熊本城石垣の示力線による安定性照査の適用性について

国士舘大学　正会員　　橋本　隆雄
共和ｺﾝｸﾘｰﾄ工業(株)　正会員　○近藤　和仁
(株)日測　非会員　　石作　克也

1. はじめに

熊本地震の影響により、熊本城の石垣総数 973 面･約 79,000m² に対し、石垣の崩落が 229 面･約 8,200m²、緩みや膨らみのため積み直しを要すると考えられているものが 517 面･約 23,600m² であり、全体の約 3 割の面積に及んでいるが，その被害原因については明らかとなっていない[1)]。筆者らは、この地震における石垣の被災状況に関する現地調査[2)]を実施し、石垣の安定性および熊本地震の変状形態を簡易な示力線により再現できるか検証した結果について報告する。

2. 示力線について

示力線法は、石積擁壁やブロック積擁壁などの設計においては転倒に対する安定性照査に適用されている[3),4)]。示力線は、積み石に作用する土圧や自重などの荷重合力の作用点の軌跡を 1 段目から最上段まで結んだ曲線であり、それが前方に位置するほど安定性が低下することを示す。石積擁壁やブロック積擁壁が安全であるためには､岡積は主働土圧に 2 倍の安全率を見込んで求められる示力線が擁壁断面の中心点より後方に存在する必要があるとし､土地改良事業設計基準では示力線がミドルサードよりも後方に位置することとしている。一般的な示力線法による照査式は、同じ勾配で積み上げられた擁壁を対象としているため、天端に向かうに伴い勾配が急になる寺勾配や宮勾配などで築造される石垣の計算を行なえない。本稿では、試行くさび法により 1 段ごとに積み勾配が異なる積み石に作用する土圧を算定し、これにより示力線を求めた(図-1)。計算に用いた推定値は、積み石の単位体積重量 γ=26kN/m³、裏込め土のせん断抵抗角 ϕ=40°（石塁,半石塁)、35°（非石塁)、裏込め土の単位体積重量 γ=20kN/m³、積み石の控長は、百間石垣西側の崩落部分の調査結果から B=79cm とした。常時及び地震時の土圧、荷重合力の作用点までの距離は次式から算定した。

$$Pa_n=\frac{W_n\cdot\sin(\omega_n-\phi)-\sum\{Pa_i\cdot\cos(\omega_n-\phi-\delta-\alpha_i)\}}{\cos(\omega_n-\phi-\delta-\alpha_n)} \quad 式(1)$$

$$Pae_n=\frac{We\cdot\sin(\omega_n-\phi+\theta)-\sum\{Pae_i\cdot\cos(\omega_n-\phi-\delta-\alpha_i)\}}{\cos(\omega_n-\phi-\delta-\alpha_n)} \quad 式(2)$$

$$d_i=\Sigma\,(M_i/V_i) \quad 式(3)$$

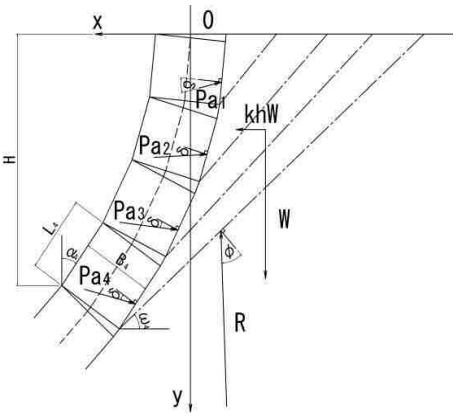


図-1　計算モデル

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⁻¹kh)、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。

3. 計算結果

熊本城では、図-2 及び図-3 に示すように石垣形状によって変状形態が異なることが認められた。そこで、石垣の規模が同程度である測線 B4(半石塁、変状なし)、測線 B3(非石塁、変状あり)、測線 D3(石塁、崩落)の三断面を対象に、水平震度を kh=0,0.15,0.20,0.25 として示力線を算出した。図-5 に示すように、示力線は、常時(kh=0)は最も後方に位置するが、水平震度の増大に伴い前方に移動している。測線 B4(変状なし)、測線 B3(変状あり)、測線 D3(崩落)の順に、小さい水平震度の値で示力線が石垣断面よりも前方に外れており、崩落した測線 D3 が三断面の中で最も脆弱であることを示している。他の石垣と比較して、石垣形状が急な勾配であることが影響していると考えられる。

キーワード：熊本地震、熊本城、石垣、安定性、示力線
連絡先：〒154-8515　東京都世田谷区世田谷 4-28-1　国士舘大学理工学部まちづくり学系　TEL 03-5481-3251

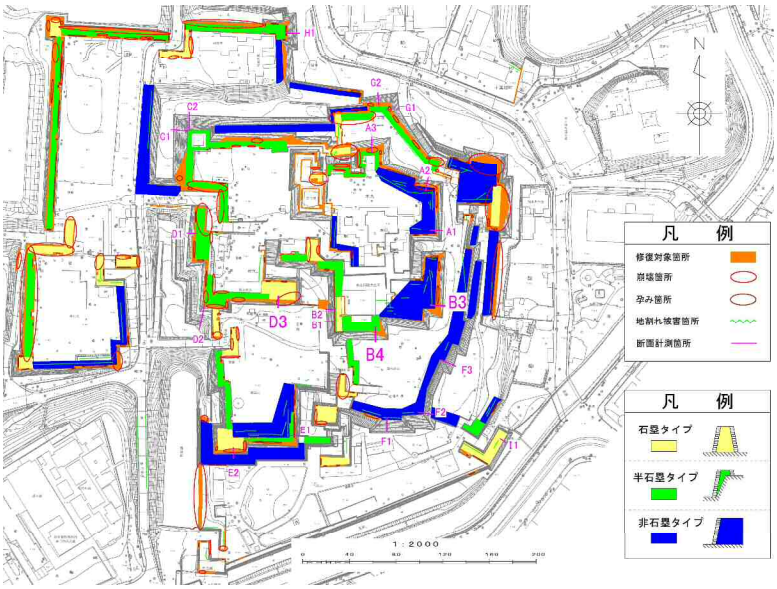


図-2 熊本城石垣の修復履歴と被害状況の整理

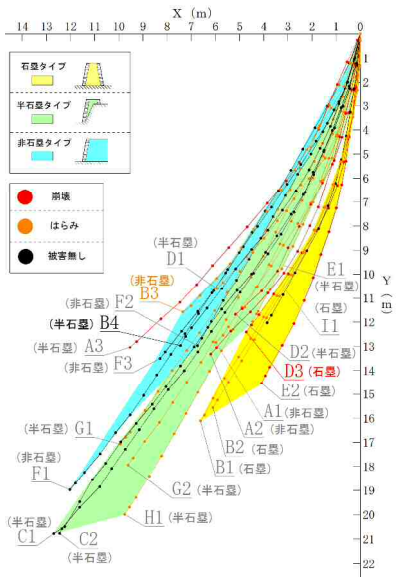


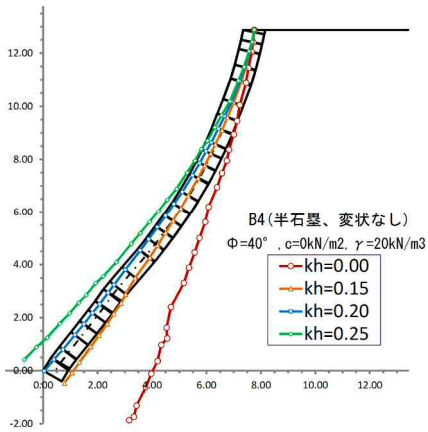
図-3 石垣形状と被害程度及びタイプの関係

測線 B4(変状なし)

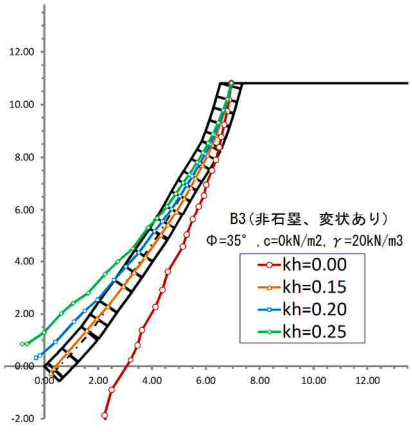
測線 B3(変状あり)

測線 D3(崩落)

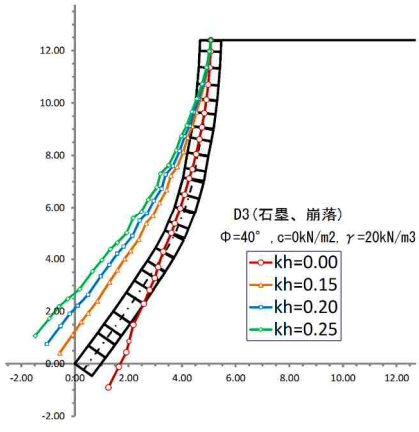
図-4 石垣の被災状況



測線 B4(変状なし)



測線 B3(変状あり)



測線 D3(崩落)

図-5 示力線の算出結果

4. まとめ

熊本城石垣の安定性を簡易な示力線により照査を行った結果、水平震度の増大に伴い石垣の安定性が低下すること、石垣形状が安定性に影響を及ぼすこと、計算結果が被災状況と概ね一致する傾向を示したことが確認できた。

謝辞：本論文は、公益財団法人鹿島学術振興財団の助成金を活用させていただきました。また、熊本城内での石垣等調査にあたっては、熊本城調査研究センターの鶴嶋文化財保護主幹、東園主任技師、嘉村文化財保護主事等の職員の皆様にご同行いただきました。末筆ながら記して謝意を表します。

参考文献

1)源健二：特別史跡熊本城跡の被災状況と復旧について,建設マネジメント技術,pp41-55,2017.3、2) 橋本隆雄,石作克也：3 次元レーザスキャナを用いた熊本城石垣等の変状分析, 第 29 回土木学会年次講演会,2017.9、3)岡積満：間知石の法勾配(1),土木技術 第 5 巻 第 9 号,pp11-13、1950.10、4)農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準設計「農道」,pp629-631,1998.3、5)桑原文夫:熊本城の石垣勾配,日本工業大学研究報告,第 14 巻,第 2 号,1984、6)小山倫史,菊本統,橋本涼太,桑島流音:平成 28 年(2016 年)熊本地震における熊本城の城郭石垣の被害調査およびその分析,社会安全学研究第 7 号,2017.2