

関西大学環境都市工学部 学生員 ○魚住 健大  
 関西大学大学院 学生員 井上 貴玄  
 関西大学 正会員 西形 達明

1. 研究背景

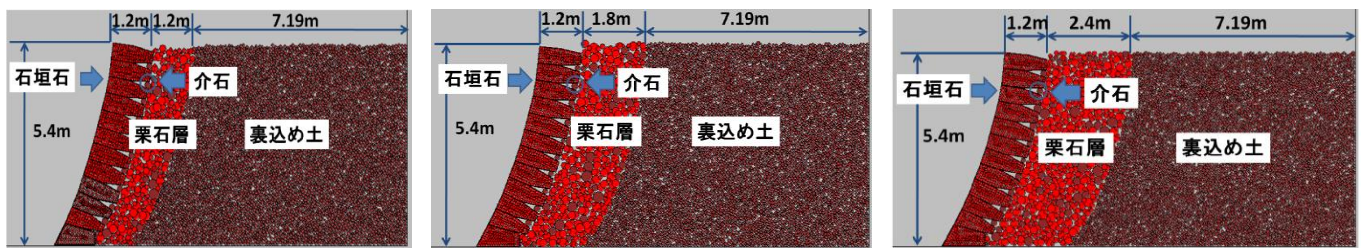
歴史的文化遺産である城郭石垣は、裏込め土、栗石層、石垣石によって構成される複合構造物で、石の加工技術の発展と共に石積みの方も野面積みから打ち込みはぎ、切り込みはぎと変転を遂げてきた。現存する城郭石垣は築城から 400 年以上経過しているものが多く、老朽化や地震による崩壊などが問題となっており、変形が局所的に生じているところが多い。また近年ではまちづくりの観点からランドスケープとしての価値を見出され、ますます石垣修復の必要性が高まっている。一方で石垣修復の現場では経験則による修復方法が用いられており、力学的な観点からの石垣の補修方法については未解明な部分が多い。そこで本研究では、地震時の石垣構造の動的挙動を調べることで、介石の効果を検討するとともに、栗石層厚が石垣構造の安定性に与える影響について検討を加えた。

2. 石垣モデル

本研究では解析方法として 2 次元個別要素法 (DEM) を用い、モデルは石垣高さ 5.4m (積み石 12 段)、石垣石の控え長さ 1.2m の城郭石垣とし、石積み方法は打ち込みはぎか切り込みはぎを念頭に置いている。図 1 に示すように栗石層厚の異なる 3 つの CASE について計算を行うことで地震時の栗石層厚の影響を調べた。なお、計算に用いた入力地震波には 1Hz, 200gal の正弦波を 20 波作用させた。計算に使用した物性値は表 1 に示すとおりである。図 1 の中に示す介石は石垣石の後部の空隙部に設置され、主に石積みの勾配を調節する役割を有している。本研究ではこの介石の有無による石垣の安定性に及ぼす影響についても考察を行った。

表 1 DEM 解析に用いた物性値

	根石	石垣石	栗石	介石	裏込め土
粒径(mm)	-----	-----	75~150	-----	25~50
密度(kN/m <sup>3</sup> )	2650	2650	2650	2650	2650
Kn,Ks(kN/m)	1×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>
摩擦係数(f)	1	1	2	2	1
粒子間粘着力(N)	0	0	0	0	1



(a) CASE1(栗石層厚 1.2m) (b) CASE2(栗石層厚 1.8m) (c) CASE3(栗石層厚 2.4m)

図 1 石垣構造解析モデル

3. 解析結果

図 2 に CASE1~3 における石垣石の水平変位量を示す。また、図には介石のある場合とない場合の両方の結果が示されている。図より、CASE3 の栗石層厚が大きい場合に石垣石水平変位量を抑制できていることが分かる。また、栗石層厚が大きい場合には、石垣は前倒れの状況を示しているが、栗石層厚が小さくなると石垣中段部において徐々に孕み出し変形が生じる傾向がみられる。経験的には栗石層の厚さは石垣石の控え長さの 2 倍程度とするのが良いと言われている

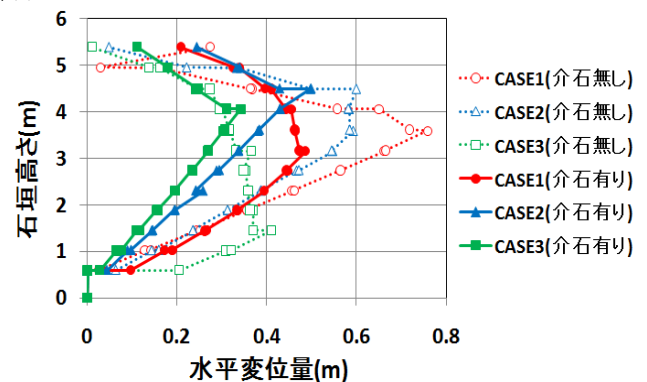
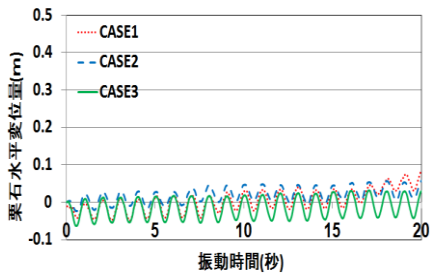
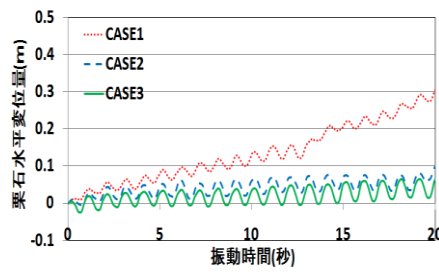


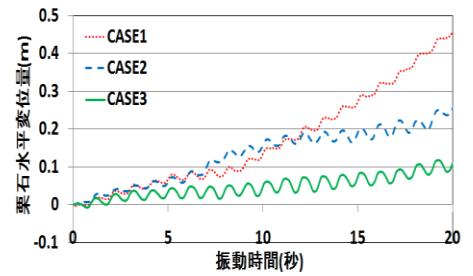
図 2 石垣石の水平変位量



(a) 石垣下部の栗石水平変位量



(b) 石垣中部の栗石水平変位量



(c) 石垣上部の栗石水平変位量

図3 栗石の変位応答

がり、本解析結果からもほぼ同様の結果が得られている。次に介石の有無による違いを見てみると、どのケースにおいても介石が有る場合の変位が小さくなっている。このことより、石垣構造の安定性に及ぼす介石の効果は大きく、石垣修復の際には介石の点検を行い、介石を健全に保つことが重要であると考えられる。

栗石層中の栗石要素を抽出し、その加振中の水平変位応答を図3に示す。なお上部(天端部より4m)、中部(天端部より3m)、下部(天端部より1.5m)と3か所の結果を示している。図より個々の栗石の水平変位量は栗石層厚が大きいかほど小さくなる傾向がみられるが、個々の応答振幅は栗石層厚が大きいかほど大きくなっている。

そこで、栗石層と石垣石の運動の相互関係を調べるために、図4、5に栗石層と石垣石の応答振幅倍率(応答振幅を入力振幅で除したもの)と栗石層厚の関係を示す。これより、栗石層厚が大きくなると栗石の振幅が大きくなり、石垣石では反対に小さくなっている。次に、図6に栗石層と石垣石の振動位相差(入力波との位相差)を示す。図より栗石層厚が大きくなると、栗石層の位相差が大きくなり、逆に石垣石では位相差が小さくなっている。

以上のことから、栗石層厚が大きくなると栗石が自由な運動をすることで、緩衝材の役割を果たして石垣石への力の伝達を抑制しているものと考えられる。

#### 4. まとめ

- 石垣石の変形に及ぼす介石の効果は大きいことから、石垣の維持管理においても介石を健全に保つことが必要である。また、修復の際には栗石層厚は石垣控え長さの2倍程度確保することが望ましい。

- 栗石層厚が石垣石の水平変位量に影響を与えるのは、栗石層厚によって栗石そのものの運動が異なるためである。

栗石層厚が大きいかほど栗石層が自由な挙動をすることで石垣石への伝達する力を緩衝し、石垣石の水平変位を抑制しているものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 吉沢和久:駿府城二ノ丸堀石垣災害復旧設計における構造検討について, Park and open space research Institute report, No.5, 2009.

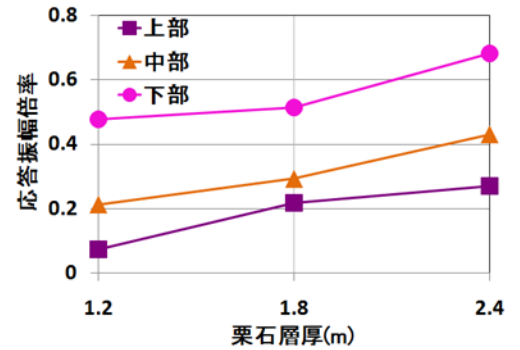


図4 栗石の応答変位倍率

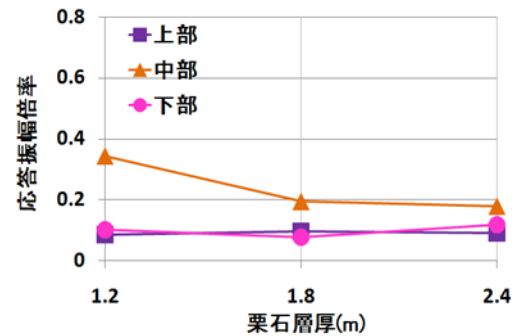
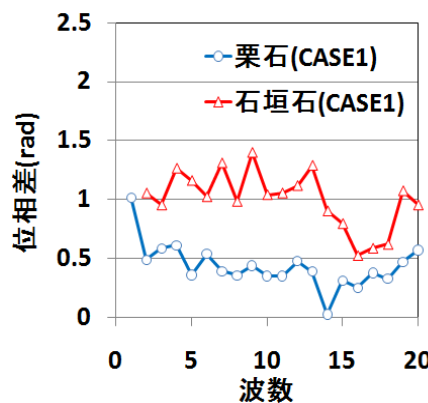
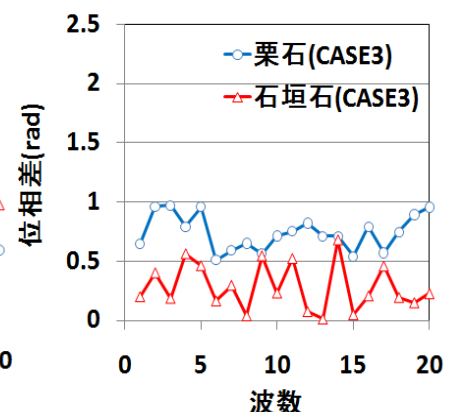


図5 石垣石の応答変位倍率



(a)CASE1(栗石層厚 1.2m)



(b)CASE3(栗石層厚 2.4m)

図6 栗石と石垣石の応答変位位相差