

# 令和5年度に実施した現地予備調査について

[ 目 次 ]

- (1) 既往調査(令和3、4年度実施)概要 ..... 1
- (2) 今回調査目的及び概要
  - 1) 調査内容 ..... 1
  - 2) 調査状況 ..... 2
- (3) 調査結果
  - A) 周辺状況調査 ..... 3
  - B) 石垣現況補足調査 ..... 5
  - C) 3次元補完測量 ..... 7
  - D) 石垣断面構造の補足調査 ..... 9
- (4) 今後の作業
  - 1) 作業概要 ..... 14
  - 2) 解析内容
    - ① 石垣変形状況の把握 ..... 15
    - ② 解析モデルの作成
      - ア 石垣断面モデル作成 ..... 15
      - イ 基礎地盤断面モデル作成 ..... 15
    - ③ 石垣簡易検討(累積示力線法) ..... 16
    - ④ 石垣基礎地盤検討(動的有限要素法解析) ..... 16
    - ⑤ 石垣詳細検討(2次元個別要素法解析) ..... 16
- (5) 今後の検討への反映の仕方について ..... 17

令和6年度第1回  
広島城天守の復元等に関する検討会議

令和6年5月

(1) 既往調査（令和3、4年度実施）概要

令和3～4年度に行われている、現況調査の概要を表-1に示す。

表-1 既往調査の概要

既往調査	業務概要
令和3年度 広島城天守台石垣現況調査	石垣計測（レーザ測量） 石垣写真撮影、写真測量（オルソ画像） 石垣の断面調査（1断面） 地中レーダ、衝撃弾性波探査、石垣内部空洞調査 現状検討 現状図作成、変状箇所の考察（はらみ出し指数） 石垣安定性簡易検討（累積示力線法）
令和4年度 広島城小天守台石垣現況調査	石垣計測（レーザ測量） 石垣写真撮影、写真測量（オルソ画像） 石垣の断面調査（3断面） 地中レーダ、石垣内部空洞調査 現状検討 現状図作成、変状箇所の考察（はらみ出し指数）

(2) 今回調査目的及び概要

天守～小天守台石垣の現状を把握し、現天守解体及び天守群の復元等に対する工学的検討を行い、課題の抽出と整理等を目的として、表-2のとおり実施する。

表-2 現地調査項目・目的・手法

調査項目	調査目的	調査手法
A) 周辺状況調査	周辺状況の把握	目視踏査・3次元レーザ測量
B) 石垣現況補足調査	石垣の変形状況、築石状況等の現状把握	石垣目視調査
C) 3次元補完測量	周辺地形、建造物等の3次元モデル作成	空中写真測量(ドローン) 3次元レーザ測量(内堀石垣)
D) 石垣断面構造の補足調査 (下図検討断面①～④)	石垣断面構造を調査し解析断面モデルを作成。石垣の安定性を技術検討する。	石垣面の地中レーダ探査 築石の衝撃弾性波探査 ファイバースコープによる裏込め状況調査

1) 調査内容

令和3、4年度に実施された天守～小天守台石垣の調査内容を踏まえ、今回行う現地調査内容を表-3に検討断面位置を図-1に示す。

表-3 現地調査内容

調査項目	調査内容	
	今回実施	既存資料あり
A) 周辺状況調査	全体状況現地確認	各種報告書・文献
B) 石垣現況補足調査	天守東、西、南面	天守北面
C) 3次元補完測量	空中写真測量（ドローン）現天守 3次元レーザ測量（内堀石垣）	3次元レーザ点群データ 石垣写真測量データ
D) 石垣断面構造の補足調査 (石垣検討断面作成)	天守西面（検討断面②） 地中レーダ探査 衝撃弾性波探査 ファイバースコープ調査 東小天守北面、南小天守西面 (検討断面③, ④) 衝撃弾性波探査	天守北面（検討断面①） 地中レーダ探査 衝撃弾性波探査 ファイバースコープ調査 東小天守北面、南小天守西面 (検討断面③, ④) 地中レーダ探査 ファイバースコープ調査

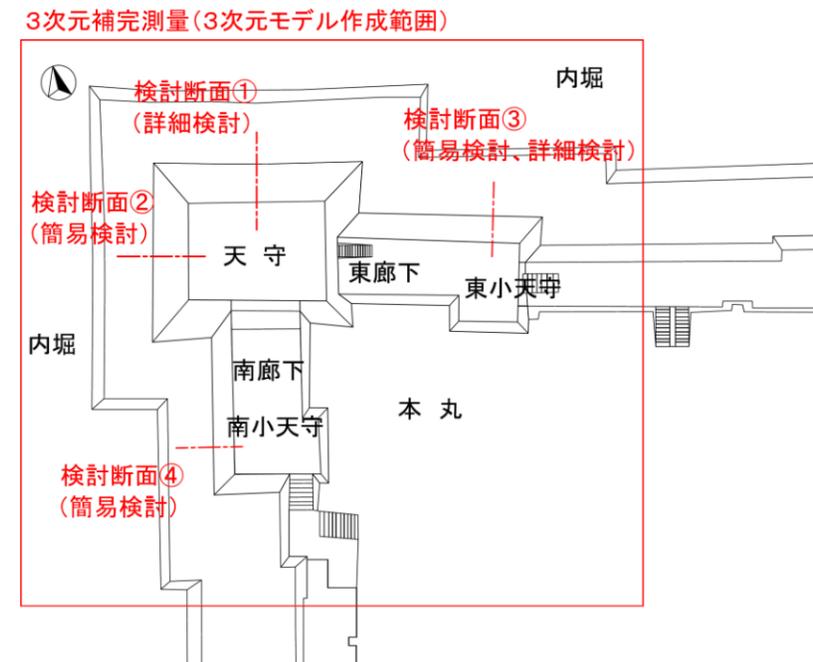


図-1 石垣検討断面

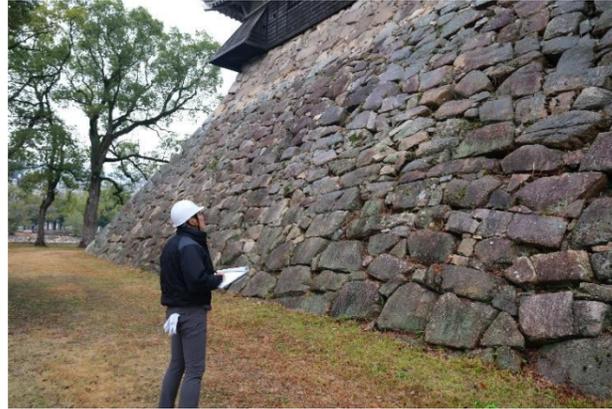
2) 調査状況

令和5年12月12日～19日にかけて現地予備調査を行った。状況写真を以下に示す。

A) 周辺状況調査 (モバイル3次元レーザスキャナ)



B) 石垣現況補足調査状況



D) 石垣断面構造の補足調査状況 (地中レーダ探査)



C) 3次元補完測量 (空中写真測量: ドローン)



D) 石垣断面構造の補足調査状況 (衝撃弾性波探査)



C) 3次元補完測量 (3次元レーザ測量)



D) 石垣断面構造の補足調査状況 (ファイバースコープ)



図-2 調査状況写真

(3) 調査結果

A) 周辺状況調査

現天守の解体及び天守群の復元等の施工計画を目的に、現地の目視調査と可搬式のモバイルスキャナによる3次元レーザ測量を行った。

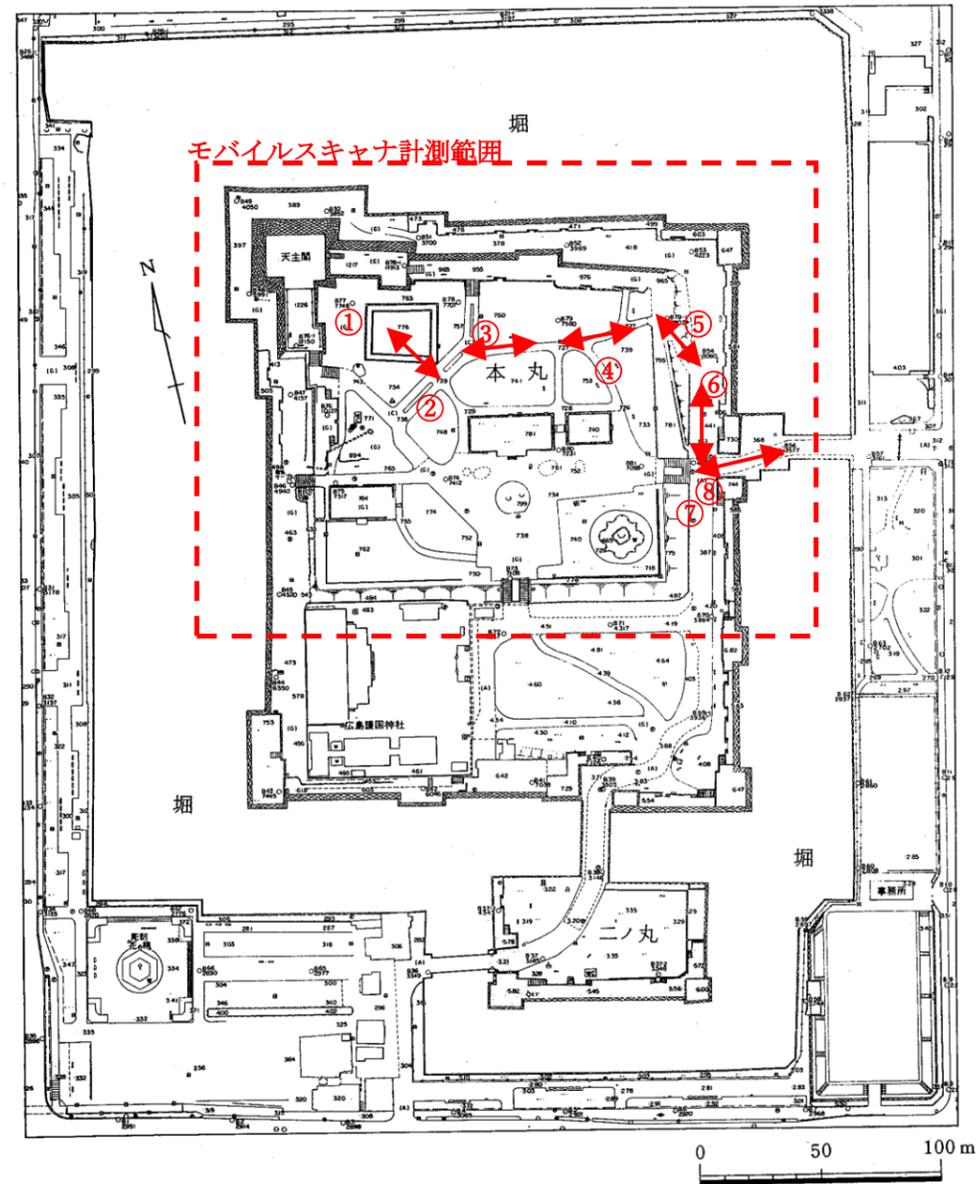


図-3 広島城平面図



図-4 現地状況写真

広島城内の広範囲の3次元測量を以下のモバイルスキャナで実施した。同スキャナは、地上型3次元レーザースキャナより精度は劣るが容易に広範囲の計測が可能である。



機械名	STONEX X120G0
測定距離	0.5~120m
測定範囲	V : 270° / H : 360°
レーザクラス	1
計測速度	320,000 点/秒
相対精度	< 6mm
内蔵カメラ	3 台 (5MP、計 15MP)

図-5 STONEX X120G0

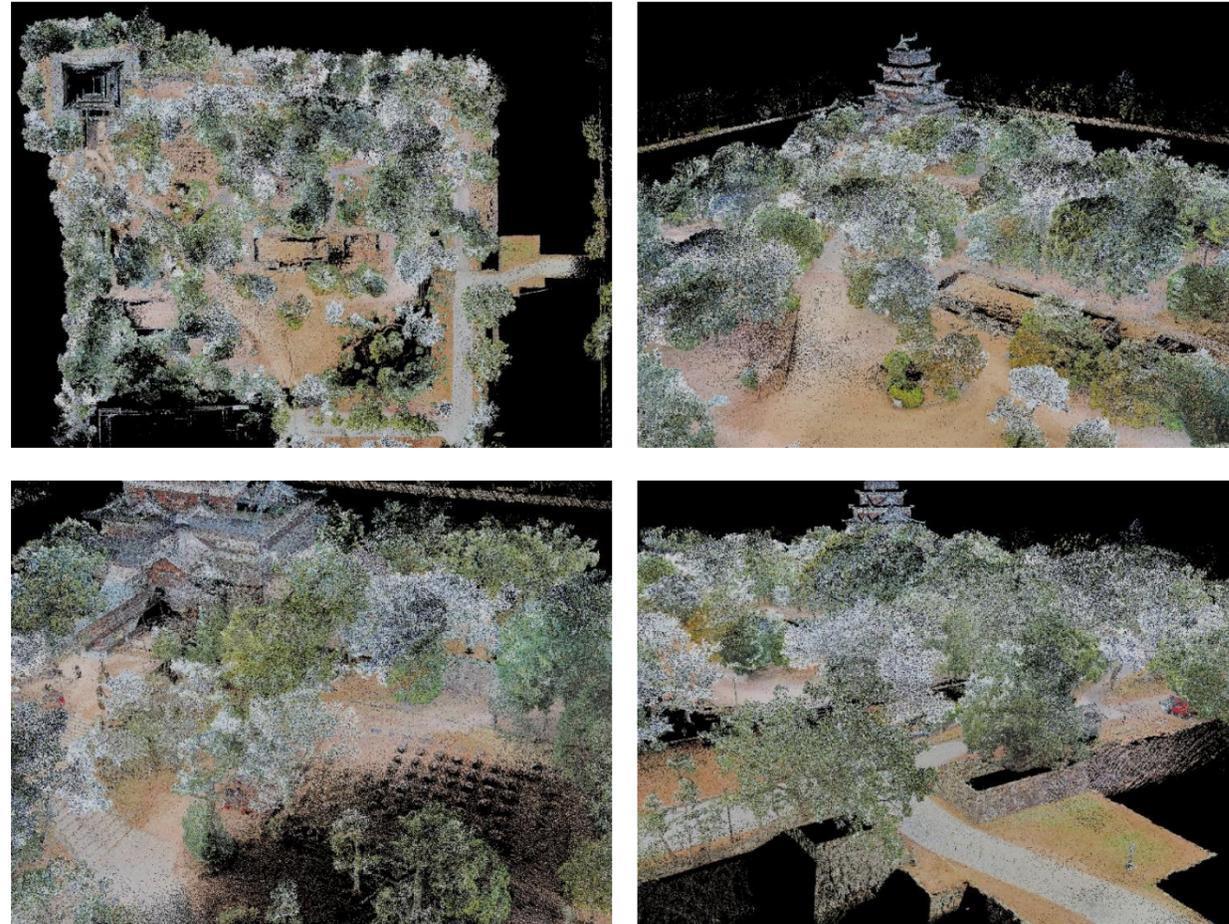


図-6 広島城内3次元画像例

B) 石垣現況補足調査

広島城天守～廊下～小天守台石垣についての工学的所見を取りまとめると以下のものであった。

◇ 築石状況

- ・ 自然石が主に用いられ、石目の発達した築石が多い。(割れの発生)



- ・ 劣化（風化）を起こしている石材が散見される。



◇ 石垣状況

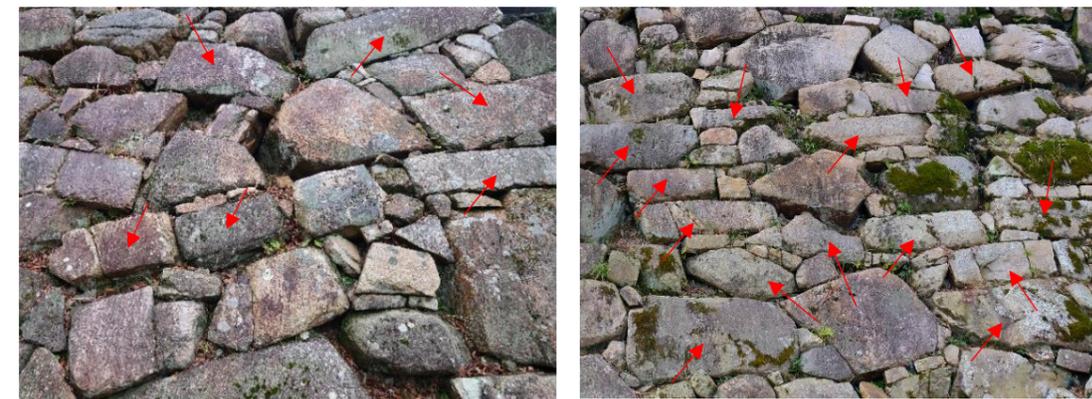
- ・ 石垣に顕著な変形（はらみ出し等）は発生していない。
- ・ 築石間の隙間が多い箇所がある。(間詰め石、劣化した築石の欠損)



- ・ 小石材による間詰めが散見される



- ・ 石材を横使いしている部分がある。(同一面で異なる積み方がある)



- ・ 樹根は一部で見られるが、現時点での影響は小さい。

◇ 石垣線形状況

・ 石垣の勾配

表-4 石垣の勾配

位置	内堀側（外郭側）	内郭側
天守台石垣	56° ~59°	62° ~65°
小天守台（廊下）石垣	60° ~66°	66° ~72°

天守台石垣の勾配は比較的緩勾配である。

石垣高さの高い内堀側（外郭側）は内郭側より石垣の勾配が緩くなっている。

天守台に比べ小天守台（廊下）は石垣の勾配が急になっている。

・ 平面線形

表-5 平面線形状況

位置	輪取り(石垣番号)	平面形状
天守台	あり	南東にかけての歪みが大きい
東小天守（廊下）台	あり (H050, H055)	歪みは小さい
南小天守（廊下）台	あり (H061)	小天守台南東にかけての歪みが大きく、石垣が前方にせり出している ⇒石垣の築石間の隙間が大きい（図-7 写真参照）

広島城天守台石垣 平面図

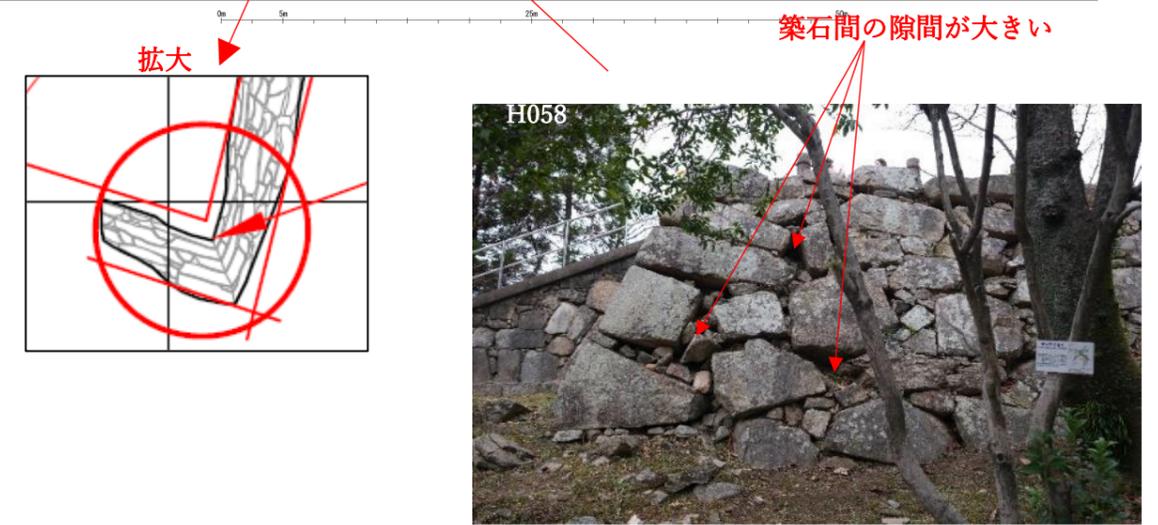
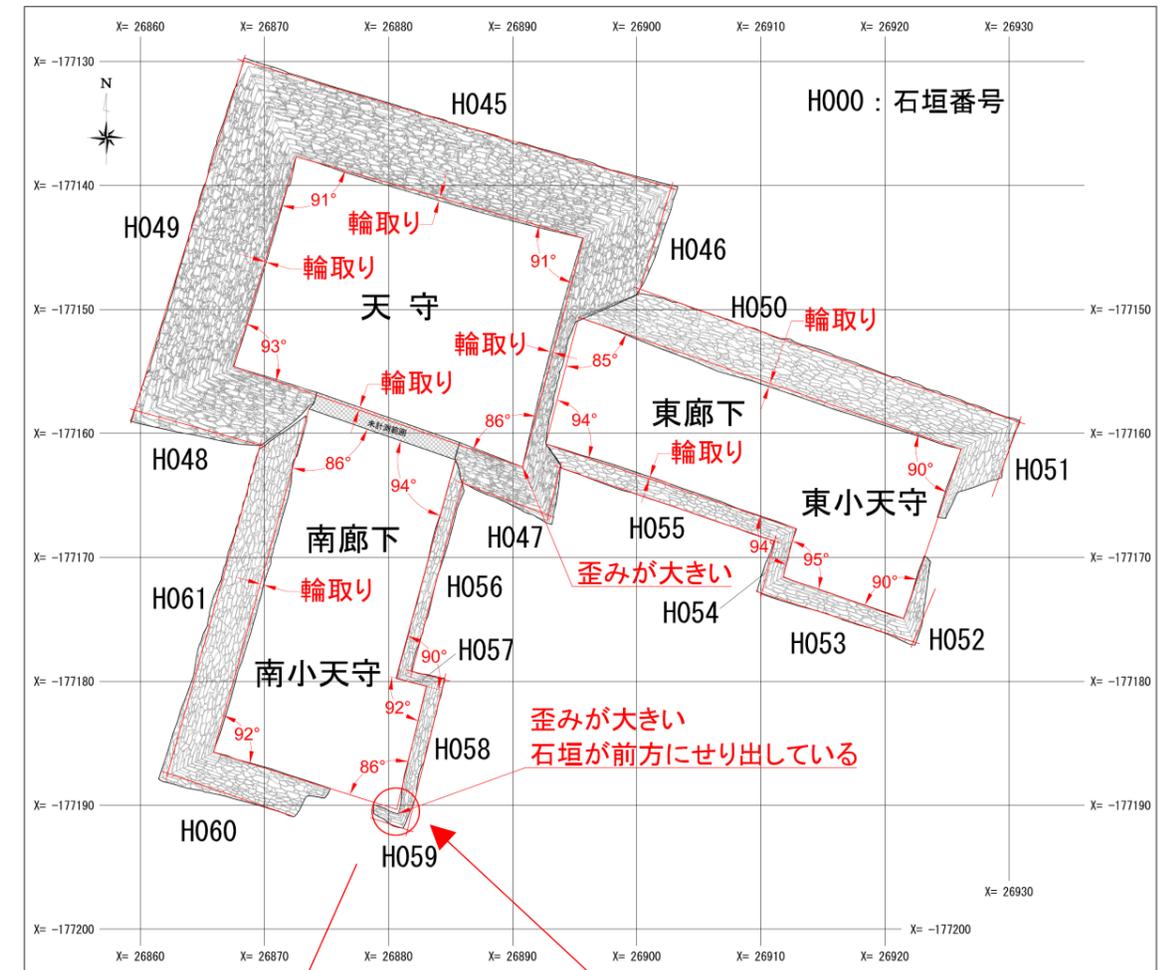


図-7 石垣平面図

C) 3次元補完測量

- ・空中写真測量（ドローン）

ドローン飛行イメージ、使用機器を以下に示す。

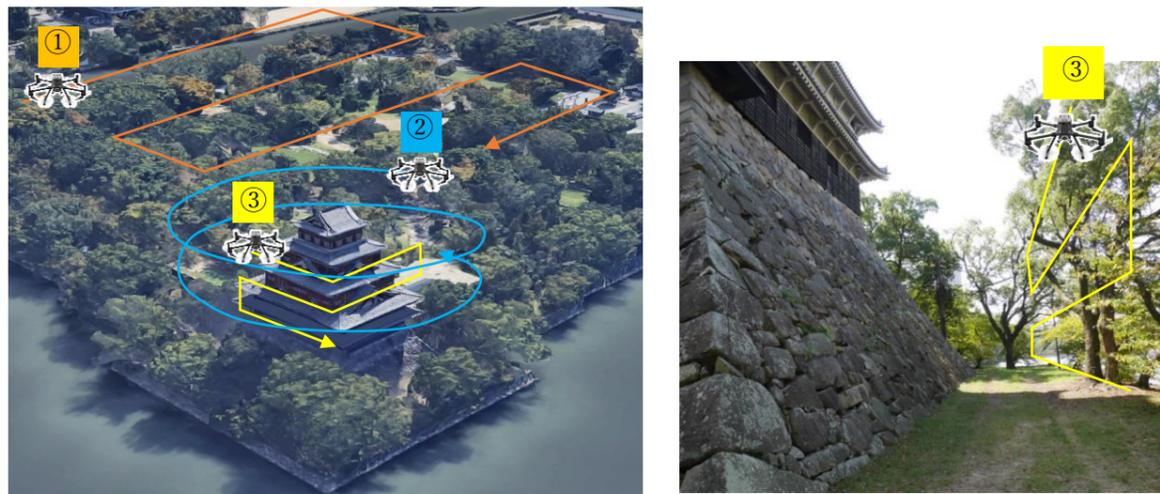


図-8 ドローン飛行イメージ

上空からの俯瞰計測（①，②）

ドローン DJI MATRICE300



名称	DJI社製 MATRICE 300RTK
重量	6.3kg(カメラ、電源搭載時)
最大離陸重量	9kg
最大風圧抵抗	15m/s
最大飛行時間	約55分(最大ペイロード時)
サイズ	810×670×430 mm
衝突検知	前後・左右・上下ビジョンシステム

ドローン搭載カメラ DJI zenmuseP1



名称	DJI zenmuseP1
タイプ	ミラーレス一眼
画素数	4500万画素 8192×5460
撮像素子	フルサイズ 35.9mm×24mmCMOS
大きさ	198 (W) ×166 (H) ×129 (D) mm
重さ	800g

天守近接計測（③）

Skydio 2



項目	仕様
飛行時間	23 分
サイズ	223*273*74
重量	775g
最大風速抵抗	約 10m/s
障害物検知	全方向
搭載カメラ画素数	1200 万画素
搭載カメラ撮像素子	1/2.3 型 CMOS
レンズ焦点距離	20mm (35mm 換算)

図-9 使用機械

- ・3次元レーザ測量

既往調査の3次元測量データを確認したところ内堀石垣のデータが無いことが分かった。内堀石垣の3次元点群データは3次元モデル作成、古写真解析に必要であることより内堀石垣の3次元レーザ測量を追加実施した。



機械名	FARO Focus Premium
測定距離	0.5～350m
測定範囲	V : 300° / H : 360°
レーザクラス	1
距離精度	±1mm

図-10 FARO Focus Premium

空中写真測量

<令和3年度成果画像 + 令和4年度成果画像 + 今回新規取得画像>

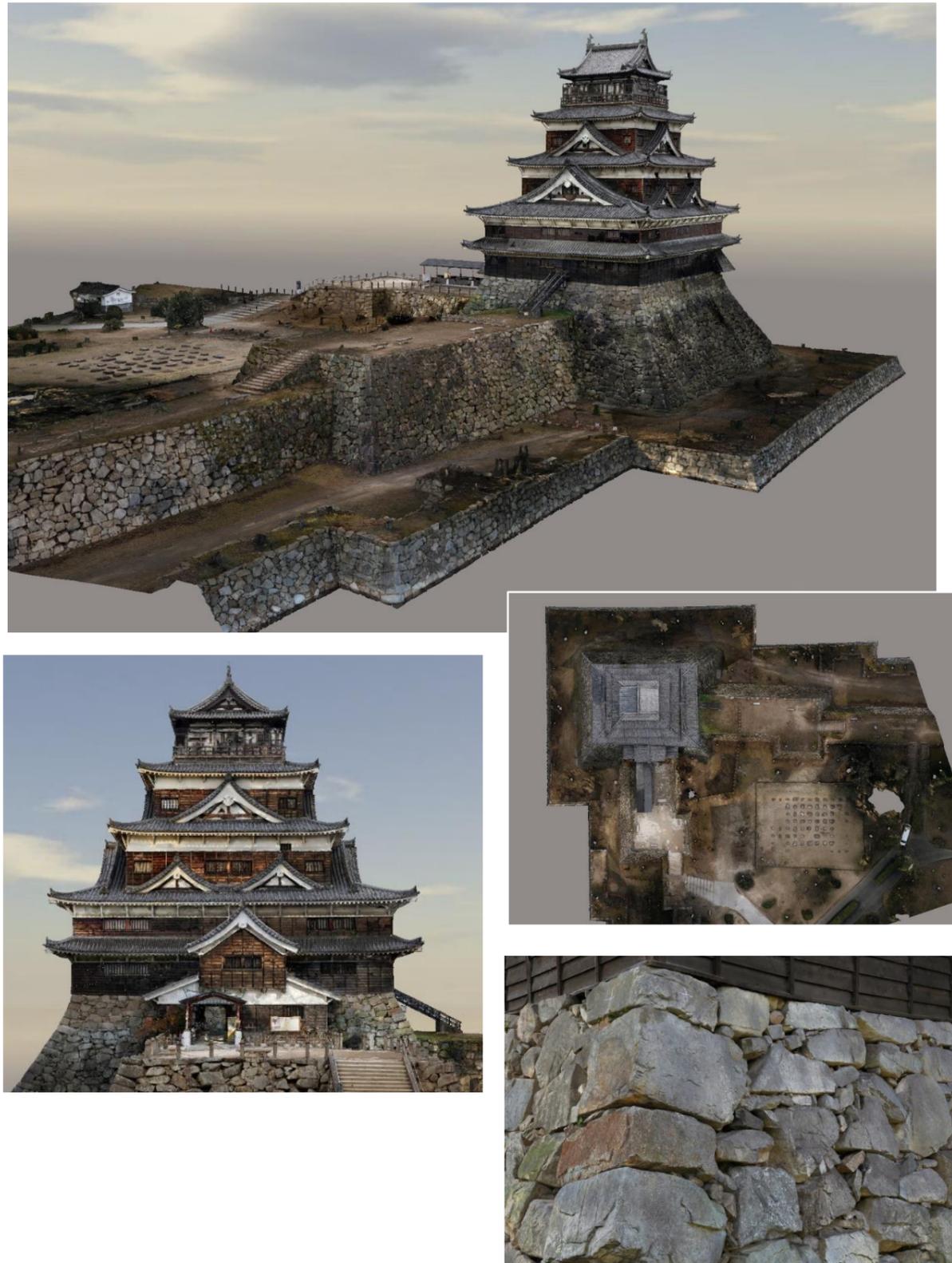


図-11 3次元モデル作成

3次元レーザ測量

<令和4年度成果点群 + 今回新規取得点群>

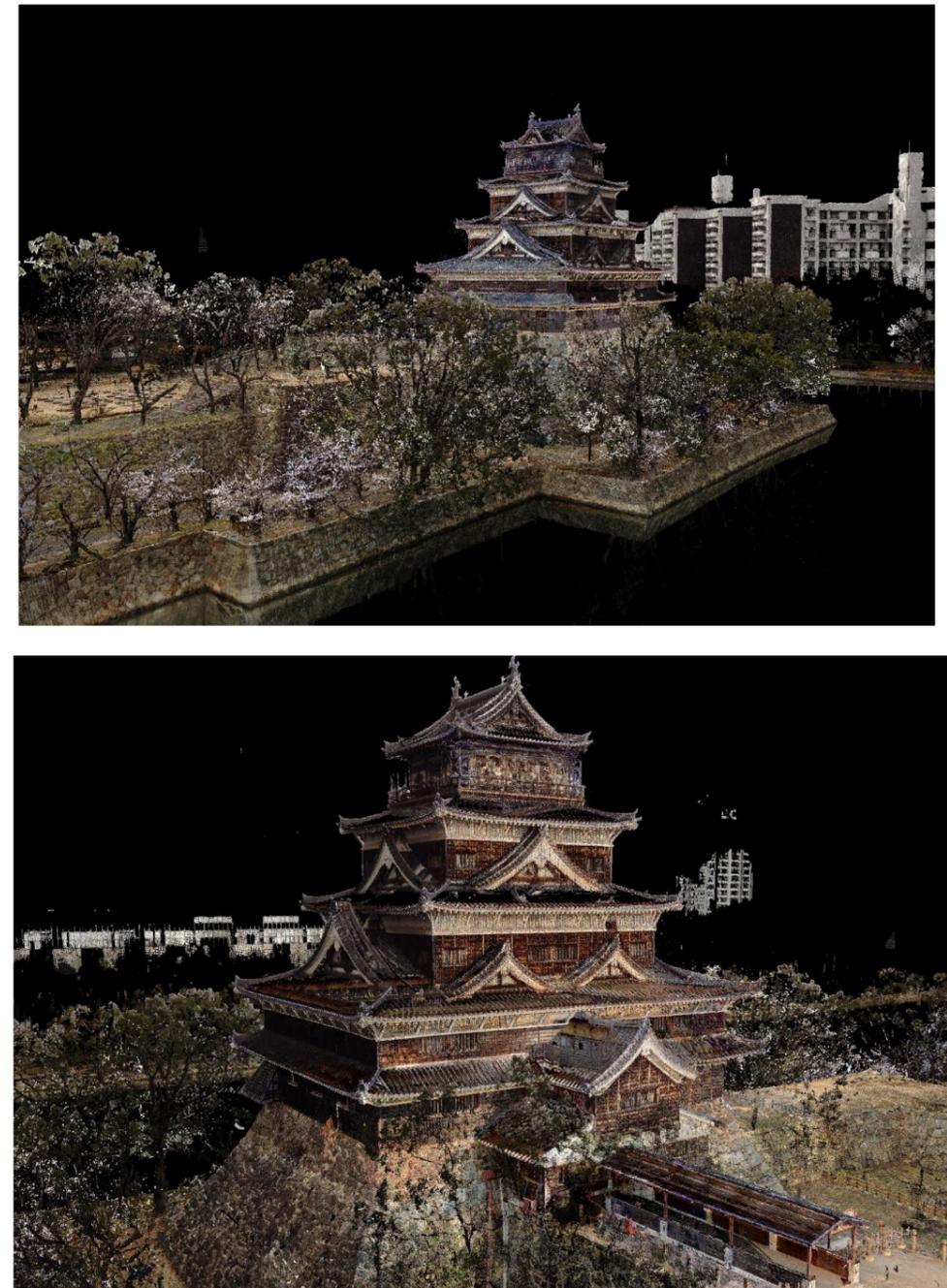


図-12 3次元レーザ測量合成モデル

D) 石垣断面構造の補足調査

石垣の解析断面の作成を目的に石垣断面構造の調査を行う。

既往調査

- ・広島城天守台石垣現況調査業務（令和4年3月）
- ・広島城小天守台石垣現況調査業務（令和5年3月）

より得られた情報を補完する補足調査を行った。

地中レーダ探査 天守台西面

衝撃弾性波探査 天守台西面、東小天守台北面、南小天守台西面

裏込め状況のファイバースコープ調査 天守台西面

- ・裏込め状況のファイバースコープ調査



機械名	TESLONG NTS200
動画解像度	1280×720
カメラ直径	8.2mm
ホース直径	7.6mm
視野角	60度
補助照明	LED6灯

図-15 TESLONG NTS200

使用機器を以下に示す。

- ・地中レーダ探査

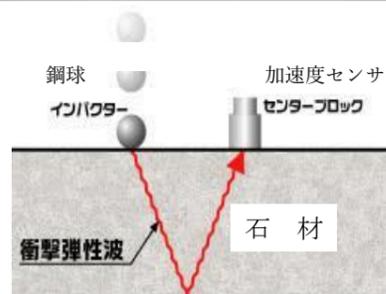
築石の控長把握が探査目的であるため深度約1.5mまでを比較的精度良く探査するため400MHzアンテナを主に使用する。



名称		型式	メーカー
地中探査レーダ SIR-3000	データロガー	DC3000/2100	GSSI
	アンテナ	50400S	GSSI
		50270S	GSSI

図-13 地中レーダ探査 使用機器

- ・衝撃弾性波調査



機能	コンクリート表面の弾性波速度測定		
	表面に開口したひび割れ深さの測定		
	コンクリート板の厚さの測定	ポイントモード	
	あるいは内部欠陥の検知	掃引測定モード	
装置の構成	本体部	アンプ, AD変換, 電源	1
	PC	測定制御(PC仕様書参照)	
	センサー	1~20kHz	1
	インパクト	φ30mm 鋼球, 350g ハンマ	1
	充電用電源	AC100V 入力, DC16V 出力(PC用)	1
	収納ケース	アルミニウム合金製	1
測定範囲	弾性波速度	2000m/s から 6000m/s	
	ひび割れ深さ	最小 20mm, 最大 200mm 以上	
	厚さ測定	最小 100mm, 最大 1500mm 以上	
測定データ数	PC側HDDの空き容量に依存 20,000データ/1GBite		
寸法	本体 260mm×190mm×70mm(突起を含まず)		
質量	約 2.8kg		

図-14 iTECKS-6

天守台西面石垣内部調査結果  
(今回調査結果から作成)

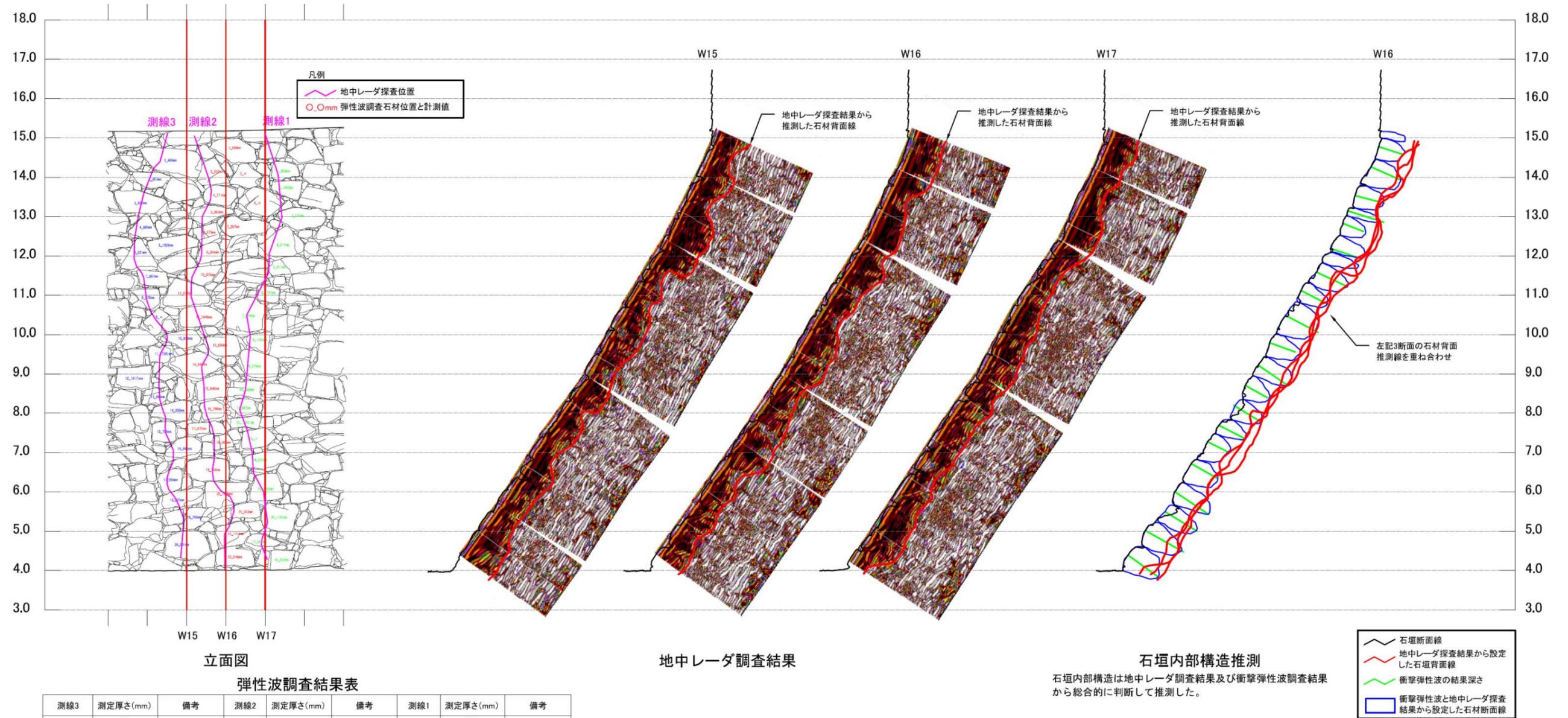
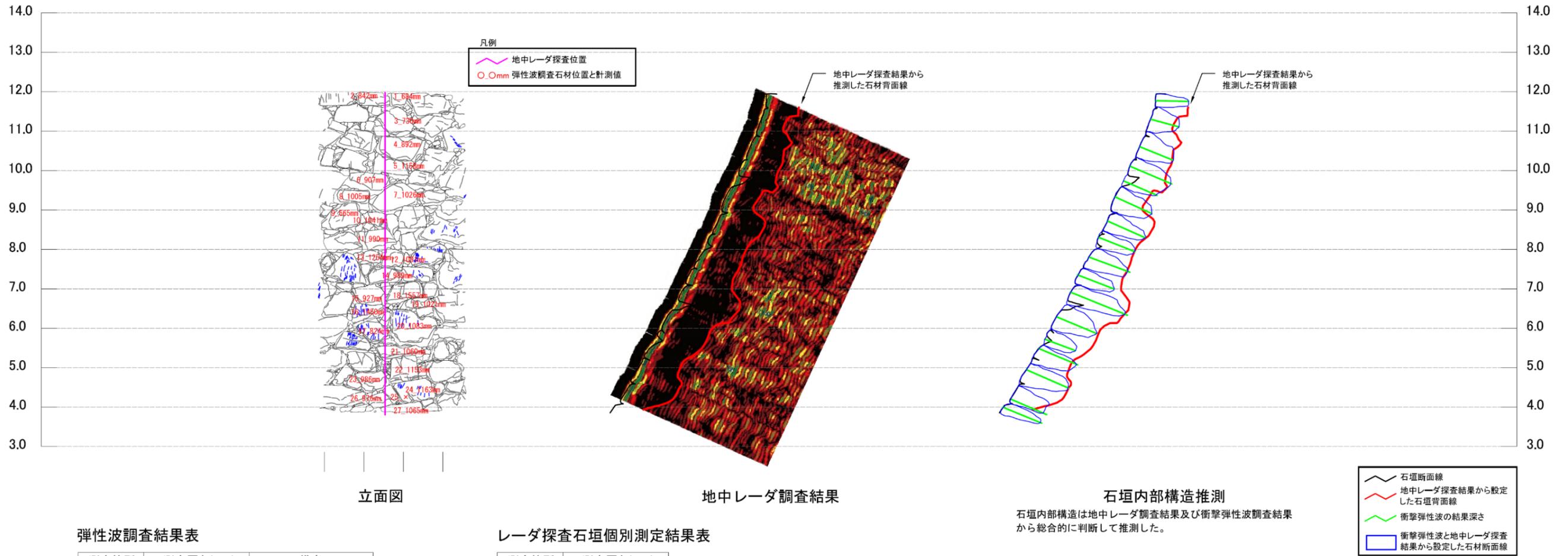


図-16 石垣内部調査結果 (天守台西面)

東小天守台北面石垣内部調査結果  
(既往調査及び今回調査結果から作成)



弾性波調査結果表

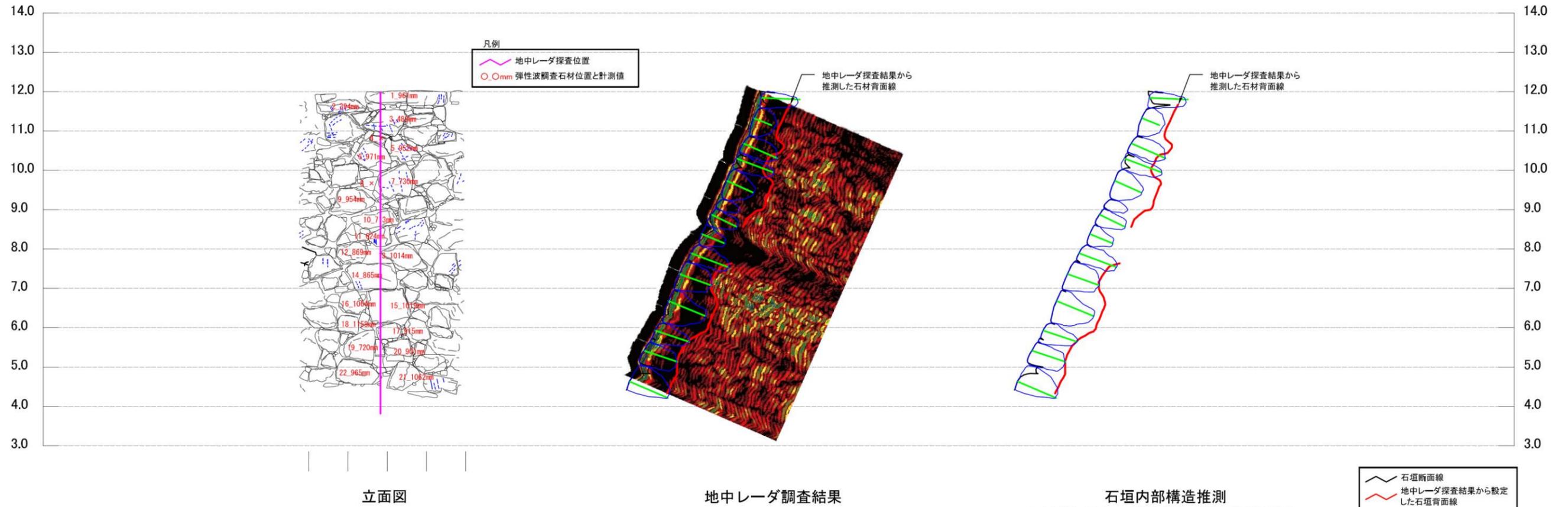
測定箇所	測定厚さ(mm)	備考
1	684	
2	842	
3	730	
4	892	
5	1158	
6	907	
7	1026	
8	1105	
9	665	
10	1041	
11	990	
12	1091	
13	1254	
14	989	
15	927	
16	1450	
17	824	
18	1557	
19	1021	
20	1083	
21	1060	
22	1153	
23	986	
24	1163	
25	-	小さすぎて測定不可
26	976	
27	1065	

レーダ探査石垣個別測定結果表

測定箇所	測定厚さ(mm)
1	830
2	920
3	590
4	980
5	1170
6	1030
7	990
8	1220
9	730
10	1230
11	1020
12	1070
13	1130
14	1040
15	930
16	1570
17	970
18	1510
19	1120
20	1200
21	1080
22	1260
23	1080
24	1250
25	130(間詰石)
26	1010
27	1140

図-17 石垣内部調査結果 (東小天守台北面)

南小天守台西面石垣内部調査結果  
(既往調査及び今回調査結果から作成)



弾性波調査結果表

測定箇所	測定厚さ(mm)	備考
1	961	
2	394	
3	483	
4	-	
5	952	
6	971	
7	730	
8	-	小さすぎて測定不可
9	954	
10	713	
11	624	
12	869	
13	1014	
14	865	
15	1019	
16	1064	
17	915	
18	1158	
19	720	
20	901	
21	1062	
22	965	

レーダ探査石垣個別測定結果表

測定箇所	測定厚さ(mm)
1	910
2	410
3	630
4	540
5	990
6	960
7	800
8	470(間詰石)
9	760
10	960
11	620
12	830
13	960
14	850
15	920
16	1060
17	910
18	1170
19	710
20	890
21	1110
22	840

石垣内部構造推測  
石垣内部構造は地中レーダ調査結果及び衝撃弾性波調査結果から総合的に判断して推測した。

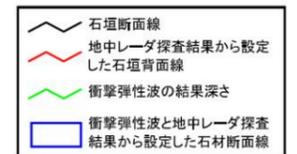
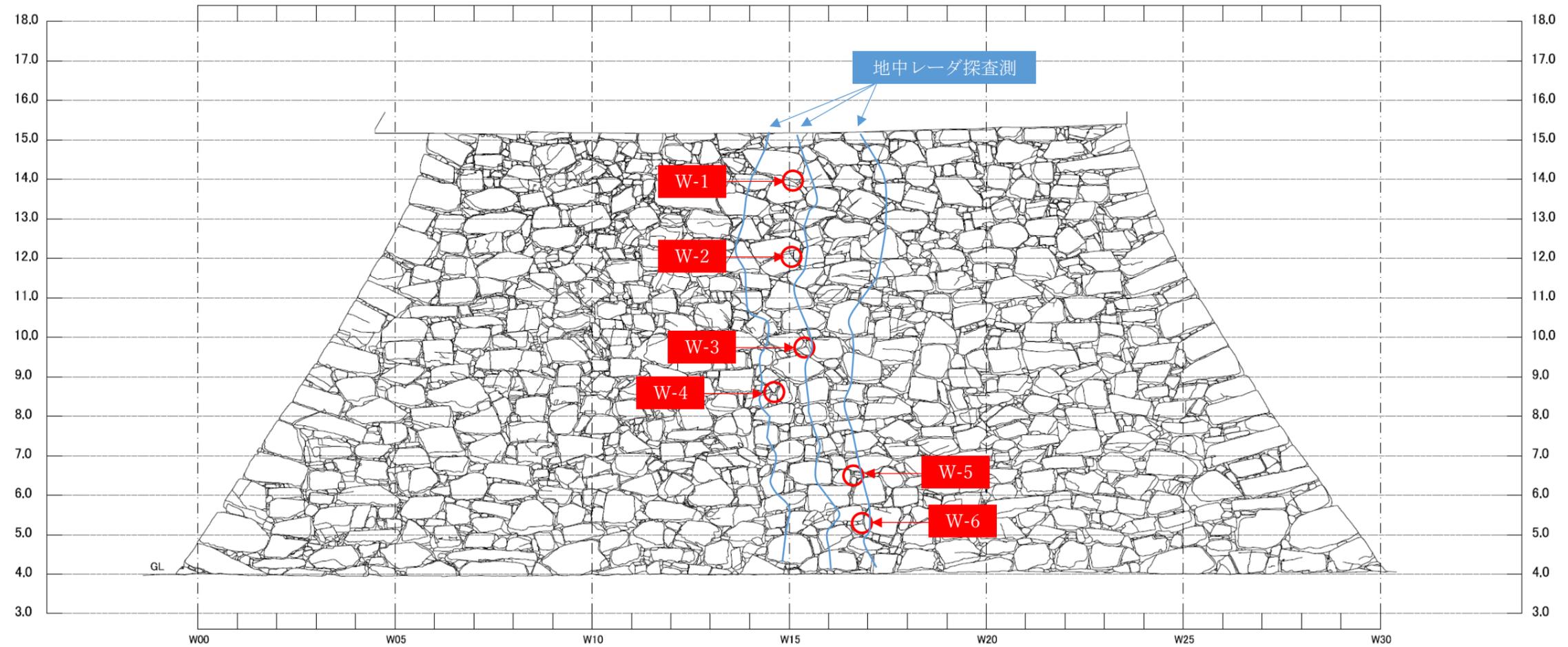


図-18 石垣内部調査結果 (南小天守台西面)

天守台西面石垣裏込状況のファイバースコープ調査



W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W-6
約 50cm からグリ石があり、多少の土砂と植物の根？がある。約 1m 奥には角ばったグリ石が見られる。	約 30cm 奥に根、約 50cm 奥に多少の土砂がある。樹根が確認された。約 90cm より奥にはグリ石が密にある状況が見られる。	表面に草が多くあった箇所。約 50cm 奥から小さめのグリ石があり、土砂も多くみられる。80cm 奥以降も根のようなものが見られる。	表面に多く草があり、控えが小さく細かな築石が密集している箇所。約 60cm 奥まで根が確認され、土砂の混入が多く見られる。	表面に小さな築石が密集している箇所。約 30cm～50cm 奥にも根が確認され、土砂の混入が見受けられる。	表面には落葉がたまり、草がある。約 30cm 奥からグリ石がある。約 1.2m 奥まで築石が確認され、グリ石もある。

図-19 ファイバースコープ調査結果 (天守台西面)

(4) 今後の作業

1) 作業概要

天守～小天守台石垣、基礎地盤の現状把握を目的に技術検討・解析を行い、技術検討結果と文化財保存の観点から現天守解体及び天守群復元等の課題整理を行う。

使用資料：「広島城天守台石垣現況調査業務 報告書 令和4年3月」

「広島城小天守台石垣現況調査業務 報告書 令和5年3月」

「広島城天守閣地質調査業務 報告書 平成31年3月」

上記資料と、今回業務で行った補足調査資料を基に検討・解析を進める。

表-6 石垣解析業務項目（現状把握）

解析位置出	簡易検討		詳細検討	
	実施の有無	手法	実施の有無	手法
①天守北面石垣	実施済 (R3 石垣調査業務)	累積示力線法（試行くさび法による累積計算）	○	2次元個別要素法解析
②天守西面石垣	○	累積示力線法（試行くさび法による累積計算）	—	—
③東小天守北面石垣	○	累積示力線法（試行くさび法による累積計算）	○	2次元個別要素法解析
④南小天守西面石垣	○	累積示力線法（試行くさび法による累積計算）	—	—
石垣基礎地盤	—	—	○	2次元動的有限要素法解析

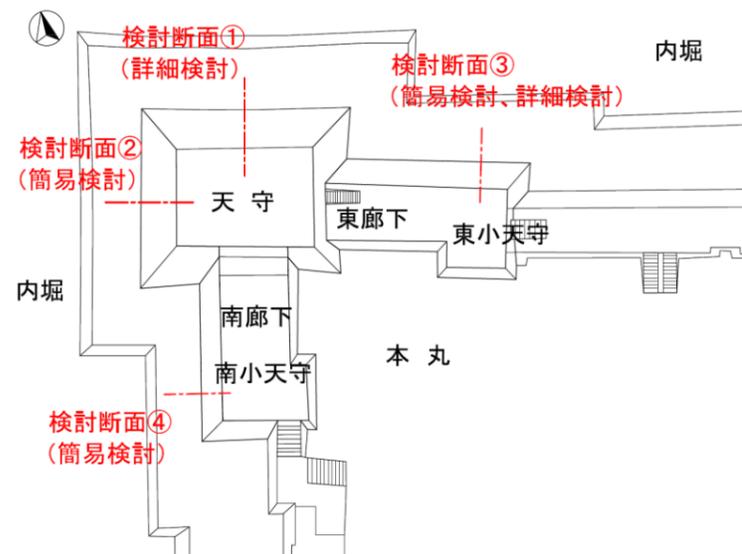


図-20 検討断面位置

・石垣安定性解析業務フロー

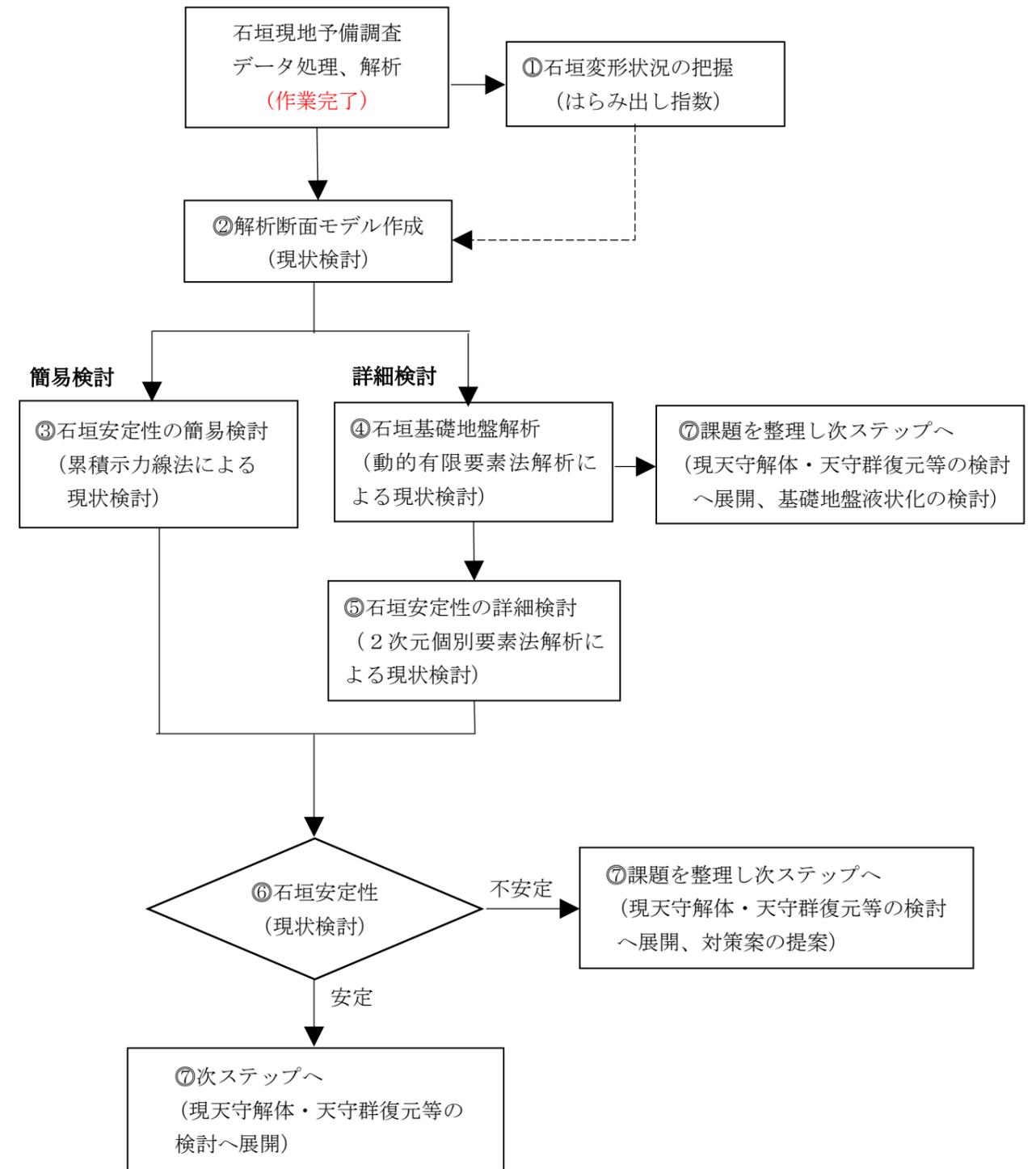


図-21 石垣安定性解析フロー

・作業工程

表-7 作業工程 (案)

作業	2024年												2025年	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2~
【現地調査】														
①データ処理・解析 (作業完了)	■	■	■											
【石垣・基礎地盤解析】														
②石垣変形状の把握				■	■	■								
③解析モデル作成				■	■	■	■							
④石垣安定性簡易検討						■	■	■						
⑤石垣基礎地盤解析								■	■	■				
⑥石垣安定性詳細検討										■	■	■		
⑦石垣安定性の検討											■	■		
⑧課題の整理												■		

②解析モデルの作成

ア) 石垣断面モデル作成

既往調査及び今回実施した補足調査から得られた、石垣の3次元測量結果、内部調査結果から石垣解析断面モデルを作成する。

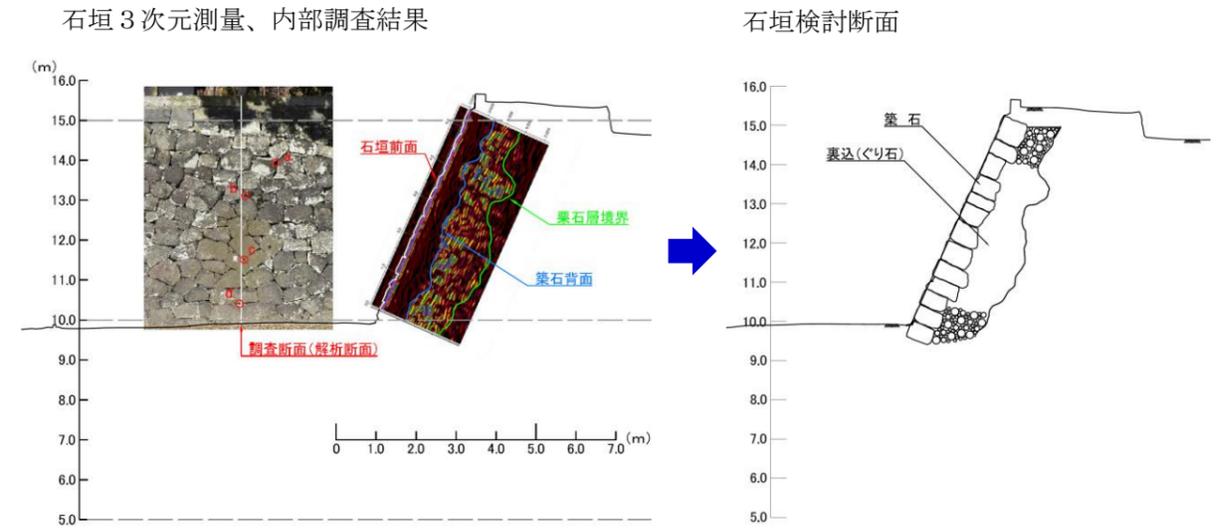


図-23 石垣解析断面モデル作成イメージ

2) 解析内容

①石垣変形状況の把握

石垣に変形がある場合は、はらみ出し指数の検討を行い石垣の変形状況を定量的に把握し考察する。

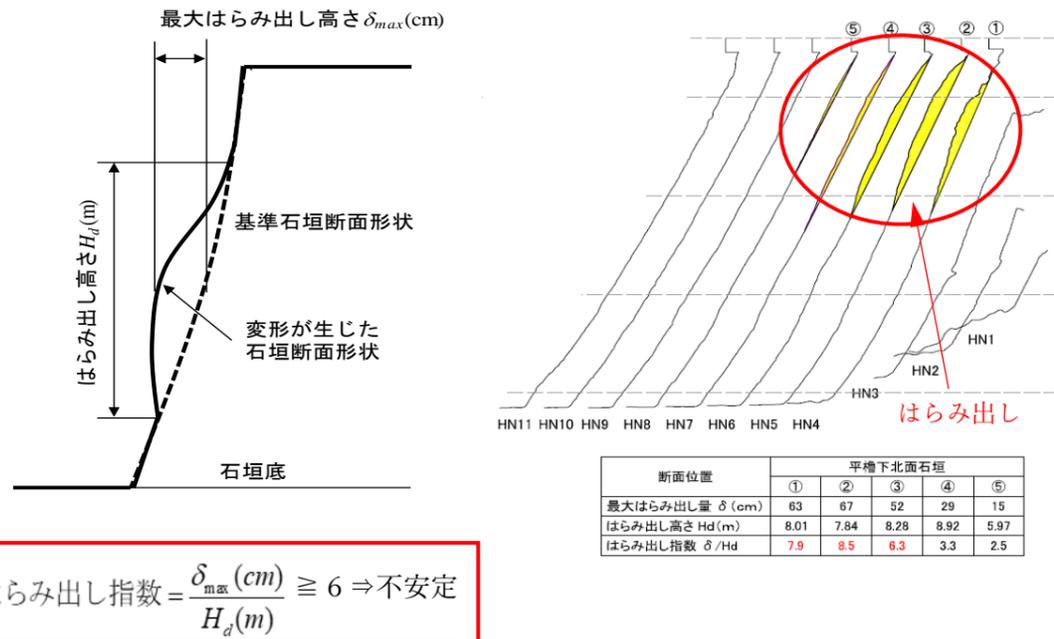


図-22 はらみ出し指数

表-8 石垣解析断面モデル作成データの整理

解析断面位置	3次元測量	石垣内部調査		石垣解析断面モデル
		地中レーダ探査	衝撃弾性波探査	
天守北面石垣	R 3 調査	R 3 調査	R 3 調査	R 3 調査
天守西面石垣	R 3 調査	今回実施	今回実施	今回作成
東小天守北面石垣	R 4 調査	R 4 調査	今回実施	今回作成
南小天守西面石垣	R 4 調査	R 4 調査	今回実施	今回作成

イ) 基礎地盤断面モデル作成

基礎地盤動的解析の断面モデルは「広島城天守閣地質調査業務 平成31年3月」の調査結果を基に作成する。土質調査ボーリングの実施は1箇所(南廊下)であるため各土層は水平分布と考え、解析に使用する物性値は報告書の提案値、土層区分に対応した換算値、一般値とする。

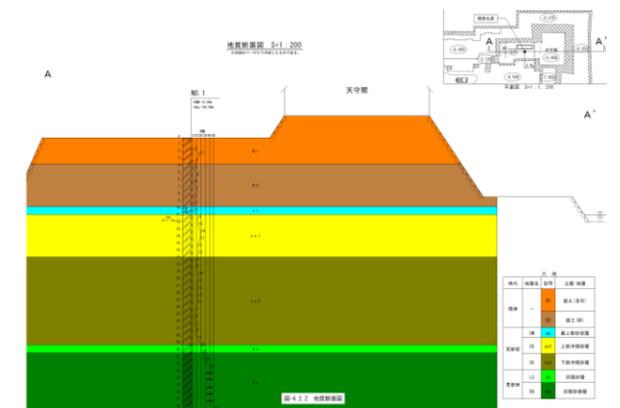


図-24 土層構成イメージ

③石垣簡易検討（累積示力線法）

石垣の地震時安定性の検討は、静的検討とし、「道路土工 擁壁工指針 平成24年」に基づき、試行くさび法で主働土圧を算定し、すべり安全率、転倒安全率、示力位置の算定を石垣頂部の築石から累積計算する。

- 試行くさび法による主働土圧  
くさび形の土塊を想定した試行くさび法の主働土圧式考え方を図-25に示す。

試行くさび法の考え方

$$P = \frac{\sin(\omega - \phi + \theta)}{\cos(\omega - \phi - \delta - \alpha) \cdot \cos \theta} \times W$$

- P : 主働土圧 (kN)
- W : 土塊重量+上載荷重 (kN)
- $\omega$  : 土塊滑り角度 (deg)
- $\phi$  : 栗石の内部摩擦角 (deg)
- $\delta$  : 築石の背面摩擦角 (deg)
- $\alpha$  : 石垣の傾斜角 (deg)
- $\theta$  : 地震時合成角 (deg)

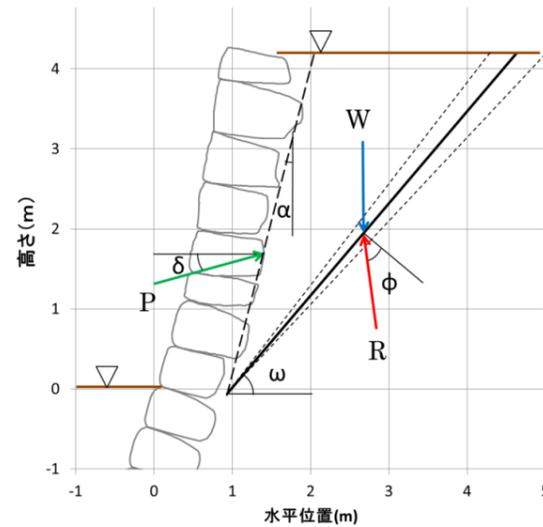


図-25 石垣の簡易検討結果イメージ

静的水平震度は、「道路土工 擁壁工指針 平成24年」解表5-1（表-9）を採用する。

	地盤種別		
	I種	II種	III種
レベル1地震動	0.12	0.15	0.18
レベル2地震動	0.16	0.20	0.24

設計水平震度 :  $kh = Cz \times kh0$   
 $Cz$  : 地域別補正係数 広島県 :  $Cz = 0.85$   
 地盤種別 : 「広島城天守閣地質調査業務 平成31年3月」から地盤の特性値を算出し選定

すべり安全率、転倒安全率、示力線位置の算定例

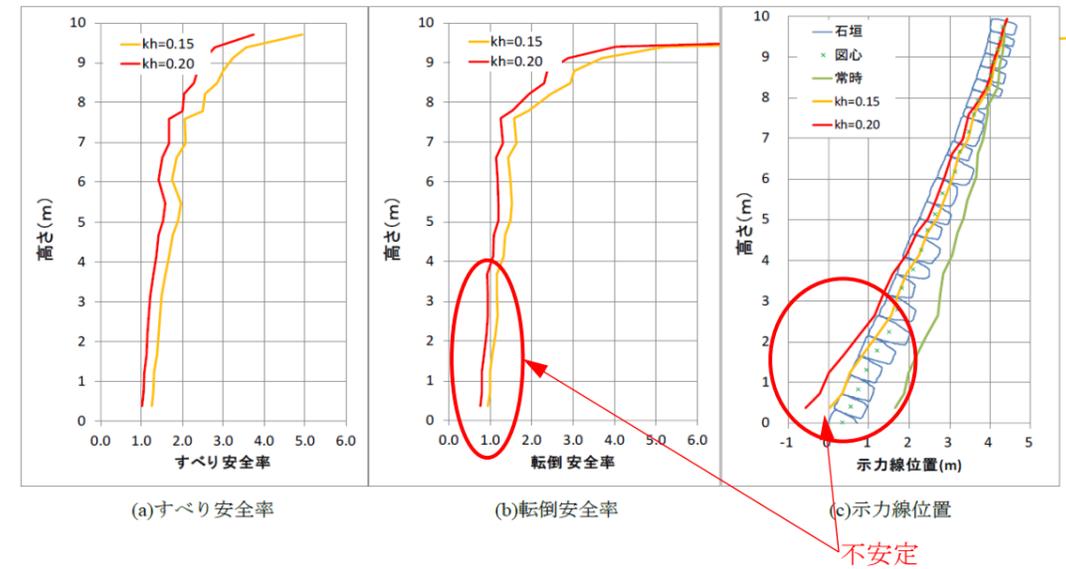


図-26 石垣簡易検討出力イメージ

④石垣基礎地盤検討（動的有限要素法解析）

「広島城天守閣地質調査業務 平成31年3月」から基礎地盤をモデル化し動的有限要素法解析を行い石垣に作用する地震応答値を求める。

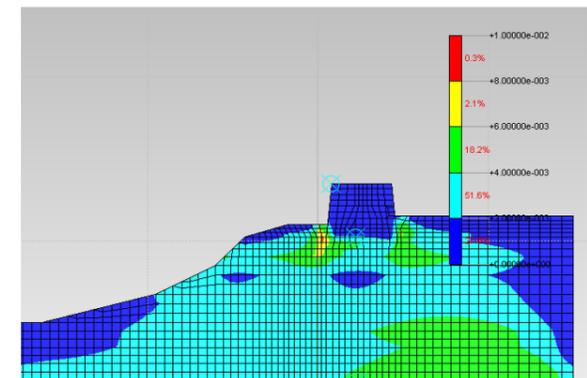


図-27 石垣基礎地盤動的解析イメージ

⑤石垣詳細検討（2次元個別要素法解析）

基礎地盤動的解析から得られた、応答値を石垣下部に作用させ石垣本体の詳細検討を行う。

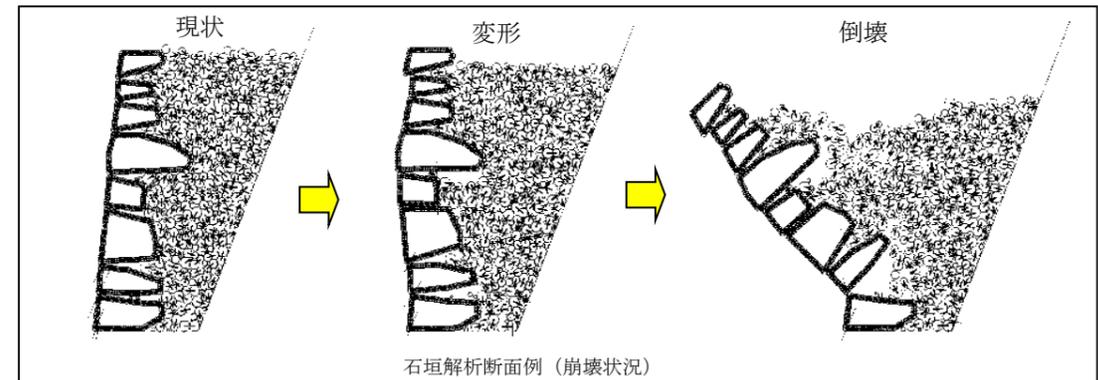


図-28 石垣2次元個別要素法解析イメージ

(5) 今後の検討への反映の仕方について  
 石垣の地震時安定性解析・現状検討後の検討の流れと課題への反映内容を図-29 に示す。

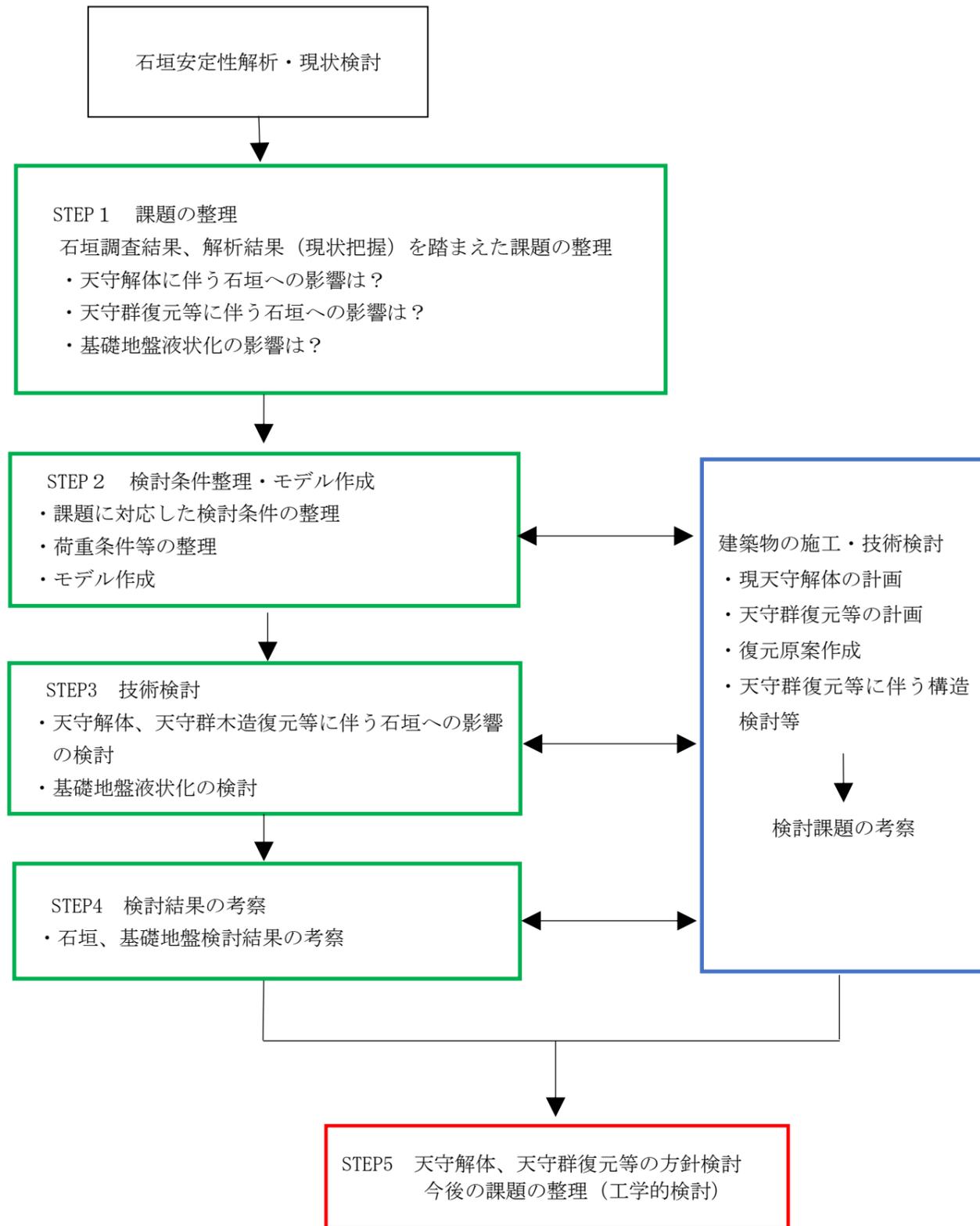


図-29 今後の業務への反映フロー