

城郭石垣の耐震補強における充填剤間隔に関する検討

金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻
金沢大学理工研究域地球社会基盤系
文化財石垣・石積擁壁補強技術協会
国土館大学理工学部理工学科まちづくり学系

学生会員	○西山	大貴
正会員	池本	敏和
正会員	岩佐 直人，堀	謙吾
正会員	橋本	隆雄

1. 研究の背景・目的

我が国には曲線形状や安定した構造を有する文化遺産の城郭石垣が多数存在しているが、地震による被害が多数発生している。そのため石垣に対する耐震補強工法が様々な提案・検討されてきたが^{1),2)}、その補強工法の多くが積直し時の工法であるため、実用化に至りづらいのが現状である。本研究は、不安定化が進んだ城郭石垣を現状維持した状態で耐震補強する工法について検討している。4種類の石垣モデルで振動台実験を行い、充填剤の適切な充填間隔について検討を行った。

2. 振動台実験の概要

石垣は、築石、裏栗石、背面土の計3つの要素からなる構造物である。築石を間知ブロック、裏栗石を玉石、背面土を石川県産の山土を用いて再現した。山土は自然含水比17.0%、礫分0.1%、砂分54.4%、細粒分45.5%(シルト分 36.0%、粘土分9.5%)の細粒分質砂である。実験では締固め状態で、含水比は20%、単位体積重量は14.88kN/m³であった。擁壁モデルの種類を表1に、概要図を図1に、作成時の様子を写真1に示す。擁壁モデルの実寸比は1/6スケールであり、松江城郭の石垣の奥行きを参考にした値である。間知ブロックを1段ずつ並べ、段数12段(高さ約600mm)、勾配1:0.25で積み上げた。玉石は間知ブロックと同じ勾配1:0.25で切土した背面土の間に奥行き500mmとなるように、自由落下させて築造した。また間知ブロックから83mm離れた地点の玉石上に0.83kN/m²の上載荷重を設置した。これは、住宅荷重5kN/m²を模したものである。また、充填材料として景観や排水性、文化財保護の観点においてモルタルよりもウレタンの方が優れており、擁壁への施工が可能なウレタンに着目した。ウレタン(圧縮強度:0.1N/mm²)の充填量を均一に充填するために、事前実験を行い1.2g±0.2g/1箇所とした。この量で充填1箇所周辺の間知ブロック3個が拘束できる。

入力波は、正弦波、振動数は5Hz、振動時間を前後20%のテーパを含めて5秒間とした。目標最大加速度は100galから100galずつ上昇させて、300gal以上は50galず

つ加速度を上昇させ、崩壊するまで加振を行った。1/6スケール模型のため香川の相似則³⁾を考慮し、実地震動では振動数約1.3Hz、振動時間約19.2秒間、前後約3.8秒間にテーパーを施した正弦波が加振されたことになる。

表1 石垣モデルの種類

条件		ウレタン充填間隔 (千鳥配置)	
石垣モデル	補強工法	実寸寸法 (横)縦	模型寸法 (横)縦
無対策0	無対策	—	—
ウレタン1	ウレタンのみ	0.45m*0.6m	75mm*100mm (充填率91%)
ウレタン2		0.9m*1.2m	150mm*200mm (充填率50%)
ウレタン3		1.2m*1.2m	200mm*200mm (充填率41%)

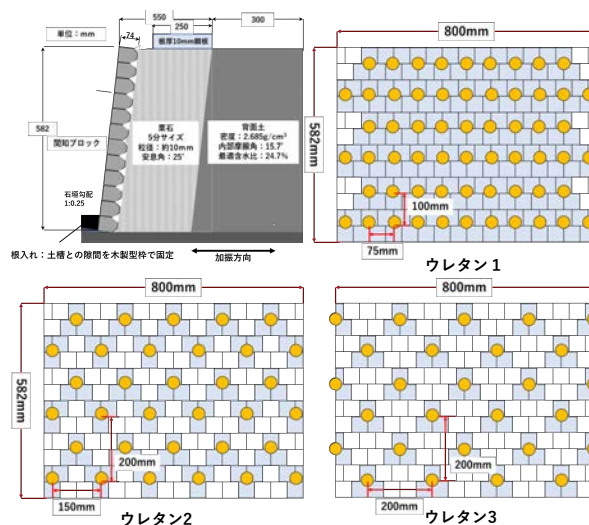


図1 側面における石垣モデルの概要と
各モデルのウレタン充填箇所

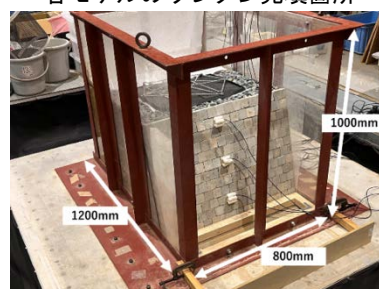


写真1 作成した石垣モデル

キーワード：城郭石垣，石積擁壁，充填材，ウレタン，充填材間隔，振動台実験

連絡先：〒530-0004 大阪府大阪市北区堂島1-2-2 パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社 TEL:06-4799-7400 FAX:06-4799-7400

3. 実験結果及び考察

実験結果を表2に示す。表2中の目標加速度とは振動台にされる正弦波の加速度の公称値であり、入力加速度とは振動台に取り付けた加速度計が記録した値の最大値である。以降、加速度とは入力加速度を指す。ウレタン1におけるウレタンの充填間隔は、2と比較して縦横それぞれ半分の間隔だった。崩壊した加速度はそれぞれ705galと701galであり、差が僅少であった。しかし、2と3の充填間隔の違いでは、崩壊加速度はそれぞれ701galと574galであり、127galもの差が生まれた

石垣7段目の水平変位と加速度の関係を図2に示す。200galから300galの加速度では無対策0と比較して、ウレタンを充填した石垣モデルの勾配が緩やかであることから、ウレタンを注入することで中央断面の壁面剛性が高くなっていることが分かる。よって、加速度が小さい場合は、ウレタンの充填間隔差による水平変位は、実験誤差を考慮しても僅少であると言える。400gal以上の加速度ではウレタンの充填間隔が狭くなるほど水平変位が抑制できている。

ここで、ウレタン3の崩壊寸前の加速度である、目標加速度500galで加振した際の各ケースの水平変位とウレタンの充填間隔の関係を図3に示す。この図において、ウレタンの充填間隔は、縦横の積で表現している。この値は、ウレタン1箇所あたりが支える間知ブロックの面積と同義である。500gal加振時、充填間隔の積が200cm²異なる1、2ではウレタン1の水平変位がウレタン2より小さいものの、その差は微小であった。しかし、充填間隔の積が100cm²異なる2、3では水平変位が約65mmの大きな差があった。したがって、施工性や経済性などを考慮して、ウレタンのみを充填する場合の最適な充填間隔は300cm²に近い値だと推定される。また、ウレタンを充填しても700gal程度の加振で崩壊してしまうことが分かった。このことから、ウレタンを城郭石垣に充填する対策工法では耐震性能に限界があると考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、4種類の石垣モデルにおける振動台実験の結果から、充填材間隔に関する検討を行った。その結果、最適なウレタンの充填間隔の積は300cm²に近い値であること、ウレタンを城郭石垣に対策工法では耐震性能に限界があることが明らかとなった。

今後は、ブロックや栗石上部の面的な挙動についても定量的な考察を進め、総合的な石垣崩壊挙動やウレタン充填による耐震補強の可能性を明らかにする予定である。

表 2 実験結果

モデル	崩壊加速度		加振終了時
	目標(gal)	入力(gal)	
無対策0	350	357	中央部から孕み出して崩壊
ウレタン1	650	705	モデル上部から転倒するように崩壊
ウレタン2	650	701	中央部から孕み出して崩壊
ウレタン3	550	574	中央部から孕み出して崩壊

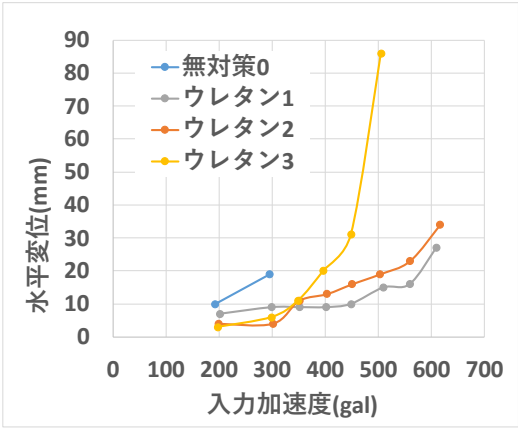


図 2 各ケースにおける7段目の水平変位と加速度の関係

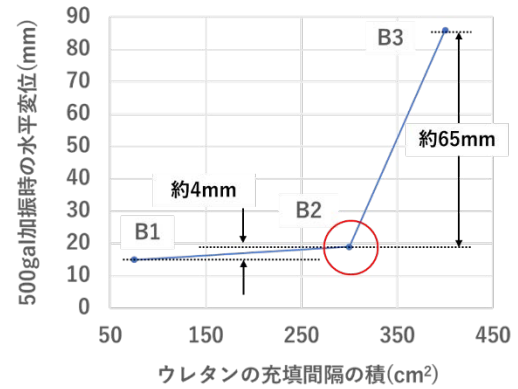


図 3 ウレタン充填間隔の積と500gal 加振時における水平変位の関係

謝辞：本研究は文化財石垣・石積擁壁補強技術協会の皆様に貴重なご意見とご指導を賜りました。また、(株)日測様、国士舘大学、金沢大学地震工学研究室の皆様に実験補助をしていただきました。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

1) 橋本隆雄，他：非石塁構造石垣における補強技術の耐震性評価に関する大型振動台実験，第 75 回年次学術講演会，土木学会，CS10-17，2020.9.

2) 堀謙吾，岩佐直人，他：石垣・石積み構造物補強技術の安定性に関する模型実験，令和 3 年土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，Ⅲ-179.

3) 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.