

大型振動台を用いた伝統的石垣の振動実験 ー石垣根石部の作用荷重についてー

ハザマ 正会員 ○西村 毅, 正会員 笠 博義, 正会員 山本 浩之
関西大学 正会員 西形 達明
関西地盤環境研究センター 正会員 西田 一彦

1. はじめに

わが国には伝統的工法によって構築された石垣が多数存在し、構築後 400 年以上を経過しても安定性を保っているものも少なくない。本研究では、石垣の地震時の挙動について検討する目的で実施された大型振動台を用いた実物大石垣の振動実験結果のうち、特に石垣根石に作用する荷重について検討を行い、石垣の変形モードの変化と発生荷重の関係を整理し、石垣の動的な安定性について考察したものである。

2. 実験概要

本実験で用いた石垣は幅 2m×高さ 2.1m×奥行き 3.65m であり、大型振動台上に設置された鋼製の構台の中に構築されたものである。実験用石垣の構築は、これまでに多数の城郭石垣の補修に携わってきた専門技術者が行い、伝統的な技法を用いた「打ち込みはぎ」による石垣とした。この石垣は実際の城郭石垣に比較するとかなり小規模ではあるが、高槻城や小田原城に実在する同規模の石垣を参考としており、面的に連続する石垣の一部分に相当するものと考えることができる。

実験は、223gal（設定 200gal）から徐々に入力加速度を上げながら、最終的には 825gal（設定 750gal）の 9 ケースについて行った。入力した地震波は 3Hz の正弦波（20 波）であり、振動方向は石垣面に直交する水平一方向のみである。実験における計測項目として、石材、栗石、地盤について変位、加速度、ひずみ、荷重などの計測を実施した。そのうち本稿では、石垣一段目の根石部に設置した荷重計測の結果について述べるものである。

3. 石垣根石部の水平および鉛直荷重

図-1 に、荷重計の設置位置および荷重作用点の算出方法を示した。荷重計を設置したのは 1 段目中央の石材（根石部）である。石材の下面には鉛直方向の荷重を測定するために 4 箇所の荷重計を設置したが、そのうち石垣前面側 2 箇所の合計値を“鉛直前面”，背面地山側 2 箇所の合計値を“鉛直背面”とした。また、水平方向荷重を測定

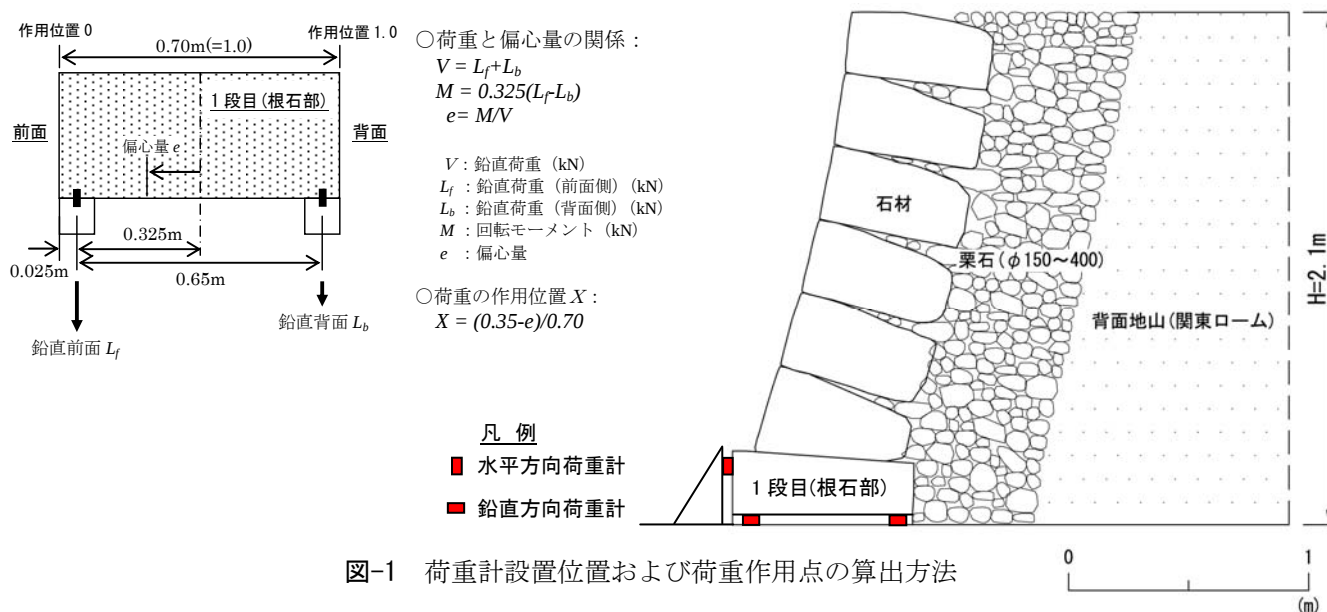


図-1 荷重計設置位置および荷重作用点の算出方法

キーワード 石垣, 振動実験, 荷重計測, 安定性

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 TEL 029-858-8813, FAX 029-858-8819

するために石垣前面に設置した 2 箇所の合計値を“水平”とした。

図-2 に荷重計による各入力加速度段階での累積残留荷重を示す。初期状態で鉛直合計 7.5kN（鉛直前面 4.1kN，鉛直背面 3.4kN），水平方向 0kN であった。その後入力加速度の増加に伴い，鉛直前面で 645gal，水平方向で 688gal までは，入力加速度の増加に伴い累積残留荷重は増加傾向を示し，それ以降減少傾向を示すのに対し，鉛直背面は漸減傾向もしくはあまり変化が見られない。このことは，石垣の変形モードの変化として説明できる。各石垣の変位測定の結果によれば，入力加速度が 645gal までは，上部に位置する石材ほど前面側への変位が大きく，“転倒モード”の変形挙動を示しており，石垣全体が転倒する形で変位し，鉛直前面の荷重が増加するものと考えられる。一方，688gal 以降は中段部の石材の前方への変位量が大きくなり，上段部の石材は相対的に背面地山側へ移動する“孕み出しモード”を示すようになり，この石材は背面の栗石および地盤で支持される割合が多くなり，鉛直前面および水平の荷重が減少しているものと考えられる。

ここで，1 段目鉛直荷重の前面側と背面側の荷重の変化より得られる偏心量 e より，図-1 に示す方法で各入力加速度段階での荷重作用位置の変化を求めた。図-2 で求めた累積残留荷重における作用位置を図-3 に示す。なお作用位置は，石垣前面側を 0，背面側 1 とし，0 に近づくほど転倒モードを示すものとして整理した。図-3 より，加振後の累積残留荷重では，当初の荷重作用位置は 0.45 付近を示し，ほぼ中央に位置している。その後 336gal 加振後で作用位置は 0.3 程度となり石材前面方向に移動し，474gal 加振後以降作用位置はほぼ 0.11～0.16 付近となり，石材前面付近に移動している。

図-3 には擁壁の安定性を示す指標である B/3 のラインを示しているが，今回の実験での 474gal 以降の状態は擁壁として考えるとかなり不安定な領域にある。しかしながら，実験終了後石垣は変形を生じたものの，転倒や崩壊には至らず著しい変状も見られなかった。このことから，もたれ擁壁のような連続体では，B/3 を超えた場合不安定な状態に至るが，不連続体の石垣の場合，B/3 を超え偏心位置が 0.1 に近い状態になっても変形が“孕み出しモード”に変化することにより，石垣の安定性を維持している可能性がある。

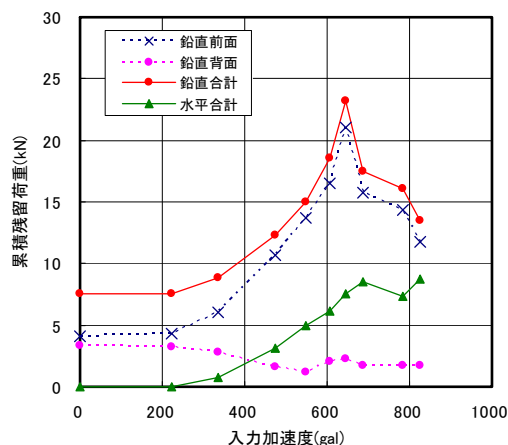


図-2 1 段目（根石部）の累積残留荷重

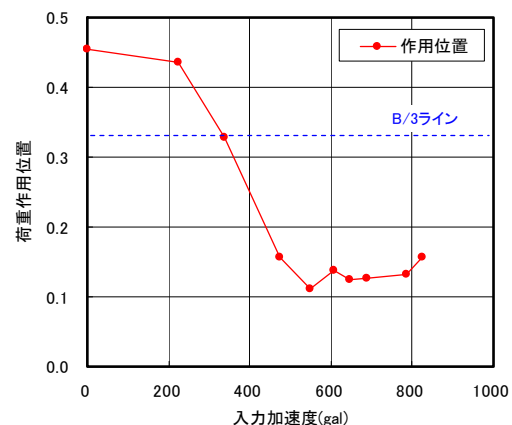


図-3 1 段目(根石部)の荷重作用位置

4. まとめ

実物大石垣の振動実験の結果，入力加速度の増大にともなう 1 段目根石に作用する荷重の変化について把握するとともに，石垣の変形モードと関連付けて考察を行った。その結果，“転倒モード”から“孕み出しモード”への変化が，荷重の作用状況の変化をもたらし，石垣の安定性に寄与している可能性を示した。今後は，DEM 等の数値解析手法で変形挙動の再現を行い，力学的安定性のメカニズムの解明を進める予定である。

【参考文献】

- 1) 山本 浩之，西形 達明，八尾 眞太郎，西田 一彦，笠 博義；“実物大モデルを用いた城郭石垣の地震時挙動の検討”，土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 1, pp.43-57, (2010)。