

大型振動台を用いた伝統的石垣の振動実験（その1）

－石垣の応答特性と変状について－

ハザマ 正会員 ○笠 博義, 正会員 山本 浩之
 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. はじめに

我が国の伝統的 stone 構築技術は世界でもほとんど類を見ない曲面構造を持ったものであり、文化財的な価値も高い上、当時の技術を現代に伝える土木遺産としても大きな意味を持っている。一方で、こうした伝統的工法により構築された石垣についての構造的な検討事例は少ない。筆者らは、これまで実際の石材を用いた摩擦実験等を行い、静的な条件下での石垣の安定性について検討してきた¹⁾。しかし、石垣の崩壊事例としては地震によるものが少なくないことから、石垣の安定性を総合的に評価するためには、動的な条件下での検討が重要である。

こうした背景において、筆者らは伝統的 stone 構築の動的な安定性を評価する目的で、大型三軸振動台を用いた振動実験を行った。本報告はこの実験結果のうち、特に石垣の高さ方向に対する応答特性および振動によって生じる変形について報告するものである。

2. 実験概要

実験用石垣（幅 2m×高さ 2.1m×奥行き 3.65m）は経験豊富な石工によって、大型振動台上に設けられた実験構台の中に伝統的な技法で構築した。実験では石材・裏栗石・背面地盤の変位、加速度等を計測すると同時に、中央の根石部分の荷重変化、石材に発生するひずみ等について計測した。実験石垣の概要および計測装置の取り付け位置について写真-1 に示した。実験に用いた入力波は 3Hz の正弦波（20 波）とし、入力加速度を 223gal から徐々に大きくしながら行い、最終的には兵庫県南部地震での最大加速度を越える 825gal までの 9 ケースとした。なお、本実験では計測条件を単純にするために振動方向は石垣の長手方向の水平方向とした（写真-1 参照）。

3. 実験結果

3.1 応答加速度：振動加速度の測定位置は石垣中央部の石材、裏栗石、背面地盤の根石から最上段まで各部に 4 段階とし、入力された地震波を確認するために振動台上にも加速度計（参照点）を取り付けた。このうち、3,5,7 段目の入力加速度に対する加速度計の測定値の比を応答倍率として図-1 に示した。なお、入力加速度は参照点における測定値とした。この図から、600gal 付近までは最上段を除いて、応答倍率は 1 程度であるが、これを超えると急激に応答倍率が増大し、上段の石垣ほどその値は大きくなることわかる。なお、最下段(1 段目)も 600gal 以降わずかに倍率が増大するが、全体として変化は少ない状況であった。また、石材、裏栗石ともに応答倍率は 3 倍程度が上限であり、各段とも入力加速度に応じたピークを有する傾向が見られる。

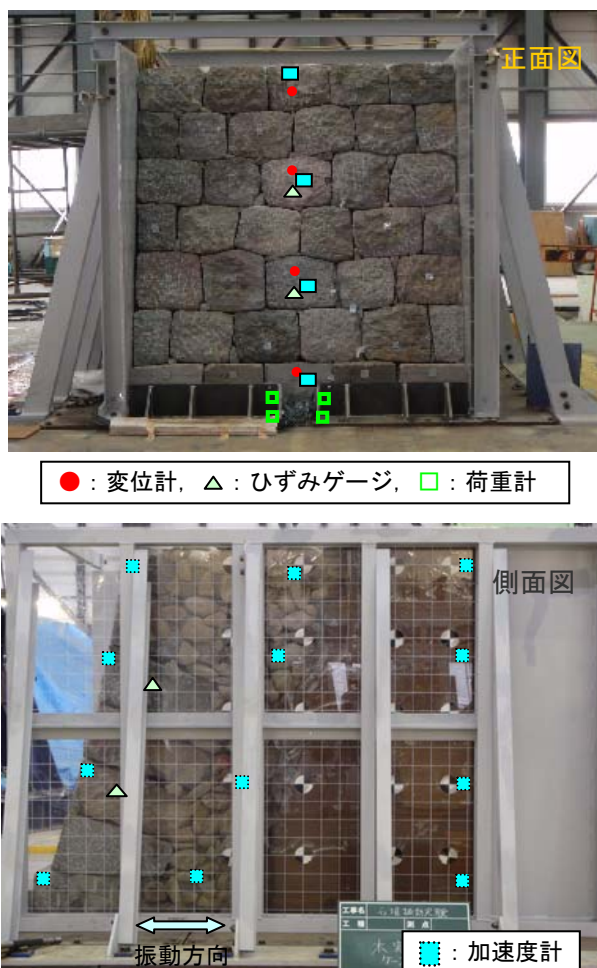


写真-1 実験石垣と計測装置の取り付け状況

キーワード 石垣, 振動実験, 応答加速度, 変形

連絡先 〒105-8479 東京都港区虎ノ門 2-2-5 TEL 03-3588-5791, FAX 03-3588-5755

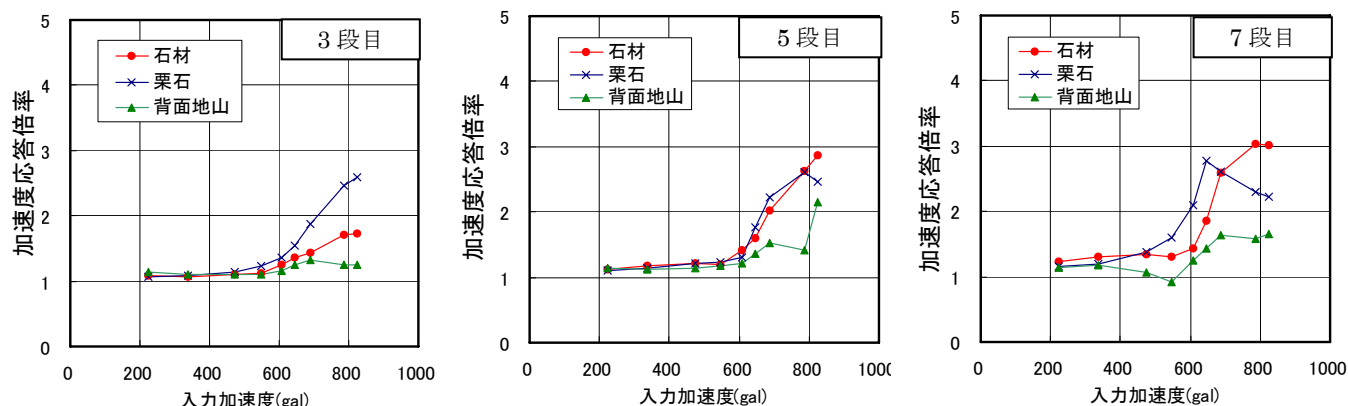


図-1 振動加速度の応答倍率

3.2 石垣の変位：石垣の変位状況を模式的に示したものが図-2である。この図は実験用構台の側面窓から、予め設けていた標点の軌跡を観察した結果を示しているものである。この図から得られる石垣の挙動は以下のよう

- ① 石材：下部の石材の変位は小さく、中段部では前方に飛び出す「孕み出し」が見られる。上段部は前後方向への動きが大きく、この断面においては、むしろ背面へ変位している。
- ② 裏栗石：上部は全体として下方へ移動している。これは振動によって栗石の締め固めがさらに進んだことと、石材が前方に変位したときに石材の背面に間隙が生じ、その部分に栗石が落ち込むようにして全体的に沈下したものと考えられる。
- ③ 背面地盤：ほとんど変位は見られず、地表面では栗石との境界部に段差が発生している。

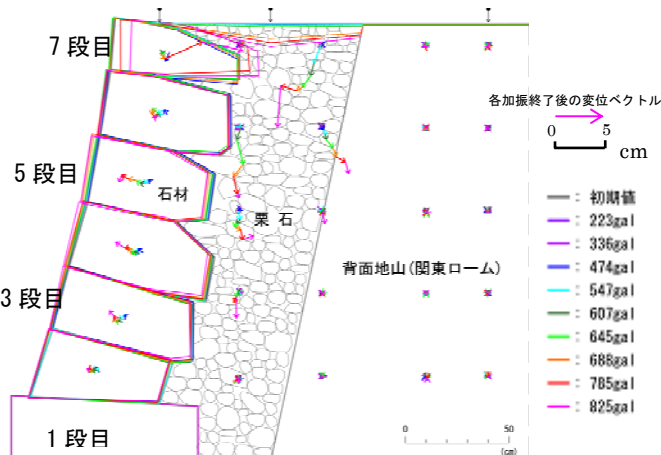


図-2 石垣・背面地盤の変位状況

4. 考察と今後の課題

今回の振動実験から、石垣は一定の地震動（加速度）までは、石材・裏栗石・地盤が一体として「擁壁的」な挙動を示すが、それを超えると急激にその挙動が変化し、石材間のすべりや、裏栗石の沈下などが発生し、それぞれ異なる動きを示すことがわかった。このことは、石垣は地震加速度が増大し、石材間の摩擦が静止摩擦から動摩擦の条件へと変化することで、石垣が一体化された構造物として転倒することなく地震動に対抗していることを予想させるものである。すなわち、伝統的の石垣は空積みであることによって、むしろ高い耐震性を発揮している可能性がある。さらに、背面地盤と石材の間を充填する裏栗石は、単に排水機能だけではなく、石垣の安定性を維持する上でも大きな役割を果たしている可能性があることも、今回の実験結果は示唆しているものと考えられる。

本実験は、高さ 2m で根石が極めて安定した構造であることや入力地震波が一軸方向であるなどの前提条件下で行ったものであり、今回の実験結果をそのまま実際の高石垣に適用できるものではない。しかし、このことは条件を整えば、石垣は 800gal を超える大きな地震加速度に対しても、安定性を保つ構造物であることを示している。

今後は、本実験結果をさらに詳細に検討して、石垣の持つ三次元的な構造特性や裏栗石の持つ機能などについても考察を行うと同時に、個別要素法などを用いた数値解析手法による検討²⁾を通じて、実験結果を実際の石垣の安定性評価手法ならびに伝統的の石垣の補修における耐震設計等に反映していく予定である。

【参考文献】

- 1) 山本他;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.127-432, 2008.11
- 2) 笠他：個別要素法による城郭石垣の安定性解析の試み,土木学会土木史研究論文集,Vol.27,45-51,2008.6