城郭石垣を対象とした累積示力線法による地震時安定性の簡易評価指標

八千代エンジニヤリング株式会社　　正会員　　○堀内　深※1
公益財団法人　文化財建造物保存技術協会　　非会員　　津和　佑子※2

１．背景と目的

2016 年の熊本地震では熊本城の石垣が甚大な被害を受け，これを契機に全国的に石垣の耐震診断に対する機運が高まった．その結果，文化庁から「文化財石垣基礎診断実施要領（案）（以下、「要領」と呼ぶ)」が公開されるに至っている．　しかし，全国には数千箇所とも言われる城郭が存在しており，その各箇所において詳細な内部調査や検討を行うことは実務的･資金的に困難である．そこで本検討では，一般的な石垣を想定し，各種パラメータが石垣の耐震性に与える影響について累積示力線法を用いて検討し，石垣内部構造の詳細調査を実施する前にある程度の耐震性能の目安をつけるための簡易評価指標の作成を目的とする．

２．検討方法と内容

検討には，「要領」にて標準手法として示されている「累積示力線法」を用いた．本手法は，改良試行くさび法により築石一段ごとに土圧を算定して合力の軌跡を求めるものであり，勾配が変化する任意の石垣形状に対応可能である．本検討は詳細な内部調査を実施する前の段階を対象とするため，設計に用いる地震力および各材料の物性値は，同要領に示される標準値を用いた．解析に用いた数値を表 1 に示す．検討ケースは，石垣の安定性への影響が大きいと考えられる石垣高さ（5m，10m，15m），断面形状（一定勾配，反り有り），法勾配（1:0.2，1:0.3，1:0.4，1:0.5）をパラメータとして設定した．断面形状における「反り有り」は城郭石垣に特徴的なもので，「２次放物線」として形状を設定した．今回は固定値とした設計水平震度と築石控え長について，次項でパラメータ解析を行い，その影響を整理した．

表1　地震力、物性値

項目・細目		数値	単位	備考
設計水平震度（kh）		0.20	―	Ⅱ種地盤
築石の物性値	単位体積重量（γ）	26.5	kN/m^3	花崗岩･安山岩相当
	底面摩擦角（ϕ_B）	45	°	打込みはぎ
	背面摩擦角（δ）	35	°	$\delta=\phi$
	控え長(奥行長さ)	1.0	m	一般値として設定
裏込材の物性値	単位体積重量（γ）	18	kN/m^3	
	内部摩擦角（ϕ）	35	°	礫質土相当
	粘着力（C）	0	kN/m^2	

３．各種パラメータの影響

（１）設計水平震度の影響　石垣高さ H=10m，反り有り，勾配 1:0.3 を対象に，設計水平震度を 0.16（Ⅰ種地盤），0.20（Ⅱ種地盤），0.24（Ⅲ種地盤）として算出した示力線を図 1 に示す．設計水平震度が増加するにつれ示力線は不安定側へ移動するが，各震度による差は小さく，0.20 と 0.16 の差は極めて小さい．示力線は天端から 7m 付近まではほぼ重なるが，それより下方で徐々に差が広がる傾向が見られた．

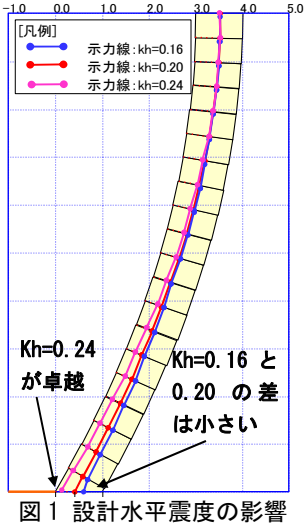
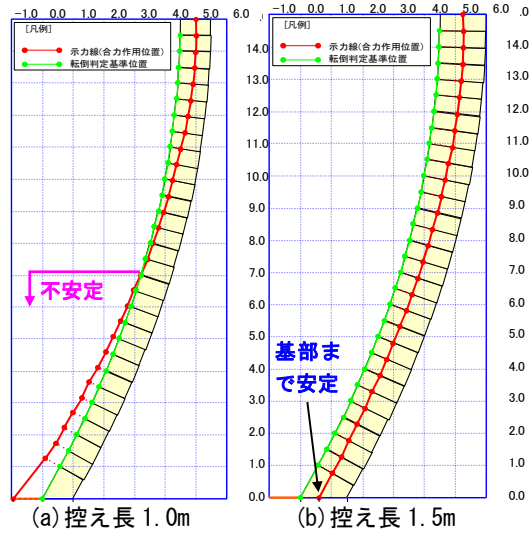


図 1　設計水平震度の影響
（壁高 10m、勾配 1:0.3）



(a)控え長 1.0m　　(b)控え長 1.5m

図 2　築石控え長の影響（壁高 15m、勾配 1:0.3）

（２）築石控え長の影響　H=15m，反り有り，勾配 1:0.3 を対象に，築石の控え長を 1.0m および 1.5m とした場合の地震時の示力線を図 2 に示す．控え長 1.0m では天端から 7m 以下で不安定となるのに対し，1.5m では基

キーワード　城郭石垣，耐震性能，累積示力線法，地震時安定性評価，パラメータ解析，簡易評価指標
連絡先　※1〒540-0001 大阪市中央区城見 1-4-70　OBP プラザビル，TEL；06-6945-9224
※2〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2-32-15，TEL；03-6458-3641

部まで安定を保つ結果となった．これは，築石が大きくなることで自重による抵抗（軸力）が増加し，同時に底面幅が広がり安定性が向上するためと考える．控え長を非破壊調査した事例では，H=10m（勾配 1:0.2，反り有り）で 1.0m 程度，H=15m（勾配 1:0.4，反り無し）で下方 1.3m・上方 0.8m 程度などであり，壁高に応じ控え長も長くなる傾向が考えられるが，本検討では比較のため一般値として 1.0m に統一して検討を行った．

4．検討結果

表 2 に検討ケースと結果を示す．検討結果は底面における示力線の位置で評価し，断面（つま先）より背面側に位置する場合を「安定している」と判断した．図 3 に，代表的な検討ケースの示力線図として，石垣高さ H=10m，勾配 1:0.3 の断面一定勾配（10A-0.3）と反り有り（10B-0.3）の地震時（kh=0.20）における結果を示す．示力線の形状は，下方にいくに従い断面前面へ外れる「弓なり形状」となる．一定勾配では基部付近で閾値を超えて不安定となるが，反り有りでは示力線が全高に渡り築石の中央付近を通過している．これは弓なりの形状により，自重や土圧の鉛直成分が石垣を垂直に押さえつける力として作用し，安定するためと考えられる．図 4 は，表 2 の検討結果を断面形状と荷重状態毎にグラフ化したものである．X 軸を底面における示力線と断面との距離，Y 軸を石垣高さとし，断面勾配ごとに示している．各グラフが X=0 での縦軸と交差する高さが，安定性を確保できる限界高さである．このグラフを用い，対象とする石垣の高さと勾配をプロットすることで，簡易的に城郭石垣の地震時安定性を評価することに活用できる．

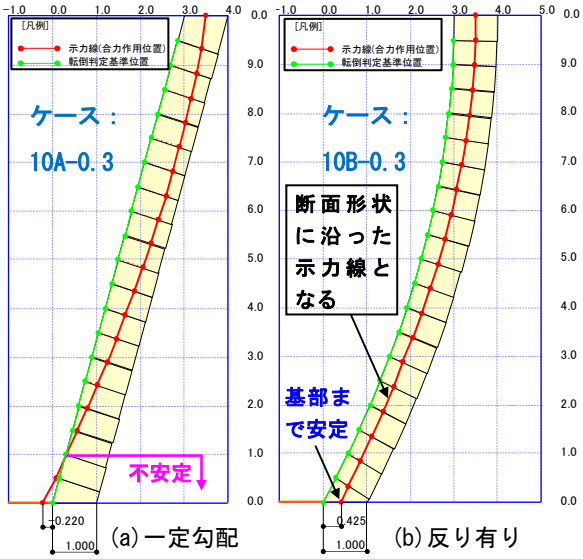


図 3 地震時の示力線図（壁高 10m、勾配 1:0.3）

5．まとめ

本検討では，累積示力線法により各パラメータが石垣の耐震性に与える影響を整理し，簡易的に安定性を評価する指標を作成した．今回は影響検討のみとした設計水平震度や築石控え長，さらに，裏込材をパラメータに加えることで，より汎用性の高い城郭石垣の耐震性能評価指標への拡張が可能と考える．

表 2　検討ケースと結果（太枠は図 3 に示したケース）

ケース名称		5A-0.2	5A-0.3	5A-0.4	5A-0.5	5B-0.2	5B-0.3	5B-0.4	5B-0.5	10A-0.2	10A-0.3	10A-0.4	10A-0.5	10B-0.2	10B-0.3	10B-0.4	10B-0.5	15A-0.2	15A-0.3	15A-0.4	15A-0.5	15B-0.2	15B-0.3	15B-0.4	15B-0.5
高さ		5m								10m								15m							
断面形状		一定勾配				反り有り				一定勾配				反り有り				一定勾配				反り有り			
法勾配		1:0.2	1:0.3	1:0.4	1:0.5	1:0.2	1:0.3	1:0.4	1:0.5	1:0.2	1:0.3	1:0.4	1:0.5	1:0.2	1:0.3	1:0.4	1:0.5	1:0.2	1:0.3	1:0.4	1:0.5	1:0.2	1:0.3	1:0.4	1:0.5
検討結果※1	常時	0.636	0.916	1.207	1.505	0.830	1.213	1.620	2.162	0.088	0.680	1.335	2.017	0.529	1.385	2.273	3.187	-0.967	-0.075	0.951	2.070	-0.302	1.027	2.500	4.031
	地震時	0.402	0.657	0.933	1.224	0.587	0.948	1.350	1.744	-0.687	-0.220	0.327	0.947	-0.297	0.425	1.235	2.135	-2.386	-1.824	-1.098	-0.202	-1.887	-0.949	0.243	1.658

※1：底面での示力線と壁面との距離を示す。正の値は合力の作用位置が壁面より背面側となり安定している。負の値は壁面より前面側で不安定となる。

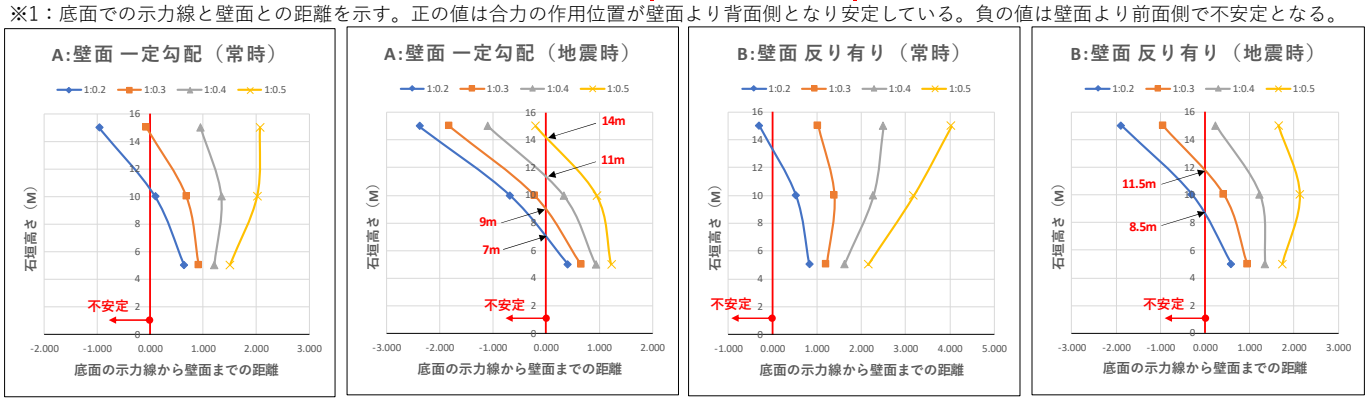


図 4 城郭石垣を対象とした地震時安定性の簡易評価指標（正の値＝石垣が安定、負の値＝石垣が不安定）

参考文献

1) 文化庁：文化財石垣基礎診断実施要領（案），2024.

2) 文化庁：文化財石垣 耐震診断指針（案），2023