

石垣の安定性に関する各種の判定手法の比較検討*

Comparison of Stability Estimation Methods for Masonry Walls

田中邦熙** 新谷洋二*** 山田清臣****

By Kunihiro TANAKA, Yoji NIITANI and Kiyoomi YAMADA

Abstract : For the purpose of judging the safety of existing masonry walls, we applied 6 kinds of methods which we have studied. It was cleared as follows. From these 6 methods, much the same results could get, but incidentally, based on their hypothesis, large variance could happen. Therefore, to get more accurate judgement using studied methods, the corrected soil constants by which checking the results of commonly used soil-slope circular slip surface method should be used. On the other hands, the collection of the field data or the analysis using the computer are expected.

1. はじめに

石積み構造物は墳墓・水理構造物・橋梁等に古くから用いられてきた。特に城郭石垣は壮大さ・技術力においてこれらを凌駕するものが多い。しかし我が国の石積み技術の変遷は、土木史的にも必ずしも明らかにされていない。したがって、その安定性に関する研究等工学的なアプローチも不十分で、研究報告も非常に少ない。

一方我が国に数多く現存する史跡的にも価値が高い城郭石垣の多くは、老朽化が著しい。これらを修復保存するためには、その安定性を客観的に定量的にかつ簡便に評価判定する手法の開発が望まれる。

なお、「石垣」とは字の意味するところに従えば「石を積み上げて造った垣または塀」であるが、一般には城郭の石垣（城壁も含む）のように「石積み擁壁」を意味することが多い。本文でも主として城

郭石垣を対象としているので、特に言及しないときは以降石垣と総称する。なお石を積んで石垣を構築する技術は石積み技術と総称する。

本研究は現段階では、理論的に解明し難い歴史的な石垣の安定性について検討を試みたものである。

すなわち、石積み技術の変遷に関して、文献資料調査および現地踏査などを行った結果の概要を述べた後、石垣に関する過去の研究成果を整理位置付けして、筆者らが提案し試みてきた石垣の安定性を判定する6手法を実存する10箇所の石垣断面に適用検討した結果をとりまとめたものである。

本文第2章では、図-1のように整理される石垣の安定性判定手法を研究開発するフロー図の右端に示す①法・②法～⑩法の12手法について、筆者らが検討提案してきた手法または検討中の手法^{1), 2), 3), 4)}やその他文献等に発表されている手法を比較検討してある。第3章では6手法を選択し、実存10断面に適用判定した結果を整理して、今後実際に適用する手順等を提案した。今回検討した6手法はほぼ同様の判定結果となるが、精度を高めるために、採用土性値等を十分吟味して、数種類の手法による結果を総合判定することが望ましいと結論された。

* keyword : 石垣, 石積み技術, 安定性判定手法

** 正会員 (株) 第一コンサルタンツ

(〒167 東京都杉並区荻窪 5-22-1)

*** フェロー 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科

(〒101 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

**** フェロー 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科

(〒101 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

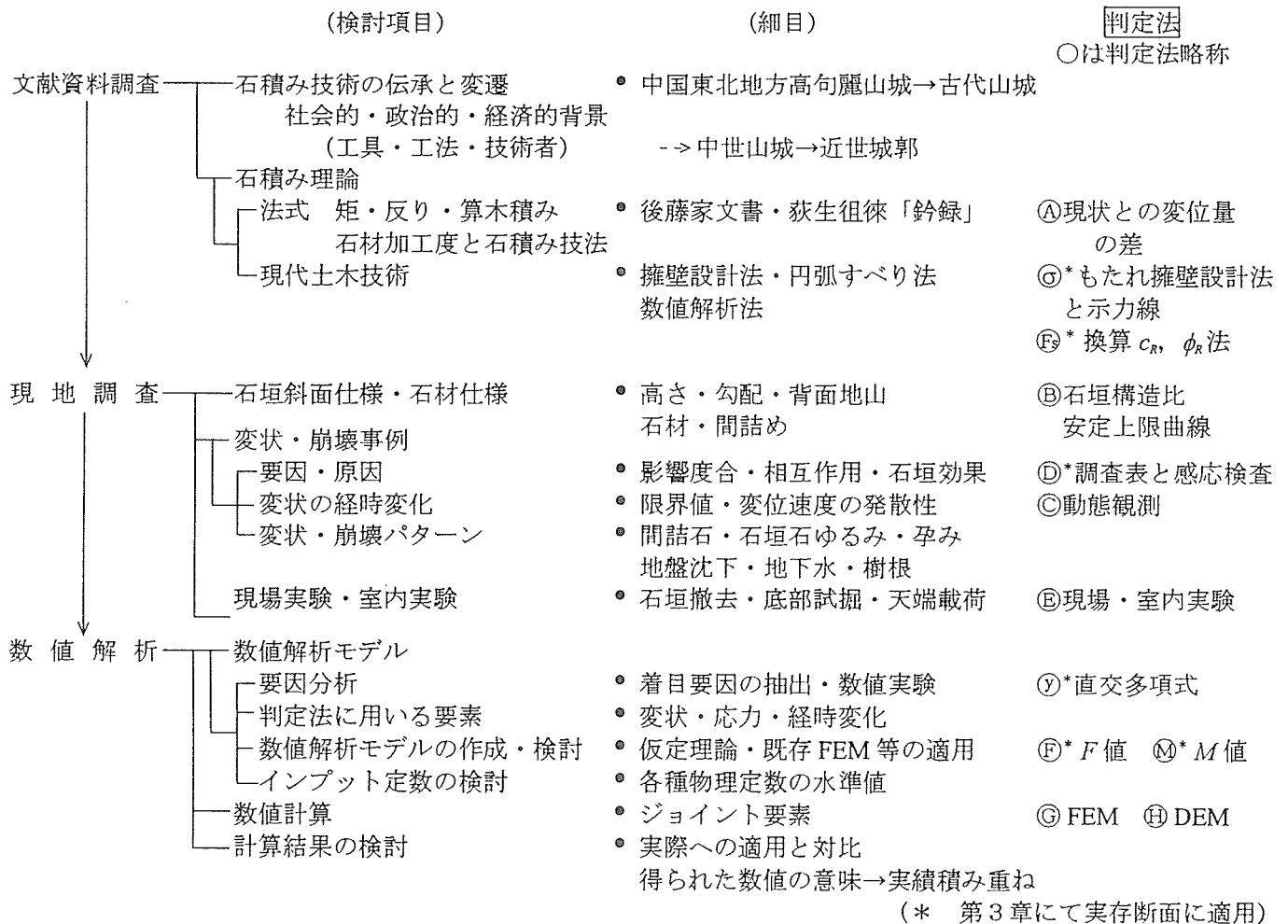


図-1 石垣の安定性判定手法の検討フロー図

2. 石垣の安定性判定手法

(1) 文献・資料調査

a) 石積み技術の伝承と変遷

我が国の石積み技術に関する伝承と変遷は以下のように要約される。

① 中国東北地方には、建国時期が紀元前後までといわれ、日本の古代国家の形成に直接間接の影響を及ぼしたといわれる高句麗の都城と山城が数多く確認されている。これらの城郭の初期には偏平な直方体状の加工石を用いた高い技術水準を示す石垣が多いが、3～4世紀の中期以降には土築・土石混築が増えている^{51,6)}。この石積み技術は、我が国で7世紀に百済からの亡命貴族の指導により築かれた古代山城⁷⁾の石垣に確かに伝承されている。

② 我が国の古墳時代には前期(4世紀初)に前方後円墳が盛んに造られ、5世紀に入って壮大な規模となり、6世紀以後は横穴式石室を持つ小規模なものへと変遷した。それら墳墓の石郭には一抱えほどの大きさの自然石を用いた、近世の穴太積みに類似

する石垣が盛んに用いられていたが、古墳時代の終わりとともに石垣はほとんど認められなくなった。一方それらの石棺には巨石をくり抜いて内面を磨く高度な石の加工技術が認められる。

これらの技術は、6世紀には巨石を用いて石像・石殿・石門を造る技術レベルに達していたことが文献上からも確かであり、古代山城の石垣や粗加工石を用いた水門等にも生かされている。

③ 古代末期から中世においては山城が盛んに築かれた⁸⁾が土塁が大半で、石垣は狭い山頂尾根部の削平地の土留め等に小規模に使用されたのみである。現地で石材が豊富に得られ、土塁よりも容易に石積みが可能場合には石垣も構築されたが、自然石・粗割石を用いた雑な積み方であり、古代山城の石垣技術の伝承は伺えない。一方古代山城には縄張り等で中世以降の城につながる初期の系譜はなく、外部からの侵攻に備えての集団の住居を囲む隔壁であった⁹⁾。

④ 古代末から中世にかけて近畿地方には数多くの

神社仏閣が造営されており、礎石工は数多くいた。また墓石・五輪塔・灯籠・石臼などを造る石工たちや、瀬戸内海地方には干拓工事や波止場の構築等に従事した石工たちも数多くいた。これらの石工達により石を扱い加工する技術は確実に伝承され発達していた。石垣を城の普請に使用することは、当初は山城の削平地の土留め用であったが、近江の六角氏の観音寺城や大和の松永氏の多聞城等のように信長の現れる（中世末期）以前にも本格的に行われていた例もある。

⑤ 織豊期は、経済力に裏付けされた政治的・軍事的必然から権威の象徴としての高石垣が盛んに築かれるようになった。これは④で述べた民間での石積み技術の蓄積があったことも重要な要素である。

⑥ 関ヶ原の役以降の近世においては、数多くの近世城郭が構築された。この時期に石積み技術も法式が確立し、粗・精加工の規格石材を大量に用い、隅角部には算木積みを用いた高石垣が造られた。

⑦ 近世に壮大な数多くの石垣を構築した石積み技術は、古代から中世に至る伝承・蓄積があったことは否定できないが、その影響度合いは小さい。近世の政治・経済・社会・技術的背景に基づく歴史的必然から、日本独自の文化として一気に成熟完成したものであると結論される。

b) 石積み理論

石を加工したり石積みする人々は当時身分の低い者とみなされていたこともあり、その技術も他の多くの技能と同様世襲的に口伝により受け継がれてきた。したがって古墳や古代山城等の石積みに関する技術的な記録等は確認されていない。

近世の城郭石垣に関しては、北垣は次のように述べている⁹⁾。「三忌五禍」¹⁰⁾を意識しない古式穴太積み技法が天正年間（1573～1591年）に完成し、慶長年間（1596～1614年）には「定法」¹¹⁾を持った高石垣技法が確立した。引き続いて規格石材を用いた間知石積みによる高石垣が盛んに構築されるようになった。

これらの高石垣の勾配等に関しては、軍学の立場から山鹿素行の「武教全書」1656（明暦2）年や荻生徂徠の「鈴録」1727（享保12）年等によって研究されている。そして19世紀に入り、加賀前田家の穴太であった後藤彦三郎による石垣に関する秘伝書の数々

が「唯子一人伝」全6巻 1824（文政7）年にとりまとめられた。これらは「後藤家文書」として喜内により広く紹介され^{12), 13), 14), 15)}、その内容は北垣により詳述⁹⁾されている。しかしこれらの技術書は経験的技術の秘伝書で、土の強さや土圧のような現代の工学との定量的な接点は見当たらない。

ここで図-1に示した判定法④は築城時の石積み技術の水準から当初の勾配を推定し、現時点での測定値と比較して変位量を求めてその安定性を評価する方法である¹⁰⁾。しかしこの方法は変状が経時的に発散傾向か収束傾向か判定できないし、また推定総変位量が危険な状態に達しているのか否か等、合理的定量的な判定基準がないなどの問題点がある。

次に現代の建設工事においては、各種の形状・寸法を持つ擁壁が設計施工されている。これらは一般に（鉄筋）コンクリート造であり、その安定性は擁壁自体が一体の剛な構造物として、転倒・滑動・支持力および壁体縁応力等の面から検討されている。石垣はもたれ擁壁の一種と考えられるが、石垣石個々が独立していて間詰石等により相互にかみ合っており擬似剛体を成していると考えられるので、剛塑性論に基づく「もたれ擁壁設計法」をそのまま適用できないことは当然である。しかし岡積がブロック積み擁壁に関して提案した示力線方程式¹⁷⁾による壁体重力と土圧との合力の作用点の軌跡の検討手法は、擁壁の安定性を検討する有力な手法であり、もたれ擁壁設計法と併用すれば、石垣の安定性を判定する有益な情報が得られる。以上の立場から筆者らは判定法⑤を提案し、もたれ擁壁に関する種々の条件を想定して、それが安定する条件を検討中である³⁾。

また土斜面の安定解析には円弧すべり法による手法が一般化している。石垣斜面は地表面を石材が被覆している土斜面の安定問題と考えれば、石垣斜面の安定解析に円弧すべり法を適用することも可能と考えられる。そのためには石垣部は平均的に土と同様な粘着力 c_R や内部摩擦角 ϕ_R を有する材料に置き換えしなければならない。筆者らは判定法⑥として、石垣の形状・寸法、石垣石の大きさ、積み方等を用いて石垣部の換算 c_R , ϕ_R を求める方法を提案し、種々の条件を有する石垣斜面に適用した計算結果を文献1)に報告している。換算式の概要は後述表-5中に示してある。

A. 一次評価 (地形・地質)

要因	細項目	小 区 分	採点
全体地形	平地	丘陵緩斜面	①
		山岳急斜面	②
部分地形	立地	平地	③
		斜面	④
	天端上	平坦	⑤
		斜面	⑥
地下水	なし	⑦	
	湧き出し	⑧	
周辺地質	天端上	⑨	
	周辺排水溝	⑩	
地質	表層地盤	⑪	
	基盤地盤	⑫	

A合計 ①～⑫ (/25)

B. 石垣の規模・石材・石積み法による補正

要因	細項目	小 区 分	採点
規模	高さ	3m以下	⑬
		3～6	⑭
	隅角間水平距離	30m以上	⑮
		10～30	⑯
法式意匠	平面部の反り	明確	⑰
		有	⑱
	隅角部の反り	明確	⑲
		有	⑳
石材	加工度	精加工	㉑
		粗加工	㉒
	寸法	1.0×1.0×2.0m	㉓
		0.6×0.6×1.2m	㉔
積み方	切り込み	1	㉕
		2	㉖
	水平角度	10°以上	㉗
		10°以下	㉘
間隔状況	空腹	㉙	
	密腹	㉚	

B合計 ㉑～㉚ (/48) × 2 = ()

C. 一次評価 変状状況・履歴による補正

要因	細項目	小 区 分	採点
石垣本体	目地開き	なし	㉛
		あり	㉜
	目地段差	なし	㉝
		あり	㉞
石垣接合部	目地開き	なし	㉟
		あり	㊱
	目地段差	なし	㊲
		あり	㊳
木根	石垣面	なし	㊴
		あり	㊵
	目地開き	なし	㊶
		あり	㊷

C合計 ㉛～㊷ (/30) × 4 = ()

D. 重要度補正

要因	細項目	小 区 分	採点
周辺への影響	小	中	㊸
		大	㊹
	中	大	㊺
		大	㊻
緊急度	小	中	㊼
		大	㊽
	中	大	㊾
		大	㊿
緊急性	小	中	㋀
		大	㋁
	中	大	㋂
		大	㋃

D+E = 点

判定

採点	ランク	緊急度	危険度
100点以上	I	緊急度 大	危険度 大
80～100点	II	緊急度 中	危険度 中
60～80点	III	緊急度 小	危険度 小
40～60点	IV	緊急度 小	危険度 小
40点以下	V	緊急度 小	危険度 小

城 名 _____

石垣位置名称 _____

石 垣 No. _____

断 面 No. _____

調 査 日 _____ 年 _____ 月 _____ 日

調査員氏名 _____

注

- 該当しない場合は0点とする
- 検討断面内に該当項目の小区分が1つでもあれば上表に採点
- 小区分が数多くあれば(1～3)倍してよい

大きい方 → D = 点

A+B = 点

図-2 石垣安定度調査表

(2) 現地調査

a) 石垣斜面仕様

天野らは徳川期大坂城の石垣調査結果を整理して、石垣天端線の中だるみのような石垣の三次元的形状に関し次のように述べている¹⁸⁾。すなわち、「石垣の高さと石垣構造比（出角部から出角部および入角部から入角部までの一辺の長さを石垣高で除した値）との関係を図化し、石垣構造比安定上限曲線が存在することを示した。そして石垣断面形状の反りと勾配とともに石垣の平面形状が石垣の安定に大きく関係することを当時の石垣師たちは石垣普請時に熟知していたことが伺われるとし、出角石垣には三次元安定効果が存在すると考えることが妥当であろう」と述べている。

同様の研究は山口らによっても発表¹⁹⁾されていて、国内6城の石垣調査から、「築城当時に石垣構造比という概念があったとは考え難いが、石垣を崩れないように高く築くことを試みているうちにこのような限界が出来上がったのであろう」と述べている。

上述の手法は判定法⑩として実用性と簡便性が高

い手法といえる。しかし現実に孕み等の変状が発生している石垣の安定性はどのように低減するか等さらにデータの蓄積と検討が望まれる。

b) 変状・崩壊事例

建設省道路局では「防災点検ガイドブック（案）」を平成2年9月に算定し、道路に対する落石・地すべり・擁壁等の11項目に対し「防災点検箇所別記録表」および「安定度調査表」により、危険箇所を採点評価している。石垣斜面は規定されていないが、擁壁に関する調査表は調査項目等で共通点も多く参考になる。筆者らは擁壁の調査表を参考に評価項目や配点等を検討して「石垣安定度調査表」を作成し、金沢城の石垣に適用した事例を文献2)に報告している。図-2は上述の調査表をさらに修正したものである。このような調査表による石垣の安定性判定法は判定法⑩といえる。

この手法は石垣地点の地形地質、石垣の規模・石材・石積み法、変状状況・被災履歴等について調査するもので、石垣カルテとも言うことができ、多くの情報を記録することができる。ただし、安定性を評価する項目の選択と配点の大きさや集計する方法

において、その根拠・妥当性に疑問が残る。

そしてこれらの判定には判定技術者の個人差や主観が入り易い。この点に関しては、複数名（5～10名）による調査を行ってそのデータを「感応検査手法」を用いて統計処理し、結論に客観性を持たせる工夫を行うことも考えられる。

石垣のように複雑な構成を持つ構造物の安定性を評価する手法を検討するためには、このような現場のデータの蓄積が不可欠である。そうすれば変状・崩壊のパターン分けや要因の因果関係・影響度合等を知ることができるようになり、より合理的な判定法の開発に役立つと期待される。

c) 動態観測

地盤工学においては「地すべり予知」を行うために、現場に変位計・伸縮計・水位計等を設置して経時データを集積し、各種の手法が提案されている。石垣斜面に関しても、動態観測データにより安定性判定法を提案するには多くのデータの蓄積が必要であろうが、崩壊メカニズムや限界変位速度・極限変位量等が明らかにされることが期待される。

この手法は判定法㉔といえる。

筆者らは金沢城石垣において石垣面に固定式傾斜計を設置し、動態観測を3年間続けた事例を文献2)に報告している。石垣面の変状は石垣部背面の浅いすべりの形状を示し、孕み部分は下だるみの形状となり、下部は石垣が前方に、上半部は後方に傾斜する傾向を示し、上部の石は後方に引き込まれるように沈下する様子が把握された。

また測定値は経時的にその方向が突然逆転することがあることが観測され、変位しては新しい安定を得ることを繰り返している可能性が推定された。

このような貴重なデータが蓄積されることが期待される。

d) 現場実験・室内実験

石垣は文化財に指定されている場合が多く、自由に石材を撤去したり、周辺を試掘したりすることはできない。しかし慎重かつ十分な準備のもとで積み直し工事等が行われている例は全国的にかなり多いと思われる。このような機会をとらえて、石垣奥行き方向の様子を観察記録し、許される範囲で石材撤去に伴う周辺の石の移動状況を計測したり、背面の地盤定数の測定試験を行ったりして、種々のデータ

を蓄積していくことが望まれる。

一方石垣に関する室内実験は方法や要因の選択と相似率の問題など多くの問題が関係してきて、実験実施とデータ解析は相当難しい。

福岡・中川はプレキャストP C曲面擁壁構造に関する室内実験により、城郭石垣では天端部の勾配は急で、基部でゆるく曲線になっていることの有効性を確認した²⁰⁾としている。

筆者らは後述の判定法㉕の補充として、実験目的を石垣の間詰状態を評価する方法を検討すること限定して簡単な室内実験を行った結果をとりまとめている³⁾。

実験目的・条件および結果の解釈を慎重に扱えば、それなりの成果は得られると期待される。

以上の方法は判定法㉕といえる。

(3) 数値解析

a) 数値解析モデル

石垣の安定に関与する要因は数多くかつお互いに複雑にからみ合っているため、数値解析を目的としたモデルを作成し、インプット定数を決定することは至難なことでありまた複雑な数式では実用上の制約が生じる。

筆者らは2. (1). bで述べた判定法㉕法により石垣断面の安定性が評価できるという前提のもとに、石垣安定に関与する要因分析を実験計画法に基づいて数値実験した結果を文献1)に報告している。

石垣の安定に影響する要因とその大きさは、高さ H が59%と最大で、土の粘着力 c_s 7.8%，石垣石接触長比 n 5.8%，石垣部換算粘着力 c_R 5.8%，土のせん断抵抗角 ϕ_s が4.1%等であることが得られた。また斜面に石垣を設けると斜面の安全率が増加し、石垣効果が期待されるのは、 $H < 6.5\text{m}$ 、 $c_s < 3.3\text{tf/m}^2$ 、 $\phi_s < 25^\circ$ の時、背面地盤は石垣が無くても安定できる状態でなければ、石垣の安定は得られ難いことを示した。

また上述の実験結果を統計手法を用いて整理し、石垣斜面の安全率が算出できる直交多項式を導いた結果を文献1)に報告している。この手法は判定法㉖となる。

この直交多項式は各要因に一般的な範囲の水準値をインプットして導かれたものであり、内挿の使用は問題ないが、若干の外挿的適用も可能と考えられ

表－１ 間詰部材の物性を想定する F 値の計算表

石垣石加工度			積　　み　　方			間詰状況		$F=f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$
f_1			f_2			f_3		
野面石 自然石 又は 粗割石	巨玉石状で角が丸い	0.60	野面積み	乱積み	0.60	抜け落ち著しい ゆるい 少ない 密 十分密	0.60	0.22
	角が少ない岩塊	0.65		古式穴太積み	0.65		0.75	
	角が多くゴツゴツした岩塊 割石（不規則形状）	0.70	打込接ぎ	乱層積み	0.70		0.80	}
		0.75		新穴太積み	0.75		0.85	
打込石 粗加工	規格材（間知石等）	0.80		間知積み	0.80	0.90	0.77	
				落し積み	0.85			
切込石 精加工	精加工石	0.90	切込接ぎ	相方積み	0.90			
				布積み	0.95			

る。この直交多項式は後述表－５下に示してある。

次に石垣断面の応力的な安全性を検討する立場から、石垣断面の平均的な許容応力を推定する手法として、筆者らは石垣係数 F という考え方を検討中である³⁾。

石垣係数は石垣石の加工度・間詰充填状況・石積み方法および高さや勾配等の石垣諸元に関して独自の係数を仮定し、それらを同一レベルで相乗して求めるものであり、 F 値のもつ物理的な意味等は十分究明されてはいないが、石垣断面の安全性を示す係数となりうる可能性が期待されると考えている。 F 値を求める計算式は後述表－６下に示してある。

この方法は判定法⑥となる。

また石垣断面を FEM 解析するに当たり、石垣断面の挙動は間詰部の状態が大きく影響すると考えて、石垣石上下間に「間詰部材」と定義する仮想的な材料を挟在させる手法を筆者らは検討中である⁴⁾。

この間詰部材も弾塑性物質として扱われるので、石垣石の加工度・間詰状況および石積み方法に関して仮定して定めた表－１のような独自の係数を用いて、ヤング係数 E 、ポアソン比 ν 、単位体積重量 γ 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ およびソフトニング係数 A の 6 物性を表－２を用いて設定し、 ν 以外の 5 物性値を乗じた値を間詰係数 M と定義する。上述の F 値と同様その物理的な意味等は十分究明されていないが、石垣の安定性を判定する指標となりうる可能性が期待されると考えている。 M 値を求める計算式は後述表－７下に示してある。

この方法は判定法⑩となる。

表－２ 間詰部材の物性選択表

F	E (tf/m ²)	ν	γ (tf/m ³)	c (tf/m ²)	ϕ (°)	A
0.2～0.4	1,000～3,000	0.39～0.37	1.1～1.3	5～15	29～31	0.58～0.62
0.4～0.6	3,000～7,000	0.37～0.35	1.3～1.5	15～25	31～33	0.62～0.68
0.6～0.8	7,000～20,000	0.35～0.33	1.5～1.7	25～35	33～35	0.68～0.72

b) 数値計算

最近ではコンピュータのハードおよびソフト両面の進歩が著しく、地盤を連続体と近似して解析する有限要素法 (FEM) や境界要素法および地盤などを土砂や岩石などの不連続な要素からなる集合体として扱う個別要素法などを石垣断面解析に適用することは有効な方法と考えられる。これらの方法によると石垣断面の内部まで、応力や変位の状況を 2 次元・3 次元に逐次計算することが可能で、その解析結果は現存石垣の現場データの解析にも有効である。

石垣の安定性評価には石垣が離散的に崩落する状態までの解析は必要なく、孕み出し状態程度までの応力・変位等の情報が得られればよい。

石垣断面解析に FEM を適用した事例として、天野らの研究¹⁸⁾や筆者らの研究⁴⁾がある。これらが判定法⑩となる。

前者は徳川期大坂城石垣の断面形状解析に適用したもので、石垣の孕み出し部に最大せん断応力が大きくなっている様子を解明した。後者は石積み技法の野面積み・打ち込み継ぎ・切り込み継ぎの 3 タイプを事例としてとり上げて、FEM を適用する場合に用いるジョイント要素等の各種インプット定数の決定に当たり、逆解析的検討を行って得られた結果

表－3 安定性検討石垣断面概要

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
城名	古代山城			中世山城	近世城					
所在地	金田城	大野城	鬼ノ城	黄峰城	観音寺城	岡山城	熊本城	三原城	盛岡城	岡城
形状・仕様	長崎県対馬 東南角石垣	福岡県大野市 百間石垣	岡山県総社市 第2展望台 石垣	香川県高松市 喰違虎ノ口 石垣	滋賀県安土町 伝本城 虎ノ口石垣	岡山市 天守台石垣	熊本市 大天守台石垣	広島県三原市 天守台石垣	盛岡市 東郭石垣	大分県竹田市 高石垣
高さ H (m)	8.00	6.00	8.00	7.00	4.00	5.00	8.00	8.00	6.00	12.00
勾配 θ (°)	70 (0.37)	72 (0.34)	81 (0.17)	75 (0.27)	85 (0.10)	65 (0.46)	65 (0.46)	65 (0.46)	70 (0.37)	80 (0.18)
石垣石高さ a (m)	0.50	0.30	0.70	0.60	0.60	0.80	0.70	0.60	0.70	0.60
奥行 d (m)	0.80	0.40	1.00	0.90	1.00	1.20	1.00	0.90	1.00	0.80
傾斜 α (°)	5	0	5	-5	0	-10	-15	-10	-10	-10
形状	米俵状自然石	扁平な自然石	直方体荒加工石	自然石粗削石	直方体状粗削石	粗加工	粗加工	粗加工	精加工	精加工
積み方	ゴボウ積み	煉瓦積み	煉瓦積み	古式穴太積み	野面積み	野面積み	打込接ぎ	打込接ぎ	切込接ぎ	落し積み
背面土密度 γ_s (tf/m ³)	1.7	1.9	2.0	1.8	1.9	2.1	2.1	2.0	1.9	2.0
摩擦角 ϕ_s (°)	25.0	20.0	30.0	25.0	20.0	35.0	35.0	25.0	25.0	30.0
粘着力 c_s (tf/m ²)	3.0	2.0	3.0	3.0	3.0	5.0	5.0	3.0	4.0	2.5
石垣部密度 γ_R (tf/m ³)	2.0	2.1	2.3	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2	2.4	2.3
摩擦角 ϕ_R (°)	10.0	12.2	17.5	12.4	16.1	8.7	11.7	8.7	18.8	15.0
粘着力 c_R (tf/m ²)	0.16	0.10	0.31	0.29	0.90	1.02	0.31	0.23	0.54	0.10
石垣石接触比 n	0.20	0.30	0.50	0.40	0.35	0.20	0.30	0.35	0.40	0.45
粗密度 m	0.85	0.90	1.00	1.00	0.90	0.85	0.95	1.10	1.20	1.20

を適用することを提案し、かつ判定法⑭で示した間詰部材を石垣石間に挿入して解析を行っている。このように石垣断面解析に FEM を適用するには石垣断面のモデル化や境界条件の設定、インプット定数の決定等多くの点で慎重に検討しなければならない点が多いが、今後とも一層の進展が期待される。

一方個別要素法は各要素ごとに運動方程式をたて、要素間は接触点を通して力が伝達されるという条件で逐次解析を行うもので、各要素の挙動を動的に時間領域で追跡できる。この代表的手法が DEM であり、判定法⑮といえる。

DEM を石垣断面解析に適用した事例として、上述天野らの研究¹⁰⁾がある。大坂城において、左右両辺が石垣で押さえられた台形地盤をモデルとし、阪神大震災で得られた地震波を入力して動的解析を行ったもので、大坂城の石積み工法は地震時の安定に有効なこと、裏込め部の破損が大きくなること等が導かれたとしている。

この手法もインプット定数や境界条件等の決定等多くの点で検討されなければならないが、今後とも一層の進展が期待される。

3. 各種判定法の実存石垣断面への適用事例

(1) 検討石垣と判定法の選択

第2章で各種の石垣安定性判定法の概要を述べた。いずれの方法とも確立された手法とはいえないと考えられ、本第3章ではそれらの手法の特徴・長短所を整理して、より有用な手法を提案するために、実存石垣に適用した場合の判定結果を比較検討することとした。

ある城内にも種々の仕様・条件を持つ石垣が混在するので、今回とり上げた断面がその城郭の石垣を代表するものとはいえないが、石垣変遷順に表－3に示す10城の10断面とした。なお、この10城の歴史的概要は文献^{7), 8), 9), 21), 22), 23), 24), 25), 26)}に詳述されている。

また今回比較検討する判定法は簡便性や実績等の立場から図－1に示す右端の①～⑭の12手法のうち*で示した6手法とした。

(2) 検討断面の各種定数

検討断面付近における地質調査データや地質構成、石垣背面状況等の実測値を得ることはできなかったが、現地踏査時に周辺の状況等から推定して、表－3に示す断面形状や土性値等を設定した。

表－４ 石垣の安定性判定結果一覧比較表

No.	判定法	(1) 石垣弧すべり 換算 c_R 法 ϕ_R 適用	(2) もたれ擁壁設計法準用			(3) 石垣安定度調査表	(4) 直交多項式	(5) 石垣係数 F 値	(6) 間詰係数 M 値
	計算値 略称 城名	F_{Smin} ⑨法	圧縮応力 σ_{c2} (kgf/cm ²) (土圧係数)			D 点	y	F	$\frac{H \cdot \log M}{8.0}$
			⑩法	K_H	K_V	⑪法	⑫法	⑬法	⑭法
1	金田城	1.578	3.83	0.25	0.05	95	0.64	0.157	5.49
2	大野城	1.470	3.69	0.17	0.05	90	0.91	0.082	7.74
3	鬼ノ城	1.134	1.94	0.20	0.05	88	1.33	0.185	6.23
4	黄峰城	1.431	2.39	0.30	0.10	74	1.36	0.229	6.92
5	観音寺城	1.868	0.71	0.30	0.10	82	2.75	0.158	12.10
6	岡山城 (天守台)	1.840 (建 1.225)	2.05	0.70	0.05	66	3.20	0.289	9.28
7	熊本城 (天守台)	2.255 (建 1.113)	4.47	0.40	0.05	60	2.20	0.274	6.46
8	三原城	1.470	3.99	0.40	0.05	59	1.00	0.271	6.54
9	盛岡城	1.914	3.15	0.40	0.05	47	2.09	0.446	8.81
10	岡 城	1.086	5.30	0.10	0.05	58	1.25	0.197	4.57

(建)は天守台荷重考慮時安全率

これらの値は、特に背面土の土性値は斜面の安定性に決定的な要因であり、他の手法の定数を決定する基本ともなると考えられる。そこで土の斜面安定解析手法として一般的に用いられ、理論的にも単純で理解しやすい円弧すべり法を基本としている換算 c_R 、 ϕ_R を用いる手法⑨法により得られた安全率と現実の感覚的安定性を比較修正して設定した。

(3) 各種手法による安定性判定結果

a) 換算 c_R 、 ϕ_R 値を用いる円弧すべり法

後述表－５中に示した石垣部を土と同様な平均的な粘着力 c_R や内部摩擦角 ϕ_R に換算する式を用いて得られた円弧すべり安全率計算結果を表－４の判定結果一覧表⑨法欄に示す。 F_{Smin} が大きいほど安定性は高い。

b) もたれ擁壁設計法準用

石垣断面は表－３のように単一勾配の斜面とし、同表中の土性値を用いて安定解析を実施した。なおこれらの石垣は現状でそれなりに安定しているので、適用土圧公式は転倒・滑動・支持力の３点とも合格しかつ示力線が石垣断面内からはずれない条件を水平土圧係数 K_H および鉛直土圧係数 K_V を変化させて選択できるテルツァギ・ペック式を用いた。これらの条件を満足する K_H 、 K_V の組み合わせは、数

多くのトライアル計算を行ったところ、非常に限定された場合であることが分かっている。石垣断面を平均的に擬似弾塑性体と想定したときの最大縁圧縮応力度 σ_{c2} の大きさおよび採用 K_H 、 K_V を表－４⑩法欄に示す。

石垣断面の許容応力は２．(３)．a)で述べた判定法⑨法で示したように石垣石の加工度・間詰充填状況・石積み方法等により大きく影響されるので推定することはかなり難しい。したがって上で得られた発生縁応力度と単純に比較してもその応力的な安全性を表すことは問題がある。しかし石垣断面は積み石や間詰石が微妙なバランス関係にあるので、断面仕様や土性値等から算出される縁応力度(σ_{c2})は小さいほど石垣の安定性は高いといえる。

c) 石垣安定度調査表

図－２に示した調査表を用いて、10断面の安定性を採点した結果(D 点)を表－４⑪法欄に示す。点数が高いほどその石垣断面の安定性は低いといえる。

d) 直交多項式

直交多項式により石垣斜面の安全率 y を求めた結果を表－５⑫法欄に示す。 y が小さいほどその石垣斜面の安定性は低いといえる。

表－５ 直交多項式による判定結果

No.	城名	高さ	土の 粘着力	土の内部 摩擦角	石垣石の 接触比	換算粘着力 $C_R=40(a/H)^2$		換算密度	石垣石 凹凸係数	判定結果
		$H(m)$	$C_S(N/m^2)$	$\phi_S(^{\circ})$	n	$C_R(N/m^2)$	$a(m)$	$\gamma_R(N/m^3)$	m	y
1	金田城	8.0	3.0	25.0	0.20	0.16	0.50	2.00	0.85	0.64
2	大野城	6.0	2.0	20.0	0.30	0.10	0.30	2.10	0.90	0.91
3	鬼ノ城	8.0	3.0	30.0	0.50	0.31	0.70	2.30	1.00	1.33
4	黄峰城	7.0	3.0	25.0	0.40	0.29	0.60	2.20	1.00	1.36
5	観音寺城	4.0	3.0	20.0	0.35	0.90	0.60	2.30	0.90	2.75
6	岡山城	5.0	5.0	35.0	0.20	1.02	0.80	2.20	0.85	3.20
7	熊本城	8.0	5.0	35.0	0.30	0.31	0.70	2.20	0.95	2.20
8	三原城	8.0	3.0	25.0	0.35	0.23	0.60	2.20	1.10	1.00
9	盛岡城	6.0	4.0	25.0	0.40	0.54	0.70	2.40	1.20	2.09
10	岡城	12.0	2.5	30.0	0.45	0.10	0.60	2.30	1.20	1.25

$$\text{多項式: } y = 2.405 - 0.473(H-6.25) + 0.0755\{(H-6.25)^2 - 7.813\} + 0.499(C_S-2.5) + 0.0313\{\phi_S-25\} \\ + 1.44(n-0.625) + 0.048(C_R-8.371) - 0.466(\gamma_R-2.75) - 6.359\{m-1.05\}^2 - 0.0125\}$$

$$\text{換算式: } C_R = 40 \cdot (a/H)^2 \\ \phi_R = \tan^{-1}\{0.8 \cdot m \cdot (e/d) \cdot (1/\cos \alpha)^4\}$$

表－６ 石垣係数 F 値による判定結果

No.	城名	f_1		f_2		f_3		f_4		f_5		f_6		f_7		F
		加工状況		間詰状況		積み方		$f_4 = -0.0047H^2$ $+0.036H$ $+0.93$		$f_5 = -5.8N^2$ $+4.25N$ $+0.14$		$f_6 = -0.47d^2$ $+1.51d$ -0.23		$f_7 = 0.4\gamma_B$ $+0.14$		
								高さ $H(m)$		勾配 N		奥行き $d(m)$		密度 γ_B (N/m^3)		
1	金田城	自然石	0.60	ゆるい	0.75	乱	0.65	8.00	0.917	0.37	0.918	0.80	0.677	2.00	0.94	0.157
2	大野城	自然石	0.60	少ない	0.80	乱	0.65	6.00	0.977	0.34	0.915	0.40	0.299	2.10	0.98	0.082
3	鬼ノ城	割石	0.65	少ない	0.80	乱	0.65	8.00	0.917	0.17	0.695	1.00	0.810	2.30	1.06	0.185
4	黄峰城	野面石	0.65	少ない	0.80	古穴太	0.70	7.00	0.952	0.27	0.865	0.90	0.748	2.20	1.02	0.229
5	観音寺城	野面石	0.65	少ない	0.80	古穴太	0.70	4.00	0.999	0.10	0.507	1.00	0.810	2.30	1.06	0.158
6	岡山城	野面石	0.65	少ない	0.80	古穴太	0.70	5.00	0.993	0.46	0.868	1.20	0.905	2.20	1.02	0.289
7	熊本城	粗加工	0.70	密	0.85	打込み	0.70	8.00	0.917	0.46	0.868	1.00	0.810	2.20	1.02	0.274
8	三原城	粗加工	0.70	密	0.85	新穴太	0.75	8.00	0.917	0.46	0.868	0.90	0.748	2.20	1.02	0.271
9	盛岡城	粗加工	0.80	密	0.85	相方	0.82	6.00	0.977	0.36	0.918	1.00	0.810	2.40	1.10	0.446
10	岡城	粗加工	0.80	密	0.85	相方	0.82	12.00	0.685	0.18	0.717	0.80	0.677	2.30	1.06	0.197

$$F = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7$$

表－７ 間詰係数 M 値による判定結果

No.	城名	f_1	f_2	f_3	$F =$	間 詰 の 物 性						$\log M$	H (m)	$K =$ 8.00/H	$K \cdot \log M$
		加工	積み方	間詰	$f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$	E (tf/m ²)	γ (tf/m ³)	c (tf/m ²)	ϕ (°)	A	M^*				
1	金田城	0.60	0.60	0.75	0.270	1,800	1.18	8.00	30.00	0.60	305,856	5.486	8.00	1.00	5.486
2	大野城	0.70	0.60	0.80	0.336	2,400	1.23	12.00	30.00	0.60	637,632	5.805	6.00	1.33	7.739
3	鬼ノ城	0.70	0.80	0.80	0.448	4,000	1.35	16.00	31.00	0.63	1,687,392	6.227	8.00	1.00	6.227
4	黄蜂城	0.75	0.65	0.80	0.390	3,000	1.30	15.00	31.00	0.62	1,124,370	6.051	7.00	1.14	6.915
5	観音寺城	0.75	0.65	0.80	0.390	3,000	1.30	15.00	31.00	0.62	1,124,370	6.051	4.00	2.00	12.102
6	岡山城	0.60	0.65	0.85	0.332	2,300	1.25	12.00	30.00	0.61	631,350	5.800	5.00	1.60	9.280
7	熊本城	0.75	0.75	0.85	0.478	5,000	1.40	20.00	32.00	0.64	2,867,200	6.457	8.00	1.00	6.457
8	三原城	0.80	0.75	0.85	0.510	5,500	1.43	21.00	32.00	0.65	3,435,432	6.536	8.00	1.00	6.536
9	盛岡城	0.80	0.80	0.85	0.544	6,000	1.45	22.00	32.00	0.66	4,042,368	6.607	6.00	1.33	8.809
10	岡城	0.80	0.90	0.90	0.648	8,000	1.55	25.00	34.00	0.69	7,272,600	6.862	12.00	0.67	4.574

$$(* M = E \cdot \gamma \cdot c \cdot \phi \cdot A)$$

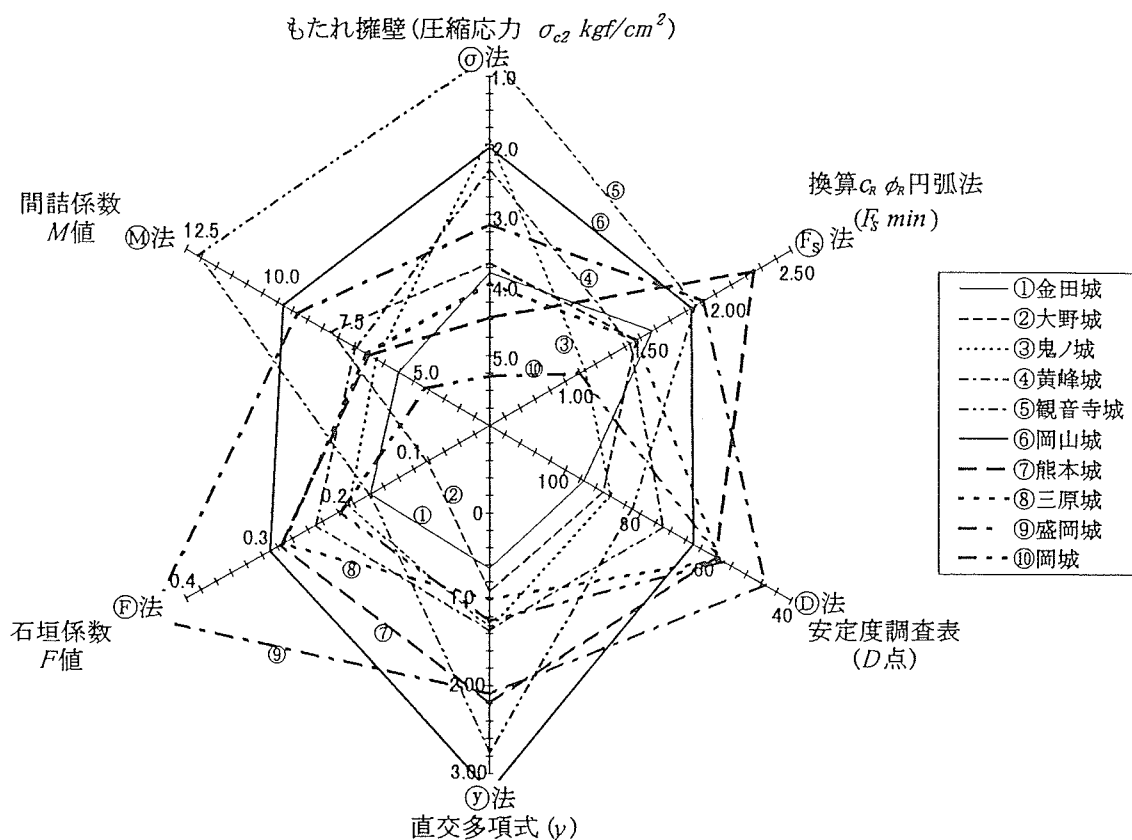


図-3 各種安定性判定法による判定結果比較図

e) 石垣係数 F 値

表-6 下に示した式により F 値を算出した結果を同表 F 欄および表-4 ⑥法欄に示す。 F 値が小さいほど石垣断面内での石の移動が容易で、一方応力的な抵抗力が小さいことを示しているため、石垣の安定性は低くなるといえる。

f) 間詰係数 M 値

10断面に対して表-1, 2により、 $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$ および間詰部材の物性値を設定し、表-7 下に示した式により M 値を算出した結果を同表 M 欄および表-4 ⑩法欄に示す。 M は対数表示した方がその状態を理解し易く、さらに高さ H による修正を加えた方が実際のと考えられる。今回は $H = 8.00\text{m}$ を基準高さとし、高さ補正係数 $K = 8.00/H$ を $\log M$ に乗じた値を M 値とした。 $K \log M$ が大きいほど石垣斜面の安全性は高いといえる。

(4) 各種手法による判定結果の比較検討

前節(3)で述べた10断面を6手法により判定した結果は表-4の一覧比較表および図-3の比較図に示すとおりである。図-3は円の中心から6方向に6手法の判定結果をプロットしたもので、円の中心から外へ行くほど安定性が高いことを示している。

各種判定手法による判定結果を比較すると、安定性評価の傾向はほぼ一致しているように見えるが、中には観音寺城石垣や岡城石垣のように評価の分かれるケースもある。上述の判定手法の信頼性を高めるためには、大きなバラツキが生じた原因等について考察する必要がある。

まず石垣ごとに検討すると次のようになる。なお各石垣断面の形状・寸法等の仕様の概略は表-3中に示してある。

① 金田城石垣：当断面の石垣は風化がかなり進行した砂岩、凝灰岩の米俵状自然石がゴボウ積みされている。孕みや天端肩部石の崩落等が著しく、老朽化が著しい。安定性は6判定法ともほぼ同様に低く判定されている。

② 大野城石垣：当断面の石垣は自然状態の偏平な風化安山岩を乱積みまたは煉瓦積み状に積んでいる。孕みや天端肩部石の崩落等が著しく、老朽化が著しい。安定性は6判定法ともほぼ同様に低く判定されているが、特に F 値が小さい。これは表-6で分かるとおり、石材の奥行き d が 0.4m と、他に比べて $1/2$ 以下で小さいために、 f_6 の値も小さくなり、これに乗じた F 値が小さい値となったためで

ある。

③ 鬼ノ城石垣：当断面の石垣はかなり大きな寸法のものも数多く含む大小様々の直方体状の風化花崗岩を重箱積み状に乱積みして、かつ石垣面の凹凸が著しい。石垣肩部は崩落顕著だが、石材が直方体状で上下石間の接触条件はかなり良く、かつ奥行き長さも大きめである。安定性は㊦法を除く5判定法ともほぼ同様に低めに判定されている。 σ_a は小さめの値が得られ、安全性は高く判定されている。もたれ擁壁設計法による σ_a 計算結果は擁壁高さ、勾配、壁厚、背面土性値等により左右されることは当然であるが、当石垣は他の石垣に比べて高さに対して奥行き長が大きめであり、擁壁断面積が大きいので背面での縁応力 σ_a が小さく計算されたためと考えられる。

④ 黄峰城石垣：当断面の石垣は自然状態または粗加工された風化花崗岩を野面積みしたものである。石垣の外観上の安定性は良好で、判定結果も6判定法とも安定性良好と判定されている。

⑤ 観音寺城石垣：当断面の石垣は大小の自然石または粗加工石を高さ 4.0m ほど、ほぼ垂直に古式穴太積みで積んでいる。外観上は積み方が雑でやや不安定にも見えるが、高さが低いためにさほど危険性は感じない。高さが低いので土圧等が小さく計算されるために、安定性は全体に高い値となっている。しかし㊦法は他の判定結果に比して極端に小さい。これは表-6で分かるように勾配 N が 0.1 と小さいために f_s の値も小さめであり、これに乗じた F 値が直接的に小さな値となったためである。一方㊦法も㊤、㊶、㊭法に比べて安定性が低めに判定されているが、図-2における石積み技法の法式意識、石材、積み方等の技術的レベルが低いために D 点が大きくなったためと考えられる。一方㊭法では表-7において高さ補正を行うために標準高さ H を 8.0m とし補正值 $K = 8.0/4.0 = 2.0$ を乗じたために M 値が大きくなったことが分かる。

ここで6判定手法とも図-3で説明すれば判定結果の値に数倍の差があってもそれは夫々の手法での計算結果でしかなく、安定性に数倍の差があることを意味していないことは当然である。したがって㊤、㊶、㊭法の判定結果は不自然な感じを受ける。当石垣断面のように高さが低く勾配の立ったような特殊

な形状に対するときには、判定結果は慎重に扱う必要があることを示している。

⑥ 岡山城石垣：当断面の石垣は角のとれた米俵より大きめの野面石の花崗岩を野面積みしている。石積み技術に矩・反りの意識も認められ、石材の控え長も大きく、外観上の安定性も良好である。安定性は6判定法とも全体に平均的に安定性が高いことを示しているが、㊶法の値が特に大きめである。これは表-5において、 y に関与する要因全てが他に比べて、その計算結果が大きくなるような数値であることが原因である。言い換えればこの断面の安定性は、考慮されている全ての要因で安定性が高いことを示している。

⑦ 熊本城石垣：当断面の石垣は大天守台の石垣であり平面部は粗加工石の打込み接ぎで矩・反りが完成した美しい高石垣である。隅角部には精加工石の見事な算木積みが見られる。外観上もどっしりして安心感が得られる。安定性は㊤と㊭法で評価が低く判定されているが、他の4手法は安定性が高く判定されている。

もたれ擁壁設計法では擁壁の高さが高く、かつ勾配が緩い場合には壁体が後方にもたれる傾向が強くなり、壁体断面前面で引張り応力、背面で圧縮応力が大きくなる。当断面ではこの傾向がそのまま計算結果に現れていて、㊤法における背面縁応力 σ_a が大きくなり、従って安定性が低く判定されたといえる。一方㊭法では表-7に示すとおり M の計算値自体はかなり大きな値となるように設定されているが、10断面の計算結果をその高さを基準に比較してみると高さ補正の行ない方に問題があるように思われる。この表-7の手法をそのまま適用するにしても傾向をより正しく表せるように標準高さ H の決め方をさらに検討する必要があると考えられる。

⑧ 三原城石垣：当断面の石垣は角錐台形に規格化された形状寸法で大量生産された良質の花崗岩が用いられていて、新穴太積み、間知積み、落とし積み等の技法により石積みされている。外観上も安定性は高い。安定性判定結果は全体的に平均的に安定性が良好と判定されているが、㊶法の値がやや小さめである。これは表-5において、高さ H は 8.0m と高めである上に、背面地盤を真砂土による盛土と考えたために土性値を低めに設定したことが原因してい

ると考えられる。

⑨ 盛岡城石垣：当断面の石垣は石材控長の長いほぼ同一形状寸法の精加工規格材が用いられていて、矩・反りが明確で、間知積み技法で石積みされている。外観上は安定性は高い。判定結果も全体に安定性が高く判定されていて、現状とよく合致していると考えられる。しかし⑩法の値はやや大きめである。これは表－6 で分かるように、 F 値に関する要因の $f_1 \sim f_5$ 全てが高い値を示していて、それら全てを相乗した F 値が必然的に大きくなった結果である。評価の傾向は正しいと考えられるが、各要因を相乗する方法にさらに検討を加える必要があると考えられる。

⑩ 岡城石垣：当断面の石垣は溶岩台地の縁部の急傾斜面に間知石を用いて間知積み技法で高く、勾配もきつく構築されている。石積み技法が形骸化、模倣された時代のもので、外観上も不安定感が強い。文献上からも地震等により度々崩落したことが明らかで、その度に修復されてきた。安定性判定結果は手法によって大きく分かれていて、⑥、⑭法は小さく、⑩法は大きめである。⑥法による σ_a が大きく、安定性が低いのは H が大きく、石材の控え長が小さいためである。また⑭法による M 値が小さいのは表－7 において高さ補正した結果であることが分かる。

一方⑩法による判定結果が安定なのは図－2 において、石積み技法の法式、石材、積み方等に関する項目で、技術的レベルが高いために低く採点された結果であることが分かる。

以上夫々に問題点はあるが、概念的にはある手法で安定性が高く（円の中心から遠く）判定されれば、残りの5手法も安定性が高く判定される傾向があり、6手法とも矛盾の少ない手法であると判断される。ただし各判定法とも多くの仮定の上に導かれた手法であり、判定結果の定量的な意味の解明も不十分であるので、判定結果は慎重に取り扱う必要がある。実用には次の手順で総合判定することが望ましいと考えられる。

- ① 調査表による現地調査 判定法⑨
- ② 検討断面の形状寸法のモデル化
- ③ 地質調査データ等の収集または土性値の設定
- ④ 換算 c_R , ϕ_R を用いる円弧すべり法による計算を

行い、現地調査結果を勘案して土性値等を修正して、再計算する。判定法⑬

⑤ 残された4法のうち、手法の性質の異なるもたれ⑥法と⑦法または⑭法のいずれかを選択し、それに必要な各種定数を設定し、判定する。

⑥ 該当断面の上述4手法の判定結果を検討しかつ近隣断面の判定結果とも比較して総合評価を行う。

なお、以上の考察から上述6手法の今回10断面を用いて検討した範囲での問題点等は以下のように整理される。

⑥法：もたれ擁壁設計法準用 σ_a

当方法は石垣高さが低いと土圧が小さく、安定性が高くなり、また勾配が緩いと大きな σ_a が生じ安全性が低くなる傾向がある。

⑬法：概算 c_R , ϕ_R 円弧すべり法 $F_s \min$

本方法は現状の安定状況と合致するように土性値等を調整して得られる結果であり、石垣安定度判定の基準と考えたい。

⑩法：安定度調査表 D 点

本方法はカルテ的に扱う利点は大きいですが、 D 点を求めるとき、図－2 において項目ごとの採点結果の重み付けや集計方法にさらに検討が必要である。

⑦法：直交多項式 y

本方法は石垣に関する諸元を数値化して数値実験した結果から導かれた式であり、とり上げた各要因効果の安定性に対する影響度合が計算結果に直接反映される。しかし高さが低くかつ急勾配な観音寺城石垣のように、やや特異な形状寸法の場合等には計算結果がバラツクようである。

⑦法：石垣係数 F 値

F 値を求める式の $f_1 \sim f_5$ 夫々はそれなりに検討されているが、全てを相乗する方法に問題があると考えられ、要因ごとの重み付けや集計方法に関してさらに検討が必要であると考えている。

⑭法：間詰係数 M 値

M を求めるまでの過程はそれなりに検討されているが、特に高さ補正を行う方法に問題が大きいと考えられるので、さらに検討が必要であると考えている。

またこれらの解析手法を比較する上で、どの物性値がその解析手法に大きな影響を与えるかについてパラメータスタディを行っておくことが望まれ

る。しかし各解析手法の判定式において考慮されている要因と水準、式の構成等が異なり、今回は十分な検討を行うことはできなかったが、次のようなことは言える。

- ① ㊦法、㊮法のように、各要因を同一レベルで相乗した値から石垣の安定性を判定する場合には、式の上では各要因が同一レベルで影響を与える。
- ② ㊶法では多項式を構成する要因ごとの y に与える影響は、計算式上でその係数や関数形式で表現されている。この式は一種の多変量解析結果を反映するものであり、他の手法の要因ごとの重み付け等を行う上で参考になる。

以上よりいずれの方法も現段階では夫々に問題があると考えられ、他の手法も含めて、さらに多くの石垣断面にも適用してみて種々の問題点を洗い出し、より合理的実用的な手法になるように検討を続けていく所存である。

4. まとめ

近世城郭の石垣は世界に例を見ない構築物であるが、石を加工し石積みする技術は我が国の古代朝鮮式山城等でも見られるように、古代から高い技術水準に達していた。しかしこれらの技術は近世まで世襲的に伝承されていただけで、現代の工学的解釈や理論までには発達しなかった。

本研究では、石垣の安定性を判定する手法を開発する手順をフロー図として示し、このフロー図に従って今までに検討されてきた12種の手法を整理位置付けした。そして簡便性や実用性の立場から6手法を選択し、実存石垣10断面に適用して、6手法の判定法の有用性等を比較検討した。その結果ある手法で安全性が高いと判定されれば残りの手法も同様の結果となる傾向がかなり明瞭に伺われた。しかし夫々が多くの仮定の上で導かれた手法であり、バラツキが大きくなることもありまた、判定結果の数値の示す定量的意味付けも十分解明できなかった。従って今後これらの手法を実用し、判定精度を高めるには次のような手順を採用することが望ましい。

- ① 安定度調査表により現地調査・判定し、検討断面をモデル化して、換算 c_R 、 ϕ_R を用いる円弧すべり法で安全率を求める。この結果と現場状況とを勘案して土性値等を修正し、この修正値により再計算す

るとともに残りの4法中からもたれ法と F 値または M 値法のいずれかの計4手法の判定結果を総合判定する。

- ② 現場の動態観測データを蓄積解析することは、石垣の崩落メカニズムを知り安定性判定手法の検討に非常に重要であるが、これらの報告は非常に少ない。今後とも経時的データ等の蓄積が望まれる。
- ③ コンピュータを用いる解析は有用であるが、検討断面のモデル化・境界条件の設計・インプット定数の決定等逆解析的に十分検討して進める必要がある。今後の進展が期待される。
- ④ 石垣斜面は土斜面上に石積みされたもので、土斜面以上にその構成や安定・崩壊メカニズムは複雑である。複雑なモデルや解析手法を考えても実用上の制約がある。各種土木構造物の設計解析手法も実際は多くの仮定と矛盾等を含みながらも実用化されている点を考えれば、石垣の安定性判定も、実用上は上述①のように数通りの手法による判定結果を総合的に判断していけばよいのではないかと思われる。ただし計算された数値の意味付け等十分究明されていないので、今後とも実績を積んでより合理的な手法となるように検討を続けていきたい。

参考文献および注記

- 1) 田中邦熙・山田清臣：石積み擁壁の安定性評価法，土木学会論文集 No.541/Ⅲ-35，pp.9～20，1996.6
- 2) 田中邦熙・新谷洋二：日本の城郭石垣の変遷と現状，土木学会論文集 No.576/Ⅳ-37，pp.101～110，1997.10
- 3) 田中邦熙・新谷洋二・山田清臣：城郭石垣の形状・寸法・石積み技術等からみた安定性評価事例，土木学会論文集第4部門 報告として投稿準備中
- 4) 田中邦熙・新谷洋二・山田清臣：石垣断面解析にFEMを適用するための問詰部の考え方と解析事例，第18回土木史研究発表会 自由投稿部門
- 5) 服部敬史 et al.：高句麗都城と山城，韓国文化研究振興財団，1992
- 6) 林直樹：桓仁高句麗遺跡考，韓国文化研究振興財団「青丘学術論集」七，1995年11月
- 7) 葛原克人：朝鮮式山城，「日本の古代国家と城」，(株)新人物往来社，pp.94～132，1994年3月10日

- 8) 村田修正編：「図説中世城郭事典 第二巻」，(株) 新人物往来社，pp.8～16，1987年6月15日
- 9) 北垣聰一郎：「石垣普請」，(財) 法政大学出版局，1987年3月31日
- 10) 石垣構築における禁忌（タブー）. 11)で述べる石垣技法の4項目の1つで、石材の加工・積み方等に関して、避けるべき事項を定めている.
- 11) 後述「後藤家文書」に記されている. 完成した石垣技法の基本であり、次の4項目をいう. ①規合・矩方の陰陽和合 ②加工石材の種類別から見た積み方をいい、陰陽五行説に結びつけたもの ③角石・角脇石の算木積みで、真・行・草の3通りある ④10)で述べた禁忌 詳細は文献9)に説明されている.
- 12) 喜内敏 解説，能嶋紘一 解題：金沢城郭史料－加賀藩穴太方後藤家文書，日本海文化叢書，第3巻，石川県図書館協会，1976年
- 13) 喜内敏：築城の土木工学的考察，日本城郭全集，第1巻，日本城郭協会，pp.30～48，1961年
- 14) 喜内敏：「唯子一人伝」についての概略，昭和44年度土木学会年次学術講演会，1969年
- 15) 喜内敏：城石垣の秘法と史料，探訪日本の城，別巻，小学館，pp.155～167，1978年
- 16) 上野市教育委員会：史跡上野城跡石垣保存修理工事報告書，1990年
- 17) 岡積：間知石の法勾配，土木技術5-9，1950年
- 18) 天野光三 et al.：徳川期大坂城石垣構造の力学的考察，土木史研究 第17号，土木学会土木史研究委員会，pp.377～388，1997年6月
- 19) 山口大介・新谷洋二：城の石垣の高さに関する基礎的研究，第52回年次学術講演会 講演概要集第4部，pp.640～641，1997年9月
- 20) 福岡正巳・中川英憲：プレキャスト・プレストレスト・コンクリート曲面擁壁構造，土と基礎，33-4，pp.11～14，1985年
- 21) 村田修正 編：「中世城郭研究論集」，(株) 新人物往来社，1990年5月25日
- 22) 村田修正 編：「図説中世城郭事典 第一巻」，(株) 新人物往来社，1987年4月25日
- 23) 村田修正 編：「図説中世城郭事典 第三巻」，(株) 新人物往来社，1987年7月15日
- 24) 鳥羽正雄：「日本城郭事典」，(株) 東京堂出版，1995年9月20日
- 25) 新谷洋二：「日本の城と城下町」，同成社，1991年10月16日
- 26) 南條範夫・奈良本辰也 監修：「日本の名城・古城事典」，(財) ティビーエス・ブリタニカ，1989年3月20日

(1998年1月23日)