遠心載荷実験による城郭石垣の安定性に及ぼす栗石の影響

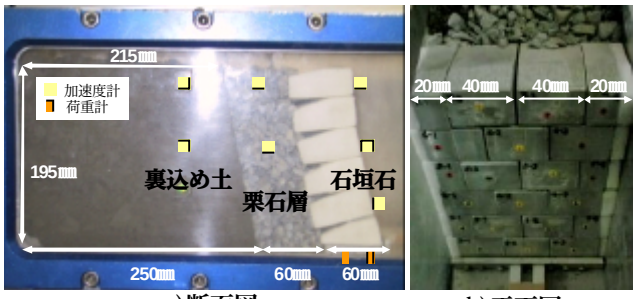
関西大学大学院　学生会員　○辻　清仁
関西大学　正会員　西形　達明
㈱間組　正会員　山本　浩之
㈱間組　正会員　笠　博義

１．はじめに

城郭石垣は文化財である反面，現在周辺を公園や災害時の避難場所としてその姿を保持している．このように近年では，城郭石垣を文化遺産としてだけでなく，まちの活性化に利用され社会基盤構造物としての側面も有している．その一方で，地震によって崩壊や著しい変形が生じたなどが報告されており[1)]，石垣の修復・保存の立場から見ても地震時の挙動を検討する必要がある．城郭石垣の構造は石垣石，栗石，裏込め土から構成されており，栗石層は本来，排水機能のために設置されている．しかし，地震時における城郭石垣の変形はこれらの異なる材料の相互作用が影響を及ぼすものと考えられる．そこで遠心力載荷装置を用い，地震時における城郭石垣の地震時挙動を検討するとともに，栗石層が石垣石の変形に及ぼす影響を検討した．

２．実験概要

図-1 に，実験に用いた城郭石垣モデルと各計測器の概略図を示す．実験に用いた地盤材料とその物性値を表-1 に示す．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%，$?_t$=2.1g/cm^3)を用いた．石垣石はアルミブロックを加工し，各ブロックが接する面にはサンドペーパーを貼り，石材表面の摩擦特性をモデル化した．アルミブロックの石垣モデルは 6 段とし，最下部の根石は固定とした．この石垣モデルは，著者らが実施した実物大振動実験[2)]の石垣と同形状となるように作製した．測定としてはブロック表面および栗石層，裏込め土内に加速度計を設置し，根石部分には地盤反力を測定するための荷重計を設置した．本研究では栗石層が石垣石変形に及ぼす影響を検討するために，栗石層厚を 30 mm，60 mm，120 mm の 3 ケースに変化させた．遠心加速度は 10G とし，入力地震波は 3Hz・20 波の正弦波とし，順次加速度を増加させた．

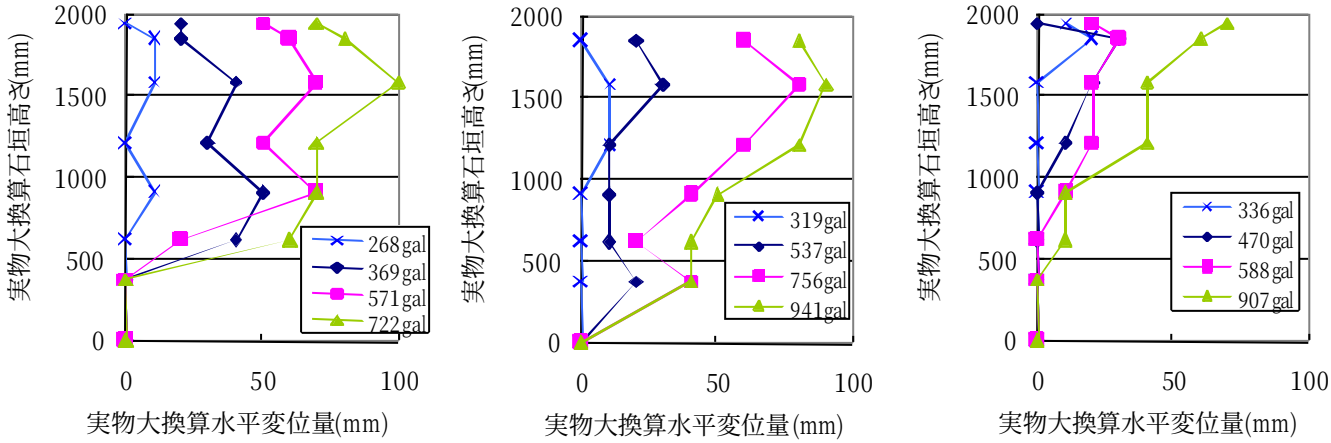


a)断面図　　b)正面図

図－1 石垣モデル

表-1　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



a) 栗石層 30mm　　b) 栗石層 60mm　　c) 栗石層 120mm

図-2　石垣石水平変位量

キーワード:遠心載荷実験　城郭石垣　栗石　安定性

連絡先:564-0073 大阪府吹田市山手町 3-3-35　関西大学大学院工学研究科　TEL/FAX 06(6368)1121

３．実験結果

(1) 石垣石の水平変位量

図-2 に栗石層厚を変化させた場合の石垣石水平変位量を示す．入力加速度が小さい段階では，石垣上部の変位が最も大きく転倒モードを示している．600gal 以降では，石垣の中部の変位が大きくなり，はらみ出しモードを示すようになる．また，栗石層厚を大きくすると地震時における石垣石の水平変位量が抑制されることがわかる．また，栗石層厚が 120 mm の場合では地震加速度が大きくなっても石垣石の変形量が小さく，はらみ出しもほとんど生じておらず安定していることがわかる．一般的に栗石層は排水層のために設置され，栗石層厚は石垣石の控え長さの 2 倍程度であるが，本実験結果から栗石層厚が石垣石の控え長さの 2 倍以上であると地震時における石垣石変形を抑制する役割を有していると考えられる．

(2) 根石底部の地盤反力

図-3 に根石部の前面に設置した荷重計による各加速度段階での加震後の地盤反力を示す．600gal までは加振後の地盤反力は入力加速度の増加に伴い増加するがそれ以降は減少傾向を示す．このことは石垣形状が転倒モードからはらみ出しモードへの変化を反映しているものと考えられる．

次に，図-4 は根石部にある荷重計による前面側と背面側の荷重から，各入力加速度段階での地盤反力の作用位置を示す．ここでは，石垣石前面を 0，背面側を 1 とし，偏心量で表している．反力の作用位置が図中の B/3 ラインより前面側になると，力学的に不安定な状態になる．図より 600gal付近から，地盤反力の作用位置が B/3 より前面側に移動し，不安定な状態になる．栗石層厚 30mm の条件では，地盤反力の位置が他の条件と比べて前方にあり，地震加速度が小さい段階から不安定な状況にある．一方，栗石層厚を大きくすると地盤反力の作用位置は 600gal 付近から B/3 より前側になるものの，600gal までは，安定を保っていることがわかる．

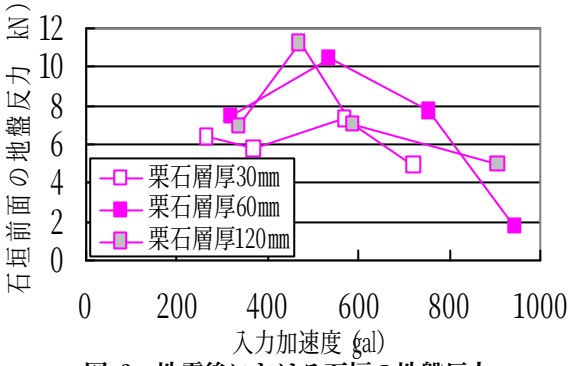


図-3　地震後における石垣の地盤反力

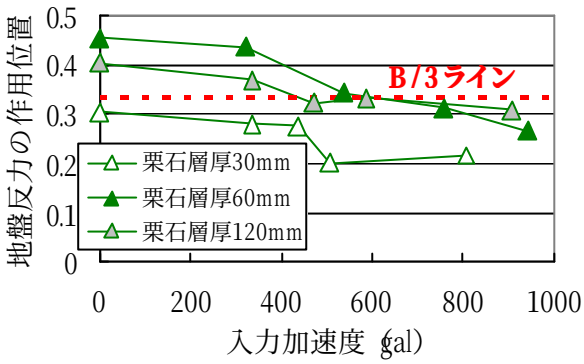
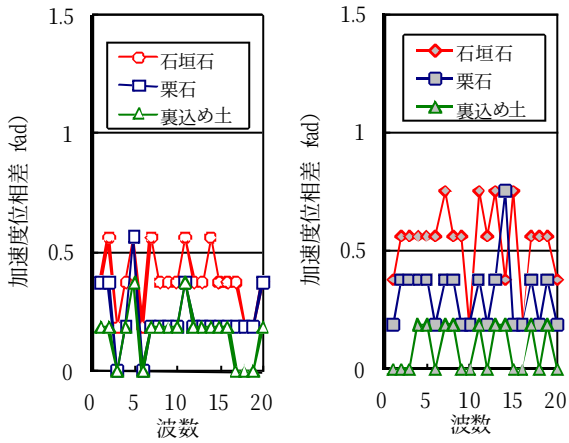


図-4　石垣の地盤反力の作用位置



a）栗石層 30mm　　b）栗石層 120mm

図-5　各材料の加速度位相差

(3) 各材料の応答加速度位相差

石垣石構造全体の振動特性を検討するために各材料の入力加速度との位相差について検討を行った．図-5 に，地震加速度 500gal での栗石層厚の違いによる各材料の応答加速度位相差を示す．栗石層厚 30 mm の場合では，裏込め土，栗石および石垣石の位相差にあまり差異がなく，各材料が一体となって挙動していることを示している．一方，栗石層が 120 mm の場合では，栗石と石垣石の加速度位相差は 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材料が自由に運動し始めることを示している．このように地震時においては，栗石の自由な運動は石垣石に伝達される力の緩衝材となり，石垣石の変形量が小さくなるものと考えられる．

参考文献

1）森本ら：城郭石垣の断面形状と石垣構築技術の変遷に関する考察，土木学会論文集，No.806，III-73，45-54，2005.12.

2）山本ら：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，Vol.66，No.1，pp.43-57，2010.