

参考資料 3：熊本城石垣基礎診断実施要領の運用（案）について

1. 本運用（案）の位置づけ

本運用（案）は、管理者が実情にあった石垣の診断を行うために、熊本城石垣基礎診断実施要領（案）に記述されていない部分についてまとめたものである。なお、本運用（案）は、平成 28 年 4 月発生の熊本地震から令和 4 年 6 月時点までに実施した熊本城における災害復旧によって得られた知見に基づき暫定的に定めたものであり、今後も災害復旧を進めるにあたり新たな知見を得られた場合は適宜改定を行うものである。

なお、上述の主旨より、基礎診断の結果、判定 B（大地震に対し不安定となる恐れがある）または判定 C（大地震に対し著しく不安定で、対策の必要がある）となる石垣に対して、ただちに現代工法を含めた補強を行うものとせず、基礎診断の結果を参考にしながらも、対象とする石垣周辺の史跡や建造物等の状況、人的安全、石垣の被災状況や修理履歴等について総合的に勘案し、慎重に補強や安全対策、対処方針の適用について決定するものとする。

また、基礎診断以外の手法や、基礎診断以上の専門的な手法が特に適切と判断される場合には、熊本城石垣耐震診断指針（案）に記載のとおり土木工学専門家を加えた専門委員会等により、その妥当性を検証したうえで運用する。

なお、本運用で示す物性値は、石垣基礎診断にのみ適用し、現代工法を含めた補強などの検討においては、その各指針・マニュアル等に準拠するものとする。

2. 石垣基礎診断に適用する諸元について

(1) 累積示力線法に入力する物性値の設定

3 診断用物性値

石垣の安定解析、背面土の安定解析及び石垣の変形解析に用いる解析用物性値の設定にあたっては、実際に行った調査等から得られた値や、既往の実験値などを総合的に評価して用いる。

※熊本城石垣基礎診断実施要領（案）より

1) 裏栗石の単位体積重量 γ ・内部摩擦角 ϕ について

裏栗石の物性値は、予め土質試験を行い、その結果を基に決定するのが望ましいが、実情は石垣解体修理工事の過程でなければ土質試験を行うことが困難である。

令和 4 年 6 月までに熊本城内の石垣解体修理工事の過程で実施した裏栗石の土質試験結果を表-1 に示す。

なお、土質試験については、現場密度試験による単位体積重量 γ 及び大型三軸圧縮試験による内部摩擦角 ϕ の算出を行った。

表-1 裏栗石の土質試験結果

工事名	試験箇所	試験日	単位体積重量 γ (kN/m ³)			内部摩擦角 ϕ (度)	
			現況石垣		修理後石垣	相似粒度 (最大粒径 53mm 以下)	玉石 玉砂利
			円礫	円礫・角礫	角礫		
熊本城天守閣復旧整備事業に伴う設計業務委託 (その 2)	小天守 (明治期)	2017 年 5 月	14.6			35.6	
	大天守 (明治期)	2017 年 5 月		12.1			
	小天守 (明治期)	2018 年 5 月	14.9				
熊本城天守閣復旧整備工事 (その 6)	大天守 (昭和前期)	2018 年 12 月			16.8		
熊本城天守閣復旧整備工事 (その 9)	小天守 (昭和前期)	2019 年 6 月			17.3		
熊本城願田丸五階櫓調査設計業務委託 (その 2)	五階櫓 (中層部) 石垣基礎部	2018 年 5 月			15.0		
	五階櫓 (南側) 基台 A (平成期)		14.5				
	五階櫓 (南側) 基台 B (平成期)	2019 年 2 月	15.0				
	願田丸五階櫓 (南側) 基台 C (江戸期)	2019 年 3 月				12.3	
熊本城願田丸五階櫓調査設計業務委託 (その 3)	裏入櫓石垣	2020 年 7 月			16.0		
熊本城願田丸五階櫓石垣復旧工事 (その 8)	裏入櫓石垣	2021 年 7 月			19.2		
熊本城平櫓台外石垣復旧 (解体) 工事	平櫓石垣	2022 年 2 月	13.0				39.6
平均値			14.2	13.9	14.4	17.8	35.6

表-2 裏栗石の単位体積重量 (単位: kN/m³)

(出典 道路土工・擁壁工指針 (平成 24 年 7 月 社団法人日本道路協会))

地盤	土質	緩いもの	密なもの
自然地盤	砂及び砂礫	18	20
	砂質土	17	19
	粘性土	14	18
	砂及び砂礫	20	
裏込め土・盛土	砂質土	19	
	粘性土 (ただし $w_L < 50\%$)	18	

表-1 の値と表-2 の「道路土工・擁壁工指針」に記載されている裏込め土として使用する砂及び砂礫の一般的な単位体積重量の値 ($\gamma=20\text{kN/m}^3$) と比較した結果、いずれの場合も現場密度試験により得られた値が小さく、一般値を用いた場合は過大評価となる恐れがある。

このことから、試験結果は石垣毎にバラつきがあり現況と修理後の結果に大きな差があるものの、総合的に評価して単位体積重量の試験結果を平均した $\gamma=16\text{kN/m}^3$ とする。

裏栗石の内部摩擦角については、表-1 に示す値は大型三軸圧縮試験 (裏栗石の現場粒度試験結果から平均粒度を作成し、最大粒径が 53 mm となるように調整した相似粒度を試験粒度として行った) の結果であるが、各石垣で相似粒度試料が異なり試験結果にバラつきがあること、また、参考となる試験数が現時点では少ないことから、当面は表-3 の「道路土工・擁壁工指針」に記載されている礫質土の内部摩擦角の一般値 $\phi=35$ 度を用いる。

なお、今後の各石垣の解体修理工事の過程における土質試験結果を蓄積し、適宜物性値の見直しを図ることとする。

表-3 裏栗石の内部摩擦角

(出典 道路土工・擁壁工指針 (平成 24 年 7 月 社団法人日本道路協会))

裏込め土・盛土の種類	せん断抵抗角 (ϕ)	粘着力 (c) (注 2)
礫質土	35°	—
砂質土 (注 1)	30°	—
粘性土 (ただし $w_L < 50\%$)	25°	—

注 1) 細粒分が少い砂は、礫質土の値を用いてよい。
注 2) 土質定数を上表から推定する場合は、粘着力 c を無視する。

2) 築石と裏栗石間に生ずる壁面摩擦角 δ について

壁面摩擦角の考え方については、図-1 及び表-4 のとおり「道路土工-擁壁工指針」に示されている。しかし、土圧作用面の状態が土とコンクリートにおける評価であり、石垣の構造とは異なる。石垣は築石と裏栗石により構成されており、その石質は共に安山岩で同一、かつ職人の手で築石尻に飼石や栗石を丁寧に隙間なく施工することで築石背面に相応の摩擦力が期待される。

このことから、築石と裏栗石間に生ずる壁面摩擦角は常時及び地震時共に裏栗石の内部摩擦角 $\phi=35$ 度と同値 ($\delta=\phi$) とする。

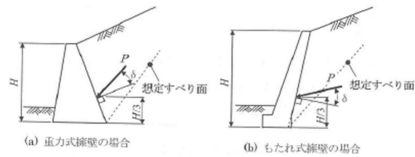


図-1 重力式擁壁等の土圧作用面

(出典 道路土工-擁壁工指針 (平成 24 年 7 月 社団法人日本道路協会))

表-4 主動土圧の算定に用いる壁面摩擦角

擁壁の種類	検討項目	土圧作用面の状態	壁面摩擦角	
			常時 (δ)	地震時 (δ_E)
重力式擁壁等	擁壁自体の安定性 部材の安全性	土とコンクリート	$2\phi/3$	$\phi/2$

3) 築石の底面摩擦角 ϕ_B (築石間摩擦係数 $\mu=\tan\phi_B$) について

築石間の底面摩擦角については、道路土工ほか各種示方書に明確に数値が記述されていない。

そこで、城郭石垣を構成する石材間の摩擦特性を把握するために行われた研究報告を参考に築石間の底面摩擦角を決定することとした。

図-2 は「城郭石垣における石材間の摩擦特性と個別要素法解析によるシミュレーション【土木史研究講演集 Vol.29 2009 年】」に示される、石垣高ささと石材間の摩擦角との関係である。

熊本城では宇土櫓下や二様の石垣などの高石垣が構築されていること、また技法として打込みはぎが用いられていることから、関係図に示される打込みはぎの場合の最低値 45 度程度は期待できると考え、**築石間の底面摩擦角は $\phi_B=45$ 度**とする。

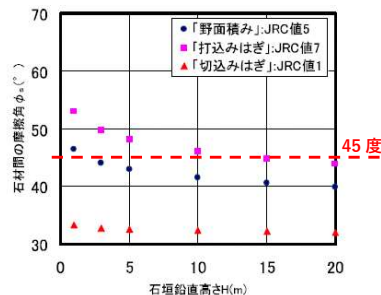


図-2 石垣高ささと石材間の摩擦角との関係

(出典：城郭石垣における石材間の摩擦特性と個別要素法解析によるシミュレーション【土木史研究講演集 Vol.29 2009 年】)

(2) 石垣に作用する上載荷重の設定

4 上載荷重の設定

石垣上に櫓等の建物が建つなど櫓等の荷重が常時存在する場合は、地震時であってもその荷重を考慮する。
※熊本城石垣基礎診断実施要領 (案) より

熊本城石垣において、石垣上に櫓等の建物が建つ場合は、建物の支点反力より石垣上に作用する荷重を考慮する。表-5 に考え方を示す。

考え方①については、建物の支点反力のうち築石上部にかかる反力が集中荷重として石垣天端の築石部に作用し、それ以外の支点反力が等分布荷重として裏込め部分に作用するものとする。

考え方②については、建物の支点反力全てが裏込め部分に等分布荷重として作用し、石垣天端の築石控え長分が築石部に集中荷重として作用するものとする。

考え方①・②の使い分けについては、実際の条件に応じて算出する。

なお、建物の荷重とは別に裏込め材に作用する群集荷重として 3.5kN/m² を別途考慮する。

建物が建たない石垣については、裏込め材に作用する群集荷重 3.5kN/m² のみ考慮する。

表-5 建物荷重の考え方

	考え方① (例：重要文化財建築物ほか)	考え方② (例：堀田丸・馬長櫓)
平面図 (イメージ図)		
前面図 (上載荷重作用イメージ図)		
説明	櫓の支点反力のうち築石上部の反力が集中荷重として作用する。 算出式： $(\text{①}+\text{②}+\text{③})/\text{桁行 (m)}$	下記のうち天端石の控え長分が集中荷重として作用する。 算出式： $(\text{①}+\text{②}+\text{③}+\text{④}+\text{⑤})/(\text{桁行 (m)} \times \text{築行 (m)}) \times \text{控え長 (m)}$
	裏込め材 (等分布荷重) (kN/m) 算出式： $(\text{④}+\text{⑤}+\text{⑥}+\text{⑦}+\text{⑧}+\text{⑨})/\text{桁行 (m)} \times \text{築行 (m)}$	櫓の支点反力の全てが等分布荷重として作用する。 算出式： $(\text{①}+\text{②}+\text{③}+\text{④}+\text{⑤}+\text{⑥}+\text{⑦}+\text{⑧}+\text{⑨})/\text{桁行 (m)} \times \text{築行 (m)}$

(3) 許容安全率の設定

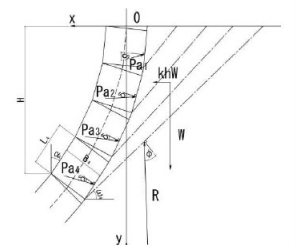
1) 築石の安定性評価 (転倒・滑動) (累積力線)

$$Pa_n = \frac{W_n \cdot \sin(\omega_n - \phi) - \sum \{Pa_i \cdot \cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_i)\}}{\cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_n)} \quad \dots \text{式-2}$$

$$Pae_n = \frac{We \cdot \sin(\omega_n - \phi + \theta) - \sum \{Pae_i \cdot \cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_i)\}}{\cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_n)} \quad \dots \text{式-3}$$

$$d_i = \sum (M_i/V_i) \quad \dots \text{式-4}$$

ここに、 Pa ：常時の土圧、 Pae ：地震時の土圧、 ω ：滑り角、 δ ：壁面摩擦角、 α ：積み石の勾配、 θ ：地震時合成角($=\tan^{-1}kh$)、 W ：すべり土塊重量、 We ：すべり土塊重量とそれに起因する慣性力との合力、 kh ：水平震度、 L ：積み石の法長、 d ：荷重合力の作用点までの距離、 M ：モーメント、 V ：鉛直力である。



※熊本城石垣基礎診断実施要領 (案) より

①転倒に関する検討

宅地防災マニュアルに準拠し、転倒に対する許容安全率 F_s を以下のとおり設定する。

ただし、累積示力線法による解析は石垣裏込材の粘着力 C を考慮せず内部摩擦角 ϕ のみの評価であり、やや安全側の設計となることから、現況の石垣を評価する場合は、常時で安全率 ($F_s \geq 1.5$) を確保していない場合であっても、常時で安全率が 1.0 以上あり、かつ地震時に安全率が 1.0 以上確保されていればよいものとする。

Ⅲ 転倒に関する検討

(1) 擁壁の転倒に対する検討

転倒とは、擁壁底板の前端を中心として擁壁を前方に回転する挙動であり、その原因となる土圧等による作用モーメントを転倒モーメントという。これに対して、擁壁の自重とフーチング上にある土の重量、土載荷重などによって、同じ軸のまわりに逆向きに抵抗するモーメントを安定モーメントという。

転倒に関する検討は、安定モーメントを転倒モーメントで除した値が、安全率を満足するかどうかを確認する。

転倒に対する安全率 F_s は、次式により算定する。

$$F_s = M_a / M_o \quad (\text{式Ⅷ.3-8})$$

ここに、

F_s ： 転倒安全率 (表Ⅷ.3-8参照)

M_o ： 転倒に抵抗しようとするモーメント (kN・m)

M_a ： 転倒させようとするモーメント (kN・m)

(1) 常時における検討

- ① 擁壁全体の安定モーメントが転倒モーメントの1.5倍以上であること。
- ② 擁壁底面における滑動抵抗力が滑動外力の1.5倍以上であること。

(3) 大地震時における検討

- ① 擁壁全体の安定モーメントが転倒モーメントの1.0倍以上であること。
- ② 擁壁底面における滑動抵抗力が滑動外力の1.0倍以上であること。

表Ⅷ.3-8 安全率 (F_s) 等のまとめ

	常時	中地震時	大地震時
転倒	1.5	—	1.0
滑動	1.5	—	1.0

(出典：宅地防災マニュアルの解説〈第三次改訂版〉(宅地防災研究会))

なお、転倒に対する安定の照査は上記許容安全率 F_s で評価することから、熊本城石垣基礎診断実施要領(案)に記載されている荷重合力の作用点までの距離 d の判定については参考値として取り扱うこととし、常時・地震時共に築石のつま先より後方 ($d \geq 0$) にあればよいものとする。

②滑動に関する検討

宅地防災マニュアルに準拠し、滑動に対する許容安全率 F_s を以下のとおり設定する。

ただし、累積示力線法による解析は石垣裏込材の粘着力 C を考慮せず内部摩擦角 ϕ のみの評価であり、やや安全側の設計となることから、現況の石垣を評価する場合は、常時で

安全率 ($F_s \geq 1.5$) を確保していない場合であっても、常時で安全率が 1.0 以上あり、かつ地震時に安全率が 1.0 以上確保されていればよいものとする。

(1) 滑動安定性

擁壁には、擁壁を底版下面に沿って滑らせようとする滑動力と、これに対して基礎地盤の間に生じる滑動抵抗力が作用する。滑動抵抗力が不足すると擁壁は前方に押し出されるように滑動する。

滑動力は、主として土圧、地震時慣性力、フェンス荷重等の外力の水平成分からなり、滑動抵抗力は、主として底版下面と基礎地盤の間に生じるせん断抵抗力からなる。

滑動に対する安全率 F_s は、次式により算定する。

$$F_s = \frac{\text{滑動に対する抵抗力}}{\text{滑動力}} = \frac{R_v \cdot \mu + C_b \cdot B}{R_H} \quad (\text{式Ⅷ.3-11})$$

ここに、 F_s ： 滑動安全率 (表Ⅷ.3-8参照)

R_v ： 基礎下面における全鉛直荷重 (kN/m)

R_H ： 基礎下面における全水平荷重 (kN/m)

μ ： 擁壁底版と基礎地盤の間の摩擦係数

(Ⅶ.3.2.3 節参照)

C_b ： 擁壁底版と基礎地盤の間の粘着力 (kN/m)

B ： 基礎底版幅 (m)

粘着力は、その長期変動も含めた適正な値の評価が一般的には困難であることから、 $C_b = 0 \text{ kN/m}$ と考え、 μ (摩擦係数) にその影響を含めたものとして取り扱う場合が多い。

表Ⅷ.3-8 安全率 (F_s) 等のまとめ

	常時	中地震時	大地震時
転倒	1.5	—	1.0
滑動	1.5	—	1.0

(出典：宅地防災マニュアルの解説〈第三次改訂版〉(宅地防災研究会))

2) 石垣背面全体の安定性評価 (円弧すべり解析)

宅地防災マニュアルに準拠し、表-6 のとおり許容安全率 F_s を設定する。

4) 最小安全率

盛土のり面の安定に必要な最小安全率 (F_s) は、盛土施工直後において、 $F_s \geq 1.5$ であることを標準とする。

また、地震時の安定性を検討する場合の安全率は、大地震時に $F_s \geq 1.0$ とすることを標準とする。なお、大地震時の安定計算に必要な水平震度は、0.25に建築基準法施行令第88条第1項に規定するZの数値を乗じて得た数値とする。

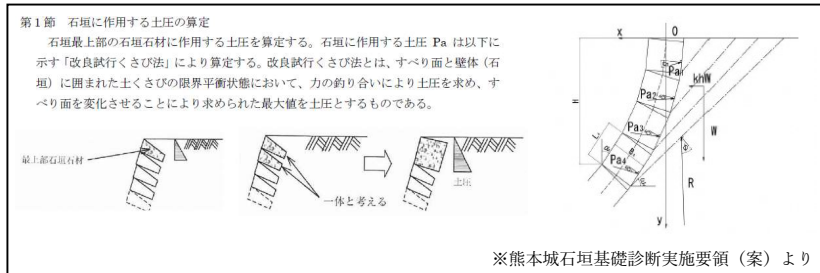
(出典：宅地防災マニュアルの解説〈第三次改訂版〉(宅地防災研究会))

表-6 円弧すべり解析の許容安全率 (F_s)

	許容安全率 (F_s)
常時	$F_s \geq 1.5$
地震時	$F_s \geq 1.0$

(4) 診断手法について

1) 築石の安定性評価（累積土圧線法）



改良試行くさび法による土圧の算定については、石垣背面の土層種別に関係なく、石垣根入れ部までの土圧を累積するものとなっており、計算上、石垣下部ほど不安定となる。

熊本城跡は、京町台地先端の通称茶臼山に立地しており、阿蘇火山起源の火災堆積物（Aso-4）が基盤をなしている。平成 28 年 4 月に発生した熊本地震において、当該基盤層のすべり崩壊は確認されていないことから、石垣面に作用する土圧として裏栗石が支配的であることが推定される。また、石垣面や勾配などの詳細な調査・検討を行った結果、過去に石垣が修理された範囲周辺で崩壊や変状している場合が多く、それより下部で石垣背面に基盤層がある場合は、地震の影響と考えられる被災があまり見られない。

このことから、図-3 に示すとおり、既往の地質調査成果による基盤層の位置、石垣の修理履歴や被災状況（石垣上部の地割れ含む）を総合的に検討し、診断の対象範囲を決定する。

ただし、修理後を想定した診断では、崩壊や変状など被災した範囲（解体修理範囲と同等）のみを診断の対象とする。

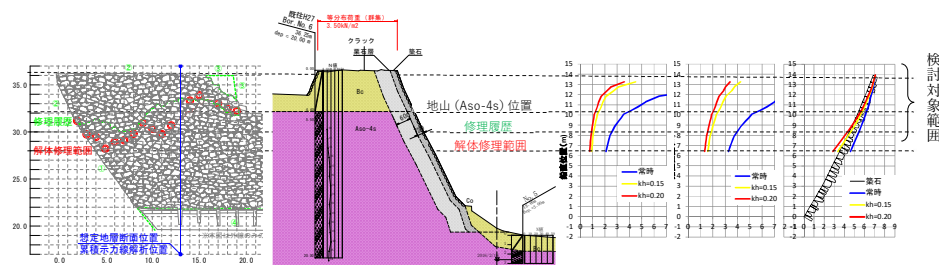


図-3 改良試行くさび法による土圧の算定対象範囲

2) 石垣背面全体の安定性評価（円弧すべり解析）

上述する築石の安定性評価と同様に被災した範囲のみを検討対象とした解析モデルにおいて円弧すべり面法（修正フェレニウス法）を行う場合、図-4 に示すとおり石垣の擁壁としての抵抗力を正當に評価することができない。

このことから、石垣の背面状況等から、石垣の途中を通過するすべりが考えられる場合は、累積土圧線法により、石垣の擁壁としての抵抗力を考慮した安定性評価を行うこととし、円弧すべり面法による解析は行わないこととする。

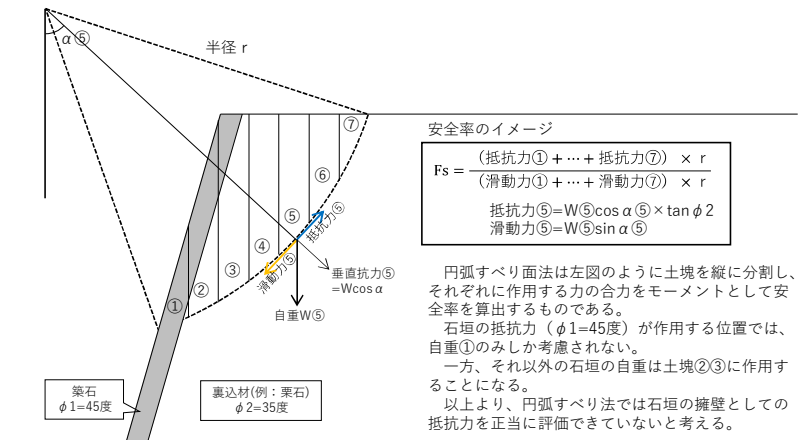


図-4 石垣の途中をすべり面が通過する場合の解析モデル