

縮小スケール模型による城郭石垣の耐震工法に関する振動台実験

金沢大学理工学域環境デザイン学類

金沢大学理工研究域地球社会基盤学系

国土館大学理工学部理工学科まちづくり学系

金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻

学生会員

正会員 池本 敏和, 宮島 昌克, 村田 晶

正会員 橋本 隆雄

非会員 恒川 怜央

○影山 亮太

1. 本研究の背景及び目的

我が国では城郭石垣が多数存在し、曲線形状や安定した構造を有する価値の高い文化遺産である。しかし、地震による被害が多数みられるのが現状であり、地震時における不安定化のメカニズムが不明であるため、耐震対策が未着手の状態にある。したがって、既存の石垣に対して、地震時における安定性や耐震補強対策に関する研究を進めるとともに、城郭石垣の地震時変形挙動の解明と対策工法を提案、検討することが緊喫の課題である。

2. 模型実験の概要

図-1 に石垣模型の設計図を、写真-1 に使用する土槽を示す。熊本城郭石垣の宇土櫓石垣を対象とし、上段 14 段の勾配 1:0.2 として模型を作成する。このとき実物の積石寸法と模型用積石の寸法を考慮して 1/7.5 スケールとする。積石は、寸法を縦 56mm×横 98mm×控え長さ 100mm とし、表面にビシヤン仕上げを施す。裏栗石は規格 5 分（直径約 15~20mm）の玉砂利を用い、内部摩擦角は 31°である。栗石層の間隙比 0.70 を目安に同一条件となるように模型を作成する。背面土として、加速度振幅の大きさが低減されないように厚さ 100mm のクッション材と、表面に木板を用いる。また、側壁と裏栗石間には、厚さ 50 μ m のテフロンシートを貼り付け、摩擦抵抗を極力低減させた。

入力地震動は、波形の前後に約 3 秒のテーパーを施した正弦波を用いる。本研究では 1/7.5 スケール縮小模型のため、内陸部の地震波を参考に作成した 2Hz、15 秒の正弦波を、香川の相似則¹⁾を考慮して振動数を 4.5 倍、すなわち 9Hz、3.5 秒とした。石垣の崩壊挙動を見るために、正弦波の最大加速度を、300gal から 700gal に 100gal ずつ増加させ、石垣模型が崩壊するまで加振を行った。

3. 耐震工法の提案

石垣の歴史的価値を損なわない対策工法であり、外観に影響がなく、栗石層の透水性の確保等、本来の裏栗石の機能を損なわないジオテキスタイル敷設工法を検討する。ジオテキスタイル敷設工法は、玉砂利の通らない網目状のジオテキスタイル敷設により裏栗石の沈下抑制効果を期待するものである。本研究では、図-1 のように裏栗石をジオテキスタイルで巻き込み、上下 2 つの巻き込み部分が重なる位置で結束して一体化させることで、沈下抑制効果の増大を期待したモデルを作成する。

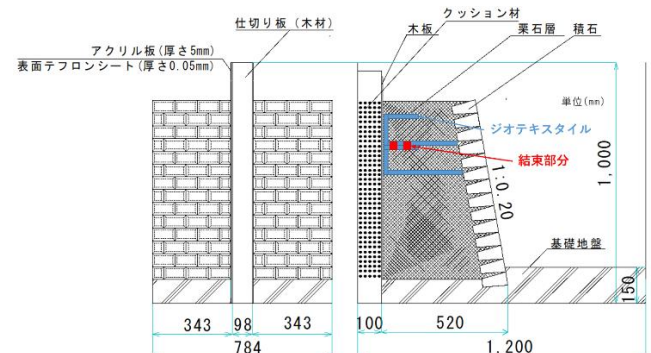


図-1 石垣模型設計及びジオテキスタイル配置図 (単位: mm)



写真-1 使用する土槽

4. 加振結果及び考察

本研究では、無対策石垣模型と図-1 の耐震対策を施した石垣模型を加振し、石垣崩壊に大きな影響を及ぼす積石の水平変位量と裏栗石の沈下量を用いて石垣の耐震安定性を評価する。図-2 に無対策、図-3 にジオテキスタイル対策石垣の積石の水平変位量を示す。なお、無対策は 700gal 加振時に上部から倒れるように崩壊したため、600gal までの結果を示す。

積石の水平変位について考察する。無対策、ジオテキスタイル対策ともに最大加速度が増大するにつれて積石の上部や中腹部付近が孕みだしており、水平変位量に顕著な差がみられる。無対策石垣は、石垣全体が前方に倒れるような挙動かつ中腹部から上部が孕みだす挙動を示し、極めて崩壊の危険性が高いと考えられる。700gal 加振時には、上部の積石から前方に崩壊した。一方、ジオテキスタイル対策の積石と、600gal 加振後の無対策の積石の最大水平変位量を比較すると、約 1/5 となっており、積石中腹部の孕みだしを大きく抑制していることが分かる。また、積石上部は積石後方に変位している。この現象は、裏栗石の沈下により積石上部における裏栗石からの水平力が働かなくなったためと考えられ、前方崩壊を防止したものである。

次に、裏栗石の沈下量について考察する。図-4 に加速度ごとの裏栗石の累積鉛直沈下量を示す。図-4 より、500gal 加振後の沈下量において、ジオテキスタイル対策は無対策と比べ、約 1/3 の沈下量となっており、裏栗石の沈下抑制効果があると考えられる。

一般的な石垣の破壊メカニズムとして、裏栗石が沈下して石垣中腹部の水平土圧が上昇することで中腹部の積石が孕みだし、崩壊に至ることが知られている。よって裏栗石の沈下を抑制し、積石の孕みだしを抑制するジオテキスタイルの敷設工法は、石垣の耐震対策として有効であると考えられる。

5. 今後の課題

積石の加速度応答倍率についても定量的に考察し、より総合的な石垣崩壊挙動やジオテキスタイル対策の効果を明らかにする予定である。

謝辞: 本実験を手伝っていただいた金沢大学及び国土館大学の学生諸氏に感謝の意を表します。なお、本研究は

大林財団奨励助成(研究代表者: 恒川怜央) の支援を得ている。

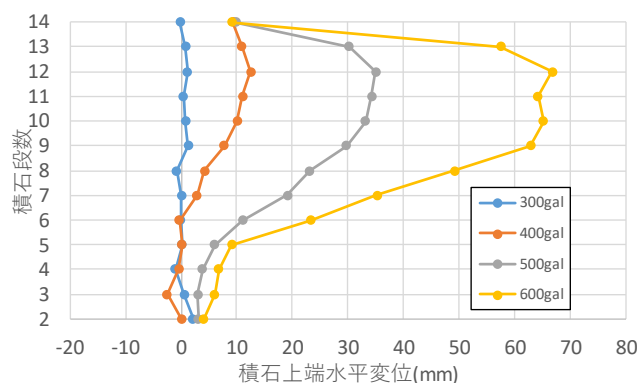


図-2 無対策石垣模型の積石上端水平変位

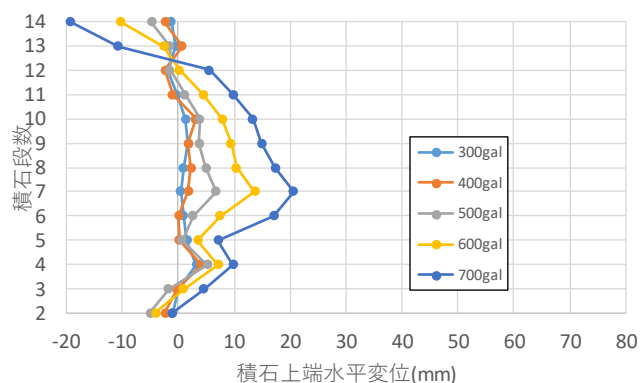


図-3 ジオテキスタイル対策石垣模型の積石上端水平変位

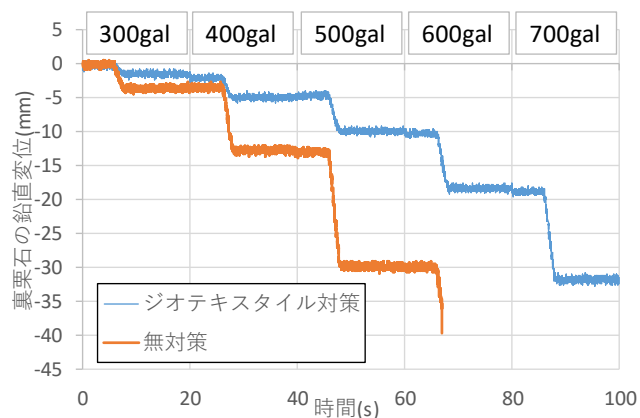


図-4 加速度ごとの裏栗石の累積鉛直変位(沈下)量

参考文献

- 1) 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.