

熊本城城郭石垣控えと動的安定性

福田光治

正会員 大成ジオテック (〒830-0038 福岡県久留米市西町 1174-10)

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

城郭石垣の安定性は、石垣曲線だけでなく控えが安定性を評価する重要なパラメータになる。しかし控えは城郭石垣の奥行になるので、発掘することなく計測することは不可能である。

2016年熊本地震で熊本城城郭石垣は多数崩壊した。この復興では必要最小限補強オーセンティシティの基本理念で実施されることが求められる。従って復興に先立って城郭石垣のオリジナル曲線の確認にとどまらず、裏込め条件を考慮した安定性が検討されなければならない。この場合石垣積層体の控えのデータが必要になる。

熊本市は西出丸一帯の発掘調査で、石材の形状を詳細に報告している^{1), 2)}。この調査結果を活用して2016年熊本地震では西出丸奉行所跡の未申櫓台石垣は非崩壊、それに隣接する石垣は崩壊という結果を分析し、控えと隠れ二重石垣の効果を検討した。

Key Words: *castle, stone wall, curvature, depth, static and dynamic stability*

1. はじめに

本論文では富田が作成した熊本城本丸縄張り^{3),4)}で示された西出丸奉行所跡南西隅にある未申櫓台石垣とそれに続く奉行所西側の石垣を対象にして、石垣形状の特徴と控え効果、および発掘過程で発見された隠れ石垣の安定性における効果に言及する。

西出丸一帯の石垣形状データが発掘調査報告書に掲載されている^{1), 2)}。これまで著者は2016年熊本地震前から石垣安定性と石垣曲線の関係を追求してきた。この過程で薄膜骨格モデルと提案し、また箱型擁壁安定性解析^{5)~7)}に類似した極限解析であることを明らかにした。この場合控えも考慮したが、調査報告書のデータを整理して、控え長さ/縦長さ比の平均値を用いて熊本城城郭石垣の安定解析を行ってきた。

2016 年熊本地震では図-1 に示す戌亥櫓、元太鼓櫓、西大手門櫓、南大手門櫓などの櫓台石垣、さらに北大手門から戌亥櫓、戌亥櫓から未申櫓台までの石垣が写真-1、2 のように崩壊した。西出丸における全域的な崩壊の中で未申櫓台石垣は非崩壊にとどまった。

本論文では西出丸奉行丸跡西側の**写真-3**の石垣崩壊と**写真-4**の非崩壊の現象に着目して検討する。この崩壊・非崩壊の違いに着目し、その原因を控えと地山に制約された仮想すべり線に着目して行った検討結果を示す。これらの石垣では石垣形状データが蓄積されているので、控えを定量的に取り上げることができる。

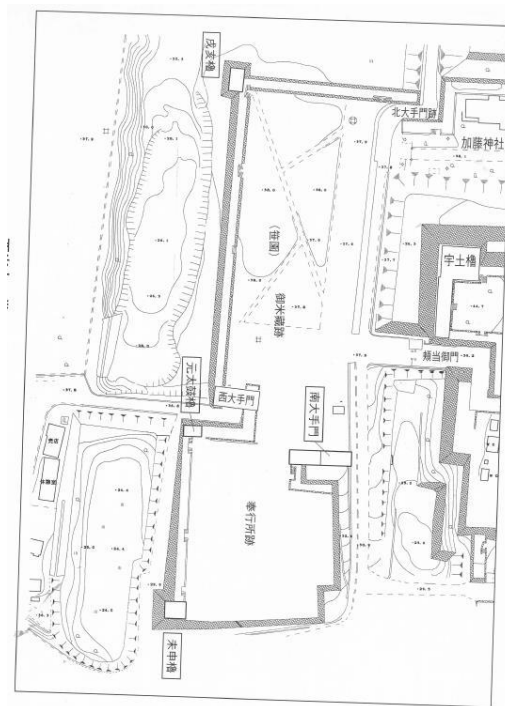


図-1 熊本城本西出丸²⁾

2. 西出丸修復の経緯と石材控え

熊本城は熊本市民の郷土意識を形付けてきた遺構であり、熊本城を巡って多くの歴史が刻まれている。したがって復興には様々な人々の願いが詰め込まれてくる。このため復興に臨む方向性を決めて復興に着手しなければ



写真-1 2016年熊本地震前震直後



写真-3 2016年熊本地震後
未申櫓台南西隅（E, Fエリア）



写真-2 2016年熊本地震本震直後
戊亥櫓



写真-4 2016年熊本地震後
未申櫓台石垣北側（C, Dエリア）

ばならない。その基本理念になる方向性は景観復興とオーセンティシティ復興に大別される。著者はオーセンティシティに沿う復興を願っているが、遺跡地盤工学の立場から考えると必要最小限補強オーセンティシティが基本理念になる。従って、城郭石垣の復興を遺跡保存考古学の特定分野からだけで色付けすることはできない。幅広い専門分野のかかわりと合意により必要最小限補強の意味が具体化され、その結果として多くの分野の専門家が合意してはじめて必要最小限補強オーセンティシティが実現される。考古学に限定されない幅広い専門分野の過不足ない調和から、復興段階での技術レベルを踏襲した必要最小限補強オーセンティシティの基本理念が創出される⁵⁾。

石垣安定性の検討では石垣控えのデータが必要になる。この控えの計測データが調査報告書に含まれている。西出丸奉行所跡は1779年ごろ完成していたが、明治初期に櫓や石垣が解体され、西大手門、戊亥櫓、戊亥櫓から西大手門間の石垣が撤去された。西出丸奉行所跡の建物も同じ運命をたどり、1960年にバレーコートとして整備された。この一環として観客席が設けられ、一部コンクリート擁壁が築かれた。

西出丸奉行所跡調査復元区域は外周がA～Fエリア、内周がI～Gエリアに区分されている。そして内周に沿

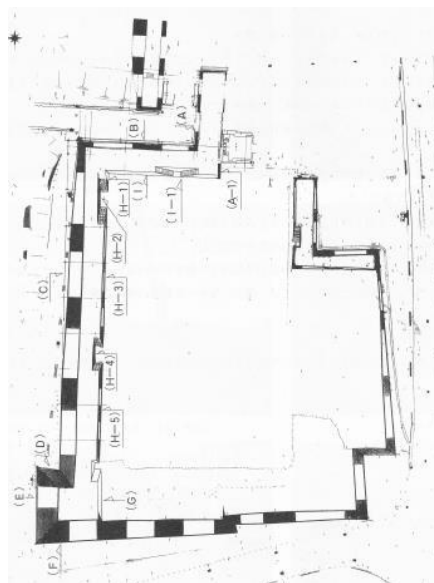


図-2 西出丸奉行所跡発掘ゾーン²⁾

って観覧席とコンクリート擁壁が構築された。トレンチ調査結果として断面図が示されている。

小高い丘陵は阿蘇火砕流で、その崖錐根元でコンクリート擁壁が確認された。トレンチ結果では石垣根石とその基礎となる阿蘇火砕流が確認されている。上部のIエリアでは現地表面下約40cmの深度で根石が確認され、阿蘇火砕流を削って設置されている。同様の手法でCエ

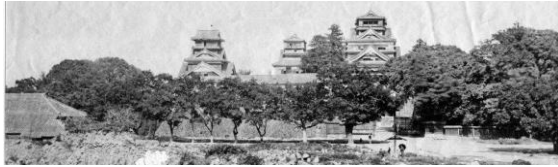


写真-5 明治時代の西出丸からみた天守閣



写真-6 西出丸からみた天守閣



図-5 Cエリア栗石搾取

リアの根石も阿蘇火砕流の上に置かれている。つまり図-3の丘陵頭部と崖錐根元で阿蘇火砕流が確認されたことになる。この発掘調査結果を図-4に示すCエリア断面に应用すると、根元部では根石が確認されているが、その背後のHエリアでは根石は確認されていない。しかし図-3を念頭に置くとHエリアでも根石は阿蘇火砕流の丘陵天端に位置している可能性がある。こうした発掘調査結果から西出丸奉行所跡の石垣は奥に向かって、表面から築石、裏込め玉石、地山の構造になり、裏込め玉石の層の天端厚さは図-5に示すように概略 2m 程度で薄い。

本論文で対象にしているのはCエリアからFエリアにいたる外周石垣で、未申櫓台の外周が D~F エリアになる。この部分は張り出し隅角で、図-6に示すようにDエリアと交叉するようにCエリアの石垣が南進し、未申櫓直下に入り込んでいる。すなわち未申櫓台石垣は二重の石垣になっている可能性がある。

復元に当たっては、控え長さが不足しているもの、あるいは粗悪な形状の築石は島崎石と呼ばれる金峰山系安山岩の新石が使用された。また裏込め玉石は白川産の川

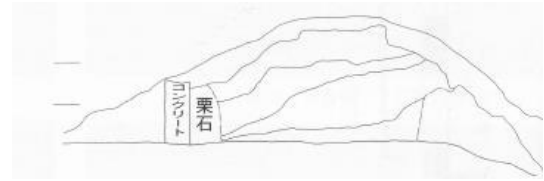


図-3 西出丸奉行所跡南側トレンチ断面図

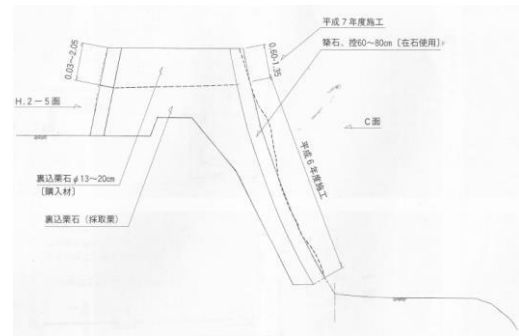


図-4 Cエリア断面



図-6 未申櫓台石垣の2重石積

石が使用されており、不足分は金峰山系安山岩の割栗石が補填され、目つぶし材として割栗石及び切り込み砕石用いられた。

調査では図-7に示すように構築石材の縦長さ(b)、水平長さ(a)、控え(c)が測定され、詳細なデータが掲載されている。調査結果をエリアごとに整理したのが図-8、表-1である。また文献で示された時代に着目して

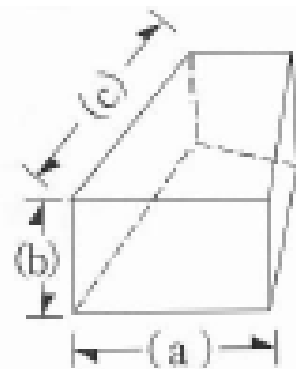


図-7 石垣形状測定

表-1 石垣形状計測データの整理

面	個数	平均値			標準偏差		
		b(cm)	a/b	c/b	b(cm)	a/b	c/b
C面平部	386	40.8	1.4	1.5	11.4	0.5	0.5
D面平部	211	41.4	1.4	1.5	13.2	0.6	0.5
E面平部	342	41.6	1.5	1.7	15.0	1.4	1.5
F面平部	338	44.7	1.3	1.5	14.7	0.5	0.4
G面平部	41	32.0	1.7	1.7	14.2	0.8	0.7
H面平部	32	35.8	1.5	1.4	10.9	0.5	0.4
平均		39.4	1.5	1.6	13.3	0.7	0.7
D/E面角石	12	59.6	2.4	3.5	22.9	2.8	5.6
E/F面角石	23	66.3	1.7	1.6	13.7	0.7	0.8
F/G面角石	4	53.6	1.6	1.5	7.5	0.6	0.5
平均		59.8	1.9	2.2	14.7	1.4	2.3

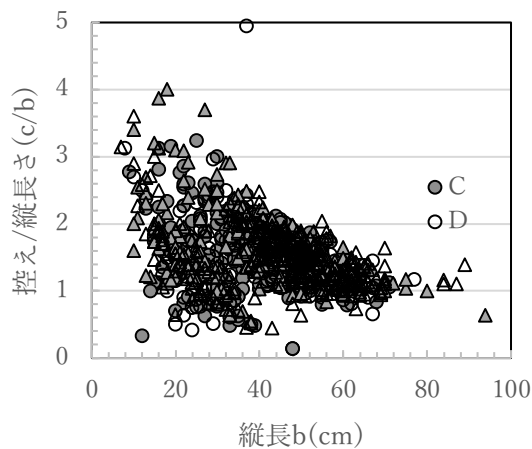


図-8 エリアごとの石材計測データ

整理したのが図-9である。図より加藤清正の特徴として抽出する傾向はみられない。

計測データのうち縦長さと、水平長さ/縦長さ比をプロットした。石材形状に関してはエリアの違いは見られず、類似した石材が使用されていると考えられる。縦長さと水平長さは石垣表面に露出されているので計測できる。石垣傾斜測定と同時に測定したほかの場所での計測結果を示す。石垣表面の縦長さは約 50 cm付近にばらついている。

本研究で着目するのは控え及び控え/縦長さ比である。飯田丸五階櫓台石垣の平均値は、縦長さの平均は約 35 cm、控え/縦長さ比は約 1.5 付近にプロットされる。従って表-1と比較すると、西出丸計測データに類似したデータになっている。

安定解析に必要な縦長さの平均値は、Cエリアが約 41 cm、Dエリアが約 41 cm、Eエリアが約 42 cm、Fエリアは約 45 cmである。また控え/縦長さ比(c/b)はCエリアが 1.5、Dエリアが1.5、Eエリアが1.7、Fエリアが1.5で、控え比/縦長さは約 1.5 が多い。このためこれまでの安

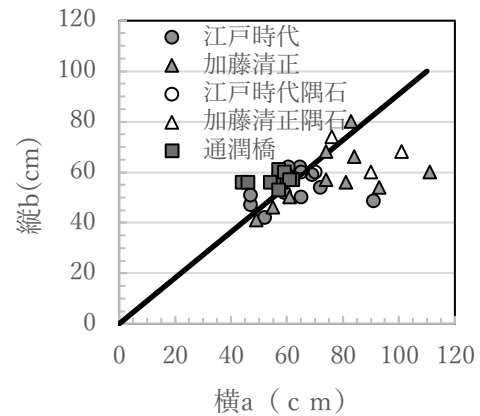


図-9 石材形状の比較

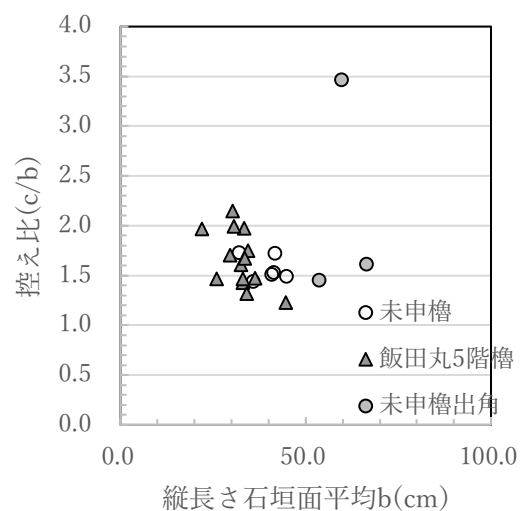


図-10 縦長さと控え

定解析では露頭した石垣表面での縦横長さの計測データを基準に、控え長さは控え/縦長さ比 1.5 と考えて実行

してきた。

3. 地震前石垣曲線

Leica510 により、2016 年熊本地震前の 2014 年に西出丸奉行所跡未申櫓台周辺 C～F エリアで石垣曲線を計測した。C エリアでは 3 側線 (C-1, C-2, C-3) , D, E, F エリアではエリアの中心付近で計測した。



図-1 1 石垣傾斜測定

石垣曲線データは 3 区分され、C-1, C-2 がひとつの区分、D と E がひとつの区分、そして F の石垣曲線は乖離している。F の乖離は根元部の盛土と考えると、根元部のデータに着目して平行移動して、F 補正と明示した。この結果 3 区分は 2 区分に区分される。D, E, F が一つの区分で未申櫓台石垣、そして他の一つが C エリアの曲線になる。

C, E 及び F エリアの石垣曲線を石垣秘伝之書の作図法で近似化した。E と F エリアの石垣曲線は類似しているので、石垣秘伝之書による近似も類似している。C エリアも近似できる。

熊本城城郭石垣の構築時代は富田⁴⁾が整理している。石垣曲線も富田の時代区分に概略対応して変遷している。本論文で対象とする奉行所石垣曲線は C エリアは第 V 期付近にプロットされ、F エリアの近似曲線は第 IV 期に属している。

富田の時代区分では西出丸奉行所跡未申櫓台石垣周辺の石垣構築時代は第 IV 期とされている。西出丸石垣は解体・復元されており、オリジナル石垣曲線と復元された石垣曲線の類似性は分からないが、解体前の石垣の特徴から時代区分されていると考えられる。計測データの E, F エリアはまさに第 IV 期のプロットゾーンにあるが、C エリアは第 V 期に属している。この時代の乖離から西出丸石垣解体前のオリジナルとなる石垣曲線と復元後の石垣曲線の相違に関しては、今後の検討課題になろう。

4. 調和振動関数と加速度

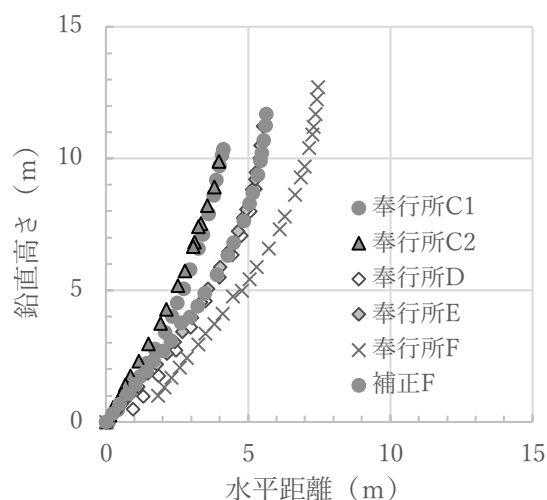


図-1 2 西出丸奉行所跡石垣曲線

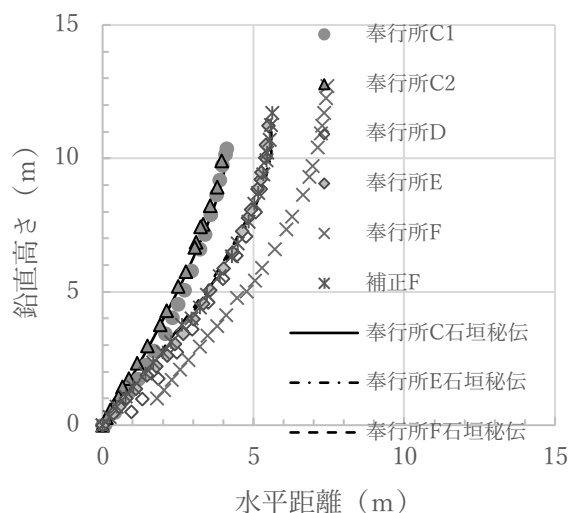


図-1 3 石垣秘伝之書による石垣曲線の近似

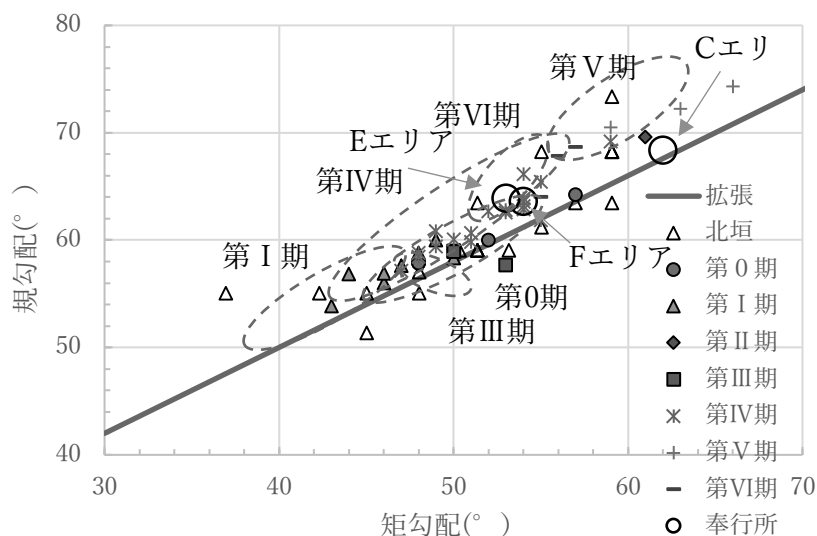


図-1 4 富田時代区分における奉行所跡石垣

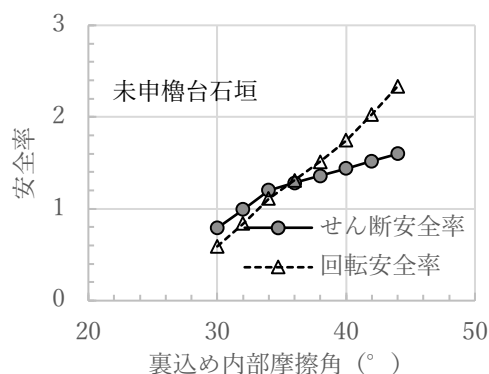


図-1 5 裏込め摩擦角と静的安全率

薄膜骨格モデルにおける動的安定解析は調和振動関数により得られる変位分布と、それに対応するスプリング力を石材重心位置に作用させて、せん断と回転の安全率を計算している⁶⁾。

波動関数⁷⁾の基礎式を示す。ここに ξ ：地盤変位， p ：伝播定数， ω ：円振動数， H ：層厚， t ：時間， f ：振動数， T ：卓越周期， V_s ：S波速度， A ， B ：定数とする。

$$\xi_N(t) = (A_N e^{ipH} + B_N e^{-ipH}) e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\xi_j(t) = \frac{\cos(pHj)}{\cos(pNH)} A_c e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$\xi_j(t) = -\frac{\cos(pHj)}{\omega^2 \cos(pNH)} A_c e^{i\omega t} = -\frac{1}{\omega^2} \ddot{\xi}_j(t) \quad (3)$$

$$p = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{T} \frac{1}{V_s} \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

一次モードの増幅形状から調和振動関数パラメータを決めた。基盤変位を 1.46 cm として頭部で最大 4 倍程度増幅されるようにパラメータを選定した。従って最大変位約 6cm 考慮していることになる。加速度を 1500cm/cm² とすると、調和振動関数の関係から対応する変位は約 6 cm になり、強振条件と対応している。

箱型擁壁マニュアル⁸⁾における動的安定解析では $d_{\max}/H=3\%$ 程度が残留変位として実験で示されている。ここで $H=10\text{m}$ とすると残留変位は $d_{\max}=30\text{cm}$ 程度になる。遠心力载荷試験は L1 地震，L2 地震が入力され，前者で壁面最大変位約 1.5cm，後者では約 30 cm が示されている。これらの壁面残留変位は数回の強振で発生した変位量であるから 1 回の強振を前提にした変位に比べ多い。こうしたことを考慮すると，薄膜骨格モデルで入力する最大強制変位量は妥当な範囲にあるように考えられる。

動的安定解析の基礎になるのが図-1 5 に示す静的石垣安全率である。地震で崩壊する前の状態は安定しているので，静的安定解析結果から安全率 1.2 以上の状態を

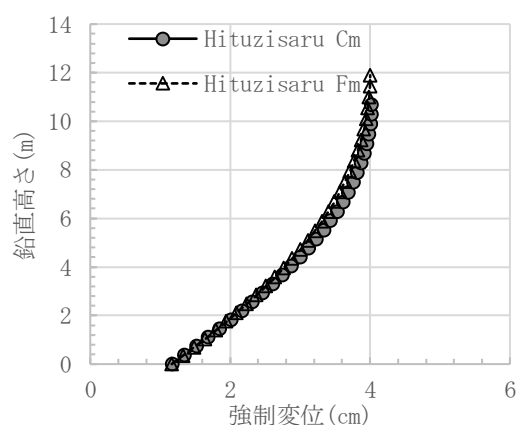


図-1 6 動的解析に使用した強制変位

表-2 調和振動解析パラメータ

パラメータ	Cエリア	Fエリア
T (卓越周期)	0.41	
$V_s(\text{m/s})$	200	
$\omega (2\pi f)$	15.317	
基準地盤変位(cm)	1.46	
スプリング係数(kN/cm)	0.5	
ρ	0.111	0.0945

想定して，裏込め内部摩擦角 38° を選定した。

動的石垣安定解析で使用した鉛直方向強制変位分布を図-1 6 に示す。

調和振動動的解析に使用したパラメータを表-2 に示す。C エリア，F エリアの動的安全率のうちせん断安全率は 1 以上であるが，回転安全率は 1 以下で，いずれも地震により回転により崩壊するという計算結果になる。

この計算結果は 2016 年熊本地震での被害現象を説明することはできない。

5. 動的安定解析と控え効果

石垣の安定性は石垣曲線ばかりでなく，積層される石材の控え，さらに裏込め強度が重要な検討因子になる。発掘調査データを用いて西出丸奉行所跡周辺の C エリアと未申櫓台 F エリアの石垣の熊本地震による崩壊状況を念頭に入れて調和振動動的安定解析を行った。しかし二つのエリアはいずれも地震時回転安全率が不足し，いずれも崩壊の可能性を抱かせる結果になった。ここでは控えの影響を検討する。

基準値として石垣の縦長さと控えの平均値を用いた。そして控えを長くする解析を行った。C エリアでは，控えを 63 cm からスタートし，76，86，100，150 cm と変化させた。F エリアでは 67 cm からスタートし，76，86，

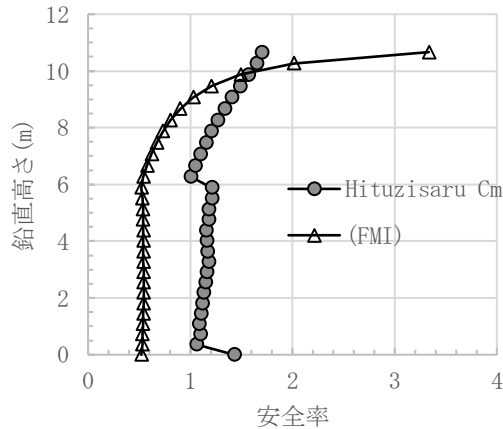


図-17 Cエリア動的安全率

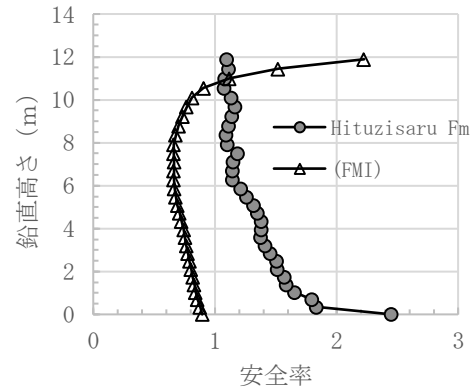


図-18 Fエリア動的安全率

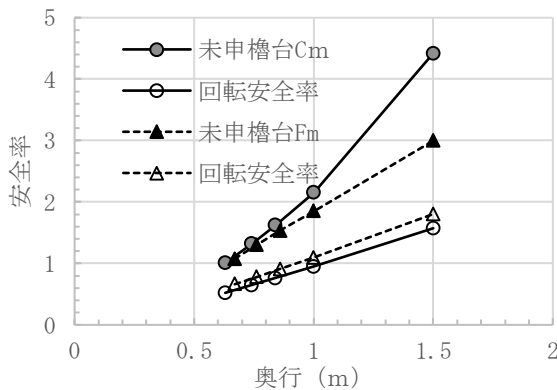


図-19 動的安全率に及ぼす控え効果

100, 150 cmと長くした。図-17, 18が解析結果である。動的せん断安全率は1以上であるが、動的回転安全率が1以上になる。崩壊したCエリア、非崩壊にとどまったFエリアのいずれも動的回転安全率は1以下であり、解析結果からは崩壊条件を説明することはできない。このため控えに着目して動的安全率が1以上になる条件を検討した。安定解析結果を図-19に示す。図より動的回転安全率を1以上にするためには、いずれのエリアでも控え長さは約1m以上にしなければならないことになり、計測された石材長さのデータからは説明することはできない。

6. 裏込め栗石層厚の影響

発掘・復元工事でのCエリアでは根石は阿蘇火砕流を削って据えられたこと、また天端は阿蘇火砕流であることが確認されている。しかし調査報告では裏込め背面土砂の土質には触れていない^{1), 2)}。本論文では図-20の写真などから、裏込め栗石は背面の阿蘇火砕流崖錐を整形して積層されたと判断した。また地震時崩壊パ



図-20 Cエリア崖錐整形状況¹⁾

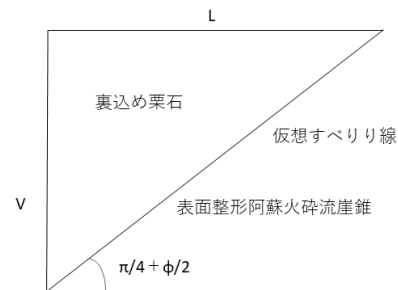


図-21 仮想すべり面と内部摩擦角

ターンでは地山から崩壊したようにはみえない。このため図-21のように裏込め栗石は背面の阿蘇火砕流崖錐に沿って流動したと判断した。そして阿蘇火砕流切土に沿う仮想すべり線を仮定した。簡単化すると高さV、仮想すべり線天端幅Lとして関係式を展開する。

$$\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) = \frac{V}{L} \quad (6)$$

そしてV=11m, L=2mとすると仮想裏込め内部摩擦角は69°が得られる。解析は仮想裏込め栗石内部摩擦角60, 65°として行った。その結果動的せん断安全率は1以上であるが、動的回転安全率ではCエリアの崩壊、Fエリアの非崩壊に対応するように、Fエリアでは1以上にな

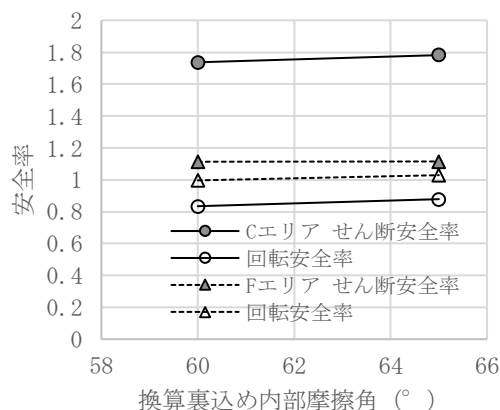


図-2 1 阿蘇火砕流崖錐はり付け
裏込め栗石崩壊

る。

発掘時の調査では西出丸奉行所跡未申櫓台直下にはCエリアから南下する石垣が確認されている。つまり現在のFエリアでは現在の石垣表面うらに隠れ石垣が存在している可能性は大である。この隠れ石垣の存在が仮想すべり面を裏込め玉石内に発生するすべり面ではなく、背面の隠れ石垣により制約されたすべり面が発生したと考えるとCエリアとFエリアの崩壊現象の違いを説明することができる。

熊本城城郭石垣で一番高い石垣は宇土櫓台石垣である。2016年熊本地震ではハラミは発生したが、非崩壊にとどまった。その原因として考えられるのは二重石垣（隠れ石垣）の可能性が高い。富田熊本城石垣時代区分⁴⁾では第IV期と第I期が重なっており、二重石垣の可能性が高く、潜在的な仮想すべり線が発生が推定される。

7. あとがき

2016年熊本地震で非崩壊にとどまった西出丸奉行所跡未申櫓台石垣と隣接する崩壊石垣の動的安定性を分析した。これらの石垣では蓄積されたデータが報告書として公表されてる。平均値ではあるが、測定された縦長さ、控えデータを用いて調和振動動的解析を行った。この結果Cエリアの崩壊、Fエリアの非崩壊は隠れ石垣によるすべり線の発生が制約されている可能性を指摘した。また隠れ石垣の効果として熊本城宇土櫓台石垣の非崩壊も説明できる時代区分がなされていることを示した。

参考文献

- 1) 熊本市教育委員会：特別史跡 熊本城跡 西出丸（奉行所跡） 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，1999.

- 2) 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 未申櫓台保存修理 南大手門及び塀 戌亥櫓及び西出丸塀 未申櫓 元太鼓櫓及び奉行所塀 奉行丸東南側塀 西大手門石垣保存修理 西大手門，2005.
- 3) 富田紘一：熊本城本丸縄張りと櫓名，2008.
- 4) 富田紘一：熊本城 歴史と魅力，熊本城顕彰会，pp.44-63，2008.
- 5) 仙台市建設局：青葉山公園仙台城石垣修復工事（仙台城跡本丸北壁石垣）工事報告書，2006.
- 6) 福田光治：熊本地震で崩壊した熊本城石垣の必要最小補強オーセンティシティ，土木学会，第37回土木史土木史研究発表会，2017.
- 7) 大崎順彦：新地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp.186-189，2008.
- 8) 「箱型擁壁」工法設計・施工マニュアル編集委員会：「箱型擁壁」工法 設計・施工マニュアル，土木研究センター，2016.