城郭石垣の対策工法に関する動的模型実験

金沢大学理工学域環境デザイン学類　学生会員　○伊藤　優作
金沢大学理工研究域地球社会基盤学系　正会員　池本　敏和
金沢大学理工研究域地球社会基盤学系　正会員　宮島　昌克

1. 本研究の背景及び目的

我が国では，古来より伝統的な擁壁として石垣が利用され，美しい曲線や安定した構造は，価値の高い文化遺産と評価されている．しかし，災害大国の我が国で，地震災害時に石垣の破壊被害が多数みられるのが現状である．地震時における安定性に関する研究事例は少なく，不安定化のメカニズムが不明であるため，耐震補強対策が未着手の状態にある．実際に，熊本地震の際に崩壊した石垣や石塁の再構築の検討と，安全性の議論が飛び交っている．したがって，城郭石垣の地震時における変形挙動解明と対策工法の検討が喫緊の課題である．そこで，石垣の特徴を考慮した模型を製作し，振動台を用いた動的模型実験を行うことで対策工法の効果を検討する．

2．模型実験の概要

城郭石垣は，主に積石，裏グリ石，背面土，基礎地盤で構成されている．既往の研究[1)]を参考に，石垣模型を作成した．また，振動台上の積載荷重を軽減し，大きな加速度を模型に作用させるために背面土をスポンジに置換した．**図-1** の右に側面図を，左に正面図を示す．このように，土槽内をアクリル板により 2 つに分け，パラメーターの異なる 2 つの石垣を同時に加振できるようにした．計測機器は，水平加速度計を模型に 6×2 箇所と振動台に 1 箇所，鉛直加速度計を模型に 3×2 箇所と振動台に 1 箇所，変位計を 3×2 箇所，土圧計を 2×2 箇所を設置した．

入力振動においては，模型の縮尺を変更したため，香川の相似則[2)]を考慮した地震動波形を入力すべきであるが，試行錯誤の結果，末富・福島氏らの NS 方向の推定地震動と，熊本市震度計で測定された鉛直地震動を入力波とした．

3　対策工法の提案

石垣の耐震対策にはいくつかの工法が考えられるが，本研究では，積石のせん断抵抗力の向上と裏グリ石の沈下抑制に着目し，積石の控えを長くすること(胴長と呼ぶ)による対策工法の影響を検討する．そこで，石垣のどの位置を胴長に置換するのが有効な対策かを判断する必要がある．ここで胴長の異なる積石を用意した．縦 56mm×横 98mm のタイプ 1 と縦 56mm×横 49mm のタイプ 2 の 2 種類の積石で，それぞれ胴の長さが 100mm，160mm の計 4 種類の台形の石材である．本実験では，**表-1** に示すようパターンで胴長積石を配置し，石垣の応答を検討する．

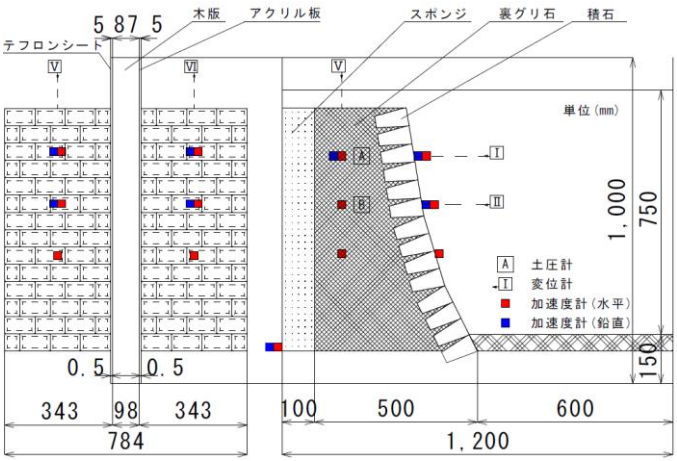

図-1　模型と測定器配置図

表-1　積石の寸法と配置位置

段数	パターン			
	0(無対策)	1	2	3
13.14	100mm	160mm	100mm	100mm
11.12	100mm	160mm	160mm	160mm
9.10	100mm	100mm	160mm	100mm
7.8	100mm	100mm	100mm	160mm
5.6	100mm	100mm	100mm	100mm
1.2.3.4	160mm	160mm	160mm	160mm

3 実験結果及び考察

3.1 積石の胴長が石垣の応答に与える影響

無対策と胴長の積石を用いた対策ありの石垣を同時に加振し，対策効果を検討した．このとき，4 方向（模型側面×2，正面，積石上面）からビデオ撮影を行い，挙動を確認した．**表-1** に示すどのパターンも無対策では破壊または大きな変形に至り，対策ありの場合では大きな破壊に至らなかった．

無対策の石は，すべり面が下端部まで形成され，裏グリ石の沈下に大きく影響する．胴長の積石を配置することで，上段部に配置された胴長の積石がすべり面形成を妨げ，上段部の積石を起点として「浅いすべり面」を形成する場合と，上段部の積石に影響せず，下腹部の基盤となる積石を起点として「深いすべり面」を形成する場合がある．

したがって，裏グリ石はすべり面を形成しながら沈下するが，胴長の積石を配置することで，すべり面の位置が変わるために裏グリ石の沈下量を抑えられると考えられる．

3.2 胴長の配置パターンによる比較

対策を施した際に形成されるすべり面は，積石の配置パターンによって異なる．**図-2** に示す各パターンでの裏グリ石の沈下量と**図-3** に示す各パターンでの中腹部の積石の変位量から比較をする．

パターン 1，2 では，裏グリ石が胴長の積石の下に潜り込むようにして，「深いすべり面」を形成し，裏グリ石が 70mm 程度沈下した．中腹の水平変位量は 20-40mm 程度であることから，変位量も中腹部に集中していることがわかる．

一方，パターン 3 では，段組みに胴長の積石を配置することで，積石間の裏グリ石が 1 つのブロックとして，上層の積石を支えるような役割を果たしたため，「浅いすべり面」を形成し，裏グリ石の沈下を 55mm に抑えられた．このため，積石の水平変位量も小さく抑えることができた．

これらより，すべり面の形状は積石の配置により異なり，土圧がすべり面の先に集中し，積石の水平変位量に依存することがわかった．また，すべり面が浅いほど，裏グリ石の沈下量が少なくなり，相対的に全石垣の水平変形量が小さくなると考えられる．

4 結論及び今後の課題

本研究では，石垣模型を製作し，振動台を用いた動的模型実験を行うことで対策工法の効果の検討した．その結果，以下の成果を得ることができた．

1) 段違いに胴長の積石に置換することで，裏グリ石の沈下を抑え，石垣の変位を抑えることができる．
2) **表-1** に示すどのパターンも無対策より，対策効果があったと考えられる．

今回は，パターン 3 において 2 段違いに胴長を配置したが，1 段違いや置換する積石の個数を変化させるなど，より効果のある配置を検討する必要がある．

謝辞：本実験を手伝っていただいた本学大学院の松扉氏及び学生諸氏に感謝の意を表します．なお，本研究は鹿島財団助成及び科研費（代表者：橋本隆雄）の支援を得ている．

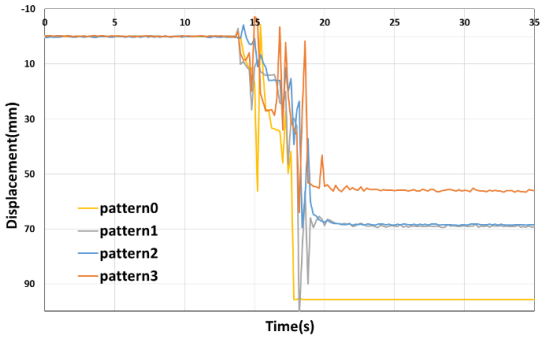

図-2 加振時の裏グリ石沈下量

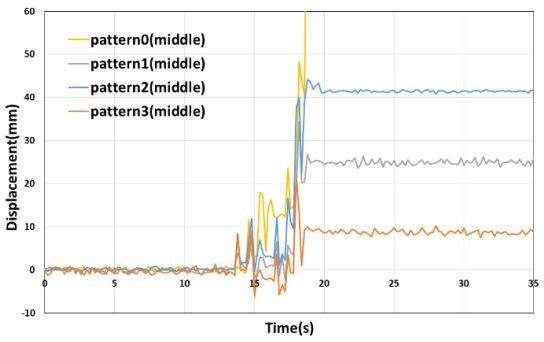

図-3 加振時の積石（中腹部）の水平変位量

参考文献

1) 池本敏和，森雅士，宮島昌克，橋本隆雄，村田晶：振動台を用いた間知ブロック積み擁壁の振動特性と破壊機構に関する実験的研究，土木学会論文集（F6），Vol.67，No.2，pp. 107-112，2011.
2) 香川崇章：“土構造物の模型振動実験における相似則”，土木学会論文報告集，No.275，pp.69–77，1978.