

城郭石垣の工学的研究

—その3 石垣の変状と数値解析—

笠 博義^{*1}

日本の城郭石垣には、「孕み出し」と呼ばれる特徴的な変状が広く観察される。この変状は石垣の表面の一部が前方に突出するもので、石垣の不安定化を示す兆候として捉えられている。本研究では、この孕み出しをはじめとする石垣の変状を整理し、そのうえで安定性を評価する方法についてまとめている。この中で、比較的簡便な方法である「孕み出し指数」による方法について紹介すると同時に、数値解析による石垣の変形解析について概要を紹介するものとする。具体的には、広く土木建造物の解析で用いられる有限要素法解析と、不連続体である石垣をそのままモデル化する個別要素法による解析事例を紹介する。

キーワード：城郭石垣、変状、数値解析、個別要素法、有限要素法

1. はじめに

城郭石垣の工学的研究と題した本研究では、その1として「石垣の調査技術」¹⁾について、その2では「石垣の安定性」²⁾について、筆者がこれまでに行なってきた研究事例を中心に、その概要を紹介してきた。このうち、その1では、石垣表面の形状の測量技術と石垣内部構造の調査技術としてレーダーによる方法を紹介し、その2では、石垣の安定性に関わる静的ならびに動的な実験から得られた知見について整理した。

こうした流れを受けて、第三報である本報では、石垣に生じる変状について、代表的なものを整理したうえで、実際の石垣の安定性を評価するための方法を紹介することとした。具体的には、簡単な調査により評価が可能な「孕み出し指数」³⁾を用いた方法について概要を示し、より詳細な検討に適用される数値解析について、有限要素法と個別要素法による解析の適用事例について紹介するものとする。

ここで、石垣の安定性評価方法については、特に定められた方法がないのが現状であるが、大別すると、石垣の形状的な特徴から定性的な評価を行うものと、石垣をモデル化したうえで数値解析等により評価を行う方法とがある。このうち、石垣の形状を測定する方法については、近年の測量技術の急速な進歩を受けて、正確な三次元的な形状把握が容易に実現できるようになってきた。また、数値解析等で必要となる石垣のモデル化のためには、非破壊探査技術が有効である。こうした調査にはその1で述べた技術が効果的に活用できる。また、数値解析を行う上で、石材間の摩擦特性や変形の特徴を確認しておく必要があるが、これについてはその2において紹介した各種実験結果が役に立つものと考えられる。

本研究は、これまでの二編の研究結果を活用して、実際の石垣の安定性評価を行うための方法についてまとめるものである。

2. 石垣の変状

石垣に生じる変状としては、孕み出し、目地の開口やずれ、間詰石等の石材の抜け落ちなど部分的なものと、石垣全体が変形することや、部分的に崩壊する例などが見られる。本研究では崩壊の前駆段階である変状について、その概要を以下のように整理する。

2.1 孕み出し

石垣の孕み出しは、多くの石垣に見られる変状であり、石垣の一部が前方に突出するように変形するものである。この変形が生じる部分は石垣により異なり、上部、中央部、下部などその石垣の構造や孕み出しを生じさせる要因により出現する場所が異なっていると考えられる。**写真-1**は石垣上部の変状の例であり、こうした孕み出しは比較的小規模なものが多く、樹木の根の張り出しによるものが多いと推定されている。ただし、解体調査の事例では、樹木の根が直接築石を押し出していない場合もあり、樹木の生育が石垣上部の地盤全体に影響を与えていることなどが推定される。

これに対して、**写真-2,3**は石垣の中央部および下部に生じた孕み出しの事例である。こうした部分の孕み出しは変形の範囲が広い場合が多く、石垣の安定性に与える影響が懸念されることが少なくない。こうした孕み出しの主要因としては、石垣の構造自体の特徴に加えて、降雨や地下水の影響により、背面地盤の土圧や水圧が増大することが考えられてきた。しかし、本研究のその2²⁾

*1 技術研究所



写真-1 石垣上部の孕み出し



写真-2 石垣中央部の孕み出し



写真-3 石垣下部の孕み出し



写真-4 縦目地の連続した石垣



写真-5 ガラス板による目地変位の観測



写真-6 抜け落ちた間詰石

において報告したように、地震により石垣の中央部～下部に孕み出しが生じることも実験や地震後の観察から確認されている。こうしたことから、規模の大きな孕み出しは地震などを一つの契機に生じ、その後は背面からの押し出し力の増大が長期間作用することで拡大することが推定される。

2.2 目地の開口やずれ

伝統的な石垣は石材同士を接着剤を用いずに積み上げていることから、石材間に隙隙やずれが生じることが多くみられる。こうした変形は、前述の孕み出しと同時に出現することも多いが、写真-4のように、目地が連続して不連続面として認識できるようになる場合もある。特に縦方向に目地が連続する場合は、石垣が構造的に分断される傾向になることが多く、不安定化が進展していることが想定される。一方、横方向に不連続面が認められる場合は、目地の開口ではなく、むしろ積み直しなど人為的な行為によるものが多い。

天然石をほぼそのまま用いる野面積みでは、目地の開口やずれはわかりにくいですが、打ち込み接ぎや切込み接ぎにおいては、こうした変形は、石垣構築後に生じ、その後も継続している場合も少なくないものと考えられ、この部分を計測することで、不安定化の進行を評価することも多い。写真-5にはガラス板を用いた計測の事例を示した。

2.3 間詰石の抜け落ち

間詰石は、築石の前面の隙間に詰め込まれる比較的小さな石材である。この石材の役割は、歴史的な見地からは、城外からの侵入者が石垣を登りにくくするためや美観上のものと言われることが多かったが、工学的には、背面からの押し出し力に対する抵抗力を向上させる効果があることを、本研究のその2²⁾において実験により示した。

こうした間詰石は、石垣の前面より差し込まれるようにして設置されるため、経年劣化や地震などにより抜け落ちることがあり、城郭管理者の日々の点検項目となっていることも多い。特に地震後に新たな抜け落ちが見られる場合は、抜け落ち箇所の確認とその周辺の変状を確認することが重要となる。城郭石垣の下部で見られる間詰石の抜け落ちの例を写真-6に示した。

なお、間詰石は築石間の力の伝達の機能を担っていることから、地震動により一瞬に強い力が作用した場合は、割れることもある。写真-7は地震後に確認された割れた間詰石の事例である。

2.4 その他の変状

以上は、石垣において比較的広く観察される変状である。これ以外には、築石同志の隙間に土砂が堆積し、その部分に植物が繁茂することで、一部の築石が変位する



写真-7 地震により割れた間詰石



写真-8 植物により押し出された築石



写真-9 天端石の変位



写真-10 樹木による石垣の変形

場合(写真-8)や、明確な理由は不明であるが、天端の築石が大きく変形する(写真-9)こともある。また、写真-10のように樹木の根が石材自体を取り込むまでに成長すると、石垣が大きく変形し、部分的には崩壊してしまうこともある。

このように、石垣直上部の樹木や石垣表面で繁茂する植物は、石垣構造に大きな影響を与えることが多い。本来の城郭石垣の上部には、塀や多門櫓または隅櫓などの構造物が構築されていたことが多かったことから、こうした樹木による変状は城跡が公園的に利用されるようになった近代以降に生じている。こうしたことから、植物に

よる石垣の変状は比較的新しい課題であると考えられる。

以上、石垣の変状について整理したが、ここで紹介した変状の中でも、不安定化を顕著に示すものとして、主として孕み出しに着目し、次章以降では安定性の評価技術について検討するものとする。

3. 石垣の安定性評価方法

城郭石垣の安定性評価方法に確立したものがないことは、前述したとおりである。このため、従来は文化財石垣に詳しい専門家の目視観察による評価により安定性を判定していることが一般的であったが、工学的なアプローチとしていくつかの安定性評価方法も提案されている。さらに、数値解析によって評価する方法も提案されており、最近では実際の補修工事においても、こうした解析方法が適用されることが増えている。これまでに提案されている方法のうち、主なものを表-1にまとめた。

3.1 経験的な方法

表中に示した中で、最も広く行われているのは、前述のように目視観察に基づくものである。この方法は、孕

表-1 石垣の安定性評価方法

手法名	目視による評価	孕み出し指数による評価 ³⁾	背面地盤強度による評価 ⁴⁾	土圧理論に基づく評価	
				控えと勾配による評価 ^{5,6)}	示力線による方法 ⁷⁾
概要	石垣の外面的特徴(孕み出しや目地の開口など)をもとに経験豊富な専門家が安定性の判断を行なう。	石垣の高さに対する孕み出し量の比を用いて安定性を評価する。代表的な城郭石垣の実測データをもとに導き出したものであり、現場で容易に安定性の評価ができる。	石垣自体ではなく、背面地盤の強度から安定性を評価する方法で、土質データに基づいて背面地盤の自立限界高さを求める方法がある。	石垣を接合面をもつ直線形の擁壁のように仮定して、主働土圧とのつり合い式を用いて石垣の安定性を検討する方法で、理論上の安定断面図と石垣の控えから容易に石垣の安定性を求めることができる。	示力線法はもたれ擁壁の安定計算に用いられている方法で、任意の断面に作用する土圧と石垣の自重の合力から求められる示力線をもとに石垣の安定性を評価するものである。
適用事例	現状では、ほとんどの石垣の安定性評価がこの方法によってなされている。	検討に適用した6城郭の石垣のデータに基づいている。他の石垣に対する健全性評価の参考にされた事例もある。	背面地盤の強度を確保する場合に適用される。	研究論文の中で、実際の城郭石垣に適用して、それぞれの方法の有効性が示されている。	熊本城における震災復旧において、この手法を元にした評価方法が適用されている ⁸⁾ 。
課題	客観的なデータに基づかないため、個人差が大きく、判断基準の共有も困難である。	評価事例を蓄積し、妥当性の根拠を強力なものとする必要がある。他の要因との関連性も今後検討されるべきと考えられる。	石垣の強度や地盤と石垣の相互関係は考慮しないため、実際の状況と異なる結論となる場合がある。	背面が不均一な地盤の場合や、石垣の構造自体が複雑な場合はモデル化が難しい。	石垣高さや勾配などの適用範囲を明確にする必要がある。

を改良した方法⁷⁾による、「熊本城石垣 耐震診断指針(案)」⁸⁾が提示された。この方法は、もたれ擁壁の設計に用いられている示力線の考えを導入したもので、任意の築石に作用する土圧を自重の合力を示す示力線を用いて、築石の勾配が変化する石垣に対して、試行くさび法を用いた検討を行うもので、常時および地震時の安定性を評価することができるものである。

以上、いくつかの事例を示したように現代工法による石積み擁壁の設計法の適用が難しい伝統的の石垣に対しては、様々な研究者が安定性評価のための方法を提案しており、熊本城の事例のように、実際の補修工事に適用されているものもある。なお、こうした方法を適用する上では、背面地盤の土質情報や石垣自体の構造をモデル化する上で、一定の調査が必要となる。

3.4 孕み出し指数による方法

前節においては、石垣の安定性について理論的に評価する方法について整理してきた。一方、石垣の管理者においては、より簡便かつ低コストで、安定性を評価できる方法に対する要求が強い。これは、より厳密な調査・検討を行う前の段階の予算確保の必要性や、広域・多数の石垣が存在する城郭等において、限られた予算を効果的に活用するために、補修の要否の度合いを全体的に把握することが求められるためと推測される。

こうした要求に対応する方法の一つとして挙げられるのが、前述の「孕み出し指数」による評価方法³⁾である。この方法は、西田、西形らが多数の城郭石垣の孕み出し量を実際に測定した結果をもとにした研究から提案されたもので、図-2に示したように、石垣の孕み出し量(δ cm)と石垣高さ(h m)の比から求められる孕み出し指数によっ

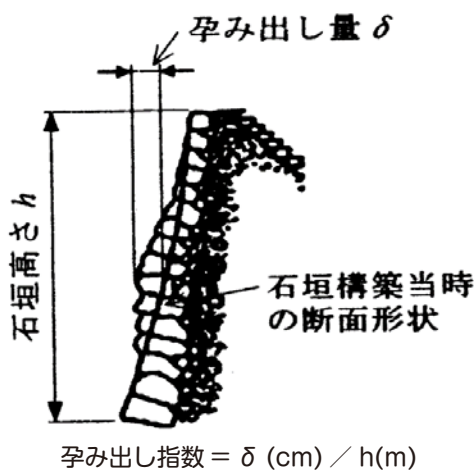


図-2 孕み出し指数による評価法

て評価するものである。実際の城郭石垣において調査した結果、孕み出し指数が6を超える変状を示す石垣がほとんど存在しないことから、経験的にこの値が6以上となると石垣の安定性が保てなることを示しているものと推定している。

ここで、孕み出し量は変状が生じる前の断面を基準とした最大孕み出し量としているが、現実問題としては、孕み出す前の断面形状は不明である場合が大半を占めている。また、石垣の高さについても、根石からの高さとした場合は、根石部分が地中に埋まった状態であることが少なくないうえ、変状が進んだ石垣では天端の沈下により、元来の高さが不明である場合もある。一方で、この方法では、石垣高さはm単位で示し、孕み出し量はcmとしていることから、測定値にはある程度のあいまいさは許容できるものと考えられる。

上記のようなことから、本方法を実際の伝統的の石垣の安定性評価に適用する上では、次に示すような方法が考えられる。

- ① 石垣高さ：根石が他の方法や調査結果より明確な場合は、その値を用いることができるが、地中部分の石垣は安定であると考え、石垣の地上部分のみの高さを測定する。
- ② 孕み出し量：厳密な意味での孕み出し量を求めることは困難であるため、隣接する変状の少ない石垣面との比較から孕み出し量を測定する。

ここで、孕み出し量をより厳密に推定する方法としては、図-3に示すように、石垣面の断面測量結果を用いて、古文書による標準断面と比較することで、より正確な値を算定できるものと思われる。なお、図-3の比較断面は、西田らの石垣の断面形状の数値的な表現に関する研究成

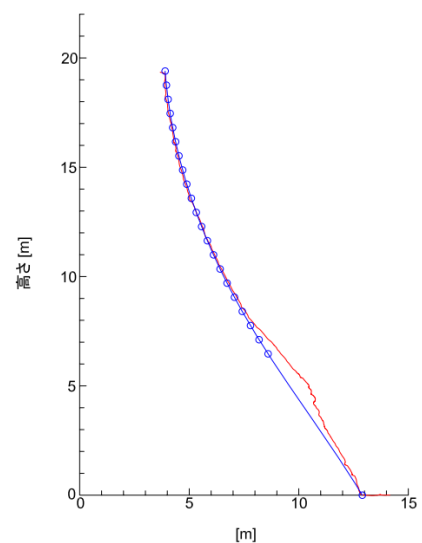


図-3 孕み出し量の推定事例

現況測量結果と古文書による断面殿との比較

表－3 石垣の数値解析手法

手法名	円弧すべりによる方法	連続体としての解析 有限要素法	不連続体としての解析	
			不連続要素法(DDA)	個別要素法(DEM)
概要	斜面の安定性解析に広く用いられる方法であり、対象領域におけるすべり土塊の滑動力と抵抗力の比が最小となる円弧を求める方法である。解析結果が安全率として明確に示されることから、現況の安定性の把握だけでなく、安定化対策の設計にも適用できる。	石垣を含んだ地盤を連続体としてモデル化し、弾性解析または弾塑性解析により評価を行う。地盤の変形予測などにおいて極めて多くの適用実績があるが、不連続体である石垣のモデル化においては、要素間の境界条件やパラメータ設定などに工夫が必要である ^{13,14)} 。	任意形状の弾性体ブロック間の接触、すべりを表現できる。任意の要素間の接触、分離は自由であるが、ブロック間の食い込みは許容しないため、石垣のような構造解析には適しているものと思われる。	対象を個々に分離する円形の要素として扱う方法である。築石を個々の要素として表現できるので、孕み出しや地震時の抜け落ちも直接的に評価することが可能である。解析結果を動画として表現することも可能であるため、地震時等の挙動予測に適する。
適用事例	多くの石垣補修工事における設計にも適用されている。	研究事例としての報告のほかに、実際の城郭石垣の補修設計でも適用事例がある。	石垣では旧日本道路公団における研究で適用された事例 ¹⁵⁾ がある。	研究的に石垣の地震時の安定性を評価した事例 ^{16,17)} などがある。
課題	築石や裏栗層のモデル化が難しく、さまざまな仮定を導入して検討することが多い。	石垣を連続体として扱うために、石材間のずれなどを正確に把握することは困難である。	地盤定数および石材のモデル化が課題で、特に石垣構造の正確な把握が必要であると考えられる。	解析に用いる地盤定数の設定が容易ではなく、石垣のモデル化においてもより正確な情報が必要となる。

果³⁾をもとに、筆者らが開発した設計支援システム¹²⁾を用いて実施したものである。このシステムでは、後藤家文書など3種類の伝統的な石垣の勾配設計法のほかに、それらを近似している数式から石垣の断面形状を算定できるため、より多面的な断面の検討が可能となっている。

以上述べてきたように、孕み出し指数による方法は、石垣の外観のみから、概略的な安定性を評価できる方法として、有効な方法であると考えられる。

4. 石垣の数値解析

第3章では石垣の安定性を評価する方法について述べてきたが、第4章では、石垣の安定性評価等に数値解析を適用した事例について紹介する。

盛土やコンクリート構造物などを対象とした数値解析には、有限要素法をはじめとする多くの解析方法が広く適用され、実際の設計にも活用されている。こうした解析では、多くの場合、対象とする構造物を多数の要素からなる連続体としてモデル化したうえで、弾性解析や弾塑性解析などを行って、静的または動的な条件下におけるひずみや応力を求めている。

これに対して、伝統的な石垣は、第一に全体として不連続体であること、第二に築石や裏栗石の変形係数等の

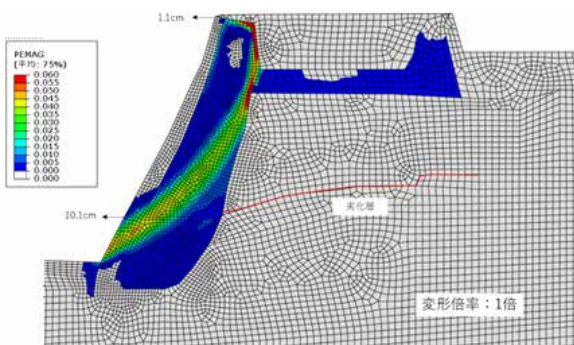
地盤定数を設定する上での根拠となるデータが乏しいこと、第三に築石の形状などは不定形であり、モデル化が困難であることなどから、数値解析自体が容易ではない。このため、ここで挙げた課題を解するための色々な工夫を加えた研究がなされている。表－3はこれまでに論文等で発表された解析方法について整理したものである。以下のその概要を述べる。

4. 1 円弧すべりによる方法

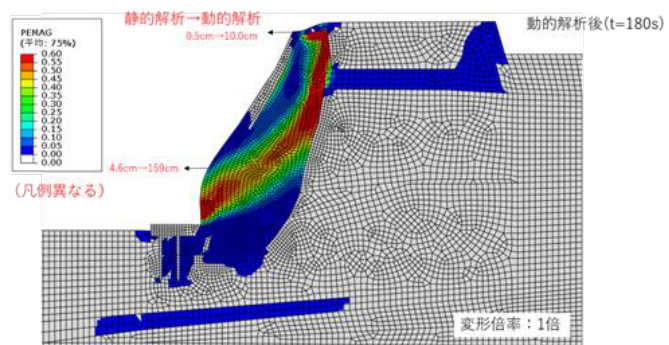
切土法面や盛土の安定性を評価する上で、広く用いられる方法であり、安全率によって安定性が示され、補強設計にも反映しやすいことから、石垣の補修時の設計などで用いられている。この方法は、石垣背面の地盤の安定性の評価に対して、従来の斜面の安定性評価と同等に適用ができるが、築石ならびに裏栗石部をモデル化することが難しく、すべり面が生じる位置を事前に制限するなどにより、現状との整合性を取ることが必要となることもある。

4. 2 連続体としての解析方法 (FEM)

石垣を連続体としてモデル化し、解析を行う方法であるが、単純な弾性解析では、実際の石垣とは変形の状況などが異なる結果となる。このため、築石間や築石と裏栗石との接触部のモデル化において、特殊な要素を設定



図－4 FEMによる静的解析結果 (塑性ひずみ分布)



図－5 FEMによる動的解析結果 (塑性ひずみ分布)

* 凡例の割り付けは図－4の10倍

する¹³⁾などの研究事例が報告されている。ここでは、上記の接触部分に引張り抵抗のみ大きく減じるなどしたうえで、弾塑性解析を行った事例¹⁴⁾を紹介する。

図-4,5は実際の石垣を忠実にモデル化したもので、地盤定数も可能な限り現地調査結果を用いている。図-4は静的な条件での塑性ひずみの分布を示したものであるが、栗石部に円弧状にひずみの集中部が見られ、この部分で円弧すべり的な変状が生じていることを示している。こうした変形は実際の変形状況ともよく合致している。

一方、図-5は同じ石垣を動的に解析した場合の変形を示している。この結果から、地震時には石垣下部の孕み出しが著しく増大し、崩壊する可能性もあることを示唆している。こうした解析結果は、石垣の修理の必要性をわかりやすく示すものとして、文化財の適切な維持・管理を議論する上で有効である。すなわち、工学的な検討結果を歴史分野の専門家などにわかりやすく示すことが可能なものとする。

なお、ここで紹介した事例は、打ち込み接ぎによる石垣であり、築石は寸法や加工度合いが比較的均一であった。さらに、ここでは修理のため背面の裏栗石および地盤の条件が詳細に調査されていたことなどから、正確なモデル化が可能であったことなど、解析を実施する上で有利な条件が揃っていた。こうしたことから、石垣の内部構造が不明確であり、野面積みのように、不均一な築石から石垣では、解析結果の妥当性が確保できない可能性が高い。

4.3 不連続体としての解析方法 (DDA, DEM)

石垣をそのまま不連続体としてモデル化することで、より正確な数値解析を行うことが可能であると考えられる。こうした解析方法の石垣への適用事例としては、不連続要素法 (DDA) による方法¹⁵⁾や個別要素法 (DEM) による方法^{16),17)}が報告されている。いずれも築石などを個別にモデル化し、要素間の剥離や衝突などを再現できるものである。以下には、このうち個別要素法で解析を行った例を紹介する。

個別要素法は、基本的に個々の粒子の運動方程式を解く疑似動的解析方法である。このため、複数の要素を結合することで、築石の形状を現実のものに近い形で再現し、個々の築石の挙動を表現することが可能である。一方、有限要素法の入力パラメータが変形係数など規格化された試験や経験的な蓄積から、工学的に求められるものであるのに対して、個別要素法でのそれは、粒子間摩擦係数 (f) や粒子間粘着力 (bond) という直接的には算定するのが困難なものである。こうしたことから、その解析結果に疑問を呈する意見もある。

以上のような状況を受けて、以下に示す事例¹⁶⁾では、

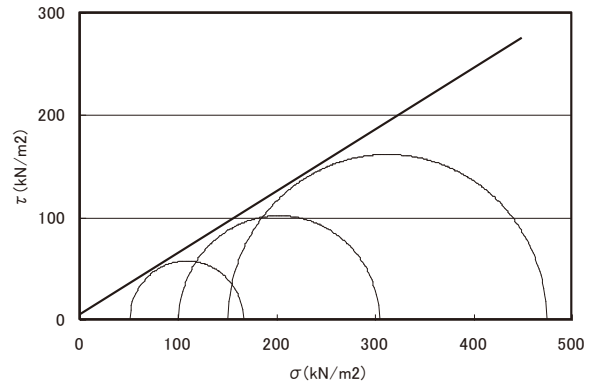


図-6 仮想二軸圧縮試験結果の例

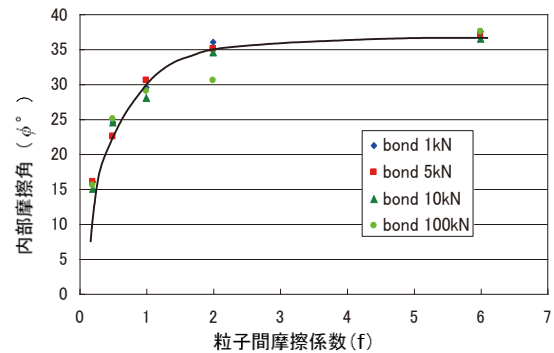


図-7 粒子間摩擦係数と内部摩擦角の関係

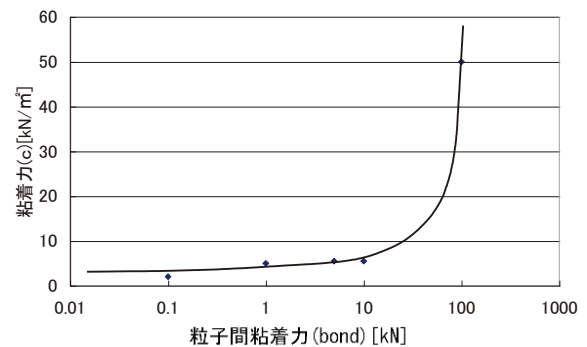


図-8 粒子間粘着力と粘着力の関係

石垣の解析を実施する前に、疑似的な二軸圧縮シミュレーションを行い、内部摩擦角 (φ) と粒子間摩擦係数 (f)、粘着力 (c) と粒子間粘着力 (bond) の関係を求め、この結果を介することでパラメータ設定を行った。シミュレーション結果の一例を図-6に、各パラメータ間の関係を図-7,8に示した。

こうした準備を行った上で、DEMにより解析を行った結果を、図-9,10に示す。この解析¹⁷⁾は実際に根石付近の孕み出しが顕著になり、解体・積み直しが行われた野面積みによる石垣をモデルとし、それぞれの条件下で、地震動 (3Hz の正弦波, 20 波, 800gal) を加えたときの変形を示している。図-9より解体前の石垣では、特に根石付近の変状が大きく、これにより、石垣全体が不安定化していることがわかる。一方で、積み直し後を示す

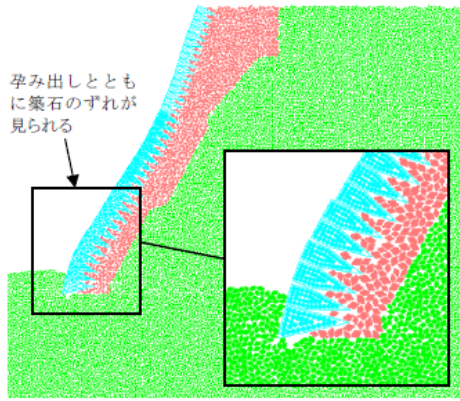


図-9 DEMによる変形解析結果(補強なし)

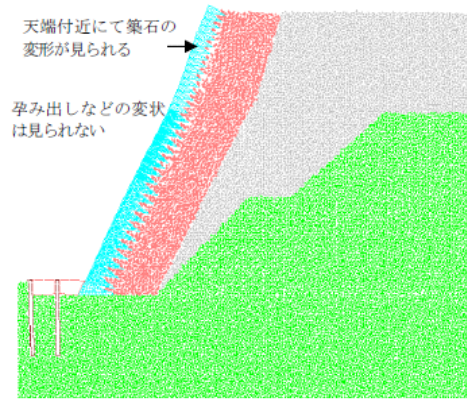


図-10 DEMによる変形解析結果(杵工による補強後)

図-10では、根石前面には変形抑制のための杵工を設置し、合わせて石灰改良による背面地盤の補強と裏栗石層の整形を行っている。これらの対策により、積み直し後の石垣の変形は大きく抑制され、特に根石付近の変形はほとんど見られない結果となっている。ここで、杵工とは伝統的な補強工法の一つであり、堀に面する石垣等において、石垣前面に松杭と捨て石により変形抑制工を施工するものである。その施工状況を写真-11に示した。

このように、石垣の変状を正確に再現できるDEMは、実際の石垣では確認が困難な地震時の変形やその対策工の効果について視覚的に表現することが可能である。すなわち、個々の石材が不定形であり、連続体としてのモデル化が難しい場合には、こうした解析方法が、視覚的にもわかりやすい結果を示すことができるものと考えられる。

なお、この事例¹⁶⁾においても解体修理に伴う調査により、石垣の構造や地盤条件が詳細に把握されており、連続体解析で紹介した事例¹⁴⁾と同様に、かなり有利な条件下で解析が行われたものである。

ここで、数値解析では、三次元的な石材の組み合わせで構築されている石垣を単純な二次元モデルとしていることなど、今後検討すべき課題が多いことは言うまでもない。



写真-11 杵工の施工状況

5. まとめ

これまで述べてきたように、石垣の安定性の評価は、現在でも標準的な方法が定められているわけではなく、さまざまな工学的な安定性評価方法の適用が試みられているのが実態である。しかし、一方では頻発する災害による被害を受けて、石垣の安定性を正しく評価できる方法を望む声は急速に大きくなっている。すなわち、従来の文化財石垣の補修では、伝統的な石積み技法を忠実に踏襲することが最重要視される傾向が強かった。しかし、東日本大震災や熊本地震などの災害による石垣の甚大な被害を契機に、工学的な裏付けがあり納得性の高い石垣の安定性の評価や積み直し設計が強く求められるようになってきた。

こうした背景を受けて、文化財である石垣の管理者である自治体の担当者や、石垣の維持管理や修理等に専門家として関与する歴史や考古学の分野の研究者からは、上述したような工学的なアプローチに期待する声は従来にも増して強くなっていると思われる。しかし、補修工事等を実際に担当する土木技術者においては、こうした要求に応えられるだけの知識の集約や体系化が進んでおらず、加えて、伝統的な価値保全の目的のために、現代的な工法の使用が大きく制約を受けることに対する理解が進んでいないことが多いように思われる。このため、文化財保全と補修設計・施工技術の間で共通認識に立った議論がしにくい場合も見受けられる。

ここで報告した内容が、そうした議論において、両者をつなぐための一助となれば幸いである。

謝辞

これまでの石垣の一連の研究を進めるにあたり、終始丁寧かつ的確なご指導をして頂いた、関西大学名誉教授の西田一彦先生ならびに西形達明先生には、心より感謝の意を申し上げます。また、伝統的な石積みについて基礎から教えて頂き、数多くの現場や実験に多大なるご支

援を頂いた和田石材建設株式会社の和田行雄氏はじめ、現場の関係者の方々に深く感謝いたします。

最後に、各種実験や解析において、率先して取り組んで頂いた西村毅氏、野間康隆氏をはじめ社内の文化財関係のメンバーに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 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, 2021
- 2) 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. 1～7, 2022
- 3) 西田一彦, 西形達明, 玉野富雄, 森本裕行：城郭石垣の断面形状の設計法とその数値表示に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 750, III-65, pp. 89～98, 2003
- 4) 西田一彦, 福田護, 竹下貞雄, 山本和夫, 沢孝平, 佐々木清一, 西形達明：土質力学, 鹿島出版, 2005
- 5) 八尾真太郎, 榊井健：石垣築石部の長期荷重時安定性について, 日本建築学会構造系論文集, 第 593 号, pp. 81～86, 2005
- 6) 市岡隆興, 石井信行, 篠原修：伝統的積石技法の力学的考察, 土木学会構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 519～526, 1996
- 7) 橋本隆雄, 近藤和仁, 石作克也：熊本城石垣の示力線による安定性照査の適用性について, 第 73 回年次学術講演会, 土木学会, pp. 581-582, 2018
- 8) 熊本城石垣 耐震診断指針(案); https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=5566&sub_id=139&fid=269347 (2022 年 9 月入手)
- 9) 国土交通省 道路局；道路土工構造物点検要領, 平成 29 年 8 月, p. 21, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/tenken-voryo_201806.pdf (2022 年 9 月入手)
- 10) 文化庁文化財部記念物課監修；石垣整備の手引き, 2015. 1
- 11) 社団法人日本道路協会：道路土工擁壁工指針（平成 24 年度版）, p. 168, 2012
- 12) 笠 博義, 山本 浩之, 西形 達明, 西田 一彦：城郭石垣勾配検討支援システムの開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会VI-129, pp. 257-258, 2012
- 13) 田中邦熙：石垣の地震時挙動解析に FEM を適用する手法の可能性, 土木史研究講演集, Vol. 26, pp. 287～298, 2006
- 14) 西村 毅, 浦野 和彦, 笠 博義, 西形 達明：名古屋城石垣積直し工事における安定性評価について, 土木学会土木建設技術発表会 2022 講演概要集, 2022
- 15) 関文夫, 梁川俊晃, 加藤英樹, 栗田純司, 池谷清次：石積み擁壁の道路構造物への適用に関する研究 (1)～石積み(穴太衆積み)の構造特性と耐震履歴について～, 土木学会第 58 回年次学術講演会VI, pp. 641-642, 2004
- 16) 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, 土木史研究論文集, vol. 27, pp. 45～51, 2008
- 17) 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, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム & 第 6 回日韓ジョイントシンポジウム講演論文集, pp. 277-282, 2013

Engineering research of castle masonry No.3 Deformation and numerical analysis of masonry

Hiroyoshi KASA

In Japanese castles, a bulging deformation in which traditional masonry is frequently observed is called “harami-dashi”. This deformation is a part of the surface of masonry protruding forward, and is regarded as a sign of its destabilization. In this study, the actual conditions of the deformation of masonry were examined, and some methods for evaluating the stability of masonry were summarized. A simple method using the “Masonry Wall Bulging Index,” was explained. At the same time, an overview of the deformation analysis of masonry by numerical analysis is shown. Some case studies were presented in which FEM and DEM were used to analyze the deformation. DEM is a method that can model the masonry as a discontinuous object.