資料２-５

第4章5　最新技術も活用した安全対策の検討

（１）文化財的価値の保存を踏まえた石垣・建造物等の耐震化等の検討

①石垣構造解析：修理検討対象の石垣で実施済み

⇒３次元レーザー測量・ボーリング調査・地中レーダー探査・衝撃弾性波探査・
ファイバースコープ調査・超音波探査

⇒FEM解析、DEM解析

⇒実現象の再現性、解析結果の妥当性の検証に課題あり

⇒熊本城石垣耐震診断指針（案）を策定（令和３年３月）し、指針による診断を実施

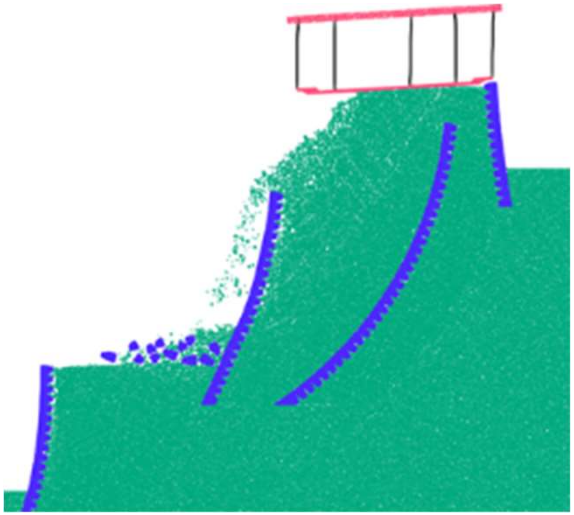
⇒診断結果と実現象の整合に課題あり　要因を分析し、解析手法の再検証を実施し改善
（令和４年６月）

⇒複雑な石垣構造を正確に評価するにはまだ課題が多い

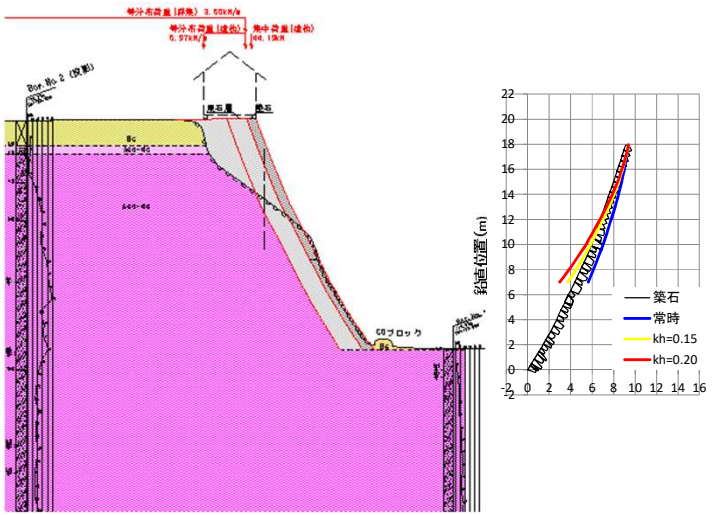
★今後も石垣の安定性評価手法の考察・検証が必要



地中レーダー探査
（本丸御殿周辺石垣）



DEM解析
（飯田丸五階櫓台石垣）



耐震診断指針による築石の安定性評価
（北十八間櫓下石垣）

2）「短期計画工程」及び「施策と具体的な取り組み」に関する検証

（1）文化財的価値の保存を踏まえた石垣・建造物等の耐震化等の検討

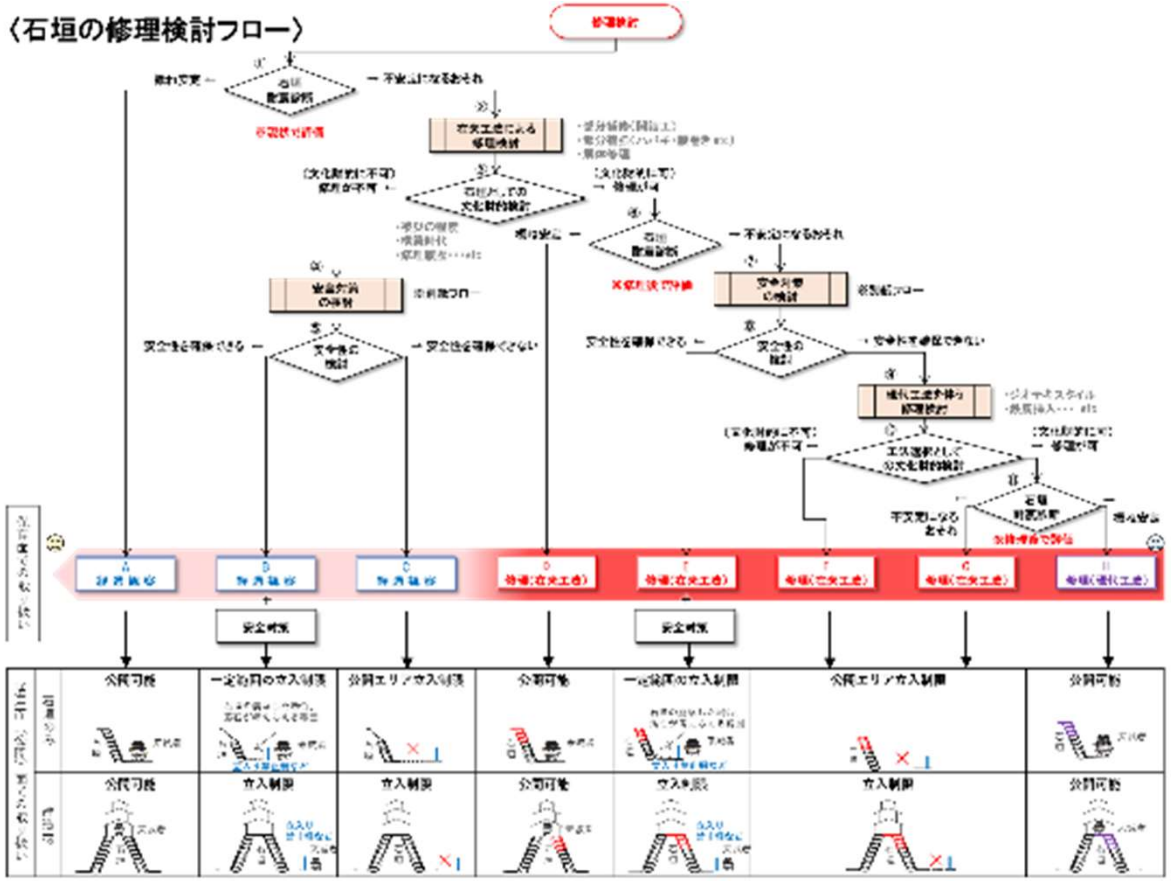
②石垣の構造評価と補強：天守台石垣、飯田丸五階櫓台石垣で実施

⇒石垣の文化財的価値を鑑みた修理検討フローを作成し、石垣補強の要否について検討

⇒石垣模型振動台実験を実施し、改良型ジオテキスタイル工法の補強効果を確認

⇒全ての石垣に適用できるわけではない

★今後も石垣ごとに異なる諸条件に応じた有効な手法の検討が必要



石垣の修理検討フロー

飯田丸五階櫓台　石垣模型振動台実験

【令和元年】

○無補強ケース・補強ケース（ジオテキ巻込み）実験

⇒震度6強程度（350gal）の加振後、石垣下部が崩壊

○補強ケース（ジオテキ＋受圧板）実験

⇒震度6強程度（450gal）の加振後、石垣下部が崩壊

【令和２年】

○補強範囲拡大ケース（ジオテキ＋受圧板）実験

⇒震度7相当（600gal）の加振後も崩壊しない





石垣模型振動台実験

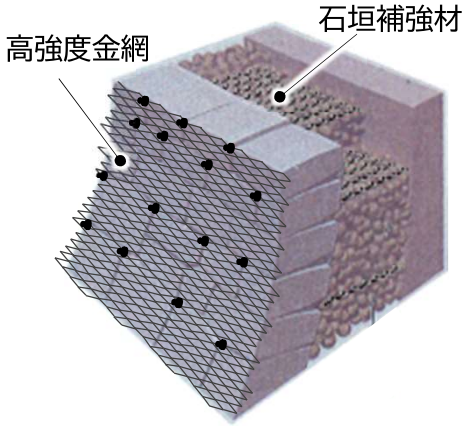
2）「短期計画工程」及び「施策と具体的な取り組み」に関する検証

（1）文化財的価値の保存を踏まえた石垣・建造物等の耐震化等の検討

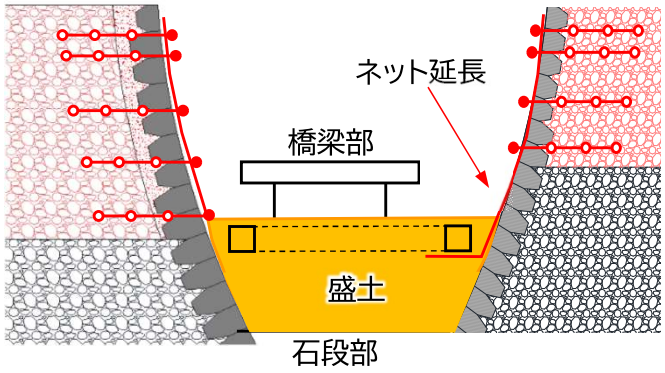
⇒天守台石垣の現代補強：石垣の崩落等の被害が甚大であり、且つ石垣の側を来城者が通る小天守入口部分に安全対策を実施した。江戸期の石垣の部分は盛土により押さえ、明治以降に修理された範囲に現代補強を行い、安全性を確保した。

⇒築石と連結する必要があるため、補強材（アンカーボルト、高強度金網もしくは受圧板など）が石垣前面に露出する

★石垣の本質的価値を損ねない範囲内での補強と耐震性能の両立が課題



石垣補強イメージ



小天守入口部分の断面図



石垣補強材の施工状況
（改良型ジオテキスタイル工法）

2）「短期計画工程」及び「施策と具体的な取り組み」に関する検証

（1）文化財的価値の保存を踏まえた石垣・建造物等の耐震化等の検討

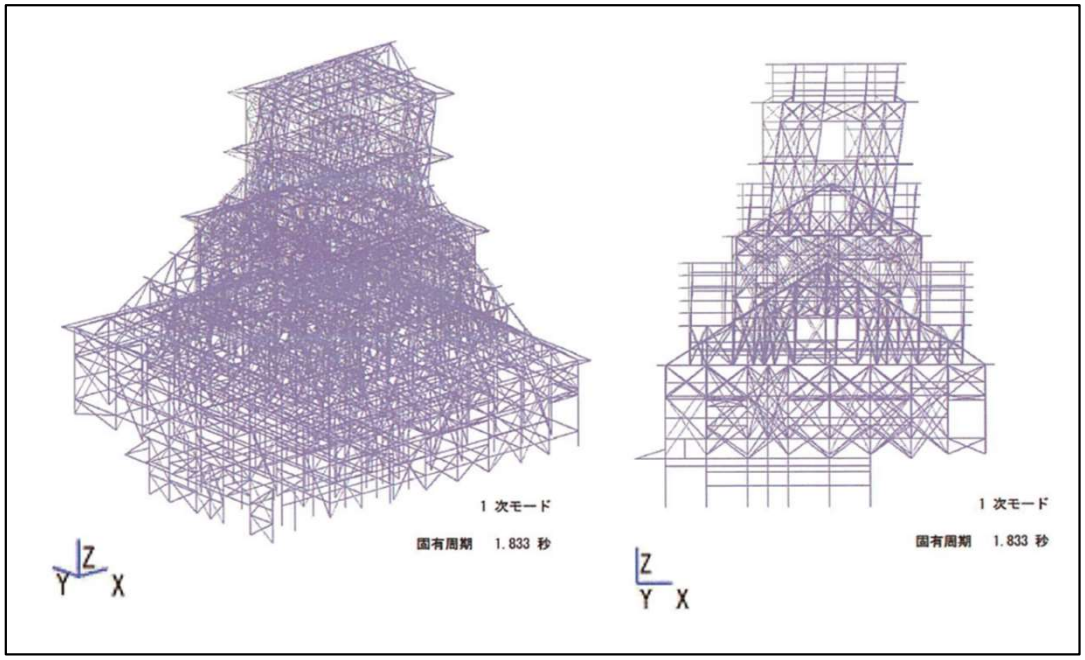
③建造物構造解析

⇒時刻歴応答解析：宇土櫓にて実施

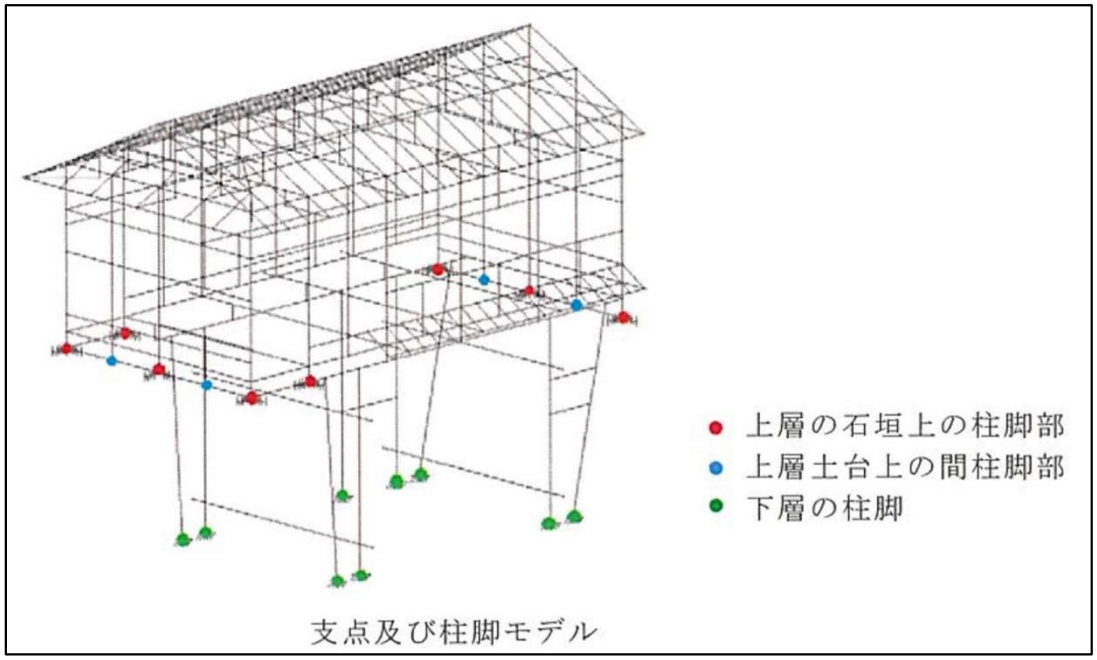
⇒限界耐力計算：その他の櫓にて実施

建造物の耐震化の計画にあたっては、文化庁文化財保護部「重要文化財（建造物）耐震診断指針」及び「重要文化財（建造物）耐震診断実施要領」を適用し実施している。

★建造物の耐震化等については、石垣が安定していることが前提となるため、石垣検討の状況に影響を受ける



時刻歴応答解析
（宇土櫓（五階櫓））



限界耐力計算
（不開門）

2）「短期計画工程」及び「施策と具体的な取り組み」に関する検証

（2）耐震化等安全対策に係る最新技術・現代工法の検討

①無人化重機による崩落石回収：飯田丸五階櫓にて実施
⇒崩落した石垣下という安全性の担保の無い場所で、作業を行うにあたり、離れた場所からオペレーターが遠隔で無人の重機を動かすという最新技術を活用した
②石垣測量設計：重要文化財建造物下石垣、飯田丸五階櫓台石垣などで実施
③石材照合ソフトの活用：飯田丸五階櫓下石垣で実施
⇒熊大と凸版印刷が協力して石材の形状等から元の位置を照合するソフトを開発。運用する中で被災前の石垣の鮮明な写真が必要といった課題もある

★円滑な復旧推進のため、今後もより効率的な最新技術の選択・活用が必要



無人化重機による石材回収
（飯田丸五階櫓台石垣）



石材調査に照合ソフトを活用
（飯田丸五階櫓台石垣）