

城郭石垣はばき補強による力学的安定機能の確認

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

石垣のはらみは一般的な現象である。日本城郭石垣や民家石垣でもはらみによく遭遇する。日本城郭石垣のはらみ補強としてはばきがある。熊本城城郭石垣でもはばきが散見され、はばき補強は日本古来の伝統技術と考えることが出来る。

はばき補強は日本古来の伝統技術としても、新たにはばき補強を行おうとすると、修復前景観とは異なってくる。石垣補強する部分を内部と外部に分けると、はばきは外部補強になる。このため城郭石垣の修復にはばき補強を計画する場合、遺構修復保存思想となるオーセンティシティ概念との調和・融合が検討されなければならない。しかしオーセンティシティ保存の概念から景観の変状レベルを考える場合、はばき補強の規模が問われてくる。本論文でははばき補強効果を動的安定解析を介して検討した。はばきを回転力とせん断力に区分して動的安定解析に組み入れる手法を検討した。動的安定解析を介してはばきの規模が検討できるが、試案の段階であり、今後具体的な例や解析精度を吟味していかねばならない。

Key Words: castle, stone wall, reinforcement, dynamic safe stability

1. はじめに

はばき補強は日本城郭石垣の伝統的な補強工法である。盛土法面に置かれる抑え盛土の機能に類似した効果が期待される工法である。しかし著者の浅学の為、日本城郭石垣に対するはばきの力学的な機能を展開した文献を入手していない。

はばきを新たに追加する場合は、はばきは石垣外側に置かれるので、補強する石垣の現状景観を大きく変える要素になる。このためはばきの規模を考えなければならない。

遺構保存ではオーセンティシティが問われる。その場合まず検討されるのが目に見える景観である。ジオテクスタイル補強は石垣内部に設置されるので、目に見えない補強となり、オーセンティシティとの調和・融合では比較的許容されると考えている。しかしはばきは石垣の外部に設置されるので、大規模になると景観を大きく変えることになり、城郭石垣保存で要求されるオーセンティシティ概念との調和・融合が検討されなければならない。このためはばき補強でははばきの規模が重要な選択要素になる。

本論文では、はばきの力学的機能としてせん断抵抗と自重による回転能からモデルを提案し、規模を決める動的安定解析を検討した結果を示した。しかしはばきの機能の分類や安定解析への組み込み方は試案の段階である。今後詳細な検討が求められる。

2 はばきと鞆石垣の定義¹⁾

日本の城郭石垣研究家北垣¹⁾は私信メールで述べる。『はばきの用例は、昔、盛岡城の石垣修理絵図の中の説明に、はばき石垣を描く事例の紹介に、私が使ったことで、今では一般化した。』『はばきとは、脛巾と書き、脛にはばきを巻き付けて紐で結び、脚を保護するためのもので、脚絆ともいう。』『はばき石垣とは、修理をした石垣の可能性が高いということで、2重石垣の意ではないと思います。』

『「鞆石垣」とは刀の「鞆」の反りかえり形状を、熊本城の石垣の勾配に見立てたことばである。』『熊本城を描く『石垣秘伝之書』には、鉛直高(本高)10間(18m)以上の石垣で勾配の基準が変わる。こうした「高石垣」を「鞆石垣」を呼称するのであろう。』

3 熊本城城郭はばき補強例

富田に提供していただいた熊本城縄張り図を背景に筆者が確認しているはばきなどの位置を図-1で機能別に示した。はばき補強を広く解釈して4種類の位置を示した。北垣の定義に沿ったはばきの位置を(□)で示した。富田の熊本城城郭石垣変遷史²⁾では時代が二重に付記されている箇所がある。重なる時代の個所は隠れ石垣の可能性が高いので(⇒)で示した。さらに北垣の定義で反りを持つ高石垣を鞆石垣としているので(△)で示し

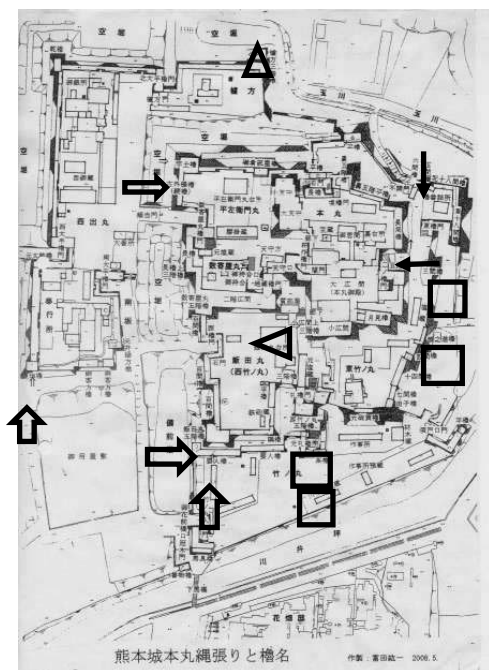


図-1 熊本城におけるはばき



図-2 熊本城城郭におけるはばきなど補強

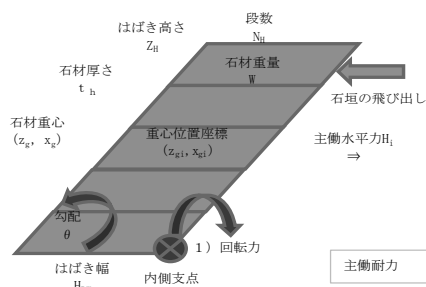


図-3 はばきの主働回転水平耐力

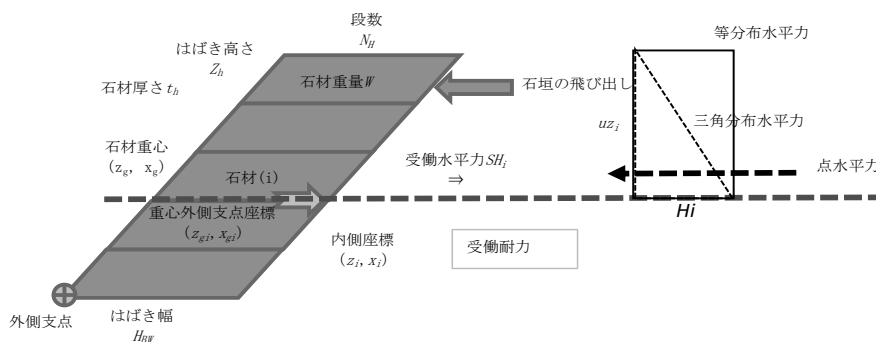


図-4 はばきの受働回転能による水平耐力

た. 熊本城南東部の元硫黄櫓台石垣も鞆石垣に見えるが, 著者にはわからないので付していない. さらに石垣根元ツッパリ位置を(→)で示した. 関連写真を図-2にまとめた.

4 はばきの力学的役割

城郭石垣表面を主役にする, はばき補強の安定性に対する力学的意義として二つ機能が考えられる.

- 1) 主役の石垣表面への水平力の強制作用
- 2) 主役石垣の外側への飛び出しに対する抑止力

意義1) は水平力を積極的に作用させることであるから, 例えばはばきの回転力やアンカーのような緊縮力が考えられる. 特にもたれ擁壁のように回転力に期待することが基礎になる.

意義2) は, はばき自体の抗体力で主役の飛び出し

を抑制する. 石垣積層体のせん断抵抗と石材の自重回転能などによる全体的な回転抑止力が考えられる. 表現としては主働的な水平力の作用と受働的なせん断力による抑止力と呼ぶことができる.

はばきの自重回転能による水平耐力は, はばきの石垣側支点(内側支点)を中心にして, 石垣側に積極的に転倒しようとする回転能で発生すると考える. 従って図-3に示すようにはばき内側支点に対する石垣側への主働的な回転力を計算することになる. はばき石材は均質形状で, 幅を H_{BW} , 厚さを t_h , 段数を N_H とする. また石材1個の重量を W , 石垣相対座標の重心位置を (z_g, x_g) とする. 下段から上方向に段数を数えるとして, (i) 段目の石材を考える.

$$H_i = \frac{W}{F_s} \left[\tan\left(\frac{\tau}{2} - \theta\right) - \frac{H_{BW}}{2} \frac{1}{(i-1)t_h + z_g} \right] \quad (1)$$

次に、はばき外側支点を中心とする回転能をを考える。石材(i)に作用する水平力として図-4に示すように点水平力、等分布水平力、そして三角形分布水平力を考える。等分布水平力および三角形分布底辺水平力を H_i とする。点水平力も H_i とする。

石材(i)底辺のせん断抵抗、石材(i)から天端までの石材個々の自重回転能との釣り合いから期待水平力を誘導する。

まずせん断抵抗からの誘導結果を示す。

$$H_i = \frac{\rho g t_h H_{BW} \tan(\varphi)}{F_s} (N_H - i + 1) \quad (2)$$

$$H_i = \frac{\rho g H_{BW} \tan(\varphi)}{F_s} \quad (3)$$

$$H_i = \frac{2\rho g H_{BW} \tan(\varphi)}{F_s} \quad (4)$$

点水平力が式(2)、等分布水平力が式(3)、三角形分布水平力が式(4)として誘導される。

次に外側支点に対する個々の石材の自重回転能との釣り合いから水平力を誘導する。

$$H_i = \frac{R}{F_s [(i-1)t_h + z_g]} \quad (5)$$

$$H_i = \frac{2R}{F_s (N_H + i - 1)(N_H - i + 1)t_h^2} \quad (6)$$

$$H_i = \frac{6R}{F_s (N_H + 2i - 2)(N_H - i + 1)t_h^2} \quad (7)$$

点水平力とすると式(5)、等分布水平力を考えると式(6)、三角形分布水平力では式(7)が誘導される。

5 はばきの幅と高さ

はばきによる石垣補強は城郭石垣の根元が対象になる。根元部の石垣勾配は近似的に矩勾配になる。根元と頂点を結ぶ勾配を規勾配と定義する。熊本城郭石垣の矩勾配は図-5に示すように $40^\circ \sim 65^\circ$ である。そこではばきの計算例として矩勾配 60° の場合を検討する。

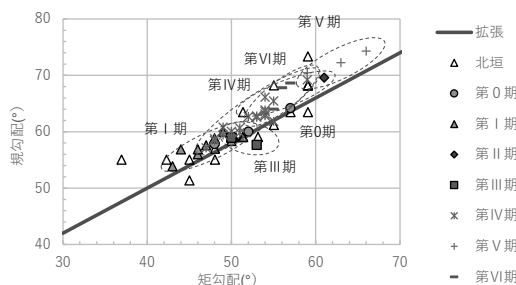


図-5 熊本城城郭石垣変遷史

高さ6mとして幅を0.4mから3mに広げていく場合の主働期待水平力を計算する。幅を広げると期待水平力は増加するが、下部には補強意義が期待できない部分が現

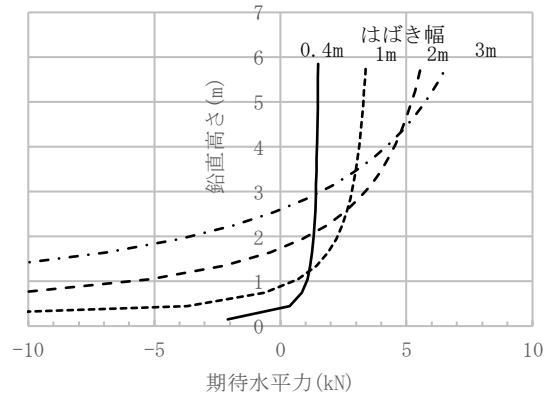


図-6 主働回転能から誘導した期待水平力

れる。幅を広げると、はばき上部での期待水平力は増加するが、下部では期待する回転力が発揮されない。式(1)からはばき勾配 θ を小さくすることで期待水平力を増加させることが可能である。しかしその場合はばきと城郭石垣の間にはばきが回転する空間を設ける必要がある。

従って、はばき内側支点を中心とする主働期待水平力とするはばき補強モデルでは補強効果を発揮することは困難と考えなければならない。

はばきのせん断力に期待する場合の計算例を示す。誘導式は式(2)~式(7)である。はばき勾配 60° 、高さ6m、幅2mで計算した。図-7の細線はせん断抵抗、太線は自重回転能の釣り合いから求めた線である。実線は点水平力による式(2)、(5)から得られた計算結果で、左上から右下に増加する傾向を示す。また鉛直に近い線で示されるのは等分布と三角形分布水平力で式(3)、(4)、(6)、(7)から得られる結果である。

本論文でははばき補強効果を等分布水平力による動的安全率の増加として評価を試みた。図-7は安全率3を加

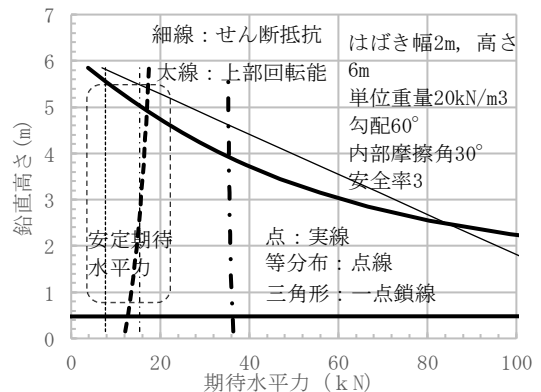


図-7 せん断力と自重回転能から誘導した期待水平力

味したはばきはばき効果であるから、等分布水平力に着目すると図の安定期待水平力の存在域が対象になり、10kN程度が期待される。

6 熊本城宇土櫓台石垣はばき補強検討例

熊本城宇土櫓台石垣西側は写真-1 に示すように根元上部にはらみが発生し、その補強としてはばきの導入が計画されている³⁾。資料では高さ約 13m にはらみがあり、高さ約 8m 付近のはらみを押さえるはばきが計画されている。

本研究で設定したはばきモデルを薄膜骨格モデル⁴⁾に組み入れてはばき効果を検討する。計算例として宇土櫓台西側城壁石垣を取り上げる。高さ約 20m で、熊本城城郭石垣では一番高い石垣である。2016年熊本地震相当の地震力をバネ力として作用させた。2016年熊本地震直後の宇土櫓台西側城郭石垣の孕みが根元付近で発生している。



写真-1 熊本城宇土櫓台石垣とはらみ

薄膜骨格モデルでは、2016年熊本地震力に相当すると考えた図-8に示す水平バネ力を入力している。伝播定数 $p=0.055$ として一次モードで変位を入力し、バネ係数 $0.5kN/cm$ としてバネ力を与えた。地盤変位は2016年熊本地震に相当する最大加速度から、応答スペクトルを用いて加速度に相当する変位を求めた。基盤入力変位は $2.131cm$ である。そして調和振動関数を用いて一次モードで増幅比を計算してバネ力を与えた。

2016年熊本城石垣崩壊箇所での流動角度から安息角を求め、裏込め材料の内部摩擦角を決めた。 30° になる。

2016年熊本地震では宇土櫓台石垣ははらみは生じたものの、崩壊までは至らなかった。裏込め内部摩擦角をパラメータとした動的安定解析結果を図-9に示す。この状態を参考に宇土櫓台の初期状態を決めた。

富田²⁾によれば宇土櫓台は時代が異なる石垣で多層化されている。著者の言葉で言えば隠れ石垣が存在する。図-10のように宇土櫓台石垣は二重の時代とされる。こ

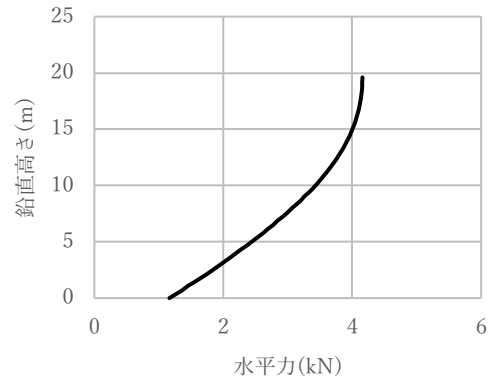


図-8 スプリング力

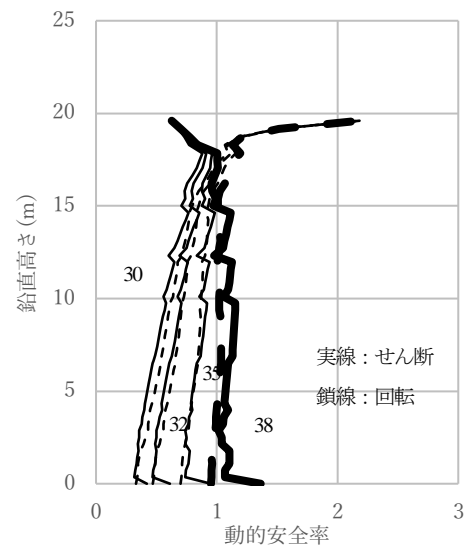


図-9 裏込め内部摩擦角と動的安定率

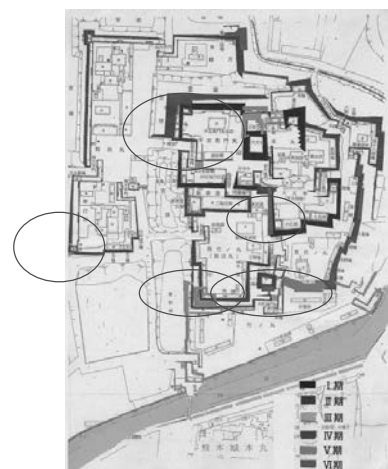


図-10 隠れ石垣背景②

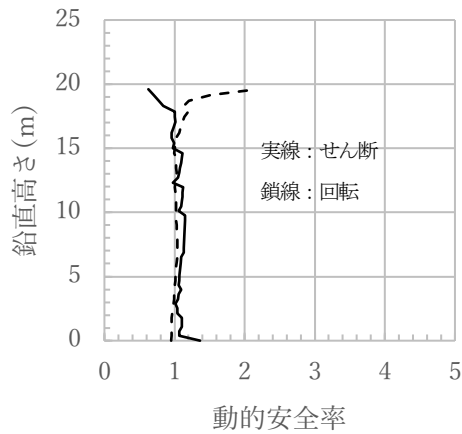


図-11 補強効果を調べる初期状態動的的安全率

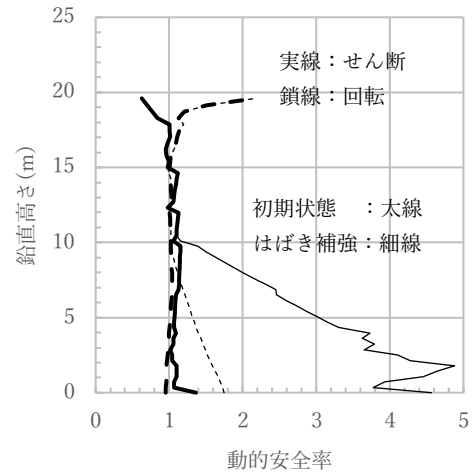


図-13 幅2m高さ10mはばきによる補強効果

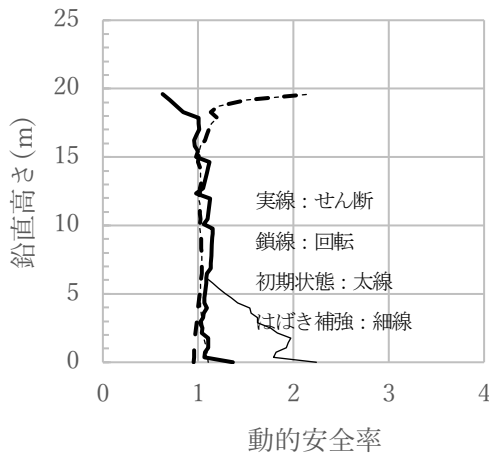


図-12 幅2m高さ6mのはばきによる補強効果

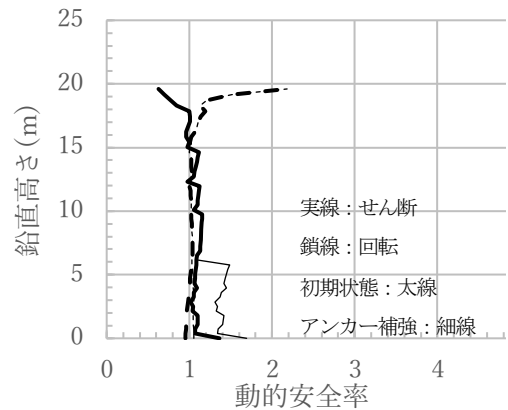


図-14 高さ約5m付近にアンカーをセットした場合の補強効果

これまでの熊本城の安定解析結果では、未申櫓台石垣では隠れ石垣が幸いして崩壊を免れ⁵⁾、飯田丸五階櫓台南面石垣は隠れ石垣が存在したが崩壊した⁶⁾。飯田丸五階櫓台隠れ石垣はやや奥にあったと考えている。宇土櫓台石垣の安定解析結果では裏込め内部摩擦角を通常 30° とすると崩壊する結果になる。このため崩壊することなく、しかし、地震ではらんだ石垣状態と考えた安全率にするためには内部摩擦角を 38° にしなければならなかった。隠れ石垣効果を考えなければならぬ結果である。

はばき補強効果を調べる基準にしたのが図-11に示す初期状態動的的安全率である。

幅2m高さ6mのはばきでは、高さ2m~5m程度の間約10kNの水平力が期待できるとして動的的安全率の改善度を求めた。初期状態として天端付近で動的せん断安全率が1以下の部分が存在するが、その存在は今後の課題に残して、その1以下には触れずに、はばき効果を調

べた。この結果動的せん断安全率、動的回転安全率は5m以下では改善されている。動的せん断効果は大きい。動的回転安全率の増大度は小さい。

幅2m高さ10mのはばきによる補強効果は動的回転安全率の補強効果は明瞭である。高さ6m、10mのはばき効果を考えると、補強目的鉛直高さ以上の高さのはばきが必要とされることは明らかである。また幅2m程度のはばきでも補強効果は十分向上することも明らかである。

薄膜骨格モデルでは水平力は容易にプログラムに組み入れることができる。その容易さの延長上にアンカーによる石垣表面固定補強がある。アンカー1本を想定して、作用する鉛直高さ、締め付け力効果を調べた。鉛直高さ約6m付近で50kNを与えた場合は動的せん断安全率の増加は明瞭であるが、動的回転安全率の増加は小さい。

鉛直高さ約15m付近でアンカーをセットして石垣表面を締め付けた場合、10kNでは補強効果は小さいが、締め付け力50kNにすると動的的安全率の向上は明らかになる。

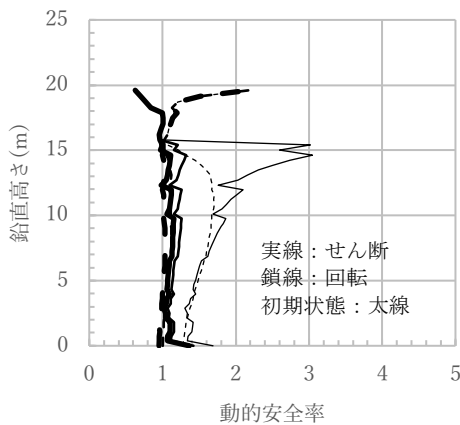


図-15 高さ約 15m 付近にアンカーをセットした場合の補強効果

10 はばき補強の地盤工学における意義

はばき補強効果を等分布水平力として評価すると、安定した期待水平力はせん断抵抗力から得られる。石材自重回転能に依拠して定義すると、その補強レベルは高さ効果を考慮しなければならぬので力学的安定性の評価は複雑になる。

宇土櫓台西側石垣を対象に、はばき補強効果から期待される等分布水平力を作用させて検討した。裏込め内部摩擦角、隠れ石垣と現在表面石垣の離隔などわからないことが多いため、初期値の設定は確定しない。本論文では 2016 年熊本地震では辛うじて崩壊を免れたとして初期値を設定した。

しかしはばき補強効果の意義は明確にできた。概略的な検討では、低はばきの効果は不明確であり、宇土櫓台石垣のように高石垣補強に対しては高はばきを目指さなければならないことを示した。北垣の定義で言う鞆石垣のようなはばきが求められる。

2016 年熊本地震による城郭石垣は概略石垣の上部の崩壊が目立つ。図-16 は図-11 の初期状態から地震の影響を除外した静的安全率を示した。宇土櫓台西石垣は回転に比べて安全率は 1 以上であるが、せん断安全率は高さ約 10m から上に向かって減少する。文献資料³⁾によるはばき高さよりも上の部分のせん断安全率の減少が特徴である。本論文では言及しなかった図-11 初期状態の天端付近の 1 以下の安全率は静的安全率の傾向を反映していると解釈することができる。従って宇土櫓台西側石垣のはばきは高さ 10m 以上の鞆石垣を考える必要がある。

高石垣の動的補強としてのはばき工法ははばき下部の躯体が効率的には作用しない。それに比べて、補足的に行った解析では、はばき効果に比べてアンカーによる補強効果は明瞭である。

宇土櫓台西側石垣補強としての高はばき補強は大きく現存景観を変えることを意味する。補強する石垣の反りを含む多くの部分が隠れ、現存景観を変えることになる。そうするとオーセンティシティが要求される保存からかけ離れ、補強すべき石垣の景観は見えないようになることが予想される。

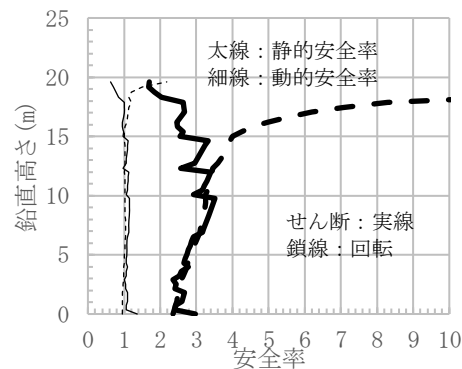


図-16 宇土櫓台西側石垣静的・動的 safety rate

11 おわりに

はばき補強の機能をせん断抵抗、自重回転能を介して意義を検討した。盛土法面法尻抑え盛土工法に類似した機能である。城郭石垣の動的補強としてはばき工法は伝統的工法になるが、機能的には効率が悪い補強工法と考えられる。また静的状態ではなく、動的不安定性を補強する意義を持たせるためには鞆石垣にならなければならないことを示した。新たな石垣でオリジナル石垣を被覆することになる。オーセンティシティ概念では、はばき補強は専門分野の総合力で判断しなければならない選択肢である。

はばき補強モデルの視座によれば熊本城石垣根元部のいわばツッパリはばき機能に期待することは意味がないことは明らかである。しかし実際の効果を調べるためにはさらなる情報収集が必要である。

参考文献

- 1) 北垣聡一郎：もの与人間の文化史 58 石垣普請、法政大学出版局、2006。
- 2) 富田紘一：熊本城 歴史と魅力、熊本城顕彰会、pp.44-63、2008。
- 3) 熊本城修復検討委員会：資料 5-2 宇土櫓続櫓下石垣 (H443) の復旧措置の検討、2021。
- 4) 福田光治：熊本城石垣曲線と静的・動的安定性、第 37 回土木学会地震工学研究発表会、2017。
- 5) 福田光治：熊本城城郭石垣控えと動的安定性、2019。
- 6) 福田光治：熊本城飯田丸五階櫓台石垣隠れ石垣と動的安定性、土木学会土木史研究発表会、2020。

(2022. 4. 18 受付)