資料3-2

宇土櫓石垣の安定性検討

1. 宇土櫓の調査結果概要と断面モデルの設定

本検討の目的は、宇土櫓石垣の現状の耐震性能を知ることであり、熊本地震後の状況を反映したものである。図 1 に、今回の調査を実施し、検討断面を設定した宇土櫓石垣の位置を示す。宇土櫓下石垣については、北面、西面とも五階櫓のほぼ中央の位置（北面、西面検討断面）で調査断面を設定した。続櫓下石垣は、はらみ出しの大きい位置に検討断面（西面続櫓検討断面）を設定したが、レーダー探査のできない石垣崩落防止ネットがあるため、調査断面についてはネットを外れた位置に設定した。

図 2 に宇土櫓北面石垣の、図 3 に宇土櫓西面石垣の、図 4 に続櫓西面石垣の検討断面の検討モデルを示す。

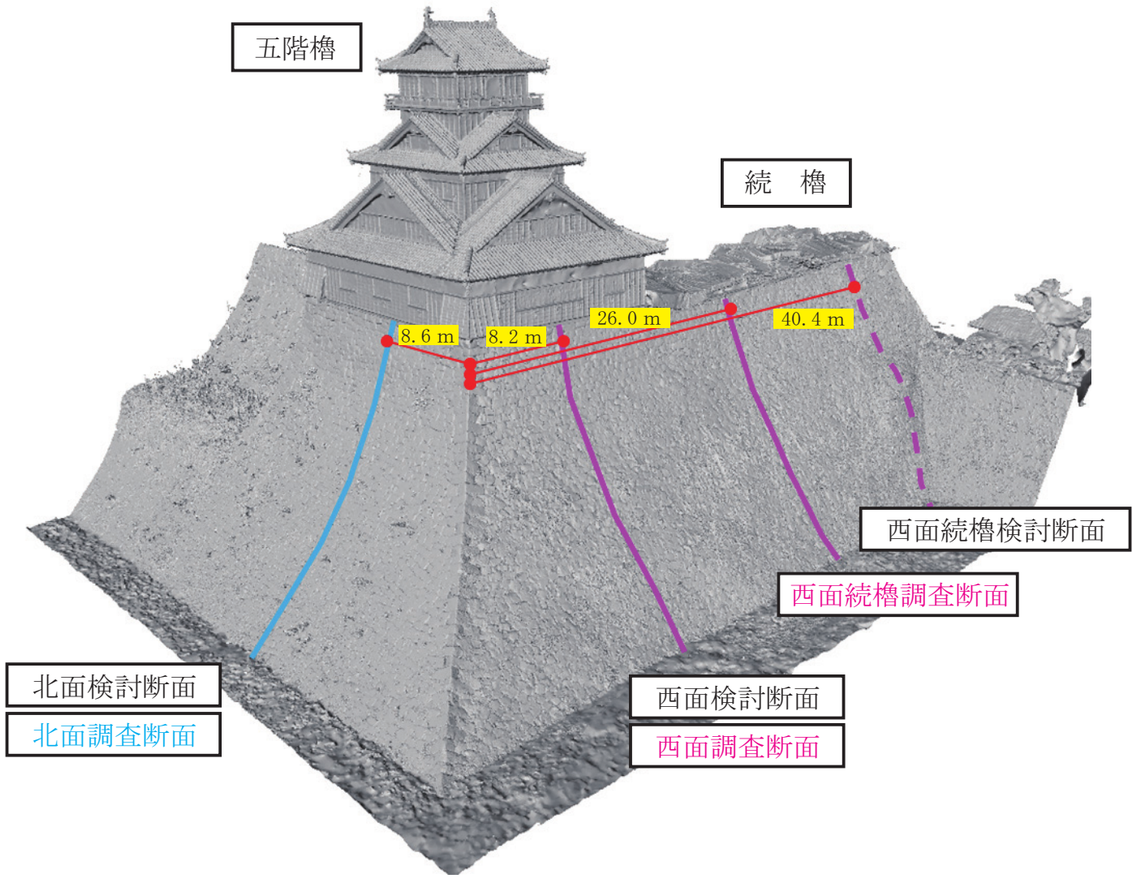


図 1　宇土櫓石垣の調査断面位置

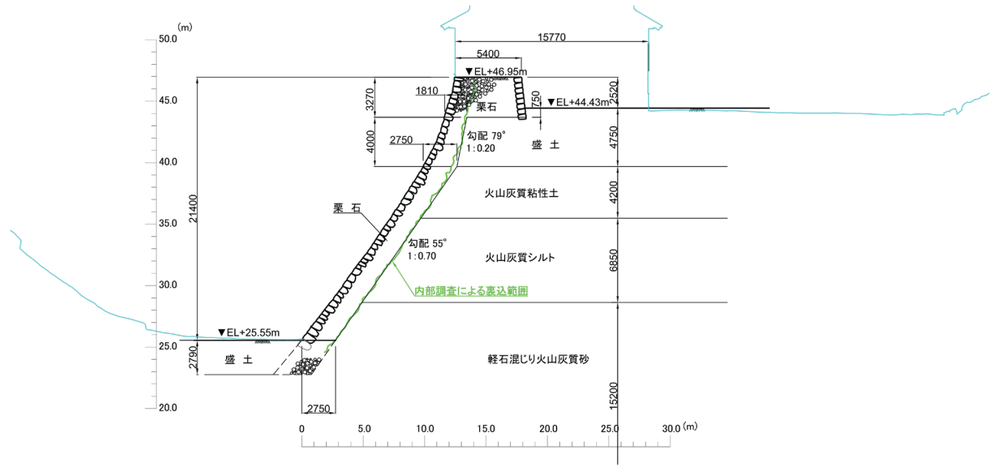


図 2　宇土櫓五階櫓北面検討断面の検討モデル

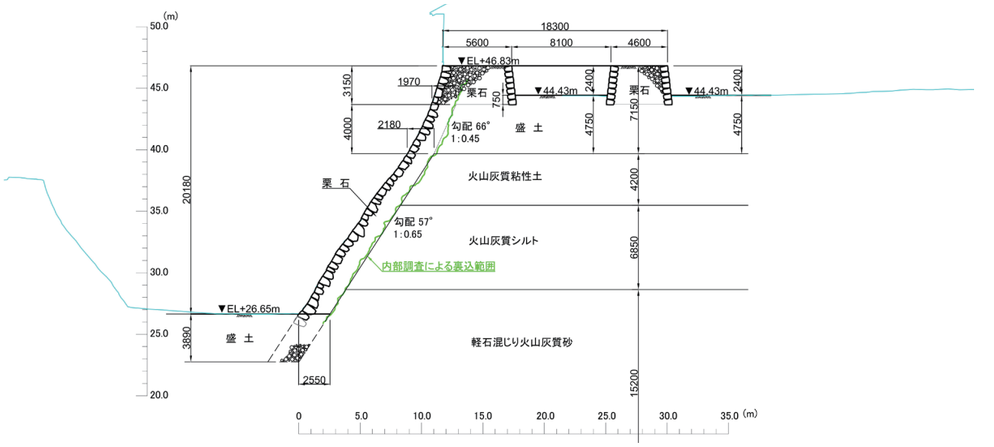


図 3　宇土櫓五階櫓西面検討断面の検討モデル

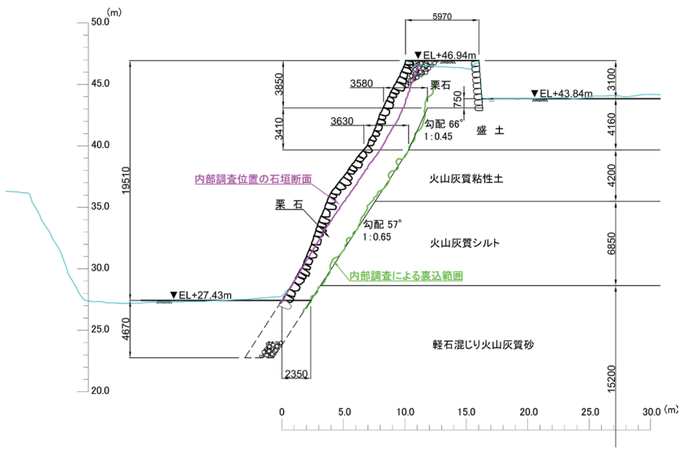


図 4　宇土櫓続櫓西面検討断面の検討モデル

2. 宇土櫓石垣のはらみ出し指数および形状変化

2.1　北面石垣のはらみ出し指数および形状変化

北面石垣の断面を 2m ピッチで表示し、はらみ出し等の変状を確認した（図 5，表 1 参照）。表 1 に示すはらみ出し指数では、従来の研究で示されている石垣の安定性に影響を与える可能性のある 6 以上の値（以下基準値という）が 2 箇所で見られるが、勾配が緩やかな部分であり、はらみ出し範囲は小さく、はらみ出し量も 20cm 以下である。

また、昭和 59 年 8 月の測量による石垣形状と今回の測量結果を比較すると、石垣下部でややはらみ出しが見られ、石垣頂部では築石の内側への倒れが見られるが、地震の影響は小さいものと考えられる。

表 1　宇土櫓五階櫓北面石垣のはらみ出し指数

断面位置	宇土櫓台下石垣					
	①	②	③	④	⑤-上	⑤-下
最大はらみ出し量 δ (cm)	20	18	17	18	18	18
はらみ出し高さ Hd (m)	3.20	3.88	4.27	3.52	3.35	2.21
はらみ出し指数 δ/Hd	6.3	4.6	4.0	5.1	5.4	8.1

2.2　西面石垣のはらみ出し指数および形状変化

図 6 に西面石垣のはらみ出し状況を、表 2 に図中の番号に対応する断面のはらみ出し指数を示す。宇土櫓五階櫓下の断面では、石垣の下半部にはらみ出しが生じている。はらみ出し指数としては 7 箇所で基準値の 6 を超えており、最大値は 10.9 である。これらのはらみ出し自体は、勾配が緩やかな部分であることやはらみ出しが熊本地震の影響をあまり受けていないと考えられることから、安定性に大きい影響はないものと考えられるが、昭和 59 年の測量データとの比較では、石垣勾配が全体にやや大きくなるような変化が見られている。

続櫓下の断面では、今回の検討断面を中心としてかなり大きいはらみ出しが認められ、はらみ出し指数で 9 から 15、はらみ出し量で 63cm から 85cm の範囲が 4 断面に渡っていることから、この部分に大きい変状があることが示されている。この変状の影響で、図 4 の検討モデルで見られるように他の断面に比べてはらみ出しが生じた影響で栗石層幅が大きくなっている。

表 2　宇土櫓西面石垣のはらみ出し指数

断面位置	宇土櫓台下石垣														宇土櫓続櫓下石垣						
	①	②	③	④	⑤	⑥-上	⑥-下	⑦-上	⑦-下	⑧-上	⑧-下	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰-上	⑰-下
最大はらみ出し量 δ (cm)	22	14	12	14	20	30	18	15	15	28	34	30	49	48	28	63	85	77	68	21	26
はらみ出し高さ Hd (m)	3.33	3.20	2.19	2.68	5.03	2.74	3.09	3.07	2.63	3.96	5.51	4.83	6.03	5.32	4.81	9.95	8.90	6.64	4.52	3.92	2.84
はらみ出し指数 δ/Hd	6.6	4.4	5.5	5.2	4.0	10.9	5.8	4.9	5.7	7.1	6.2	6.2	8.1	9.0	5.8	6.3	9.6	11.6	15.0	5.4	9.2

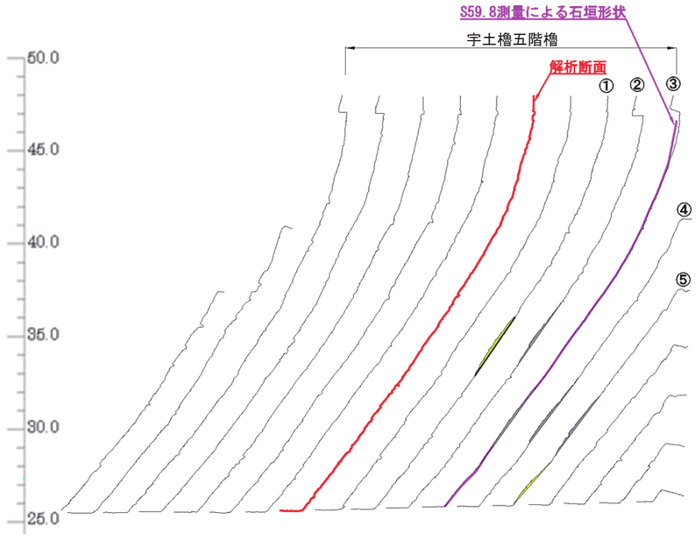


図 5　宇土櫓五階櫓北面石垣の断面とはらみ出し状況

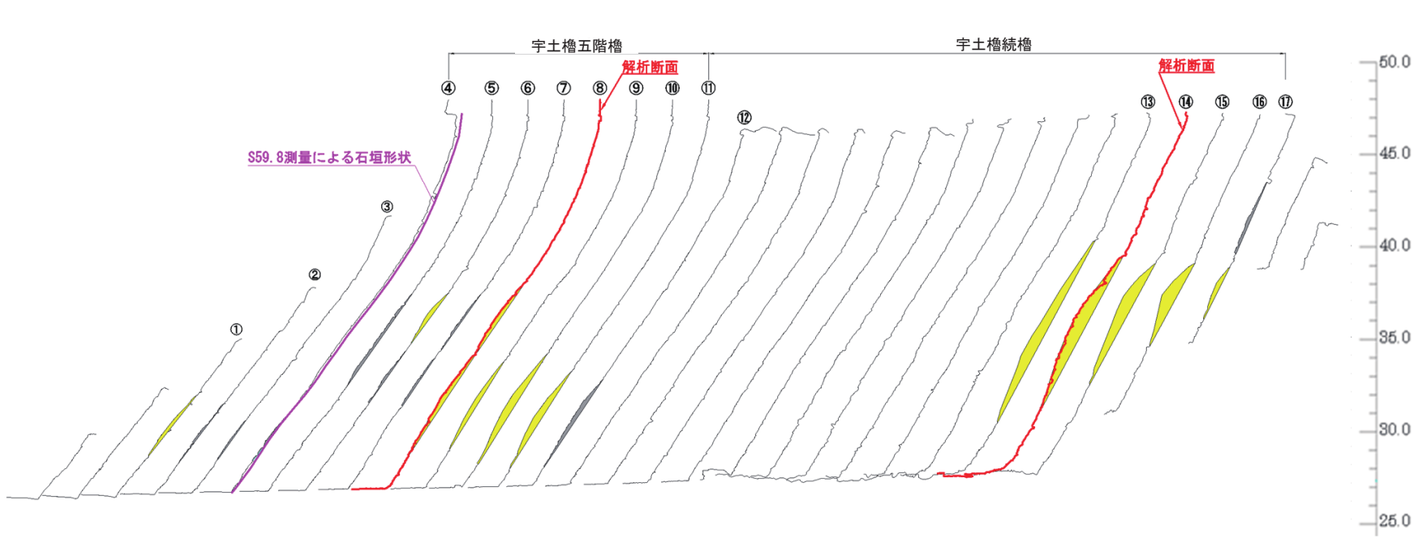


図 6　宇土櫓西面石垣の断面とはらみ出し状況

はらみ出し指数 > 6.0

3. 宇土櫓石垣の DEM 解析による地震時安定性検討

3.1　解析モデルおよび解析条件

宇土櫓石垣の解析に用いた解析モデルは、検討断面の築石、栗石層および建造物荷重（54.7kN/m を仮定）をモデル化したもの（図 7 参照）であり、①静的水平震度を載荷した解析および②長塀の石垣下端で設定した熊本地震相当の入力地震動を加えた動的解析を実施した。なお、穴蔵の石垣については詳細が不明のため、勾配を 1:0.1（84.3°）、築石の胴の長さを約 70cm として、根石より上部をモデル化した。

①静的水平震度の載荷方法は、モデル全体に一様な震度を与えることとし、所定の値まで徐々に震度を増加させて一定の値となったところで、釣合状態となり、安定するか倒壊するかを追跡した。その所定の震度をパラメータとして解析することにより、安定性限界となる静的水平震度を求めた。②動的解析については、加速度波形を用いて、築石および栗石の応答計算を行い、地震前後の変状を検討した。

なお静的震度 k_h ＝ 0.2 は、Ⅱ種地盤におけるレベル 2 地震相当である。

3.2　北面石垣の DEM 解析

静的水平震度を加えたパラメータスタディでは、k_h ＝ 0.22 までの条件で釣合状態が得られたが、k_h ＝ 0.23 の条件で倒壊するという結果が得られた。また、動的解析においては設定した入力地震動では変形は生じるものの倒壊に至らず、最大加速度を 1.2 倍した入力地震動で倒壊に至る結果となった。

破壊性状は、静的安定性解析では、穴蔵部分が全体に堀側に崩れる形式となり、動的解析では石垣部分が堀側に崩れる形式となった。

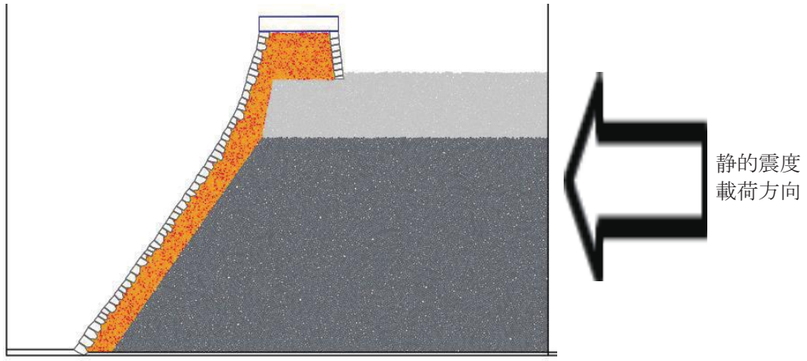


図 7　宇土櫓五階櫓北面石垣の DEM 解析モデル

3.3　西面石垣の DEM 解析

西面検討断面の DEM 解析モデル（図 8）を作成し、静的安定性解析および動的安定性解析を実施した。解析条件等は、北面石垣と同様とした。

西面石垣では、静的安定解析において k_h ＝ 0.25 で倒壊に至り、倒壊形式は石垣中央のはらみ出し部分から倒壊した。また、動的解析では入力地震動の最大加速度を 0.7 倍までは倒壊せず、0.8 倍した波形で倒壊した。倒壊形式は静的解析と同様に石垣中央のはらみ出し部分からであった。

3.4　宇土櫓西面続櫓石垣の DEM 解析による静的安定性検討

西面続櫓下の石垣については、栗石層のみのモデル（図 9）に重力加速度を載荷した自重解析の段階で倒壊に至る結果となった。

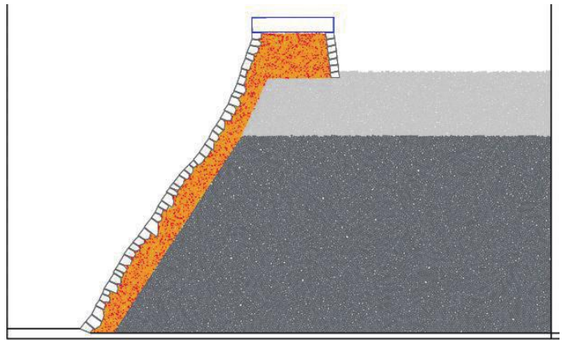


図 8　宇土櫓五階櫓西面石垣の DEM 解析モデル

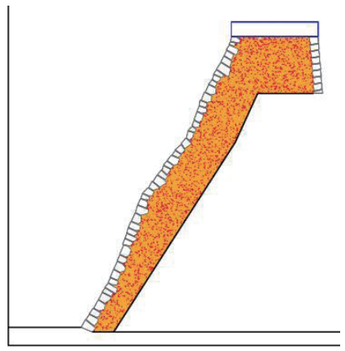


図 9　宇土櫓続櫓下石垣の DEM 解析モデル
（栗石層のみの初期配置）

4. 宇土櫓石垣の安定性検討のまとめ

現地調査では、3D 測量を行い熊本地震前（昭和 59 年）の測量結果と現状の変形状況の比較を行った。

解析的な検討として、DEM 静的解析と DEM 動的解析を実施した。倒壊に至るレベルを確認するため、DEM 静的解析では静的震度、DEM 動的解析では、熊本地震相当の入力地震動（長塀の検討で用いた入力地震動と同じもの）の最大加速度の増減を行った。

＜五階櫓北面石垣＞

- 現地調査によると、熊本地震前と比較し大きな変形は見られない。
- DEM 静的解析では k_h=0.22 まで倒壊せず、0.23 では倒壊するという結果が得られた。
- DEM 動的解析では熊本地震相当の入力地震動に対しては変形を生じるものの倒壊には至らず、最大加速度 1.2 倍の入力地震動で倒壊した。

以上の解析結果から、北面石垣は、熊本地震レベルの地震動に対し大きな倒壊には至らないと考えられる。

＜五階櫓西面石垣＞

- 現地調査によると、下半部にはらみ出しが見られる。熊本地震前と比較し、はらみ出し部分における地震による影響は少ないと考えられるが、石垣勾配がやや大きくなるような変形が見られる。
- DEM 静的解析では k_h=0.24 まで倒壊せず、0.25 では倒壊するという結果が得られた。
- DEM 動的解析では熊本地震相当の入力地震動の最大加速度 0.7 倍に対して石垣中央の孕み出し部分から変形し倒壊した。

以上の解析結果から、北面石垣は、熊本地震レベルの地震動以下で倒壊の可能性があり、はらみ出し部分が強度低下に寄与している可能性が高いと考えられる。

＜西面続櫓下石垣＞

- 現地調査によると中段に大きなはらみ出しが見られる。地震前からも孕み出しは確認されていた。
- DEM 静的解析において、静的震度を加えるまでもなく自重ではらみ出し部分から崩壊に至った。（DEM 動的解析は未実施）

以上より、西面続櫓石垣は、地震動を考慮しない状態でも不安定な状態と考えられる。

上記の安定性検討の結果によると、五階櫓北面は大きな問題はないと考えられるが、西面については、はらみ出し部分に問題があると考えられる。五階櫓西面をはらみだし部分まで解体し積み直すことは、五階櫓北面の概ね健全な石垣にも影響が及ぶことから適当ではないと考える。よって、五階櫓西面が設定地震動でも崩落しない程度の補強を施すことが必要と考える。

西面続櫓下の石垣は、地震動を考慮するまでもなく極めて不安定で、積み直しを含めた石垣修理が必要と判断する。

今後の課題として、DEM 静的・動的解析それぞれの関連性の検証と妥当性の確認が必要である。また、この結果は、2 次元という限られた条件下での解析であることを付記しておく。