

文化財石垣における逆石の滑動安定性に関する実験的検討

安藤ハザマ 正会員 ○ 澤田 純之 関西大学名誉教授 正会員 西形 達明
 安藤ハザマ 正会員 笠 博義 安藤ハザマ 正会員 西村 毅
 安藤ハザマ 正会員 船津 貴弘 和田石材建設 和田 行雄

1. 目的

本実験は、文化財石垣の修理において、逆石が石垣の安定性に与える影響を評価するために実施した。ここで、逆石とは伝統的の石積みにおいて、通常状態では石材(築石)の設置面が 10~15°程度石垣背面側に傾斜しているのに対し、接触面の傾斜が小さくほぼ平坦もしくは表面側に逆傾斜している状態の築石をいう。そこで、石垣設置面の角度が安定性に与える影響を評価するため、1) 石材設置面の角度による滑動抵抗性の評価、2) 逆石補強対策工法の効果、について検討

した。なお、本実験は名古屋市観光文化交流局名古屋城総合事務所発注の名古屋城石垣補修工事(本丸搦手馬出周辺)の一環として実施したものである。

表1 実験ケース一覧

ケース名称	設置面角度(°)	補強の有無	想定状態
A5m	-5	無し	逆石状態
A0	0		
A5	5		通常状態
A10	10		
A15	15		
A0-R	0	有り	逆石の補強



写真1 実験状況(A10)

2. 実験概要

表1に、本実験のケース一覧を示した。ケース名称は、英文字Aに設置面の角度(°)を付して示している。なお、傾斜角が負の場合にはm、鉄筋補強したケースはRを付した。写真1には、A10の実験状況を示した。使用した石材は花崗岩であり、実際の文化財石垣を参考にして加工した。上下の石材の設置面角度はスペーサにより調整し、下部石材の表面側には滑り止めを設置した。なお、上下石垣の接触面積は約0.55m²、上部石材の重量は806kgであった。また、写真2には、逆石時の上部石材滑動対策として鉄筋鋼棒にてアンカー補強した場合(A0-R)の石材配置を示した。これは、下部石材が文化財的な価値を有しており、現状変更ができない場合を想定した補強工法である。具体的には、補強石材に穿孔した孔(19mm)にエポキシ系の接着剤で固着させた全ネジの鉄筋鋼棒(φ16mm)2本を、上部石材の貫通孔を通してナットで固定する方法である。荷重は、油圧ジャッキにより水平方向に一定の速度(0.2mm/sec程度)で実施し、変位が50mmを超えるまで実施した。荷重は油圧ジャッキの油圧を換算して求め、変位は表面側の4隅に設置した接触式変位計の平均変位(以後、変位)とした。



写真2 逆石時の石材配置(A0-R)

3. 実験結果

(1) 石垣の設置面角度による滑動抵抗性

図1には、設置面角度が-5~15°までのケースの荷重-変位関係を

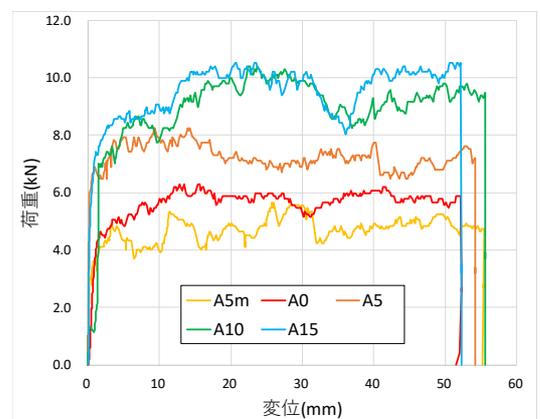


図1 荷重-変位関係(設置面角度比較)

キーワード 石垣, 文化財, 逆石, 滑動抵抗性, 補強対策

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

表 2 実験結果の一覧

ケース 名称	最大荷重時				平均荷重時			
	荷重 (kN)	変位 (mm)	摩擦 係数	摩擦角 (°)	荷重 (kN)	変位 (mm)	摩擦 係数	摩擦角 (°)
A5m	5.67	23.7	0.86	40.7	4.92	24~53	0.75	36.9
A0	6.29	12.8	0.80	38.5	5.82	13~52	0.74	36.4
A5	8.25	9.3	0.88	41.2	7.08	20~54	0.75	36.9
A10	10.41	22.4	0.93	42.8	9.37	23~55	0.84	39.9
A15	10.52	20.6	0.78	38.1	9.85	21~52	0.73	36.3
A0-R	19.56	10.4	-	-	19.27	11~14	-	-

示した。この図より、載荷初期(変位 1.5 mm 程度まで)は、パラメータによる傾向は見られず、石材間の接触状態によるばらつきが大きいと推察される。変位 5 mm 程度を過ぎると、荷重±1kN 程度の幅を保ちながら、概ね一定荷重値を示すこと、その値は接触面角度が大きいほど増大することがわかる。滑動する最大荷重は、逆石状態(A5m, A0, A5)の 5.7~8.3 kN に比較して、通常状態(A10, A15)では約 10.5 kN であり、通常状態の 5~8 割程度の力で滑動していることが示された。

表 2 には、本実験より得られた結果の一覧、図 2 には、荷重と設置面角度の関係を示した。表中に示す平均荷重は、最大荷重到達後に一定速度で載荷した範囲の平均荷重とした。また、図中には本実験から得られた値と合わせて、内部摩擦角(石垣の摩擦抵抗)がそれぞれ 30~45° の場合の想定値を破線で示した。なお、内部摩擦角は式(1)より算出した。

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

ここで、 τ :せん断応力(載荷荷重)、 σ :垂直応力(上部石材の自重)、 ϕ :内部摩擦角、 c :粘着力である。本実験では、粘着力は無視できるものとし 0 とした。また、せん断応力および垂直応力は設置面の角度を考慮して算出した。実験結果より、A10 の荷重が他のケースに比較して若干大きく示されるものの、全体としてほぼ一定値を示し、平均荷重時で摩擦係数 0.76、摩擦角 37.2° であった。摩擦角は石材間の接触条件が変化しない場合は一定値となることから、本実験結果はそれを再現できていると考えられる。なお、A10 の場合は載荷初期に石材が回転しており、接触面の条件が変化していることが影響していると考えられる。

(2) 逆石補強対策工法の効果

図 3 には、鉄筋補強の有無を検討するため、A0 および A0-R の荷重-変位関係を比較して示した。図より、補強していない A0 では、荷重が 4 kN を越えると、滑動に伴う勾配変化が見られるが、補強した A0-R は最大荷重(変位 10.4 mm, 最大荷重 19.56 kN)までほぼ一定勾配を確保している。また、最大荷重は通常状態の滑動荷重(約 10.5 kN)を十分に上回っており、この補強工法が逆石の滑動防止に対する有効な対策工法であると考えられる。

4. まとめ

本実験結果より得られた結果をまとめると以下の通りである。1) 上下石材の石材接触面の角度が大きくなると、滑動抵抗は大きくなる、2) 逆石状態(-5~5°)の滑動荷重は、通常状態(10~15°)の積み方の場合の 5~8 割程度である、3) 摩擦係数は約 0.76、内部摩擦角は 37.2° とほぼ一定値になる、4) 鉄筋鋼棒による補強工法は有効な対策工法であること、を確認した。本実験結果は、文化財石垣における逆石の工学的評価を検討する上で参考になるものと考えており、引き続き石垣の安定性評価に関する基礎的な検討を続けていくことが必要と考えている。

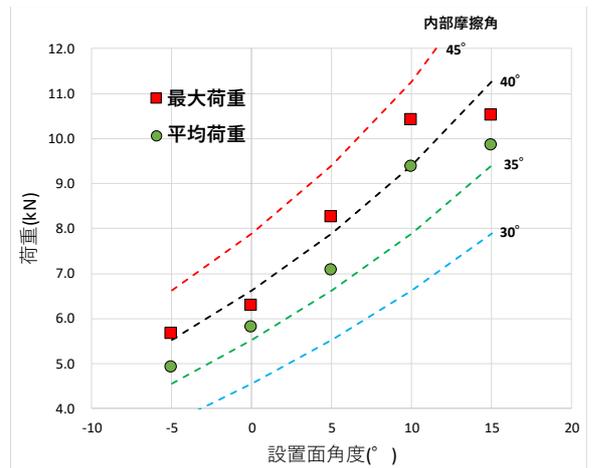


図 2 荷重-設置面角度の関係図

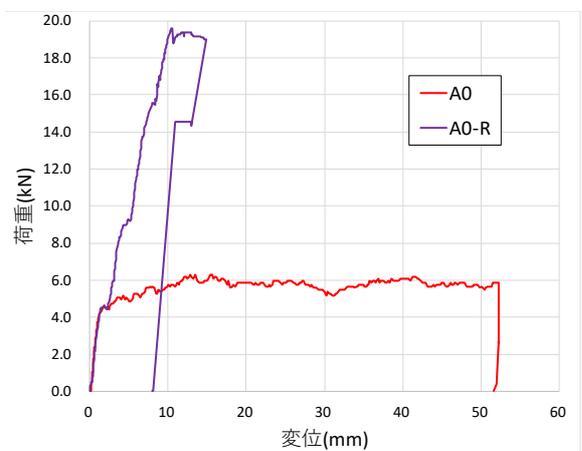


図 3 荷重-変位関係(補強有無の比較)