

城郭石垣の地震時挙動と その安定性に及ぼす栗石の影響^{*1}

Dynamic stability of castle masonry stone wall and behavior of cobble stone layer in stone wall

西形達明^{*2}, 山本浩之^{*3}, 笠博義^{*4}, 辻 清仁^{*5}

By Tatsuaki NISHIGATA, Hiroyuki YAMAMOTO, Hiroyoshi KASA and Kiyohito TUJI

概要

我国の城郭石垣には文化財としての価値が非常に高いものがあるが、老朽化により著しい変形の生じたものも数多く存在する。これらの石垣変形には少なからず地震が影響しており、地震時における城郭石垣の検討は石垣修復の立場からも非常に重要であると思われる。そこで本研究では、地震時における城郭石垣の安定性を力学的に評価することを目的とし、遠心載荷実験および個別要素解析(DEM)を行った。この結果、地震時には加速度の大きさによって、石垣の変形挙動は転倒モードから孕み出しモードに変化し、また栗石層が石垣と裏込め土の間で自由に運動することで緩衝効果を発揮して石垣石の変形を抑制することが明らかとなった。このように、栗石層は排水層としてだけでなく、地震時には石垣石の変位を抑制する機能を有しているものと考えられる。さらに、地震時の城郭石垣のように、分離した物体が大きく変位する場合の解析には個別要素法が有効であることが明らかとなった。

1. はじめに

歴史的価値が高く文化財でもある城郭石垣に関する実物による実験や調査は、変状や損傷を伴う可能性があるため、その修復技術や地震時の変形のメカニズムを考察するためには、モデル実験や数値解析に頼らざるを得ない側面がある。既往の研究にも、模型実験^{1),2)}や数値解析^{3),4),5)}を用いて城郭石垣の安定性を検討したものが数多くある。この意味で、石垣構造のような文化財では、その変形挙動を考察しうる数値解析手法を確立しておくことは非常に重要である。一方で、石垣構造は石垣石、栗石、裏込め土などの物理的性質の異なる材料からなる複合体であり、とくに地震時にはこれらの各材料の相互作用が、その変形特性に大きく影響を及ぼすものと考えられる。

そこで本研究では、遠心載荷実験結果と個別要素解析結果を地震時における城郭石垣の実物大振動実験を行った結果⁶⁾と比較することで、それぞれの結果の妥当性を検証した。その結果を踏まえ、石垣構造の中でも栗石層の挙動に注目して考察を行った。遠心載荷実験では栗石層の厚さの影響について検討し、個別要素解析では栗石層の剛性が石垣構造の変形に及ぼす影響について検討を行い、栗石層の振動特性と動的役割について考察した。

2 実験方法および解析方法

2.1 実物大振動実験⁶⁾

遠心載荷によるモデル実験や、個別要素法による数値解析を行う上で最も注意すべき点は、結果の信頼性であろう。本研究では、遠心載荷実験結果や個別要素解析結果と、著者らが以前に実施した実物大モデルを用いた振動実験の結果とを比較し、それぞれの整合性を確認することで実験結果および解析結果の妥当性を検証した。

本研究で参考とした実物大振動実験モデルに用いられた石積みは「打ち込み接ぎ」であり、石材は幅400mm、高さ300mm、奥行き600mm程度のものである。石垣モデルの幅は2000mm、高さは2100mmである。裏込め土には関東ローム(含水比91.4%, $\rho_t=1.4\text{g/cm}^3$)を使用し、その奥行きは土槽背面壁の影響を無視できるように余裕を持たせて2150mmとしている。栗石には直径50~400mmの玉石を使用し、栗石層の平均密度は 1.7g/cm^3 であった。このモデルを大型振動台上に乗せて加振実験を行った(写真-1)。入力地震波は表-1に示すように正弦波20波、3Hzとし、200gal~750galの範囲で段階的に加振した。

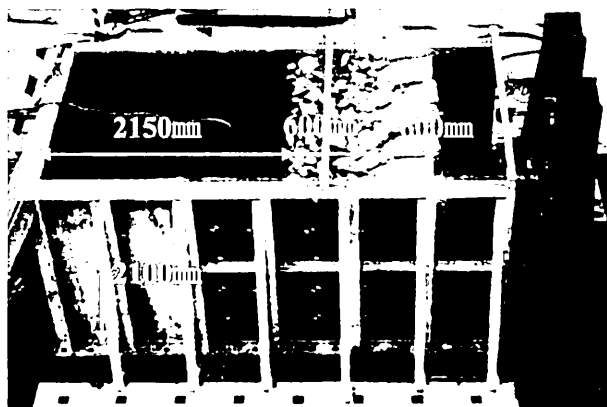


写真-1 実物大振動実験モデル

^{*1} keyword : 城郭石垣, 地震時安定性, 遠心実験, 個別要素法

^{*2} 正会員 工博 関西大学環境都市工学部
(〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

^{*3} 正会員 ㈱間組本店土木事業本部技術第二部

^{*4} 正会員 博士(工学) ㈱間組本店技術・環境本部

^{*5} 学生会員 関西大学大学院工学研究科

表-1 実物大実験の振動条件

入力波	周波数(Hz)	加速度(gal)	
		設定値	実測値
正弦波 20波	3	200	223
		300	336
		400	474
		450	547
		500	607
		550	645
		600	688
		650	785
		750	825

2.2 遠心載荷実験

遠心実験載荷実験には図-1 に示すような、実物大振動実験モデルのほぼ 1/10 サイズのモデルを用いた。したがって、この石垣モデルは 10G の遠心場で実物大モデルに相当する。遠心載荷実験モデルに使用した材料を表-2 に示す。ここで、裏込め土には豊浦標準砂と藤森粘土を重量比 2:1 で混合した土(含水比 14%, $\rho_s=2.1\text{g/cm}^3$)を使用し、栗石層には粒径 5~10mm の砕石を使用した。石垣石はアルミブロックを所定の大きさに加工して作成し、上下左右の石と接触する面にはサンドペーパーを貼り付けることで石材表面の摩擦抵抗を表現した。石垣ブロックは図-1 の正面図に示すように 6 段積みとし、最下部の根石に相当するブロックは固定とした。

測定は、石垣ブロックおよび栗石層と裏込め土内に加速度計を設置し、根石部分には石に作用する地盤反力を測定するため荷重計を設置した。さらに、遠心載荷実験では栗石層の厚さを 30mm, 60mm, 120mm と変化させることで、石垣構造の変形特性に及ぼす栗石層厚の影響を考察した。入力地震波についても、実物大実験と同様に周波数 31Hz で、正弦波 20 波とし、約 300~900gal まで順次加速度を増加させた。

表-2 遠心載荷実験の物性値

	裏込め土	栗石・介石	積み石
材料	豊浦標準砂、藤森粘土	砕石	アルミ
寸法(mm)	-	-	40×30×60
粒径(mm)	-	5~10	-
密度(g/cm^3)	2.1	2.00	2.70

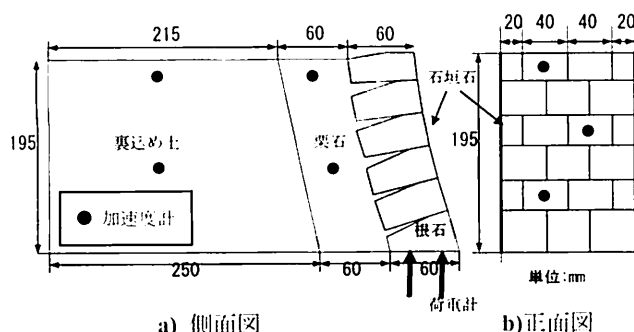


図-1 遠心載荷実験モデル (栗石層厚 60mm の場合)

2.3 個別要素解析

城郭石垣の変形解析に用いる手法の代表的なものには有限要素法と個別要素法がある。石垣のように個々に分離した材料からなり、さらには大変形が生じる可能性のある構造物に対する有限要素法の適用には限界があるものと考えられる。とくに、石垣の地震時の挙動は個々の石垣石や栗石の運動が全体としての安定性に影響を及ぼすものと考えられることから、著者らは以前から個別要素法の適用を試みている^{7),8)}。

本解析における個別要素モデルも、図-2 に示すように、実物大振動実験と同じ石垣高さと石垣形状とした。表-3 に個別要素解析に用いた物性値と解析条件を示す。表中に示した個別要素解析に必要な裏込め土の要素間バネ定数や要素間粘着力などの定数値の決定は以下のような手法によって行っている。

個別要素モデルに使用した裏込め土の要素と同じ要素を用いて、別途 2 軸圧縮シミュレーション解析を実施し、その結果より実物大実験に用いた土の強度定数 (c , ϕ) に対応する定数値を決定した。入力地震波の条件は、実物大実験あるいは遠心載荷実験と同じ条件とした。

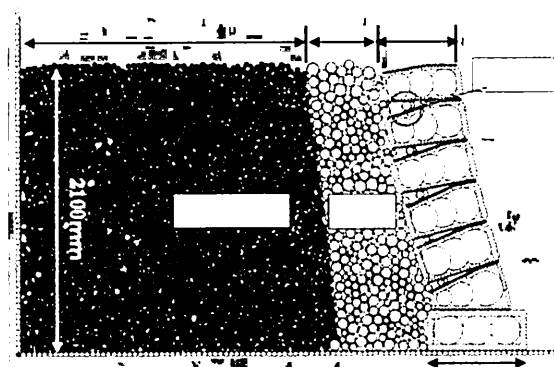


図-2 個別要素解析モデル

表-3 個別要素解析の物性値

	裏込め土	栗石・介石	積み石
寸法(mm)	-	-	300×600
粒径(mm)	30~50	50~100	-
密度(g/cm^3)	2.65		
摩擦係数	1	2	1
粘着力(N)	1	0	0
バネ定数(N/m)	1×10^5		

3 実験および解析結果

3.1 石垣石の水平変位量

図-3, 4, 5 に実物大振動実験と遠心載荷実験および個別要素解析における各地震加速度を与えたときの石垣石表面の水平変位分布を示す。図-3 の実物大振動実験では、地震加速度が小さい場合には、石垣石の上部ほど変位が大きくなっているが、645gal 程度の地震加速度から石垣高さの中程における変位が大きくなっている。石垣の変形モードは地震加速度の増加に伴い、転倒モードからはらみ出しモードに変化することがわかる。すなわち、加振加速度

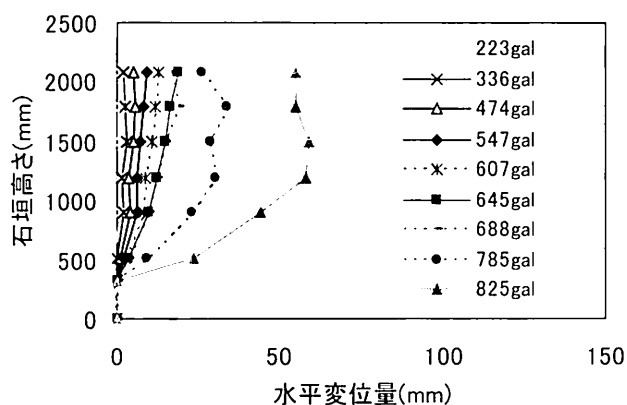


図-3 実物大振動実験による石垣水平変位量

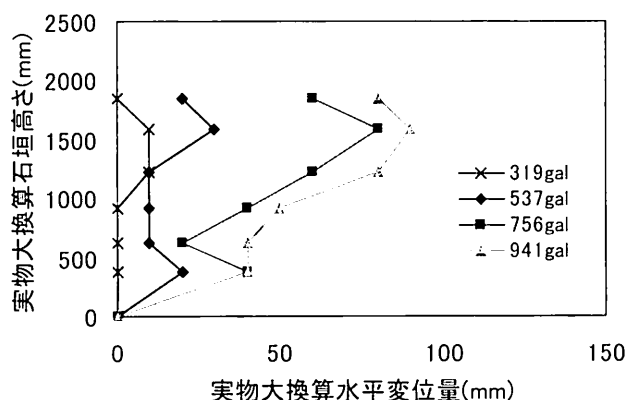


図-4 遠心載荷実験による石垣水平変位量

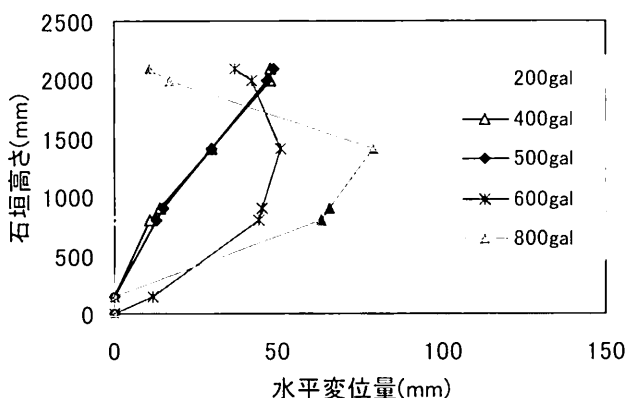


図-5 個別要素解析による石垣水平変位量

が小さい間は石垣が板状に挙動しており、加速度が大きくなると個々の石垣石が異なった挙動をし始めることではらみ出し変形が生じるものと考えられる。このことから、はらみ出し変形が顕著になり始めることが、石垣構造が不安定状態に至る兆候であることは、ほぼ間違いないものと考えられる。次に、図-4, 5 の遠心載荷実験および個別要素解析の結果をみると、変形量はもとより、600gal 付近で石垣の変形が転倒モードから孕み出しモードへ移行することなど、両方法ともに実物大実験の変形状態を再現できたものと考えられる。以降では、この遠心実験モデルと個別要素解析モデルを用いて城郭石垣の変形挙動を考察する。

3.2 遠心載荷実験による石垣の変形に及ぼす栗石層の厚さの影響

栗石層は本来、排水層としての機能を有しているとされているが、地震時の石垣の動的挙動に何らかの関係を有しているものと推察できる。そこで、遠心載荷実験において栗石層厚を 30mm, 120mm と変化させた場合の石垣石水平変位量を図-6, 7 に示す。図-4, 6, 7 (図-4 は栗石層厚 60mm の場合) を比べると、栗石層厚を大きくすることで地震時の石垣石の水平変位量が抑制されており、とくに、栗石層厚が 120mm の場合では、石垣の不安定化の原因と考えられるはらみ出し変形がほとんど発生していない。実際の城郭石垣の栗石層厚は石垣石の控え長さと同程度のものが多いようであるが、本実験結果から、栗石層厚を石垣石の控え長さより大きくすることで、地震時における石垣石の変位を抑制しうるものと思われる。

次に、図-1 中に示した根石下部に設置した 2 つの荷重計の測定値から、根石に作用する反力の作用位置を求めることができる。そこで、各地震加速度段階での反力作用位置を示したものが図-8 である。縦軸の反力作用位置は石垣石前面を 0 としており、図中の B/3 ライン (B: 根石の控え長さ) は、middle third の条件の限界位置を示している。図より、栗石層厚が小さいものほど、反力の作用位置が前方にあり、とくに栗石層が 30mm の場合は他の条件下と比べて、常に不安定な状態にあることがわかる。

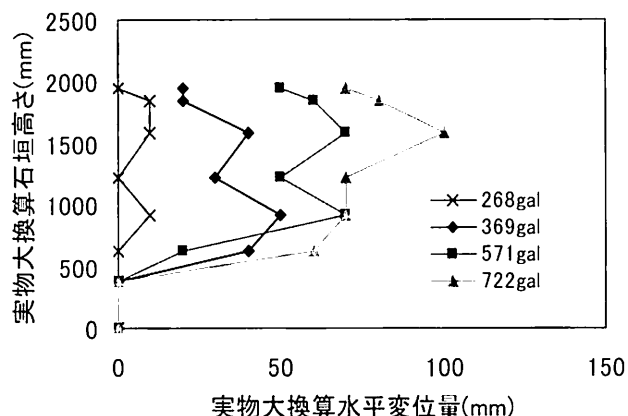


図-6 栗石層厚 30mm の場合の石垣水平変位量

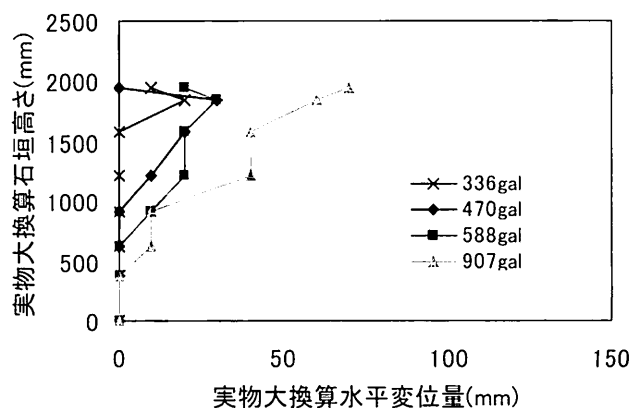


図-7 栗石層厚 120mm の場合の石垣水平変位量

以上のことから、栗石層の厚さが地震時の石垣石の変形と安定性に影響を及ぼしているものと考えられる。次に、石垣構造の動的挙動について以下に考察を行う。

図-9 は遠心載荷実験における石垣石、栗石層、裏込め土の入力加速度と応答加速度倍率の関係を示したものであるが、栗石層の応答が最も大きくなっており、栗石層が入力振動に対して最も敏感に応答していることがわかる。

図-10 は栗石層厚が異なる場合の栗石層の応答加速度倍率を示したものである。図より、栗石層厚が 30mm の場合の応答加速度が最も小さく、入力加速度が増加してもほとんど増加しない。一方、栗石層厚が 60mm、120mm の場合には、500gal 付近から応答倍率が増加する傾向がみられる。すなわち、栗石層の応答が大きいほど石垣石の変形が小さく安定性が高いことになる。

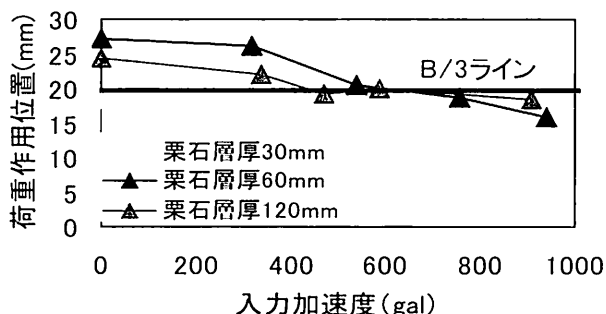


図-8 根石に作用する反力の作用位置

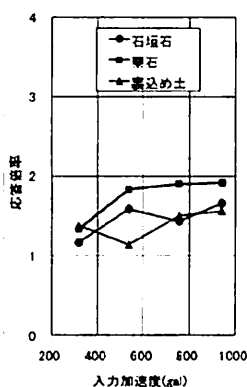


図-9 石垣構造の加速度応答倍率

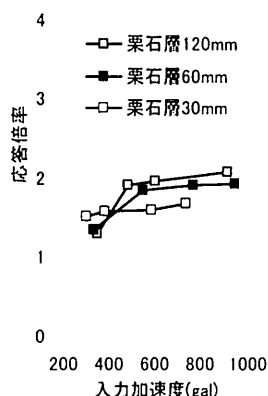
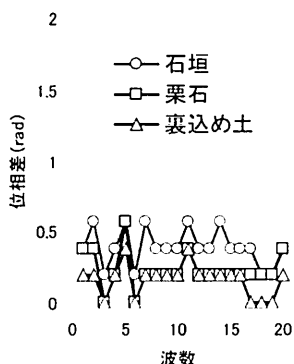
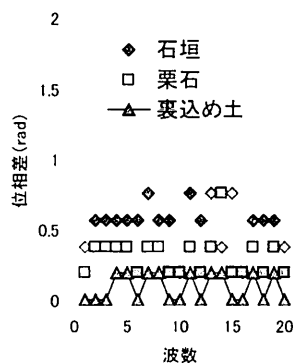


図-10 栗石層厚の違いによる加速度応答倍率



a) 栗石層厚 30mm



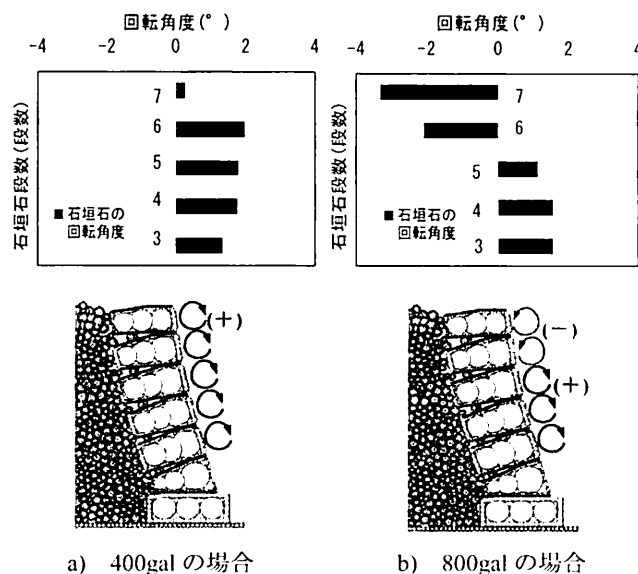
b) 栗石層厚 120mm

図-11 応答加速度の位相差 (800gal 付近)

以上のような挙動は、石垣石、栗石、裏込め土の異なる 3 つの材料による動的な相互作用によるものと思われる。そこで、栗石層厚 30mm と 120mm の場合について、石垣の上部における各材料（石垣石、栗石、裏込め土）の応答加速度と入力地震加速度の位相差を図-11 示す。栗石層厚 30mm の場合では、栗石の位相差が裏込め土の位相差と大きな差異がなく、栗石と裏込め土が一体となって挙動している。一方、栗石層が 120mm の場合では、栗石と石垣石の位相差は 0.2~0.8rad の間で大きく変動している。このことは栗石層厚が大きくなることで個々の栗石が自由に運動し始めることを示しており、この栗石の自由な運動には、石垣石に伝達される力を緩和する効果があるものと考えられる。

3.3 個別要素解析による石垣石の変位と栗石層の剛性の影響

石垣に変形の生じる要因には、石垣石間のずれと石垣石自身の回転によるものがある。個別要素解析は加振による個々の石垣石の運動による変位を詳細に検討するために非常に有効な手法であるといえる。そこで、図-2 に示した個別要素モデルによる加振前後の石垣石の座標から各石垣石の回転量を算出した結果が図-12 である。なお、回転は右回りを正とし左回りを負としている。図より、加振加速度が 400gal の場合は、すべての石に右回りの回転が生じており、この結果、図-5 に示したように石垣には全体として転倒モードの変形が生じることになる。また 800gal の場合には、下から 5 番目と 6 番目の石の間で石の回転方向が右回りから左回りに変化している。結果として、この部分にははらみ出しモードの変形が生じることになる。このように、城郭石垣の変形には、石垣石間のせん断ずれよりも個々の石の回転が大きく影響を及ぼしているものと考えられる。



a) 400gal の場合

b) 800gal の場合

図-12 石垣石の回転量とその模式図

前述の遠心載荷実験では栗石層の厚さによる石垣石への影響について考察したが、以下の個別要素解析では栗石層の剛性の影響を考えることにする。ここでいう栗石層の剛性とは、栗石の締固め度などによる変形特性の違いを表わしており、栗石の要素間バネ定数を変化させることで表現される。

図-13 は加振条件を 600gal として、栗石層の剛性値に異なる値を与えた場合の石垣石の変形量を比較したものである。ここで使用した要素間バネ定数の値は、あくまで比較のために選定したものであり、実験等から得られた具体的な数値ではない。一般に単一の土層を対象とする場合には土の剛性を小さくすると変形量は大きくなるが、図-13 を見ると、栗石層の剛性が小さくなるほど石垣石の水平変位量が小さくなる結果が得られている。これは、栗石層の剛性（バネ定数）を減少させることで、個々の栗石が自由に運動しうようになり、石垣石に作用する力の緩衝材となったものと考えられる。この状況は、遠心実験の結果（図-11）に示したように、栗石層厚を大きくすることで栗石層と石垣石間の応答加速度の位相差が大きくなることと同じことを意味している。このように、栗石層が比較的自由に挙動しうる状態であれば、石垣石への過度な力の伝達を緩和する役割を担っているものと考えることができる。

次に、周波数の影響を検討したものが図-14 である。図は 600gal における石垣高さ 950mm での石垣石水平変位量

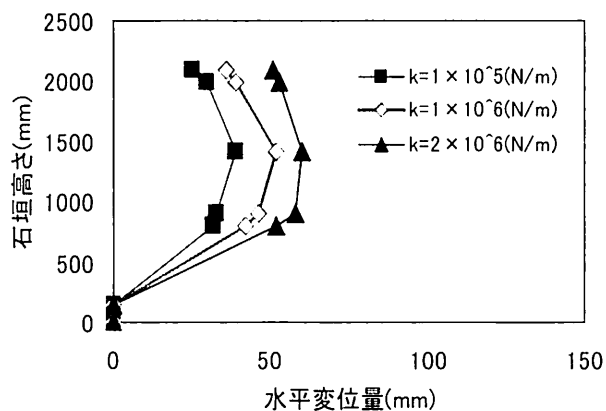


図-13 栗石層の剛性と石垣の水平変位

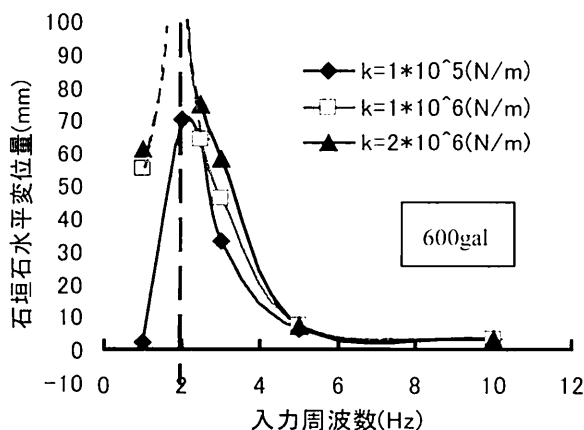


図-14 入力周波数の影響

と入力周波数の関係を示している。

周波数 2Hz の地震動では、栗石層の剛性による影響に関係なく石垣は大きく変形し、とくに栗石層の剛性が大きい場合には崩壊に至った。このことから、本研究で対象とした石垣モデル全体としての固有振動数 2Hz 程度であり、栗石層の剛性の影響はあまり見られないようである。しかし、5Hz 以下の周波数領域ではいずれの周波数でも栗石層の剛性が小さい場合の変形量が小さくなっている。これより、石垣の修復時には栗石層は過度な締固めを行わず、栗石が自由に運動しうる余裕を持たせて構築することが、石垣構造の耐震性の向上に効果的であると推察される。

4. まとめ

- 1) 本研究で対象とした城郭石垣の地震時挙動は 600gal 付近から転倒モードからはらみ出しモードへ移行する。また、はらみ出しモードに至ると石垣石の反力荷重作用位置が前方に移動し、力学的にも不安定な状態になる。この状況は、実物大振動実験、遠心載荷実験、個別要素解析のいずれの手法によっても同様の結果が得られた。
- 2) 栗石層は排水層とされているが、地震時の石垣の変形を抑制する効果がある。とくに、栗石層の厚さを石垣石の控え長さよりも大きくすることで、その効果を助長することができる。これは、栗石層厚が大きいと個々の栗石が自由に運動し、石垣石に伝達する力を緩和するためと考えられる。
- 3) 石垣のはらみ出し変形の原因としては、背面土圧による石垣石間のせん断ずれよりも、石垣石自身の回転による影響が大きいものと考えられる。
- 4) 栗石層の剛性（変形係数）を大きくすると、地震時の石垣の変形が大きくなる。すなわち、栗石層では個々の栗石が自由に運動しうる状態であれば、石垣石への力の伝達を緩和させることができる。このように、石垣構造の変形は石垣石と栗石層の相互作用によって生じるものと考えられる。
- 5) 本研究で対象とした城郭石垣の固有振動数は約 2Hz であった。さらに、1～5Hz の周波数領域では、栗石層の剛性を小さくすることで、石垣構造の変形を抑制しうるものと考えられる。

参考文献

- 1) 松永信幸, 榎井健, 八尾真太郎: 石垣築石部の水平振動時の崩壊挙動に関する模型実験, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.54B, pp.29-36, 2008.
- 2) 小林善勝, 新谷洋二, 田中邦熙, 谷優作: 石垣模型肩部の静的載荷実験, 土木史研究講演集, Vol.24, pp.251-254, 2004.
- 3) 西山哲, 大西有三他: DDA による空積み擁壁石垣の解析, 第 8 回日本計算工学会講演会計算工学講演論文集, 2003.

- 4) 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.
- 5) 玉野富雄，金岡正信，西田一彦，西形達明，森本浩行，高岡光夫：大阪城石垣の地震時力学挙動，第 7 回地盤改良シンポジウム論文集，日本材料学会，pp.277-282，2006.
- 6) 山本浩之，西形達明，八尾眞太郎，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.43-57，2010.
- 7) 西形達明，笠博義，西田一彦，森本浩行，阿波谷宜徳，山本浩之，引場啓太：城郭石垣の盛土構造と動的安定性，土木史研究，235-240，2008.
- 8) 笠 博義，西田一彦，西形達明，森本浩行，阿波谷宜，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，Vol.27，45-51，2008.