

大型振動台を用いた伝統的石垣の振動実験 (その2)

—動的状態における石材間の摩擦特性の検討—

ハザマ 正会員○山本浩之, 正会員 笠 博義

関西大学 正会員 西形達明, 八尾眞太郎

関西地盤環境研究センター 正会員 西田一彦

1. 目的

国内に多数存在する城郭石垣は、文化財的な側面において非常に高い価値を有し、同時に土木構造物としての機能も持っている。特に、構築後約400年以上経過し、多くの地震の影響を受けているにも関わらず、高さ20m以上で平均勾配60°程度を有するものもあることから、石垣は人工斜面として優れた安定性を持つものと考えられるが、不連続体である石垣としての安定性の原理については解明されていない部分が多い。

このような背景において、筆者らは実際の城郭石垣や模型石垣により石材間の摩擦実験を実施し、それらの静的状態での摩擦特性や間詰石の効果について検討を行ってきた¹⁾。

本検討では、さらに動的状態での城郭石垣の安定性評価に対する基本的なデータを得ることを目的に、大型三軸振動台を用いて、実物大の石積構造物の動的変形挙動を再現した。そこで、得られた実験データより、動的条件下での石材間の摩擦特性を評価し、静的状態との関係を考察したので、以下に検討結果を報告する。

2. 城郭石垣の実物大模型の概要

実験用石垣は、既存の城郭石垣を参考に幅2m、高さ2.1m、奥行き3.65mの規模とし、大型振動台上に構築した。石材は蔵王産の安山岩を使用し、積み方は城郭石垣で最も事例の多い“打込みはぎ”で行った。また、隙間には間詰石を配置し、平均勾配は1:0.3で反りを入れた(写真-1参照)。

3. 計測概要

計測断面図を図-1に示す。計測器は、石垣中央部の最上段(7段目)、5, 3段目、最下段(1段目)の石材にワイヤー式変位計と加速度計、振動台に入力加速度確認用の加速度計を設置した。

入力波形は、3Hzの正弦波とした。加速度振幅は、最大825galまで9段階で50~100gal増加させ、1段階あたりの入力波数を20波とした。入力方向は、実験用石垣長手方向の水平方向とした。



写真-1 実験状況

4. 動的状態における石材間の摩擦特性

各石材の重量が測定されていることから、7, 5, 3段目石材の変位量 δs と慣性力 ma (=上載荷重 $\times$ 加速度)との関係が得られる。代表例として、図-2に5段目の474gal, 607gal, 688gal, 825gal時の変位量 δs と慣性力 ma のヒステリシスを示す。

ここで、今回の石積構造物の石垣部分に注目し、“7段目”、“6~5段目”、“4~3段目”、“2~1段目”の4つのブロックとした図-3に示すモデルを考えたとき、せん断質点系の運動方程式は次式のように示される。

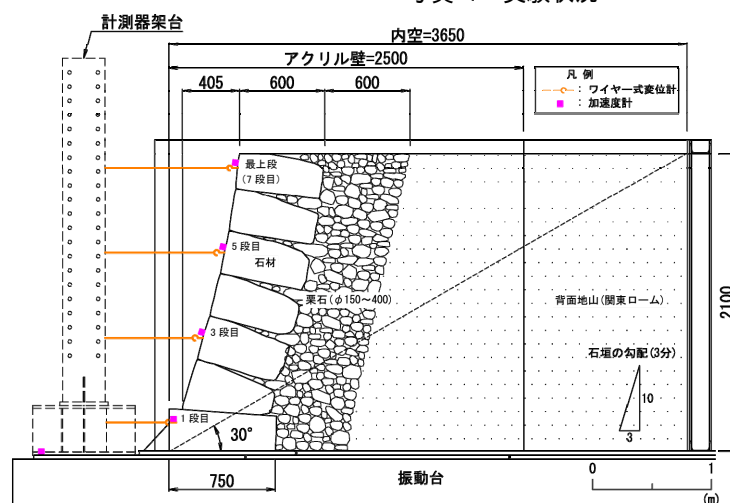


図-1 計測断面図

キーワード 城郭石垣, 実物大, 動的挙動, 石材間の摩擦角

連絡先 〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5 TEL: 03-3588-5770, FAX: 03-3588-5755

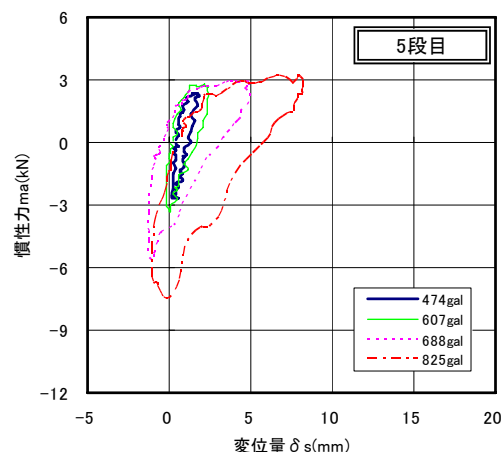


図-2 5段目の変位量-慣性力のヒステリシス

・前面方向 (+) へ変位する場合

$$\left. \begin{aligned} m_3 a_3 + F_3 + f_3 &= 0 \\ m_2 a_2 + F_2 + f_2 - f_3 &= 0 \\ m_1 a_1 + F_1 + f_1 - f_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

・背面方向 (-) へ変位する場合

$$\left. \begin{aligned} m_3 a_3 - F_3 + f_3 &= 0 \\ m_2 a_2 - F_2 + f_2 - f_3 &= 0 \\ m_1 a_1 - F_1 + f_1 - f_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

図-3および式(1)(2)に示すように、動土圧 F は常に前面方向(図中の左、転倒方向)へ作用し、前面方向(+)と背面方向(-)の変位時の慣性力 ma が同じ場合、石垣に対し動土圧 F が作用していないものと考えられる。ここで図-2より、607galまでは前面方向(+)と背面方向(-)の慣性力 ma がほぼ等しい値を示すことから、慣性力 ma はすべて石材間のせん断力 f として作用している。さらに、607gal以上の前面方向(+)の慣性力 ma の増加が見られないことから、前面方向(+)の慣性力 ma は石材間のせん断力 f として作用しているものと推定される。

そこで、前面方向(+)に注目し、7, 5, 3段目の最大変位量 δs_{max} と最大せん断力 f_{max} との関係をまとめたものを図-4に示す。さらに、各段の鉛直応力 σ_n に対する最大せん断強度 τ_p との関係より得られる入力加速度と岩盤の内部摩擦角に相当する石材間の摩擦角 ϕ との関係を図-5に示す。

図-5より、600gal程度で石材間の摩擦抵抗がほぼ100%モービライズされており、動的状態の石材間の摩擦角 ϕ は 30° 程度を示すことがわかる。既往の研究¹⁾では、静的状態における石材間の摩擦角は 52.6° が得られており、動的状態は静的状態に対して40%程度低下し、岩盤の残留内部摩擦角 $25\sim 35^\circ$ に近い数値を示すことが確認された。

5. まとめ

今回大型振動台を用いて実物大の城郭石垣模型実験を行い、動的状態の石材間の摩擦角が岩盤の残留内部摩擦角に近い 30° 程度を示すことが確認された。今後これらの結果は、解析で再現し検証する予定である。

参考文献 1) 山本浩之, 他: 城郭石垣における石材の摩擦特性と間詰効果に関する一考察, 日本材料学会第8回地盤改良シンポジウム論文集, pp.127-132, 2008.11

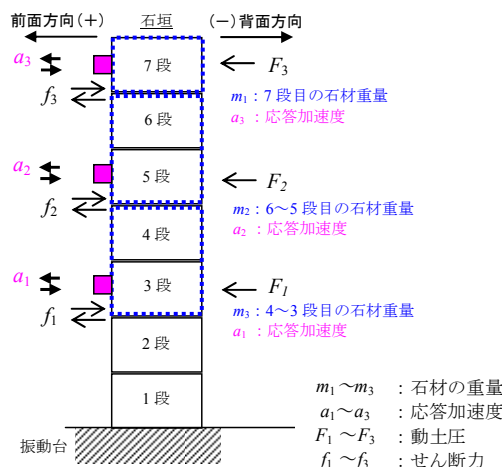


図-3 石垣部分のせん断質点系の運動モデル

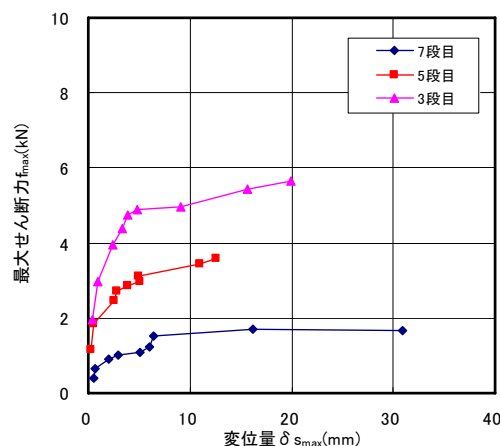
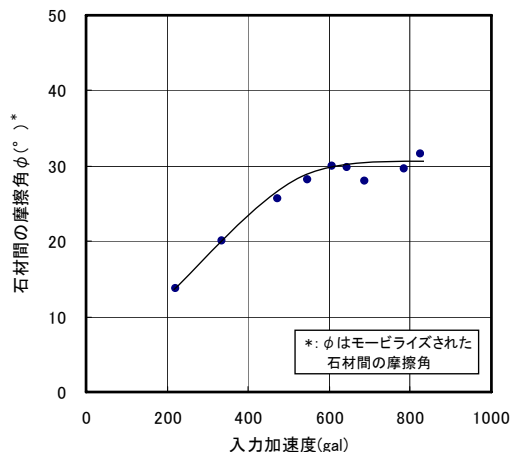
図-4 最大変位量 δs_{max} と最大せん断力 f_{max} との関係

図-5 入力加速度と石材間の摩擦角との関係