

城郭石垣の工学的な研究 - その2 石垣の安定性 -

笠 博義^{*1}

我が国の城郭石垣は、接着剤を用いない「空積み」によって構築されており、石材同士の噛み合わせと摩擦によって安定性を保っているということができる。このため、連続体を対象とした円弧すべり解析や有限要素法などによる安定性評価が困難である。本研究では、こうした背景において、石垣の安定性を検討するうえで重要と考えられる、築石の摩擦特性や間詰石の効果、逆石の影響などの基本的な特性を検討した。合わせて、実際の地震による石垣の変形と大型振動台の実験から得られた知見をもとにした、動的な安定性についても基礎的な検討を行った。こうした検討結果は、文化財石垣を工学的に評価するうえで有効に活用できるものと思われる。

キーワード：城郭石垣、安定性評価、摩擦抵抗、地震、実物大実験

1. はじめに

我が国の城郭石垣は、漆喰などの接着剤を用いない「空積み」構造物である。このため、基本的に構造物としての安定性は、石材間の噛み合わせと摩擦力により確保しているということができる。こうしたことから、連続体の安定性評価に用いられている円弧すべり法や有限要素法の石垣への適用には限界があり、積み直し工事等における設計においては、個別のケースごとに様々な前提条件を設定し、解析上の工夫を行うなどして対応しているのが実態である。さらに、実際の石垣に土圧や地震力が作用したときの変状プロセスといった、基礎的な事項についても十分な研究成果が得られているとは言い難い状況である。

こうした背景において、筆者らは石垣の安定性評価を適切に行うことを目的として、いくつかの基礎的な実験による検討を行ってきた。具体的には、①築石（つきいし）に背面より土圧が作用した場合の摩擦抵抗^{1),2)}、②間詰石（まづめいし）による安定性向上効果³⁾、③石垣構造上の弱点となる「逆石（さかいし）」の影響について実物大実験による検討⁴⁾を行った。合わせて、地震による石垣の影響を把握する目的で、④大型振動台実験による検討結果⁵⁾と、⑤地震による石垣の変状の調査⁶⁾を行った。

なお、実際の補修工事における石垣の計測や調査に関してまとめた第1報⁷⁾と同様に、本報では、あくまでも文化財石垣の修理や復元に役立てることを目指して、石垣の安定性に関して得られた知見を整理し、検討を行っている。このため今日の石積み擁壁の安定性評価手法との比較・検討は行っていない。これは、現代の石積み擁

壁では、空石積みでの急勾配かつ高い石積み自体を想定していないためである。

2. 石垣の構造

伝統的な工法による石垣は、その表面から築石、裏栗石、背面地盤の3層構造から成り立っている。図-1にはその構造を模式的に示した。また、築石を固定し、その位置や方向などを調整する介石（かいいし；飼石と表記する場合もある）と石垣前面の間隙に配置される間詰石が構成要素として挙げられる。それぞれの石材の機能については、表-1のようにまとめられる。なお、この表は、主に構造物としての石垣の安定性に着目して整理したものであり、歴史的な知見による機能については、あえて記載していない点に注意が必要である。例えば、間詰石については、歴史的には石垣の表面を平滑化し、外部の人間が容易に侵入できないようにする機能があるとされているが、本報では、築石の変状を抑制する機能にのみ注目している。

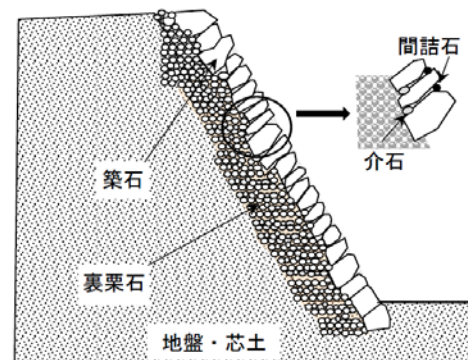


図-1 石垣の構造

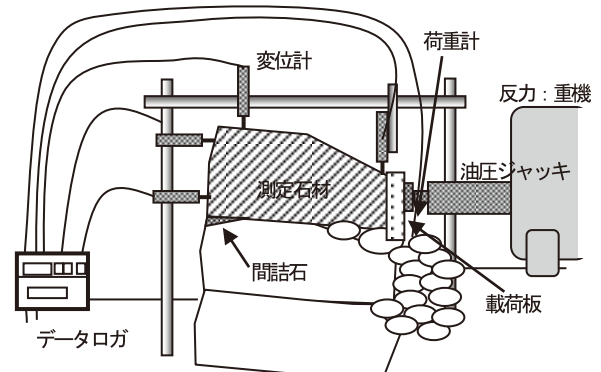
*1 技術研究所

表－1 石垣の構成要素の機能

名称	工学的な機能
築石	石垣本体の構造材
間詰石	築石前面の固定
介石	築石背面・上下の固定
	石材の配置調整
裏栗石	築石背面充填(応力伝達, 雨水・地下水排水)

石垣は、築石の加工度合いにより、野面積み（のづらづみ）、打ち込み接ぎ（うちこみはぎ）、切込み接ぎ（きりこみはぎ）に分類される。また、築石に用いられる岩種やその大きさも城郭ごとに、さらには城内の場所によっても異なる。同様に、裏栗石、介石、間詰石も寸法、形状、岩種は築石同様に多種多様である。加えて、裏栗石層はその幅についても場所による差が大きい。一方、背面地盤も築城される場所の地理的な条件により大きく変化する。例えば、高松城のように海に面した城郭では、海成砂層の上に砂質の盛土が、名古屋城をはじめとする平野部の城（平城、平山城）では、平野上や台地の縁辺部に砂質または粘性土質の盛土により構成されることが多い。また、多くの山城では岩盤の前面にごく薄い裏栗層が見られることが多い。

以上のように、伝統的な石垣にも、さまざまな構造上の特徴があり、安定性の検討も、個々の城郭内の個々の石垣に対して評価する必要がある。一方で、石垣に対する原位置実験等を実施できる場所や機会は、解体修理が行われる地点等に限定されているのが実態である。こうしたことから、以下に紹介する現場実験は、筆者らが調査・実験を実施できた場所に限定されているが、その実施条件においては、可能な限り、一般的な知見が得られるように配慮した。また、原位置実験ができない場合は、伝統的な石積み技能者の協力を得て、現在の文化財石垣の補修と同等な方法でモデル石垣の構築を行った。



図－2 摩擦実験の概要

3. 静的条件化における石垣の安定性評価

石垣の変状として顕著なものは、石垣の一部が前方に突出する「孕み出し」や、石材間に間隙が生じて隣接する石材間に変位が生じる「目地の開き」や「ずれ」などがあげられる。また、間詰石の抜け落ちや築石の抜け落ちなどが見られる場合もある。このうち、孕み出しは多くの石垣で観察され、安定性が損なわれた石垣の典型的な特徴とされている。その要因としては、背面からの土圧や水圧の増加、樹木の根の張り出しなどがあげられてきたが、詳細なメカニズムについては確認されていない。また、石垣の不安定化の要因の一つに、石積み自体の不具合である逆石の存在があげられるが、これが石垣の安定性の低下に及ぼす具体的な影響も確認されていない。

以上のようなことから、石垣の主な変状要因の一つと考えられる石垣の背面から土圧の影響を検討するために、いくつかの水平載荷実験を行った。

3.1 築石の摩擦抵抗と間詰石の安定性向上効果

(1) 築石の摩擦特性

築石の摩擦抵抗について検討するために、実際の石垣および伝統的な工法で積み上げたモデル石垣を、背面



(1) 打ち込み接ぎ (原位置)



(2) 野面積み (モデル石垣)



(3) 切込み接ぎ (モデル石垣)

写真－1 摩擦実験の状況

表-2 摩擦実験の検討ケース

ケース	分類	岩種	寸法(m) 幅×控え×高さ	重量 (kg)	上載荷重 (kg)	接触面積 (m ²)
1-1	野面	安山岩	0.60×0.60×0.48	196	0	0.25
1-2					75	
1-3					170	
1-4					320	
2-1	切込み	安山岩	0.37×0.48×0.37	185	0	0.17
2-2					75	
2-3					170	
2-4					320	
3-1*	打込み	花崗岩	0.50×0.70×0.45	273	0	0.27
3-2*					107	
3-3*					200	

*ケース3は2006年度実施実験データ³⁾

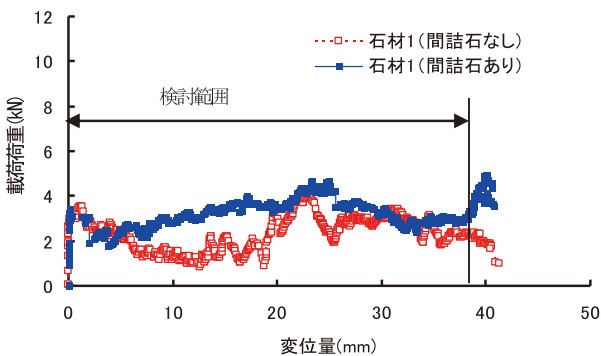


図-3 摩擦実験における荷重と変位の関係

から油圧ジャッキによりゆっくりと載荷し、築石の挙動を確認した¹⁾。実験の概要を図-2に示す。また、写真-1は、実験の状況である。このうち、打込み接ぎでの実験(写真-1(1))は実際の城郭石垣の解体修理中の現場において行ったものであり、野面積み(写真-1(2))と切込み接ぎ(写真-1(3))は実物大の石垣モデルにより実験を行った²⁾。

実験条件を表-2にまとめた。この表に示したように、各ケースとも上載荷重を3~4段階に変化させて行った。現場実験で行ったケース3について、載荷に伴う変位状況をまとめたものが、図-3であり、この図では、間詰石を配置した場合と除去した場合の検討結果を合わせて示している。この図からわかるように、築石の載荷荷重は、最初に動き始めるまでは急激に上昇し、その後ほぼ一定の荷重の範囲で変動する。このことは石垣に背面から作用する荷重が一定の値を超えると、石垣は徐々に変位し始めることを示している。

次に、この実験から得られた垂直応力(σ)とせん断応力(τ)の関係を整理し(図-4~6)、内部摩擦角(ϕ)を求めた。

なお、上下の石材の接触状況は、写真-2に示すように、点接触であり、実際の接触面積を求めることは困難であるため、ここでは実験終了後に確認された接触点に

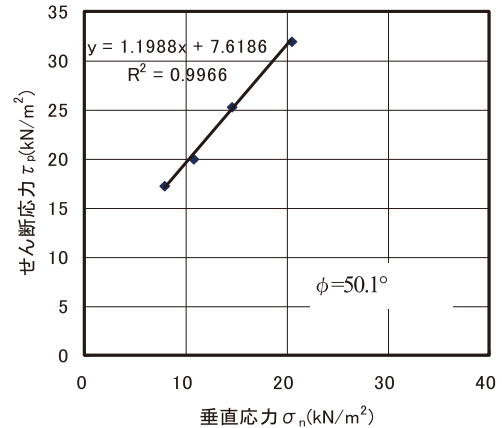


図-4 垂直応力とせん断応力(野面積み)³⁾

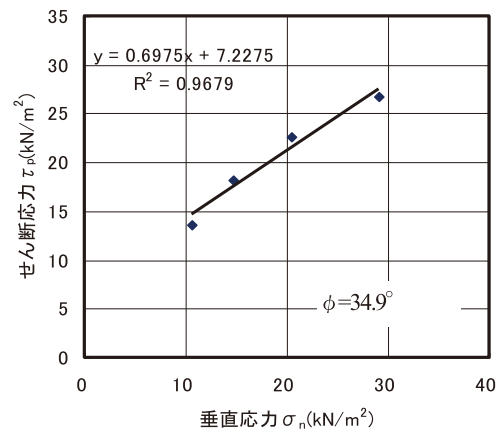


図-5 垂直応力とせん断応力(切込み接ぎ)³⁾

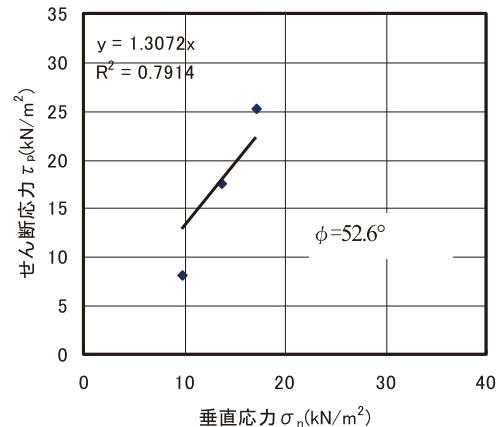


図-6 垂直応力とせん断応力(打込み接ぎ)³⁾

より囲まれた範囲を接触面積とすることとし、この値を用いてせん断応力を算出した。

これらの図から求められる内部摩擦角(ϕ)の大きさは、野面積み: 50.1°, 切込み接ぎ: 34.9°, 打込みは接ぎ: 52.6°となり、野面積みや打込み接ぎに比較して、切込み接ぎの ϕ の値が小さいことがわかった。これは、石材の加工度が高い切込み接ぎでは、石材表面の凹凸が小さく、背面からの荷重に対する抵抗力が小さいことを



写真-2 石材間の接触状況 (摩擦実験終了後)

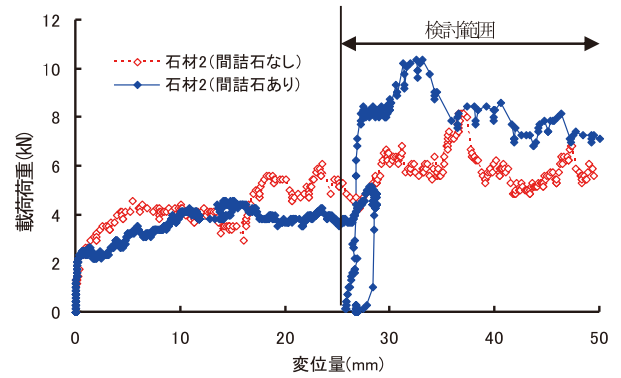


図-7 間詰石の効果検討実験2- 荷重と変位の関係



写真-3 載荷実験による孕み出し状況

表-3 間詰石の効果検討実験結果のまとめ

	せん断応力 (τ) kN/m ²				せん断応力の増加率 (%)	
	間詰石なし		間詰石あり		ピーク値	平均値
	ピーク値	平均値	ピーク値	平均値		
石材1	40.3	23.7	46.8	33.3	16	41
石材2	56.3	39.9	69.1	55.1	23	38

*せん断応力の増加分＝間詰石ありの値 / 間詰石なしの値 × 100

示しているものと考えられる。

一方で、天然石を用いる野面積みにおいては、特に、個々の石材によって ϕ の値はばらつきが大きいことが予想される。すなわち、前述したように、築石同志の接触は点接触であることから、石材の移動に伴って接触する位置は変化し、これによって上下の石材の噛み合い状況やせん断抵抗角も変化するものと考えられる。

なお、原位置で行った実験においては、背面から一個の石材に載荷した場合も、写真-3に示すように、その周辺の複数の石材が同時に前方に変位する現象が観察された。これは、隣接する石材間の噛み合わせや摩擦によって、石材同士が拘束されて一体として変位し、孕み出しが生じたものと考えられる。すなわち、築石の背面に直接押し出す力が作用する範囲より広い範囲において、孕み出しが生じるものと考えられる。この現象は、孕み出し範囲の大きさと背面での押し出し力の作用範囲が必ずしも一致していないことを示唆するものであり、石垣の変状要因を推定する上でも重要であり、今後、さらなる調査・研究が必要であると考えられる。

(2) 間詰石の安定性向上効果

間詰石が築石の変状抑制に与える影響を評価するため

に、前述の摩擦実験において、間詰石の有無による比較を行った³⁾。その結果として、載荷荷重と変位の関係を前述の図-3および図-7に示した。ここで、図-3では間詰石が単純に前方に変位している0～38mmを検討対象範囲とした。また、図-7において「間詰石あり」のケースで約28mmの変位量の位置で大きく載荷荷重が変化しているが、これは、このケースでは、本来この場所には存在していなかった間詰石を実験用に現場で加工して設置したため、0～28mmの範囲はいわゆる「遊び」の部分に相当し、間詰石が上下の築石と十分に接触していなかった領域であると考えられる。このため、本検討では28mm付近の立ち上がり部分以降のデータについてのみ検討することとした。

表-3に示した実験結果より、いずれの石材の実験結果においても「間詰石あり」のケースにおいて載荷力が全体的に大きくなっており、ピーク値、平均値ともに15～30%程度の増加が見られる。このことは、間詰石による「くさび効果」により石材が背面からの荷重に対する抵抗力が大きくなったことを示すものと考えられる。

なお、図-3および図-7では、全体として間詰石があるケースの方が載荷荷重の変化が少ない傾向にあるが、これは間詰石がない状態では、石材の凹凸による噛み合いがそのまま石材の摩擦抵抗に反映するのに対して、間詰石があるケースでは築石の最前面に配置された間詰石が押し出し力に抵抗することにより、築石全体の変位が抑制され、その結果、築石自体の摩擦抵抗の変動が抑制されたものと考えられる。



写真-4 城郭石垣における逆石の例

表-4 逆石の影響確認実験の結果

ケース 名称	最大荷重時				平均荷重時			
	荷重 (kN)	変位 (mm)	摩擦 係数	摩擦角 (°)	荷重 (kN)	変位 (mm)	摩擦 係数	摩擦角 (°)
A5m	5.67	23.7	0.859	40.7	4.92	24~53	0.751	36.9
A0	6.29	12.8	0.796	38.5	5.82	13~52	0.737	36.4
A5	8.25	9.3	0.877	41.2	7.08	20~54	0.75	36.9
A10	10.41	22.4	0.926	42.8	9.37	23~55	0.835	39.9
A15	10.52	20.6	0.784	38.1	9.85	21~52	0.734	36.3
A0-R	19.56	10.4	-	-	19.27	11~14	-	-



写真-5 築石設置角度の影響評価実験状況

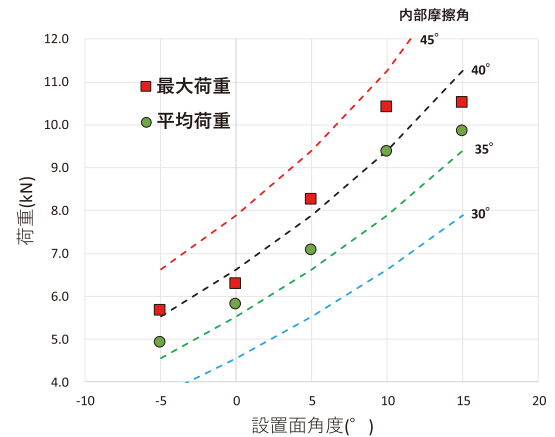


図-9 荷重-設置面角度の関係

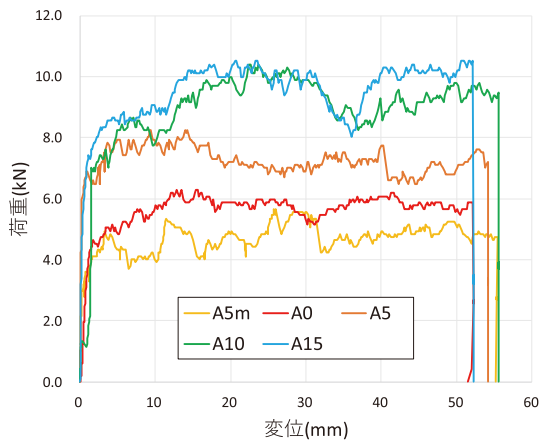


図-8 荷重-変位関係(設置面角度比較)

(3) 逆石が石垣の安定性に与える影響の検討

伝統的の石積みの築石は、通常、 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 石垣背面側に傾斜しているが、部分的にこの傾斜角が小さく、ほぼ平坦または前方に逆傾斜している場合があり、こうした部分は逆石と呼ばれている。写真-4に逆石の例を示した。こうした部分は、背面からの押し出し力に対して、前面に移動しやすいと考えられ、特に石垣下部に逆石が存在した場合は、石垣全体の安定性に与える影響が大きいことが予想される。こうしたことから、築石の設置角度により摩擦抵抗の大きさの変化について検討するためにモデル

実験を実施した⁴⁾。なお、本実験では、合わせて、補助石材と鉄筋を用いた逆石の補強工法の効果についても検討を実施した。なお、本実験は名古屋市観光文化交流局名古屋城総合事務所発注の名古屋城石垣補修工事(本丸搦手馬出周辺)の一環として実施したものである。

1) 築石の設置傾斜角度の安定性への影響

実験は写真-5に示すように、傾斜を変えて固定した下部石材上に上部石材を設置し、背面から0.2 mm/sec程度の速度で水平に載荷を行うことで実施した。

設置角度を変更した実験の荷重と変位の関係を図-8に示した。この図より、載荷のごく初期(変位1.5mm程度まで)は、設置角度による差は見られないが、その後設置角度に応じて、 ± 1 kN程度の幅を持ちながら概ね一定荷重値を示すことと、その値は接触面の角度が大きいほど増大することがわかる。また、荷重の値は、逆石状態(表-4のケース:A5m, A0, A5)の5.7~8.3 kNに比較して、通常の状態(ケース:A10, A15)は約10.5 kNであり、逆石状態では、通常の50~80%程度の力で滑動することが示された。

表-4に本実験の実験結果をまとめた。なお、この表における平均荷重は、最大荷重到達後に一定速度で載荷した範囲における荷重の平均値とした。また、図-9には、荷重と設置面角度の関係を示した。ここで、図中に



写真-6 逆石補強方法



写真-7 実物大石垣の振動実験の概要

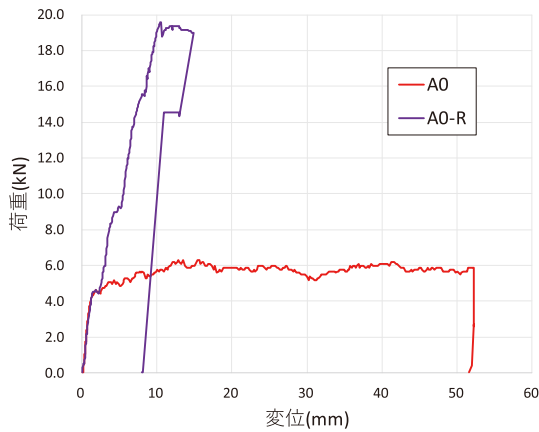


図-10 荷重-変位の関係 (逆石補強のケース)

は本実験から得られた値と合わせて、石垣の摩擦抵抗を表す指標として内部摩擦角 (ϕ) がそれぞれ $30^\circ \sim 45^\circ$ の場合を想定した値を破線で示している。なお、内部摩擦角は以下の式 (1) より算出したものであり、粘着力 (c) は無視できるものとして $c = 0$ とした。また、せん断応力および垂直応力は設置面の角度を考慮して算出している。

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (1)$$

この結果、図-9よりわかるように、角度 10° で数値が若干大きく示されるものの、全体として ϕ の値は一定であり、平均荷重から求めた摩擦係数は 0.76、摩擦角 (ϕ) は 37.2° となった。ここで、摩擦角は石材間の接触条件が変化しない場合は一定となるはずであり、本実験結果はそれを的確に再現できているものと考えられる。なお、接地面角度 10° の値が他のケースと異なっている要因としては、変位計の計測結果から、このケースでは载荷中に石材がわずかに回転したことが確認されており、これにより接触面の条件が変化したことが考えられる。

2) 逆石補強対策工法の効果

逆石の補強対策としては、逆石の前面を抑える方法や、

背面にアンカーを設置する方法などが考えられるが、ここでは、前述の写真-5に示すような状況において、極力周辺に影響を与えず、確実に逆石の滑動を抑制できる方法として、写真-6に示した方法を検討した。この方法は、下部石材の背面に補助石材を配置し、これと上部石材を鉄筋 ($\phi 16\text{mm}$) で接続し、エポキシ系接着剤で鉄筋を固定することで、上部石材の滑動を抑制するものである。本方法では、上部石材の一部を穿孔する必要が生じるが、逆石となっている下部石材とその上部石材ともに本来のものを利用することが可能であり、新補材(新規に加工した石材)の利用や構造を大幅に変更することなく、石垣の安定性向上が可能である。ただし、一部とはいえ文化財である石材の破壊を伴う対策であるため、適用の可否は文化財の専門家による判断が必要である。

上述の方法による逆石補強方法における载荷実験の結果を図-10に示した。この図より、同じ設置角度で補強のないケース (A0) では、荷重が 4 kN を越えると、滑動に伴う勾配変化が見られるが、補強したケース (A0-R) は最大荷重 (変位 10.4 mm で最大荷重 19.56 kN) まで一定勾配を確保している。また、最大荷重は通常状態の滑動荷重 (約 10.5 kN) を大きく上回っている。こうしたことから、この補強方法が逆石の滑動防止に対する補強方法として有効な方法の一つであることが確認された。

4. 地震時の石垣の安定性評価

地震時における石垣の変状メカニズムは明確になっておらず、同様に動的な安定性の評価手法についても確立していない。こうした背景において、筆者らは大型振動台を用いた実物大石垣の振動実験を行い、地震時の石垣の変状プロセスを確認し、石垣の動的な安定性評価に役立つ知見を得ることを目指した。この検討結果の詳細は山本らの研究⁵⁾を参照していただくこととして、ここで

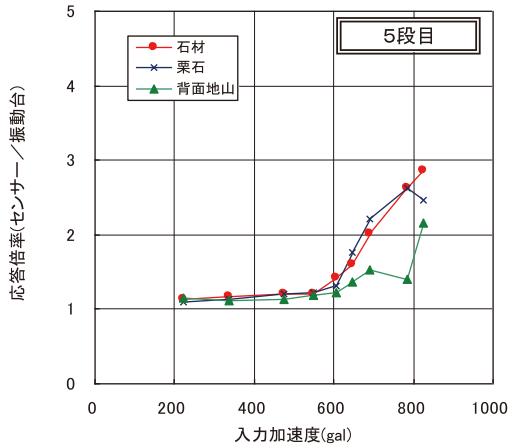


図-11 振動速度の応答倍率 (図-12 中の5段目)

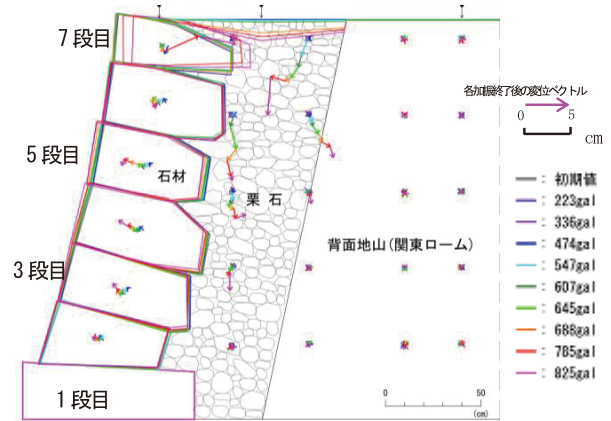


図-12 モデル石垣の変位状況

はその概要と実際の地震による石垣の変状の調査結果との対比から、地震時の石垣の変状プロセスについて簡単にまとめることとする。

4.1 実物大石垣の振動実験

文化財石垣の地震時の挙動については、直接地震時の状況を観察することが困難であり、実物大モデルでの振動実験についての研究報告もほとんどない。こうした中で、より現実に近い条件における石垣の変状過程を知るために、前述の振動実験を行った⁵⁾。この実験は、写真-7に示すように、大型振動台上に幅2m、奥行き4.5m、高さ2.2mの石垣を構築し、これに振動を加えながら、石垣の変状や応答速度などを計測したものである。実験結果の詳細は前述の論文⁵⁾に譲るものとするが、築石、裏栗石および背面地盤の応答加速度と変位の状況について、それぞれ図-11ならびに図-12示した。

図-11より、石垣は一定の入力加速度までは一体として応答し、その後、築石・裏栗石・背面地盤のそれぞれが異なった応答を示すことと、応答加速度自体も急激に増大することがわかる。このことは、変状の過程を示した図-12にも示されており、一定の加速度を超えると、築石、裏栗石、背面地盤とも、以下に示すような特徴的な変位過程を見せることがわかった。

- ① 築石：上下一体としてではなく、接触面においてすべり出し、特に石垣上部において変位量は大きくなる。中段以下においては、振動により前面に移動した築石が、逆方向に戻る際に、上部より沈下した栗石の影響(②参照)で、完全に元の位置までは戻りきらない。これを繰り返すことで、結果として前面に突出した「孕み出し」の状態になる。一方で石垣の上段部は上載荷重が小さく拘束力が小さいため、振動による変位が生じやすく、特に最上段では下位



写真-8 地点Aの石垣の変状(左)と天端の陥没と地割れ(右)



写真-9 地点Bの石垣の変状



写真-10 地点Cの石垣の変状

の築石との間で大きなずれが生じることがある。

- ② 裏栗石：個々の栗石が個別に動き出し、上面では波立つような動きを見せる。また、いわゆる「揺すり

表－５ 振動実験と現地調査結果の比較

	実験結果	現地調査結果		
		地点 A	地点 B	地点 C
孕み出し	○	○	△	○
抜け落ち・緩み	○	○	○	○
天端陥没・段差	○	○	○	○

○：顕著な変状，△：やや不明瞭な変状

込み」により、裏栗石層の上部が沈下する。

- ③ 背面地盤：振動による変状はほとんど発生しない。このため、背面地盤と沈下が生じる裏栗石の境界では不連続面が形成され、地表部では段差が発生する。
- ④ 間詰石：応答加速度が増大し、個々の築石間ですべりが生じると、間詰石の抜け出し、割れなどの変位・変状が生じる。

4.2 地震による石垣の変状状況

前述の実験結果を検証するために、東日本大震災で大きな被害が生じた3ヶ所の城郭石垣のうち、高さが2～4mの比較的低い石垣について変状の状況を調査した⁶⁾。これは、振動実験による石垣モデルが、高さ2.2mと低いものであったため、比較対象もそれに近い規模としたためである。また、実験で構築したモデル石垣には、わずかではあるが反りを再現しているが、ほぼ直線勾配に近いことから、比較対象とした石垣においては、厳密な勾配までは確認していない。

写真－8～写真－10は今回現地状況を調査した3ヶ所の城郭のうち、上記の条件に合致する石垣の状況を示したものである。以下に各石垣の変状の特徴をまとめる。

- ① 地点A(写真－8)：高さ3～3.5mであり、「打ち込み接ぎ」で積み上げられている。この石垣は「く」の字状に中央部が前方に変位し、石垣上部では陥没と地割れが生じていた。また、角石部分では明瞭な不連続面が生じており、地震時には角石と築石では挙動が異なることが類推される。
- ② 地点B(写真－9)：高さ2.5m程度の石垣であり、地点Aと同じく「打ち込み接ぎ」で積まれた石垣である。なおこの石垣は、近年伝統的技法により復元されたものであることから、石材全体が新鮮で風化等による表面の変色や劣化は見られない。石垣の変状としては全体的な緩みと間詰め石等の抜け落ちおよび上部の地盤沈下が顕著であった。
- ③ 地点C(写真－10) 高さ2.5m程度の「切込み接ぎ」に近い技法で積まれた石垣である。この石垣も「く」の字状に中央部が孕み出しており、石材間にも間隙が

生じている。また、石垣の天端においては、連続した陥没が見られ、20cm程度の段差が広く確認された。

東日本大震災による石垣の変状状況と前述の振動実験結果を対比したものが表－5である。この表に示したように、実際の石垣においても、振動実験により観察された変状とほぼ同等の変形が確認された。このことは、地震時においては、実際の石垣でも実験時と同様なプロセスで変形が生じた可能性が高いことを示している。同時にこの結果は、実験と同規模の石垣に対する地震時の挙動を推測する上でも有効である。ただし、より高い石垣や、山城など背面地盤条件が大きく異なる条件下での変状状況については、石垣の挙動が大きく異なる可能性もあることから、この結果をそのまま適用することはできないものと考えられる。一方で、こうした条件での実験的な検討には限界があることから、実際の地震後の変状事例の収集・分析や数値解析等による検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

空積みによる石垣はマクロ的には連続体としての評価が可能な場合もあり、これまでも主として背面地盤でのすべりに対する安定性評価として、円弧すべり法や有限要素法による解析が行われてた。しかし、実際の石垣は個々の築石の噛み合わせや摩擦などにより構造物としての安定性を保持しており、連続体として取り扱うことに限界があることは、最初に述べた通りである。

こうした背景において、本報では、城郭石垣の静的な安定性に関する実験結果と地震時の変状について検討した結果をまとめた。なお、ここで示した実験は、築石の摩擦特性や間詰石の効果および逆石が安定性に与える影響など、特定の目的を持って実施しているものである。しかし、そこから得られた結果は、孕み出しの状況など実際の石垣の変状との整合性が高いうえ、これまで経験的に言われてきた間詰石や逆石の安定性に与える影響についても、矛盾がなく説明できることから、石垣の変状について一般的な傾向を示すものと思われる。

以下には、具体的な変状に関する特徴を、わかりやすい表現でまとめることとする。なお、ここでは石垣背面から前方に作用する力を慣用的に「押し出し力」と呼ぶこととする。この押し出し力の原因には土圧、水圧、樹木の根の張り出しなどによるものが考えられる。

- ① 築石の摩擦特性：築石は背面からの押し出し力が作用した場合は、一定の値までは変位することなく抵抗するが、一旦滑動し始めると、そのまま動き出す

性質がある。その度合いは内部摩擦角 (ϕ) によって表すことができる。

- ② 石積み技法による安定性の違い：背面からの静的な押し出し力に対しては、打込み接ぎ、野面積みが $\phi = 50^\circ$ 程度であるのに比較して、切込み接ぎでは $\phi = 35^\circ$ と小さく、背面からの押し出しに対する抵抗は小さい。ただし、特に野面積みは天然石をそのまま用いることが多いため、個々の石材の形状や噛み合わせにより、 ϕ の値の変動も大きいものと想定される。
- ③ 間詰石の効果：間詰石により背面からの押し出し抵抗は増加する。その大きさは、条件により異なるものと推定されるが、間詰石がない場合に対して1～2割程度増大する。
- ④ 逆石の影響：逆石の存在が石垣の安定性に与える影響は大きく、逆石の水平面に対して前方に 5° ～後方に 5° 程度の範囲で傾斜する場合は、通常の場合（水平面に対して後方に 10° ～ 15° 傾斜）の50～80%程度の押し出し力で滑動し始める。すなわち、わずかでも築石が逆傾斜している場合は、一般的な積み方に対して、半分程度の押し出し力でも滑動する可能性があり、安定性に与える影響が大きい。
- ⑤ 地震時の石垣の変状：地震に対して石垣は、一定レベルの加速度までは築石および裏栗石が背面地盤と一体として挙動するため、構造物としての変状はほとんど生じない。しかし、そのレベルを超えると築石と裏栗石の応答加速度が急激に増大し、孕み出し、目地のずれや裏栗石の沈下などが生じる。振動実験で得られたこの変状の状況は、東日本大震災後の地震後の石垣の変状観察結果ともよく一致している。城郭石垣の安定性評価は、その石垣の高さ、構築状況

や地盤条件などにより大きく異なるが、本報で示したような基本的な特性は共通しているものと考えられる。今後は、具体的な検証事例をさらに増やすと同時に、数値解析手法の適用性も含めて、より汎用性の高い安定性評価手法について検討を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 笠博義, 阿波谷宜徳, 西田一彦, 西形達明: 石垣構成石材の原位置摩擦実験, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, pp. 457-458, IV-230, 2006. 9
- 2) 笠博義, 山本浩之, 外館寛, 西田一彦, 西形達明, 和田行雄: 石垣を構成する石材の形状による摩擦特性に関する実験的検討, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, pp. 241-242, IV-121, 2008.
- 3) 笠博義, 山本浩之, 阿波谷宜徳, 西田一彦, 西形達明, 和田行雄: 城郭石垣における間詰石の安定性向上効果についての実験的検討, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, pp. 467-468, CS12-003, 2007
- 4) 澤田純之, 西形達明, 笠博義, 西村毅, 船津貴弘, 和田行雄: 文化財石垣における逆石の滑動安定性に関する実験的検討, 土木学会第75回年次学術講演会講演概要集, VI-758, 2020. 8
- 5) 山本浩之, 西形達明, 八尾真太郎, 西田一彦, 笠博義: 実物大モデルを用いた城郭石垣の地震時挙動の検討, 土木学会論文集C, Vol. 66, No. 1, pp. 47-57, 2010. 1.
- 6) 笠博義, 山本浩之, 西田一彦, 西形達明: 城郭石垣の地震による変状に関する一考察, 地盤工学会第47回地盤工学研究発表会講演集, pp. 79-80, 2012. 7
- 7) 笠博義: 城郭石垣の工学的研究 - 石垣の調査技術 -, 安藤ハザマ研究年報, 論説, Vol. 8, pp. 1 ~ 7, 2020

Engineering research of castle masonry No.2 Stability of masonry

Hiroyoshi KASA

No materials for adhesion such as plaster are used in the masonry of castles in Japan, which is stable due to the meshing and friction between the stones. In this study, we investigated the effects of friction between stones and the structural characteristic of masonry on stability. The deformation of the masonry due to earthquakes was also examined by a large shaking table experiment and a field survey. The results of these studies can be effectively used in the engineering evaluation of masonry with cultural property value.