

## 遠心力載荷模型実験による築石構造物の動的挙動に関する研究

長崎大学工学部 学生会員 ○奥山 大輔 長崎大学大学院 正会員 杉本 知史  
長崎大学大学院 正会員 大嶺 聖 長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静

### 1. はじめに

2016年に発生した熊本地震により、熊本城の石垣の多くの箇所では崩壊・変状などの被害が生じた。現在も復旧工事が進められているが、変状箇所が多く残っているのが現状である。本研究では築石構造物の模型により動的遠心力載荷模型実験を行い、加振時の石垣内部の土圧の推移から、崩壊・変形の力学的メカニズムを検討する。

### 2. 動的遠心力載荷模型実験について

#### 2.1 実験概要

使用した遠心力載荷装置を**写真1**に示す。本装置は、アーム先端に試料容器を吊架し、回転を与えることによって遠心力を発生させ、容器内の試料に均等な力を作用させるとともに、必要に応じて強制的な力を付加するものである。遠心力が最大に達したとき、振動台を振動させ、動的遠心力載荷実験を行う。また、容器内部の試料の土圧、変形状況、崩壊現象等の計測を行う。**図1**は、模型の断面模式図及び土圧計の設置位置である。半石塁タイプと呼ばれる石垣の模型を作成し、石垣石下、背面地盤と栗石間、栗石と石垣石間に1か所ずつ、背面地盤の鉛直、水平方向に1か所ずつ設置した。また、実験の加振条件として、熊本地震の本震データを踏まえ周波数 50Hz、繰り返し回数 300 回 (6 秒間)、振幅 1 mm、石垣勾配  $60^\circ$ 、遠心加速度 50G という条件で行った。



写真1 中型遠心力載荷装置

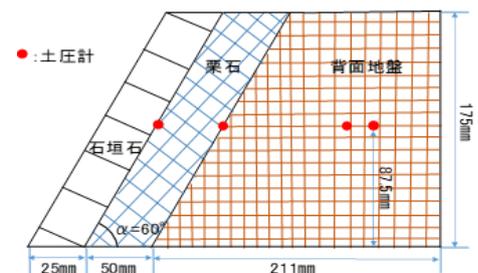


図1 石垣模型断面と土圧計埋設箇所

#### 2.2 既往研究からの変更点

既往研究では、滑らかな表面のアルミブロックを石垣石に見立て、石垣勾配  $60^\circ$ 、 $80^\circ$  の2ケースの実験を行った。しかし、実際の石垣石は凹凸があるため表面は粗く、表面の滑らかなアルミブロックでは石垣石の模型としては不十分であると考えられる。そこで本研究では、アルミブロックの表面にサンドペーパーを貼付してアルミブロックの表面を粗くし、実際の石垣石の状態により近づけたような条件で実験を行った。

#### 2.3 サンドペーパーの摩擦係数の計測

石垣石の表面に貼付するサンドペーパー同士の静止摩擦係数を調べるための実験を行った。**写真2**に示す装置の鉄板にサンドペーパーを貼付し、鉄板の上に載せるアルミ板の底部にも同じ粗さのサンドペーパーを貼付した。その後鉄板の角度を上げ、アルミ板が滑り落ちた角度を記録し、静止摩擦係数を求めた。#60~#400のサンドペーパーの摩擦係数は0.7~0.8となり、#40は摩擦係数が1を超えた。石垣石に使用される岩石のせん断抵抗角は  $40^\circ$  以上であり、凹凸のある実際の石垣石の再現としては#40が最も適していると考えられる。



写真2 摩擦係数計測の様子

### 3. 築石構造物を再現した動的遠心力載荷模型実験

#### 3.1 石垣石表面が滑らかな条件下での実験

既往研究における石垣勾配  $60^\circ$  の実験の加振前後の模型断面を**写真3**、**写真4**に示す。加振前後で、栗石の上面が2cmほど下がり、石垣中腹部付近の石垣石が前方に押し出されるような変形をした。**図2**に模型内部の土圧の推移を示す。栗石、石垣石間の栗石による水平方向土圧が加振開始と同時に急激に増えていることが伺

える。加振による力に加え、栗石の間隙が狭まることにより、主動土圧が作用したからだと考えられる。背面地盤、栗石間の土圧は振動と同時に急激に下がった。これは、石垣石中腹部が前方に押し出されるような変形をしたことにより、背面地盤、栗石間に作用していた土圧が変形した石垣石側にかかるようになり、土圧が減少したと考えられる。

**3. 2 石垣石表面が粗い条件下での実験**

加振条件、背面地盤の含水比、石垣勾配を既往研究と同じ条件に設定し、#40 のサンドペーパーをアルミブロックに貼付するという変更点を加え実験を行った。写真5、写真6にサンドペーパーを貼付したケースの模型断面を示す。サンドペーパーを貼付した石垣では栗石、石垣石ともに変化はあまり見られなかった。サンドペーパー同士の摩擦が作用して石垣石群の変形が小さくなったためと考えられる。図3に土圧計の推移を示す。図2と比較すると背面地盤内の鉛直方向、水平方向において同様の推移がみられた。背面地盤、栗石間においては加振後土圧が急激に上昇した。加振で栗石の間隙が狭まることにより、栗石が寄りかかる背面地盤側の土圧が一時的に上昇したと考えられる。また、栗石、石垣石間においては土圧の変化が加振前後でほとんどなかった。サンドペーパーを貼付した石垣石の加振による変化がほとんどなかったため、栗石、石垣石間ではほぼ一定の土圧が加振の有無によらず作用し続けたためと考えられる。

**4. おわりに**

本研究では、アルミブロックにサンドペーパーを貼付して動的遠心力载荷模型実験を行った。既往研究において、加振後栗石、石垣石間の土圧は急激に増加し、背面地盤、栗石間の土圧は減少した。これに対し、本研究では背面地盤、栗石間の土圧は加振後一時的に増加したが、加振前後の土圧の変化は既往研究と比較すると小さかった。よって、石垣石の動きを抑制する効果が確認された。

**謝辞:** 本研究は、JSPS 科研費基盤研究(C)20K05030 の助成を受けて実施しています。また熊本城調査研究センターのご協力に謝意を表します。

**参考文献**

1) 山口晃佑：被災城郭石垣の変状評価と動的挙動の再現実験に関する研究，土木史研究講演集，Vo141，pp. 17-22，2021  
 2) 三上元弘ら：地山の内部摩擦角に着目したトンネルの岩種分類の提案，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp. 109-110，2003



写真3 加振前の様子

写真4 加振後の様子

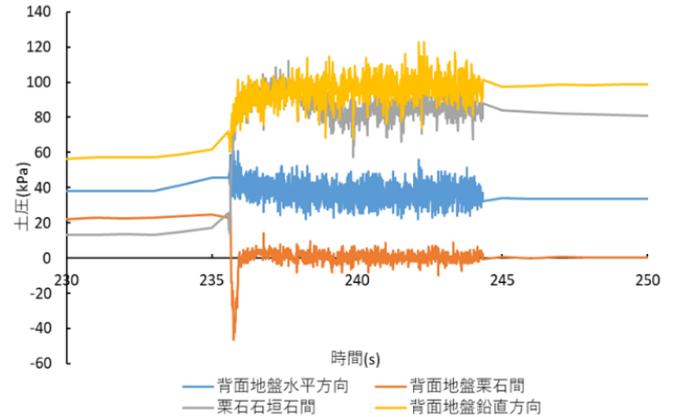


図2 土圧推移 (サンドペーパーなし)



写真5 加振前の様子

写真6 加振後の様子

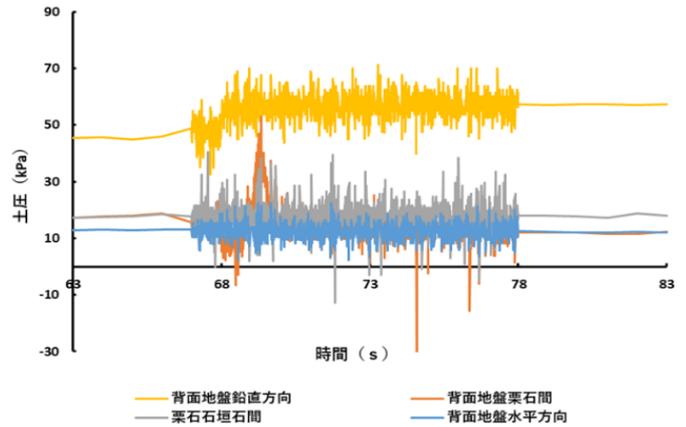


図3 土圧推移 (サンドペーパーあり)