

地震時における城郭石垣の挙動と安全性に関する実験

金沢大学工学部 学生会員○梶田啓介、 金沢大学大学院 フェロー正会員 北浦 勝
金沢大学大学院 正会員 池本敏和、 金沢大学大学院 正会員 宮島昌克

1. はじめに

石垣は墳墓、河川構造物、橋梁など古くから用いられてきた。城郭石垣もその一つである。城郭石垣は個々の石の大きさや加工の状態、初期勾配や反りの程度などの違いにより様々な断面形状を形成している。このような石垣は石垣石と間詰石とが相互にかみ合って全体のバランスを保っていると考えられる。また石垣は高度な解析技術を用いて造られたのではなく、試行錯誤した経験と実績により構築されたものであり、科学的に解明されていない部分が多い。さらに城郭石垣は築造後 400 年近くを経ていて老朽化が著しく、石が割れたり、風化による石の傷み、悪い積み方による孕みなどが起こっているため、実際の地震により被害を受けているものもある。このような城郭石垣を修復・保存するため、伝統的な技術で築造された城郭石垣の動的挙動を現代の科学技術で評価し、石垣の修復・保存方法の確立が必要である。

そこで本研究では、石垣の模型を作成し、地震動を想定した石垣の動的挙動を調べる。

2. 実験について¹⁾

各城の石垣の資料から一般的な石垣の形状を決定し、石垣模型を作成する。実験模型を図 1、図 2 に示す。金沢城に使われている戸室石は入手困難なため、使用する石垣石は御影石とする。奥行き 0.8mm、幅 0.5m、高さ 0.53m のせん断土槽を用いて、奥行き 0.7m、幅 0.5m、高さ 0.7m の石垣模型を作成する。内部の石垣石や地山と接する部分は、御影石を板状にしたものを用いて、石垣石に摩擦を与える。石垣背面で地山との間には裏込石、地山部分には珪砂 5 号を用いてを再現した。さらに表面の間隙を埋めるための間詰石や一番下の石垣石の下にある根石も再現した。石垣石一つの大きさは縦 100mm、横 100mm、控え長さ 200mm 程度のもので、1 段に 4 個～5 個の石垣石を並べ、全体で 6 段の石垣を作成する。また石垣の勾配は全国の城郭石垣の勾配を参考に初期勾配が 60 度のものと 80 度のもので行う。地震時の石垣石同士を再現するために振動実験装置を用いて、石垣模型に振動を与える。石垣模型に与える振動は石垣模型の固有振動数と、それ以外の振動数である。また相似則を用いて、模型と実際の石垣のスケールの縮尺に合わせた振動数でも振動を与える。加速度は 50gal、100gal、200gal とする。

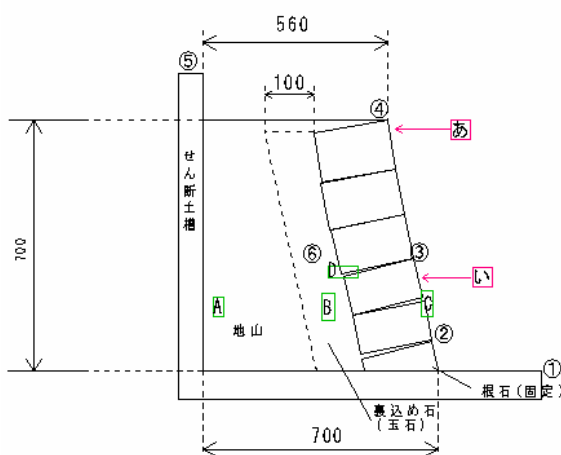


図 1 石垣模型（断面）

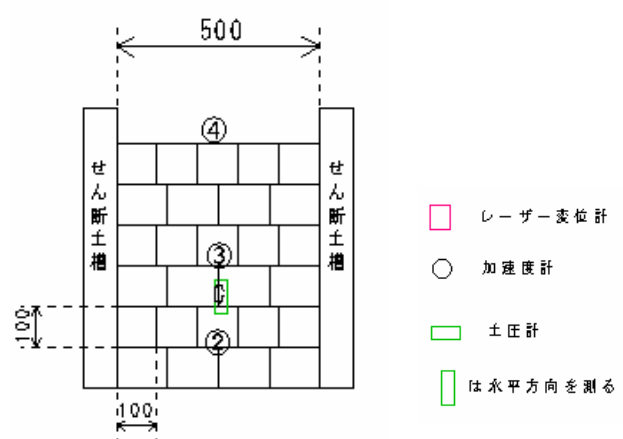


図 2 石垣模型（正面）

表1 全国の城郭石垣の形状 (一般的なもの)²⁾

	高さ h(m) (尺)	下底 B (m) (尺)	上底 L (m) (尺)	初期勾配 (°)
一般的な形状	12.29 (40.39)	5.28 (17.43)	1.15 (3.80)	1/0.27 (74.5°)
模型	0.67	0.18	0.04	1/0.27 (74.5°)
模型/実物	1/20	1/33	1/33	1/1

3. 実験結果

まずは勾配が 80 度の石垣模型を作成し水平方向でスweep試験 (30gal、1~15Hz まで水平方向に加振、加振時間は 280s) を行い、固有振動数を求めた。模型上段、模型中段、模型下段、玉石内部の加速度計の計測値の結果より、今回作成した石垣模型の固有振動数は 11.8Hz であり (0.08s)、石垣模型の固有振動数は高いと言える。また、地山内部、玉石内部、石垣石の間に水平方向の土圧計と、鉛直方向の土圧計を設置した。入力振動数は、2Hz、11.8Hz、20Hz とした。実験結果を図 3、図 4 に示す。図 3 の結果より固有振動数のときが最も応答倍率が高いことがわかる。また石垣の高さが高くなるにつれて、応答倍率も大きくなる結果となった。また図 4 の結果より、入力振動数を変えても水平方向には応力がほとんど作用していない結果となった。しかし鉛直方向は低い振動数ほど大きい力が加わっている。これは入力振動数が高いと石垣石が浮いてあまり鉛直方向に力が加わらないと考えられる。玉石内部にも低い振動数のときに水平方向の応力が加わっていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、石垣の模型を作成し、様々な振動を与え石垣の動的挙動を調べることが目的である。今回の実験では入力加速度を 200gal にしても石垣模型に大きな変化は見られなかった。したがって城郭石垣は震度 4 程度の地震に対しては大きな変化なく耐えられると考えられる。また、城郭石垣は地震時には水平方向にはあまり応力が加わらず、鉛直方向に応力が加わると考えられる。

今後は、石垣の上に櫓が建っていることを想定して石垣上部から荷重を加えること、石垣石のはらみ出しがはっきりと確認できる入力加速度や上下動を入れた実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 西村達明、笠原義、西田彦、森本浩行、阿波谷直徳、山本浩之、引陽啓太：城郭石垣の盛土構造と動的安定性、土木史研究講演集、Vol.27、2007。
- 2) 西田彦、西村達明、玉野富雄、森本浩行：城郭石垣断面形状の設計法とその数式表示に関する考察、土木学会論文集、No.750、III-65、pp.89-98、2003。

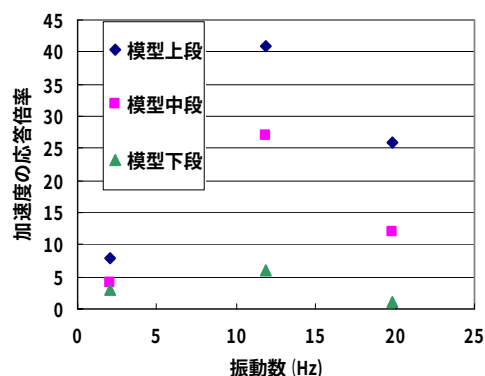


図3 各振動数における石垣各部の

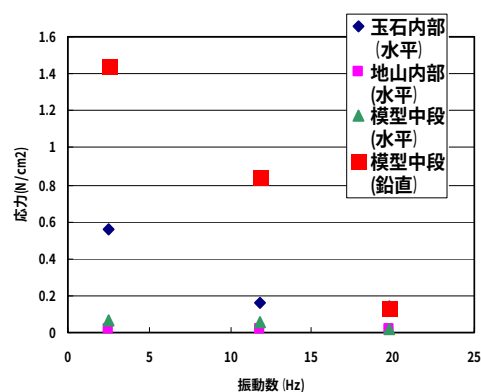


図4 各振動数における石垣各部の