

1. 飯田丸五階櫓台石垣（H266～H269）復旧措置の検討【検討】

【平成 29 年度】

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

【平成 30 年度】

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）

9月27日：石垣WG ○調査履歴・復旧に伴う調査範囲について

→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

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

→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

【平成 31・令和元年度】

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

→基本方針（石垣の要求性能）は「耐震本地震相当」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

→ (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

11月17日：石垣・構造合同WG ○要人檜台石垣の解体設計について、五階檜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）

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

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

→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

5月31日：第1回文化財修復検討委員会 ○飯田丸五階櫓台石垣（H266～H269）復旧措置の検討

→補強対象とする石垣面は継続審議

→受圧板の仕様は継続審議

【資料 1-3～14】補強対象とする石垣面について

【検討】

【資料 1-15～16】補強仕様について（受圧板）

【検討】

【令和3年度】

4月～9月頃 要人櫓台石垣復旧工事

8月～9月頃 五階櫓台石垣復旧設計図作成

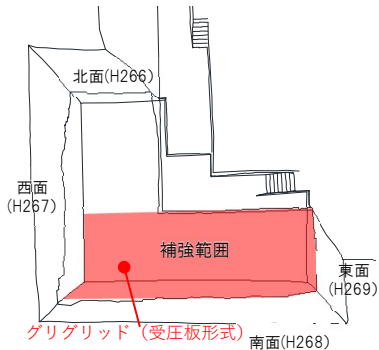
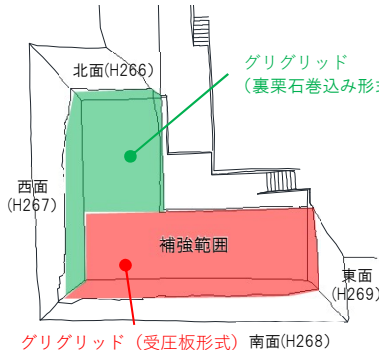
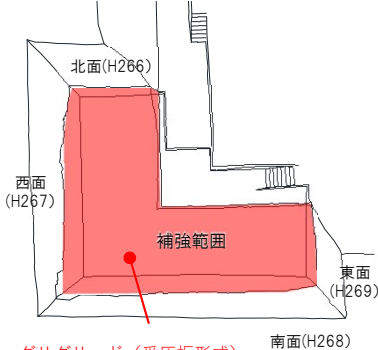
【令和4年度】

6月～3月頃 五階櫓台石垣復旧工事

■ 前回委員会の主な意見（補強対象とする石垣面）

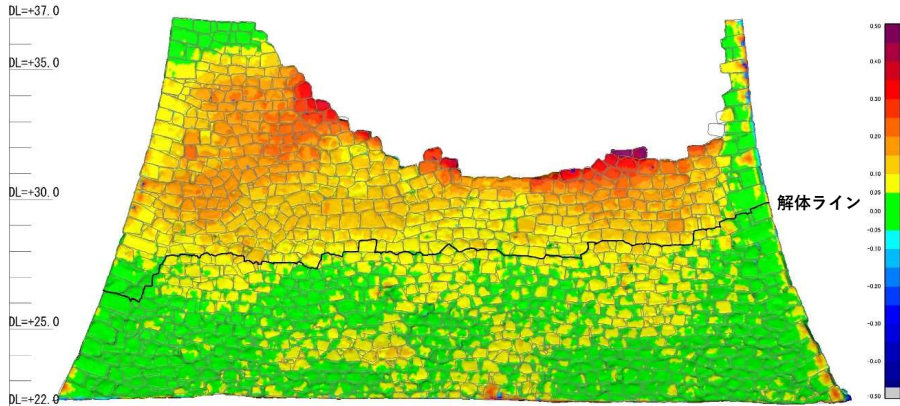
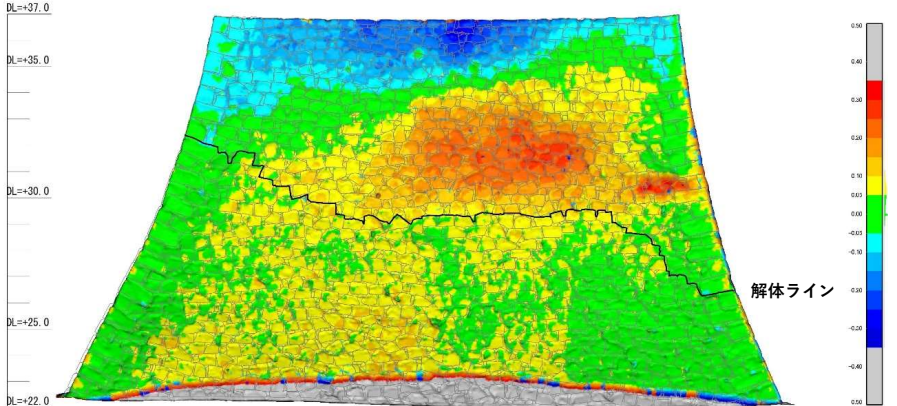
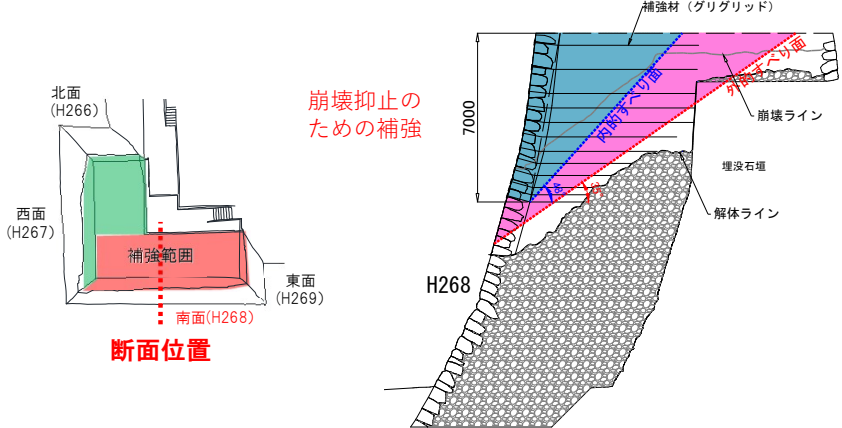
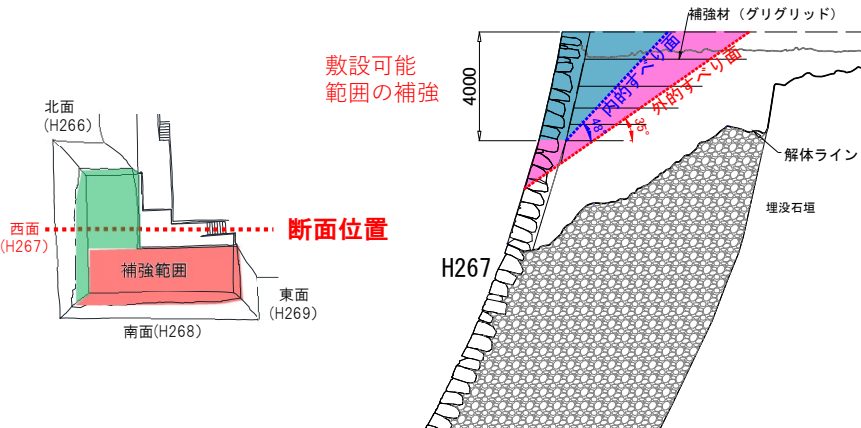
北野委員	・ 在来工法による復旧を目指すという観点では西面に補強は過剰 ・ 建物の内部に人を入れる前提を問い直したい ・ 想定外の自然災害に打ち勝つスタンスではなく、減災のような考え方の必要性もあるのではないか ・ 示力線の検討でもあるように、飯田丸五階櫓は危険性の高い場所。ここに常時人を入れなければならないかという点に疑問がある。 ・ そのような点で、伝統的な補強による改善で十分と考える
千田委員	・ 天守の公開のように、飯田丸についても、地域にとって大きな意義があり、お客様が入って頂く修復整備が望ましいと思う。 ・ 本質的な価値を壊さないことが前提だが、グリグリッドは文化財としての担保と構造強化の両立がうまくいっていると思う。 ・ 解体修理した範囲で、一定の補強を行ってなるべく安心な形でご覧頂くのがいいと思う。
西形委員	・ 補強のという意味ではイ‘もイもあまり変わらない。そういう観点で行けば、文化財に配慮したイ’でいいかなと思う。
山尾委員長	・ 過去の履歴（金峰山地震）から見るに、今回の補強（南面）で十分対応できるのではないかと。人の入れ方、避難の対策を含め検討し、最低限のアでとどめるのはいかがか。
伊東委員	・ 人を入れて安全第一とするのであれば、安全のための対策はとってもいい。常時公開ということではなく、定期的に順番に公開していくというやり方をとる方法もあるのではないかと。
北原委員	・ 労力をかけて修復するわけなので活用しなければならない。最大限の判断がなかなか難しいが、イ‘ないしイで安全ということであれば。
文化庁	・ 一定の根拠がないと、（櫓に）人を入れることはリスク。最終的には管理者（熊本市）の責任になるので、そういったリスクがあるということを踏まえて検討して頂きたい。文化財的価値を重視してアもありえるが、そこでは人は入れにくいと思う。 ・ 補強して人を入れる場合は、客観的な数値をもって説明するというのが自治体として求められる。

■ 補強対象とする石垣面について

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			
	文化財的検討	外観への影響 ・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 △	外観への影響 ・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 △	外観への影響 ・東西南北4面の前面に現代材料(受圧板)が露出 ×
		材料、内部への影響 ・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 △	材料、内部への影響 ・東西南北4面の栗石内部に補強材料を配置 ×	材料、内部への影響 ・東西南北4面の栗石内部に補強材料を配置 ×
実現象及び実験結果から見た石垣の耐震性能		・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 ○	・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 ◎	・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 ◎ ※案イ'より効果大
熊本城石垣耐震診断指針(R3.3構造WG東京部会)に基づく石垣の安定性評価		累積力線法による築石の安定性評価(滑動・転倒) ・中規模地震動(レベル1地震動 kh=0.15):NG =石垣が大地震に対し著しく不安定で、対策の必要がある(耐震診断指針による判定結果) ×	ジオテキスタイル安定計算による安定性評価 ・大規模地震動(レベル2地震動 kh=0.20):OK =石垣が大地震に対し概ね安定(櫓内部への立入可) ○	ジオテキスタイル安定計算による安定性評価 ・大規模地震動(レベル2地震動 kh=0.20):OK =石垣が大地震に対し概ね安定(櫓内部への立入可) ○
特記事項 (文化財調査の結果)		・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、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、 <u>本質的価値を有している</u> 。 裏込め：平成の文化財修理時で <u>江戸期の様相は改変されている</u> 。 ※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。		

(事務局案) 西面・北面の本質的価値を損ねない範囲の現代補強（案イ'）を行い、五階櫓復旧後は来場者を櫓内部に入れる活用を行う

■ グリグリッドの安定計算（補強土壁の設計）

石垣面	南面（東面）				西面（北面）					
被害状況	 段彩図 H268（南面） ・ 上部約 6 m の崩壊、崩壊部より 2 ～ 3 m 程度下部まではらみ出し				 段彩図 H267（西面） ・ 上部から約 3 m ～ 7 m 位置にはらみだし					
	要求性能									
耐熊本地震相当：600gal（震度7）＝石垣の崩壊及びはらみ出しの抑止										
補強断面図	 補強断面図 H268（南面）				 補強断面図 H267（西面）					
	安定検討									
安定検討	照査項目		設計水平震度	結果	備考	照査項目		設計水平震度	結果	備考
	内的安定の検討 （補強内部を通るすべりに対する照査）		レベル2 地震動 （Kh=0.20）	OK		内的安定の検討 （補強内部を通るすべりに対する照査）		レベル2 地震動 （Kh=0.20）	OK	
	外的安定の検討 （補強領域自体の安定性照査）			OK		外的安定の検討 （補強領域自体の安定性照査）			OK	
全体安定の検討 （補強領域の外側・内部を横切るすべりに対する照査）		OK		H=7m	全体安定の検討 （補強領域の外側・内部を横切るすべりに対する照査）		OK		H=4m	

■ 補強範囲の設定手順について

①内的安定の検討

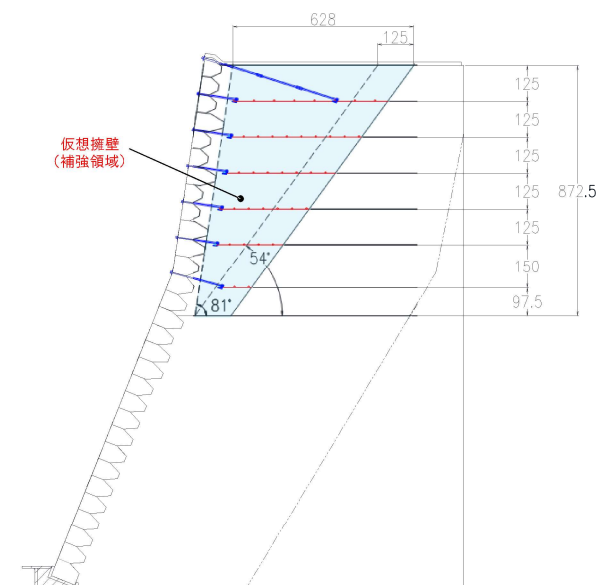
- ・ 試行くさび法で地震時最大土圧となる仮想すべり面を決定し、グリグリッドの最低定着長を確保

②外的安定の検討

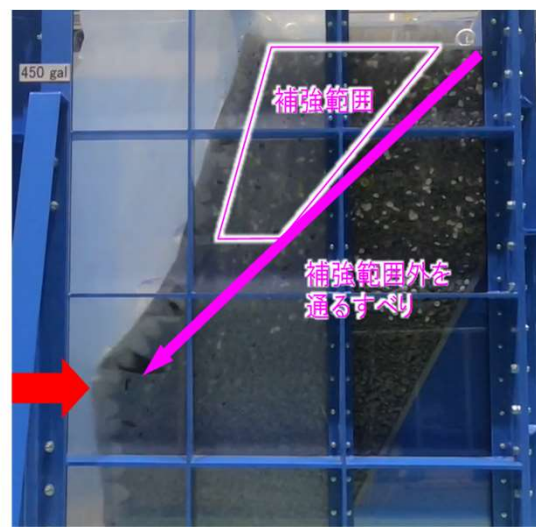
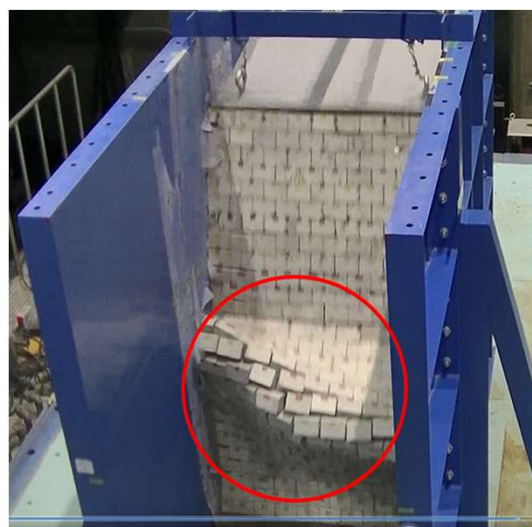
- ・ 最低定着長を確保した領域 = 仮想擁壁と設定
- ・ 仮想擁壁背面に作用する地震時最大土圧を算定し、仮想擁壁の
 - 滑動に対する安定
 - 転倒に対する安定
 - 支持力に対する安定
 を照査

③全体安定の検討

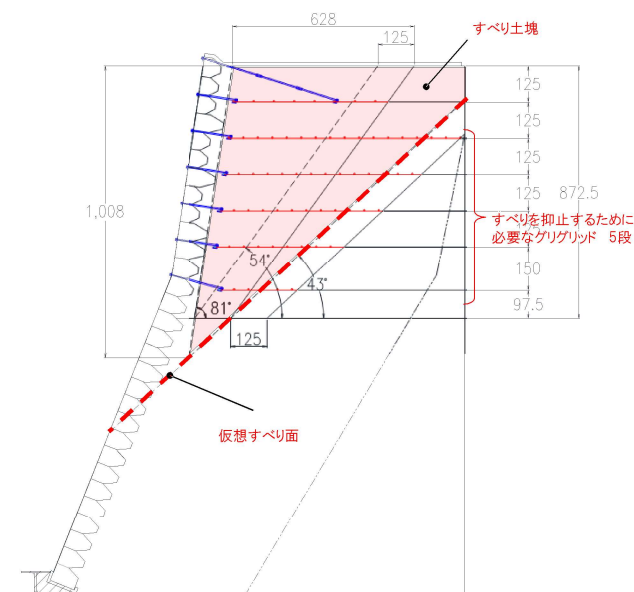
- ・ ②外的安定の検討において、地震時最大土圧を算定した際に得られる仮想すべり面が、仮想擁壁の背面下端を通過することで**過年度の振動台実験のような崩壊に至る（下図）ものと考え**、このすべりの抑止に必要な引張力をグリグリッドで負担するよう負担段数および仕様を決定



仮想擁壁の設定



補強範囲の背面を通るすべり（R1年度振動台実験Case3 450gal加振時）

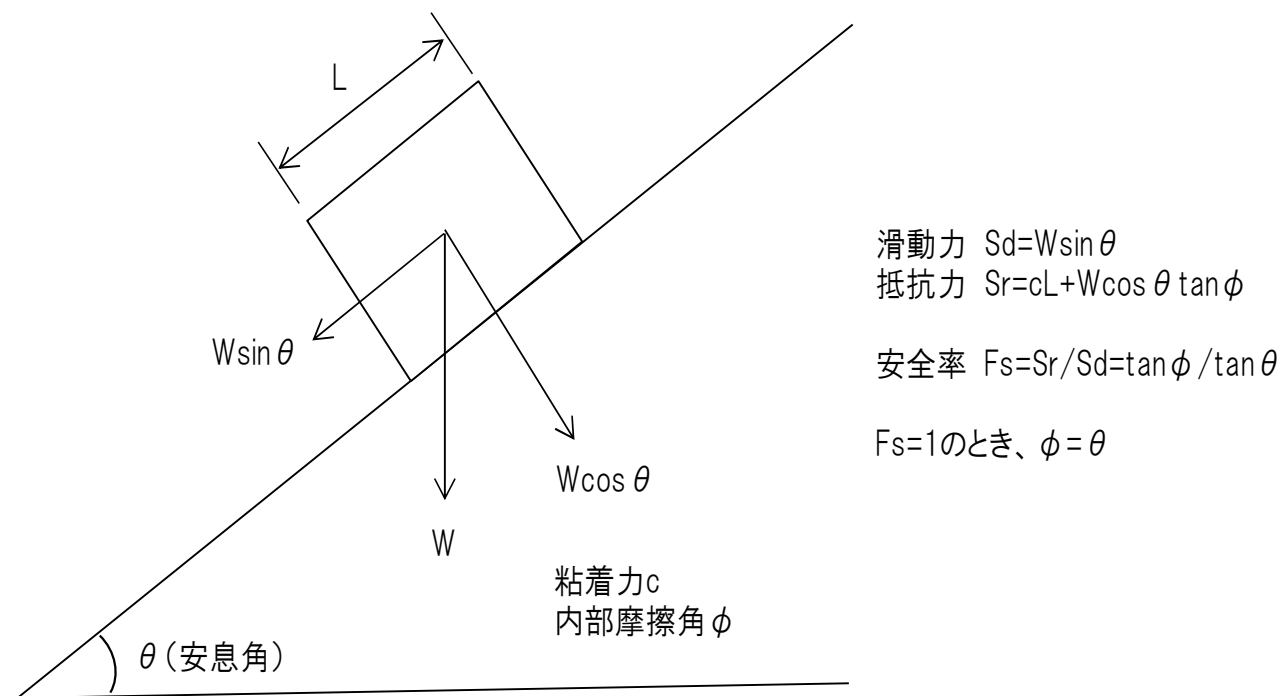


仮想擁壁背面を通るすべりを抑止するためのグリグリッドの段数

■ 補強範囲の設定手順について

④補強範囲の設定

- ・ 栗石層の安息角は、直線すべりの場合、内部摩擦角と一致する（右図）。
- ・ ③の仮想すべり面の角度が、内部摩擦角以下であれば、このすべり面よりも低角度のすべり面は発生しないと考えられる。
- ・ すべり面の角度が内部摩擦角以上となる場合は、③で決定した補強範囲を仮想擁壁として設定し、②～③の検討を繰り返す。

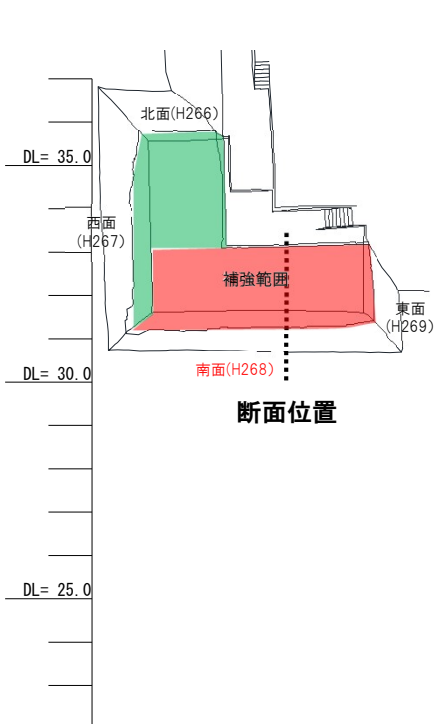
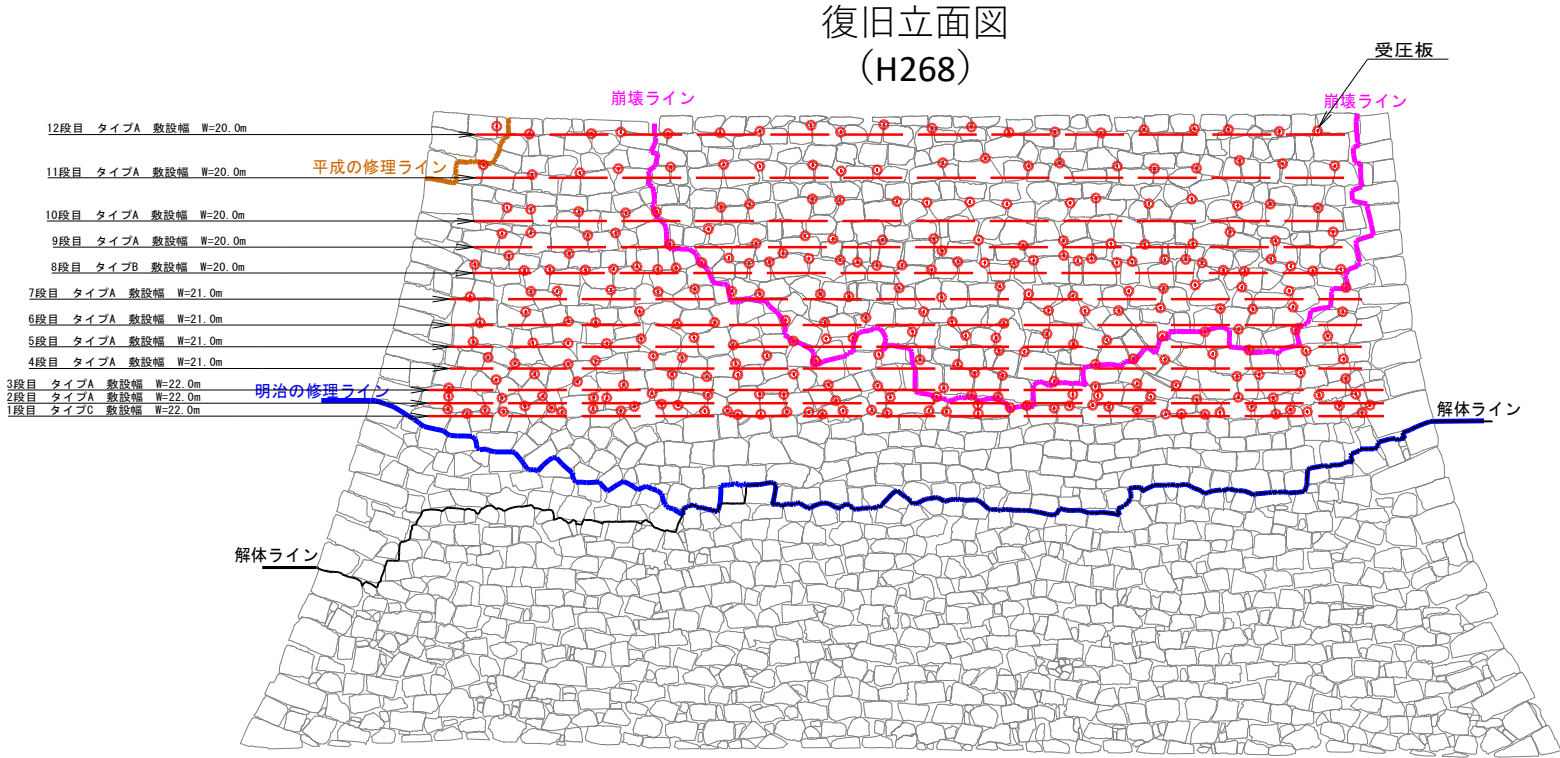


安息角の概念図

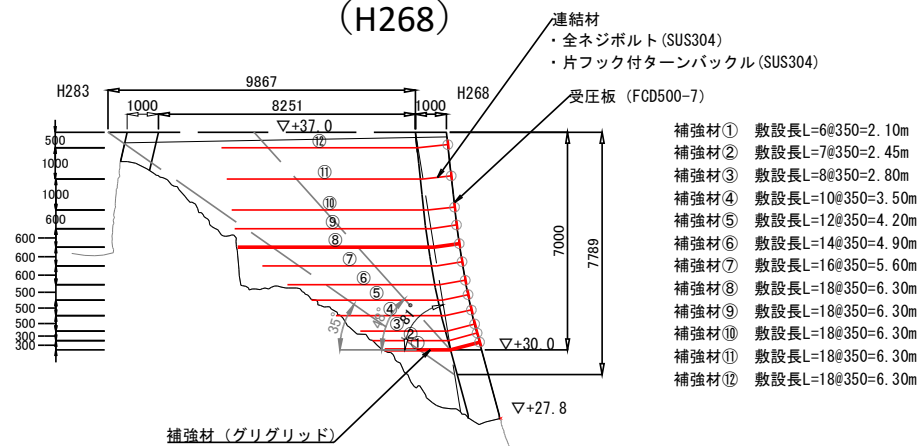
補強後の安定性について

石垣面		南面（東面）	西面（北面）
補強断面			
	栗石層	・崩壊を抑止（内的安定：OK） ・補強領域は安定（外的安定：OK） ・補強後のすべりを抑止（全体安定：OK） ※ $35^{\circ} < 35.6^{\circ}$ 仮想すべり面の角度 栗石層の内部摩擦角	・従前よりも安定（内的安定：OK） ※実際に崩落していないため、補強後は崩落しないと判断 ・補強領域は安定（外的安定：OK） ・補強後のすべりを抑止（全体安定：OK） ※ $35^{\circ} < 35.6^{\circ}$ 仮想すべり面の角度 栗石層の内部摩擦角
	築石	・崩落を抑止（受圧板形式グリグリッド）	・築石は崩落するが、栗石層が自立（裏栗石巻込み形式グリグリッド） ※（参考）模型実験結果参照
補強後の安定性		櫓台全体	・大地震時（レベル2：Kh=0.20）で石垣が崩壊しない安定性を確保

■ (参考) 復旧立面図 (南面：H268)



復旧断面図 (H268)

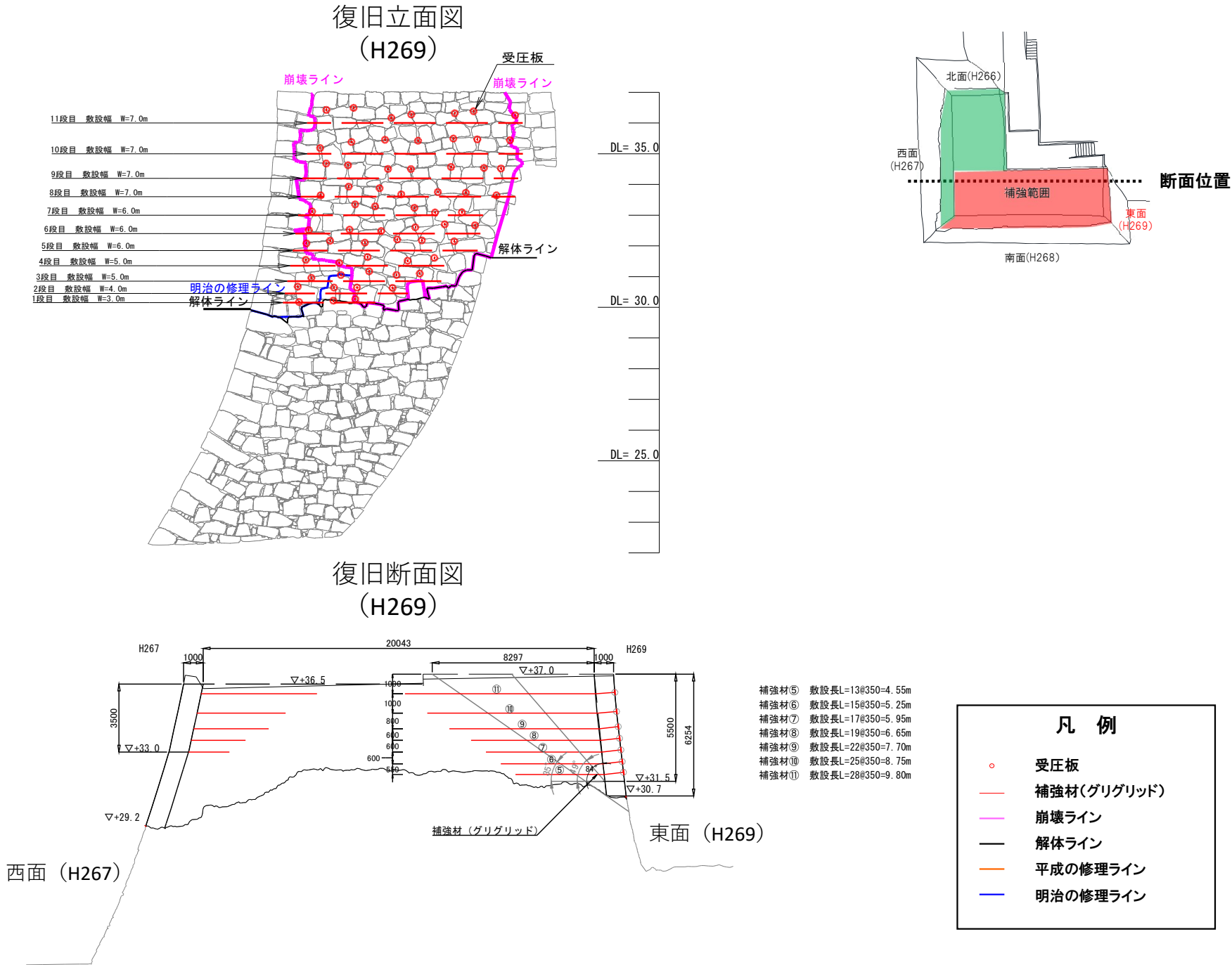


南面 (H268)

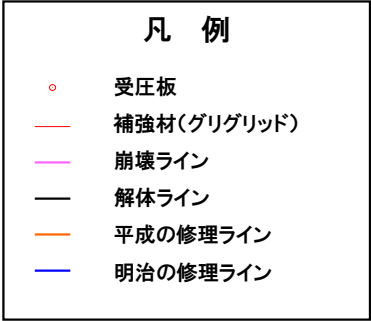
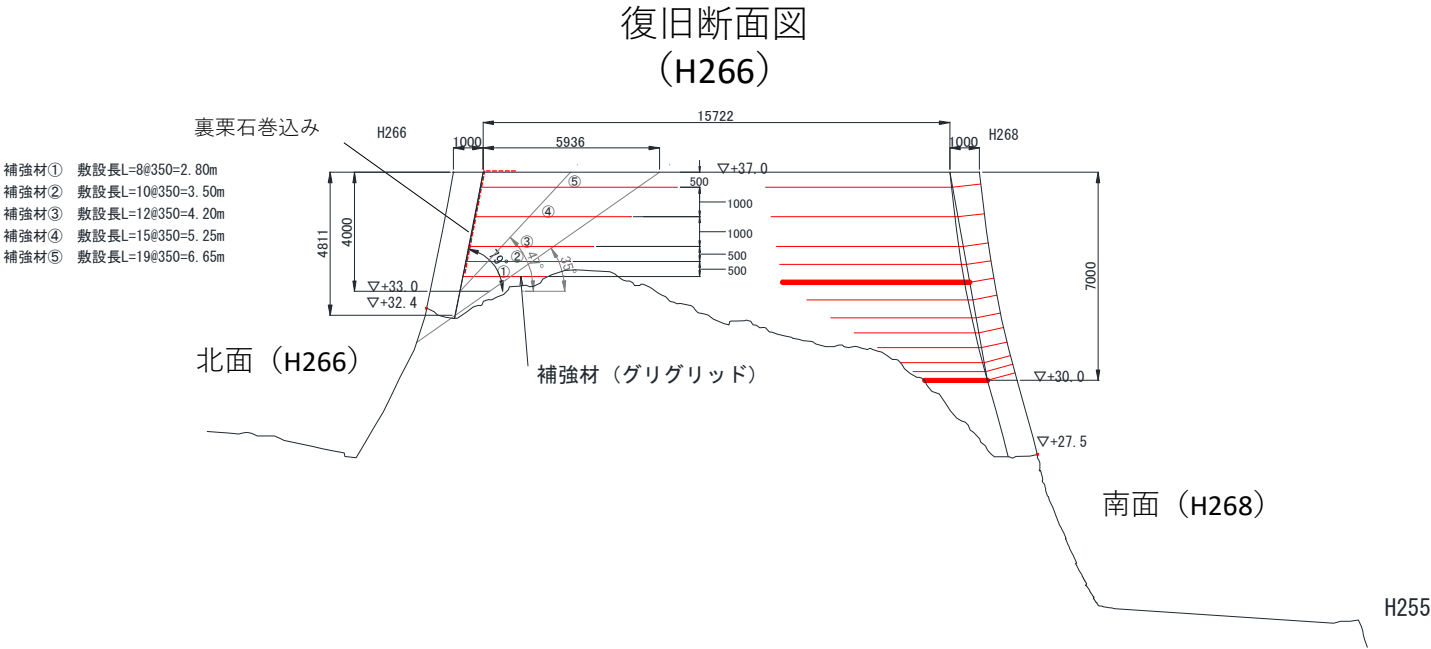
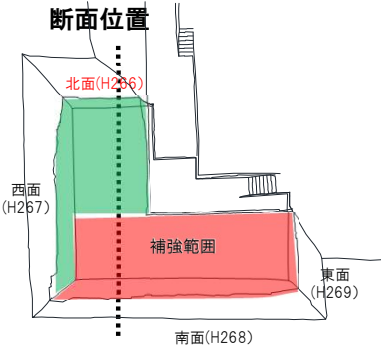
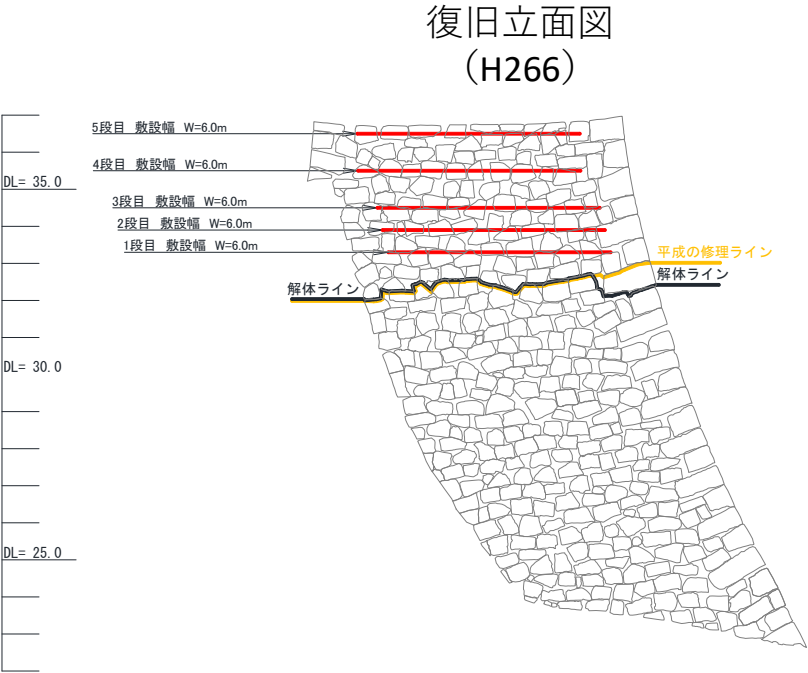
凡 例

- 受圧板
- 補強材(グリグリッド)
- 崩壊ライン
- 解体ライン
- 平成の修理ライン
- 明治の修理ライン

■ (参考) 復旧立面図 (東面：H269)

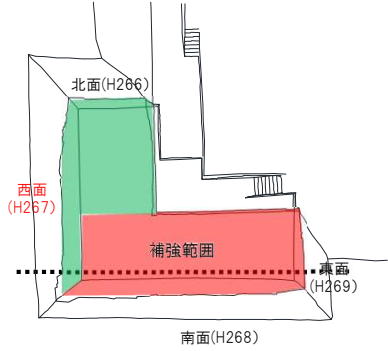
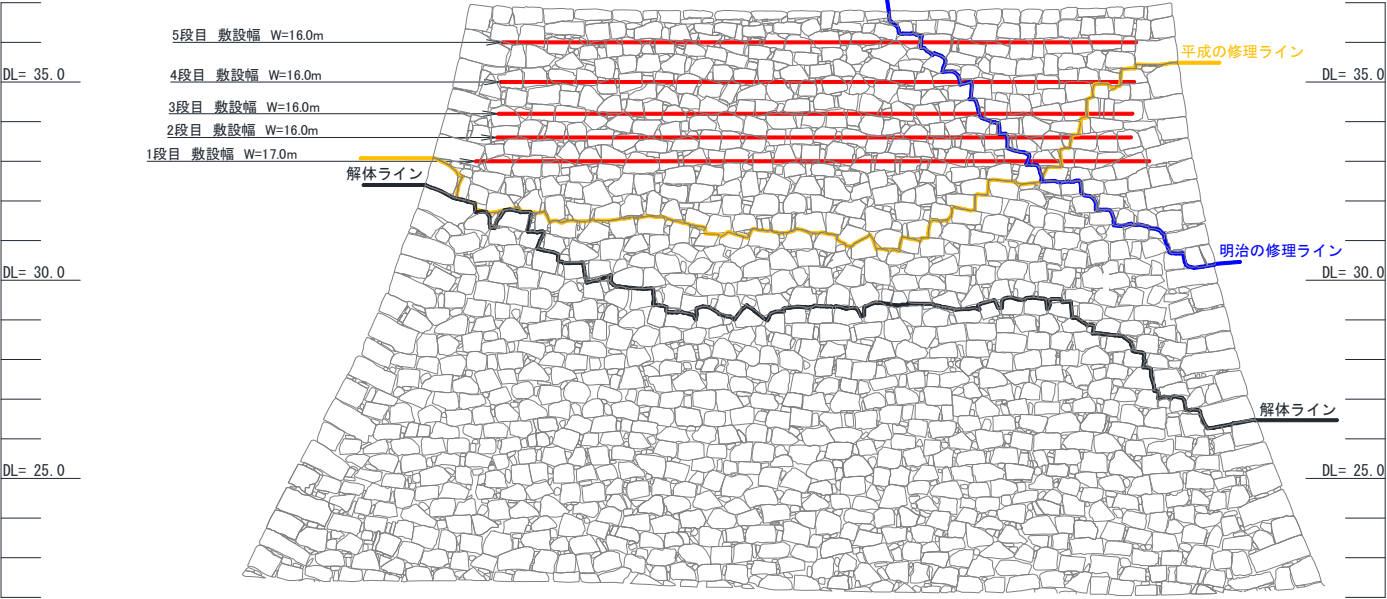


■ (参考) 復旧立面図 (北面：H266)

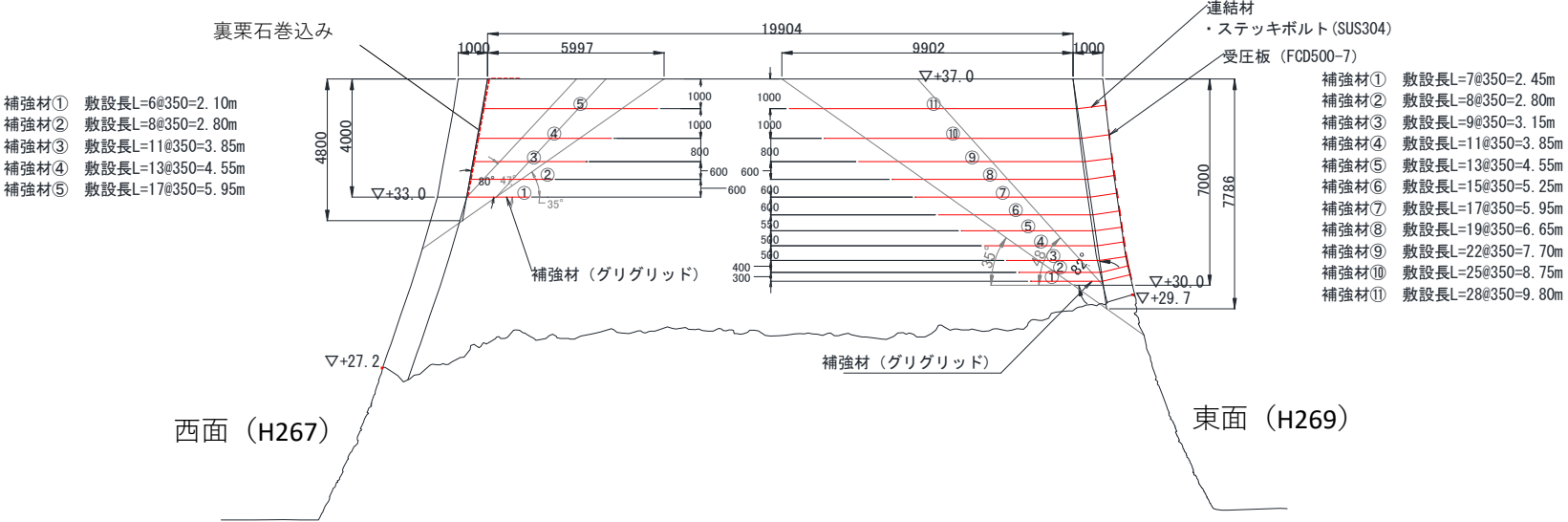


（参考）復旧立面図（西面：H267）

復旧立面図
(H267)



復旧断面図
(H267)



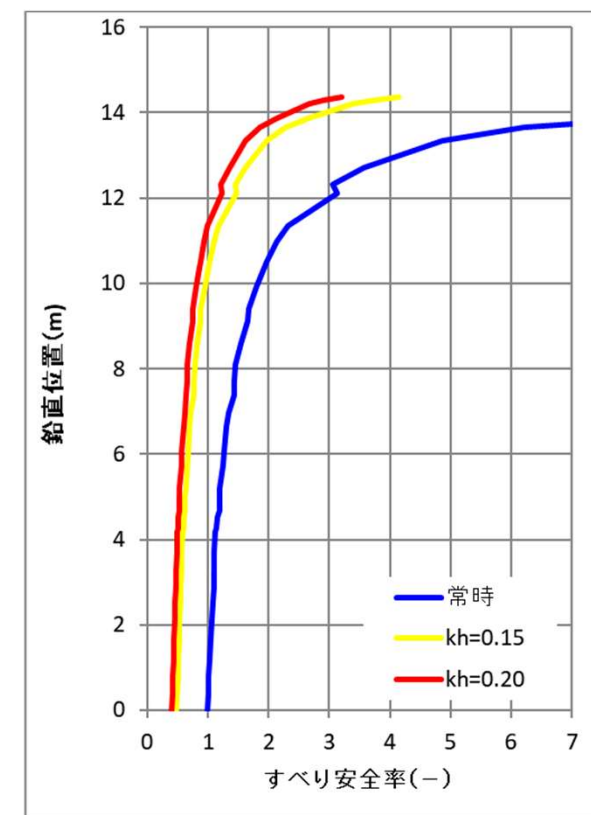
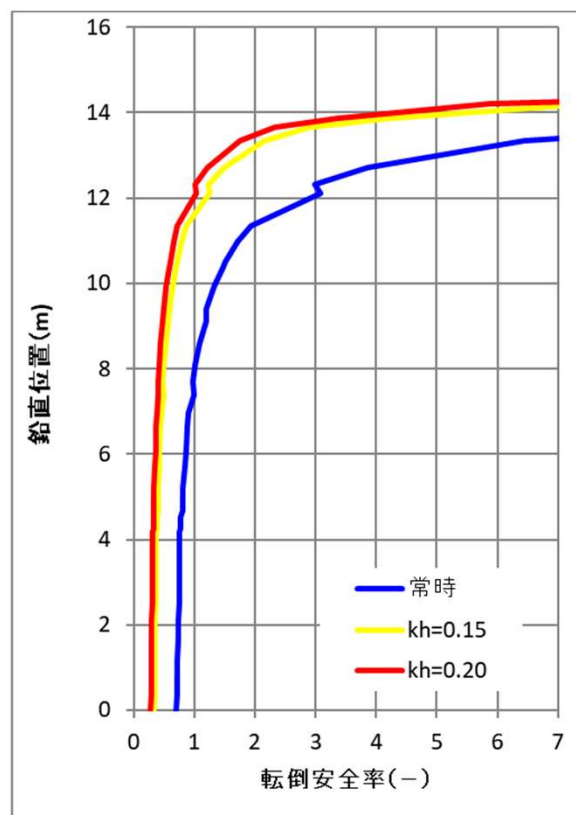
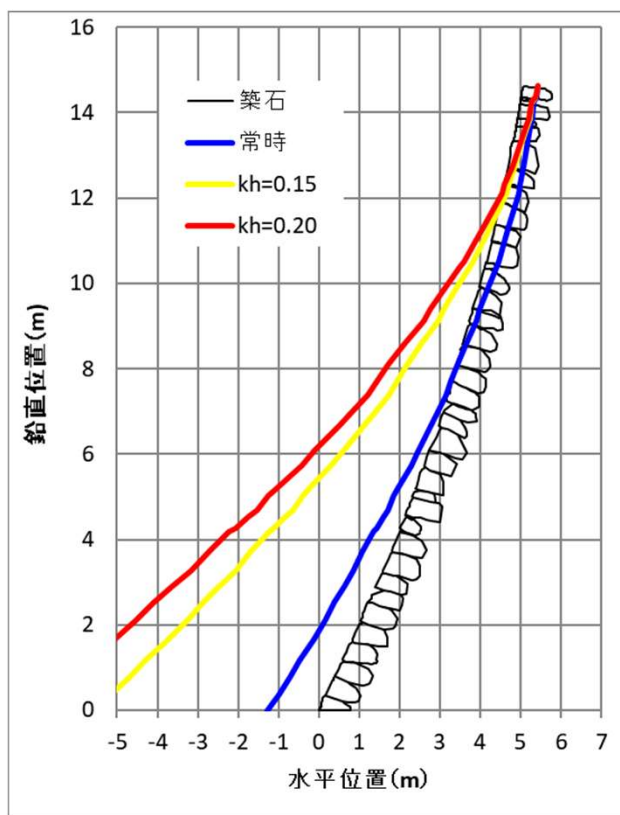
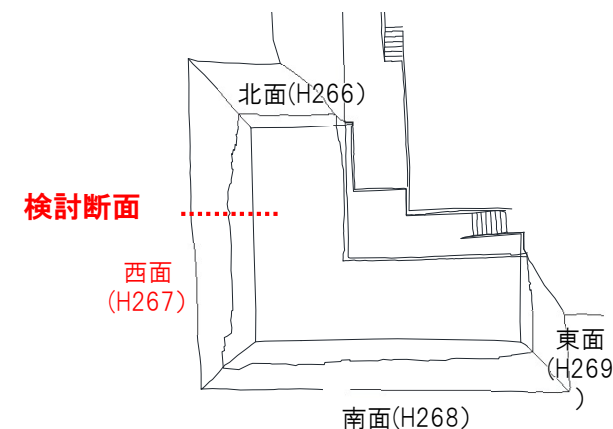
凡 例

- 受圧板
- 補強材(グリグリッド)
- 崩壊ライン
- 解体ライン
- 平成の修理ライン
- 明治の修理ライン

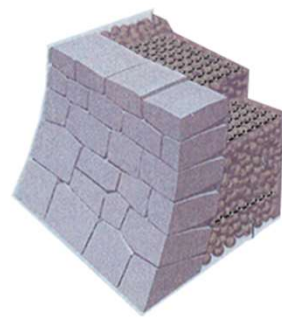
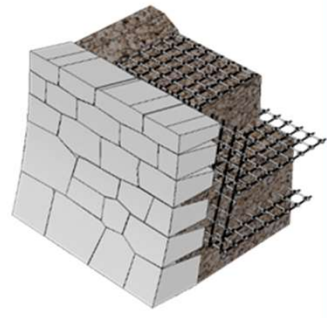
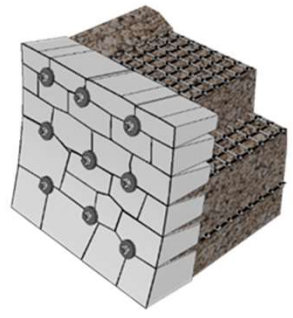
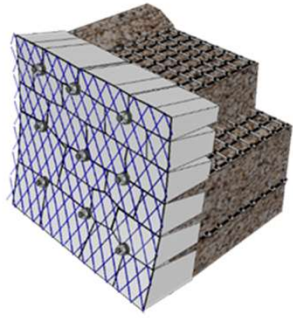
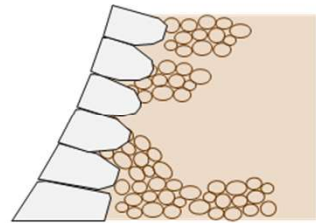
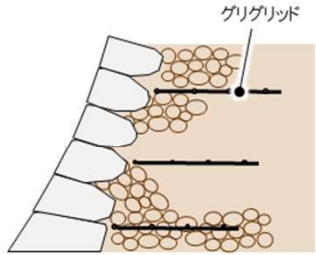
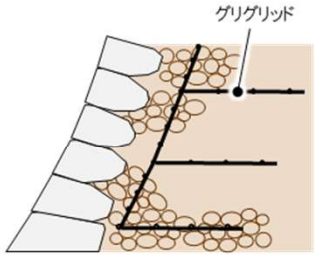
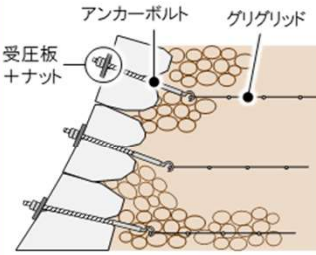
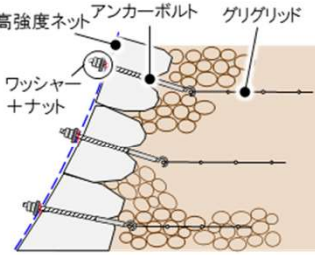
■ (参考) 累積示力線法による築石の安定性評価 (西面：H267)

【示力線に用いる設計定数等】

- ・ 築石の密度： $\gamma = 26.5 \text{ kN/m}^3$
- ・ 栗石の密度： $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$
- ・ 栗石層の内部摩擦角： $\phi = 35.6^\circ$
- ・ 縦断勾配は復旧後の形状を反映
- ・ 築石形状は石材調査結果を反映 (非解体部は推定)



■ (参考) 実験結果を踏まえた補強工法 (グリグリッド工法)

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		 ・栗石層にグリグリッドを敷設する。	 ・栗石層にグリグリッドを敷設し、さらに築石背面で巻き込む。	 ・栗石層にグリグリッドを敷設し、石垣前面に設置する受圧板に連結する。	 ・栗石層にグリグリッドを敷設し、石垣前面に設置するネットに連結する。
文化財的検討	外観への影響	・障害物なし ○	・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		×	△	△	○	△

■ (参考) 模型実験結果 (裏栗石巻込み型グリグリッド)

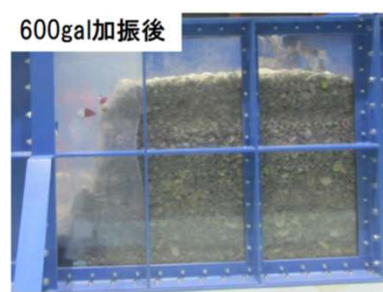
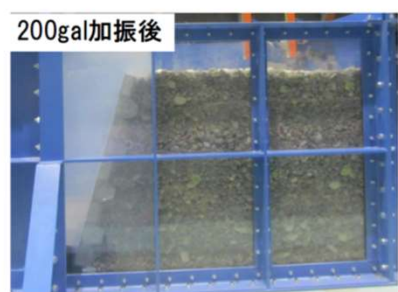
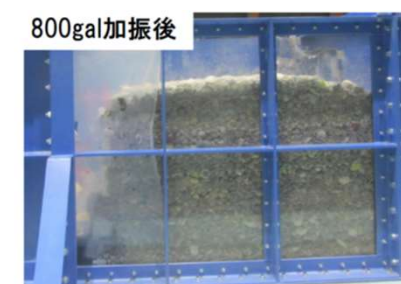
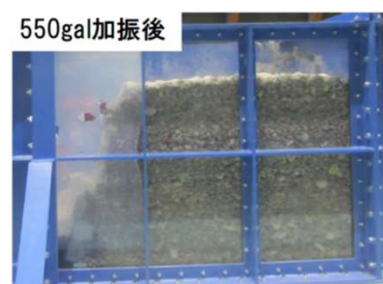
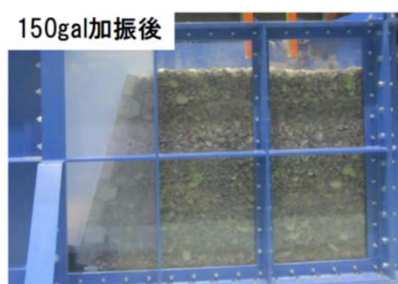
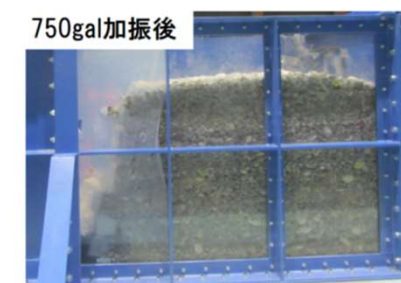
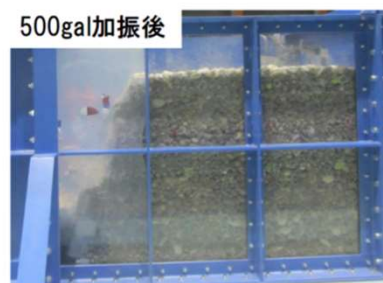
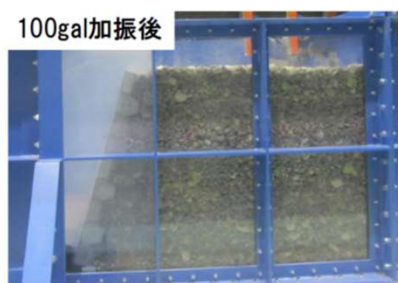
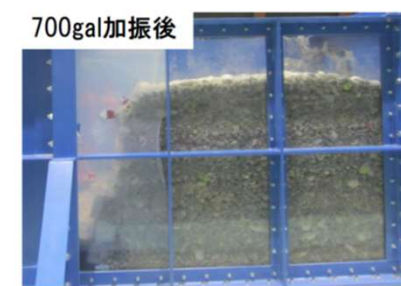
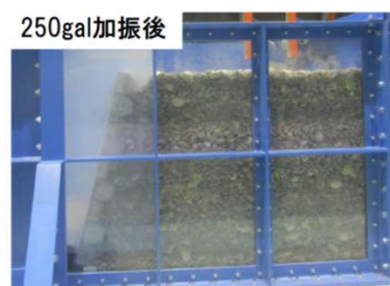
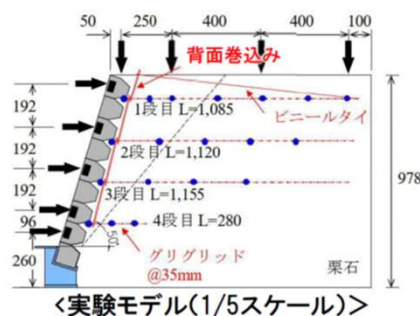


図-1 加振実験時の模型石垣の変形推移

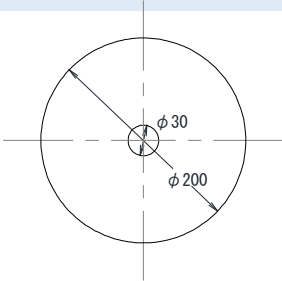
⇒築石のみ崩壊するが、裏栗石は崩壊しない =大地震時でも櫓の土台として自立

■ 前回委員会の主な意見（補強仕様について（受圧板））

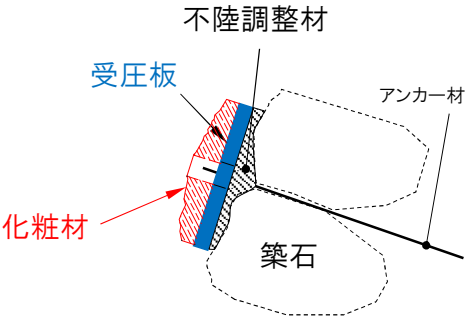
北野委員	・デザインもあるがメンテナンスもあわせて考慮が必要 ・平滑プレート（鋳鉄）の錆なども考えるべき
千田委員	・近くで見た時の印象もあるが、距離を取って高石垣に設置されている印象を実際に見て、みんなで決められたらいい

■ 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（φ200mm）



② 材 質：築石への錆付着を考慮し、**ステンレスプレート**とする



案	鋼製プレート+亜鉛メッキ	ステンレスプレート
概要	鋼製のプレートに溶融亜鉛メッキHDZ55を塗膜	ステンレスのプレート
コスト比	1.0	1.5
備考	塗膜が剥離した場合、築石に錆が付着するおそれ	

③ 化 粧 材：外観がなじむ**自然石（安山岩）**とする

案	案① 自然石（安山岩）	案② 擬岩コンクリート	案③ 擬岩FRP	案④ 化粧なし
イメージ				
		※色粉による色調の調整は可能	※塗装により色調の調整が可能	※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 ※鋼製プレートの場合
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
コスト比	1.5	1.6	1.7	1.0 ※鋼製プレートの場合

■ (参考) 受圧板試験施工状況 (7 / 2 ~ 五階櫓台石垣)

