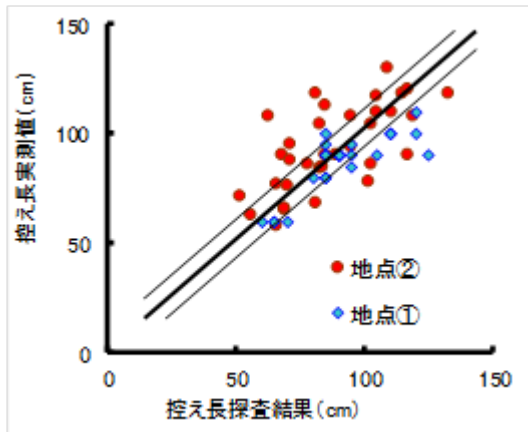


図-6 レーダー探査による探査精度の検討⁴⁾



写真-8 石垣背面探査実施地点
左：健全部，右：劣化部

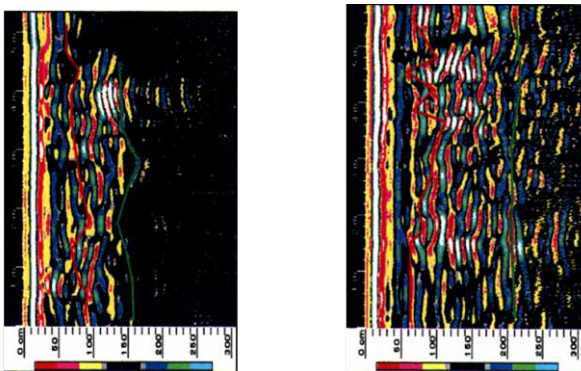


図-7 背面地盤構造の違いによる探査結果の比較⁴⁾
左：健全部，右：劣化部

度での控えの把握が可能であるが、地点②のように加工精度が低い石材では、測定のばらつきも大きくなり、探査誤差も最大で±30cm程度と大きくなる。なお、ほぼ天然石からなる野面積みの場合は、さらにばらつきが大きくなることが予想され、こうした石垣での探査結果については、個々の築石の控えというよりは、石垣全体としての築石と栗石層の境界の把握と考えた方が適切であると言える。

以上のように、レーダー探査によって築石の控えを推

定することは可能であるが、その場合においては、対象となる石垣を構成する石材の加工度合いを考慮したうえで、探査結果を評価することが重要であることがわかる。

4.3 石垣背面地盤状況の推定

石垣の安定性評価や補修工事においては、築石の控え以外に、その背面の栗石層の厚さや築石背面の空洞の有無などが問題となることが少なくない。こうした情報をレーダー探査で把握するために、写真-8に示した地点において探査を行った。この地点では、数年以内に積み直し工事が実施された部分(写真-8左：健全部)と江戸期以降の石垣はほぼそのまま残存し、部分的に石垣表面に緩みや変状が生じている部分(写真-8右：劣化部)が隣接している。このことから、積み直しが実施された場所を健全部とし、そこに隣接する部分を劣化部として、探査を実施した⁴⁾。

両地点での探査結果を比較したものが図-7である。この図から、健全部(左)では、築石と裏栗層の境界はやや不明瞭であるものの、裏栗層の背面の地盤からはほとんど反射が見られず、石垣の三層構造が明瞭であることがわかる。

一方、劣化部(右)では特に栗石層と背後の地盤との境界が不明瞭であり、地盤中からも多数の反射波が確認される。このデータからは、栗石層への背面土砂の流入や長年に渡る雨水の浸透などによる地盤の緩みなどが発生していることが推定される。

4.4 山城石垣での背面構造の推定

写真-9に示した山城では、個々の築石の控え以上に、石垣の全体的な構造が課題となった。具体的には、対象石垣の中央上部に存在する大きな築石と想定される部分、独立した築石であるか、地山に連続しているものなのかについての確認が必要となった⁶⁾。すなわち、当該の築石が独立した一つの石材の場合は、この石材の重量を楊重し運搬する能力を有する重機が必要となるが、そうでない場合は、より小出力の重機での作業が可能となるため、施工計画を立案する上で、重要な検討課題となったものである。



写真-9 山城での探査地点(点線：測線)

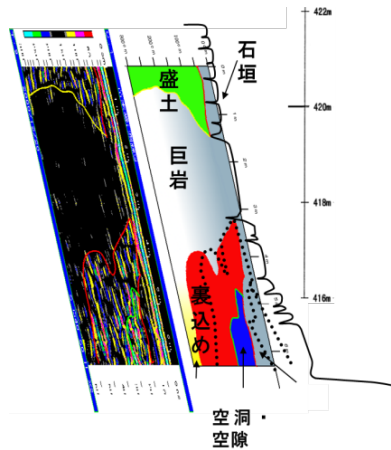


図-8 山城(写真-9)の探査結果⁶⁾

探査結果は、図-8に示したように、対象となった巨石の背面には、明瞭な反射は認められず、地山と一体化していることが想定され、その後の解体工事において、この探査結果が妥当であったことが確認されている。

この事例は、やや特殊なケースともいえるが、山城での石垣補修工事では、急峻で狭隘な作業スペースや搬入路の関係で大型の重機等を用いることが困難な場合も多く、事前に背面構造を確認しておくことが、施工計画の立案上も極めて有効であることを示すものである。

レーダー探査による石垣背面の調査結果は、築石の控えの把握、背面の栗石層の厚さや空洞の有無の確認などに加えて、安定解析のためのモデル作成⁷⁾や鉄筋挿入工法の設設計⁸⁾にも活用されている。

5. まとめ

伝統的な石垣の修理・復元においては、「真実性(authenticity)」と「可逆性(removable)」の両方が求められている。このうち、真実性とはその石垣が有する本質的な価値を示すものであり、特に石垣の解体・積み直しのように、現在ある石垣の一部または全体を解体(破壊)する場合において、最も大切なものとして守るべきもので、極力現状のまま後世に残すべきものを示す。例えば、ある石垣の中で、一部分のみ築城期の構造がそのまま残っており、後世の修理等による改変が行われていない領域や、その城郭の石積みの特徴的にみられる構造などがこれに該当する。また、石垣の根石と呼ばれる基礎の部分には、築城期の構造がそのまま残っていることも多く、こうした部分を極力保全することに腐心する事例も多い。

一方、復元性とは、将来的により適切な修理技術が発明・考案された場合に、元の状態に戻せることである。このため、セメント等による補修は一旦実施してしまった場合、完全に元に戻すことが難しいため、文化財補修で適用が避けられることが多い。

文化財石垣の修復においては、以上のような制約条件がある上、特に内部構造に関する情報が極めて限定されていることが多い。このため、通常の土木工事以上に、事前の調査・測量が重要となるが、前述したように、ボーリングや試掘といった破壊を伴う調査自体も極力避けることが求められる。こうした背景において、石垣の外観を精密に調査する測量技術や内部構造を非破壊で把握するレーダー探査などの技術に対する期待がさらに向上することとなる。

本報告では、この二つの技術について、これまでの研究開発成果をまとめてきたが、近年、測量・計測技術の発達は加速度的に進んでおり、レーダー探査においてもデータ解析および内部構造の可視化のレベルは格段に向上している。こうした背景を受けて、伝統的な技術を重んじる文化財関係者においても、最新の測量・計測技術への注目が集まっており、修復事業を担当する技術者には、最新の調査・計測技術についての知識についても求められている。

一方で、最新技術を用いて得られた情報を適切に評価するうえで、石垣の内部構造や構築方法に関わる知識が不可欠であることも、これまで述べてきたとおりである。このため、歴史や文化財の専門家の話を真摯に聞くことと合わせて、数多くの石垣を実際に見て、可能な限りその内部構造についても確認することが必要であると考えられる。

以上のことから、文化財石垣の補修・復元に関する調査を行う技術者においては、自身の専門とする調査・計測に関する知識や技術に加えて、石垣の持つ文化的な意義や歴史的な背景についても自ら学んでゆく柔軟な姿勢が求められていると言って過言ではない。

参考文献

- 1) 山本裕之：文化財城郭石垣の工学的研究と安定性評価手法に関する研究，関西大学学位論文，p. 184，2011
- 2) 笠博義：文化財保全における空間情報の活用について 城郭石垣保全での UAV の活用，第 8 回横幹連合コンファレンス論文集，E-1-4，2017. 12
- 3) 笠博義，平井光之，大澤克比古，荘林茂徳，小林力：城郭石垣の健全度診断への非破壊調査技術の適用性について - 電磁波を利用した石垣控え長の測定 -，第 34 回地盤工学研究発表会論文集，pp. 201 ~ 204，2000
- 4) 笠博義，平井光之，則松勇，関根富昭，大澤克比古，荘林茂徳，小林力：城郭石垣の健全度診断への電磁波反射法の適用，日本応用地質学会平成 12 年度研究発表論文集，pp. 353 ~ 354，1999. 7

- 5) 前田信行, 笠博義, 平井光之, 則松勇, 大澤克比古:
電磁波反射法による城郭石垣の非破壊健全度調査技術, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, VI-129, pp. 258 ~ 259, 2000. 9
- 6) 原益彦, 笠博義, 則松勇, 大澤克比古: 城郭石垣補修に向けた非破壊健全度調査技術の適用, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, CS5-004, 2001. 10
- 7) 笠博義, 西田一彦, 西形達明, 森本浩行, 阿波谷宜徳, 山本浩之: 個別要素法による城郭石垣の安定性解析の試み, 土木学会土木史研究講演集, Vol. 27, pp. 45 ~ 51, 2008
- 8) 笠博義, 西形達明, 西田一彦, 和田行雄, 藤川直也:
鉄筋挿入による城郭石垣の補強, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, VI-337, 2018. 9

Engineering research of castle masonry
-Surveying technology of masonry-

Hiroyoshi KASA

In recent years, the collapse of castle masonry due to natural disasters has increased in Japan. Numerous masonries in castles require repair due to aging. Technology to evaluate the soundness of such masonry has not been established. We have conducted engineering research of castle masonry for more than 20 years. In this report, we introduce castle masonry soundness survey technology. Especially, both the technology for measuring the shape of the masonry and for investigating the inside of the masonry by radar exploration are summarized.