

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基礎研究

長崎大学大学院 学生会員 ○山口晃佑 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 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 大嶺 聖

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。現在も修復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、模型の変状や加振時の石垣内部の土圧の推移から、崩壊・変形時の力学的挙動を検討した。

2. 動的遠心力載荷模型実験について

2.1 実験概要

遠心力載荷装置は、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。半石壘タイプと呼ばれる石垣の模型を作成し、4か所に土圧計を設置した。また、図2に示すように石壘タイプと呼ばれる石垣の模型も作成し、5か所に土圧計を設置した。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1mm、石垣勾配60°、遠心加速度50Gという条件で行った。

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°、80°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代物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。また、アルミブロックの表面の粗さを変更するという条件下で、石壘タイプの石垣模型でも実験を行った。

3. 築石構造物を再現した動的遠心力載荷模型実験

3.1 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摩擦係数を調べるための実験を行った。実験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°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判断した。以下、サンドペーパーを貼付したものを「粗面ブロック」、しないものを「滑面ブロック」と称す。

3.2 半石壘タイプにおける土圧の推移

粗面ブロックを用いた勾配60°の石垣では、模型断面の目視による変化は栗石、石垣石ともに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

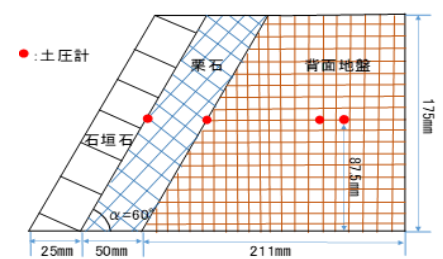


図1 半石壘タイプ模型断面図

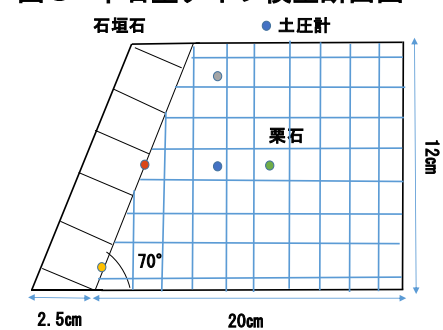


図2 石壘タイプ模型断面図

キーワード 築石構造物、遠心力載荷模型実験、土圧

連絡先 〒852-8521 長崎市文教町1-14 長崎大学大学院工学研究科 TEL 095-819-2618

に土圧の推移を示す。既往研究における石垣勾配 60° の土圧推移と比較すると、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、石垣石間において既往研究では土圧が急激に増加しているが、本研究では土圧の変化が加振前後でほとんどみられなかった。粗面ブロックの石垣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。石垣勾配 80° の石垣では、一部崩壊がみられた。図4に土圧の推移を示す。背面地盤、栗石間において加振後土圧が急激に上昇し、その後0に近い値まで下がった。崩壊直前に振動で栗石の位置が下がり、密度が大きくなるため土圧が一時的に上昇し、その後栗石が外部に流れ出たことで栗石による圧力が作用しなくなったため0に近い値になったと考えられる。栗石、石垣石間においては既往研究と同様に、崩壊直前に土圧が急激に増加し、その後減少している。崩壊直前に栗石による主働土圧が石垣石に作用するため土圧が上昇し、崩壊後は栗石による圧力が作用しなくなり急激に土圧が減少したと考えられる。

3.3 石罫タイプにおける土圧の推移

ブロック表面の粗さを変更するという条件下で、石罫タイプの石垣模型でも実験を行った。図5に滑面ブロック、図6に粗面ブロックを使用した石垣模型の土圧推移を示す。石垣勾配 80° の石垣において、栗石、石垣石間底部では、滑面ブロックのケースでは栗石が石垣石を押し出し、石垣石が崩壊する直前に大きな土圧が一瞬作用し、崩壊後は一部の栗石による圧力が加わった状態になっている。粗面ブロックのケースにおいては、滑面ブロックと同様に崩壊直前に土圧が急激に大きくなり、その後は、底部の石垣石が滑面ブロックのケースに比べて崩壊が小さいため、崩壊後も栗石からの主働土圧を受け続けたと考えられる。栗石、石垣石間中部においては、両ケースとも似たような土圧の推移がみられた。土圧が急激に上昇した際の値は粗面ブロックのケースのほうが大きい。これは、滑面ブロックが崩壊する際に作用する力より、摩擦力の大きい粗面ブロックが崩壊する際に作用する力のほうが大きくなるためと考えられる。

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。既往研究と比較すると、加振前後の土圧の変化や模型の変形・崩壊が少ないケースが確認された。石垣内部の土圧変化より、石垣石の表面特性や石垣勾配、構造の違いによる動的挙動の傾向を明らかにした。

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。

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 Vol.41, pp. 17-22, 2021.

2) 三上元弘：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

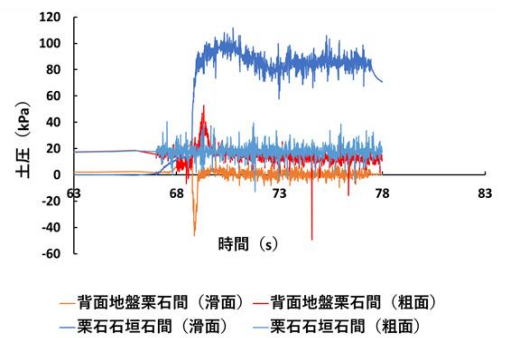


図3 土圧推移 (60° , 半石罫)

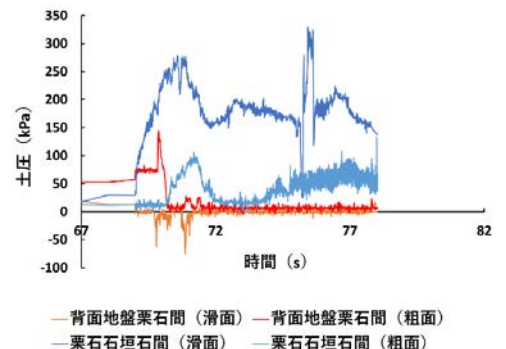


図4 土圧推移 (80° , 半石罫)

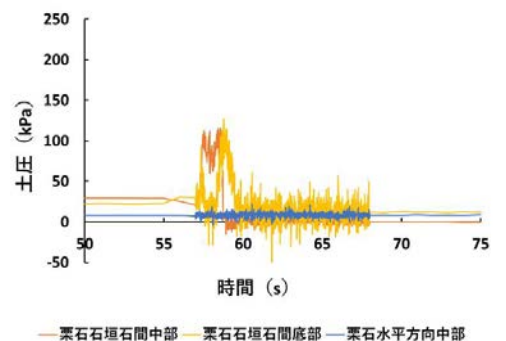


図5 土圧推移 (滑面ブロック, 石罫)

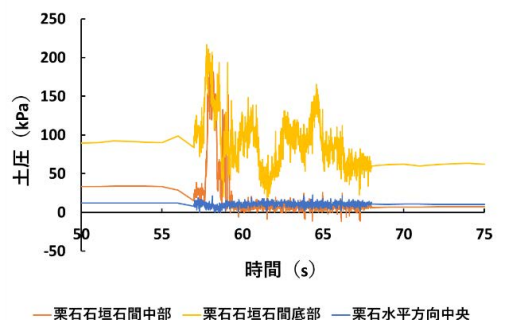


図6 土圧推移 (粗面ブロック, 石罫)