

第 部門 遠心載荷実験による城郭石垣の地震時変形挙動

関西大学大学院 学生員 ○辻 清仁
 関西大学環境都市工学部 正会員 西形 達明

1. はじめに

400 年以上も現存する城郭石垣は歴史的、文化的価値が高く、後世に保存すべき文化遺産である。この城郭石垣に変形や崩壊を生じさせる最大の要因として地震が挙げられる。近年でも地震による城郭石垣の崩壊や石垣石の孕み出し、クラックが生じた報告もあり地震時挙動の検討は重要課題である。しかし既往の研究では石垣石を直方体として扱われており¹⁾、実物の石垣石とは形状が異なりその研究結果は危険側に評価されると思われる。そこで本研究では遠心力载荷装置を用い、石垣石の石尻部分を加工し地震時における積み石形状の影響を検討した。

2. 実験手法

遠心载荷実験では、モデルの作製にあたって裏込め土に豊浦標準砂、栗石に3号硅砂を使用し、石垣にはアルミブロックを用いてこれを25段積みすることで城郭石垣モデルを作成した(写真-1)。なお、介石には栗石同様、3号硅砂を用い、石垣最下部の根石は固定とした。そこで、本研究で用いた積み石を図-1に示す。



写真-1 石垣モデル

図-1に示すように全体の石垣長さをLとし、石と石の接する部分の長さを L_i として $L_i/L=1.0, 0.3, 0.1$ の積み石を3種類作製した。また、このような石の接する長さ(加工度)の違いは、「野面積み」「打込み接ぎ」「切込み接ぎ」の違いを表現しうる可能性

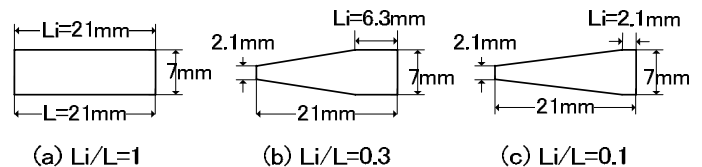


図-1 石垣石の加工度

があるものと考えている。モデルは実際の積み石の大きさを考慮し、70Gの遠心場においた。入力地震波は0.7Hz, 120galとし、より顕著な変形特性を見るため波数は50波と設定した。表-1に使用材料の物性値を示す。

表-1 遠心载荷実験の物性値

	裏込め土	栗石・介石	積み石
材料	豊浦標準砂	3号硅砂	アルミ
寸法(mm)	-	-	7×21×50
粒径(mm)	0.19	2.00	-
密度(g/cm ³)	1.80	2.00	2.70

3. 実験結果

3.1 積み石形状と介石の影響

図-2に石垣石の加工度の違い($L_i/L=1.0, 0.3, 0.1$)による地震時の水平変位分布の比較を示す。図より地震時では石垣石の加工度が小さくなるほど水平変位量が大きくなっている。加工度が0.3の石垣と加工度が0.1の石垣の場合には、加振により石垣にははらみ出し変形が生じるが、直方体(加工度1.0)の石垣においては城郭石垣の崩壊の原因となる孕み出し変位はほとんどみられない。このことから石垣モデルを直方体の石垣で表現すると、石垣の変位を過小評価し危険側の結果を与えることになるものと考えられる。次に、介石の影響による比較である。介石は石垣の背面において石垣石と石垣石との間に設置することで石垣石のずれを防ぐとともに石垣の反り形状を作り出すための役割を持っている。そこで、図-3は遠心実験による介石の有無による石垣水平変位の比較を加工度が0.3の場合について示したものである。図より、介石のない石

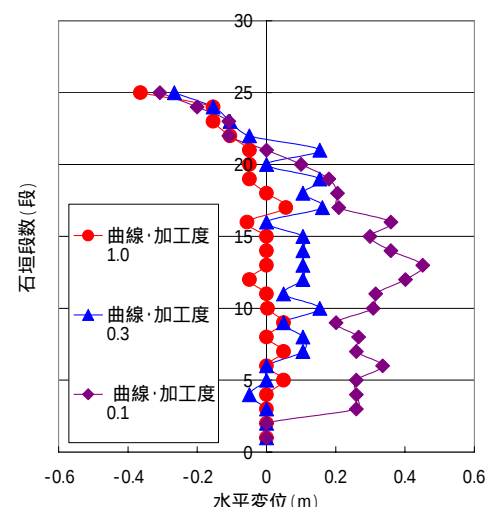


図-2 積み石形状による比較

図-3は遠心実験による介石の有無による石垣水平変位の比較を加工度が0.3の場合について示したものである。図より、介石のない石

垣では明らかに孕み出し変位が大きくなっていることがわかる．これは介石のない石垣は積み石と積み石の間に空隙があるため，積み石に回転変位が生じやすくなったためである．一般的に城郭石垣の孕み出し現象は背面土からの土圧によって生じる現象と考えられている．このような空隙は，個々の石垣石の回転によって石垣構造に局所的な座屈現象が生じたために生じたものと推察することができる．したがって，石垣構造の孕み出しは従来からいわれる土圧の影響ではなく，介石の欠落によって空隙が生じ，石垣石自身の回転による石垣構造の座屈によるものではないかと考えられる．そのため，城郭石垣の補修の際には介石の点検が重要であり，介石の劣化や抜け落ちといった点に注意する必要がある．

3.2 孕み出し指数

城郭石垣の安定性を把握する一つの方法として石垣孕み出し指数がある．孕み出し指数とは図-4 に示されるように，孕み出し量 δ (cm) を孕み出しが生じた部分の石垣高さ H (m) で除した値であり次式で表される．西田²⁾らは，石垣構造が不安定状態となる孕み出し指数の限界値は約6であるとしている．そこで，本研究における遠心実験の結果から孕み出し指数を求めて検討を行った．図-5 に加振時の孕み出し指数と石垣石の加工度の関係を示す．なお，本実験における石垣モデルの曲線形状は「後藤家文書」による形状を用いている．直線形状の加工度0.1の石垣モデルでは加振によって崩壊したが，崩壊直前の孕み出し指数は6を大きく上回っている．曲線形状の加工度0.1の石垣は孕み出し指数は6に近い値となっている．この石垣モデルは崩壊することはなかったが，変形量は非常に大きかった（図-2 参照）．このことから，孕み出し指数による石垣安定の限界値は玉野らが報告しているように6付近が妥当値であるものと考えられる．

4.まとめ

- (1) 直方体の積み石モデルを用いると極度に高い安定性を示し，実際の城郭石垣とは異なった挙動を示す．このため，積み石モデルはできるだけ実際の積み石の形状に近いものを用いる必要がある．
- (2) 城郭石垣の孕み出し変形は裏込め土の土圧によるものではなく，介石の欠落による石垣石の回転と局所的な座屈現象によるものであると考えられる．したがって，石垣構造においては介石の機能が重要であり，今後の石垣の修復時には介石の点検が重要である．
- (3) 石垣が不安定性を示す孕み出し指数の限界値は，既往の研究に示されているようにほぼ6付近であると思われる．したがって，この孕み出し指数により城郭石垣修復の指標とすることができるものとする．

5.参考文献

- 1) 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．
- 2) 西田一彦，玉野富雄：歴史遺産としての城郭石垣の安定性評価手法の工学的提案，地盤に係わる維持，補修，管理技術に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.125-132，1998．

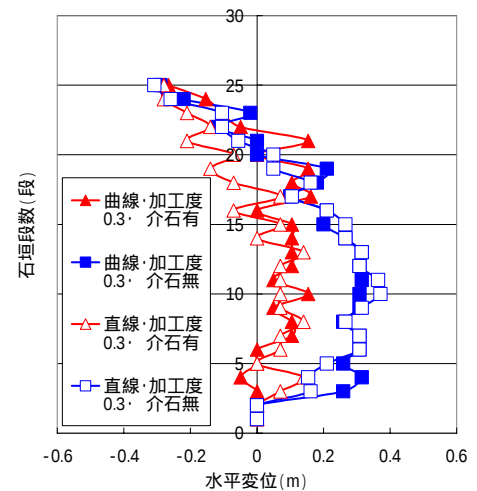


図-3 地震時による介石の有無による比較

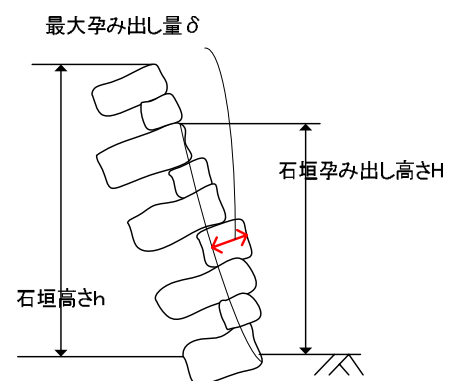


図-4 孕み出し指数の定義

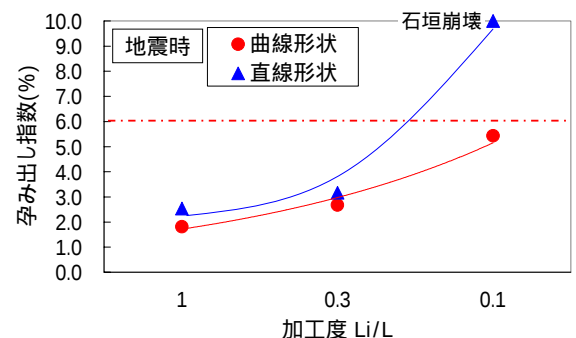


図-5 地震時の孕み出し指数