

熊本地震で崩壊した熊本城石垣の復興と 必要最小限補強オーセンティシティ

福田光治

正会員 大成ジオテック（福岡県久留米市西町 1174-10）

E-mail: fuku564b@xug.biglobe.ne.jp

2016 年熊本地震では熊本城の石垣が多数崩壊した。崩壊した石垣を復元するためにはこれまで延々と行われてきた熊本城石垣の修復履歴の分析が復興課題を提供してくれる。論文では江戸時代を中心とした石垣修復場所を確認し、昭和・平成石垣の現代的な工法による石垣修復箇所を特定した。

2016 年熊本地震では昭和・平成石垣修理箇所の多くが崩壊したことを明らかにし、必要最小限補強オーセンティシティという基本概念を提案する。必要最小限補強を検討するためには石垣安定性の常時・地震時評価方法の確立が求められる。これまで提案してきた常時薄膜骨格モデルに加え、調和振動関数による地震時増幅特性を考慮した地震時薄膜骨格モデルを提案した。2016 年の石垣では多くの低石垣が崩壊している。この崩壊には石垣の素材形状の影響が考えられ、地震強度による安定性を検討した。高石垣には時代が反映され、時代とともに、高くそして急勾配になっているが、その安定性を分析し、時代の影響を分析した。石垣安定性安全率の高さ方向形態を踏まえ昭和・平成石垣修理の基本工法を吟味し、必要最小限補強の意義を併置した。

Key Words: Stone wall of castle, static and dynamic stability, reinforcement of necessary minimum, authenticity

1. はじめに

遺跡保存の基本概念にオーセンティシティがある。構築時の構造と素材をそのまま復元し、未来に継承していく概念として解釈されている。しかし構築後にも自然現象や人為的な変遷が付加されており、オーセンティシティの柔軟な解釈が求められる。

2016 年熊本地震では昭和・平成石垣修理箇所で多数の石垣崩壊に遭遇した。このため昭和・平成石垣修理の考え方をオーセンティシティ座標上で検討しなければならない。特に被害が少なかった江戸時代の石垣と比較することにより、昭和・平成石垣修理の工法の特徴を知ることができる。このため昭和・平成石垣修理の工法を吟味し、必要最小限補強オーセンティシティという概念を定着させなければならないことが分かった。石垣修理におけるオーセンティシティの多様性が存在することを確認する必要がある。このためには石垣の安定性評価方法が確立している必要がある。これまで薄膜骨格モデルを提案し常時のせん断安全率、回転安全率の計算方法を提案してきた¹⁾。また熊本地震を踏まえて調和振動による地震時安定性を提案した²⁾。調和振動関数による地震時増幅特性は伝播定数により異なるが、伝播定数の計算方

法と増幅形態の重要性を示した。また石垣構築時代では代表されない低石垣も多数崩壊している。この低石垣の安定性には石垣の形状の影響が分析できるので、復興計画で崩壊原因を明らかにしなければならない。

2. 熊本城石垣曲線と時代区分

熊本城は全国の城郭石垣の時代変遷をみる基準石垣であるという北垣の研究成果³⁾は重要である。石垣曲線ばかりでなく、石材形状や積み方を分類の指標にしている。

富田は熊本城城郭石垣の詳細な時代を調べている⁴⁾。城郭石垣の復元に当たってはまずは復元前の現代人が目にする景観である。しかし富田の城郭時代区分では、多重に石垣が被覆されていることを明らかにしている。このため崩壊した石垣を復元する時代の景観が求められることになる。

オリジナルの石材の位置を決めることが困難な状態まで散乱した熊本地震による城郭石垣の復元では、オリジナルな石材をオリジナルな位置に戻すという意味だけではオーセンティシティを保持することにはならない。

つまり積み方だけを元に戻したとしても、保存すべき石垣曲線に復元されなければオーセンティシティは完結しない。

オーセンティシティという概念を踏襲する復元は多分野からなる遺跡保存関係者を納得させる環境を作ってくれる。したがって散乱した状態から出発する復元でのオーセンティシティの意義を問う必要がある。そのオーセンティシティの内容、基準になるのが北垣や富田の時代区分とその内容である。つまり北垣や富田の研究成果に依拠して復元することは歴史を後世に伝えることになり、オーセンティシティの路線を維持するという日本の遺跡保存の基本思想になると信じるからである。

熊本城石垣曲線は石垣秘伝の書で、金沢城の石垣曲線は後藤家文書で解釈することができる⁵⁾。しかし二つの石垣曲線は異なった数式で表現されるが、図-1 に示すように日本古来から発展してきた破風曲線⁶⁾に近似化される。後藤家文書石垣曲線は全体高さの下部 1/3 は直線であるが、石垣秘伝乃書や破風曲線では全高さを等分割された曲線が得られる。破風曲線に付与された数字は分割数である。

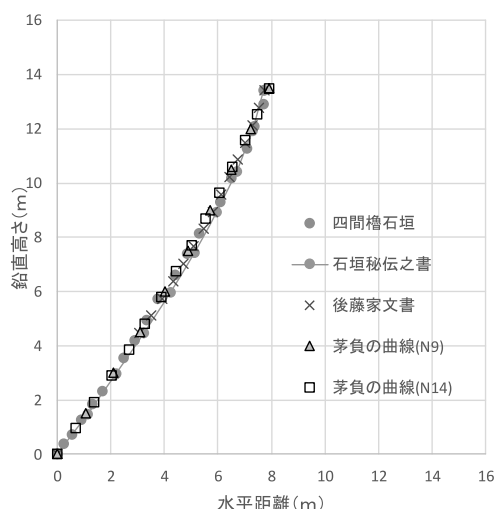


図-1 伝統石垣曲線の類似性

石垣秘伝乃書による石垣近似では図-2 に示すように根元と頭部を結ぶ近似 A と下部曲線に着目した近似 B の二つの視点が考えられる。後で言及するように根元部分の石垣曲線は比較的安定的に保持されている。このためオーセンティシティの対象になる石垣曲線は近似 B が基準になろう。

富田は熊本城石垣の構築時代を I ～VI に区分している。図-3 はその時代と近似 B の関係を図-3 に示した。富田の時代区分が経過するに従い、概略的には急勾配になり、また石垣は高くなる傾向がみられるが、一方向に特化されるほどの傾向ではない。

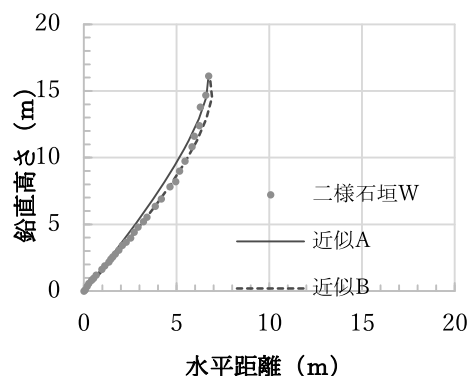


図-2 石垣秘伝乃書による二つの近似曲線

表-1 熊本城石垣富田時代区分

時代	富田時代区分		石垣
	和暦	西暦	
I	慶長4年	1599	小広間台南面
			月見櫓台
			東三階櫓台
			大天守台南面
II	慶長5年	1600	
III	慶長6年前半	1601	
IV	慶長6年～12年	1601-1607	田子櫓台
			七間櫓台
			十四間櫓台
			源之進櫓台
			東十八間櫓台東面
			長局櫓台
V	慶長12年以降	1607～	飯田丸五階櫓台
VI	寛永10年 文政3年	1633-1820	二様の石垣西面

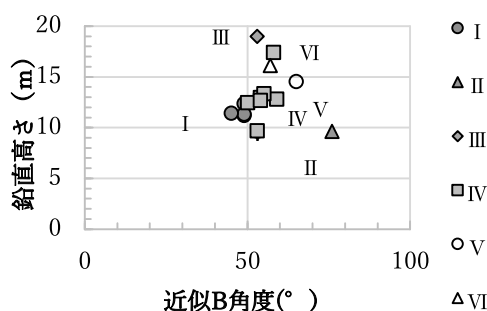


図-3 石垣秘伝乃書近似 B 勾配と石垣高さ

3. 石垣秘伝乃書を基準にした熊本城石垣の変状

熊本城修復の歴史が熊本市の復元工事報告書^{8,9)}に整理されている。表-2 は江戸時代の修理に関する個所を抽出したものである。地震や豪雨により石垣が変状し、その修復を幕府に願い出たことが示されている。石垣修

表-2 江戸時代を中心とした熊本城の変状

年	場所
1625	熊本地方に大地震、城内被害甚だしい、天守閣その他石垣にも被害あり
1634	熊本城の石垣・堀・門などの改修を幕府に願い出る。
1640	熊本城・八代城石垣修復について幕府老中よりの奉書を受ける。
1644	大雨で熊本城石垣・土手・堀・橋破壊する。 幕府、熊本城石垣・土手・堀の修理許可
1649	本丸の石垣修復許可される。
1676	熊本城三の丸石垣高さ5間、幅14間余崩壊 熊本城石垣普請箇所について幕府許可・坤方石垣修築
1703	熊本城小天守下石垣孕み、石垣普請につき橋2カ所取り除き
1704	天守閣北側の石垣を大補修
1715	熊本城石垣破損、5カ所補修を願い出許可される。
1719	熊本城本丸、子の方石垣1カ所、丑寅の方1カ所孕みだし、外曲輪末申の方外川岸土留、石垣ともに1カ所崩壊につき補修を先月願い出、許可される
1744	熊本城石垣修築幕府より許可される。
1747	熊本城石垣崩れ孕み箇所3カ所修復。
1781	熊本城不開門脇の石垣、竹之丸御門脇の石垣の孕み修理
1790	熊本城本丸の方及び未之方石垣孕みの補修について幕府に申請する。
1820	熊本城櫓方裏御櫓石垣普請を幕府に届け出。
1821	熊本城石垣手入れを幕府に提出
1822	熊本城櫓方裏御櫓石垣普請完成。
1847	数十年来希な強震のため、熊本城の諸所の石垣崩れ

復箇所を特定することは困難であるが、天守閣、小天守閣、不開門、竹の丸御門、櫓方裏御櫓が挙げられている。

金沢城石垣や姫路城石垣の変状が後藤家文書石垣曲線を基準に評価されている⁷⁾。同じように熊本城石垣曲線とその変状形態は石垣秘伝の書の石垣曲線を基準にして評価することができる。石垣秘伝乃書の石垣曲線は石垣根元の石垣勾配で近似化することができる。これは矩勾配になり、矩勾配と高さを整理し、時代の反映を検討した。

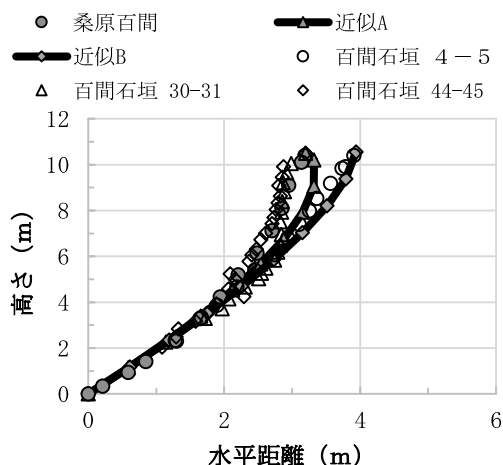


図-4 百間石垣の変状と石垣秘伝乃書

百間石垣では地震前に測定した桑原のデータ⁸⁾がある。2016年熊本地震後には著者が崩壊石垣を含むゾーンで測定した。●は地震前の桑原の測定結果である。近似Aで近似すると頭部が異常に反ってしまう。近似Bに対しては頭部が近似曲線から大きく前面に傾斜するモードになる。百間石垣は1889年熊本地震で崩壊し、復元されているが、崩壊しなかった箇所は変状は修復されずに、そのまま放置され保存されてきたと解釈すること

が可能である。

4. 地震強度を考慮した薄膜骨格モデル

薄膜骨格モデル^{1),2)}は石垣形状を測定して、その平均値を底辺長さとする台形の形状で石垣を近似化する。控えや長辺の長さは未申櫓などの解体時データ^{9,10)}を用いて底辺比により決めた。薄膜骨格モデルは平均値としての同一形状の基本台形が積層するモデルである。個々の台形の上下端で安定性を評価する。類似した検討方法が「箱型擁壁」設計方法で確立している¹⁰⁾。このモデルでは四角形が基本要素であるが、薄膜骨格モデルでは台形であることから図-5のように石垣の孕みが表現できる。台形の間の三角形部分は石垣と同じ特性を付与した充填土を考えている。薄膜骨格部分の質量を石垣頭部から根石に向かって個々に計算し、背後から土圧を作用させた。図-6の幾何条件により座標、つり合いを計算している。

石垣への地震動は双曲型偏微分方程式を満足する調和振動関数¹⁰⁾により、最大変位として1次モードで作用させた。

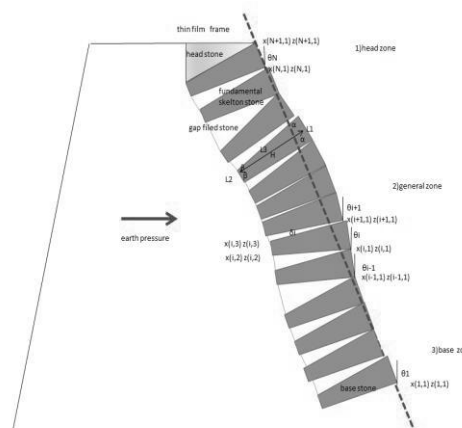


図-5 石垣の孕みと薄膜骨格モデル

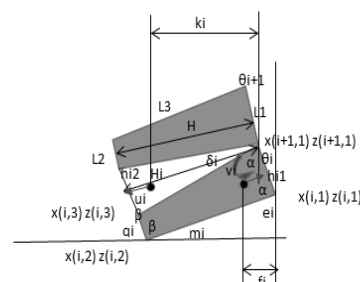


図-6 台形石垣の幾何条件

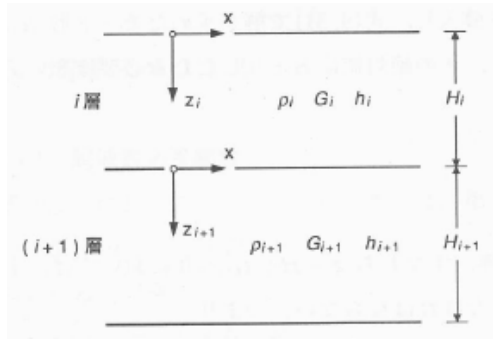


図-7 地震動の一次元伝播

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\xi_i(z_i, t) = (A_i e^{ip_i z_i} + B_i e^{-ip_i z_i}) e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$u = C \exp[i\xi(\pm x \pm ct)] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{A_i + B_i}{A_N + B_N} &= \frac{e^{ip(i-1)H} + e^{-ip(i-1)H}}{e^{ip(N-1)H} + e^{-ip(N-1)H}} \\ &= \frac{\cos p(i-1)H + i \sin p(i-1)H + \cos p(i-1)H - i \sin p(i-1)H}{\cos p(N-1)H + i \sin p(N-1)H + \cos p(N-1)H - i \sin p(N-1)H} \\ &= \frac{\cos p(i-1)H}{\cos p(N-1)H} \end{aligned} \quad (5)$$

$$p = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{T} \frac{1}{V_s} \quad (6)$$

地震動変位は図-8 に示すように石垣の重心に作用させたが、石垣前面方向に作用する力だけを作用させ、背面に向かう変位は無視した。類似した地震動は仙台北壁石垣検討¹²⁾や箱型擁壁設計でも図-9 に示すように仮定されている。図-10 に示すように調和振動関数は伝播パラメータ p により数次の増幅形態が存在するが、本モデルでは一次曲線を作用させた。

薄膜骨格モデルによる計算例として飯田丸五階櫓台石垣の安全率を示す。飯田丸五階櫓は図-11 に示すように熊本城石垣の中では、矩勾配、打出勾配がもっとも大きく、急勾配の石垣である。飯田丸五階櫓は 1889 年熊本地震で石垣が崩壊した¹³⁾。同じ場所が 2016 年熊本地震前震で崩壊し、さらに本震で崩壊域が広がった。

図中の実線はせん断安全率、鎖線は回転安全率である。さらに地震強度として入力基準地盤変位を 1 cm、スプリング強さは 0.5kN/cm として計算した安全率である。増幅率は点線で示すように 1 次モードである。これらの安全率は裏込めや石垣間の摩擦係数に依存するが、熊本城石垣に関する実測データは皆無に近い。筆者は 2016 年熊本地震後に測定した裏込め崩壊栗石の安息角測定結

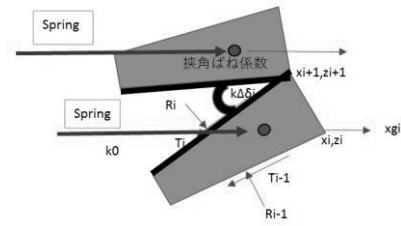


図-8 スプリングの作用位置

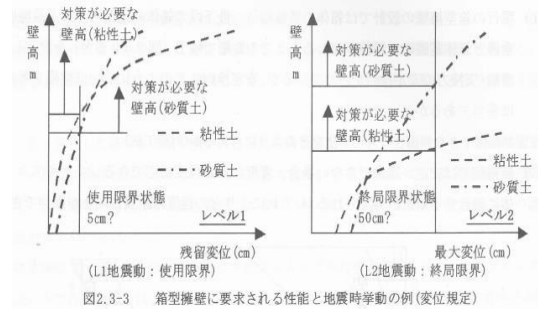


図-9 仙台北壁石垣時に作用させた地震強度

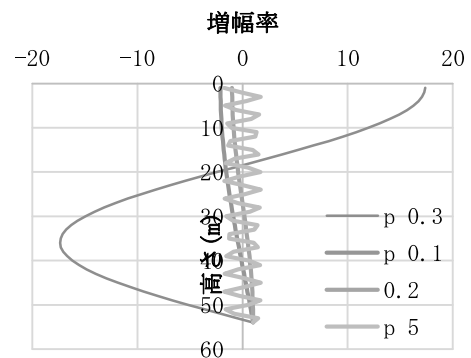


図-10 伝播定数 p と伝播変位モード

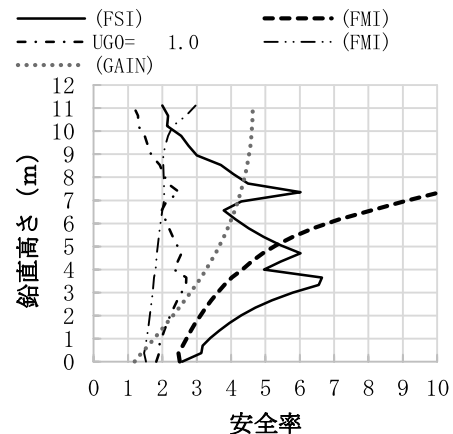


図-11 飯田丸五階櫓台石垣安全率

果から 30 度を使用している。薄膜骨格石垣間では 45 度を使用している。

4. 低石垣の崩壊

熊本城は高石垣と武者返りで表現され、その高石垣が 2016 年熊本地震で崩壊したのではないかという危機が湧くのは避けられない。しかし高石垣だけではなく、低石垣も多数崩壊している。しかし古城の石垣では視覚的に変状は見られない。解析ではこれらの違いを検討しなければならないが、低石垣曲線の解析では控え長さに着目した。



写真-1 本丸御殿側小広間台石垣

低石垣の崩壊は薄膜骨格モデルでも対象にしなければならない。ここでは飯田丸五階櫓台のパラメータを参考にして以下のように設定した。

石垣縦長さ	0.45m
控え	0.65m
石垣長辺長さ	0.2m
石垣積層個数	5ケ
石垣接触内部摩擦角	45 度

低石垣のせん断・回転安全率の深度方向分布を図-12 に示す。静的条件では 1 以上であるが、基礎から基準変位 1 cm、頭部での増幅比約 4 倍とすると、上部側でせん断安全率が 1 以下になる。同じ増幅比を与えて控えを小さくすると図-13 に示すように回転安全率は低下し、控え長さ 50 cm 以下になると根元部分から回転安全率が 1 以下になる。

5. 高石垣の崩壊

10m 以上の石垣を高石垣と定義する。図-14 は近似 B 角度と石垣高さの関係を示し、2016 年熊本地震で崩壊

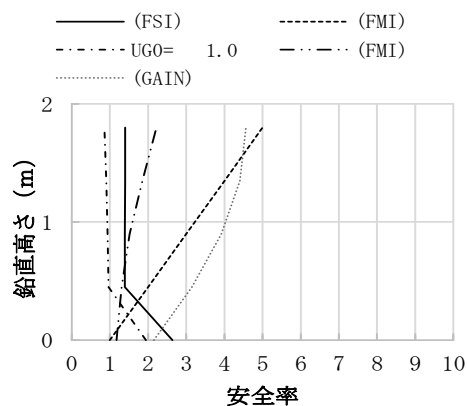


図-12 低石垣地震時増幅比と安全率

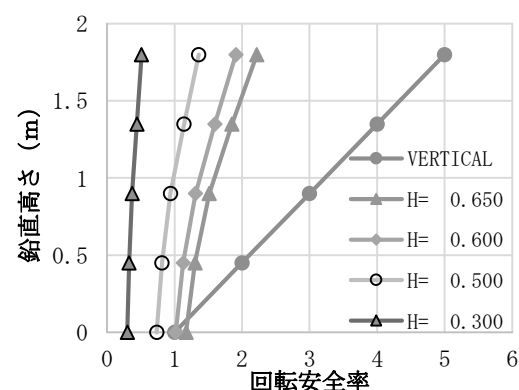


図-13 低石垣控え長さと回転安全率

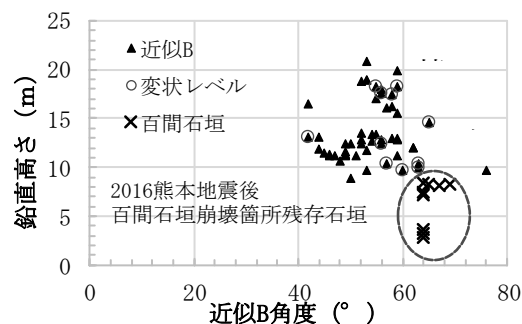


図-14 高石垣と崩壊箇所

した石垣を○で囲んだ。この図には崩壊した百間石垣の地震後の石垣曲線の解析結果も含まれている。崩壊石垣は急勾配ほど、そして高石垣ほど崩壊していることを示している。しかし前節で検討したように多数の低石垣も崩壊しており、急勾配・高石垣だけを石垣崩壊条件とすることはできない。計算では控えは石垣縦長さの約 1.5 倍の長さになっている。低石垣で示したように、控えが短かった可能性も否定できない。

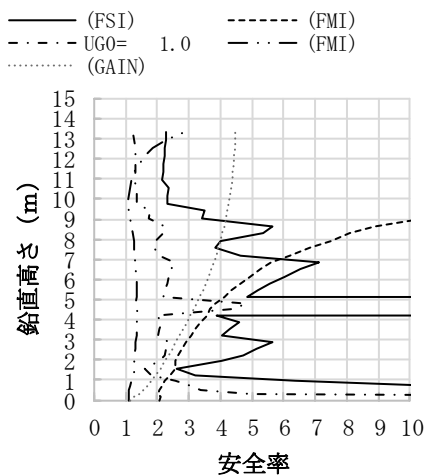


図-15 地震強度と高石垣の安全率（未申櫓台）

表-3 熊本城石垣曲線と地震時回転安全率

幕府時代区分			石垣	高さ (m)	近似B(°)	動的回転安全率	崩壊
時代	和暦	西暦					
I	慶長4年	1599	小広間台南面	12.384	49	1.207	○
			月見櫓台	11.19	49	1.18	○
			東三階櫓台	11.329	49		○
			大天守台南面	11.441	45	1.29	○
II	慶長5年	1600	飯田丸	9.644	76		○
III	慶長6年前半	1601	元祇堂櫓	18.997	53		○
IV	慶長6年～12年	1601-1607	田子櫓台	12.959	54	1.101	○
			七間櫓台	12.797	59	1.06	○
			十四間櫓台	13.337	55		○
			源之進櫓台	9.693	53	1.247	○
			東十八間櫓台東面	17.427	58	0.892	×
			長局櫓台	12.459	50	0.904	○
			西出丸末申櫓台	12.702	54	1.052	○
V	慶長12年以降	1607-	飯田丸五階櫓台	14.54	65	0.454	×
VI	寛永10年 文政3年	1633-1820	二樓の石垣西面	16.134	57	1.883	○

2016 年熊本地震では崩壊を免れた奉行丸末申櫓台石垣の解析結果を例として示す。増幅比は根元基準変位の約 4 倍作用させている。せん断安全率、回転安全率は静的条件ではいずれも 1 以上である。地震動を作用させると急激に安全率は低下するが、いずれも 1 以上になっている。

2016 年熊本地震で崩壊した百間石垣を含む 27 石垣で静的安全率、動的安全率を計算した。地震強度はいずれの計算でも根元基準変位 1cm に対し、頭部の増幅比を約 4 倍にして計算した。表-3 は動的回転安全率と石垣条件を整理したものである。表中の×印は 2016 年熊本地震で崩壊した石垣、○は非崩壊にとどまった石垣である。崩壊した石垣の動的回転安全率は 1 以下であるが、1 以下でも長局櫓台石垣のように非崩壊にとどまった石垣もある。

動的せん断安全率と動的回転安全率を示したのが図-16 である。図中の○印は崩壊した石垣を示している。概略的には崩壊した石垣は 1 以下の動的せん断安全率と動的回転安全率の領域に含まれる。

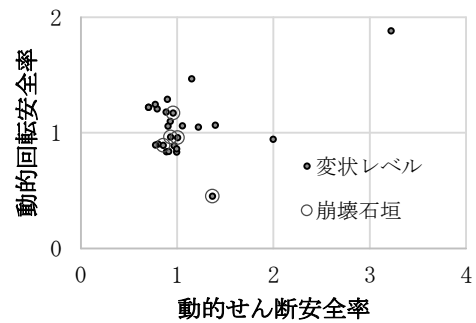


図-16 地震時せん断安全率と回転安全率

6. 江戸時代熊本城石垣修復箇所と熊本地震

熊本城修復の歴史が熊本市の復元工事報告書^{8,9)}に整理されている。表-4 は江戸時代の修理に関する箇所を抽出したものである。地震や豪雨により石垣が変状し、その修復を幕府に願い出たことが示されている。石垣修復箇所を特定することは困難であるが、天守閣、小天守閣、不開門、竹の丸御門、櫓方裏御櫓が挙げられている。

表-4 江戸時代の修復箇所

年	場所
1625	熊本地方に大地震、城内被害甚だしい。天守閣その他石垣にも被害あり
1634	熊本城の石垣・堀・門などの改修を幕府に願い出る。
1640	熊本城・八代城石垣修復について幕府老中よりの奉書を受ける。
1644	大雨で熊本城石垣・土手・堀・橋破損する。
	幕府、熊本城石垣・土手・堀・橋の修理許可
1649	本丸の石垣修復許可される。
1676	熊本城三の丸石垣高さ8間、幅14間余崩壊
	熊本城石垣普請箇所について幕府許可→坤方石垣修築
1703	熊本城小天守下石垣孕み、石垣普請につき櫓2カ所取り除き
1704	天守閣北側の石垣を大補修
1715	熊本城石垣破損、5カ所修補を願い出許可される。
	熊本城本丸、子の方石垣1カ所、丑寅の方1カ所孕みだし、外曲輪末申の方外川岸土留、石垣ともに1カ所崩壊につき修補を先月願い出、許可される
1719	
1744	熊本城石垣修築幕府より許可される。
1747	熊本城石垣崩れ孕み箇所3カ所修復。
1781	熊本城不開門脇の石垣、竹之丸御門脇の石垣の孕み修理
1790	熊本城本丸卯の方及び未之方石垣孕みの補修について幕府に申請する。
1820	熊本城櫓方裏御櫓石垣普請を幕府に届け出。
1821	熊本城石垣手入れを幕府に提出

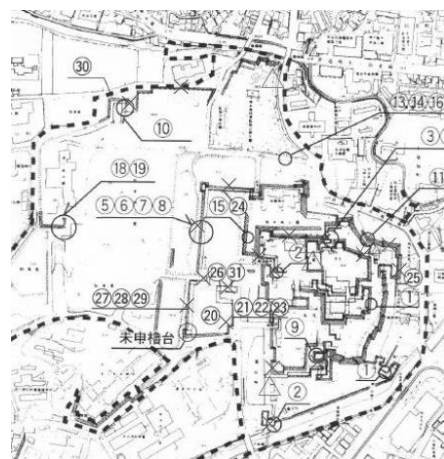


図-17 江戸時代の修復箇所と熊本地震石垣崩壊箇所

図-17 は 2016 年熊本地震で崩壊した石垣を×印で示し、修理箇所が明らかな江戸時代の修復箇所を△で示した。情報の制約はあるが両者が重なる個所が限定されていることは明らかで、江戸時代修復石垣の 2016 年熊本地震による崩壊は少数であったことが分かる。

7. 1996 年以降修復箇所と熊本地震崩壊石垣

工事報告書^{8,9)}には 1966 年から続けられてきた修理石垣、復元プロジェクトと復元費用が掲載されている。復元費用の推移を図-17 に示す。記載されている表-5 の 31 のプロジェクト個所は図-18 に番号が示されている。

表-5 1966 年以降の石垣修復

①	午砲台・平御櫓前	
②	馬具櫓	×
②	数寄屋丸櫓門	×
③	小天守下門	×
⑤	西出丸から	×
	戌亥櫓	×
⑧	西大手門まで	×
⑨	竹の丸五階櫓台	×
⑩	二の丸御門	×
⑪	不開門坂道	×
⑬	棒安坂	
⑮	宇土櫓西側	
⑯	棒安坂	
⑱	二の丸美術館南側	
㉑	奉行所跡東側	×
㉒	西出丸北側	×
㉓	東竹之丸	
㉔	南大手門西側	×
㉕	奉行所跡西側	×
㉖	二の丸御門跡	×
㉗	南大手門櫓台及び南坂	×

図-18 に
は 2016 年熊
本地震で崩
壊した石垣
箇所を×印
で示した。
○印は 1966
年から続け
られてきた
石垣修理箇
所である。
○と×が重
なっている
個所が、
1966 年修復
石垣箇所が
2016 年熊本
地震で崩壊
したことを

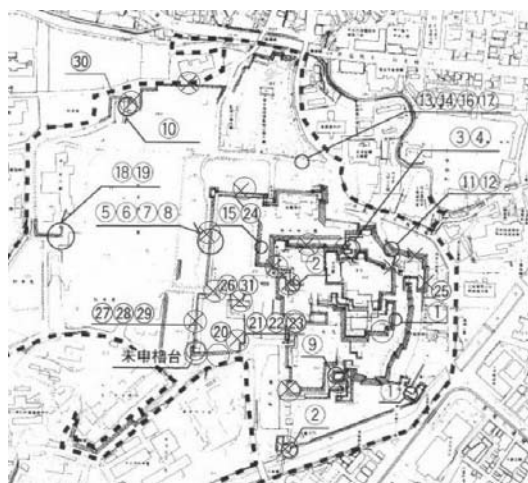


図-18 1966 年修復箇所と 2016 年熊本地震による崩壊石垣

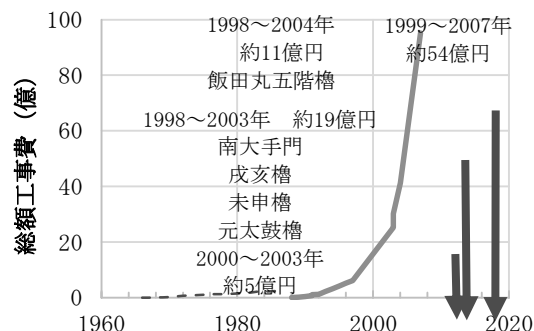


図-19 1966 年以降熊本城石垣修復経過

示している。1966 年以降の修復石垣が崩壊しなかったのは行幸坂西側では西出丸未申櫓台と奉行所南面石垣である。行幸坂東側では月見櫓台石垣が崩壊しなかった。一方行幸坂東側では 1966 年以降の石垣修復対象として挙げられていない東十八間櫓台、北十八間櫓台石垣、長局台北側石垣が崩壊している。熊本城内立ち入り禁止のため石垣崩壊箇所の点検は不可能であるが、google map や外周からの点検により崩壊箇所をプロットしているので、確実性ではやや劣ることになった。しかし石垣崩壊箇所が西出丸周辺で顕著であることから、1966 年以降の石垣修復技術を点検することから出発する必要がある。

図-19 の点線が石垣修理費用、実線が、櫓復元工事が含まれている復元費用である。2007 年までに約 90 億円が出費されている。

9. 必要最小限補強オーセンティシティによる復興

2016 年熊本城石垣崩壊の分析を行った。この結果江戸時代修復箇所の崩壊は少数にとどまったものの、1966 年から開始されてきた石垣修理箇所がほとんど崩壊したことを確認した。この原因に裏込めに存在していた土砂を篩分けして除去し、丸い栗石だけを集積させて石垣修理に使用したことでありと考えられる。復元に当たっては振動ローラーによる締固め風景が写真で訴えられているが、均等径の栗石を締固めすることは困難で、締固めは格好だけにとどまっている。しかも密度試験や強度試験による施工管理試験は実施されていない。従って地盤工学的な検討がみられない石垣修理が、2016 年熊本地震で灰塵に帰したことを意味する。

復興に当たっては、石垣の耐震性を検討し、必要最小限補強を考えなければならない。また確認試験もぜひとも実施しなければならない。

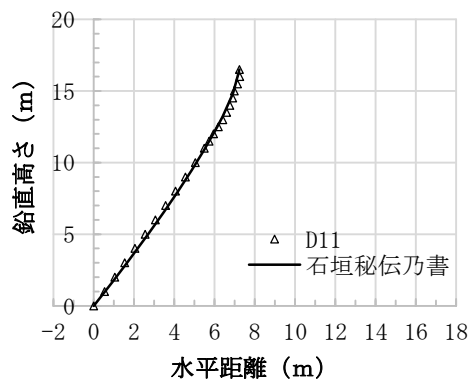


図-20 仙台北壁石垣曲線石垣秘伝乃書による近似

仙台北壁石垣修復工事¹²⁾では必要最小限補強が検討され、安定解析などから石垣控えの調整、ジオテクスタイルの敷設などを行い補強された。仙台北壁石垣の石垣曲線も図-20 に示すように石垣秘伝乃書で解釈することができる。

図-21 によような補強で 2004 年復元された。この結果 1997 年本丸北壁石垣の修復が始まり、2004 年修復工事が完了する。2011 年東日本大震災では一部石垣が崩壊しているが、修復された北壁では変状は見られない。

仙台北壁石垣復元工事では建築史、近世史、建築、土木、考古学、石垣歴史学、耐震工学の専門家で検討委員会が構築され、1997 年から 2003 年まで詳細な検討と専門家の復元思想の調整が行われ、必要最小限の意味が深化された。この結果が図-21 に示す標準図である。

10. あとがき

2016 年熊本地震では 1966 年から推進されてきた石垣修理箇所のほとんどが崩壊したことを確認した。また復元工程を追跡して地盤工学的な検討がなされていないことを明らかにした。石垣復元工事では必要最小限補強オーセンティシティの概念が必要になることを示した。この場合石垣安定性モデルが必要になる。2016 年熊本地震を踏まえて調和振動関数を使用した薄膜骨格モデルを示し、仙台北壁石垣復元工事で行われた安定解析結果と比較し、概略類似した結果が得られることを示した。

参考文献

- 1) 福田光治：秘伝化された石垣勾配とその安定性，地盤工学会関東支部，土木史跡の地盤工学的分析・評価に関するシンポジウム，2014.
- 2) 福田光治：熊本城壁石垣曲線形態の時代変遷と安定性，日本材料学会地盤改良部門委員会，第 12 回地盤改良シンポジウム，2016.

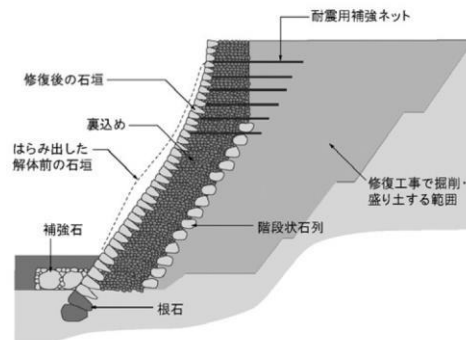


図-21 仙台北壁石垣復元工事標準図

- 3) 北垣聡一郎：ものと人間の文化史 58 石垣普請，法政大学出版会，pp. 32-145，2006.
- 4) 富田紘一：熊本城 歴史と魅力，熊本城顕彰会，pp. 44-62，2008.
- 5) 北垣聡一郎：石垣研究の歩みと現在，石川県金沢城調査研究所「金沢城史料叢書 16 城郭石垣の技術と組織」，pp. 7-24，2012.
- 6) 柳井浩：石垣の曲線―様式の数理―，日本オペレーションズ・リサーチ学会，オペレーションズ・リサーチ，論文・研究レポート，pp. 281-286，1988.
- 7) 森本浩行・西田一彦・西形達明・玉野富雄：城郭石垣の安定性に影響する各種要因の検討，土木学会 土木史研究講演集，Vol. 24，pp. 255-260，2004.
- 8) 桑原文夫：熊本城の石垣勾配，日本工業大学研究報告 14，1984.
- 9) 熊本市教育委員会：特別史跡熊本城跡西出丸・二の丸御門跡・南大手門跡・南坂 石垣保存修理工事・発掘調査報告書，pp. 10-21，1999.
- 10) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp. 175-195，2008.
- 11) 土木研究センター：「箱型擁壁」耐震性技術検討委員会 報告書，pp. 4-13，2003.
- 12) 仙台市建設局：青葉山公園仙台北壁石垣修復工事（仙台北壁本丸北壁石垣）工事報告書，2006.
- 13) 表俊一郎・久保寺章：都市直下型地震―熊本地震から兵庫県南部地震まで，古今書院，p. 70，1998.
- 14) 熊本市：特別史跡熊本城跡 西出丸一帯復元整備工事報告書 2005.