資料３

石垣・基礎地盤検討モデルについて

〔 目 次 〕

（１）石垣安定性検討フロー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ １
（２）石垣簡易検討（累積示力線法）
　１）石垣検討条件の設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ２
　２）石垣検討モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ３
（３）基礎地盤検討
　１）基礎地盤検討条件の設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ６
　２）基礎地盤検討モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ８

令和６年度第２回
広島城天守の復元等に関する検討会議
令和６年８月 26 日

（1）石垣安定性検討フロー

石垣安定性検討フロー（図-1）を示す。現天守の解体及び天守群の復元等の検討に当たり、現地予備調査結果等から作成した石垣及び基礎地盤の検討モデルにより、石垣安定性の簡易・詳細検討及び基礎地盤解析を行い、石垣の安定性を評価する。

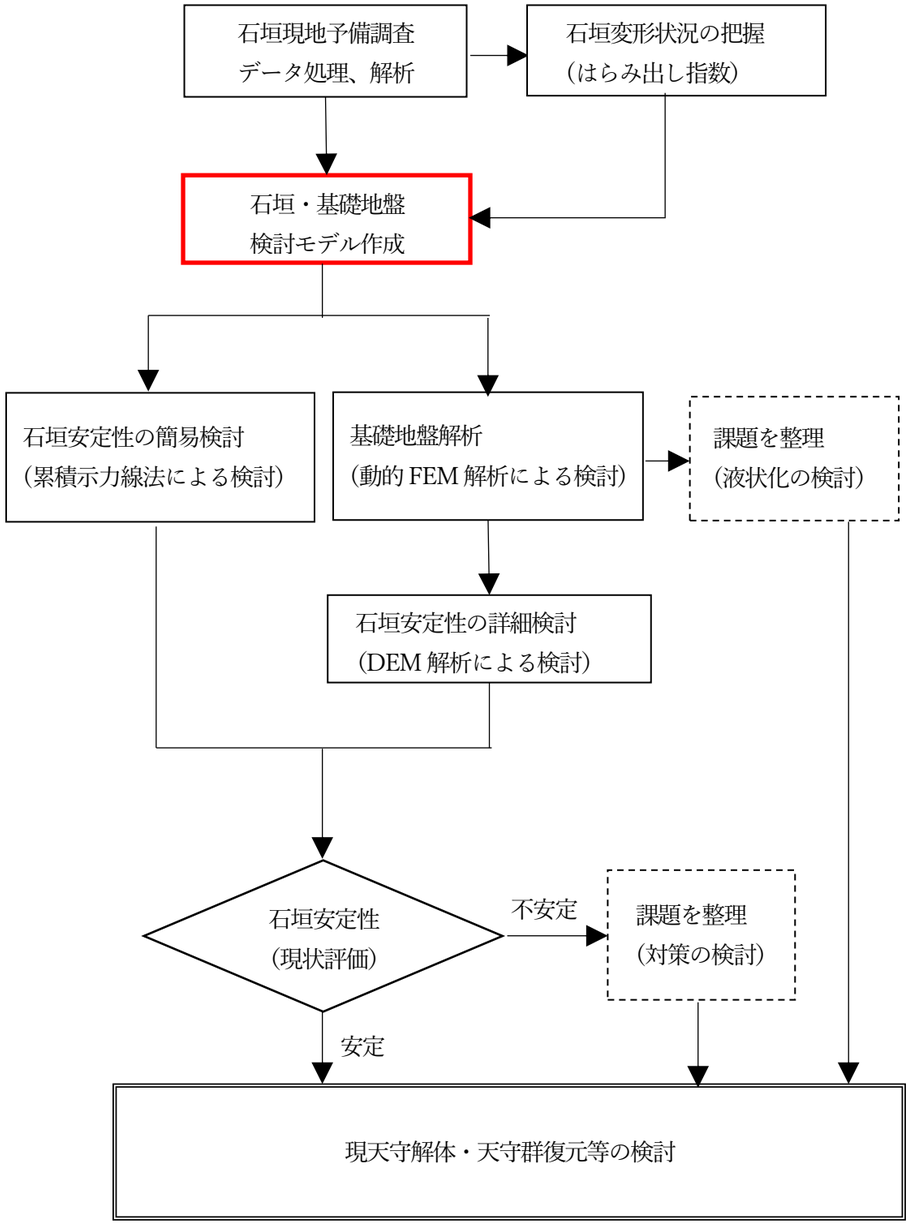


図-1　石垣安定性検討フロー

（2）石垣簡易検討（累積示力線法）

1）石垣検討条件の設定

・準拠資料

検討に際しては以下の基準に準拠する。

「道路土工　擁壁工指針（平成 24 年度版）平成 24 年 7 月　社団法人　日本道路協会」

検討条件の設定は下記の報告書より設定した

「広島城天守閣地質調査業務 報告書」（平成 31 年 3 月）

・設計水平震度

設計水平震度は「道路土工　擁壁工指針（平成 24 年度版）平成 24 年 7 月　社団法人　日本道路協会」より設定する。

表-1　地盤種別と地盤の特性値

地盤種別	地盤の特性値　TG（S）
Ⅰ　種	TG＜0.2
Ⅱ　種	0.2≦TG＜0.6
Ⅲ　種	0.6≦TG

設計水平震度設定に必要な地盤の特性値（地盤種別）については、「広島城天守閣地質調査業務 報告書」（平成 31 年 3 月）より石垣基礎地盤を砂質シルト層（ａｃ）と考え、下記のように設定した。

表-2　地盤の特性値の計算

土　　層		層厚：H	平均Ｎ値	土質区分	せん断弾性波速度:Vsi	TG (H/Vsi)	備　　考
ａｃ	砂質シルト	1.1	6	粘性	170	0.00646	
ａｓ1	礫混り砂	6.0	13	砂質	217	0.02764	
ａｓ2	シルト質砂	12.4	9	砂質	193	0.06412	
ｄｓ	シルト混り砂	1.1	21	砂質	252	0.00436	
ｄｇ	砂　礫	基盤層	50 以上	砂質			
地盤の特性値：TG＝４×Σ（H/Vsi）＝						0.41035	**→Ⅱ種地盤**

表-3　設計水平震度

	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・ｋｈ0

地域別補正係数　Cz=0.85（広島県）

※地域別補正係数については、近年の地震発生状況、「熊本城石垣基礎診断実施要領」等を考慮し、地域別補正係数による水平震度の低減は行なわないものとする。

（参考：熊本市の地域別補正係数：Cz=0.85）

以上より　Cz=1.0　と考え、

設計水平震度

レベル１地震動（中規模地震）　：　ｋｈ0＝0.15　ｋｈ= 1.0×0.15＝**0.15**

レベル２地震動（大規模地震）　：　ｋｈ0＝0.20　ｋｈ＝1.0×0.20＝**0.20**

とする。

・上載荷重

広島城天守は基礎躯体で全荷重を受け、石垣に荷重が作用しない構造となっている。従って上載荷重（天守荷重）と地震時慣性力は石垣に作用しないものとする。

・材料定数

表-4 に石材、裏込めの材料定数を示す。定数の設定に際しては、過去の経験と実績を考慮し設定した。

表-4　石垣安定性検討に用いる材料定数

項　　目	単　位	数　値
裏込（ぐり石）の単位体積重量	kN/m3	20
裏込（ぐり石）の内部摩擦角	ｄeg	40
裏込（ぐり石）の粘着力	kN/m2	0
築石の単位体積重量（花崗岩）	kN/m3	26.5
築石の底面摩擦角	ｄeg	30
築石の壁面摩擦角（地震時：φ/2）	ｄeg	20

2）石垣検討モデル

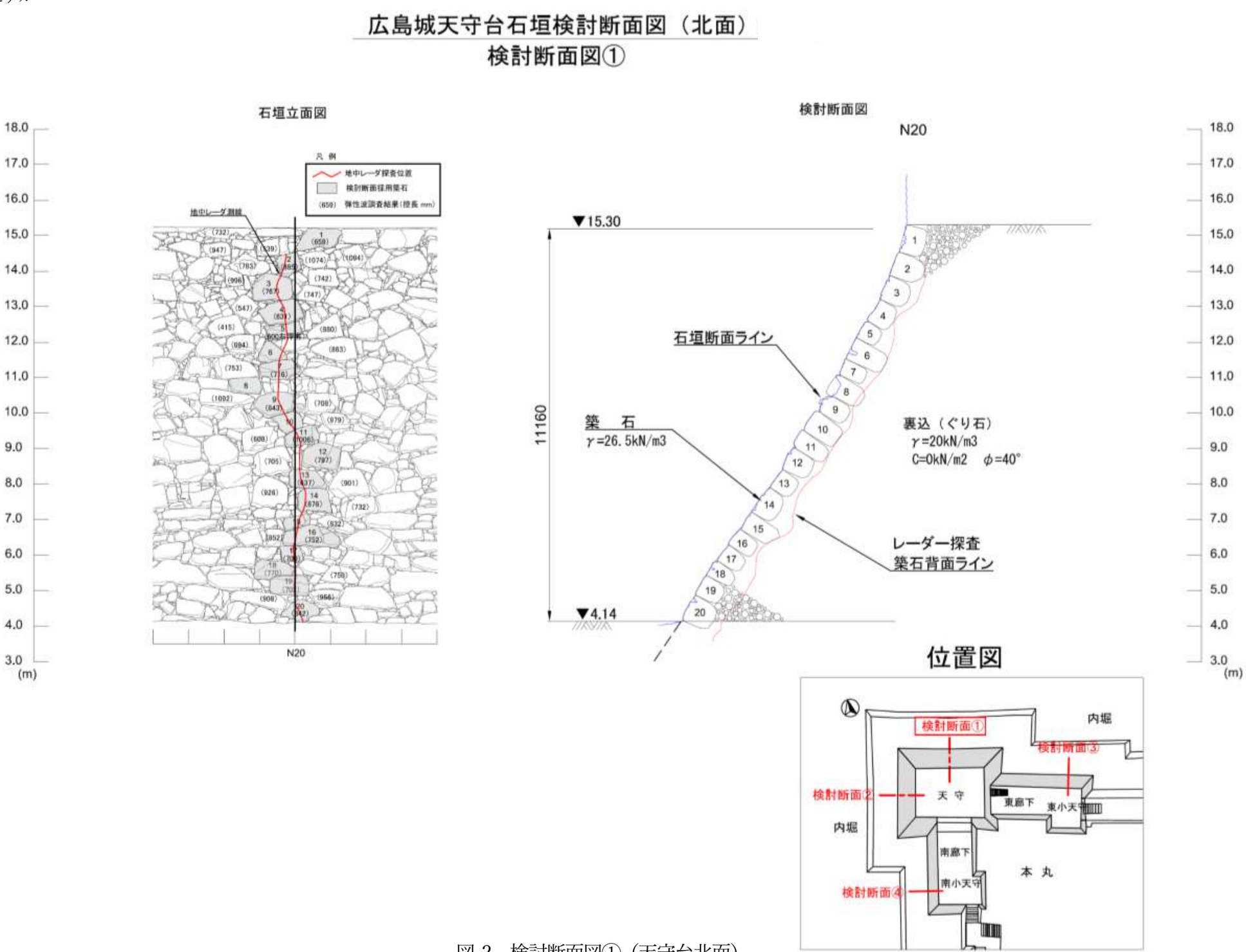
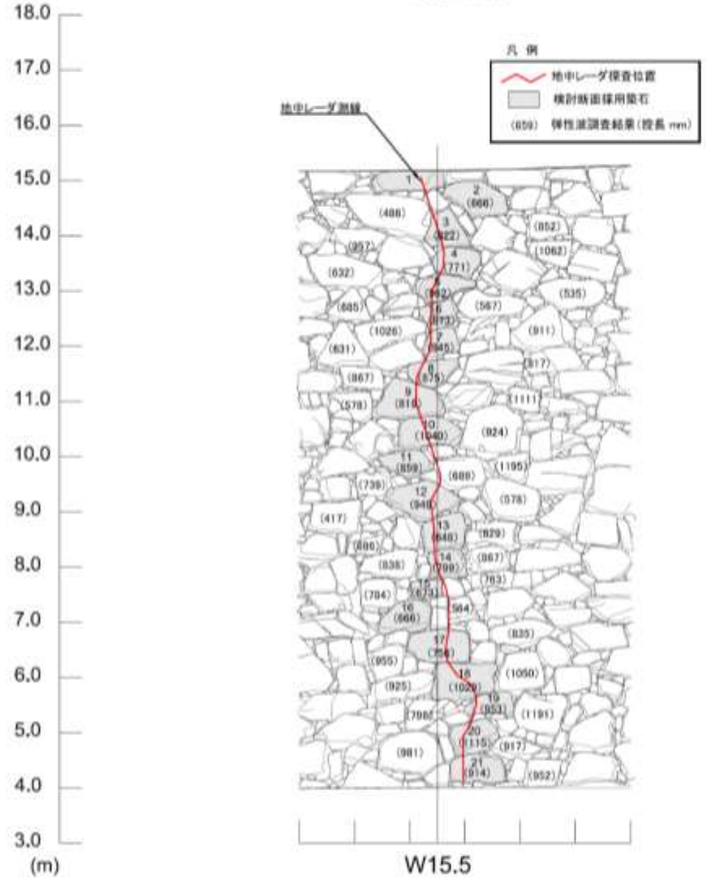


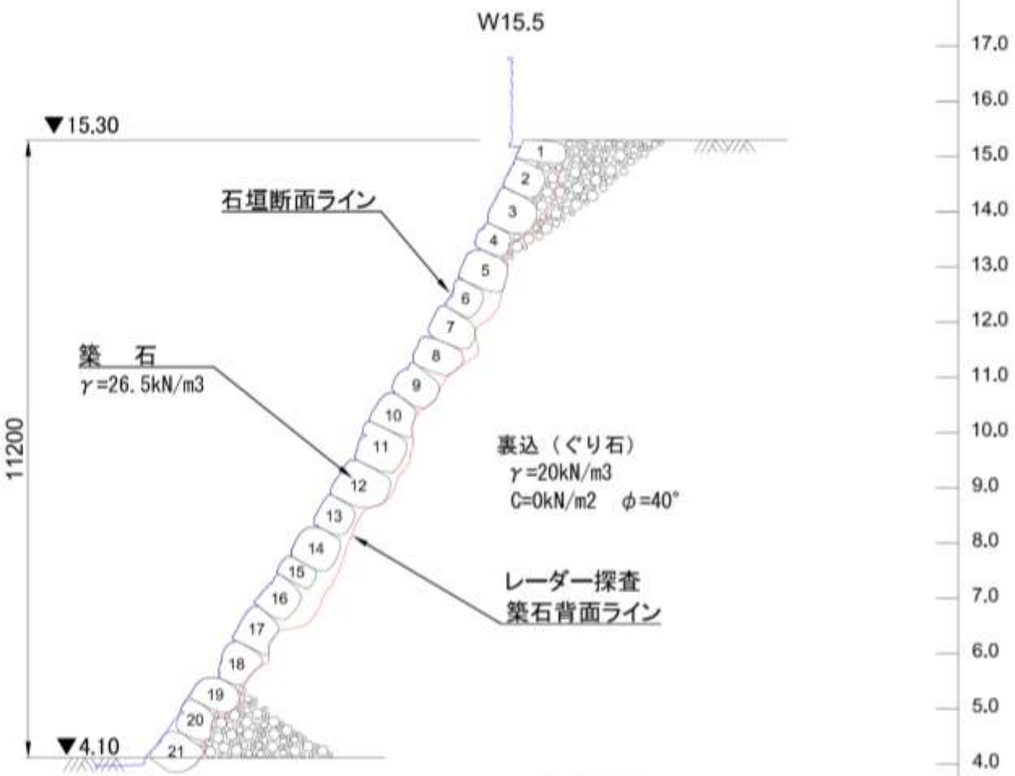
図-2　検討断面図①（天守台北面）

広島城天守台石垣検討断面図（西面）
検討断面図②

石垣立面図



検討断面図



位置図

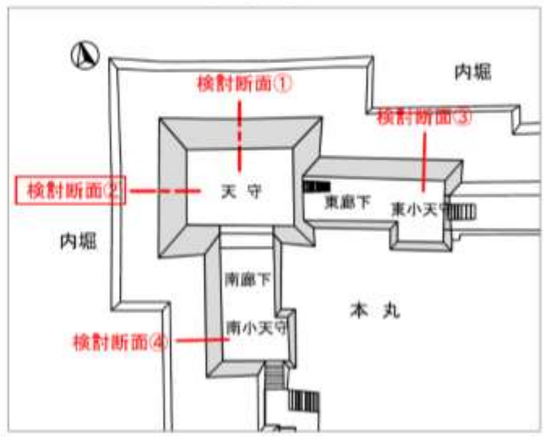
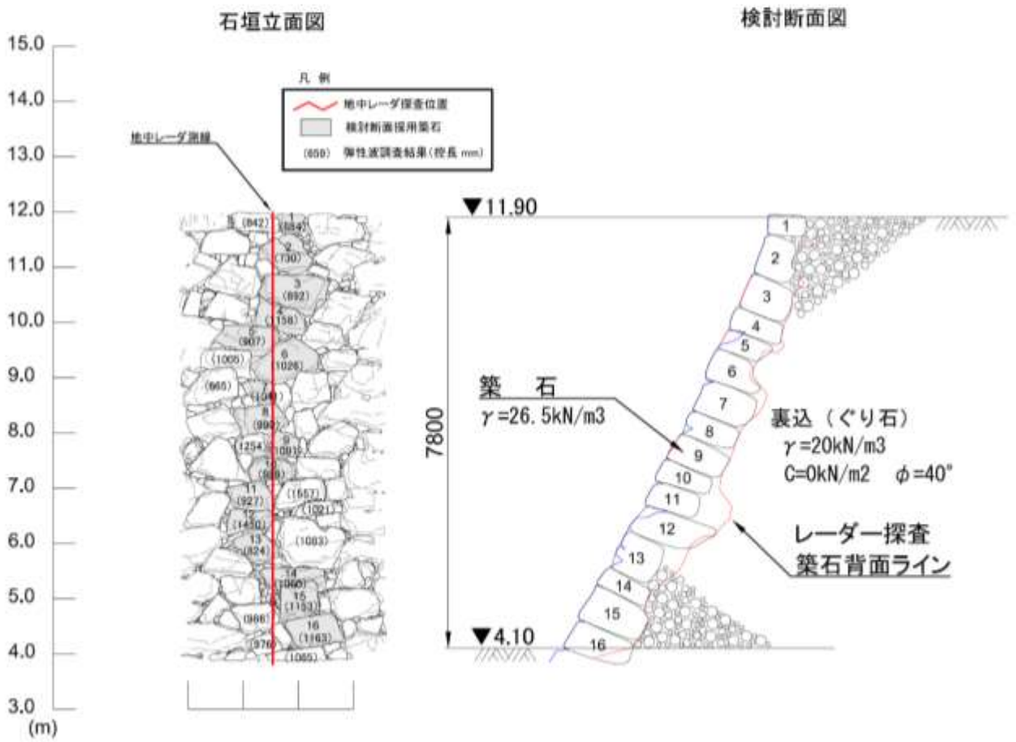


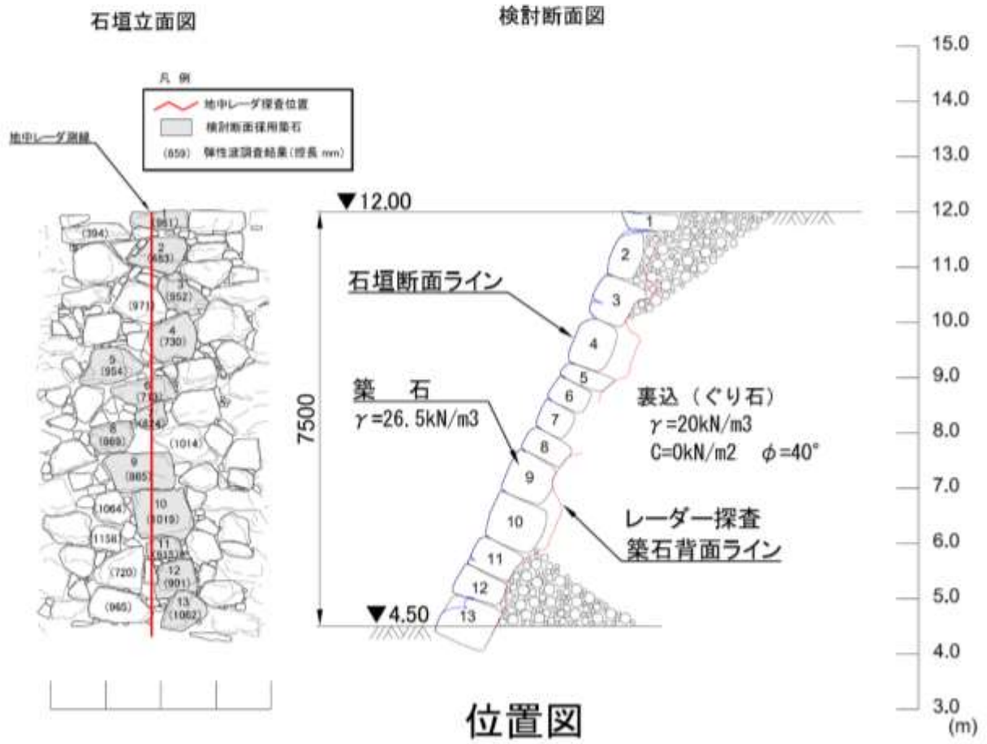
図-3　検討断面図②（天守台西面）

広島城小天守台石垣検討断面図

東小天守北面
検討断面図③



南小天守西面
検討断面図④



位置図

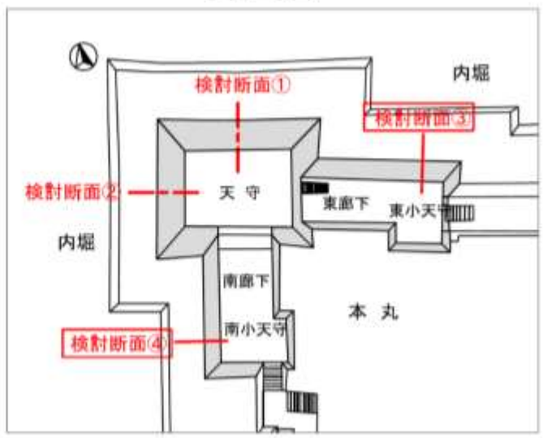


図-4　検討断面図③④（小天守台）

（3）基礎地盤検討

1）基礎地盤検討条件の設定

・地盤条件

地盤条件は「広島城天守閣地質調査業務 報告書」（平成 31 年 3 月）等を基に表-5 のとおり設定した。

表-5　基礎地盤条件

記号	土層・地質	層厚 (m)	区分	平均 N 値	単位体積重量 γ_t(kN/m3)	せん断波速度 Vs(m/s)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G_0(k N/m2)	ヤング係数 E_0(kN/m2)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	最大減衰定数 h max	備　考
石垣	築　石	－	花崗岩	－	26.5	314	0.333	266,612	710,787	－	－	線形
基礎	基礎グラウト	4.76	無筋 con	－	23.0	1,976	0.2	9,166,667	**22,000,000**	－	－	線形　**f ‘$_{ck}$=18(N/mm²)**
B1	玉石混り礫(裏込)	3.7	砂質土	42(換算値)	20.0	314	0.333	200,793	535,313	0.000207	0.22	非線形
B2	礫混り砂	6.0	砂質土	5	19.0	161	0.333	50,122	133,624	0.000478	0.27	非線形
a c	砂質シルト	1.1	粘性土	6	14.7	170	0.333	43,482	115,924	0.001159	0.22	非線形
a s1	礫混り砂	6.0	砂質土	13	17.6	217	0.333	84,603	225,552	0.000622	0.27	非線形
a s2	シルト質砂	12.4	砂質土	9	17.6	193	0.333	67,157	179,042	0.000710	0.27	非線形
d s	シルト混り砂	1.1	砂質土	21	18.6	252	0.333	120,833	322,140	0.000768	0.24	非線形
d g	砂　礫	基盤層	砂質土	79	20.0	400	0.333	326,531	870,531	－	－	線形

上表において　せん断波速度　：$Vs=97N^{0.314}$

せん断弾性係数：$G=\rho Vs^2$

ヤング係数　　：$E=2（1+\nu）G$

・入力地震動

今回の検討は、限られた条件を基にした検討であるため基礎地盤性状の傾向を把握することを目的とする。以下に示す手順で入力地震動を設定する。

表-6　基礎地盤解析入力地震波

検討 STEP	解析モデル	地震動
STEP1	1 次元モデル（棒モデル）	告示波 A　近距離地震 【1995 年　兵庫県南部地震神戸気象台観測波】 告示波 B　遠距離地震 【1923 年　関東地震東京管区気象台(大手町)】 告示波 C　一様乱数 （L2 波）
STEP2	2 次元モデル（P8 参照）	告示波 A、B、C（L2 波）のうち STEP1 で最大変位の発生する地震動を用い解析

表-7　入力地震波一覧（解放工学的基盤）

地震動	L1 地震動		L2 地震動		継続時間 (sec)
	最大加速度 (cm/s²)	最大速度 (cm/s)	最大加速度 (cm/s²)	最大速度 (cm/s)	
告示波 A	76.3	10.5	381.7	52.5	81.92
告示波 B	62.6	7.63	311.5	38.0	200.02
告示波 C	78.2	7.16	390.8	35.8	72.04

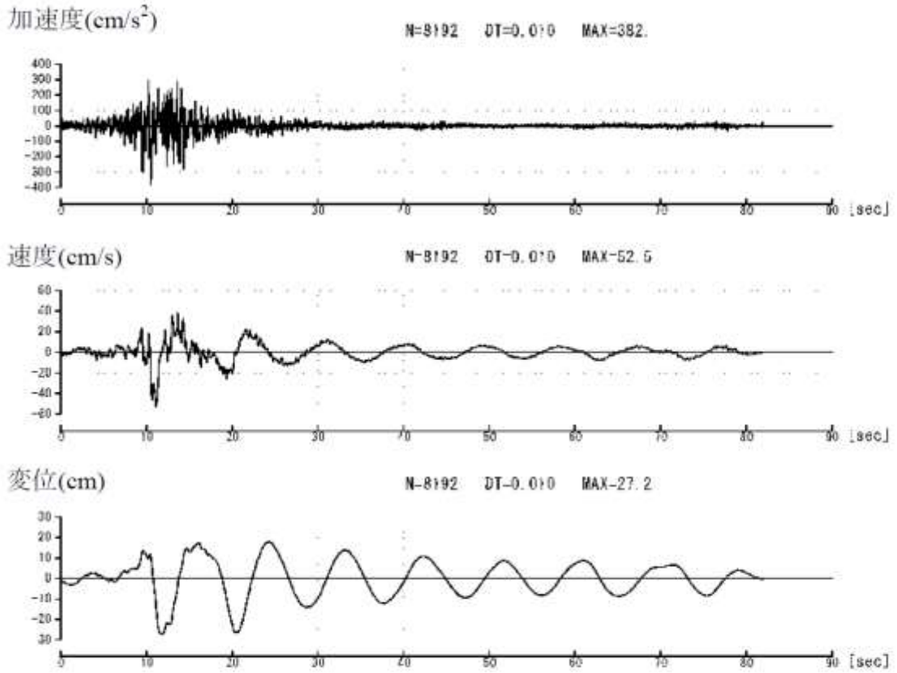


図-5　告示波Ａ（レベル２）時刻歴波形（解放工学的基盤）

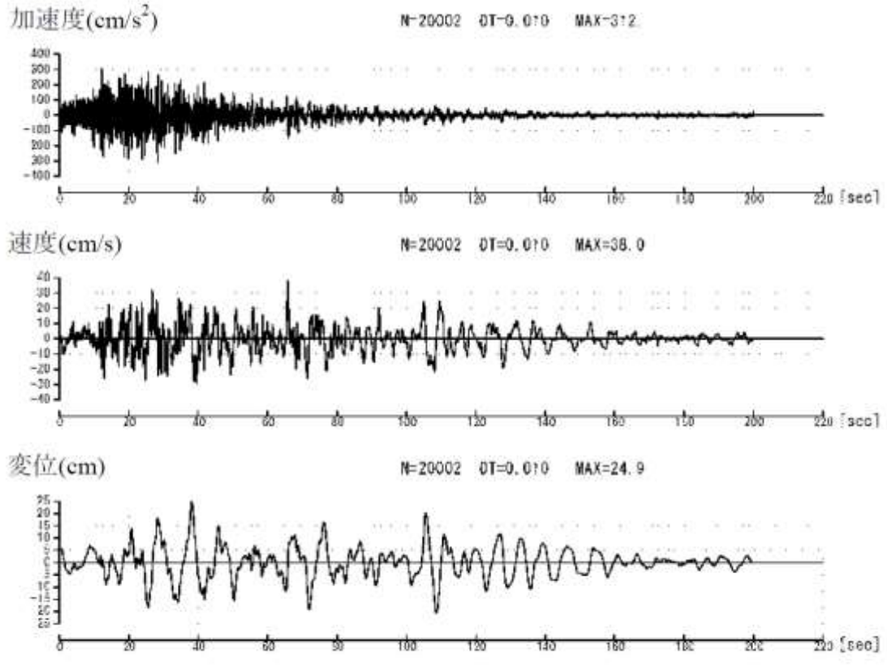


図-6　告示波Ｂ（レベル２）時刻歴波形（解放工学的基盤）

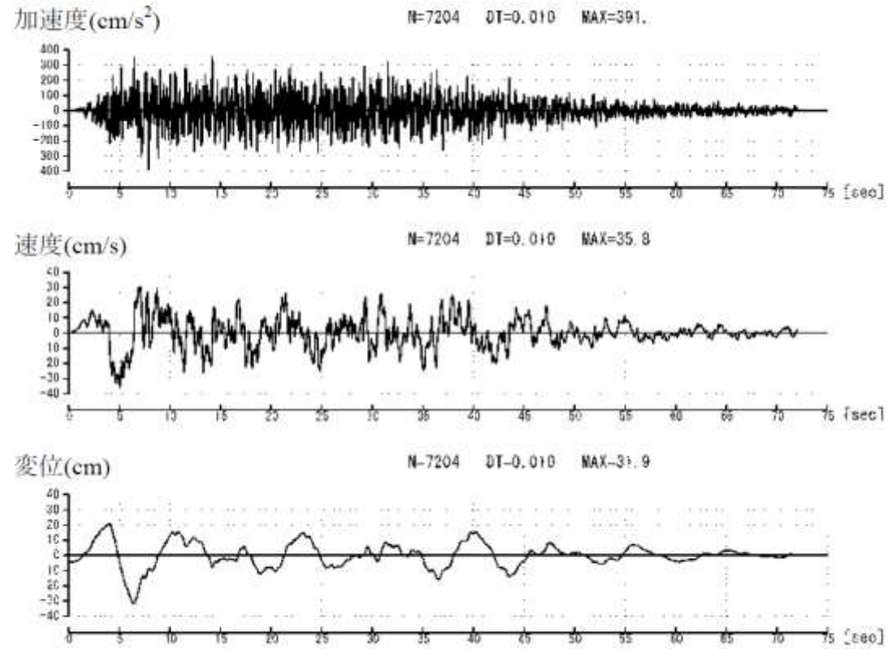


図-7　告示波Ｃ（レベル２）時刻歴波形（解放工学的基盤）

・天守荷重

天守荷重は木造天守を想定し表-8 のとおり設定した。

表-8　広島城天守建築物延べ面積と想定重量

建　物	天　守	南廊下	南小天守
延べ面積（m2）			
5　階	89.4		
4　階	127.8		
3　階	253.0		34.9
2　階	410.1	27.8	62.1
1　階	415.4	182.8	192.1
計	1295.7	210.6	289.1
建物想定重量（kN）	18,500	3,680	4,190
基礎想定重量（kN）	7,600	1,340	1,410
想定重量合計（kN）	26,100	5,020	5,600
基礎設定面積（m2）	247	183	192
単位重量(kN/m2)	106	27	29

※設定条件

・延べ面積は「広島城天守閣木造復元基礎調査追加業務 報告書」（令和３年３月)添付資料１より設定

・面積当たりの荷重は過去の事例より設定《最上層部：18(kN/m2)　その他：14(kN/m2)》

・基礎想定重量については、天守は現在の基礎概算重量、南廊下・南小天守は t=300mm の耐圧盤で想定

・基礎設定面積は、天守についてはＲＣ基礎換算面積、廊下・小天守については１階床面積とした。

２）基礎地盤検討モデル

・石垣モデルの設定

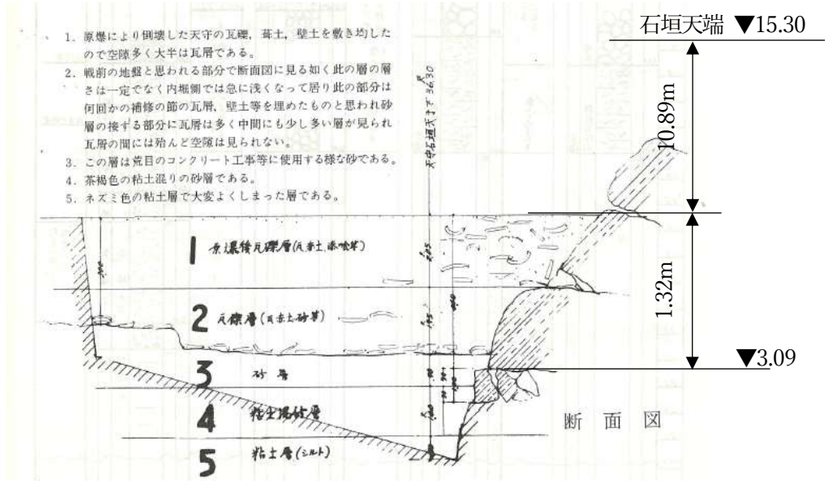
築石の控長は現地調査（弾性波探査）結果より平均値を求め設定した。

天守台石垣、内堀石垣の根入れ深さについては、

「支部報 鯉城 N0.5 1975」（広島県建築士会　広島地区支部）

「史跡広島城跡　保存修理工事報告書」（1971 年、広島市教育委員会）

等を参考に設定した。



天守台石垣高さ：36.3 尺=10.89m　標高 15.30　とし、

天守台石垣根入れ深さ：4.4 尺=1.32m　より　石垣下端部標高を《3.09》で設定

図-8　天守台根入部調査断面図

「広島県建築士会　広島地区支部　支部報 鯉城 N0.5 1975」より

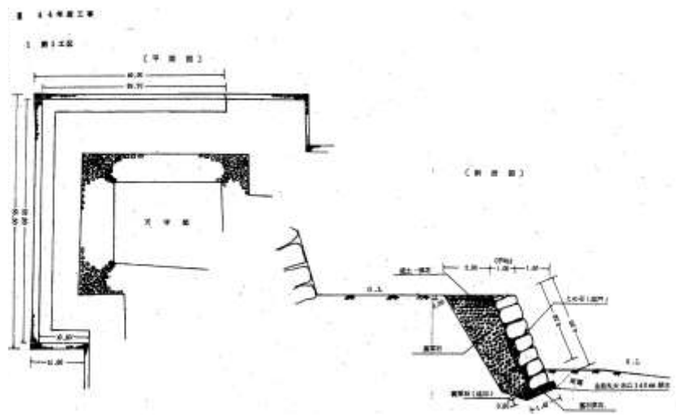


図-9　内堀石垣構造断面図

「史跡広島城跡　保存修理工事報告書」より

・天守台内部構造の設定

天守台の内部構造は不明であるが、下記資料を参考に推察し設定した。

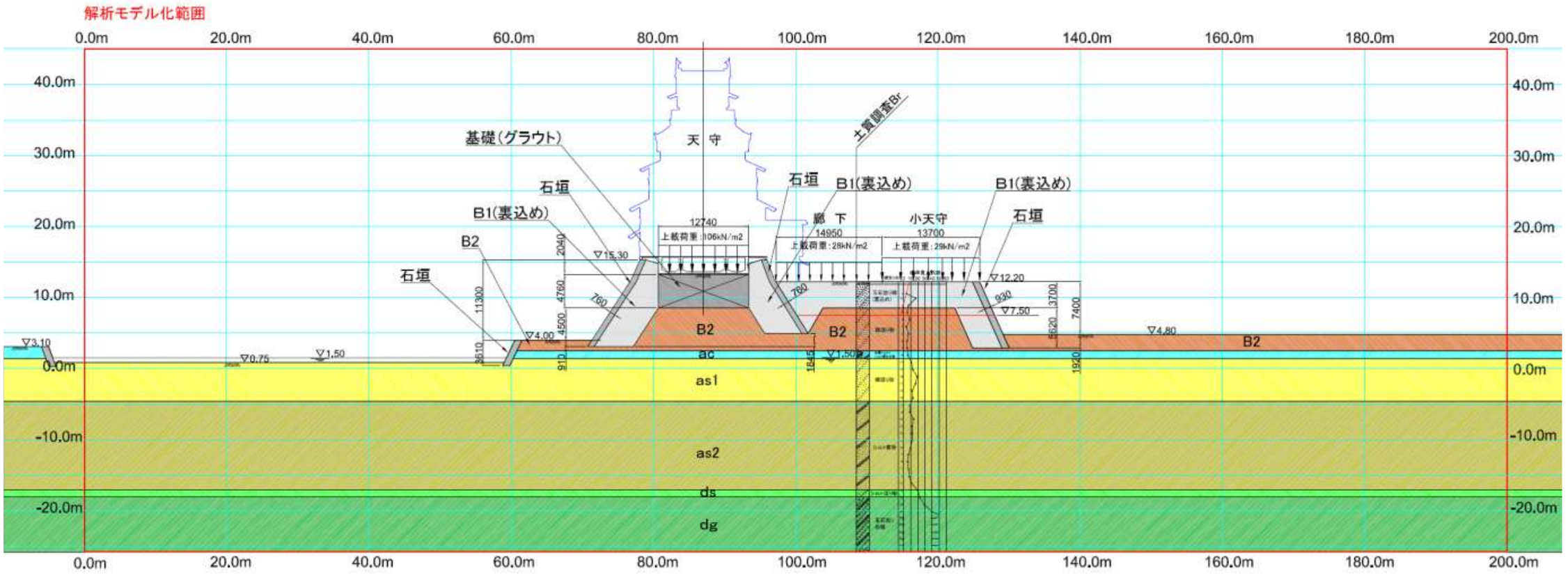
「支部報 鯉城 N0.5 1975」（広島県建築士会　広島地区支部）

「会報ひろしま N0.40 ‘71 10」（(社法)広島県建築士会）

「基礎グラウト図」（広島城所蔵）

※裏込め層（B1）は空隙があることより、基礎グラウト高さについては、礫混じり砂層（B2）から上の裏込め層（B1）全体が充填されていると推定した。

・基礎地盤検討モデル



記号	土層・地質	層厚 (m)	区分	平均Ｎ値	単位体積重量 γ_t(kN/m3)	せん断波速度 Vs(m/s)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G_0(ｋN/m2)	ヤング係数 E_0(kN/m2)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	最大減衰定数 h max	備　考
石垣	築　石	－	花崗岩	－	26.5	314	0.333	266,612	710,787	－	－	線形
基礎	基礎グラウト	4.76	無筋 con	－	23.0	1,976	0.2	9,166,667	**22,000,000**	－	－	線形　**f'_{ck}=18(N/mm²)**
B1	玉石混り礫(裏込)	3.7	砂質土	42(換算値)	20.0	314	0.333	200,793	535,313	0.000207	0.22	非線形
B2	礫混り砂	6.0	砂質土	5	19.0	161	0.333	50,122	133,624	0.000478	0.27	非線形
ａc	砂質シルト	1.1	粘性土	6	14.7	170	0.333	43,482	115,924	0.001159	0.22	非線形
ａs1	礫混り砂	6.0	砂質土	13	17.6	217	0.333	84,603	225,552	0.000622	0.27	非線形
ａs2	シルト質砂	12.4	砂質土	9	17.6	193	0.333	67,157	179,042	0.000710	0.27	非線形
ｄs	シルト混り砂	1.1	砂質土	21	18.6	252	0.333	120,833	322,140	0.000768	0.24	非線形
ｄg	砂　礫	基盤層	砂質土	79	20.0	400	0.333	326,531	870,531	－	－	線形

図-10　広島城天守台基礎地盤解析モデル