

令和3年（2021）熊本城修復検討委員会第1回
飯田丸五階櫓台石垣の復旧に関する報告・検討内容について

◆今回の委員会での報告・検討内容

1. 飯田丸五階櫓台石垣（H266～H269）復旧措置の検討【検討】

これまでの検討経過（五階櫓台石垣・要人櫓台石垣）

【平成29年度】

9月28日：文化財修復検討部会 ○櫓の解体、倒壊防止対策

12月25日：文化財修復検討部会 ○五階櫓台石垣の解体範囲、構造解析の進め方について

→（第一段階）数値解析により被災前の石垣の限界加速度を検証

→（第二段階）補強した場合の石垣モデルで解析を行い、効果を検証

3月30日：構造解析WG ○DEM解析の概要報告（解析モデルについて）

【平成30年度】

5月1日：構造解析WG ○DEM解析の概要報告（解析モデルについて）

6月4日：構造解析WG ○DEM解析の進捗状況報告（基礎地盤と石垣の要素パッキング）

6月29日：石垣WG ○危険石垣の解体について

9月27日：石垣WG ○調査履歴・復旧に伴う調査範囲について

〃：構造解析WG ○DEM解析の進捗状況報告（解析結果）

→同日の土木学会による報告を受け、飯田丸の石垣で示力線法による検討を行う

12月25日：石垣WG ○曲輪側石垣解体について、五階櫓台石垣復旧勾配の考え方について

1月29日：石垣WG ○五階櫓台石垣の復旧勾配について、要人櫓台石垣の解体について

〃：構造解析WG ○検討方針の変更

→DEM解析及び示力線法による検討結果より、飯田丸の場合は在来工法のみ（築石の控え増大・粒度改善）による補強では効果が低いと判断し、効果が見込める工法（複合型ジオグリッド）を主体に検討を進める

3月5日：石垣WG ○五階櫓台石垣解体範囲について、要人櫓台石垣復旧方針について、石垣基底部等の発掘調査について

【平成31・令和元年度】

4月15日：石垣WG ○五階櫓台石垣解体範囲について

5月27日：石垣WG ○飯田丸南面石垣（H270）復旧方針（案）、要人櫓台石垣（H255）の復旧工法（案）について、飯田丸五階櫓台石垣（H267～269）の解体調査成果報告

7月12日：石垣・構造合同WG ○飯田丸五階櫓復旧の基本方針（熊本市の目標）、これまでの構造解析WGの検討経緯報告、石垣基底部等発掘調査の現場確認

→基本方針（石垣の要求性能）は「耐熊本地震相当」とする

→これまでの検討経緯（DEM解析・示力線法による検討結果）から、今後は効果が見込める工法（複合型ジオグリッド）を考案し、実験等により補強効果を検証する

8月9日：石垣・構造合同WG ○実験ケース案・補強ケース案について、石垣基底部等発掘調査の

現場確認

→（新型ジオグリッド巻込み）タイプと（新型ジオグリッド+アンカーボルト+受圧板）にて大型振動台実験を行う

9月13日：石垣・構造合同WG ○石垣基底部等発掘調査の成果報告、要人櫓台石垣の復旧工法について

11月17日：石垣・構造合同WG ○要人櫓台石垣の解体設計について、五階櫓台石垣の復旧設計について、振動台実験について（補強ケースの詳細報告）

12月25日：石垣・構造合同WG ○振動台実験結果報告（速報）、五階櫓台石垣の復旧設計について

3月26日：文化財修復検討委員会○令和元年度の検討内容報告

【令和2年度】

7月3日：石垣・構造合同WG ○令和元年度の振動台実験結果の報告、五階櫓台石垣の復旧方針について、追加実験実施について、要人櫓台石垣の遺構調査結果報告、要人櫓台石垣の遺構面保護措置について、要人櫓台石垣の解体範囲について

→五階櫓台石垣の非解体部の補強検討は行わない

→補強範囲を解体範囲に拡大したケースの振動台実験を実施し、補強効果を検証する

10月9日：石垣・構造合同WG ○要人櫓台石垣の解体調査成果報告、要人櫓台石垣の復旧設計について

11月9日：石垣・構造合同WG ○振動台実験

12月15日：石垣・構造合同WG ○振動台実験結果の報告

3月25日：石垣・構造合同WG ○実験結果を踏まえた五階櫓台石垣の復旧措置の検討について

→現代工法（受圧板形式のグリグリッド工法）による補強の承認

→断面方向の補強範囲は解体範囲とする

→補強対象とする石垣面は継続審議

1. 飯田丸五階櫓台石垣復旧措置の報告・検討

【資料6-2～6】補強仕様について（グリグリッド） 【報告】

【資料6-7】補強仕様について（受圧板） 【検討】

【飯田丸資料6-8～9】補強対象とする石垣面について 【検討】

2. 今年度以降の予定

【令和3年度】

4月～9月頃 要人櫓台石垣復旧工事

6月～7月頃 五階櫓台石垣復旧設計図作成

7月～8月頃 令和3年度第2回熊本城修復検討委員会（五階櫓台石垣復旧設計検討）

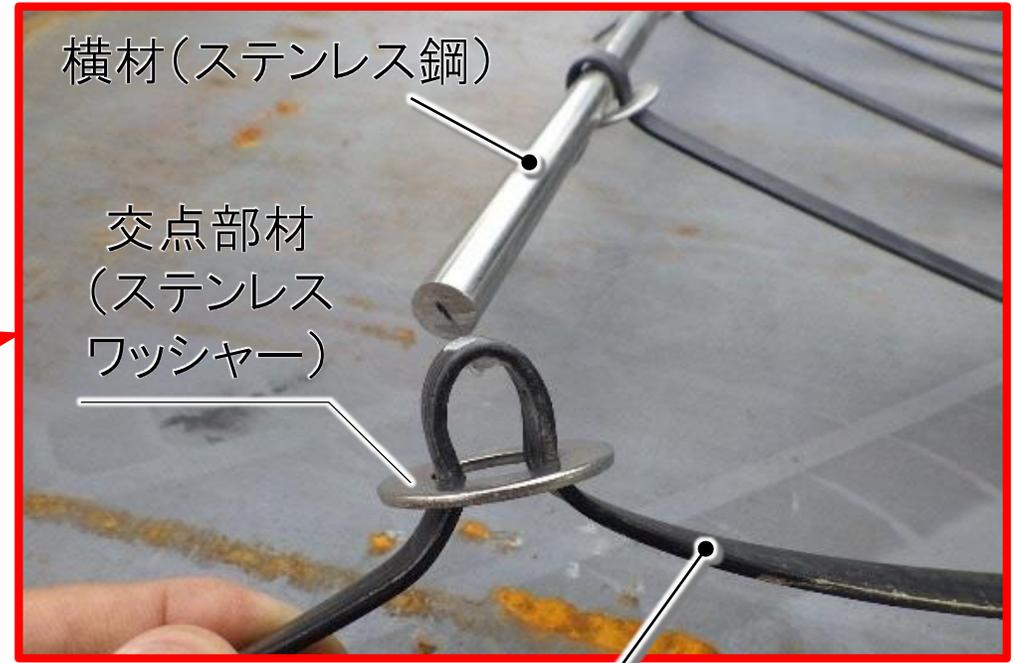
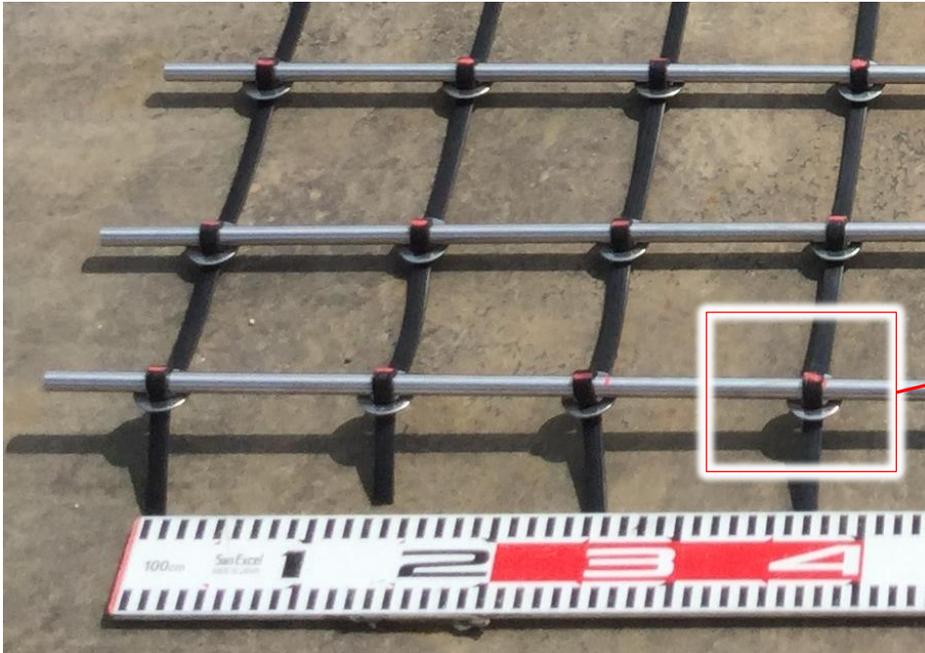
【令和4年度】

6月～3月頃 五階櫓台石垣復旧工事

熊本城飯田丸五階櫓石垣 補強仕様について

➤ 従来型グリグリッドの概要

- 交点強度が低い(5kN) ⇒ 縦材間隔“小”、敷設段数“多”。



<従来型グリグリッド>

縦材(PP被覆ポリエステル繊維)

※本技術は、大林組の研究開発成果です。

熊本城飯田丸五階櫓石垣 補強仕様について

＜補強仕様比較表(南面H268の場合)＞

	従来型グリグリッド	改良型グリグリッド
断面図		
補強材の目合い	縦材ピッチ 20～90mm 横材ピッチ 350mm	縦材ピッチ 125～250mm 横材ピッチ 350mm
敷設段数	12段	8段
敷設間隔	300～1,000mm	600～1,200mm

熊本城飯田丸五階櫓石垣 補強仕様について

＜補強仕様比較表(東面H269の場合)＞

	従来型グリグリッド	改良型グリグリッド
断面図		
補強材の目合い	縦材ピッチ 75mm 横材ピッチ 350mm	縦材ピッチ 125~250mm 横材ピッチ 350mm
敷設段数	11段	6段
敷設間隔	300~1,000mm	750~1,700mm

熊本城飯田丸五階櫓石垣 補強仕様について

＜補強仕様比較表(北面H266の場合)＞

	従来型グリグリッド	改良型グリグリッド
断面図		
補強材の目合い	縦材ピッチ 100mm 横材ピッチ 350mm	縦材ピッチ 125~200mm 横材ピッチ 350mm
敷設段数	5段	4段
敷設間隔	500~1,000mm	500~1,000mm

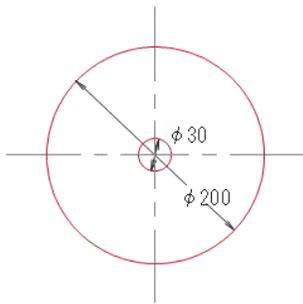
熊本城飯田丸五階櫓石垣 補強仕様について

＜補強仕様比較表(西面H267の場合)＞

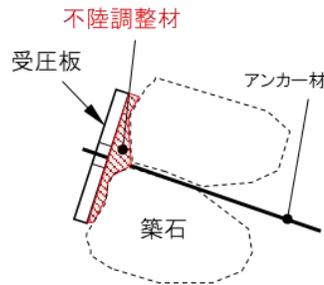
	従来型グリグリッド	改良型グリグリッド
断面図		
補強材の目合い	縦材ピッチ 90mm 横材ピッチ 350mm	縦材ピッチ 200~250mm 横材ピッチ 350mm
敷設段数	5段	4段
敷設間隔	600~1,000mm	800~1,000mm

■ 補強仕様について（受圧板）

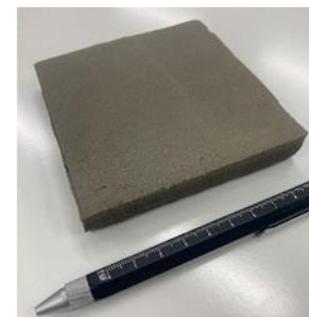
- ① 形状：設置面積が極力少なくなるよう**円形**とする（ $\phi 200\text{mm}$ ）。
- ② 不陸調整材：築石面との間に不陸調整材を設置する（ポリエチレンorポリエステルで施工性、耐久性を見て選定）。



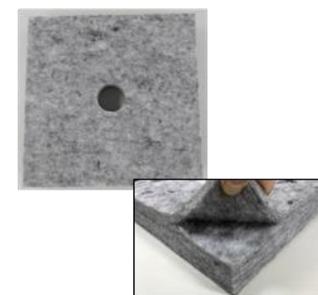
受圧板の形状



<不陸調整>



<ポリエチレン t=10~100mm>



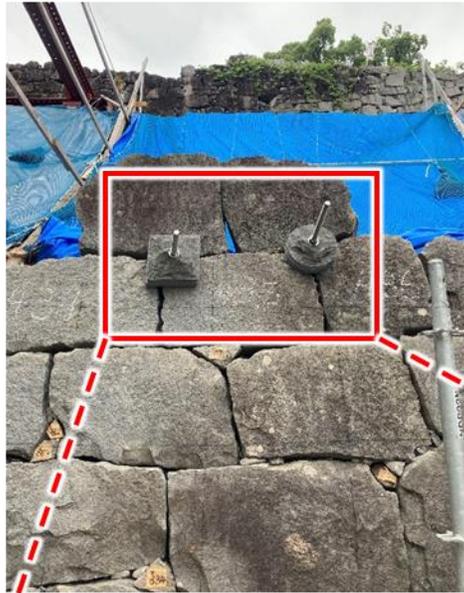
t=70mm(ポリエステル)

不陸調整材の種類

- ③ 材質及び色調：築石と同調するものを下記より選定する

案	案① 平滑プレート+自然石（安山岩）	案② 平滑プレート+擬岩コンクリート	案③ 平滑プレート+擬岩FRP	案④ 平滑プレート
イメージ		<p>※色粉による色調の調整は可能</p>	<p>※塗装により色調の調整が可能</p>	<p>※塗装前の写真であり、実物の色調とは異なる。 ※塗装により色調の調整が可能</p>
概要	自然石を切削加工し、鋼製の平板に接着	自然石から製作した型枠にコンクリートを打設し、製作した面板を構成の平板に接着	自然石から製作した型枠にFRPを充填し、製作した面板を鋼製の平板に接着	鋼製の平板

■ 補強仕様について（受圧板）



<自然石>



<擬岩コンクリート>



<擬岩FRP>



<平滑プレート>



<自然石角形(近景)>



<自然石円形(近景)>



<家紋調円形(近景)(参考)>

案		案ア	案イ'	案イ
		東面・南面：グリグリッド（受圧板形式） 北面・西面：在来工法	東面・南面：グリグリッド（受圧板形式） 北面・西面：グリグリッドのみ	東面・南面：グリグリッド（受圧板形式） 北面・西面：グリグリッド（受圧板形式）
イメージ図	平面	<p>北面(H266) 西面(H267) 東面(H269) 南面(H268) 補強範囲 グリグリッド（受圧板形式）</p>	<p>北面(H266) 西面(H267) 東面(H269) 南面(H268) 補強範囲 グリグリッドのみ グリグリッド（受圧板形式）</p>	<p>北面(H266) 西面(H267) 東面(H269) 南面(H268) 補強範囲 グリグリッド（受圧板形式）</p>
	文化財的検討	<p>外観への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東面・南面の前面に現代材料(受圧板)が露出 ・西面・北面は影響なし <p>△</p> <p>材料、内部への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東面・南面・西面の一部の栗石内部に補強材料を配置 ・北面は影響なし <p>△</p>	<p>外観への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東面・南面の前面に現代材料(受圧板)が露出 ・西面・北面は影響なし <p>△</p> <p>材料、内部への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東西南北4面の栗石内部に補強材料を配置 <p>×</p>	<p>外観への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東西南北4面の前面に現代材料(受圧板)が露出 <p>×</p> <p>材料、内部への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・東西南北4面の栗石内部に補強材料を配置 <p>×</p>
実現象及び実験結果から見た石垣の耐震性能		<ul style="list-style-type: none"> ・東面：600gal(震度7相当)まで耐震性が向上 ・西面：無補強と同等 ・南面：600gal(震度7相当)まで耐震性が向上 ・北面：ほぼ変形なし ・全体：目標性能(耐600gal相当)まで性能向上 <p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・東面：600gal(震度7相当)まで耐震性が向上 ・西面：耐震性が向上(無補強以上○) ・南面：600gal(震度7相当)まで耐震性が向上 ・北面：耐震性が向上(無補強以上○) ・全体：目標性能(耐600gal相当)まで性能向上 <p>◎</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・東面：600gal(震度7相当)まで耐震性が向上 ・西面：耐震性が向上(無補強以上◎) ・南面：600gal(震度7相当)まで耐震性が向上 ・北面：耐震性が向上(無補強以上◎) ・全体：目標性能(耐600gal相当)まで性能向上 <p>◎ ※案イ'より効果大</p>

特記事項
(構造検討・文化財調査の結果)

・西面について熊本城石垣耐震診断指針(案)(2021.3文化庁)に基づく築石の安定性評価(示力線)を行ったところ、**大地震に対し不安定で対策の必要あり**との結果となった。

・飯田丸一体復元整備事業において、北面及び西面は平成13年(2001)に石垣の文化財修理が施されている。今回事業で当時の修理内容について再調査した結果は以下のとおり。

築石：正徳5年(1715)の江戸期修理の様相を再現しており、**本質的価値を有している**。

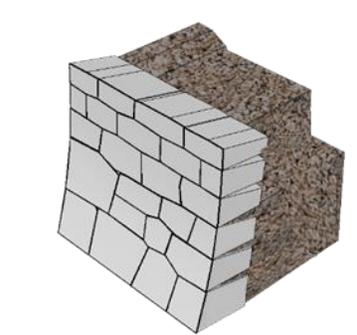
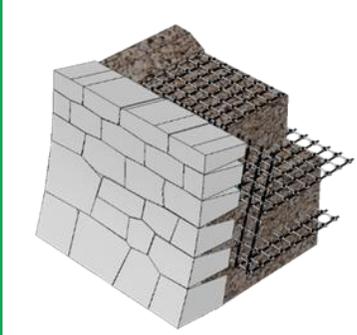
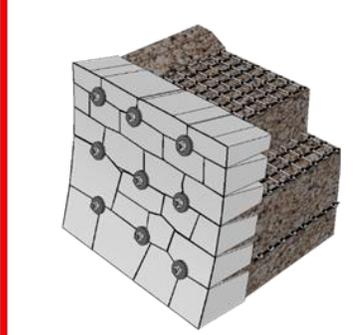
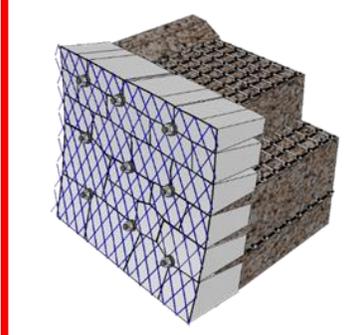
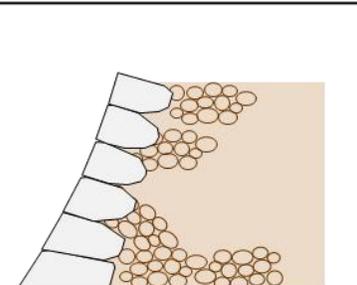
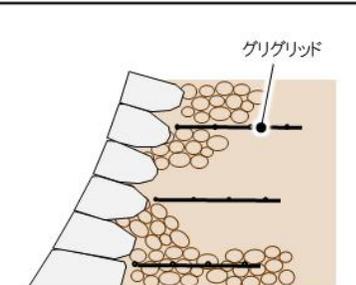
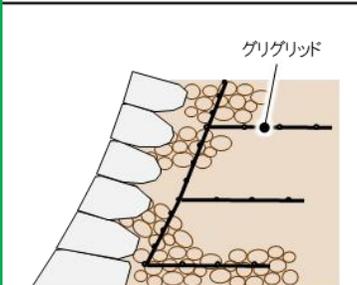
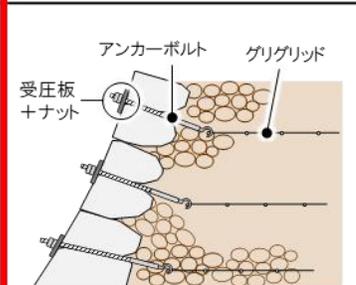
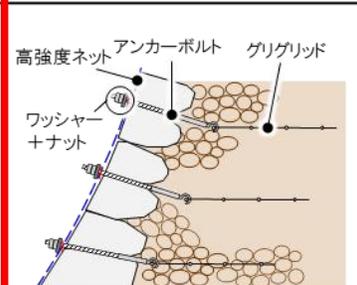
裏込め：平成の文化財修理時で**江戸期の様相は改変されている**。

⇒平成の文化財修理により改変された部分の取り扱いをどう判断するか(文化財修理ではあるが、石垣の本質的価値が喪失されてたと捉えるか)

※南面及び東面は、明治22年(1889)金峰山地震の際に大部分が崩壊している。南面及び東面の補強範囲は、平成28年(2016)熊本地震以前から石垣の本質的価値が失われている箇所に対して検討した。

■ 実験結果を踏まえた補強工法 (グリグリッド工法)

資料6-9

案		(無補強)	案1：裏栗石グリグリッド敷設	案2：裏栗石巻き込み	案3：受圧板 +アンカーボルト	案4：ネット +アンカーボルト
イメージ図	外観					
	断面		 グリグリッド	 グリグリッド	 アンカーボルト グリグリッド 受圧板 + ナット	 高強度ネット アンカーボルト グリグリッド ワッシャー + ナット
文化財的検討	外観への影響	・ 阻害物なし ○	・ 影響なし ○	・ 影響なし ○	・ 受圧板により石垣の景観美を損ねる △	・ ネットにより石垣の景観美を損ねる ×
	材料、内部への影響	・ 現代材料なし ○	・ 栗石内部に補強材料を配置 △	・ 栗石内部に補強材料を配置 △	・ 栗石内部に補強材料を配置 ・ 築石間にアンカー材を配置 △	・ 栗石内部に補強材料を配置 ・ 築石間にアンカー材を配置 △
実験結果から見た耐震性能		・ 150gal(震度6弱相当) ※200gal(震度6弱相当)で、 石垣上部の築石・裏栗石が 崩落 ×	・ 無補強に対し、1.25倍耐震性が向上 ・ 無補強に対し、栗石の崩壊範囲を50%縮小 △	・ 250~300gal(震度6弱相当)まで耐震性が向上 築石：250gal(震度6弱相当) 裏込層：300gal(震度6弱相当) △	・ 400~600gal(震度6強~7相当)まで耐震性が向上 ○	受圧板+アンカーボルト と同等以上 ◎
文化財的検討を加味した耐震性能評価		×	△	△	○	△