

■対象石垣

石門北側（平櫓西側）石垣

■これまでの経緯

【2023年6月 令和5年度第1回文化財修復検討委員会】

●復旧設計対象石垣の被害状況・修復履歴の報告

●石垣復旧措置案（復旧勾配・解体範囲案）を審議

⇒H123、H427、H428、H429、H430、H431、H432、H433、
H434、H435、H437、H440は承認。

⇒**H438・H439については下方法面を含め、変状を評価し再検討する。**

●石垣耐震診断結果、石垣安全対策（現状・在来工法修理後）の報告

⇒H438・H439については、在来工法修理検討方針で承認。

⇒H437については現代工法を伴う修理検討方針で承認。

■今回の委員会での報告・審議事項

1 前回委員会審議指摘事項【報告】

H438・H439下方法面を含めた変状の評価

- (1) 変状調査
- (2) 法面安定性確認
- (3) 解体範囲再検討

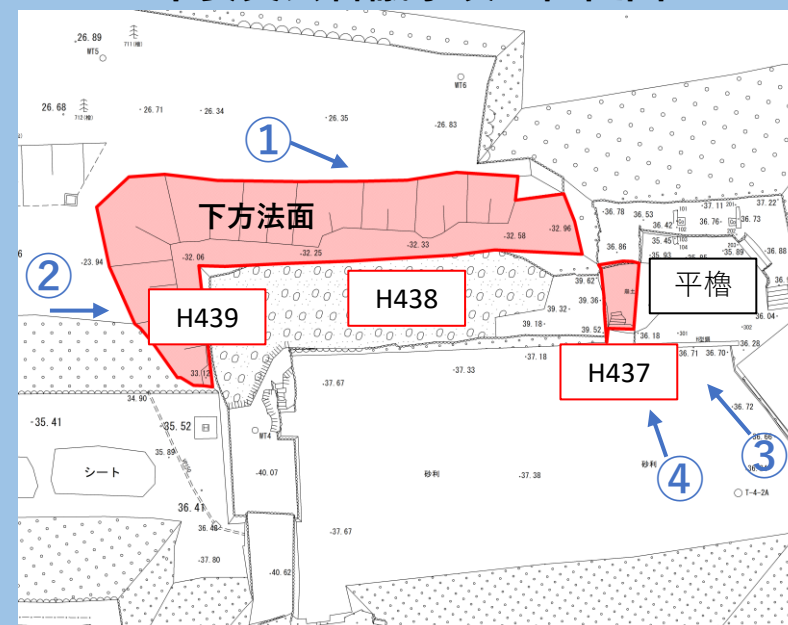
2 H438・H439法面復旧工法【審議】

3 H437・H438（平櫓隣接石垣）現代工法対策【報告】

4 今後の予定【報告】

- 令和5年度内の工事契約～着手
- 石門北側工区と接続部を作業調整し進める。

本委員会審議事項 位置図



① H438下部法面（石材回収後）



② H439下部法面（石材回収後）



③ H437石垣と平櫓（震災前）



④ H437石垣と平櫓（震災後）



1 前回委員会審議 指摘事項【報告】

■ 指摘事項（要約）

震災前後の写真から、角石やその周辺の築石の目地が開いており、また、角石が地震によって急勾配になっているように見えることから、地震によって角石が動いていると考察できる。
土羽法面の地盤の検討が必要。地盤の補強が必要な場合、解体範囲も再検討する必要がある。



H438・H439下方法面を含めた変状の再評価

■ 再評価の観点

以下の項目についてH438・H439の石垣および下部法面を評価した。

（1）変状調査

- ・①現地踏査 ②被災前後の写真比較から、変状状況および変状メカニズムを推定した。

（2）法面安定性確認

- ・H438・H439石垣基礎部となる下方法面の安定性を円弧すべり解析により確認した。

（3）解体範囲再検討

- ・上記の結果を踏まえ、解体範囲を再設定した。



(1) 変状調査 【調査①】 現地踏査

■ 下方法面の現地踏査、既存被災調査資料等を確認。

◆現地踏査結果◆

現地踏査の結果、下部法面について、石垣の崩壊・変状の起因となるような地割れや滑り、段差、隆起は生じていない。



◆震災直後の被災状況調査結果◆

震災直後の地割れを含む石垣被災状況調査が実施済み。その結果、H438の崩落箇所より曲輪側の地盤に**すべりに繋がる地割れ等は確認されていない**ことが報告されている。

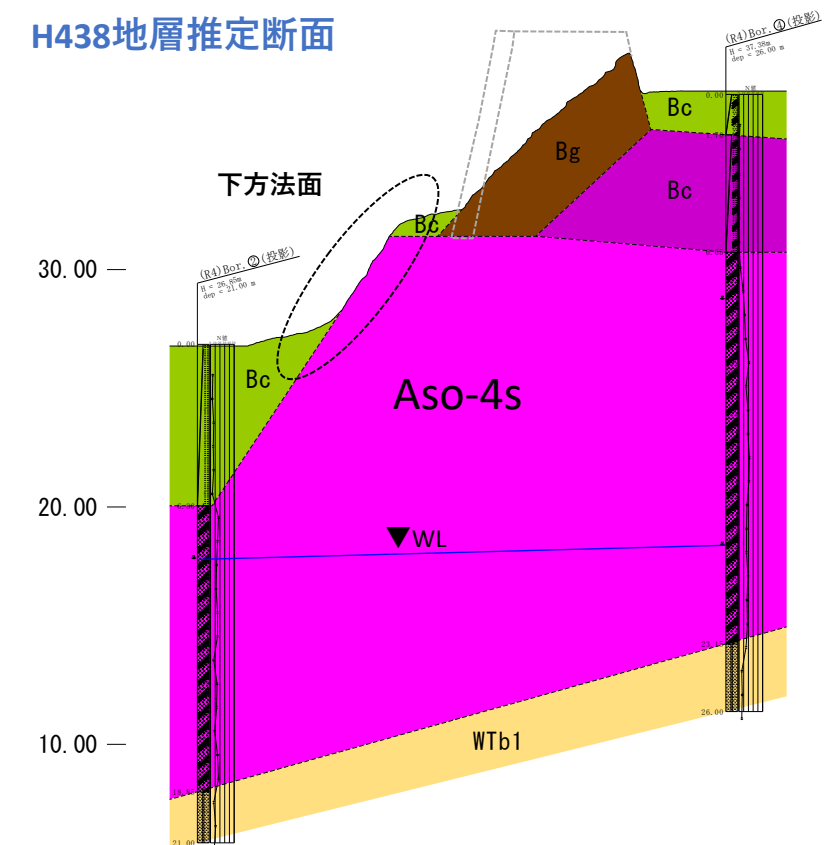
◆地質調査結果◆

H438・H439の基礎地盤となる地層は、地質調査結果から**Aso-4s**（火山灰質砂質土）である。**N値は10以上、勾配は1：0.6程度で安定した法面として自立している**。地下水位も法面より下方で確認されており、**地下水の上昇による法面の崩壊等の懸念もない**。

Aso-4s(火山灰質砂質土)は、特殊土として知られる火山成粗粒土に該当する。シラス台地と類似する点もあり、どちらもガリ浸食が・起きやすい。一般に、火山成粗粒土は、こう結作用により、**乱さない状態の地山である場合、強度が大きいとされている**。また、数十mの鉛直の崖をなして自立することも知られている。

※こう結作用：水に溶解している鉱物成分が泥質・砂質・礫質などの堆積物の間隙に沈殿して、粒子を互いに結合させる作用

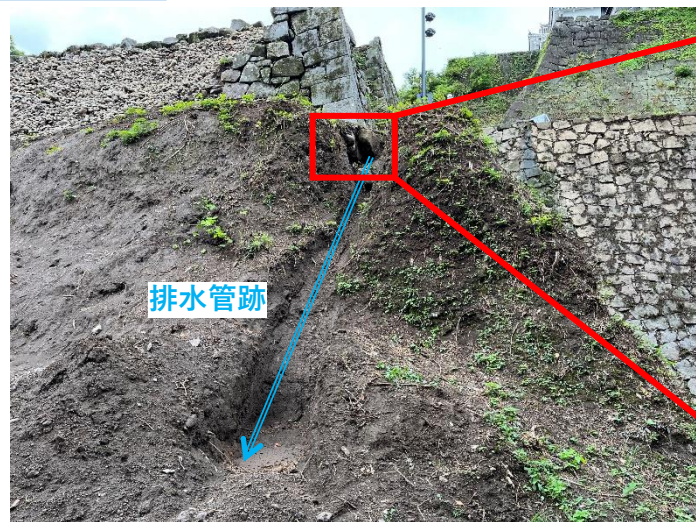
H438地層推定断面



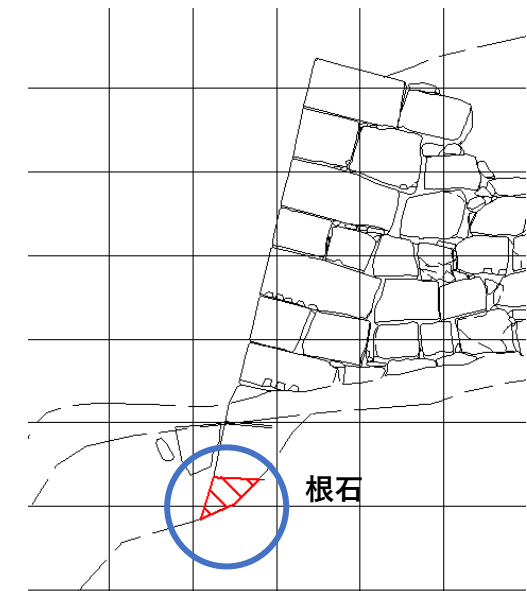
◆H438-H439隅角部根石の洗堀◆

下方法面のH438・H439隅角部は、過去に排水管が法面に敷設されており、熊本地震とは関係なく、その埋め戻し土砂が経年の降雨により流出し、排水管が露見していた。既に排水管は機能しておらず撤去したが、その傍らにある根石周辺が洗堀により大きく空隙が生じていることを確認した。

震災後

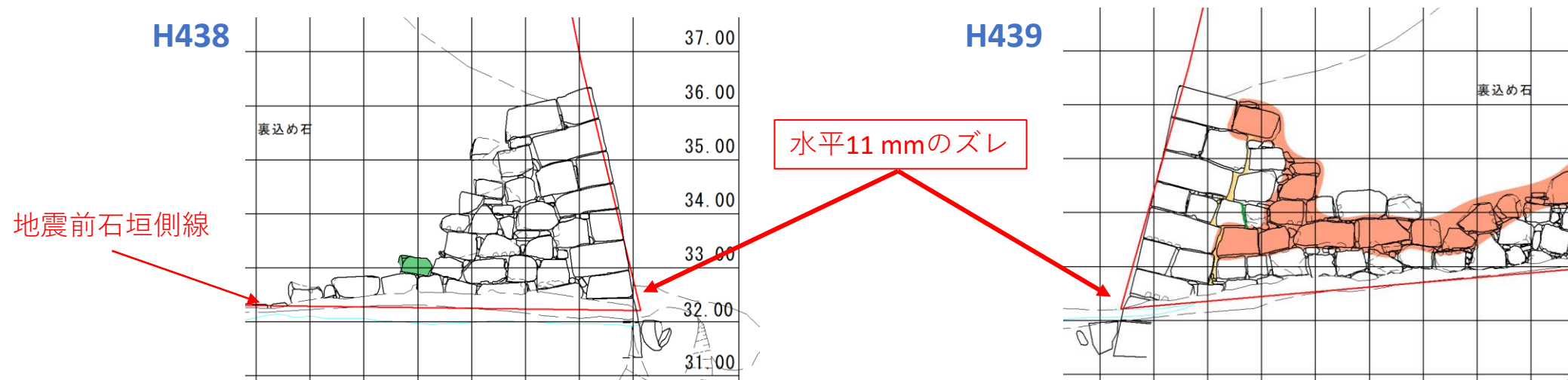


洗堀箇所図（H439）



◆H438-H439隅角部の変動◆

H438-H439隅角部について震災前と震災後の座標値を比較し、面的な移動量を確認した結果、11mmとなった。測量における較差の許容値（約50mm）以内（※）であることから、石垣隅角部に大きな変動はなかったと推測される。



※ 熊本地震に伴う基準点成果の改定（2016）より

(1) 変状調査 【調査②】 写真調査

■ H438・H439 隅角部周辺の石垣の変状について、震災前写真及び崩落石材回収時のオルソ画像をもとに評価を行った。

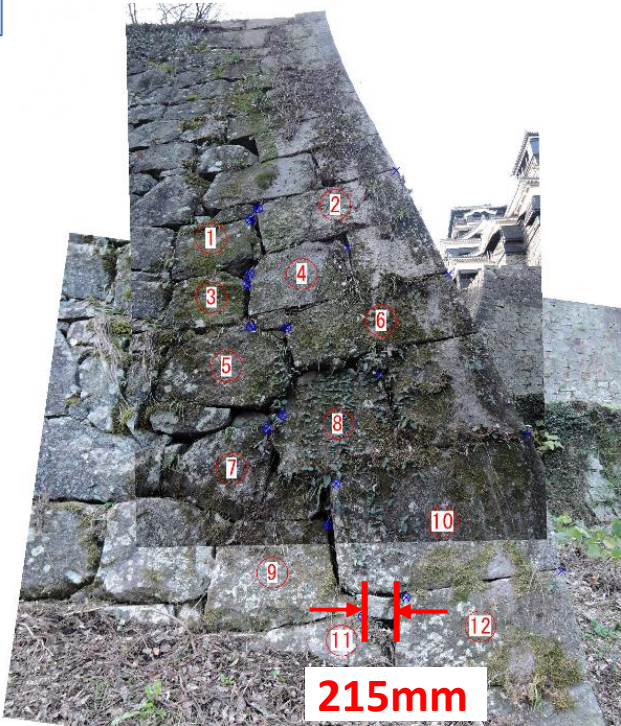
◆縦目地間隔◆

H438側で最大74mm程度、H439側で最大72mm程度の目地の開きが確認された。
震災前の写真はオルソ写真ではなく、清掃もされていないため精度が高いとは言えない参考の数値であるが、少なくとも震災の影響により、隅角部周辺の石垣に変状が発生したことは明らかである。

震災前

H438

図 1



震災後

図 2



- ・地震前後の写真から築石同士の距離を測定。
- ・被災前の写真はオルソ写真ではないため、計測される築石の長さの比から写真による距離のズレを補正した。

表1 図1-2の比較

築石No.		計測距離		変状
左	右	崩壊前	崩壊後	
1	2	92.6	122.5	29.9
3	4	30.3	80.6	50.3
5	6	120.4	134.7	14.3
7	8	41.2	46.2	5.0
9	10	31.8	101.4	69.6
11	12	215.3	289.3	74.1

目地の開き（mm）

H439

図 3

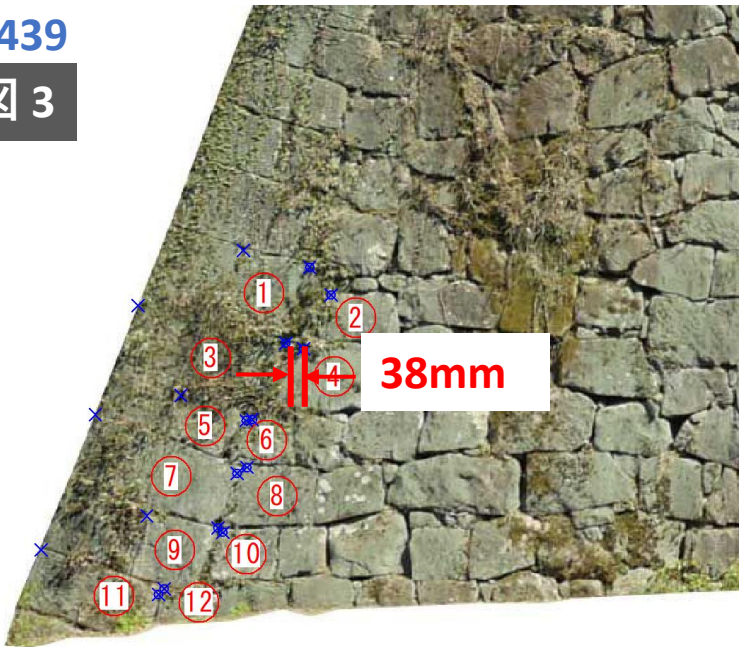


図 4

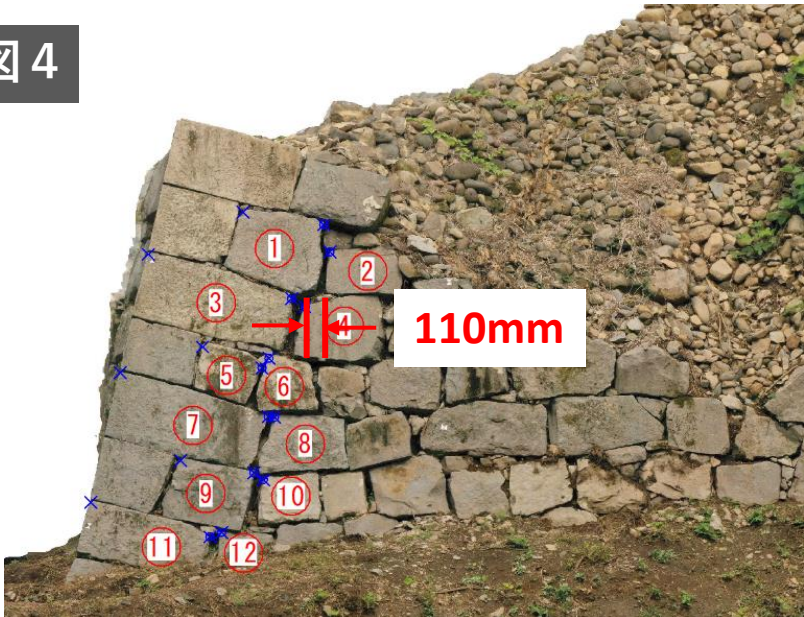


表2 図3-4の比較

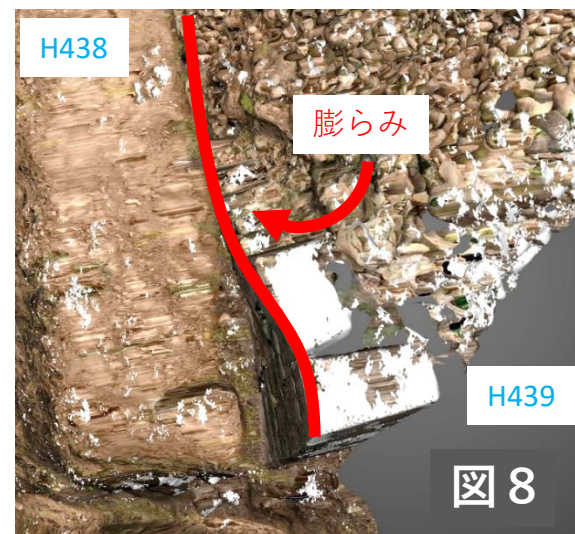
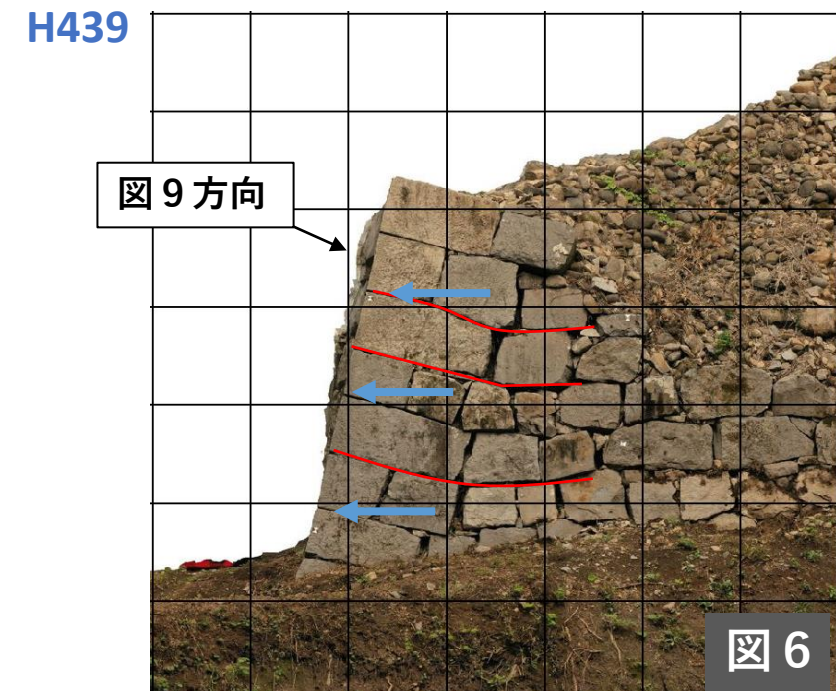
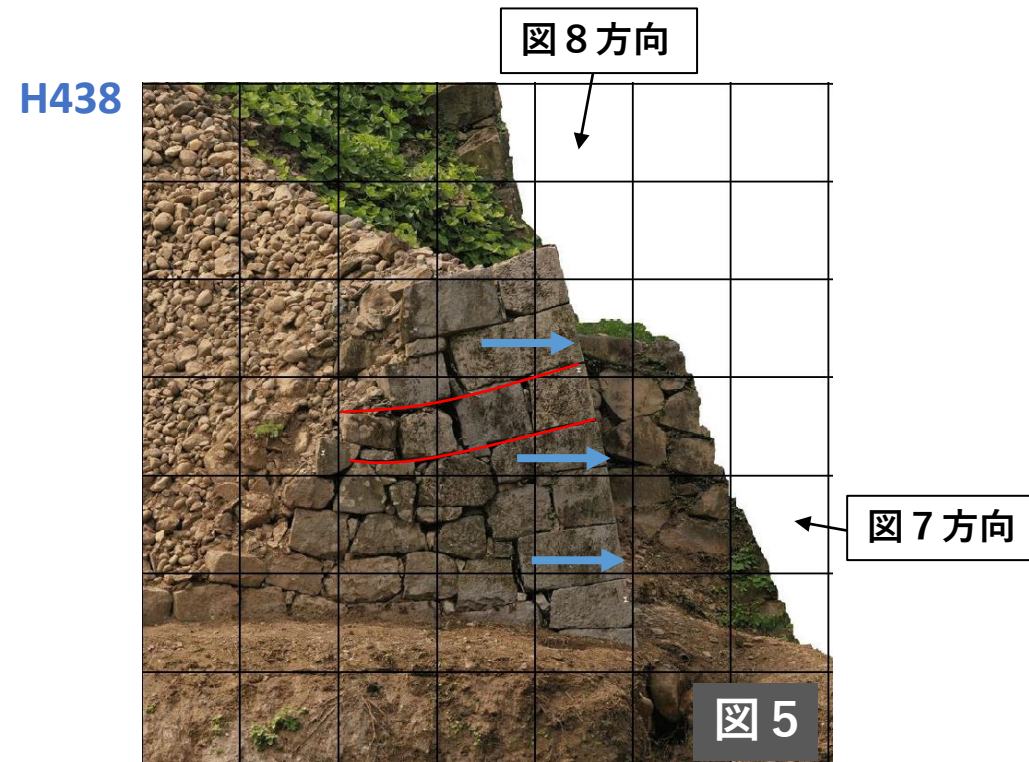
築石No.		計測距離		変状
左	右	崩壊前	崩壊後	
1	2	60.5	73.1	12.6
3	4	38.2	110.2	72.0
5	6	11.7	31.6	19.8
7	8	23.4	53.5	30.2
9	10	33.5	80.1	46.7
11	12	30.6	87.4	56.7

目地の開き（mm）

◆変状考察◆

- ・オルソ画像を確認すると縦目地と交わる横目地にズレは生じておらず、局所的な沈下が発生していない。
- ・変状の動きとしては、縦目地・横目地の動きから、地震動による隅角部全体の水平移動が生じていると想定。（図5・図6）
- ・また、縦目地の開きは、築石の崩落に伴う膨らみによるものも要因の一つとされる。（図7・図8・図9〔3次元データ〕）

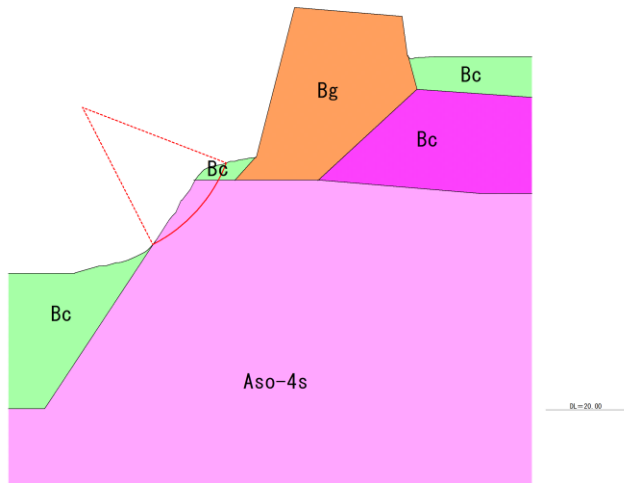
→以上のことから、変状は複合的な要因によるものといえる。



(2) 法面安定性確認

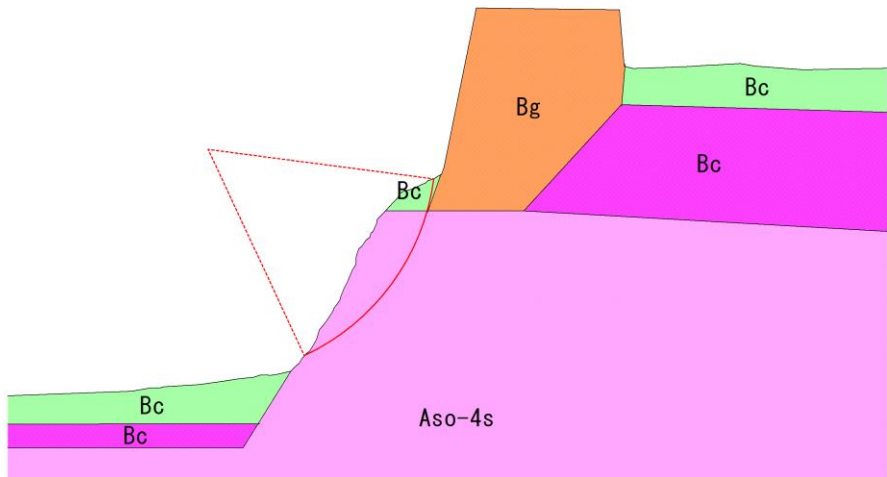
- 目的：前述のとおり、震災による法面の崩落・地割れ等に伴う石垣の変状は生じていないことを確認したが、今後の石垣及び法面の安定性確保の観点から、H438・H439 において石垣下方法面の円弧すべり解析で安定計算を実施。
- 結果：常時・地震時ともに**必要安全率は満足する**ため、下方法面及び石垣について崩落の懸念はない。

H438



安定計算結果					
項目		記号	単位	常時	地震時
計算結果	安全率	Fs	-	2.616	2.035
	計画安全率	Fsp	-	1.200	1.000
	必要抑止力	Pr	kN/m	-56.0	-48.9

H439



安定計算結果					
項目		記号	単位	常時	地震時
計算結果	安全率	Fs	-	1.644	1.256
	計画安全率	Fsp	-	1.200	1.000
	必要抑止力	Pr	kN/m	-58.8	-39.3

熊本城石垣基礎耐震診断実施要領（案）に示された必要安全率を満足する

【評価と対応方針】

◆調査結果◆

- 下部法面の地割れ・すべりの痕跡は認められない。ただし隅角部の根石は洗掘に伴い露見・空洞化している。隅角部の縦目地には連続して開きが生じているが、以下の複合的な事象が要因であると想定した。
- ①築石の崩落による膨らみ
- ②根石の空洞・露見により不安定化した隅角部全体が地震動により水平方向に変位
- 下方法面の沈下は生じていないが、隅角部周辺の築石は変位が生じており、根石の洗掘による不安定化も原因の一つである。
- ◆円弧すべり解析◆下部法面においてすべり性崩壊に対する安定性を確認。

◆対応方針 1◆

根石を含めた解体範囲の再検討

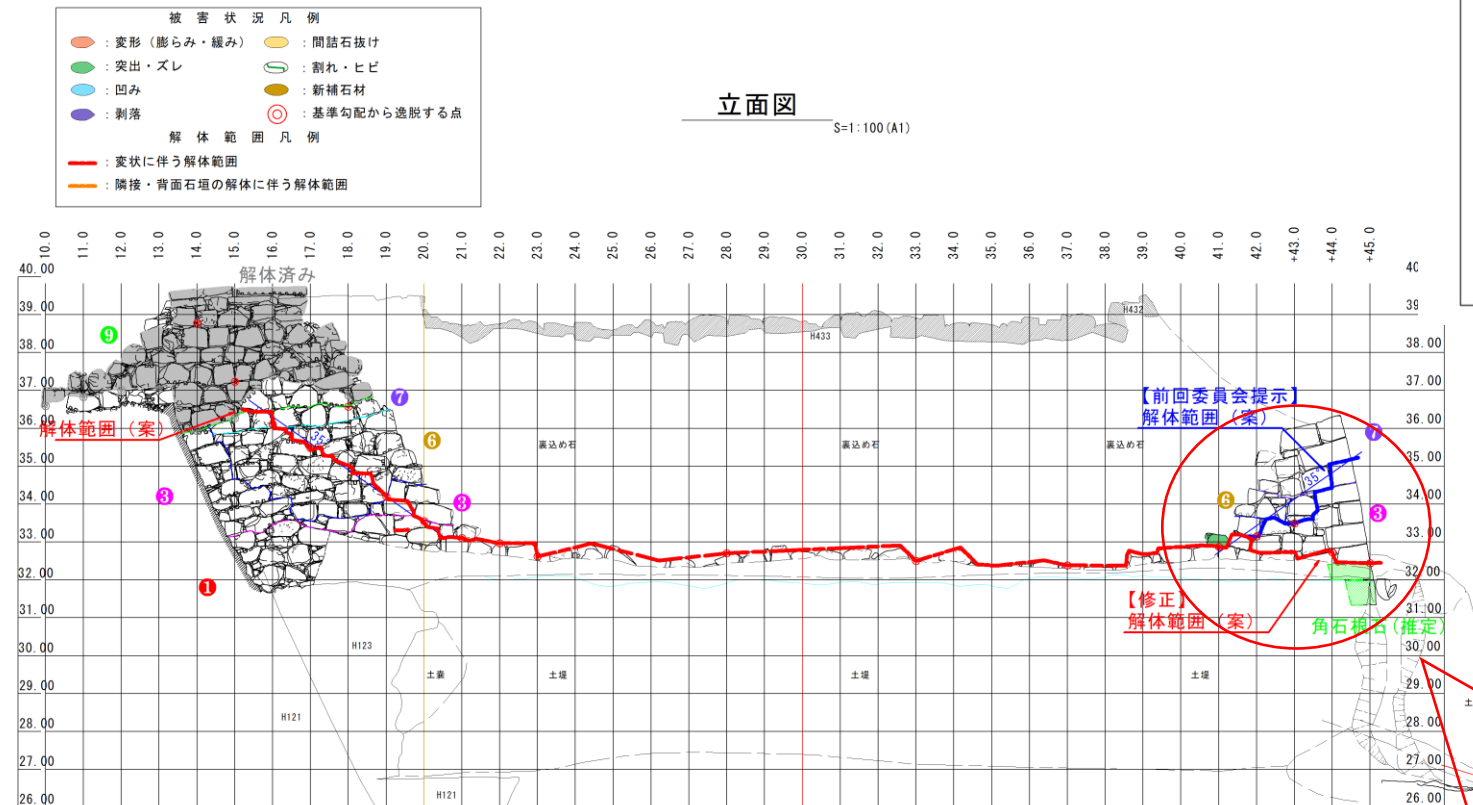
◆対応方針 2◆

下部法面の補強対策は不要

(3) 解体範囲再検討

隅角部の変状を再検討し、解体範囲の見直しを行った。

H438



【石垣履歴把握について】

①熊本城石垣 3 期【構築当初】

③熊本城石垣 6 期（1632～1871年）【修理 1】

築石部：斜め方向に横目地が通る→方形を呈した築石を積む

⑥熊本城石垣 6 期（1632～1871年）【修理 4】（享保4年）

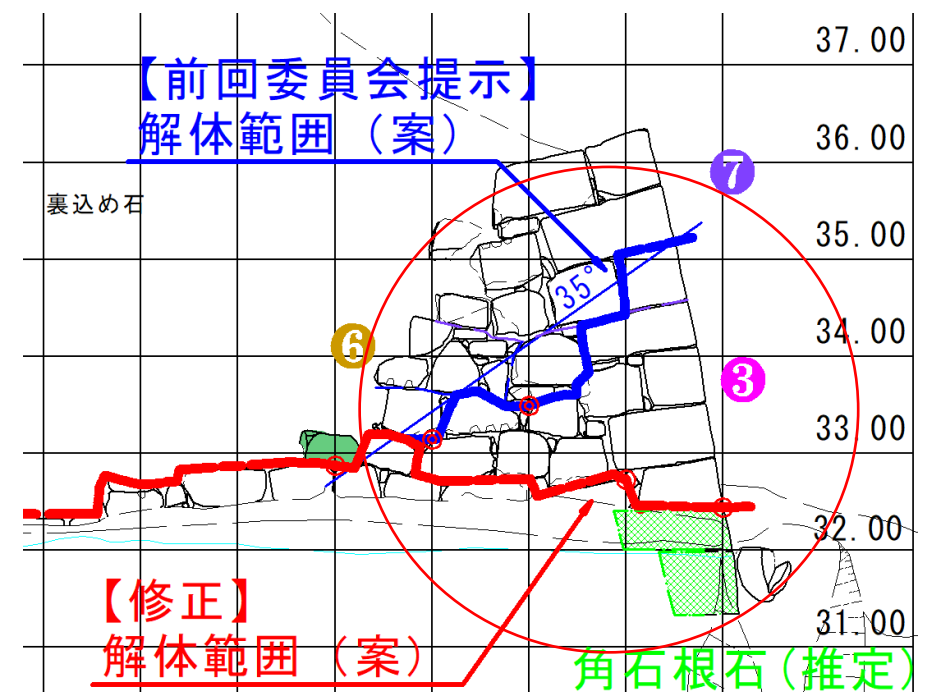
築石部：横目地が通らない→非方形を呈した築石を積む

⑦熊本城石垣 6 期（1632～1871年）【修理 5】

築石部：横目地が通る→方形を呈した築石を積む

⑨文化財修理（昭和28年）【修理 7】

隅角部周辺の解体範囲を修正

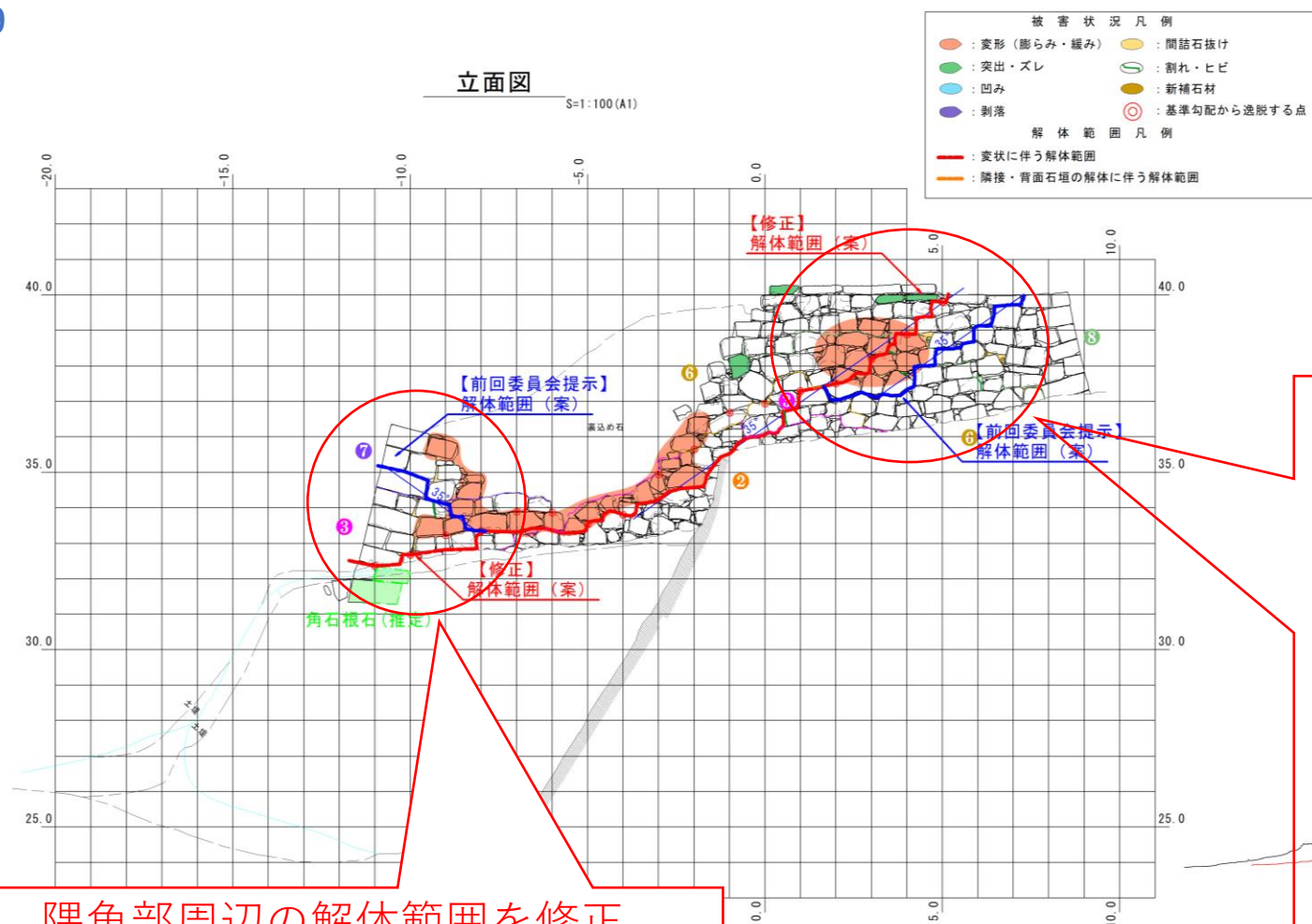


■ 前回委員会からの見直し内容

隅角部周辺の築石は縦目地が開き、不安定化している。この状態で石垣を復旧した場合、脆弱な箇所となり崩落する可能性があるため、今回、解体範囲を見直し、修理を行うことで従前と同様の安定性を確保する。

角石の根石部および空洞化の対策については、上部の石材を解体後、目地の開き等を確認のうえ検討する。

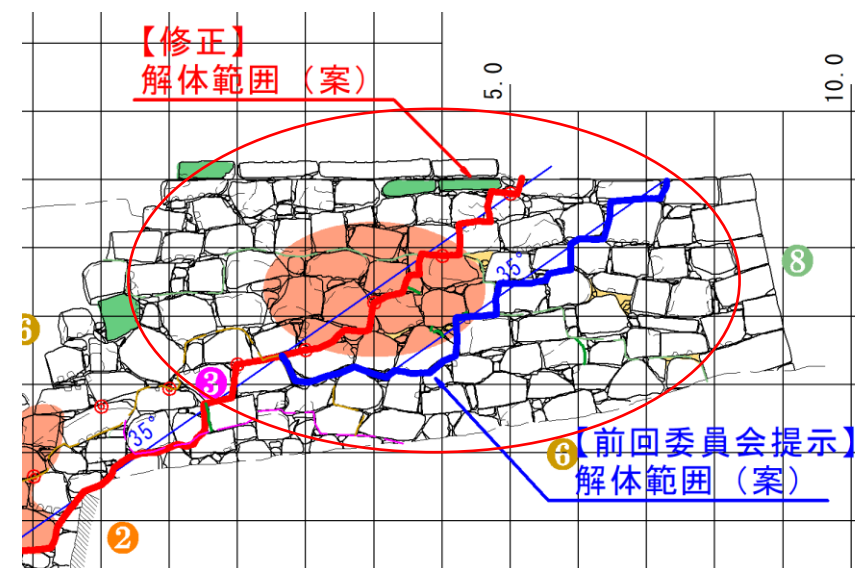
H439



【石垣履歴把握について】

- ②熊本城石垣 3 期（1607～1611年）【構築当初】
- ③熊本城石垣 6 期（1632～1871年）【修理 1】
築石部：斜め方向に横目地が通る→方形を呈した築石を積む
- ⑥熊本城石垣 6 期（1632～1871年）【修理 4】（享保4年）
築石部：横目地が通らない→非方形を呈した築石を積む
- ⑦熊本城石垣 6 期（1632～1871年）【修理 5】
築石部：横目地が通る→方形を呈した築石を積む
- ⑧熊本城石垣 6 期（1632～1871年）【修理 6】
築石部：横目地が通る→方形を呈した築石を積む

解体範囲を縮小（前回指摘事項）

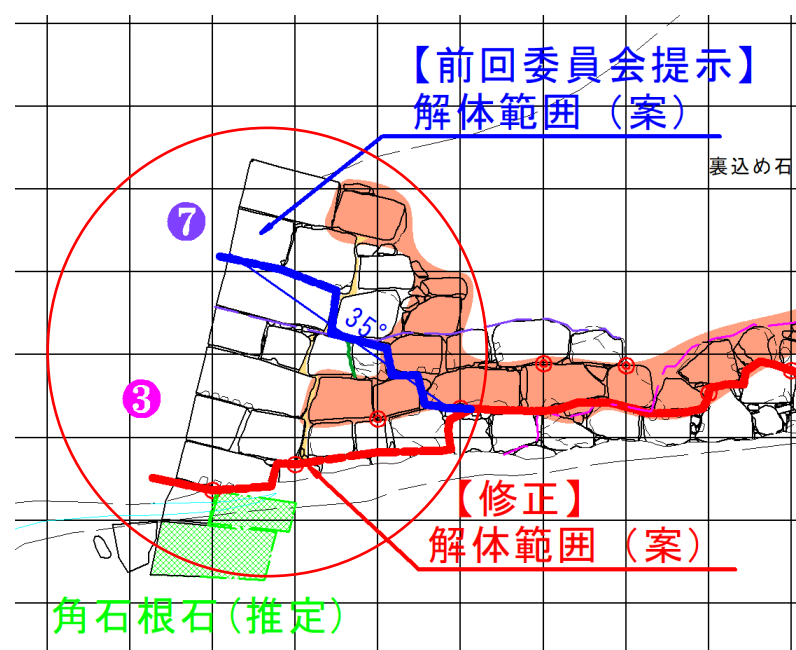


前回委員会では膨らみを解消するような解体範囲を設定していたが、石垣中腹の膨らみは軽微なものであり、石垣の安定性を損なうような変状ではない。よって、解体範囲を縮小する。

■ 前回委員会からの見直し内容

隅角部周辺の築石は縦目地が開き、不安定化している。この状態で石垣を復旧した場合、脆弱な箇所となり崩落する可能性があるため、今回、解体範囲を見直し、修理を行うことで従前と同様の安定性を確保する。

角石の根石部および空洞化の対策については、上部の石材を解体後、目地の開き等を確認のうえ検討する。



2 H438・H439法面復旧工法【審議】

H438・H439下方法面について、前述したとおり石垣の崩落・変状の起因となる崩壊は生じておらず、安定した状態であることから、補強対策は実施しない。しかしながら、石垣下方法面や小段において、震災時の石材落下の衝突による浸食や降雨による浸食が発生しており、今後も浸食が進行することで根石の露出等、石垣の安定性に著しい影響を及ぼすことが懸念されるため、**現状以上に拡大しないための対策**を講じる。

地震前

H438



地震後

石材落下に起因する浸食



排水管の埋設箇所（経年劣化）



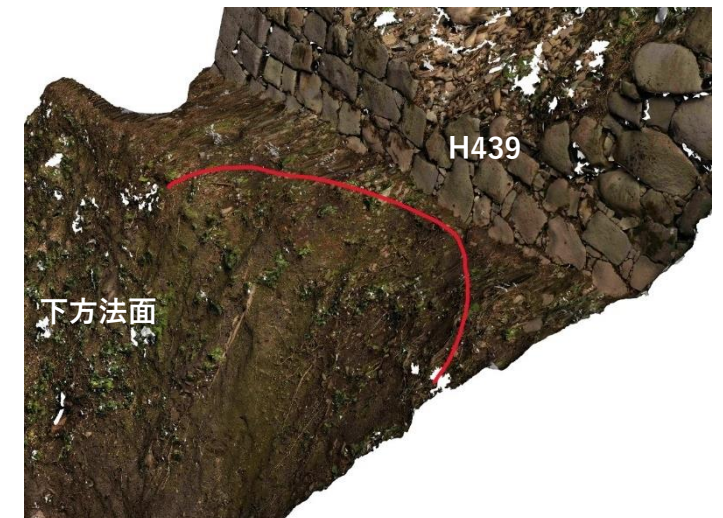
H439



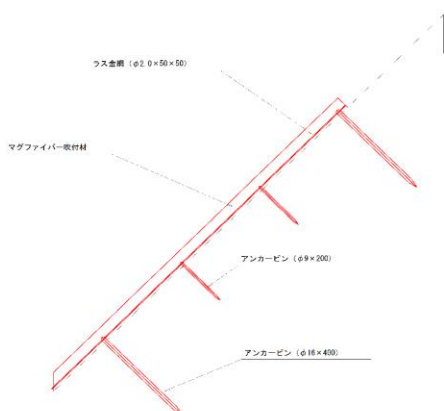
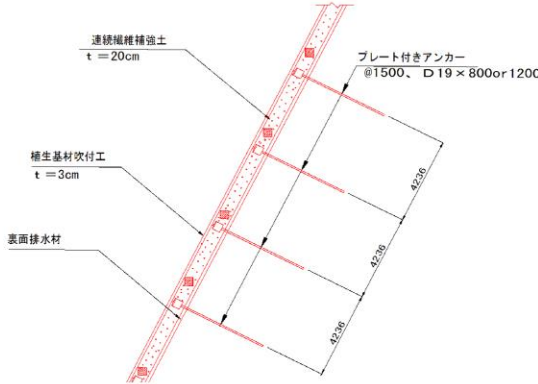
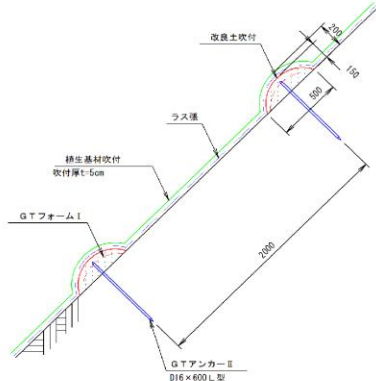
石材落下に起因する浸食



石材落下に起因する浸食



◆法面の浸食対策◆
熊本城の実績があり、維持管理も容易かつアンカー長など遺構への影響が少ない、**自然色防草土吹付工法**を選定した。

法面侵食 対策		第1案	第2案	第3案	
		自然色防草土吹付（マグファイバー工法）	連続繊維補強土工（ジオファイバー工法）	補強土植生法砕工（GTフレーム工法）	
施工事例					
標準図					
文化財への適用事例		熊本城（備前堀東側法面） 国指定史跡 乗場古墳（福岡県八女市）	熊本城（監物台樹木園前）	国指定史跡 大原幽学遺跡（千葉県旭市）	
工法概要・目的		雑草抑制・法面保護（侵食防止）	緑化による修景 ・ 法面保護（侵食防止）		
使用材料		土系吹付 （自然土/竹・樹皮繊維/海水マグネシア固化剤） ラス張り ずれ止め防止アンカー（標準長L=400mm）	連続繊維補強土 （砂質土/ポリエステル/保水材） ラス張り ずれ止め防止アンカー（標準長L=800mm or 1200mm）	ジオグリッド（枠構造） 改良土（セメント/砂質土/短繊維） ラス張り ずれ止め防止アンカー（標準長L=600mm）	
文化財への 影響	外観	○	土系吹付により現地になじむ	○	緑化により景観を確保する
	内部	×	アンカーピンの打設あり	×	アンカーピンの打設あり
	可逆性	×	//	×	//
侵食部への対応		○	増厚または土嚢による充填の上吹付	○	増厚吹付
維持管理		○	除草作業等の維持管理が不要である。	△	斜面勾配60度程度と、除草作業が困難
施工ヤード			必要		必要
総合評価		○			

3 H437・H438（平櫓隣接石垣）現代工法対策【報告】

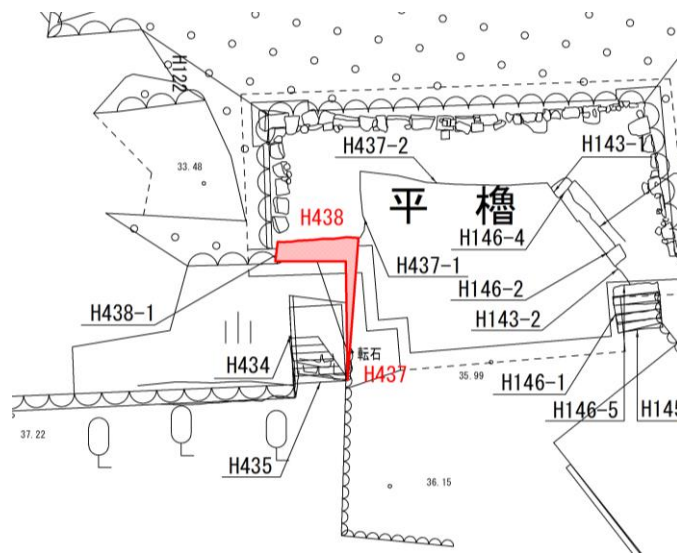
■これまでの委員会で承認済み事項

令和4年度第3回委員会審議にて、平櫓にかかわる石垣の全体安定の観点から、平櫓に隣接する石垣H437・H438の現代工法（ジオテキスタイル）による復旧が**承認済み**（標準断面図）

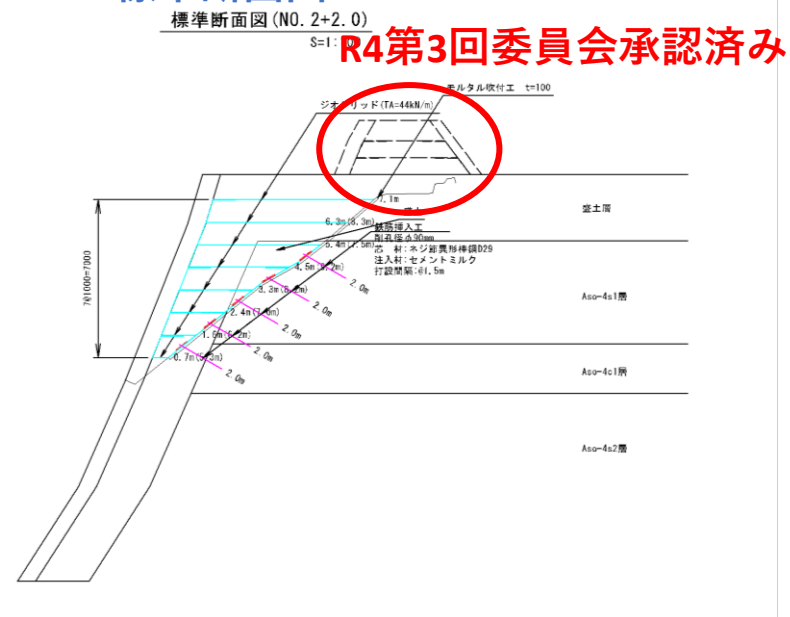
■ 今回の報告事項

- ・ジオテキスタイルによる補強により栗石層の安定は確保されるが、築石が崩落・飛散し、平櫓に被害が生じる恐れがある。
⇒**対応**：築石の崩落により平櫓倒壊の被害が生じているため、受圧板もしくは防護ネットで平櫓への飛散防止対策を講じる。

平面图



標準断面図



H437と平櫓（震災前）



H437と平櫓（震災後）



施工例写真



受圧板例(飯田丸五階櫓)



防護ネット例(小天守)

補強断面図

