

丸亀城 石垣耐震検討 【概要】 R5. 2. 13(月)

1.	検討概要	1
2.	結果概要	2
3.	土質定数	3
4.	石垣調査	5
5.	はらみ出し法まとめ	6
6.	示力線法まとめ	7
7.	円弧すべり法まとめ	8

●石垣耐震検討内容

1. 検討内容

①～③の3つの方法により、石垣の耐震性能を照査する。

表 石垣の耐震診断事項

①	はらみ出し指数によるはらみ出し分析
②	示力線法を用いた石垣本体の簡易耐震診断
③	円弧すべり法による周辺地盤を含めた全体安定

①はらみ出し法

変状が生じている部分のはらみ出し量の最大値（ δ_{max} ）をはらみ出し範囲の高さで除した指数『はらみ出し指数』により、地震時の崩落の危険性を判断する方法。

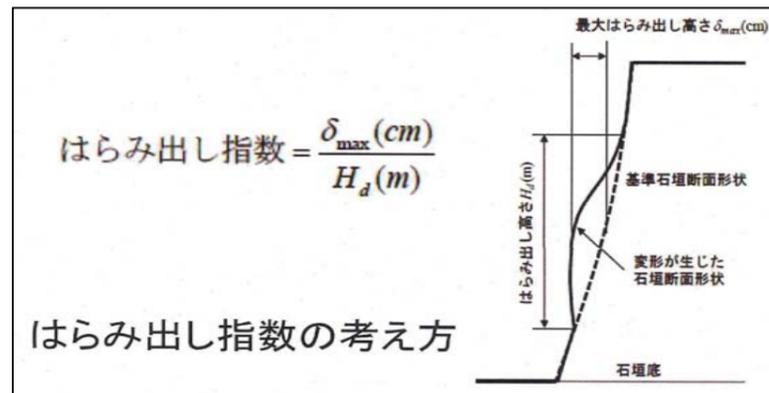
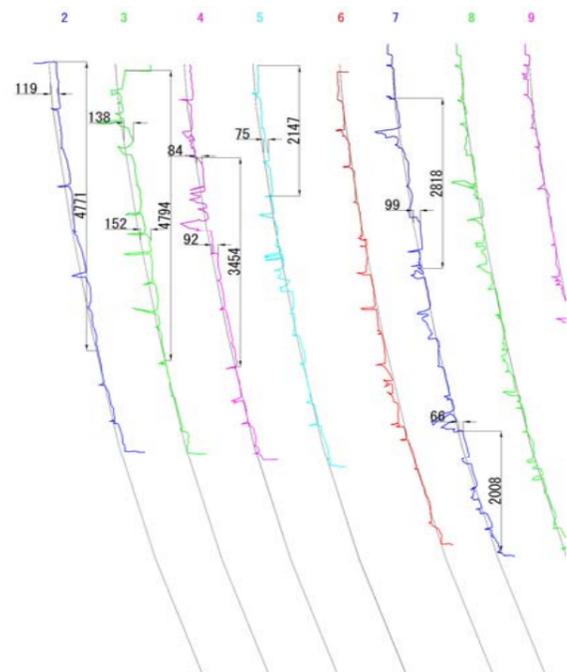


図 はらみ出し指数の算出



断面位置	記号	2	3	4	5	6	7
最大はらみ出し量	δ (cm)	11.9	15.2	9.2	7.5	無し	9.9
はらみ出し高さ	Hd(m)	4.771	4.794	3.454	2.147	—	2.818
はらみ出し指数	δ / Hd	2.5	3.2	2.7	3.5	—	3.5
判断基準値	a	6.0	6.0	6.0	6.0	—	6.0
照査	$\delta / Hd < a$	OK	OK	OK	OK	—	OK

図 はらみ出し法の照査イメージ

②示力線法

石垣に作用する土圧及び地震時慣性力と、石垣自重の合力の作用点を線で結び、転倒に単する検討を視覚化したもの。示力線が石垣前面を越えたら、転倒（安全率1.0以下）となる。また、根入れ部の安定検討として、石垣基部の「転倒」、「滑動」、「支持力度」の照査を行う。

国士館大学理工学部まちづくり学系
工学(博士)橋本隆雄教授「熊本城石垣及び擁壁の被害分析」より転載

・石垣に作用する土圧(常時)

$$Pa_n = \frac{W_n \cdot \sin(\omega_n - \phi) - \sum \{Pa_i \cdot \cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_i)\}}{\cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_n)}$$

・石垣に作用する土圧(地震時)

$$Pae_n = \frac{We \cdot \sin(\omega_n - \phi + \theta) - \sum \{Pae_i \cdot \cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_i)\}}{\cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_n)}$$

・合力の作用位置(示力線)

$$d_i = \sum (M_i / V_i)$$

ここに、Pa: 常時の土圧、Pae: 地震時の土圧、 ω : 滑り角、 δ : 壁面摩擦角、 α : 積み石の勾配、 θ : 地震時合成角(=tan-1kh)、W: すべり土塊重量、We: すべり土塊重量とそれに起因する慣性力との合力、kh: 水平震度、L: 積み石の法長、d: 荷重合力の作用点までの距離、M: モーメント、V: 鉛直力

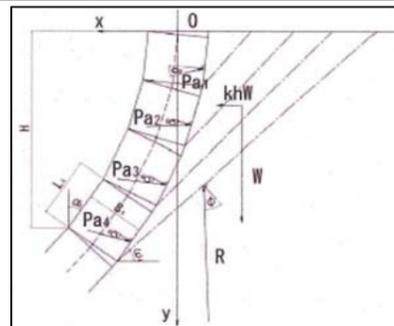


図 示力線法における荷重の作用状態

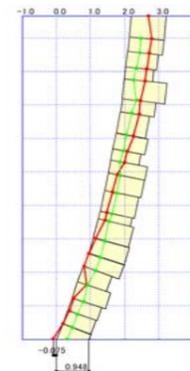


図 示力線法の照査イメージ

③円弧すべり法

石垣を含む斜面全体のすべり安定性を評価する解析手法。すべり面を円弧と仮定し、すべり面に沿って派生する滑動力の総和と、すべり面の摩擦抵抗や粘着力の総和の比率(=安全率)により照査する。

$$F_s = \frac{\sum [c \cdot l + \{(W - u \cdot b) \cos \alpha - k_h \cdot W \cdot \sin \alpha\} \tan \phi]}{\sum (W \cdot \sin \alpha + \frac{h}{r} \cdot k_h \cdot W)} \quad (7.3)$$

ここに、 F_s : 安全率
 r : すべり円の半径 (m)
 c : 粘着力 (kN/m² (tf/m²))
 l : 分割片で切られたすべり面の弧長 (m)
 W : 分割片の重量 (kN/m (tf/m))
 u : 間隙水圧 (kN/m² (tf/m²))
 b : 分割片の幅 (m)
 α : 分割片で切られたすべり面の中心とすべり円の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角 (度)
 k_h : 設計水平震度[®] (無次元)
 ϕ : せん断抵抗角 (度)
 h : 各分割片の重心とすべり円の中心との鉛直距離 (m)

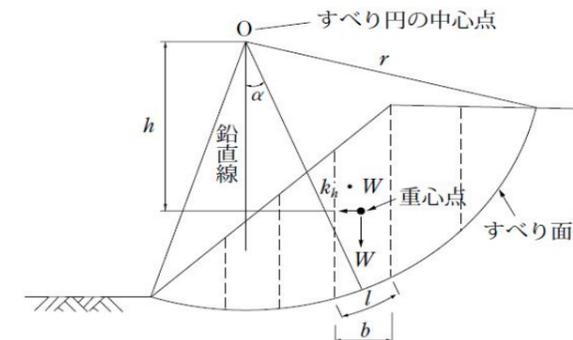


図 円弧すべり面を用いた地震時の安定計算法

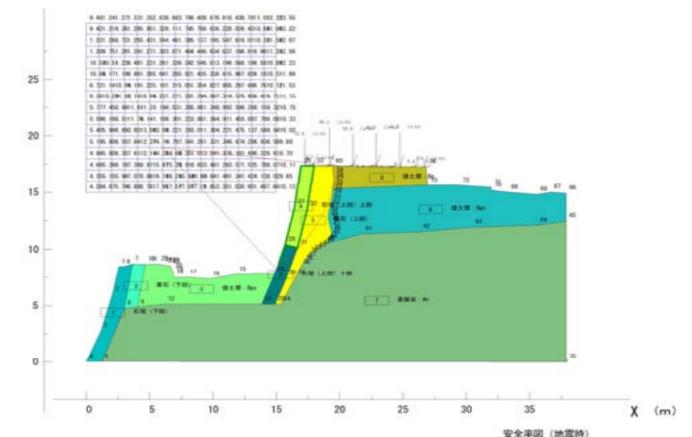


図 円弧すべり法の照査イメージ

●石垣耐震検討結果概要

1. 検討結果

表 石垣耐震診断結果

石垣面	①はらみ出し法	断面	②示力線法						③円弧すべり法(B-2)		備考
			(1)安定		(2)根入れ部				常時	地震時(kh=0.16)	
			常時	地震時(kh=0.16)	常時		地震時(kh=0.16)				
			転倒	滑動	支持力度	転倒	滑動	支持力度			
北面	顕著な変状無し	N-1	△	△	○	○	○	○	○	○	③地震時にFs=1.0となる石垣部cを逆解析で設定
		N-3	○	△	○	○	○	○	○	○	
		N-5	○	△	○	○	○	○	○	○	

【凡例】

○:B/3より背面側
△:石垣前面より背面側
×:石垣前面より前面側

【凡例】

○:B/2より背面側
△:石垣前面より背面側
×:石垣前面より前面側

【凡例】

○:Fs≥1.2
△:1.0≤Fs<1.2
×:Fs<1.0

【凡例】

○:Fs≥1.0
×:Fs<1.0

【検討結果概要】

①はらみ出し法

1) 検討結果

- ・顕著なはらみ出しは確認されなかった。
- ・弱部等の問題は無い。

2) 対策工

- ・はらみ出し法の結果に対し、緊急な耐震対策は不要と考える。

②示力線法

1) 検討結果

- ・安定：合力の作用位置が石垣前面より背面側となり、概ね耐震性を満足する。
- ・根入れ部：石垣根石は岩着していると考えられ、根入れ部の安定性は確保されている。

2) 対策工

- ・示力線法の結果に対し、緊急な耐震対策は不要と考える。

③円弧すべり法

1) 検討方針

- ・築城後、複数回の大地震を受けたが、損傷した記録は無い。
- ・②示力線法の結果より、石垣部で損傷しないと仮定し、石垣部に粘着力cを考慮する。
- ・石垣部の粘着力cの値は、地震時の震度（道路土工より設定したL2の震度kh=0.16）で安全率Fs=1.0となる値を逆解析で設定したケース①と、常時で安全率Fa=1.0となる値を逆解析で設定したケース②を試算した。

2) 検討結果（ケース①）

- ・常時は、Fs=1.215となり、必要安全率を満足。
- ・地震時は、Fs=1.00となり、必要安全率を満足。

3) 対策概要

- ・円弧すべり法の結果に対し、緊急な耐震対策は不要と考える。

【まとめ】

丸亀城天守台石垣の耐震安定性は、常時・地震時において概ね照査を満足し、直ちに補強が必要な状態ではないと考える。

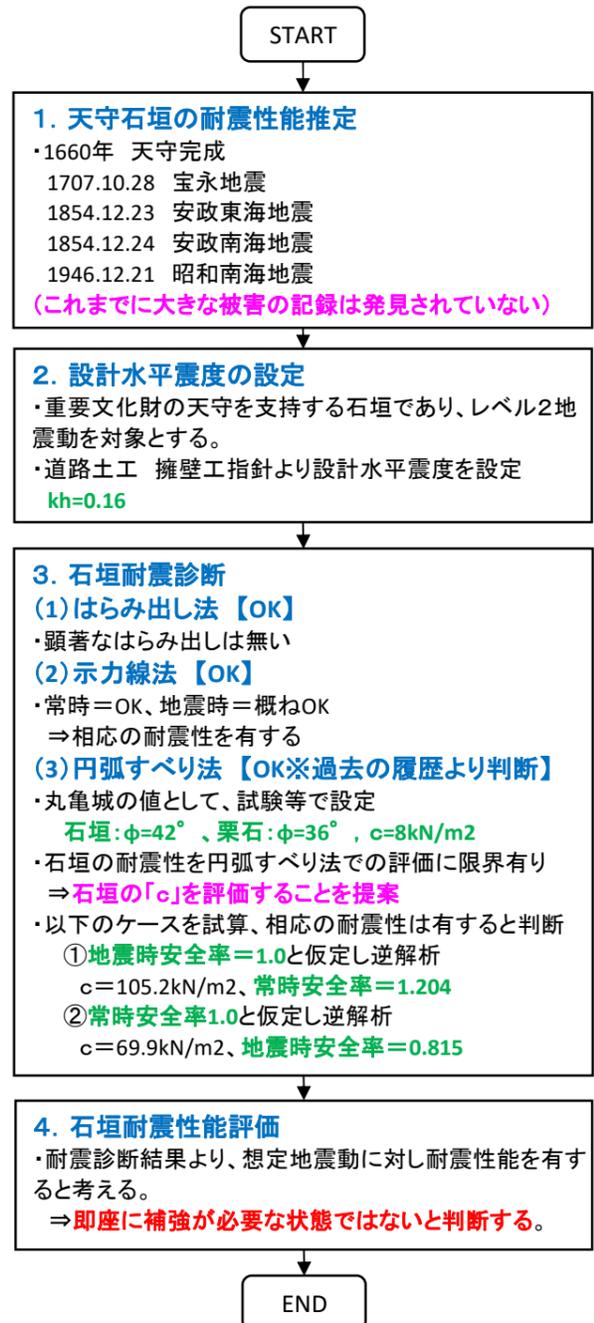
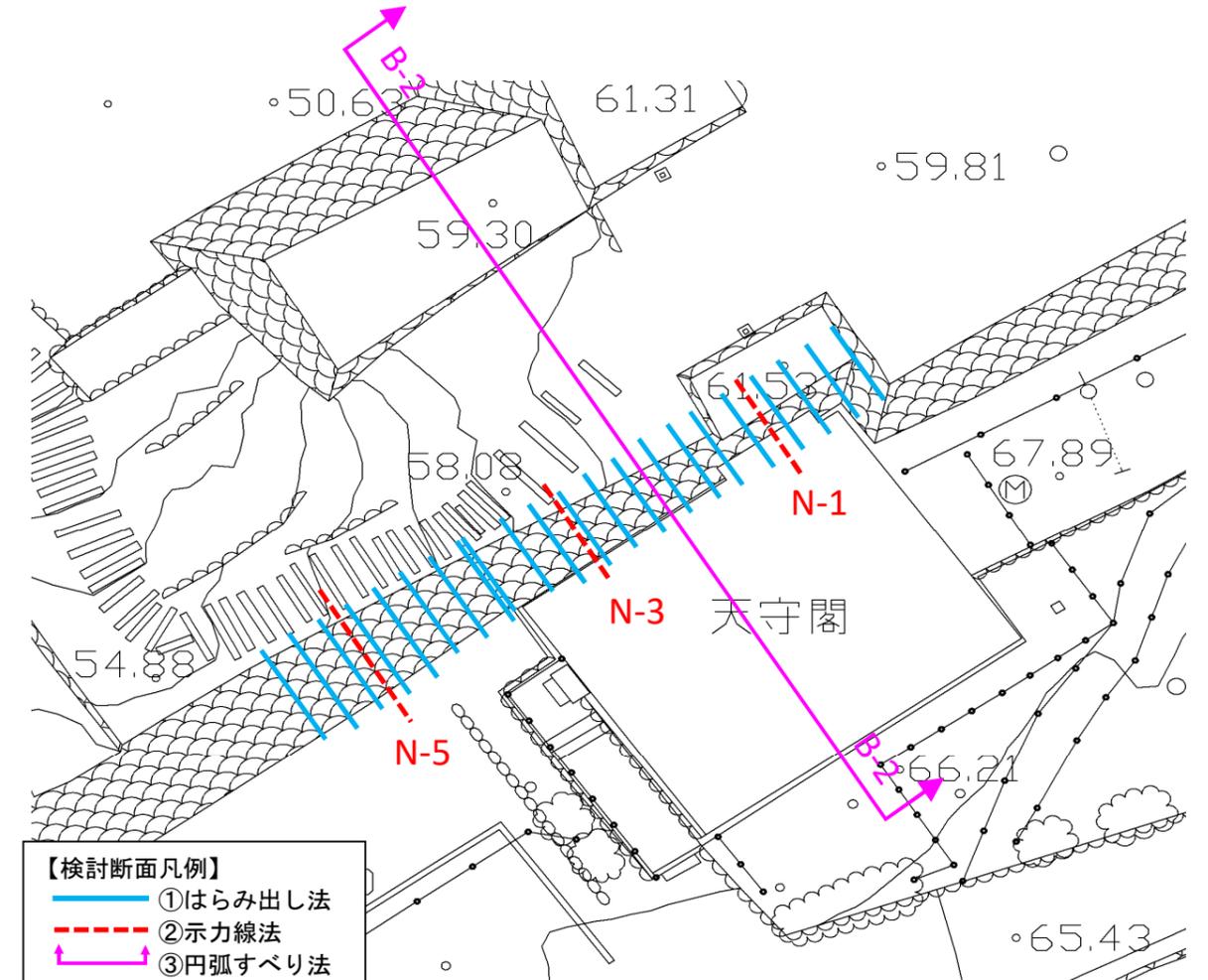


図 石垣耐震検討 検討フロー



【検討断面凡例】
 ①はらみ出し法
 ②示力線法
 ③円弧すべり法

図 石垣耐震検討位置図

●地盤定数

石垣の安定計算に寄与する、石垣背面土の土質定数を、R元年、R2年に実施された地盤調査結果を基に、コア写真による土質判断と、PS検層のVsを考慮し設定する。

【R2年度地盤調査】

表-5.2.4 各層の地盤定数推定値

地層名	記号	設計用N値	単位体積重量γ (kN/m³)	粘着力c (kN/m²)	せん断抵抗角φ(°)	変形係数E (MN/m²)
盛土層	Bg	10.0	19.6	0	29	6.5
砂礫層	Bgs	10.8	18.6~19.8 ^{※3}	25.6~25.9 ^{※3}	4.6~8.4 ^{※3}	3.8 ^{※3}
基礎岩(安山岩) ^{※1}	An	— ^{※2}	21.6~26.5	980~1960	38~45	490~1960

※1 安山岩はCM級として地盤定数を推定。
 ※2 N値は貫入不能。
 ※3 室内土質試験結果の試験値。

① 盛土、砂礫層(Dg)

N値: N=10.0(データ数 1)

γ: 表-5.2.1の「盛土、礫および礫まじり砂」として、 $\gamma=2.0 \text{ t/m}^3 \approx 19.6 \text{ kN/m}^3$

c: 砂礫のため、安全を見てc=0 kN/m²

φ: 大崎の式より、 $\phi=15+\sqrt{20 \times 100} \approx 29^\circ$

E: 図-5.2.1に示す関係式より、 $E=670 \times 10.0^{0.986} = 6487 \text{ kN/m}^2 \approx 6.5 \text{ MN/m}^2$

② 盛土、砂礫・砂層(Bgs)

N値: N=10.8(データ数 18)

γ: 室内土質試験結果より、 $1.86 \sim 1.98 \text{ g/cm}^3 = 18.6 \sim 19.8 \text{ kN/m}^3$

c: 室内土質試験結果より、 $c=25.6 \sim 25.9 \text{ kN/m}^2$

φ: 室内土質試験結果より、 $\phi=4.6 \sim 8.4^\circ$

E: 室内土質試験結果の平均値より、 $E=3.8 \text{ MN/m}^2$

③ 安山岩(An)

γ: 表-5.2.2の安山岩の比重より、 $\gamma=2.2 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3 \approx 21.6 \sim 26.5 \text{ kN/m}^3$

c: CM級岩盤主体であることから、表-5.2.3より、 $c=980 \sim 1960 \text{ kN/m}^2$

φ: CM級岩盤主体であることから、表-5.2.3より、 $\phi=38 \sim 45^\circ$

E: CM級岩盤主体であることから、表-5.2.3より、 $E=490 \sim 1960 \text{ MN/m}^2$

【検討に用いる土質定数】

・Bg、BgsのPS検層結果のVsから想定したC、φ

表 Vsによる土質定数の設定(Bg、Bgs)

項目	単位	Bg	Bgs	算出式等
Vs	(m/sec)	280	250	Ps検層結果
土質	—	砂質土	粘性土	Ps検層結果
N値	—	42.9	15.6	速示Vの式用いVsより算出
粘着力C	(kN/m²)	0.0	93.6	6N
内部摩擦角φ	(°)	40.4	0	$15+\sqrt{(15N)}$

《Bg》

・コア写真より岩塊が主体
 ・R2地盤調査成果の「N=10」は土砂部分の値と判断
 ・N=10を基に算出したφ=29°は過小
 ⇒砂質土としてPS検層のVsよりφを設定
 φ=40°、c=0、γ=19.6kN/m³

《Bgs》

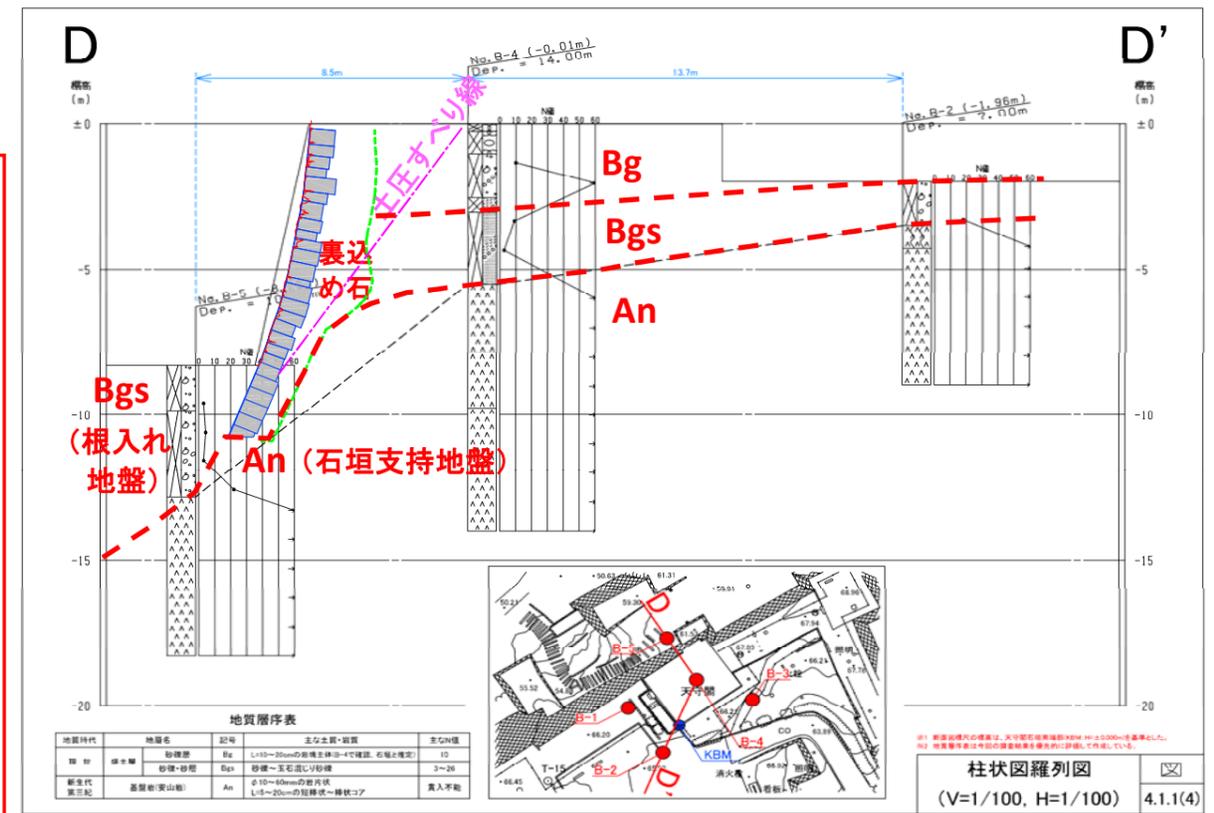
・コア写真より粘性土が主体
 ①UU試験結果: φ=4.6°、c=25.6kN/m²
 ②Vsより設定: φ=0、c=93kN/m²
 ⇒cの設定は、②は過大と判断し、φと共に①を採用
 ・φ=4.6°、c=25.6kN/m²、γ=18.6kN/m³

《An》

・安山岩 CM級
 ⇒R2地質調査で提案されたCM級推定値の下限値を採用
 φ=38°、c=980kN/m²、γ=21.6kN/m³

《裏込め石》

⇒砂礫層の一般値を採用
 ・φ=40°、c=0、γ=20kN/m³



道路橋示方書・同解説V耐震設計編

粘性土層の場合
 $V_{si} = 100N_i^{1/3}$ ($1 \leq N_i \leq 25$)
 砂質土層の場合
 $V_{si} = 80N_i^{1/3}$ ($1 \leq N_i \leq 50$)
 ここに、
 N_i : 標準貫入試験によるi番目の地層の平均N値

【検討に用いる土質定数一覧表】

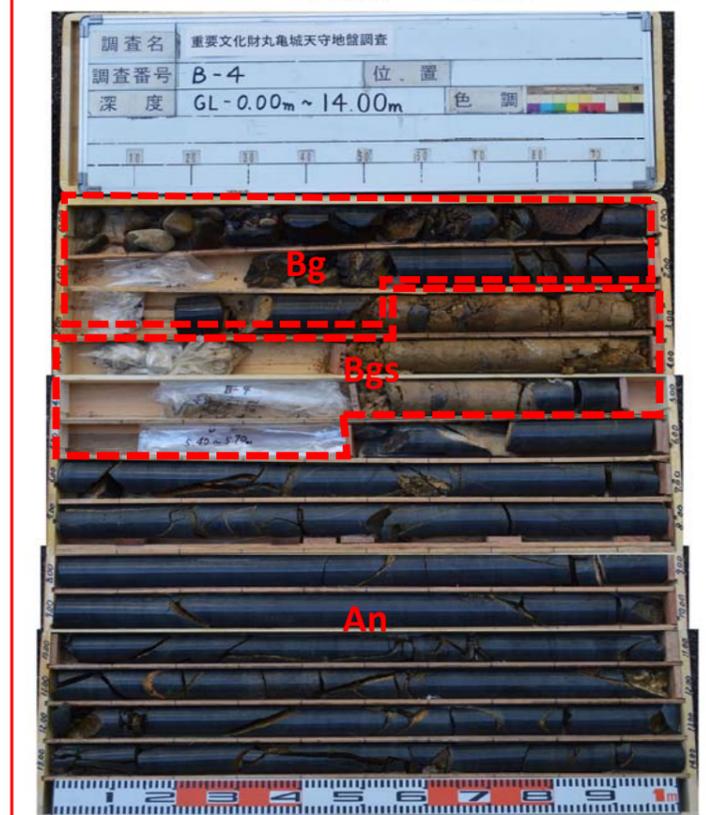
表 検討に用いる土質定数一覧

	単位体積重量γ (kN/m³)	粘着力C (kN/m²)	内部摩擦角φ(°)
Bg	19.6	0	40
Bgs	18.6	25.6	4.6
An	21.6	980	38
裏込め石	20	0	40
	砂礫土の一般値	砂礫土の一般値	砂礫土の一般値

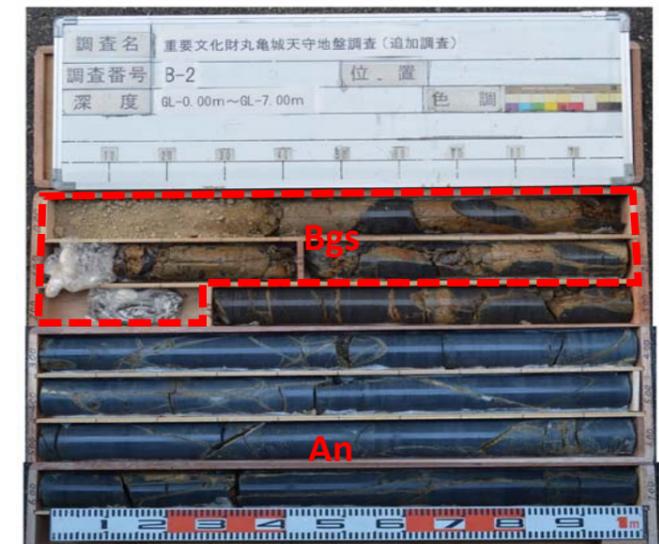
コア写真(No. B-5 地点: 深度 0.00~10.00m)



コア写真(No. B-4 地点: 深度 0.00~14.00m)



コア写真(No. B-2 地点: 深度 0.00~7.00m)



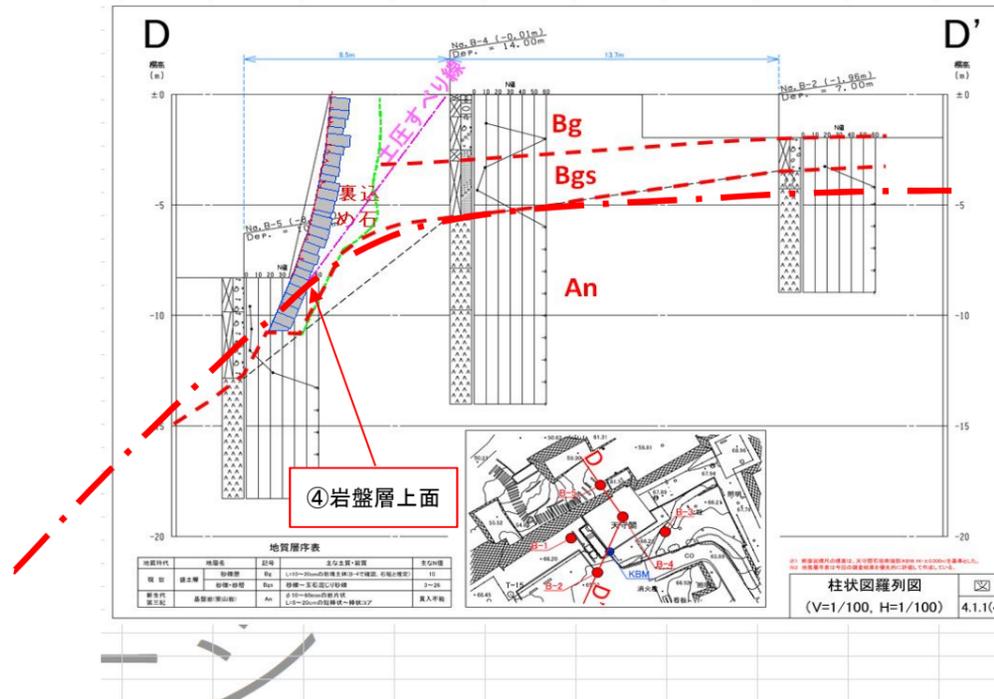
●地層構成の設定

円弧すべり解析に用いる地盤構成は、「R1,R2地盤調査」、「R2微動アレイ探査」を基に、以下の考察を踏まえ設定する。

- ①当該地盤は、盛土層(Bg, Bgs)と岩盤層(An)の2層で構成されている。→**盛土層と、岩盤層の2分割**で設定する。
 - ②「R1地盤調査」でPS検層が実施され、S波速度は**盛土層でVs=250~280m/sec、岩盤層で980m/sec**である(表1、図1)。
 - ③「R2微動アレイ探査」で、北側の石垣についてS波速度分布が確認された(図2)。
 - ④「R1,R2地盤調査」より、天守付近の**ボーリング調査でより詳細な地層線を設定**する(図3-④)。
 - ⑤天守で実施された「R2地中レーダー探査」で確認された築石の控え長、裏込め石の厚さを参考に、**1, 2段目石垣を設定**した(図2-⑤)
- 【地層線の設定】**
- ⑥岩盤層(An)の上面は、③を参考に**Vs=280m/sec程度を目安に、天守付近は④を参考に設定**した(図2-⑥)。

表1 PS検層結果一覧表

深度 GL-(m)	湿潤密度 (g/cm ³)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	ポアソン比	剛性率 (kN/m ²)	ヤング率 (kN/m ²)
0.00 ~ 2.50	2.00	550	280	0.325	156,800	415,500
2.50 ~ 5.50	1.80	940	250	0.462	112,500	328,900
5.50 ~ 13.00	2.50	2,290	980	0.388	2,401,000	6,665,000



件名 重要文化財丸亀城天守地盤調査 ボーリング No. B-4

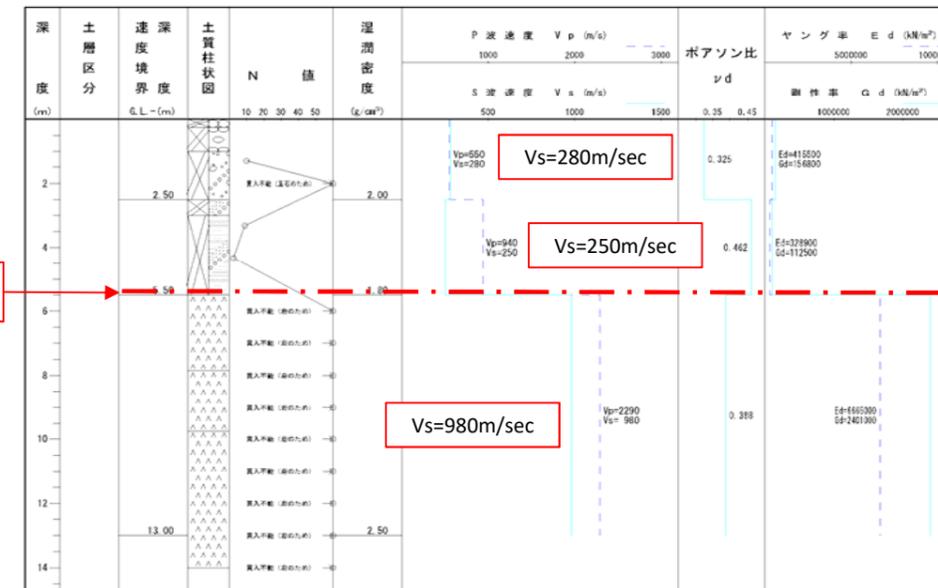


図1 PS検層結果図

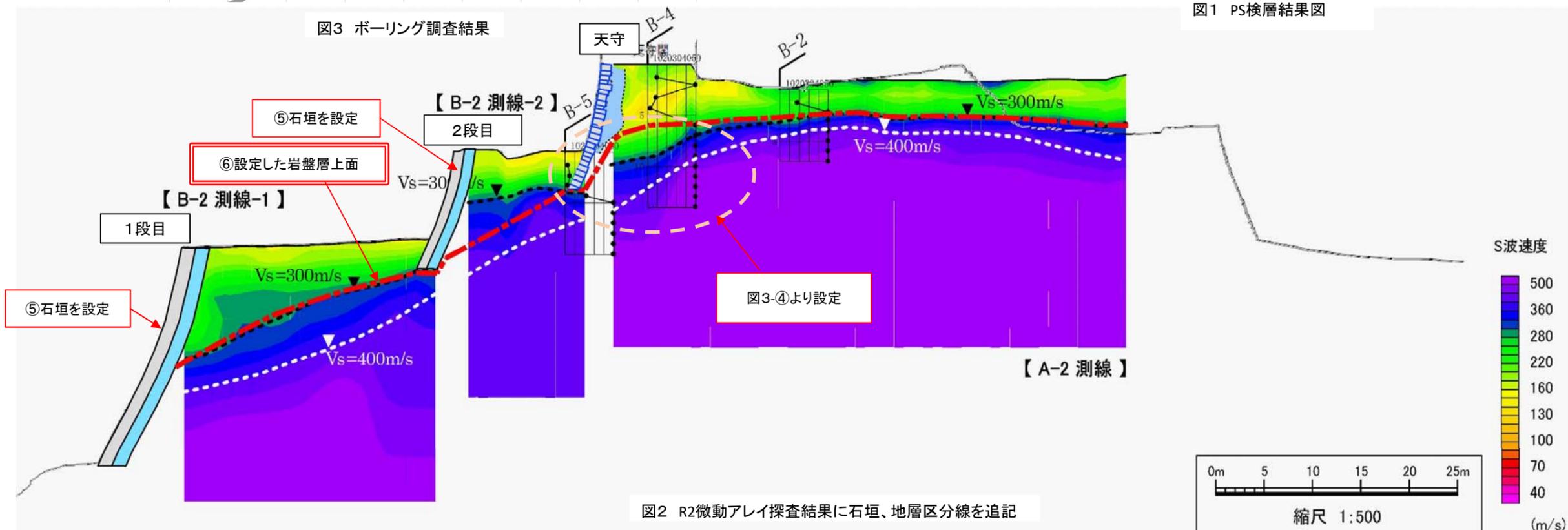


図2 R2微動アレイ探査結果に石垣、地層区分線を追記

●石垣レーダー探査結果

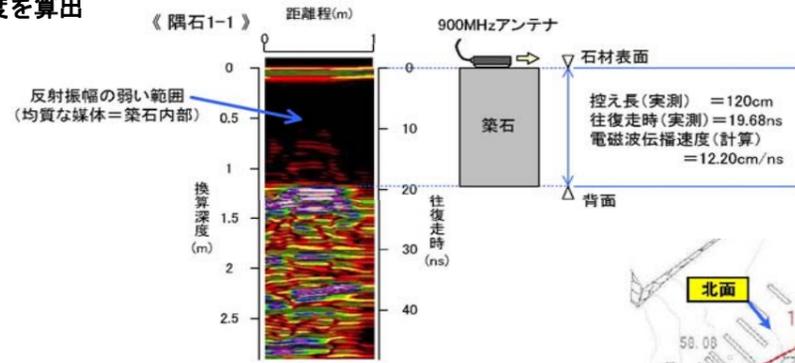
【目的】

・築石の控え長、裏込め石の厚さを、電磁波を用いて非破壊で探査する。

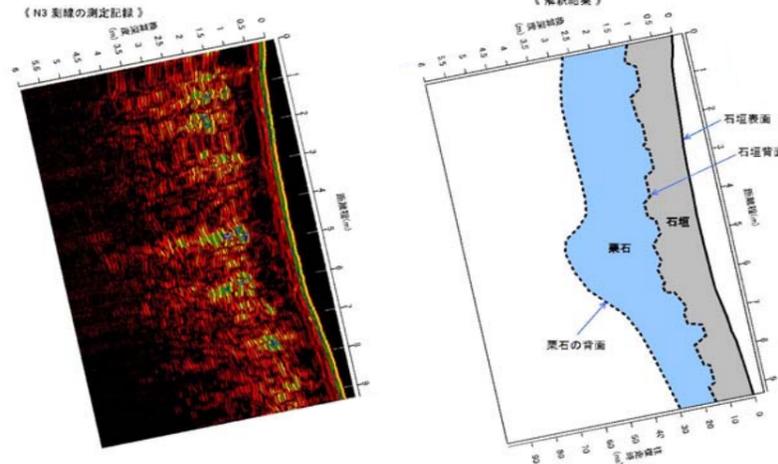
【探査方法】

- ①実測可能な隅石で、築石の電磁波伝播速度を算出。
- ②石垣を「連続測定」し、電磁波の反射状況から、築石と裏込め石の厚さを推定。
- ③連続測定の側線付近の築石を1つずつ「石垣の控え長測定」を実施。

①築石の電磁波伝播速度を算出



②石垣連続測定

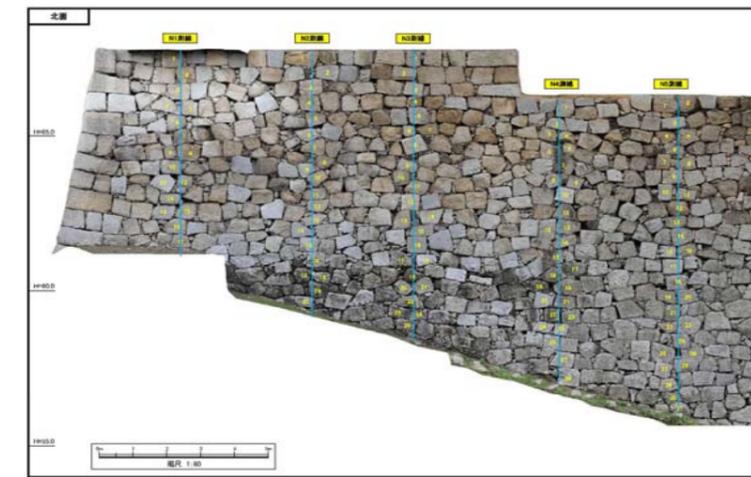


③連続測定の側線付近の築石を1つずつ「石垣の控え長測定」を実施

表 2-2 石垣控え長の測定結果・1 (北面)

N1 測線		N2 測線		N3 測線		N4 測線		N5 測線		
築石番号	控え長(cm)									
N1-1	118	N2-1	114	N3-1	101	N4-1	108	N5-1	88	
N1-2	114	N2-2	115	N3-2	102	N4-2	70	N5-2	124	
N1-3	108	N2-3	105	N3-3	90	N4-3	99	N5-3	117	
N1-4	92	N2-4	109	N3-4	82	N4-4	88	N5-4	89	
N1-5	113	N2-5	117	N3-5	125	N4-5	95	N5-5	88	
N1-6	88	N2-6	109	N3-6	98	N4-6	86	N5-6	117	
N1-7	96	N2-7	88	N3-7	91	N4-7	102	N5-7	93	
N1-8	101	N2-8	111	N3-8	87	N4-8	93	N5-8	77	
N1-9	75	N2-9	109	N3-9	94	N4-9	95	N5-9	88	
N1-10	105	N2-10	95	N3-10	83	N4-10	125	N5-10	109	
N1-11	127	N2-11	91	N3-11	109	N4-11	109	N5-11	92	
N1-12	146	N2-12	115	N3-12	109	N4-12	110	N5-12	115	
N1-13	108	N2-13	120	N3-13	103	N4-13	107	N5-13	112	
N1-14	114	N2-14	82	N3-14	108	N4-14	114	N5-14	92	
N1-15	102	N2-15	121	N3-15	95	N4-15	112	N5-15	104	
N1-16	98	N2-16	93	N3-16	107	N4-16	96	N5-16	95	
N1-17	104	N2-17	128	N3-17	99	N4-17	84	N5-17	95	
		N2-18	99	N3-18	111	N4-18	115	N5-18	105	
		N2-19	119	N3-19	109	N4-19	114	N5-19	88	
		N2-20	110	N3-20	80	N4-20	95	N5-20	116	
				N3-21	88	N4-21	99	N5-21	91	
				N3-22	102	N4-22	89	N5-22	90	
				N3-23	112	N4-23	112	N5-23	114	
				N3-24	90	N4-24	109	N5-24	91	
				N3-25	87	N4-25	105	N5-25	107	
						N4-26	92	N5-26	82	
						N4-27	89	N5-27	104	
						N4-28	85	N5-28	121	
								N5-29	106	
								N5-30	102	
								N5-31	132	
測線平均	106	測線平均	108	測線平均	97	測線平均	100	測線平均	101	
									北面の平均控え長 (cm)	103

※ 赤色箇所：控え長 100cm 未満の石材

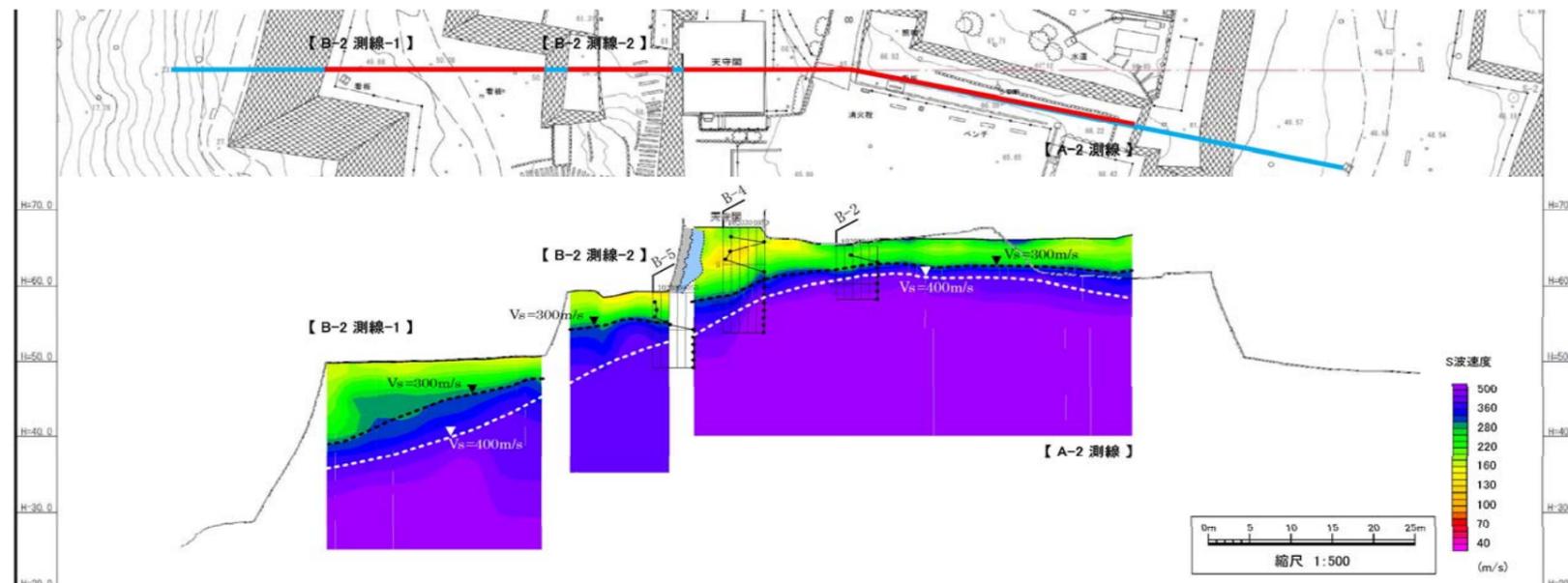


参考図 石垣控え長測定の測定位置 (北面)

●微動アレイ探査結果

【目的】・地盤のS波速度を測定し、地盤の地層構成を推定する。

【探査方法】・地盤を伝播する常時微動を複数の微動計で測定・解析することで震度数10mの地盤のS波速度を求める。

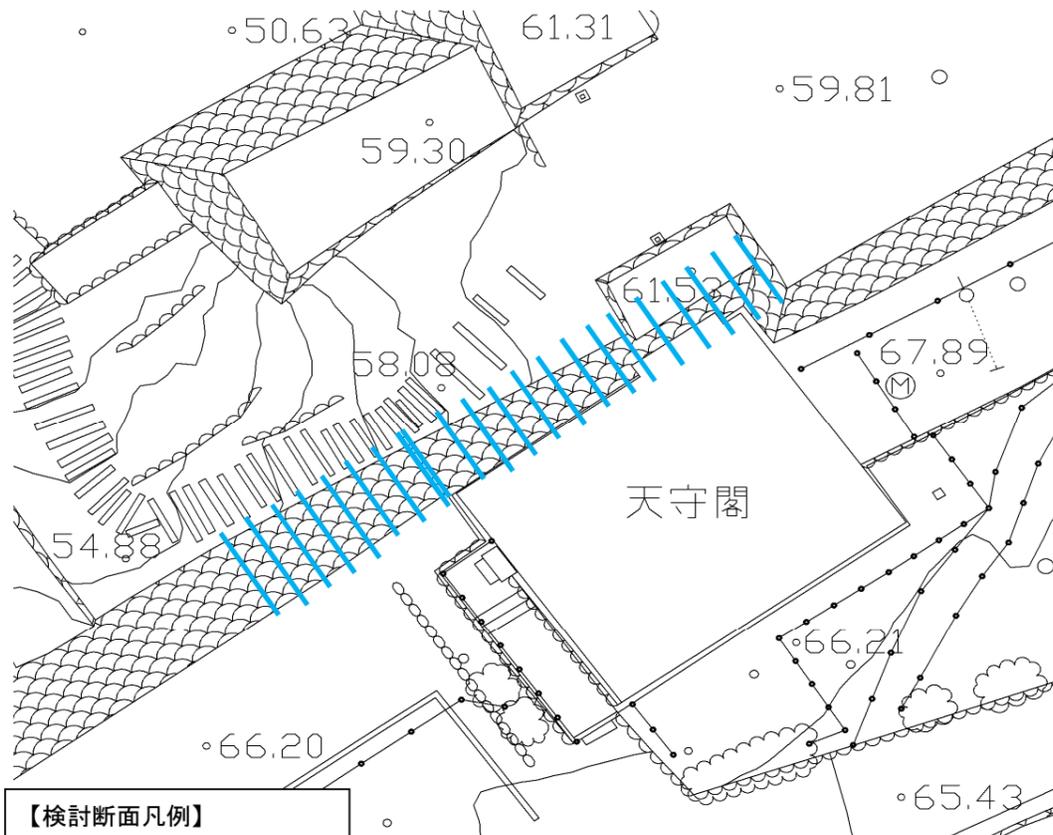


●石垣耐震検討結果概要 【はらみ出し法】

【検討結果概要】

①はらみ出し法

- 1) 検討結果
 - ・顕著なはらみ出しは確認されなかった。
- 2) 対策概要
 - ・はらみ出し法の結果に対し、緊急な耐震対策は不要と考える。



【検討断面凡例】
①はらみ出し法

図 石垣耐震検討位置図 (はらみ出し法)

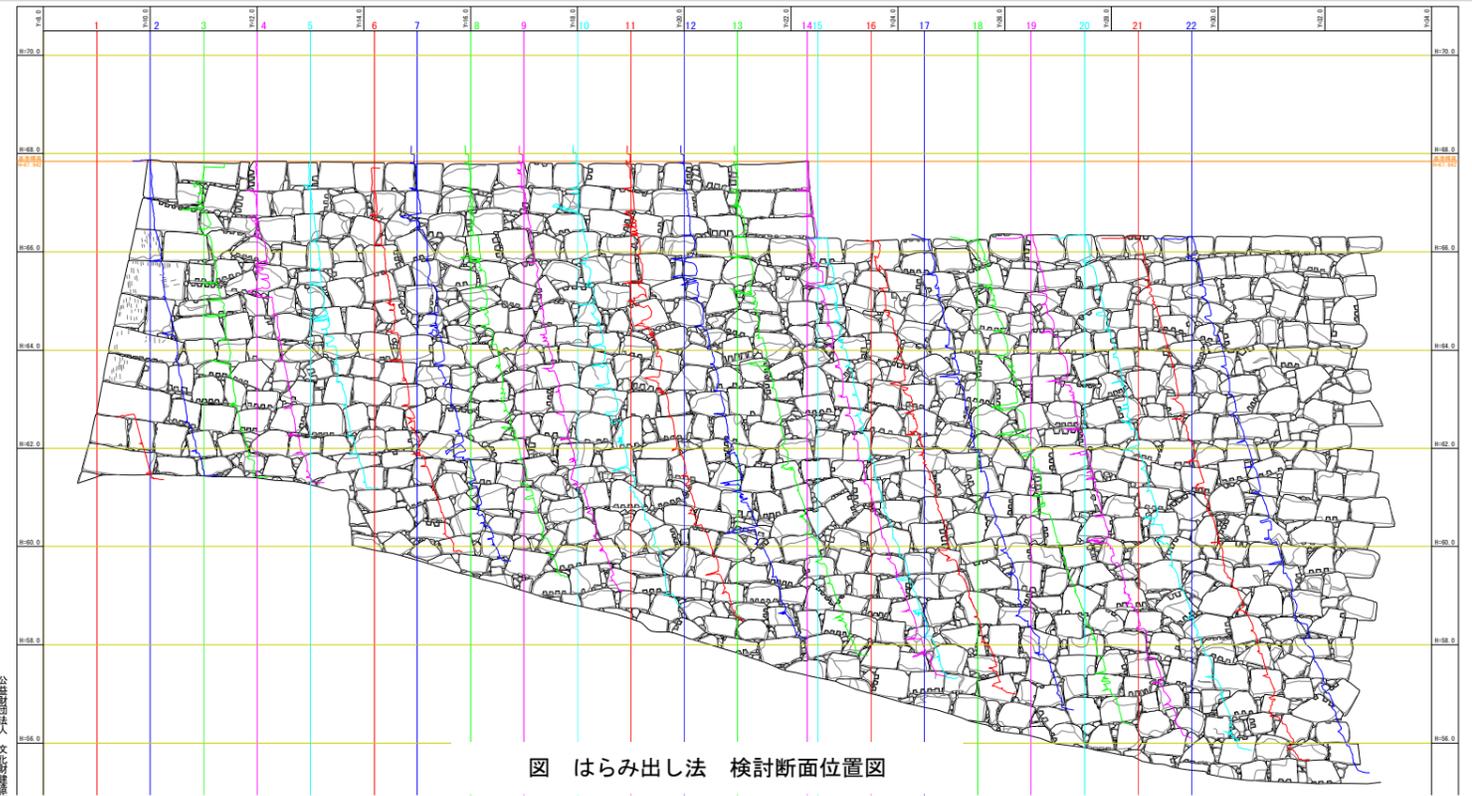


図 はらみ出し法 検討断面位置図

●標準石垣断面

・算木積み3段分の高さで設定

●断面図重ね合わせ

・明確なはらみ出しが確認された断面について、はらみ出し指数を算出した。

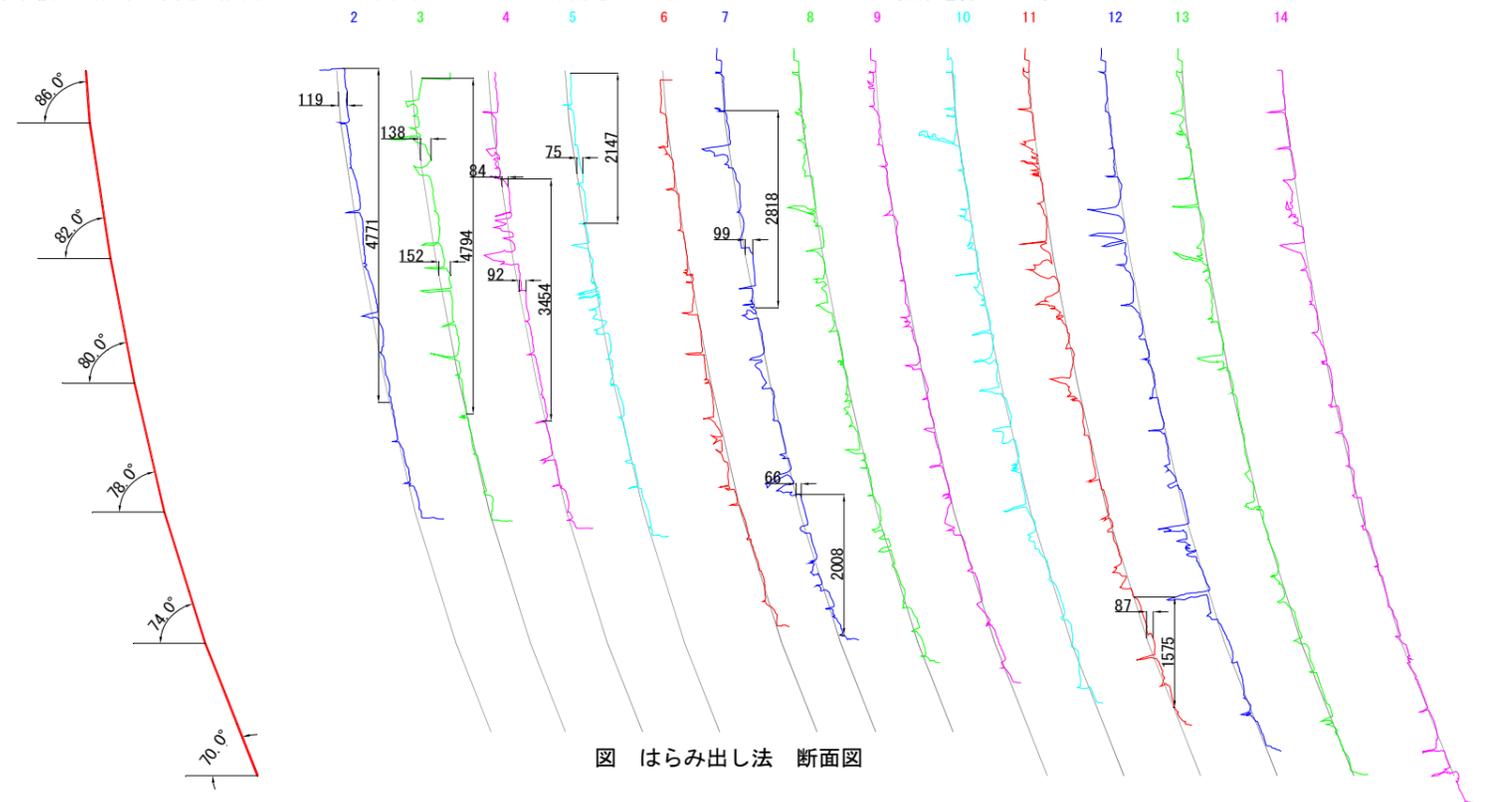


図 はらみ出し法 断面図

表 はらみ出し指数

断面位置	記号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
最大はらみ出し量	δ (cm)	11.9	15.2	9.2	7.5	無し	9.9	6.6	無し	無し	無し	8.7	無し	無し
はらみ出し高さ	Hd(m)	4.771	4.794	3.454	2.147	—	2.818	2.008	—	—	—	1.575	—	—
はらみ出し指数	δ / Hd	2.5	3.2	2.7	3.5	—	3.5	3.3	—	—	—	5.5	—	—
判断基準値	a	6.0	6.0	6.0	6.0	—	6.0	6.0	—	—	—	6.0	—	—
照査	$\delta / Hd < a$	OK	OK	OK	OK	—	OK	OK	—	—	—	OK	—	—

【はらみ出し法】
はらみ出し筒指数OK

●石垣耐震検討結果概要 【示力線法】

【検討結果概要】

②示力線法

1) 検討結果

- ・安定：合力の作用位置が石垣前面より背面側となり、概ね耐震性を満足する。
- ・根入れ部：石垣根石は岩着していると考えられ、根入れ部の安定性は確保されている。

2) 対策工

- ・示力線法の結果に対し、緊急な耐震対策は不要と考える。

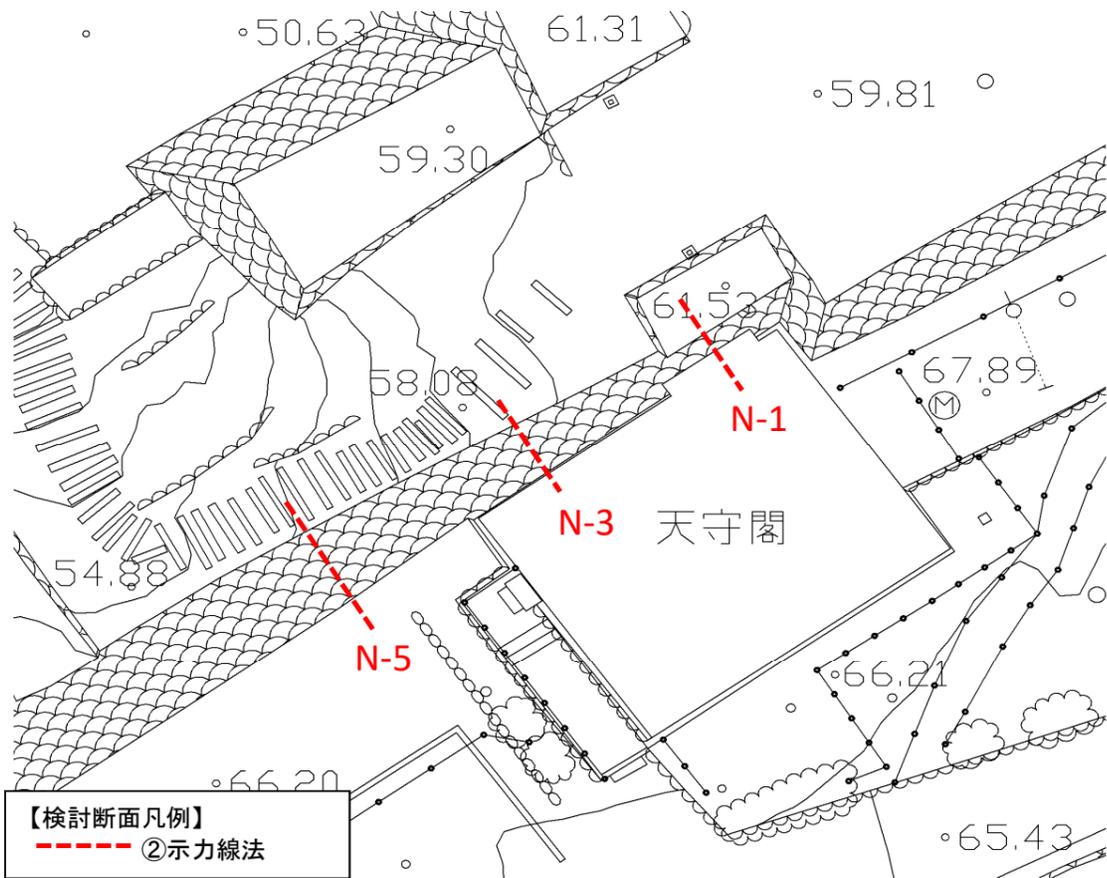


図 石垣耐震検討位置図 (示力線法)

【検討断面凡例】
--- ②示力線法

【示力線法】
概ねOK

【根入れ部】
OK

表 石垣耐震診断結果

石垣面	断面	②示力線法		(1)安定						(2)根入れ部						
				常時			地震時(kh=0.16)			常時			地震時(kh=0.16)			
		常時	地震時(kh=0.16)	転倒	滑動	支持力度	転倒	滑動	支持力度	転倒	滑動	支持力度				
北面	N-1	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	N-3	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	N-5	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

【凡例】
○: B/3より背面側 ○: B/2より背面側
△: 石垣前面より背面側 △: 石垣前面より背面側
×: 石垣前面より前面側 ×: 石垣前面より前面側

●解析モデル作成：測量結果「立面図」、「断面図」と、地中レーザ探査結果「築石控え長」を用い設定

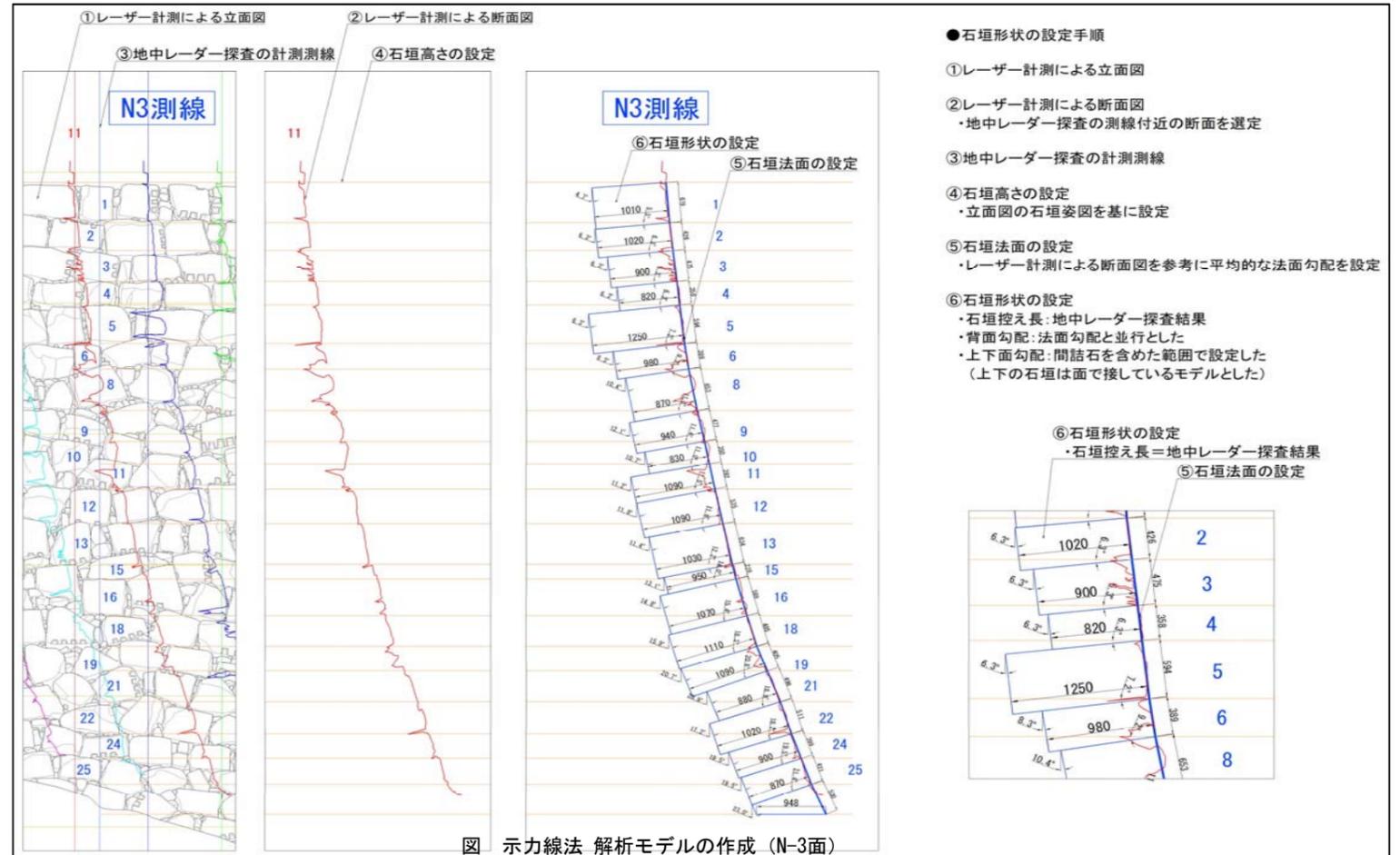
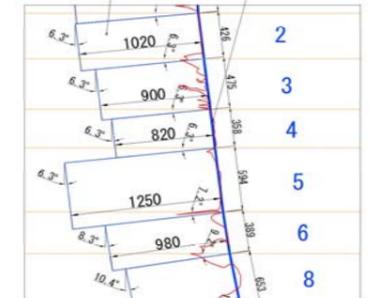


図 示力線法 解析モデルの作成 (N-3面)

●石垣形状の設定手順

- ①レーザー計測による立面図
- ②レーザー計測による断面図
・地中レーザ探査の測線付近の断面を選定
- ③地中レーザ探査の計測測線
- ④石垣高さの設定
・立面図の石垣姿図を基に設定
- ⑤石垣法面の設定
・レーザー計測による断面図を参考に平均的な法面勾配を設定
- ⑥石垣形状の設定
・石垣控え長：地中レーザ探査結果
・背面勾配：法面勾配と並行とした
・上下面勾配：間詰石を含めた範囲で設定した
(上下の石垣は面で接しているモデルとした)

●石垣形状の設定
・石垣控え長＝地中レーザ探査結果



●示力線法：合力の作用位置は、常時・地震時の許容値を超過する箇所はあるが、石垣前面を超える箇所は無く、概ね耐震性を有していると判断する。

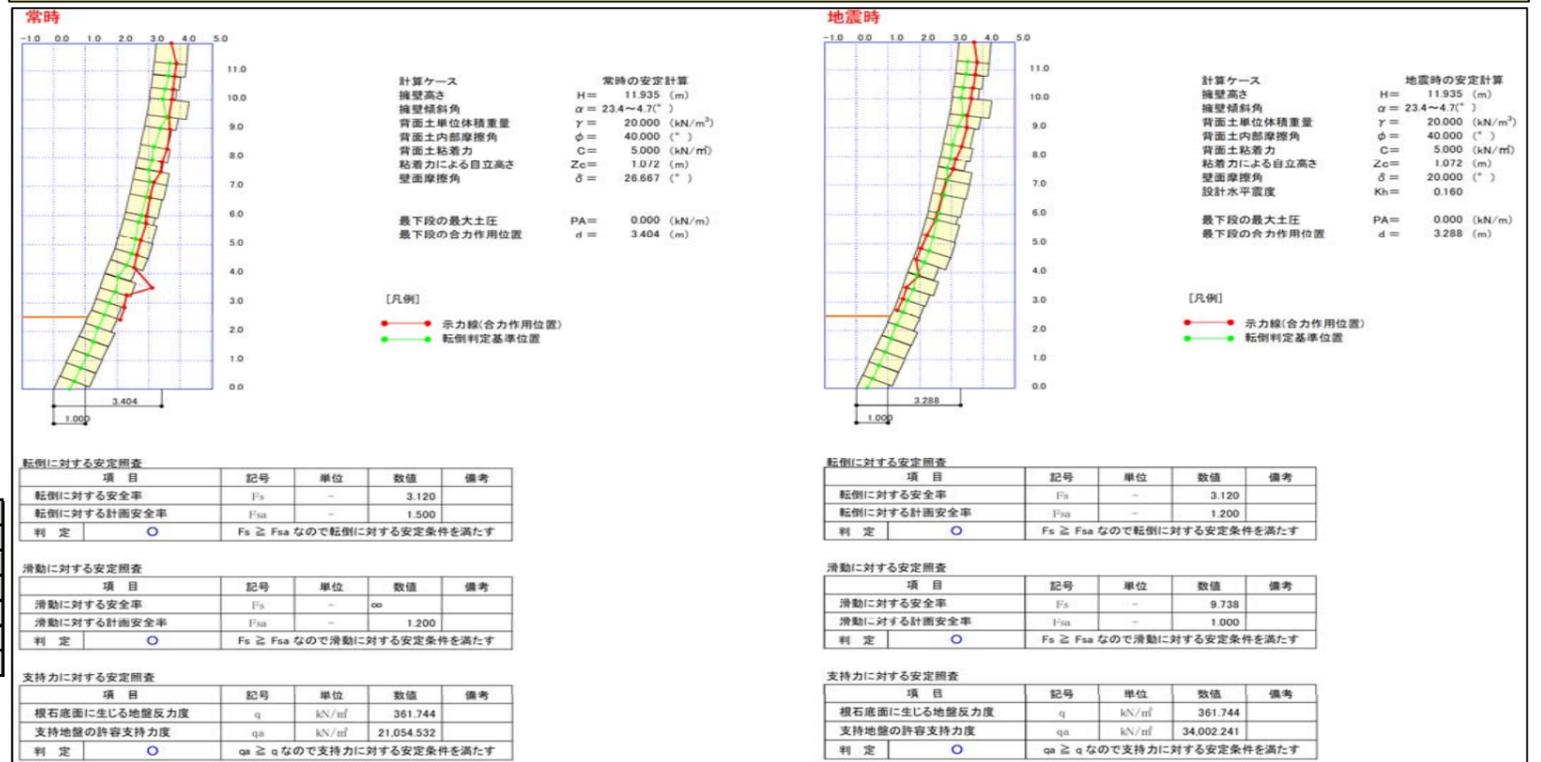


図 示力線法 検討結果 (N-3面)

●石垣耐震検討結果概要 【円弧すべり法】

【検討結果概要】

③円弧すべり法

1) 検討方針

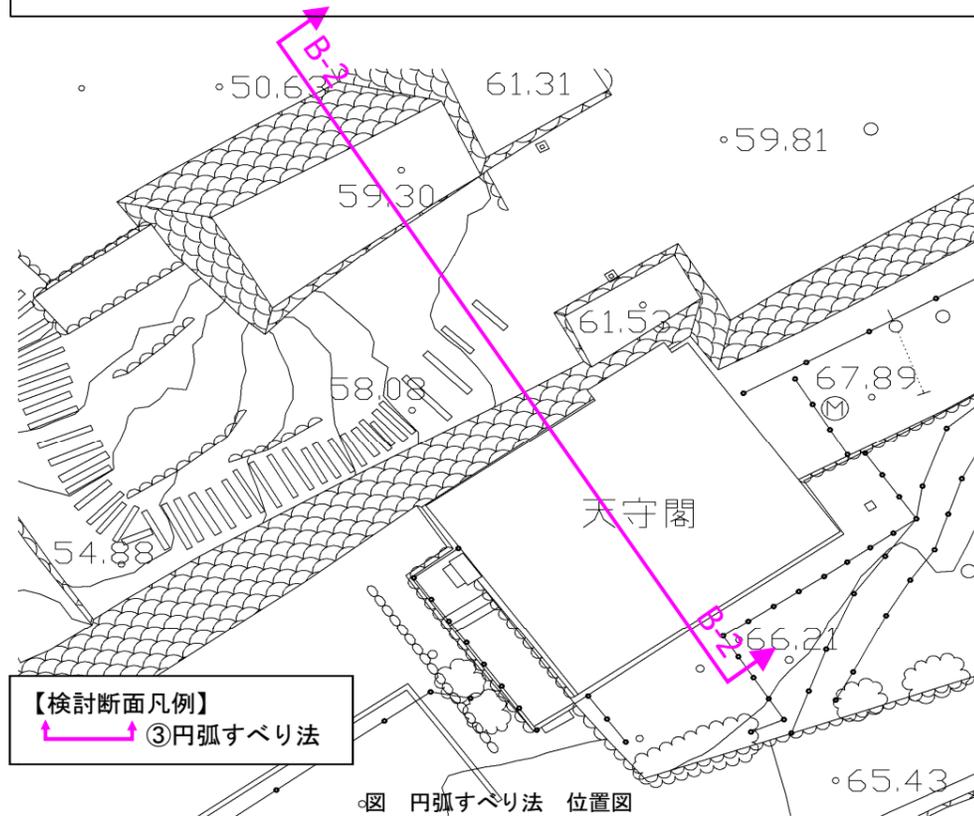
- ・築城後、複数回の大地震を受けたが、損傷した記録は無い。
- ・②示力線法の結果より、石垣部で損傷しないと判断でき、**石垣部に粘着力cを考慮する。**
- ・石垣部の粘着力cの値は、地震時の震度（道路土工より設定したL2の震度 $kh=0.16$ ）で安全率 $F_s=1.0$ となる値を**逆解析**で設定した。

2) 検討結果

- ・常時は、 $F_s=1.215$ となり、必要安全率を満足。
- ・地震時は、 $F_s=1.00$ となり、必要安全率を満足。

3) 対策概要

- ・円弧すべり法の結果に対し、緊急な耐震対策は不要と考える。



【検討断面凡例】

③円弧すべり法

図 円弧すべり法 位置図

表 安全率 一覧表 (円弧すべり法)

項目	常時	地震時 $kh=0.16$
許容安全率	1.200	1.000
北面 B-2断面	1.215	1.000

表 結果一覧表 (円弧すべり法)

石垣面	③円弧すべり法 (B-2)		評価
	常時	地震時 ($kh=0.16$)	
北面	○: $F_s \geq 1.2$	○: $F_s \geq 1.0$	③地震時に $F_s=1.0$ となる石垣部cを逆解析で設定

【凡例】

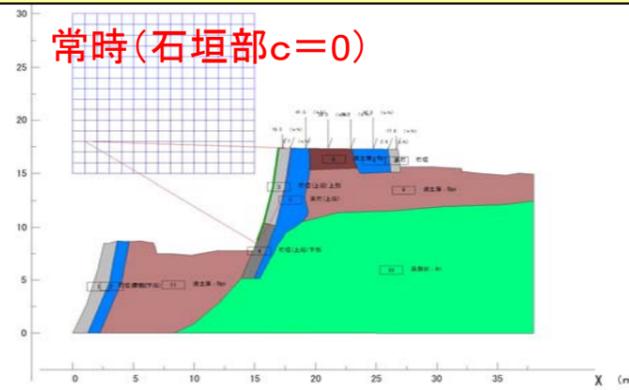
- : $F_s \geq 1.2$
- △: $1.0 \leq F_s < 1.2$
- ×: $F_s < 1.0$

【凡例】

- : $F_s \geq 1.0$
- ×: $F_s < 1.0$

●円弧すべり法：石垣部の定数を、 $c=0$ 、 $\phi=40^\circ$ とすると、安全率が常時で $F_s=0.272$ となり、現実とかけ離れた結果となる。

常時 (石垣部 $c=0$)

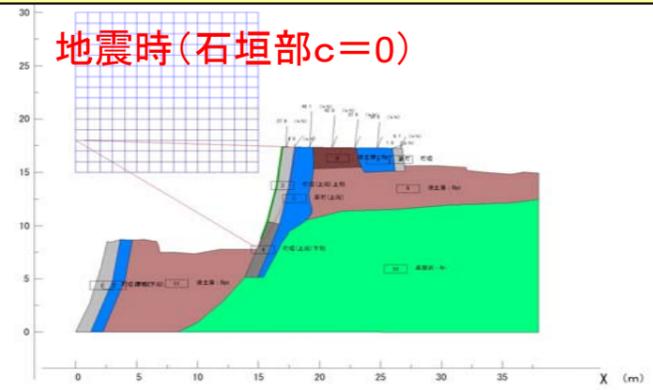


最小安全率 $F_s \text{ MIN} = 0.272$
 円弧の中心 X = 1.00 (m)
 Y = 18.00 (m)
 半径 R = 17.000 (m)
 抵抗モーメント $M_R = 793.2$ (kN·m)
 起動モーメント $M_D = 2913.8$ (kN·m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	浸透重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
4	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
5	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
6	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
7	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
8	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.000	0.000
9	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.000	0.000
10	21.60	21.60	38.00	960.00	0.00	0.000	0.000
11	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.000	0.000

常時で安全率 F_s が1.0を大きく下回り、現実とかけ離れた結果となる

地震時 (石垣部 $c=0$)

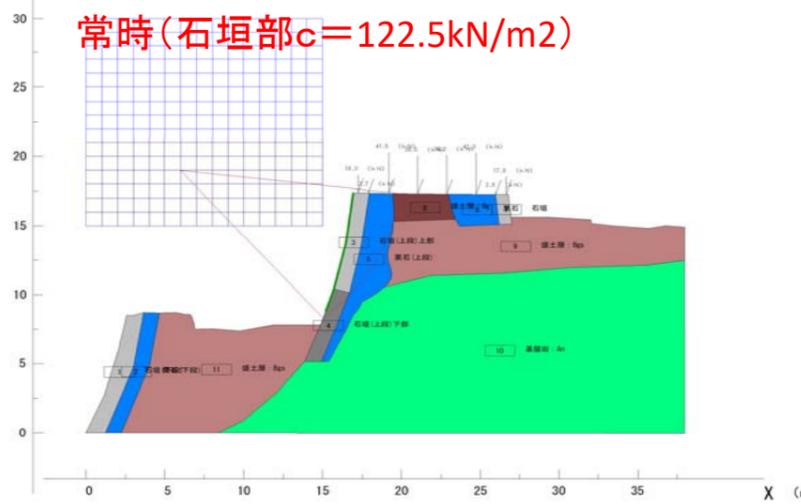


最小安全率 $F_s \text{ MIN} = 0.140$
 円弧の中心 X = 0.00 (m)
 Y = 18.00 (m)
 半径 R = 18.000 (m)
 抵抗モーメント $M_R = 508.2$ (kN·m)
 起動モーメント $M_D = 3625.7$ (kN·m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	浸透重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
2	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
3	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
4	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
5	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
6	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
7	23.00	23.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
8	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.160	0.000
9	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.160	0.000
10	21.60	21.60	38.00	960.00	0.00	0.160	0.000
11	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.160	0.000

●円弧すべり法 (逆解析)： $kh=0.16$ で、 $F_s=1.0$ となる、石垣部の粘着力： $c=122.5\text{kN/m}^2$

常時 (石垣部 $c=122.5\text{kN/m}^2$)

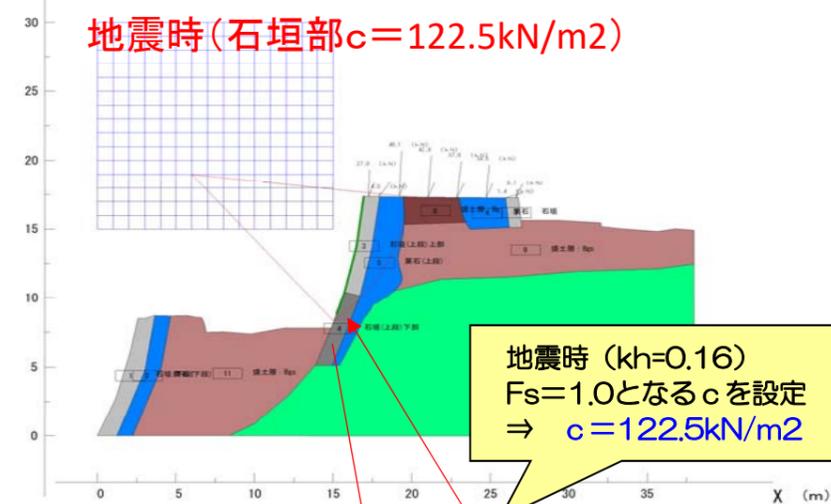


最小安全率 $F_s \text{ MIN} = 1.215$
 円弧の中心 X = 6.00 (m)
 Y = 19.00 (m)
 半径 R = 14.000 (m)
 抵抗モーメント $M_R = 6479.0$ (kN·m)
 起動モーメント $M_D = 5333.2$ (kN·m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	浸透重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.000	0.000
2	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.000	0.000
4	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.000	0.000
5	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
6	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.000	0.000
7	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.000	0.000
8	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.000	0.000
9	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.000	0.000
10	21.60	21.60	38.00	960.00	0.00	0.000	0.000
11	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.000	0.000

常時 ($c=122.5\text{kN/m}^2$)
 $\Rightarrow F_s=1.215 > 1.2$

地震時 (石垣部 $c=122.5\text{kN/m}^2$)



最小安全率 $F_s \text{ MIN} = 1.000$
 円弧の中心 X = 6.00 (m)
 Y = 19.00 (m)
 半径 R = 14.000 (m)
 抵抗モーメント $M_R = 5870.6$ (kN·m)
 起動モーメント $M_D = 5872.4$ (kN·m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	浸透重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.160	0.000
2	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
3	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.160	0.000
4	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.160	0.000
5	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
6	30.00	30.00	40.00	0.00	0.00	0.160	0.000
7	23.00	23.00	40.00	122.50	0.00	0.160	0.000
8	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.160	0.000
9	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.160	0.000
10	21.60	21.60	38.00	960.00	0.00	0.160	0.000
11	19.20	19.20	4.60	93.60	0.00	0.160	0.000

地震時 ($kh=0.16$)
 $F_s=1.0$ となるcを設定
 $\Rightarrow c=122.5\text{kN/m}^2$

●丸亀城 円弧すべり法 石垣部の定数検討

1. 概要

丸亀城天守台石垣の円弧すべり法による耐震検討結果より、石垣部分にも粘着力を見込むことが妥当ではないか、との見解に至った。

本検討では、石垣の築石や栗石の定数をパラメータに、逆解析の目標とする計算ケースごとに、石垣が有していると考えられる粘着力cを、逆解析により求めた。

2. 検討ケース

以下の条件で検討を行った。

case1・・・これまでの検討ケース
case2、3・・・追加検討ケース

(1)石垣、栗石の定数

1)石垣

case1	一般値として、 $\phi = 40^\circ$ を設定。 cは、地震時Fs=1.0となる値を逆解析で設定
case2	丸亀城の値として、 $\phi = 42^\circ$ を設定 cは、地震時Fs=1.0となる値を逆解析で設定
case3	丸亀城の値として、 $\phi = 42^\circ$ を設定 cは、常時Fs=1.0となる値を逆解析で設定

2)栗石

case1	一般値として、 $\phi = 40^\circ$ 、c=0を設定。
case2、3	丸亀城の復旧工事での試験値の平均的な値を設定。 $\phi = 36^\circ$ c=8kN/m2

3. 検討結果

栗石の定数が改善されたことで、石垣部分のcの値は小さくなる。
case1、2は、地震時Fs=1.0で設定したcの常時安全率は、1.2を満足している。
case3は、常時Fs=1.0に対し、地震時は0.8程度の安全率となる。

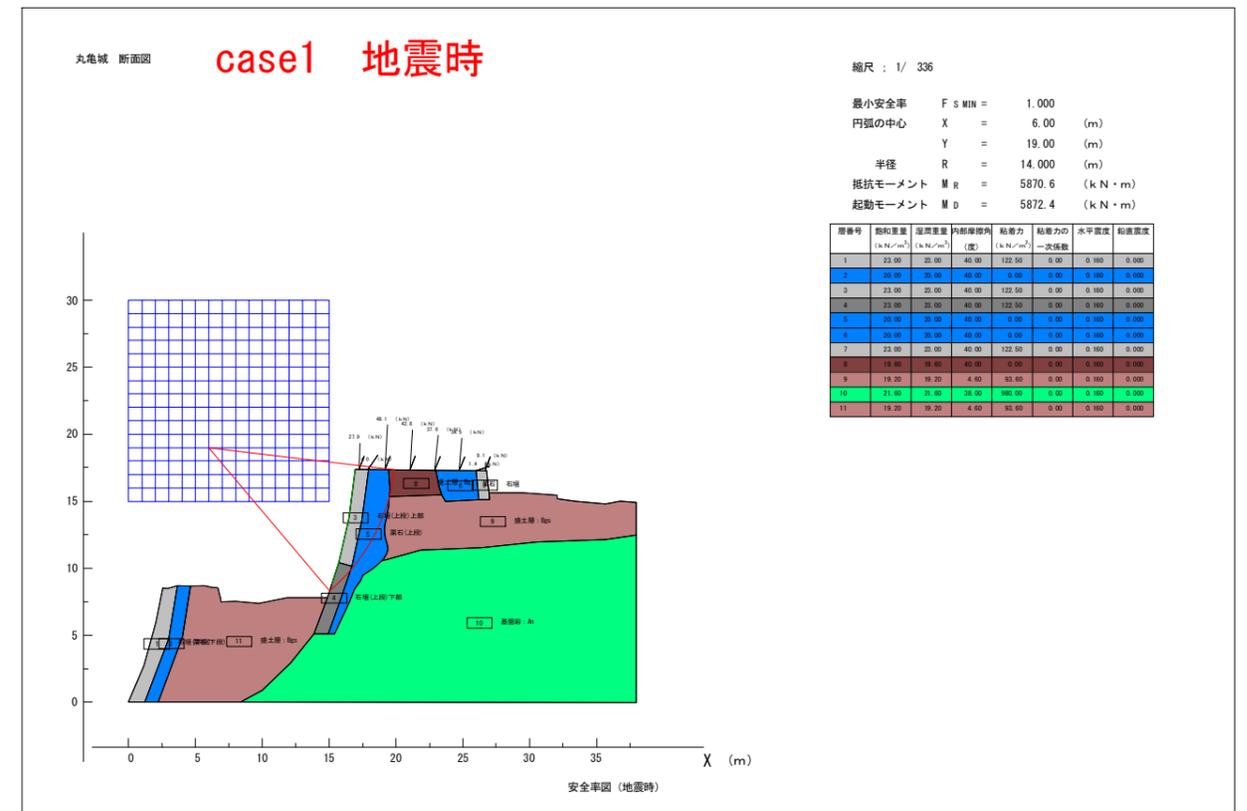
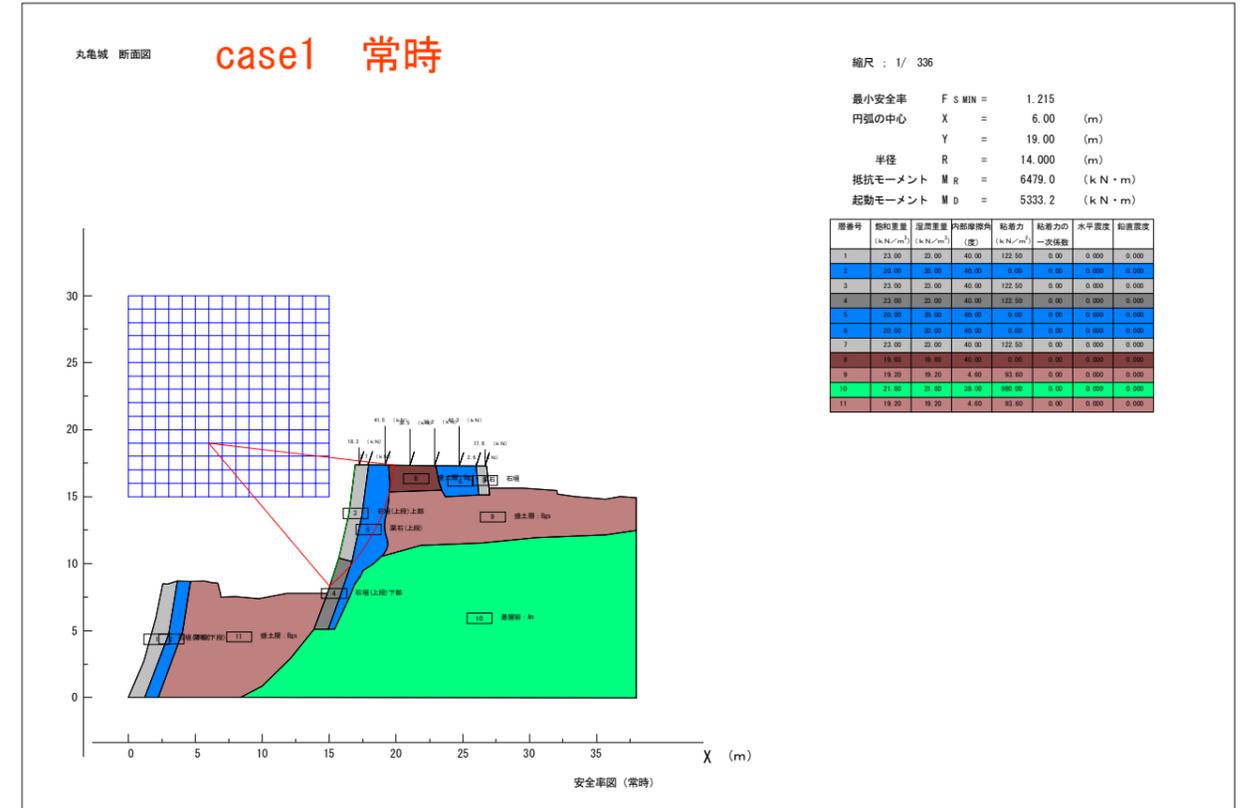
表 石垣定数逆解析の検討結果

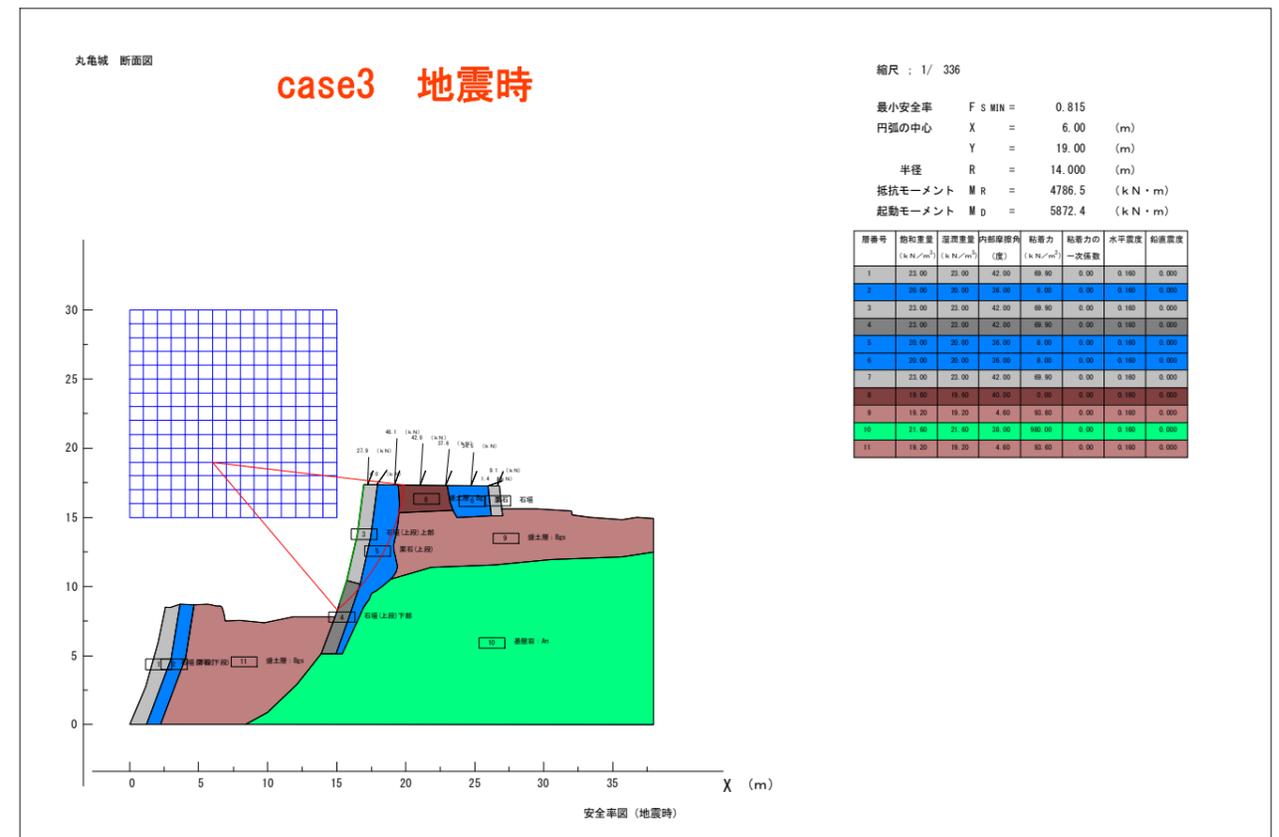
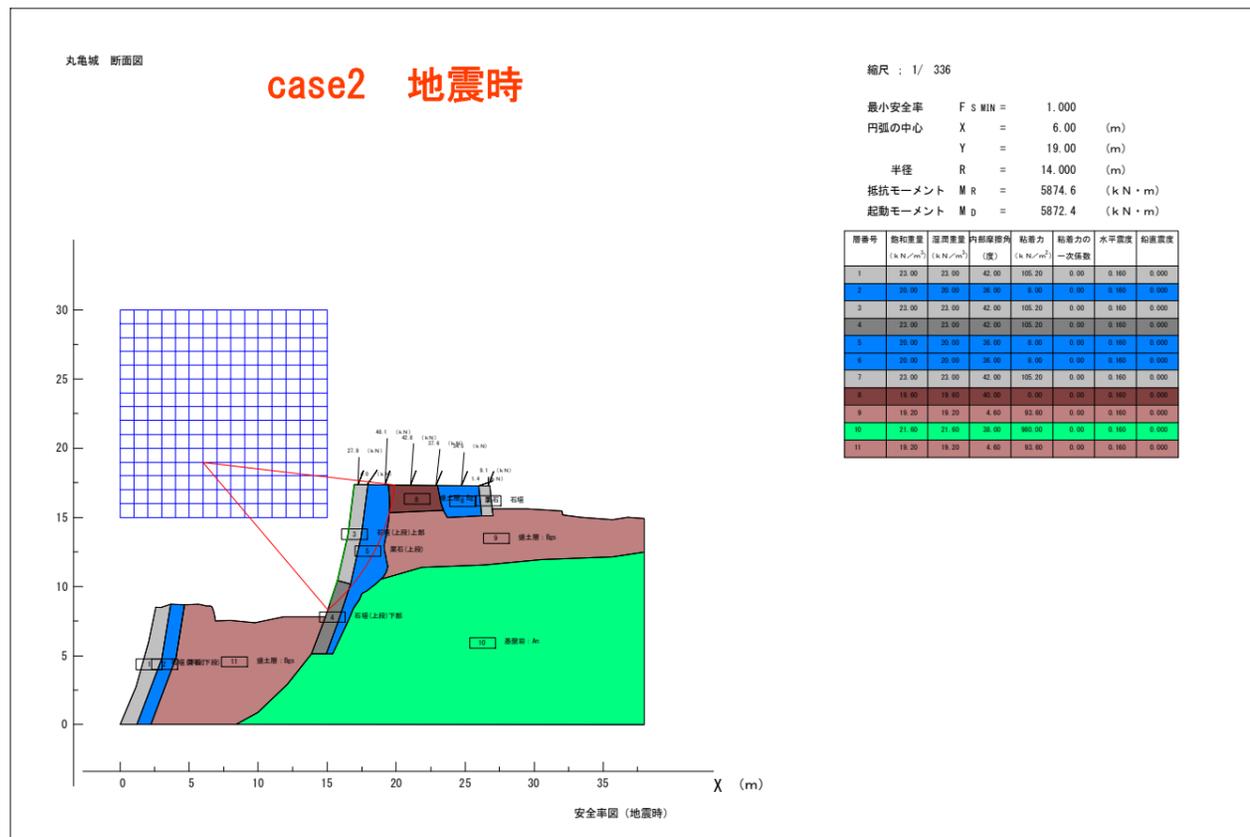
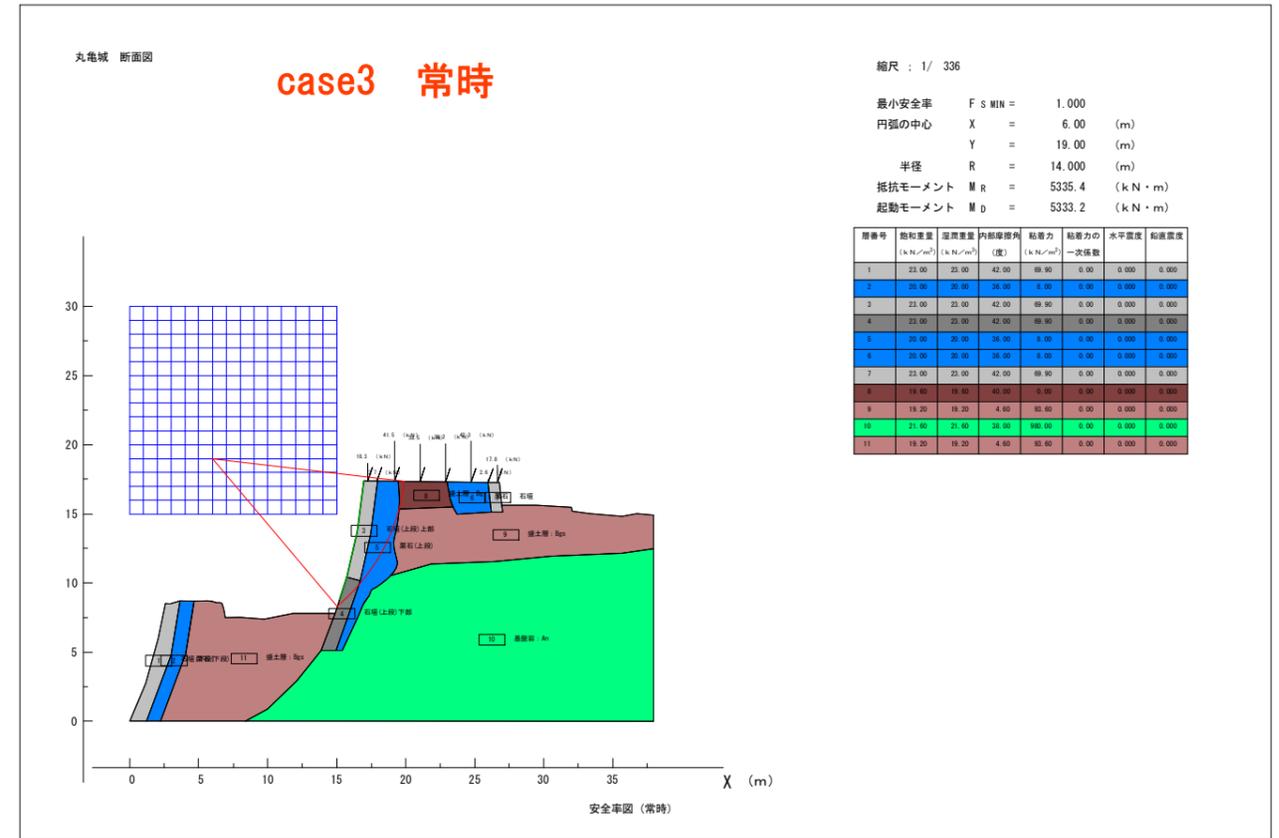
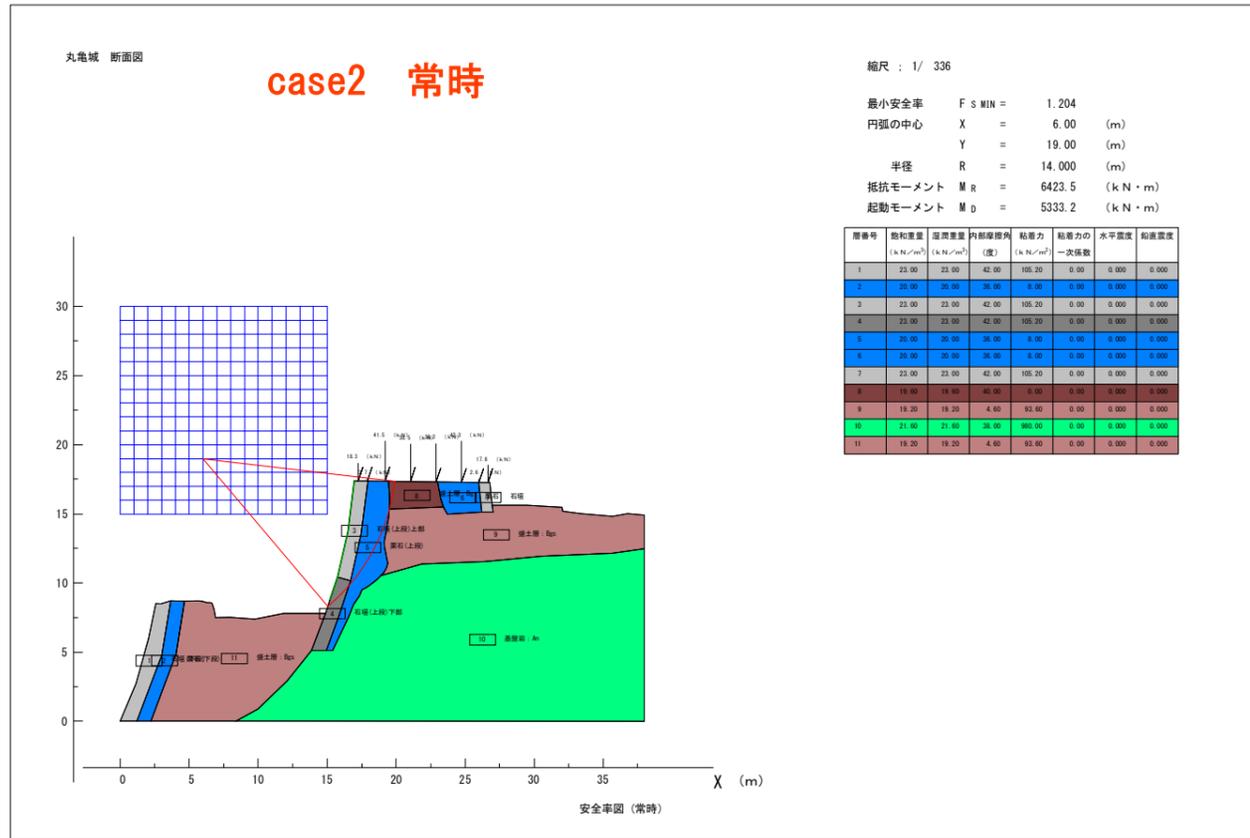
番号	内容	定数	逆解析 石垣のc(kN/m2)	安全率Fs	
				常時	地震時
case1	現在の検討	石垣： $\phi = 40^\circ$ 、c=逆解析 栗石： $\phi = 40^\circ$ 、c=0	122.5	1.215	1.000
case2	栗石、石垣定数修正、地震時Fs=1.0で石垣cを逆解析	石垣： $\phi = 42^\circ$ 、c=逆解析 栗石： $\phi = 36^\circ$ 、c=8kN/m2	105.2	1.204	1.000
case3	栗石、石垣定数修正、常時Fs=1.0で石垣cを逆解析		69.9	1.000	0.815

赤字：逆解析の目標値

4. 石垣を対象とした円弧すべり法の適用について

- 石垣は形状が大きい築石が積みあがった構造で、円弧すべり法でのモデル化が課題となる。
- 常時で石垣部分をc=0とした場合、安全率は1.0を下回り、現実と異なる。
⇒cを評価するのが現実合致する
- cの設定は、安全率を設定した「逆解析法」が考えられる。
- 逆解析で設定する安全率は、以下が考えられる。
 - 地震時=1.0とする
 - 常時=1.0とする：常時の状態で損傷していないことが根拠





●丸亀城 円弧すべり法 石垣部の定数検討【追加】

1. 概要

丸亀城天守台石垣の円弧すべり法による耐震検討結果より、石垣部分にも粘着力を見込むことが妥当ではないか、との見解に至った。
 本検討では、石垣が有していると考えられる粘着力cを、常時の安全率=1.2(case1)及び、1.1(case2)として、逆解析により求めた。

2. 検討条件

(1)石垣、栗石の定数

1)石垣

丸亀城の値として、 $\phi = 42^\circ$ を設定
 cは、常時Fs=1.2及び1.1となる値を逆解析で設定

2)栗石

丸亀城の復旧工事での試験値の平均的な値を設定。
 $\phi = 36^\circ$ $c = 8\text{kN/m}^2$

3. 検討結果

case1: 常時Fs=1.2に対し、地震時は1.0程度の安全率となる。

case2: 常時Fs=1.1に対し、地震時は0.9程度の安全率となる。

表 石垣定数逆解析の検討結果

番号	内容	定数	逆解析 石垣のc(kN/m ²)	安全率Fs	
				常時	地震時
追加case1	栗石、石垣定数修正、常時Fs=1.2で石垣cを逆解析	石垣: $\phi = 42^\circ$ 、c=逆解析 栗石: $\phi = 36^\circ$ 、c=8kN/m ²	104.4	1.200	0.996
追加case2	栗石、石垣定数修正、常時Fs=1.1で石垣cを逆解析	石垣: $\phi = 42^\circ$ 、c=逆解析 栗石: $\phi = 36^\circ$ 、c=8kN/m ²	87.2	1.100	0.906

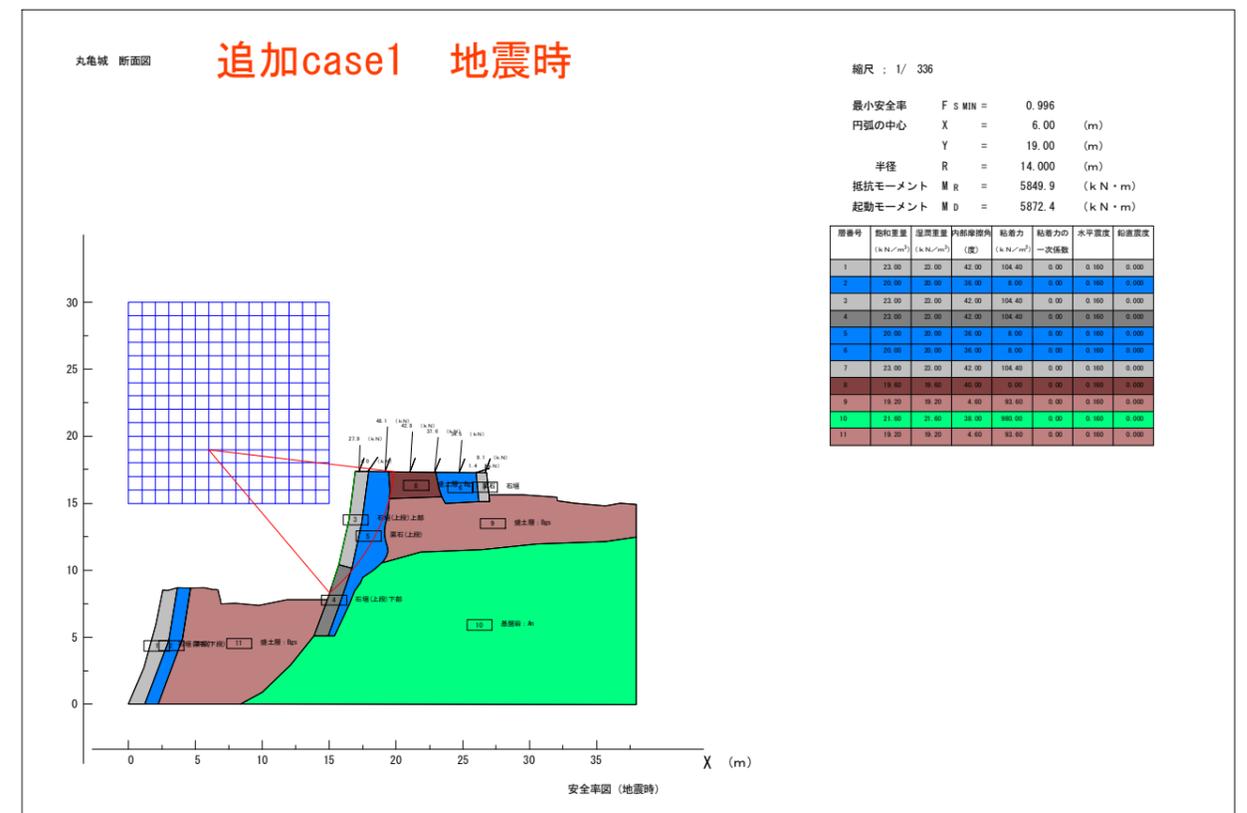
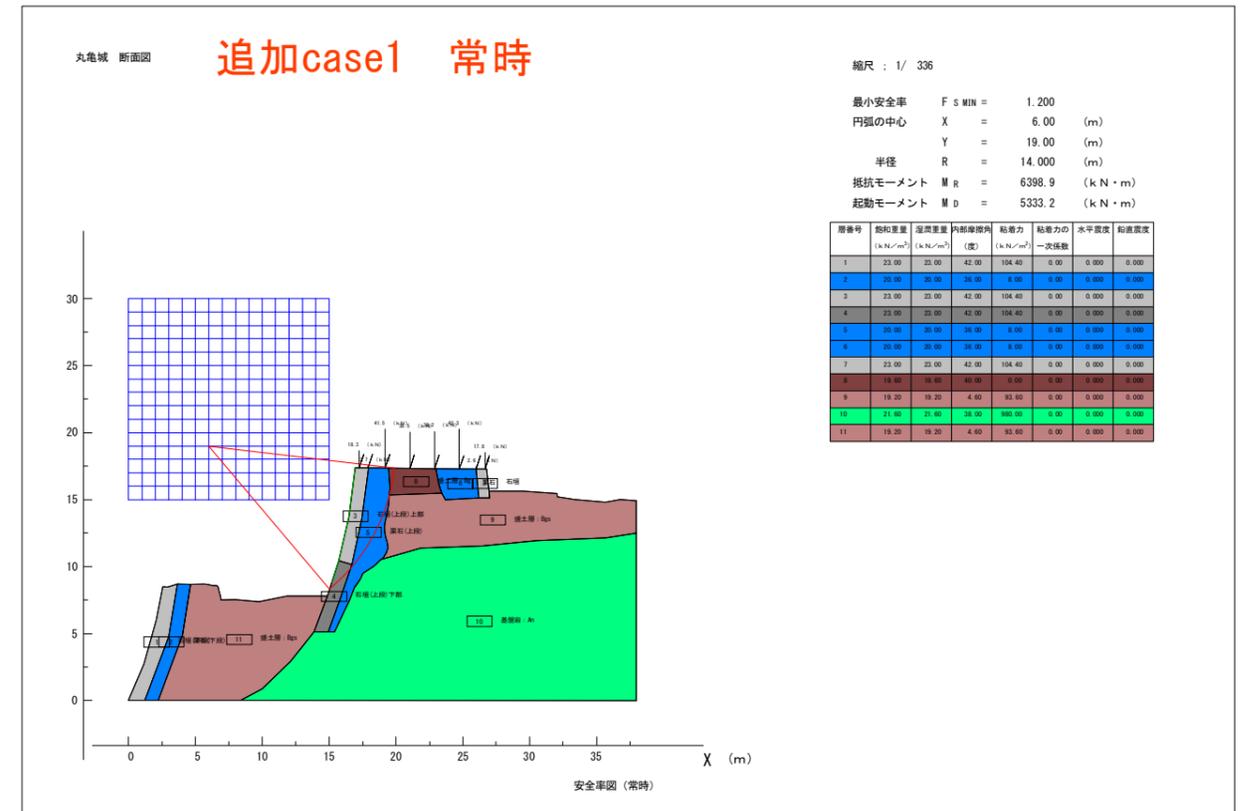
赤字: 逆解析の目標値

4. 石垣を対象とした円弧すべり法の適用について

- 石垣は形状が大きい築石が積みあがった構造で、円弧すべり法でのモデル化が課題となる。
- 常時で石垣部分をc=0とした場合、安全率は1.0を下回り、現実と異なる。
 ⇒cを評価するのが現実に合致する
- cの設定は、安全率を設定した「逆解析法」が考えられる。
- 逆解析で設定する安全率を以下のように考えた。
 追加case1『常時=1.2とした場合』
 - 常時の状態で損傷していない、はらみ出しも認められない。
 - 安全率=1.0は滑り出す直前の状態で、何らかの変状が生じると考えられるが、現地にはその兆候は確認されていない。

追加case2『常時=1.1とした場合』

- case3、追加case1の中間の安全率を目標とした逆解析ケース。



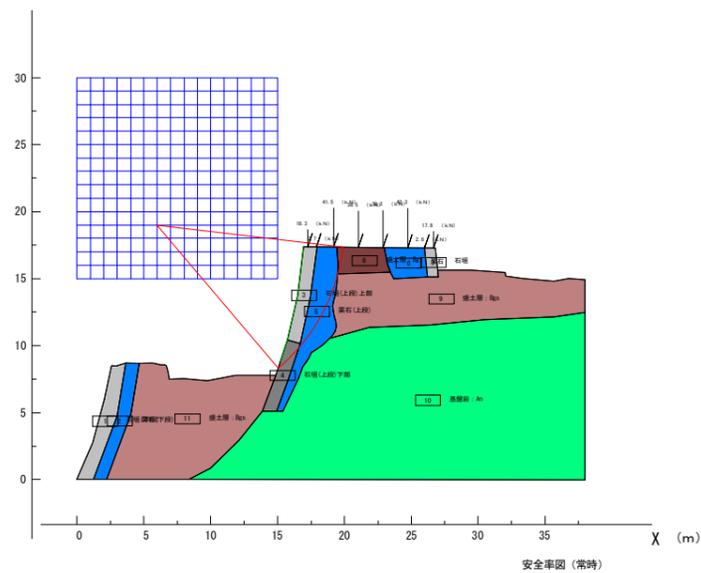
丸亀城 断面図

追加case2 常時

縮尺 : 1/ 336

最小安全率 $F S_{MIN} = 1.100$
 円弧の中心 $X = 6.00$ (m)
 $Y = 19.00$ (m)
 半径 $R = 14.000$ (m)
 抵抗モーメント $M_R = 5868.7$ (kN・m)
 起動モーメント $M_D = 5333.2$ (kN・m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	自重重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平変位	鉛直変位
1	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.000	0.000
2	20.00	20.00	36.00	9.00	0.00	0.000	0.000
3	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.000	0.000
4	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.000	0.000
5	20.00	20.00	36.00	9.00	0.00	0.000	0.000
6	20.00	20.00	36.00	9.00	0.00	0.000	0.000
7	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.000	0.000
8	19.20	19.20	4.40	30.00	0.00	0.000	0.000
9	19.20	19.20	4.40	30.00	0.00	0.000	0.000
10	21.60	21.60	38.00	880.00	0.00	0.000	0.000
11	19.20	19.20	4.40	30.00	0.00	0.000	0.000



丸亀城 断面図

追加case2 地震時

縮尺 : 1/ 336

最小安全率 $F S_{MIN} = 0.906$
 円弧の中心 $X = 6.00$ (m)
 $Y = 19.00$ (m)
 半径 $R = 14.000$ (m)
 抵抗モーメント $M_R = 5319.7$ (kN・m)
 起動モーメント $M_D = 5872.4$ (kN・m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	自重重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平変位	鉛直変位
1	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.180	0.000
2	20.00	20.00	36.00	9.00	0.00	0.180	0.000
3	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.180	0.000
4	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.180	0.000
5	20.00	20.00	36.00	9.00	0.00	0.180	0.000
6	20.00	20.00	36.00	9.00	0.00	0.180	0.000
7	23.00	23.00	42.00	87.20	0.00	0.180	0.000
8	19.20	19.20	4.40	30.00	0.00	0.180	0.000
9	19.20	19.20	4.40	30.00	0.00	0.180	0.000
10	21.60	21.60	38.00	880.00	0.00	0.180	0.000
11	19.20	19.20	4.40	30.00	0.00	0.180	0.000

