

石垣構成石材の原位置摩擦実験

ハザマ¹⁾ 正員 ○笠博義, 阿波谷宣徳
 関西大学 正員 西田一彦²⁾, 正員 西形達明³⁾

1. はじめに

我が国には、主として中世以降に建造された城郭石垣等の石造構造物が多数現存しており、それらの多くは、現代に当時の文化や技術を伝える貴重な文化遺産としての役割を担うと同時に、市民の憩いの場や観光施設および公園としての機能を合わせ持っている。こうした二つの側面から、石垣の維持管理においては、文化財的な価値を損なうことなく構造物としての安定性も確保していくことが求められている。この中で、構造物としての安定性の検討においては、モルタル等を用いない空積みによる石垣の安定性を定量的に評価する技術が必要とされているが、現時点ではこうした評価手法は確立されておらず、各方面において数値解析手法等による安定解析技術の適用研究（例えば参考文献1）など）が進められているのが現状である。

本研究は、こうした背景において、石垣の安定性を考える上で、極めて重要な要素である石材の摩擦特性を確認するために、実際の石垣において原位置摩擦実験を行った結果について整理・検討したものである。

2. 実験状況

実験は名古屋城内の石垣修復工事現場にて実施した。実験概要を図-1に示す。この図に示したように、石垣を構成する石材の背面から油圧ジャッキにより一定速度で水平方向の力を加え、その際の水平および垂直変位量（各4点）と載荷力を測定した。実験対象とした石材はいずれも花崗岩からなり、重量100~200kgのものである。また、実験終了後クレーンで石材を吊り上げて、上下の石材間の接触状況を目視によって確認した。なお、文化財としての石材の保護と実験の安全性を考慮して、載荷石材の上部の石材は取り外した状態で実験を実施した。

実験ケースを表-1に示した。ケース1では主として周辺の石材の拘束力の影響を、ケース2,3

については間詰石による拘束力への影響について評価することを主目的とした。ここで、ケース2,3においては、最初に間詰石が存在する状況で載荷実験を実施（ケース2）した後、間詰石を取り除いた上で石材を元の位置に戻して、ケース3の実験を実施した。なお、表中の石材No.とは工事管理用に石材に付与したものであり、間詰石とは石垣を構成する石材の隙間を埋める形で配置される小さな石材である（図-1参照）。

3. 実験結果と考察

(1) 石材の摩擦特性

各ケースの載荷荷重と変位についてまとめたものを図-2に示した。ここで、変位量は石材の前面に設置した4本の変位計の測定値を平均して求めた。この図から、各ケースとも載荷開始後急激に荷重は上昇した後、

キーワード：石垣、原位置実験、摩擦、力学的安定性

連絡先1) (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5, 技術・環境本部 環境事業部, TEL03-3588-5791, FAX03-3588-5755)

2) 関西大学名誉教授 (〒556-0042 摂津市東別府1-3-3, 関西地盤環境研究センター, TEL06-6827-8833, FAX06-6829-2256)

3) (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35, 関西大学工学部土木工学科, TEL06-6368-0898, FAX06-6388-1424)

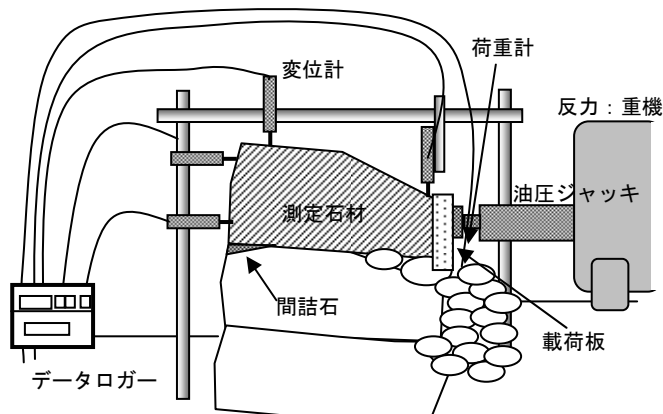


図-1 実験概要

表-1 実験ケース

ケース	載荷石材No.	重量(kg)	検討目的
1	No.7-37	119	周辺拘束の影響評価
2	No.8-58	180	間詰石効果確認(間詰石あり)
3	No.8-58	180	間詰石効果確認(間詰石なし)

一旦石材が移動を開始すると、荷重は一定範囲で変動することがわかる。

次に、図-2 に示した荷重-変位曲線から、式(1)により摩擦角 ϕ を求めた。ここで、 ϕ ：摩擦角、 τ ：せん断応力（載荷荷重の最初のピーク値）、 σ ：垂直応力（石材の自重） c ：粘着力=0 とした。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

検討結果は表-2 に示したように、摩擦角はケース 1 で 45° 、ケース 2,3 では約 30° である。ここで、ケース 1 が 45° と大きな値となっているのは、周辺石垣との噛み合いによる拘束力の増大によるものと推定される。このことは、ケース 1 の載荷に伴って、載荷対象の石材の下段および隣接する石材も同時に徐々に押し出される現象が確認されたことから裏付けられる。

また、実験終了後の石材の状況を示した写真-1 からわかるように、今回実験を行ったような「打ち込みはぎ」の石材間は面接触ではなく点接触となっている。このため、石材の移動に伴って接触位置は変化し、上下石材の噛み合い状況によって摩擦角も大きく変化するものと考えられる。

(2) 間詰石の効果

図-2 に示したように、ケース 2 では載荷荷重が最初のピーク値を迎えた後、一度低下するものの、 $0.8 \sim 1.0 \text{ kN}$ の範囲内の比較的安定した値をとるのに対して、間詰石がないケース 3 では、最初のピーク後に荷重は徐々に低下し、 $0.3 \sim 0.6 \text{ kN}$ の範囲で推移する。このことは、間詰石は石材の水平移動に対する「くさび」の効果を発揮して水平力に抵抗するが、間詰石が存在しない場合は、こうした抵抗力が働かず、一旦滑動し始めた石材は比較的容易に移動することを示している。なお、載荷荷重の変動幅がケース 3 の方が大きく、変位量 20 mm 以降に急激に値が上昇した理由としては以下のようなことが考えられる。すなわち、ケース 2 の実験終了後、上下の石材間に堆積していた土砂も間詰石と一緒に除去されたことにより、石材接触面の凹凸の影響が直接作用し、ケース 2 とは異なる接触点で上下の石材が新たに噛み合う形で接触したためであると推定される。

4. まとめと今後課題

今回の実験結果は以下のようにまとめられる。

- ① 石材は背面より水平力が作用した場合、石材面の凹凸や周辺部の石材による拘束等により抵抗し、上載荷重を考慮しない状況では、そのときの摩擦角 (ϕ) は $30^\circ \sim 45^\circ$ となる。また、周辺石材による拘束がある場合は、載荷石材の周辺部の石材も変位し、いわゆる「孕み出し」の変状が生じるものと考えられる。
- ② 間詰石は押し出し力に対しては抵抗効果があり、石垣の安定性を確保する上では重要な役割を果たしている。

今後は、上載荷重または石材の形状や大きさ等の条件についても着目した実験を行うとともに、周辺部石垣の変位等についても定量的に確認していく必要があるものと考えられる。

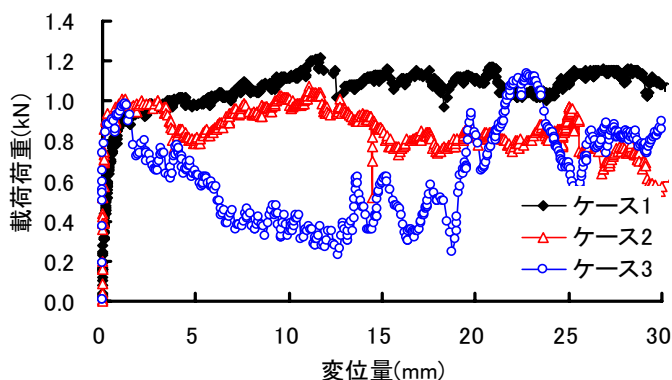


図-2 変位・荷重の関係

表-2 摩擦角のまとめ

ケース	垂直応力(σ) kN	せん断応力(τ) kN	摩擦角(ϕ) 度
1	1.21	1.22	45.2
2	1.84	1.07	30.2
3	1.84	0.99	28.3

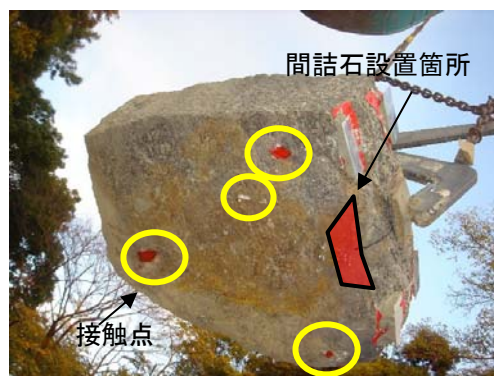


写真-1 石材間の接触状況(ケース 2 終了後)