

石垣の工学的研究 —その4 石垣の修理—

笠 博義^{*1}

城郭石垣の修理には、変状した石垣を解体して積み直す「解体・積み直し」と、既に消失した石垣を資料に基づき構築する「復元」とがある。筆者らは、こうした方法とは別に、既存の石垣を解体せずにその安定性を向上させる方法として「間詰石工」、「鉄筋挿入工法」を実施してきた。本報ではこうした石垣の修理方法について、実際の施工事例をもとに、各工法の概要と特徴について紹介した後、実際の工事の手順について整理するものとする。

キーワード：城郭石垣，文化財，修理，補強

1. はじめに

日本の城郭石垣の大半は構築後400年以上を経過しており、経年劣化に加えて、地震や豪雨などの自然災害による影響を繰り返し受けてきた。加えて、石垣の前面は城の防御上の理由から水濺とされている例も多数見られるが、こうした場所は元来の沼沢地などの軟弱地盤が大半を占め、石垣構築後に圧密沈下が継続することで、石垣全体が変状することも少なくない。また、海岸に面した城郭では、砂地盤上に石垣が築かれることも多く、地盤の沈下に加えて潮の干満による細粒分の洗い出しが石垣の変状要因の一つとなった高松城のような事例¹⁾もある。

上述のような地盤条件に対しては、伝統的な石垣の構築技法として、胴木の施工（写真－1）や石垣の勾配自体を緩くするなどの対策が取られてきたことが石垣の伝統的技法をまとめた古文書にも記されている²⁾が、こうした対策のみでは変状の進行を完全に止めることは困難な場合も多いものと考えられる。さらに、明治以降に多くの城郭において天守等の建造物が解体され、新たな近代的な建物が作られると同時に、周辺も公園などに姿を変えるなど、急激に環境が変化した。こうした変化は、石垣の上載荷重の変化や雨水の浸透や地下水の流れにも影響を与え、加えて多数の樹木が石垣直上に植栽されることによる根の伸長などにより、石垣の不安定化を促進したものと考えられる。

このように、我が国の城郭石垣の多くは、現在、元来の地盤条件に加えて、その後の環境変化や自然災害による影響を避けることは難しく、さらに変状が進行する恐れがある。ここで、伝統的な石垣は空積みであることから、変状が進行した場合や部分的に崩れた場合などは、一旦解体して積み直しを行うことで、その時々の保存と



写真－1 石垣下部に出現した胴木の事例

活用の考え方に沿って、ある時は現状を維持し、ある時は姿を変えながら、今日までその姿を留めてきたものと思われる。

こうした中で、城郭石垣の文化的価値が近年再認識されている。すなわち、天守復元等の動きの中でも、貴重な遺構としての石垣を適切に保護していこうという動きが多くのところで見られるようになった。これに伴って、石垣の変状対策においても、極力伝統工法により、その価値を伝えていくことが求められるようになっている。

一方で、東日本大震災や熊本地震などの自然災害による多数の石垣の被害状況を目の当たりにした結果、観光資源としての石垣の安全性が、より強く求められるようになり、伝統的な価値の保全と確実な安定性の確保という、半ば相反する条件への対応が要求されている。

以上述べてきたように、伝統的な石垣の文化財としての石垣を正しく後世に伝えていくためには、歴史的・文化的価値を守りつつ、その安定性も同時に確保していくことが求められている。本報告では、こうした要請を受けて、伝統的な技法を活用しつつ安定性を確保する

*1 技術研究所

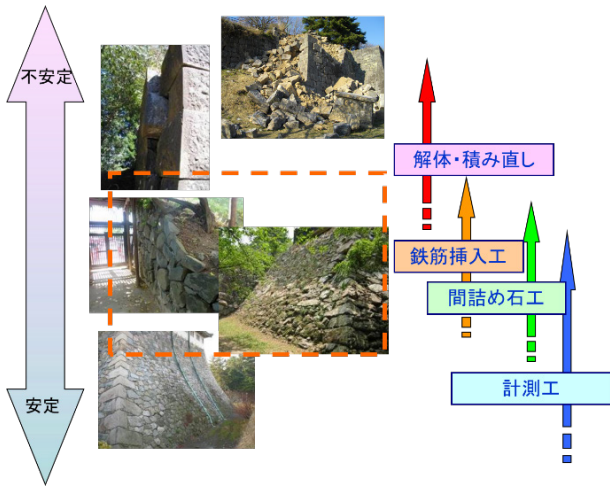


図-1 変状レベルに応じた対策工

技術のうち、筆者らが取り組んだいくつかの工法について紹介する。

2. 石垣修理の種類

変状が進行して不安定化が進行した石垣に対しては、その程度に応じた対策を施すことが必要である。図-1には石垣の変状度合いと対策工についての概念を示した。この図に示すように、地震等の災害で既に崩壊または大きな変状が生じた石垣や、孕み出しなどが顕著になった石垣は、解体・積み直し工が選択される。一方で、変状がごくわずかで築石の隙間が目立つ程度や孕み出しがわずかである場合は、定期的な計測等により、変状の進行速度を確認し、大きな進行が見られない場合は現状を維持していくこともある。

上述した変状の中間に相当する状況を呈する石垣に対しては、その石垣の崩壊による人的・物的な被害が発生する可能性、文化財的・観光資源としての価値などさまざまな要因を考慮して対策が取られることとなる。例えば、石垣の崩落による人的な被害を最優先し、緊急性が高い対策の場合は、落石防止ネットの設置、土嚢や蛇籠等による抑え工等が適用されることがある。ただし、これらの方法は石垣の景観自体を大きく変更し、観光資源としての石垣の価値も低下させることから、あくまでも仮設的な対策であることが多い。なお、第三者の目に触れない山城の石垣等では、長期に渡り落石防護ネット等による対策が取られることもある。

また、石材（築石）の隙間を埋める間詰石の抜け落ちが進行した石垣に対しては、第4章で説明する間詰石工³⁾が有効な場合もあり、さらに積極的に補強を行う場合は、第5章で説明する鉄筋挿入工⁴⁾も有効な手段の一つである。これらの工法は、石垣の外観を含めた文化財的な価値に影響を与えず、現状の石垣構造も大きく変更する

ことがないことが特徴であるが、その効果には限界があることに留意する必要がある。

なお、近年、主に石垣の耐震性を向上させる目的で、石垣の裏栗層および背面地盤にジオテキスタイル等の近代材料を敷設する補強工法が用いられることが増えてきたが、この対策は、解体・積み直し時のみ適用可能な方法であることから、ここでは詳述しないこととする。

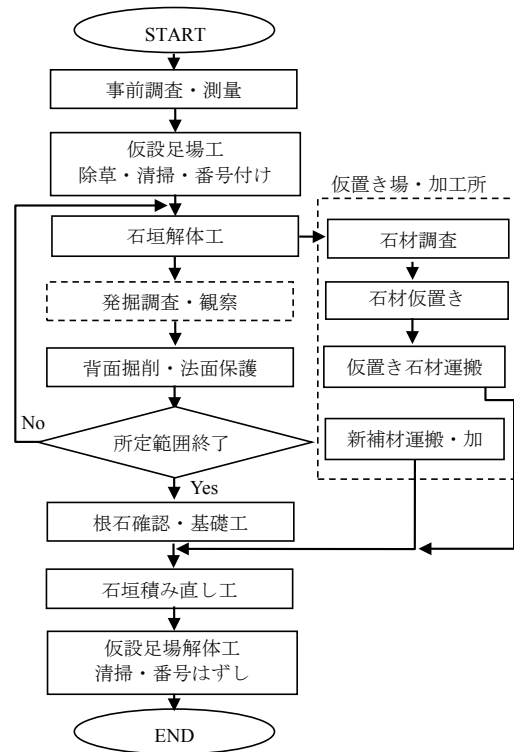


図-2 石垣の解体・積み直しの流れ⁵⁾

3. 解体・積み直し

石垣の修理では、変状が進んだ部分を一旦解体し、変状が発生する前の状態に積み直しを行うことが一般的である。積み直し工事の流れを図-2に示した⁵⁾。この手順については、文化財担当者向けの手順書⁶⁾に詳しく述べられており、ここではその概要のみを示している。

(1) 番号付け

最初に、解体前に個々の築石に番号を割り付ける。この番号は、かつては石材に直接ペンキ等で記載していたこともあったが、シールやプレートに番号を記入したものを貼り付けることが増えている。こうした番号の掲示方法は、石垣の解体から積み直しの期間が短い場合は、大きな問題とならないが、これが長期に及ぶ場合は仮置き中の素材自体や接着剤の劣化による剥がれ落ちにも十分に注意する必要がある。なお、このとき間詰石や介石も極力元の位置に戻せるように、築石同様に番号付するか、築石と近い位置に仮置きするなどしておくことが多い。



写真-2 石垣の刻文



写真-3 背面地盤内の遺構（施工面）



写真-4 石垣背面の保護工の例

(2) 築石の解体

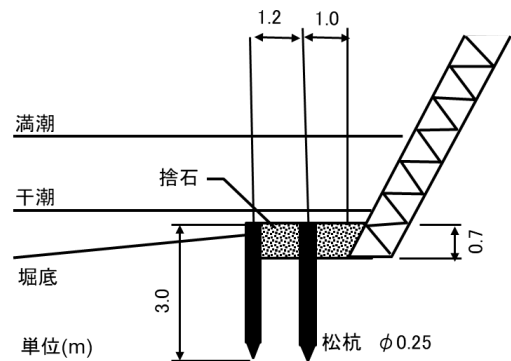
番号付けが終わり、クレーン等により取り外した築石は寸法や重量、外観等を記録し、周辺の石材との接触状況なども確認しておく。特に石材に割れや破損などが確認された場合は、後述する再利用の可否の判断に役立つように、詳細に記録をしておく。こうした記録を施工者側で行う場合は、文化財の専門家の指示に従って過不足がないように行うこととなる。ここで、写真-2のような刻印、矢穴などが見られることもあるが、こうしたものの記録は専門家が行うのが一般的である。なお、最近では個々の築石の形状を3Dスキャナ等により計測し、デジタルデータとして保存することも行われるようになっている。

(3) 裏栗層の解体

裏栗石に対しては、個々の番付までは行わないが、裏栗石の形や粒径分布、敷設幅、栗石の岩質などを記録しておく。さらに、現場密度試験によって栗石層の単位体積重量を計測しておく、後に変状が発生した場合などに、その原因を検討する上で重要な知見を与えることがある。また、解体の過程で、栗石層の中に様々な遺物が発見されることもある。こうした遺物は、一般に歴史的・文化的に重要な意味を有すると考えられることから、一旦工事を中断して専門家の確認が必要である。特に重要なものが出現した場合は、詳細な調査が行われる場合もあることから、解体工事の工期にはある程度の余裕を見込んでおく必要がある。また、裏栗層の中に築石と同程度の大きさの石材が確認されることもあるが、こうしたものが単なる大きな裏栗石なのか、特別な機能を期待したものなのかは判別が難しく、こうした場合も文化財専門家の確認を求める必要がある。

(4) 背面地盤の掘削

背面地盤は盛土の場合と自然地盤の場合があり、いずれも極力掘削を行わないようにすることが一般的である。施工時の安全性確保のために、止むを得ず掘削する場合もその範囲を極力小さくする必要がある。なお、盛土内にも過去の施工面などの遺構(写真-3)が残されている場合もあり、掘削時には細心の注意が必要である。

図-3 枠工の概要（高松城）⁸⁾

背面地盤を掘削したままの状態が長期間継続する場合は、浸食等が進まないように確実に養生する必要がある。写真-4には背面地盤の養生のため、鉄筋による法面補強を行った事例⁷⁾を示した。

(5) 根石の補強

石垣の解体が終了した後に、積み直しが行われるが、一般的には築石の最下段部(根石)は解体しないことが多い。これは、根石はその石垣の施工基面に相当し、ここに手を加えると、石垣全体が当初のものとは全く違うものとなる恐れがあるためである。本来、石垣下部の地盤自体が沈下した場合は、石垣の基礎構造の強度を確実に確保するためには、地盤の補強などを行うことが考えられる。一方で、文化財的な価値を守るうえで、近代工法の使用はできる限り控えることが望ましく、近代工法である地盤改良工は、通常適用できない。

以上のようなことから、根石部の補強が必要となった場合は、根石前面を抑えることで安定性を保つ方法がとられる場合がある。そうした工法の一つに「枠工」^{1,8)}があるが、これは図-3に示したように、根石前面に木製の杭を打設し、石垣と杭の間に捨て石で充填するもので、根石部が前面にすべり出すのを抑制する効果が見込まれる工法で、伝統的な工法の一つであると捉えることができる。

(6) 積み直し

石垣の積み直しは、築石、裏栗石、背面盛土を下から順次施工していくこととなる。築石は、設計勾配に合わ

表－1 石垣修理における事前調査の概要¹⁰⁾

調査項目	目的	手法
精密測量	工事対象範囲の平面図，石垣の立面図を作成し，石垣の形状や孕み出し等変状の範囲などを確認する。	・平板測量（平面図），・写真測量（立面図）， ・断面測量，・3D スキャナ
地盤調査	石垣の背面地盤の構成・強度，地下水位，裏栗層の分布範囲，遺構の有無を調査する。	・ボーリング，標準貫入試験，・表面波探査
石垣背面調査	石垣の控え長，栗石厚さ，背面空洞の有無や分布状況を調査する。	・レーダー探査，・ファイバースコープ観察
根石調査	水堀下の根石の深度，水深，落石，水中の遺物等について確認する。	・ポール突き刺し法による調査

せながら，隣接する石材との接触状況もずれないように一石ずつ丁寧に設置していく。この作業には熟練の技能が必要であり，伝統的石材の施工実績のある石工以外では施工できないのが実状である。築石の位置や傾きなどの微調整は介石の配置等のみで行い，築石自体を部分的に加工するなどは原則として許されない。

なお，石垣の勾配は丁張を用いて管理していくのが一般的であるが，高石垣では丁張自体を継ぎ足していくことも必要になることがある。

裏栗層は，長期に渡って栗石層に流入した土砂を除去したうえで充填していく。なお，裏栗層が極端に狭い場合は石垣の安定性確保で問題となり得ることが，遠心載荷実験からも指摘されている⁹⁾。逆に裏栗層が厚すぎる場合は，地震時に栗石が流動化し不安定化する可能性もあることから，文化財としての価値を失わない範囲で裏栗層の厚さを変更する場合もある。

背面盛土については，掘削土自体に必要な強度が期待できない場合は，石灰等を混合することで強度確保を行うことがあるが，これも「三和土」や「二和土」として知られている伝統工法の一つである。

(7) 新補石材

築石の中には，完全に割れている場合や，風化が進み脆弱化しているものもあり，再利用が難しいものが含まれている。こうした場合，同等の石材で同じ形状に加工した新補石材と取り換えることもある。こうした新補石材の加工は，旧材の型取りを行い，寸法・形状ともに同等に加工していくこととなるが，この作業も熟練した石工以外では難しい。

(8) その他－計測工－

石垣工事では，上部から石材を取り外すほかに，石垣の前面に盛土を行うこともあり，いずれのケースでも石垣に作用する荷重条件が変化し，石垣が不安定化することがある。具体的には，石垣の解体時には除荷により地盤は全体的に上方および前方に変位する傾向にあり，これに伴い築石に変状が生じることがある。石垣前面に盛土を行う場合は，その基礎部分が沈下することにより石垣が前方に変位することもあり，工事の進行に伴いこうした変状は大きくなることが多い。

このような変状が予想される場合は，石垣および背面

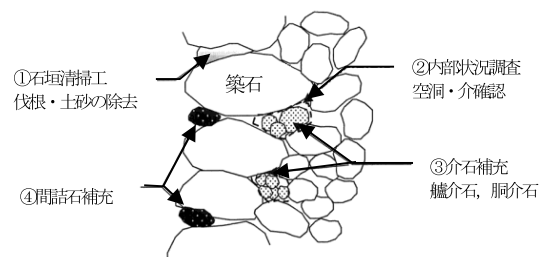
地盤の変位を計測し，石垣の安定性を確認しながら工事を進めることで安全な工事の進行が可能となる。具体的には，光波測量などによる石垣の変位や孔内傾斜計等による地盤の変状を動態観測することが有効である¹⁰⁾。石垣工事における事前調査について表－1に整理した。さらに，予め数値解析などにより変位量を予想しておくことで，管理基準値を設けて，工事にフィードバックする情報化施工が有効であると考えられる。

なお，こうした計測を実施する場合は，石垣の解体に伴い逐次明確になる石垣構造や背面地盤の情報を加えた解析や評価を行うことで，より高い精度での安定性を確保することができる。

4. 間詰石工

築石同士の間隙を埋める形で設置される間詰石は，従来は城外からの侵入者の防止などが主な機能とされてきたが，石垣の安定性においても，築石のずれ防止や地震時の変位抑制などの機能があるものと考えられる。また，築石の間隙に土砂が流入し，植生が繁茂することもあるが，こうした石垣では，植物の根の伸長や，目詰まりによる土圧や水圧の上昇により石垣内部の介石も変位することが考えられる。こうしたことから，抜け落ちやずれが起きた間詰石や介石を補充することで，低下した石垣の安定性を回復させることが期待できる¹¹⁾。

間詰石工³⁾は，このように間詰石や介石を補充することで，築石間の力の伝達を確実なものとするとともに，その方向も修正するものであり，その結果として石垣の安定性を回復するものである。その概要を図－4に，工事の流れを図－5に示した。以下に各工事ステップの概要を示す。



図－4 間詰石工の概要³⁾

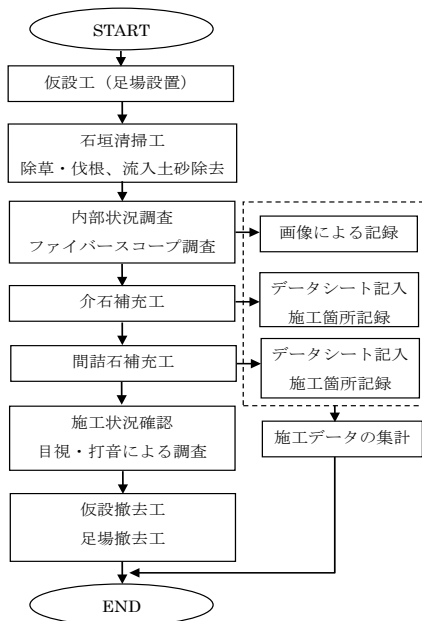


図-5 間詰石工の流れ³⁾

- ① 準備工：石垣表面の主な植物を伐採し，対象石垣の前面に仮設足場を設置する。
- ② 石垣清掃工：石材間に入り込んだ根や流入した土砂をバール等で除去する。
- ③ 内部状況調査：根や流入土砂を除去した空隙を観察し，主に介石の補充の必要性などを検討する。観察にはファイバースコープ等を用いるのが効果的である。石垣間隙の観察写真を写真-5に示した。
- ④ 介石補充工：築石の間隙から新たに石材を投入し，バール等を用いて可能な限り固定する。（写真-6）。この作業は周辺の石材への影響を考慮して慎重に行う必要がある。なお，新たに補充した介石については，データシート等に記録するとともに，後世の補充材であることを示す何らかのマークをしておくことが望ましい。



写真-5 ファイバースコープによる観察画像
築石背面に空隙が存在していることが確認できる



写真-6 間詰石工の作業状況

- ⑤ 間詰石補充工：築石の表面に生じた間隙に間詰石を補充する。このとき，間詰石のみで上の築石の全荷重を直接受けることがないようにすることと，石垣の風合いを損ねることがないように配慮する必要がある。また，補充石については介石と同様に記録をとり，識別可能なマークを付加しておく。
- ⑥ 施工状況の確認：上記の作業が終了した後，間詰



写真-7 間詰石工実施前（左）と実施後（右）の状況

石の状況を目視および打音調査で点検し、浮石等がないことを確認する。

実際にこうした工事を実施した石垣の施工前後の写真を写真-7に示す。この写真に示したように、間詰石工により、石材間の間隙は充填され、安定性が向上したものと考えられる。また、石垣全体の景観的にも違和感がなく、文化財的な価値も保っていると判断される。

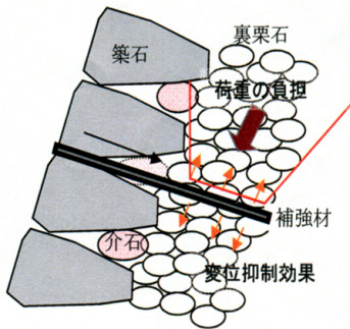


図-6 鉄筋挿入工法の概要

5. 鉄筋挿入補強工

石垣の鉄筋挿入工法は、石垣表面の築石の隙間から鉄筋を挿入することによって石垣を補強するものである⁴⁾。

この方法は図-6にその概念を示したように、石材の隙間から打ち込まれた鉄筋（補強材）により、背面の栗石を適度に拘束して、石垣の一体化を図ると同時に、地震時による「揺すり込み」による栗石の沈下を抑える効果があることが実験により確認されている¹²⁾。こうした効果により、孕み出しなどの変形を抑制して石垣の安定性の向上が期待される。

さらに、施工実験¹³⁾から打設する鉄筋の直径は、十分な剛性を有しつつ石材間への打設時の施工性から、呼び径25mm (D25)が妥当であるとの結果が得られており、その長さについては、前述の遠心載荷実験¹²⁾等から、最低でも裏栗層の幅程度は必要であることがわかっている。

実際の設計においては、レーダー探査や各種の調査結果を参考にして、挿入する鉄筋の長さを決定し、平面的な打設間隔については、地盤の鉄筋補強工法の設計法¹⁴⁾等を参考にしながら、現地状況により決定する。

こうして、挿入する鉄筋の長さや打設位置が決定されれば、石垣前面に仮設足場を設置し、順次鉄筋を挿入していくこととなるが、石垣への影響を最小限に留め、石垣背面の介石への影響も避けるためには、写真-8に示すように、人力による打ち込みが望ましいものと考えられる。加えて、長尺鉄筋はそのまま打設することが困難であることから、適切な長さの鉄筋を打ち込みながら溶接していく方法も適用される。また、鉄筋の腐食を防止するために、用いる鉄筋には予め防錆処理を施しておく必



写真-8 人力による鉄筋打ち込み状況

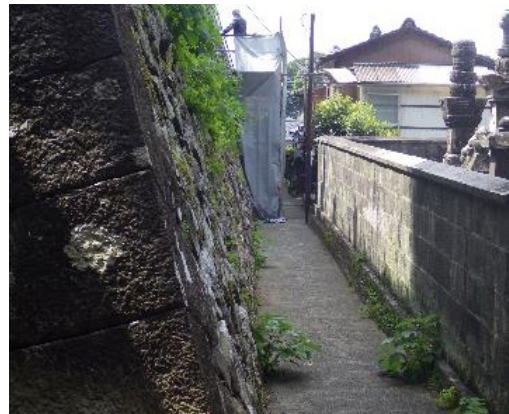


写真-9 狭小現場での施工状況



写真-10 鉄筋挿入工法施工後の状況



写真-11 鉄筋の打設状況

要がある。

実際に鉄筋補強を施工した石垣の状況を写真-9に示したが、このように石垣前面に狭隘な道路を挟んで民家等が隣接している石垣は数多く存在する。こうした石垣では解体・積み直し自体が困難なことが多く、このような条件における補修においても本工法は有効である。また、打設された鉄筋は写真-10に示すように、石垣の景観上はほとんど影響しない。

本工法は、一般的なアンカー工とは異なりグラウト材を用いていないことから、必要性が生じた時点で鉄筋を除去できることも大きな特徴である。なお、鉄筋打ち込み時に築石や介石に生じる擦過痕も、施工実験から、ごくわずかであることが確認されている(写真-11)。

以上のように本工法は、その石垣の本質的な価値(Authenticity)を確保しながら、必要に応じて元の状態に戻せること(Reversible)から、文化財石垣の補強工法として適切なものであるということが出来る。

6. まとめ

本報告では、石垣の修理方法について、一般的な解体・積み直しに加えて、間詰石工と鉄筋挿入工について、その概要を示した。これらの方法は、文化財の価値の保全と安定性の確保の両方を実現できる方法として有効な方法であると考えられる。ただし、実際の石垣修理については、各現場でその特徴に応じた工法の選択が求められることが多く、担当の文化財専門家と綿密な調整を行った上で、工事を進める必要がある。ここで、間詰石工や鉄筋挿入工については、実施事例も少ないことから、一般の解体・積み直し工以上に事前の調整が必要であると考えられる。

石垣の工学的研究と題した一連の報文^{15,16,17)}では、調査、解析、設計について、これまで各種学会等で発表してきた内容を再整理してきた。本報告は主に石垣の修理における施工法について、筆者らがその効果を確認し、実際の石垣修理に適用したものについて紹介した。各報告の内容はそれぞれ独立しているものの、全体を通して読んでいただければ、筆者らがこれまでに取り組んできた石垣を対象とした研究開発成果を概観することができるものと考えている。

文化財石垣に関する技術・研究開発については、近年の度重なる災害により、にわかに注目されるようになってきたが、まだまだ解明しなければならない工学的な課題が残されている。筆者らのこれまでの研究開発成果が、今後の石垣の工学的な研究を行う上で、何らかの参考になれば、望外の喜びである。

この一連の報告を完了するに際して、これまで、多く

の研究において、常に真摯なご指導と惜しみないご協力を頂いた関西大学名誉教授西田一彦先生、同じく西形達明先生に心より御礼申し上げます。また、多くの現場実験や実証試験でご協力を頂き、伝統的技法について丁寧にご教示して頂いた和田石材建設㈱の和田行雄様には、深く感謝の意を表します。最後に、長年にわたり石垣の調査や実験と一緒に取り組んで、知恵と汗を出し合いながら、支えてくれた技術研究所、本社、現場の皆様に対しては、感謝の気持ちしかありません。本当にありがとうございました。

参考文献

- 1) 西田一彦, 大嶋和則, 玉野富雄, 山中稔, 白石建, 笠博義, 西山秀哉, 北園和憲: 高松城天守台修復における地盤改良技術の適用について, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 27-34, 2012. 10
- 2) 石川県金沢城調査研究所: 金沢城資料叢書7 金沢城石垣構築技術史料 I, pp. 7-10, 2008
- 3) 笠博義, 阿波谷宜徳: 櫓直下の石垣補修技術について, 土木学会土木建設技術シンポジウム2006 論文集, pp. 73-78, 2006.
- 4) 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部門, VI-337, 2018. 8
- 5) 歴史的土木構造物の保全: 土木学会歴史土木構造物保全技術連合小委員会編, 鹿島出版会, pp. 109-111, 2010
- 6) 文化庁文化財部記念物課監修: 石垣整備の手引き, 2015. 1
- 7) 西田一彦, 大嶋和則, 玉野富雄, 金岡正信, 北園和憲, 山中稔, 白石建: 高松城天守台解体時の力学調査と保全工法, 土木史研究, 講演集 29, pp. 235-242, 2009
- 8) 野間康隆, 西村 毅, 山本浩之, 笠 博義, 西形達明, 西田一彦: 城郭石垣の補修効果に関する動的安定性の検討岩の力学連合会, 第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 277-282, 2013. 1
- 9) 辻清仁, 西形達明, 山本浩之, 笠博義: 遠心載荷実験による城郭石垣の安定性に及ぼす栗石の影響, 土木学会第65回年次学術講演会 III-058, pp. 115-116, 2010. 9
- 10) 笠 博義, 山本浩之, 西田一彦, 西形達明: 城郭石垣補修における調査と計測について, 土木学会第65回年次学術講演会 IV-002, pp. 3-4, 2010. 9
- 11) 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, 土木史研究講演集, Vol. 27, pp. 229-234, 2007. 7
- 12) 蔦野温也, 西形達明, 山本浩之, 笠 博義, 西村 毅, 野間康隆: 鉄筋挿入による城郭石垣の修復とその補強効果に関する遠心実験, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集VI部門, VI-494, 2013. 9
- 13) 西村 毅, 笠 博義, 山本浩之, 野間康隆, 西形達明, 西田一彦: 鉄筋挿入工法による伝統的の石垣の補強における施工性の検討, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集

VI部門, VI-493, 2013.9

- 14) 地盤工学会：地山補強土工法設計・施工マニュアル,
pp.78-83, 2011
- 15) 笠博義：城郭石垣の工学的な研究 - 石垣の調査技術 -, 安
藤ハザマ研究年報 Vol.8 pp.1-7, 2020
- 16) 笠博義：城郭石垣の工学的な研究 - その2 石垣の安定性 -,
安藤ハザマ研究年報 Vol.9 pp.1-9, 2021
- 17) 笠博義：城郭石垣の工学的な研究 - その3 石垣の変状と数値,
解析 -, 安藤ハザマ研究年報 Vol.10 pp.1-9, 2022

Engineering research of castle masonry
- No.4 Repair of masonry -

Hiroyoshi KASA

When repairing deformed castle masonries, they are generally rebuilt after being dismantled. The rebuilding work is carried out in such a way that their historical information is not compromised. However, ensuring the stability and safety of the masonries is also required. For the repair method that does not employ dismantling, this report provides overviews on the "mazumeishi method", a traditional construction method and the "nailing method" a modern construction method, as methods to improve the stability of existing stone walls without dismantling them.