

城郭石垣における石材の内部摩擦角推定方法の一提案

(株)間組 正会員○山本浩之 正会員 笠 博義 正会員 猪狩哲夫
 関西大学 正会員 西田一彦 正会員 西形達明
 和田石材建設(株) 和田行雄

1. 概要

国内には城郭石垣のような石積構造物は多数現存するが、こうした石積構造物を維持管理していく上では、その安定性を定量的に評価することが重要となる。このような背景の中で、石垣の安定性評価の手法として、さまざまな数値解析手法を用いた研究が進められている。しかし、老朽化し不安定化している城郭石垣は、文化財的価値があるため、現場での実験や破壊を伴う調査が困難な場合が多く、解析上必要な石材の物性値には経験的な数値が用いられていることが多い。

そこで本研究は、実際の城郭石垣補修工事の現場において石材の原位置摩擦実験¹⁾を行い、実際の内部摩擦角を得るとともに、ISRM 指針に示されているせん断強度の推定式²⁾により得られる内部摩擦角との関係を検討した。これにより、簡便に解析上必要な石材の内部摩擦角を推定する方法について考察した。以下に結果を報告する。

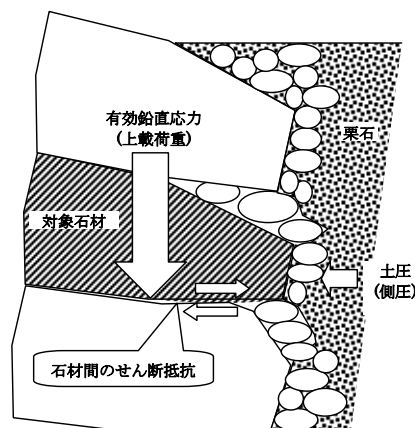


図-1 石垣の力学的概念図

2. 今回対象とする石垣と力学的安定性について

今回の研究対象は、打込みはぎで構築された城郭の石垣である。ここで、図-1 に示す対象石材の力学的安定性に注目すると、背面からの土圧(側圧)に対し石材間のせん断強度でバランスを図っており、粘着力 c が期待できないことから、内部摩擦角 $\phi_p (= \tan^{-1}(\tau_p / \sigma_n))$ の数値が重要となる。このため、石材間の精度の良い内部摩擦角を得ることが、力学的安定性を評価する上で必要となる。

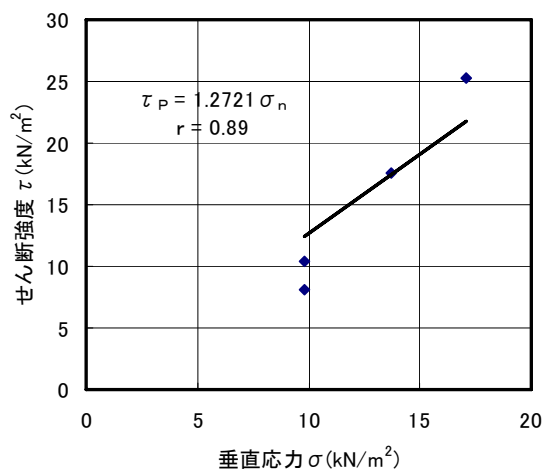


図-2 垂直応力とせん断応力との関係

3. 摩擦実験結果

上述した解体工事現場における摩擦実験のうち、せん断応力と垂直応力の関係について整理したものを図-2 に示す。また対象とした石材を写真-1 に示す。図-2 より実験に用いた石材の粘着力 c を 0 とすると、内部摩擦角 ϕ_p は 51.8° が得られた。

4. ISRM 指針による内部摩擦角の推定方法

今回実施したような原位置摩擦実験は手間が掛かり、特に文化財的な価値のあるものでは、通常実施することが極めて困難である。そこで、ISRM 指針に示されている不連続面の粗さから岩石の内部摩擦角を求めるせん断強度の推定式(式 1)により、簡便に精度良く石材間の内部摩擦角を得る方法を検討した。

$$\phi_p = \text{JRC} \log_{10} \frac{\text{JCS}}{\sigma'_n} + \phi_r \quad (\text{式 1})$$

ここで、 ϕ_p : 内部摩擦角(ピーク) JRC : 節理の粗さ係数

JCS : 節理面の圧縮強度 σ'_n : 有効鉛直応力 ϕ_r : 内部摩擦角(残留)



写真-1 実験に使用した石材(花崗岩)

キーワード : 石垣, 原位置摩擦試験, 内部摩擦角, JRC

連絡先 : 〒105-8479 東京都港区虎ノ門 2-2-5 TEL : 03-3588-5770, FAX : 03-3588-5755

4-1 各設定数値について

JRC 値(節理の粗さ係数)は、対象石材を非接触 3 次元デジタイザ(ミノルタ製 VIVID910)により 3 次元形状を取込み、代表断面(①-①' 断面)の石材表面の粗さ形状を図化することで求めた。測定状況を写真-2 に、石材の三次元形



写真-2 形状測定装置による測定状況

状および石材表面の粗さ形状断面を図-3～4 に示す。ここで、図-5 に示す ISRM 指針に示されている JRC 値に対応する典型的な粗さ形状より、図-4 に示す石材表面は 4 区分(JRC 値=6～8: ”粗く～滑らかで、平坦”)に属するものと判断し、JRC 値を中間値の 7 とした。

JCS(節理面の圧縮強度)は、シュミットロックハンマー試験を実施し、反発度からの換算値より JCS 値を 37,880kN/m² とした。

また有効鉛直応力(σ'_n)は、今回の垂直応力の試験範囲より 10～20 kN/m² とし、さらに残留内部摩擦角 ϕ_r を 30° と仮定した。

4-2 推定される内部摩擦角について

4-1 項の各設定値より、(式 1)から得られる内部摩擦角は $\phi_p=52.9^\circ \sim 55.0^\circ$ となり、実測値(51.8°)より若干大きいもののほぼ同程度の数値が得られた。この結果、ISRM 指針に基づく推定式から精度良く石材間の内部摩擦角が推定できるものと判断された。

4-3 石垣高さとの内部摩擦角の関係について

ISRM 指針に基づき、石材表面から JRC 値を推定し、シュミットロックハンマー試験より JCS 値を測定することで、石材間の内部摩擦角が得られることとなる。例えば、打込みはぎの花崗岩石材(単位体積重量 γ_t : 26kN/m³)の JCS 値を 50,000kN/m²、JRC 値を 6～8 とし、有効鉛直応力が石垣高さに比例すると仮定した場合の石垣高さ(最大 20m)と石材間の内部摩擦角との関係を図-6 に示す。これにより、上述した簡便な計測を実施することで、石垣の鉛直高さに応じた内部摩擦角が得られるものと考ええる。

5. まとめ

今回、文化財である城郭石垣において、石垣の石材間の内部摩擦角を測定した。さらに、ISRM 指針の簡便なせん断強度の推定式から得られる内部摩擦角との関係を整理し、実験結果と推定値がほぼ一致することを確認した。今後、岩種の違いや野面積みや切込みはぎなどの違いについても検証する予定である。

参考文献 1)笠博義ほか：石垣構成石材の原位置摩擦実験,土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集,pp.457-458,IV-230,2006.9

2)岩の力学連合会：日本語訳 ISRM 指針 vol.3 岩盤不連続面の定量的記載方法,pp37-51, 1985.11

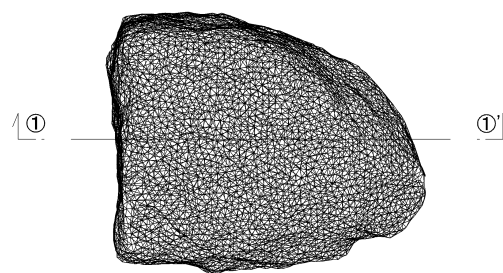


図-3 対象石材の三次元形状

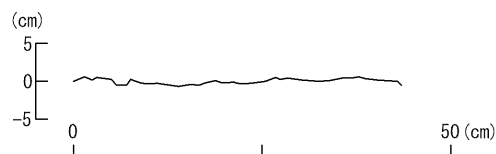


図-4 粗さ形状断面(①-①' 断面)

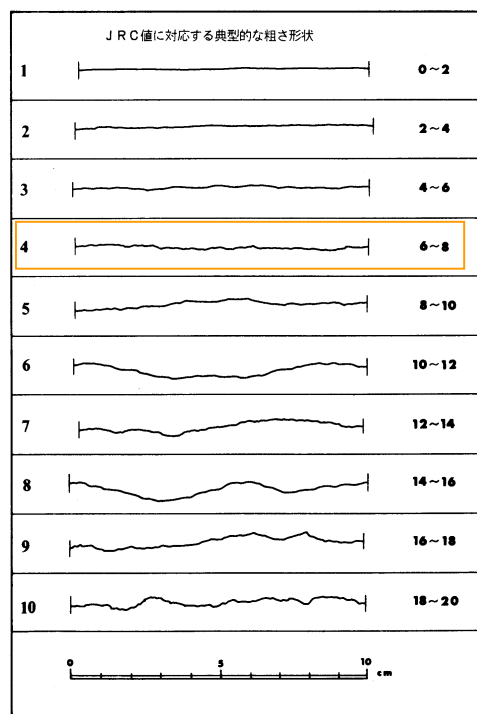


図-5 粗さ形状と、それに対応する JRC 値の範囲²⁾

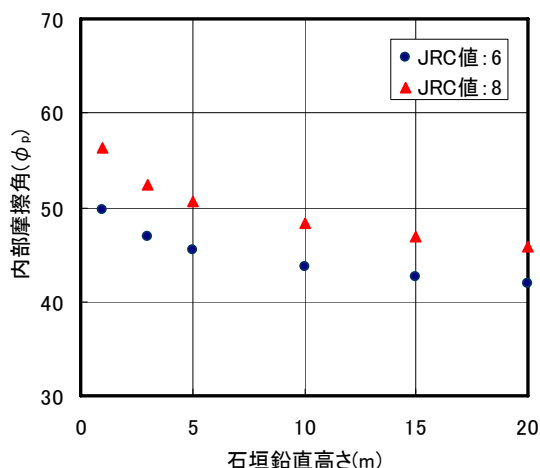


図-6 石垣高さとの内部摩擦角との関係