

城郭石垣の工学的な研究 -その2石垣の安定性-

Engineering research of castle masonry No.2 Stability of masonry



笠 博義 Hiroyoshi KASA *1

研究の目的

文化財的な価値を有する城郭石垣は、漆喰等の接着剤を用いない「空積み」により構築されている。こうした石垣は石材間の噛み合わせや摩擦力によって安定性を保っているものと考えられるが、このような構造物に背面から押し出し力が作用した場合や地震時の変形プロセスについては把握されておらず、安定性の評価手法についても確立したものはない。こうした背景において、石垣の摩擦抵抗や間詰石や逆石などが石垣の安定性に与える影響など、石垣の安定性評価を行う上で基礎的な情報を得るために、石垣修理の現場や実物大のモデルを用いた水平載荷実験や振動実験を実施した。

研究の概要

石垣の変状要因と考えられる石垣背面からの土圧や水圧、樹木の根の張り出しなどによる「押し出し力」による変状を評価するために、図-1に示したような実験を行った。すなわち、石垣の背面から油圧ジャッキで載荷を行い、そのときの変形状況について検討を行った。合わせて、地震時の石垣の変状プロセスについても検討を行った(写真-1)。具体的には、以下に示す①~⑤の実験・調査を実施した。

- ① 石積み形状による摩擦抵抗の確認実験
- ② 間詰石の安定性向上への効果の確認実験
- ③ 逆石が石垣の安定性に与える影響の確認実験
- ④ 大型振動台による石垣の地震時の挙動確認実験
- ⑤ 大規模地震後の石垣変状状況の調査

このうち、①~④は実際の城郭石垣または、実物大の石材によるモデル実験により実施した。また、⑤の現地調査は東日本大震災による大きな被害を受けた3つの城郭において実施し、④の実験結果との対比を行った。

結論

本検討の結果は以下のようにまとめられる。

- ① 築石の摩擦特性：築石は背面からの押し出し力が作用した場合は、一定の値までは変位することなく抵抗するが、一旦滑動し始めると、そのまま動き出す性質がある。その度合いは内部摩擦角(ϕ)によって表すことができる。
- ② 石積み技法による安定性の違い：背面からの静的な押し出し力に対しては、打込み接ぎ、野面積みが $\phi = 50^\circ$ 程度であるのに比較して、切込み接ぎでは $\phi = 35^\circ$ と小さく、背面からの押し出しに対する抵抗は小さい。ただし、天然石による野面積みでは、特に個々の条件により値は大きく変化するものと考えられる。
- ③ 間詰石の効果：間詰石により背面からの押し出し抵抗は増加する。その大きさは、条件により異なるものと推定されるが、間詰石がない場合に対して1~2割程度増大する。
- ④ 逆石の影響：逆石の存在が石垣の安定性に与える影響は大きく、わずかでも築石が逆傾斜している場合は、一般的な積み方に対して、半分程度の押し出し力でも滑動する可能性があり、石垣の安定性に与える影響が大きい。
- ⑤ 地震時の石垣の変状：地震に対して石垣は、一定の振動レベル(加速度)を超えると、築石および裏栗石の応答加速度が急激に増大し、孕み出し、目地のずれや裏栗石の沈下などの変状が生じる。この実験結果は、実際の地震後の石垣の変状観察結果ともよく一致している。

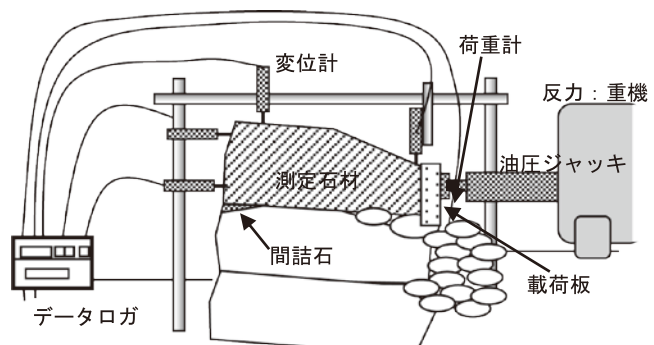


図-1 石垣摩擦実験の概要

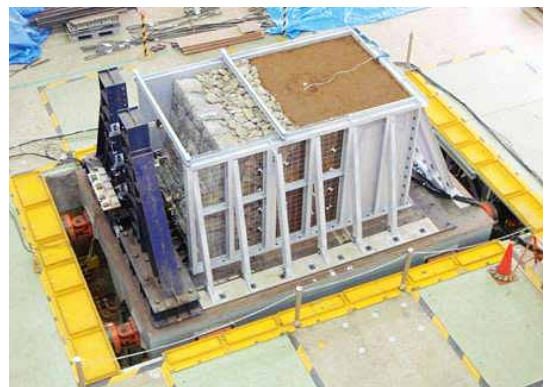


写真-1 実物大石垣の振動実験の概要