

## 石垣安定性の簡易検討 (累積示力線法による検討)について

[ 目 次 ]

(1) 石垣安定性検討フロー	1
(2) 検討条件	2
(3) 検討結果	3
(4) 考 察	3
【各検討断面 検討結果データ】	4

令和6年度第3回  
広島城天守の復元等に関する検討会議  
令和6年11月7日

石垣安定性の簡易検討（累積示力線法による検討）

(1) 石垣安定性検討フロー

石垣安定性検討フローを図-1 に示す。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から、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。今回検討会議においては石垣安定性の簡易検討（累積示力線法による検討）の結果を報告する。

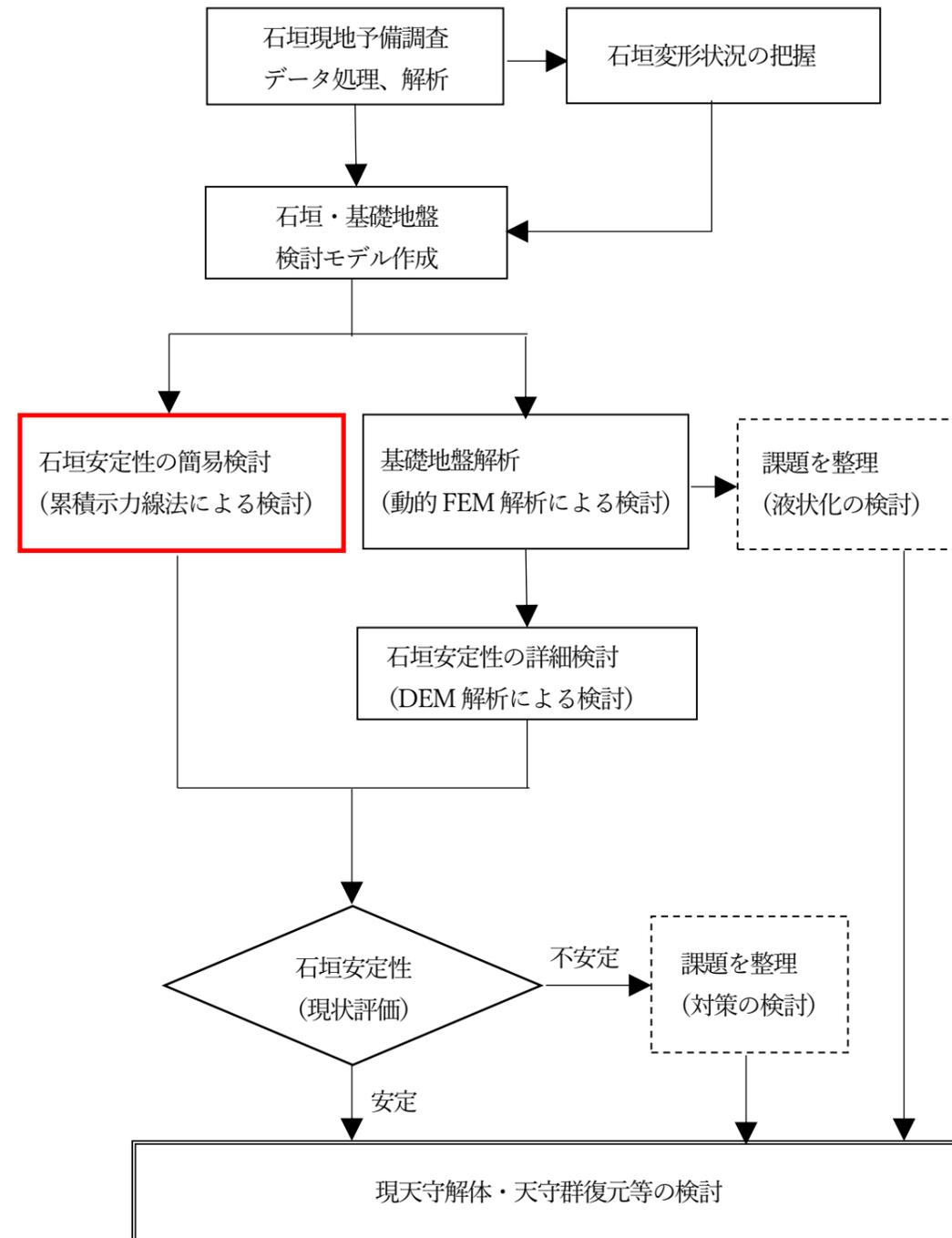


図-1 石垣安定性検討フロー

(2) 検討条件

・ 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  $k_h = C_z \cdot k_{h0}$

地域別補正係数  $C_z=0.85$  (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:  $C_z=0.85$ )

以上より  $C_z=1.0$  と考え、

設計水平震度

レベル 1 地震動 (中規模地震) :  $k_{h0} = 0.15$   $k_h = 1.0 \times 0.15 = 0.15$

レベル 2 地震動 (大規模地震) :  $k_{h0} = 0.20$   $k_h = 1.0 \times 0.20 = 0.20$

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/m <sup>3</sup>	20
裏込 (ぐり石) の内部摩擦角	度	40
裏込 (ぐり石) の粘着力	kN/m <sup>2</sup>	0
築石の単位体積重量 (花崗岩)	kN/m <sup>3</sup>	26.5
築石の底面摩擦角	deg	30
築石の壁面摩擦角 (地震時: $\phi/2$ )	deg	20

(3) 検討結果

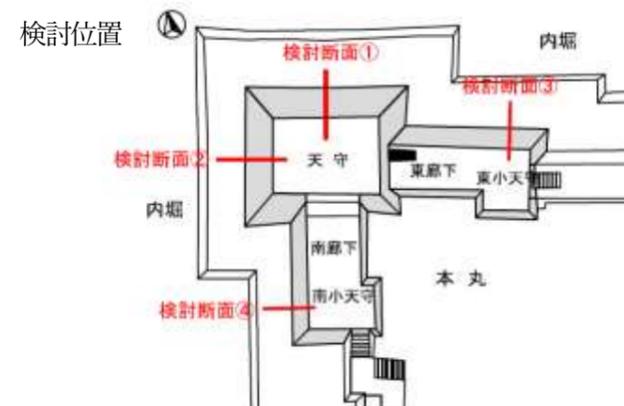
累積示力線法による天守台、小天守台石垣の地震時安定性検討結果を表-5に示す。検討の結果、裏込の内部摩擦角を《40度》とした場合、検討断面①②において安全率《1》を若干、下回るケースが発生した。これを踏まえ検討断面①②において裏込の内部摩擦角を《42度》とした場合の追加検討を行った。結果、いずれの断面においても安全率《1》以上となる検討結果となった。

CASE 1 裏込の内部摩擦角：40度 築石の壁面摩擦角：20度 (当初設定条件)

CASE 2 裏込の内部摩擦角：42度 築石の壁面摩擦角：21度 (追加検討条件)

表-5 累積示力線法検討結果一覧表

検討 CASE	検討断面① 天守台北面石垣	検討断面② 天守台西面石垣	検討断面③ 東小天守北面	検討断面④ 南小天守西面
CASE 1 裏込の内部摩擦角：40度				
最小転倒安全率				
常時	3.908	4.715	4.653	4.205
レベル1(中規模地震)	1.237	1.379	1.496	1.384
レベル2(大規模地震)	0.956	1.048	1.176	1.086
最小すべり安全率				
常時	3.452	3.958	4.383	3.986
レベル1(中規模地震)	1.207	1.278	1.613	1.487
レベル2(大規模地震)	0.933	0.970	1.278	1.175
CASE 2 裏込の内部摩擦角：42度				
最小転倒安全率				
常時	4.969	6.112	—	—
レベル1(中規模地震)	1.406	1.571	—	—
レベル2(大規模地震)	1.075	1.189	—	—
最小すべり安全率				
常時	4.399	5.115	—	—
レベル1(中規模地震)	1.396	1.484	—	—
レベル2(大規模地震)	1.069	1.123	—	—



(4) 考察

累積示力線法による石垣の地震時安定性検討の考察を以下に示す。

- ・石垣は今回設定した条件において中規模地震動～大規模地震動に対して安定していると考えられる。
- ・天守台と小天守台の比較を表-6に示す。

表-6 天守台・小天守台の比較

比較項目	天守台 (北面、西面)	小天守台 (東小天守北面、南小天守西面)
石垣高さ	11.2m	7.7m
石垣勾配	57度 (天端付近の反りは未考慮)	62度 (天端付近の反りは未考慮)
築石控長(平均)	799mm (弾性波探査)	956mm (弾性波探査)

天守台石垣と小天守台石垣を比較すると、天守台石垣の高さは高いが勾配は緩く、小天守台石垣の高さは低い勾配は急となる。築石控長に関しては、天守台石垣では横使いの築石が散見されることより小天守台石垣の方が大きい状況となっている。

石垣の安定性は高さが低く、勾配が緩く、築石の控長が大きい方が有利となる。天守台、小天守台石垣共に長短があるが、石垣の線形、築石の控長共に全体的にバランスの取れた状況と考えられる。

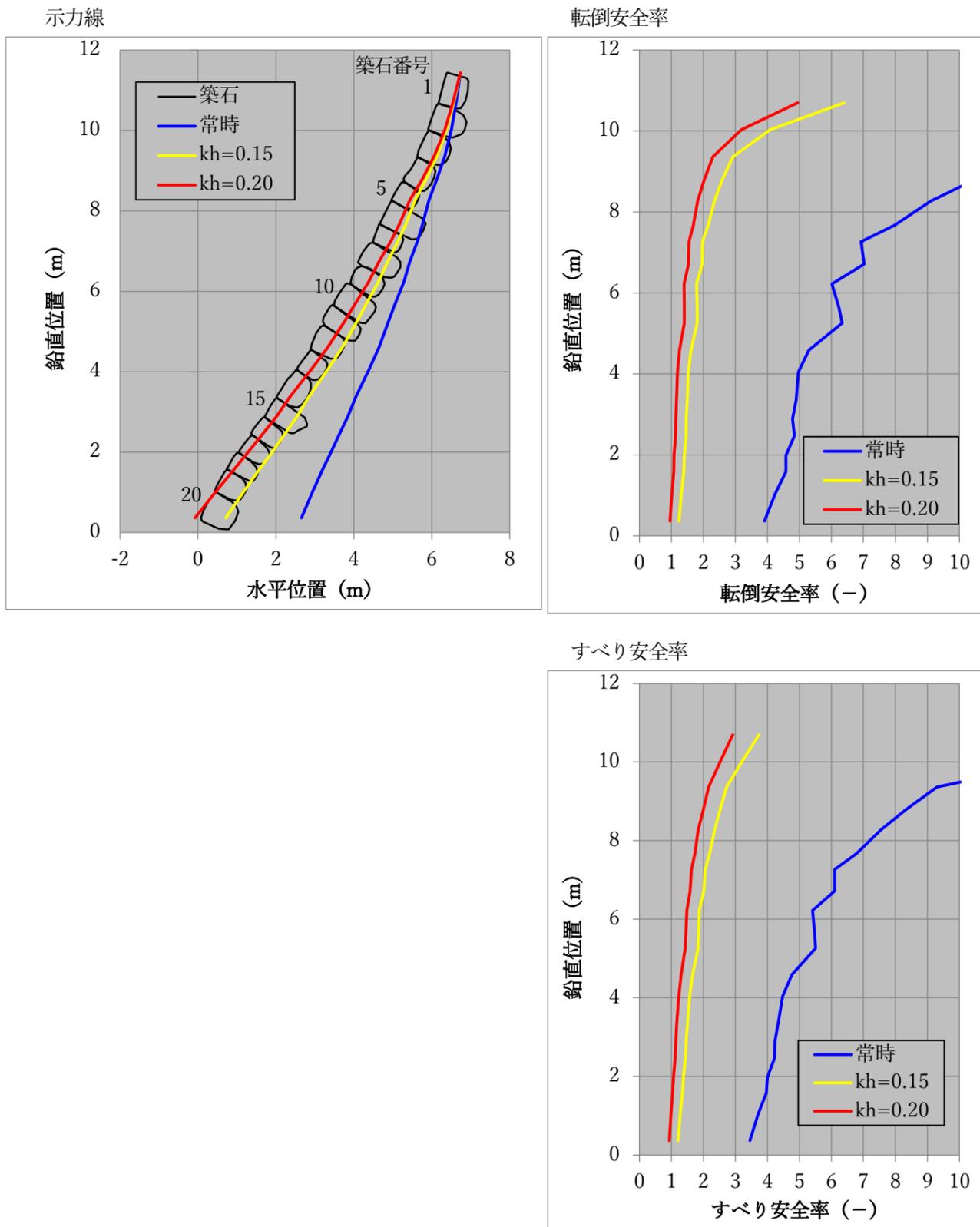
- ・今回の検討における材料定数は経験値から設定しており、検討精度を上げるためには石垣を構成する部材の調査・試験を将来、行う必要がある。表-7に具体的項目と試験方法を示す。

表-7 石垣部材の調査・試験項目

部材	調査項目	試験方法等
築石	単位体積重量	密度試験
裏込	単位体積重量	現場密度試験
	内部摩擦角	粒度試験、大型三軸圧縮試験

※上表の調査・検討項目は今回の技術検討では行わず、次のステップで必要な項目を示す。

【検討結果 検討断面① 天守台北面 CASE1 裏込の内部摩擦角：40度】



累積示力線法解析結果一覧表

築石番号	石垣天端からの高さ(m)	転倒安全率			すべり安全率		
		常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20	常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20
1	0.7346	50.7681	6.4039	4.9484	22.0888	3.7401	2.9189
2	1.4002	21.6648	4.0833	3.1831	13.2317	3.2181	2.5376
3	2.0697	12.4246	2.9214	2.2962	9.3037	2.7240	2.1670
4	2.6595	10.4051	2.5749	2.0168	8.3056	2.5195	1.9952
5	3.1593	9.1050	2.3457	1.8160	7.5392	2.3480	1.8368
6	3.7635	7.9634	2.1529	1.6846	6.7833	2.1950	1.7345
7	4.1647	6.9255	1.9714	1.5464	6.0957	2.0555	1.6281
8	4.7179	7.0268	1.9652	1.5338	6.0966	2.0134	1.5851
9	5.2097	6.0148	1.7814	1.3958	5.4068	1.8705	1.4784
10	5.7751	6.2253	1.8020	1.4034	5.4743	1.8476	1.4498
11	6.1746	6.3331	1.8084	1.4053	5.5052	1.8304	1.4325
12	6.8447	5.2943	1.6081	1.2531	4.7601	1.6614	1.3032
13	7.3903	4.9666	1.5280	1.1892	4.4730	1.5696	1.2288
14	8.0643	4.9020	1.4945	1.1586	4.3428	1.5013	1.1693
15	8.5451	4.7822	1.4639	1.1339	4.2305	1.4637	1.1385
16	8.9616	4.8426	1.4623	1.1305	4.2237	1.4381	1.1157
17	9.4499	4.5779	1.3999	1.0820	4.0051	1.3731	1.0644
18	9.8496	4.5745	1.3867	1.0707	3.9649	1.3437	1.0400
19	10.3969	4.2376	1.3118	1.0130	3.7055	1.2745	0.9860
20	11.0659	3.9082	1.2371	0.9556	3.4523	1.2068	0.9333

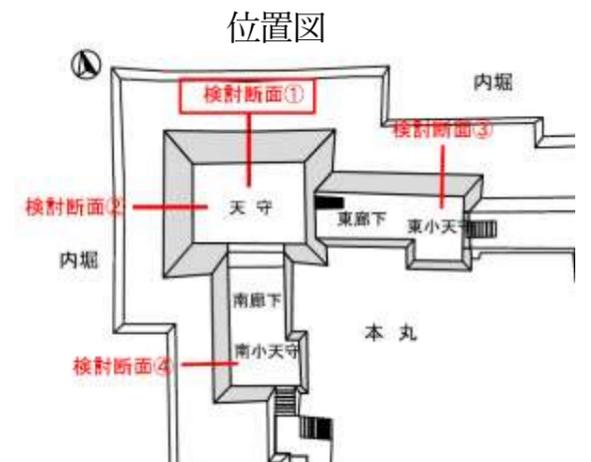
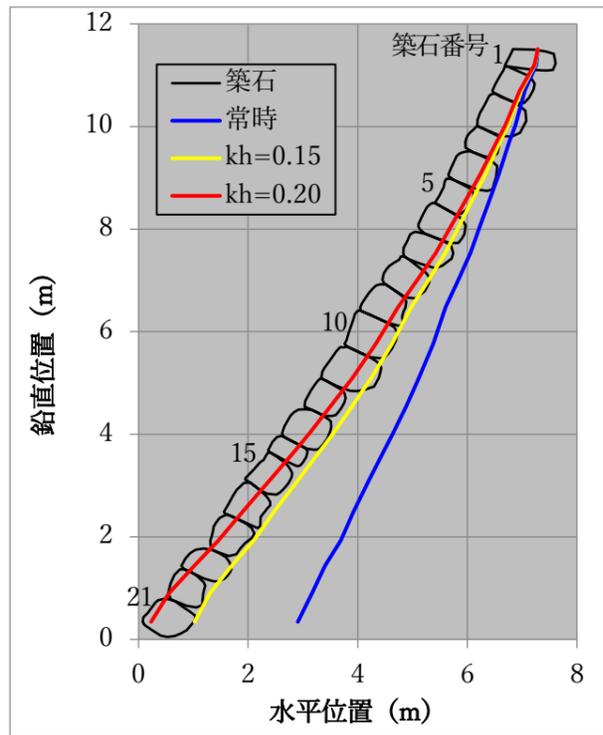


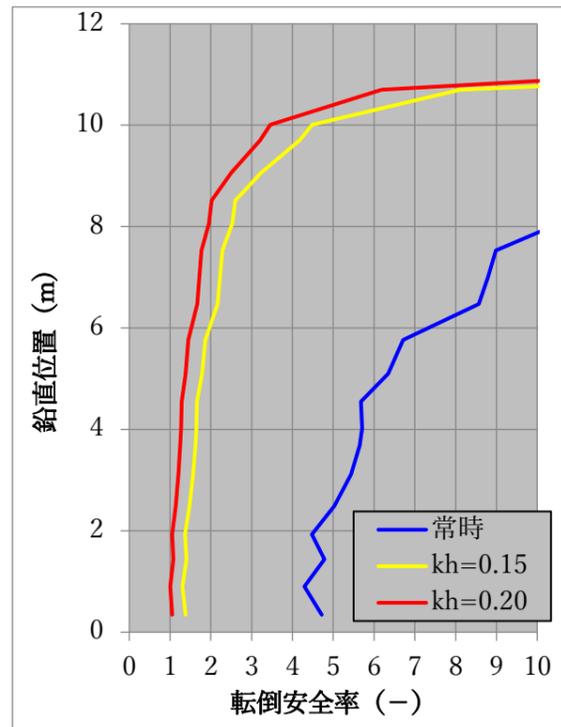
図-2 検討結果 検討断面① (天守台北面 CASE1)

【検討結果 検討断面② 天守台西面 CASE1 裏込の内部摩擦角：40度】

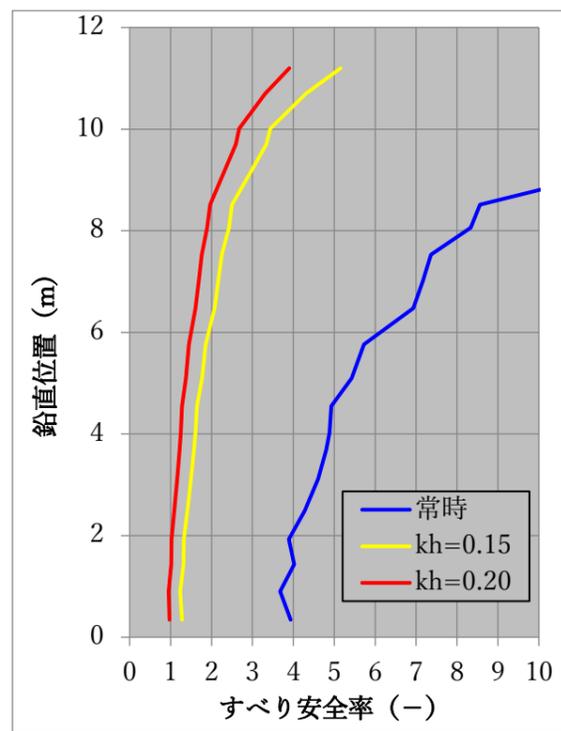
示力線



転倒安全率



すべり安全率



累積示力線法解析結果一覧表

築石番号	石垣天端からの高さ(m)	転倒安全率			すべり安全率		
		常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20	常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20
1	0.3094	676.0667	22.8471	17.2411	104.9326	5.1550	3.9025
2	0.8106	86.9415	8.1137	6.1852	33.4551	4.3102	3.3095
3	1.4989	27.3008	4.4824	3.4575	16.0277	3.4369	2.6770
4	1.8076	25.0866	4.1726	3.2079	15.5047	3.3447	2.5947
5	2.4438	15.9527	3.2394	2.5036	11.3316	2.8947	2.2587
6	2.9928	10.8694	2.5956	2.0185	8.5642	2.5031	1.9657
7	3.4503	10.5345	2.5212	1.9533	8.3318	2.4273	1.8974
8	3.9774	8.9894	2.2851	1.7728	7.3627	2.2489	1.7597
9	4.4993	8.7950	2.2233	1.7197	7.1663	2.1631	1.6862
10	5.0353	8.5665	2.1629	1.6679	6.9315	2.0763	1.6120
11	5.7459	6.7110	1.8638	1.4444	5.7266	1.8553	1.4475
12	6.4096	6.3473	1.7866	1.3828	5.4232	1.7686	1.3771
13	6.9603	5.6816	1.6558	1.2822	4.9287	1.6483	1.2833
14	7.4864	5.7114	1.6448	1.2709	4.8872	1.6098	1.2497
15	7.8204	5.6489	1.6206	1.2513	4.8037	1.5711	1.2182
16	8.3923	5.4397	1.5640	1.2067	4.6049	1.5002	1.1615
17	9.0230	5.0266	1.4746	1.1375	4.2780	1.4111	1.0914
18	9.5809	4.4736	1.3644	1.0535	3.8871	1.3229	1.0238
19	10.0725	4.7815	1.4041	1.0813	4.0232	1.3167	1.0153
20	10.6081	4.2928	1.3039	1.0048	3.6777	1.2361	0.9533
21	10.8556	4.7149	1.3788	1.0476	3.9358	1.2778	0.9697

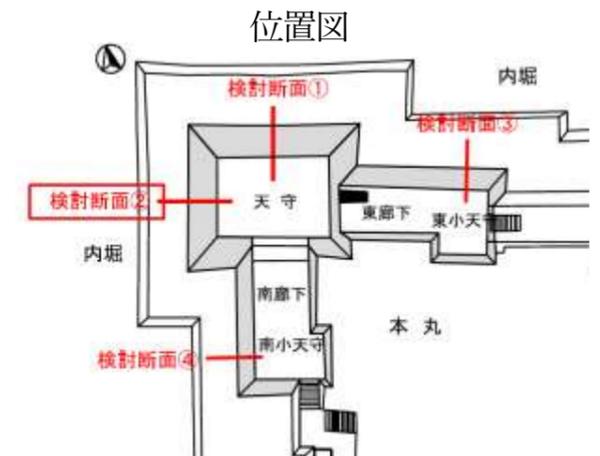
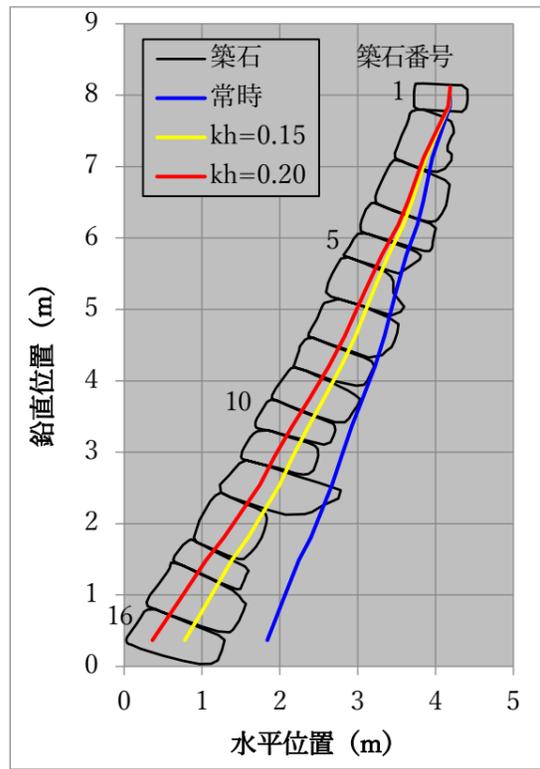


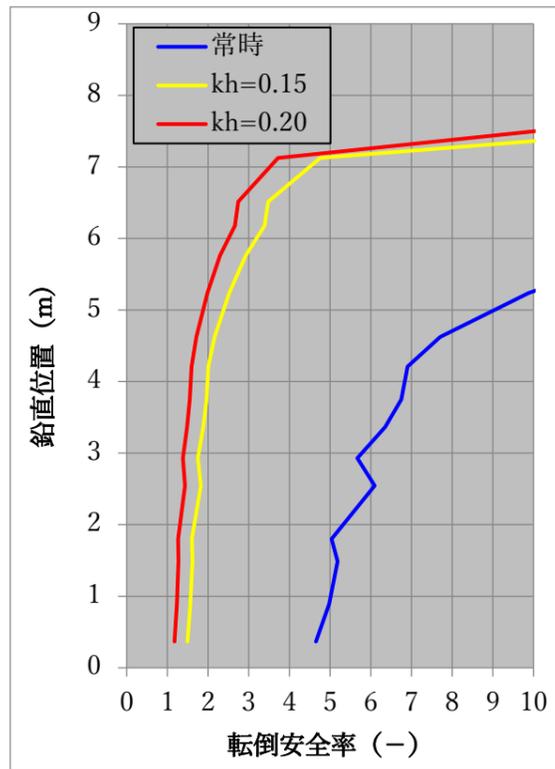
図-3 検討結果 検討断面② (天守台西面 CASE1)

【検討結果 検討断面③東小天守北面 CASE1 裏込の内部摩擦角：40度】

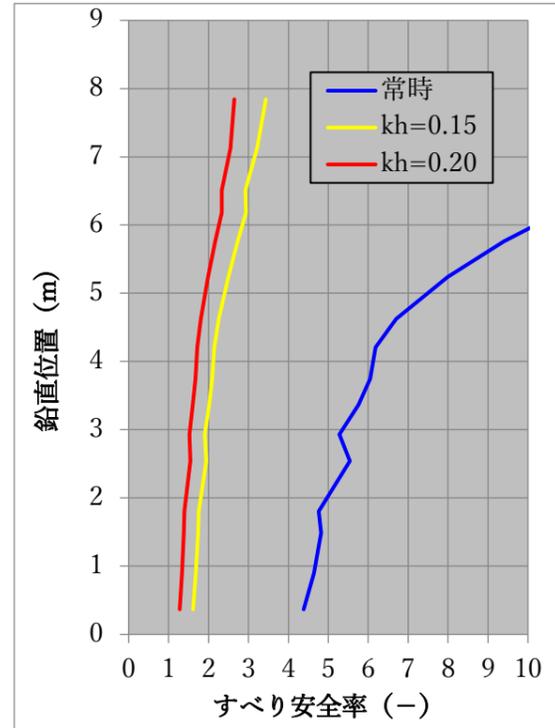
示力線



転倒安全率



すべり安全率



累積示力線法解析結果一覧表

築石番号	石垣天端からの高さ(m)	転倒安全率			すべり安全率		
		常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20	常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20
1	0.2687	348.2675	20.6989	15.8373	40.8817	3.4358	2.6456
2	0.9855	25.4736	4.7572	3.7237	13.2163	3.2159	2.5468
3	1.5989	15.9121	3.4777	2.7432	10.5488	2.9214	2.3349
4	1.9302	15.7473	3.3908	2.6590	10.7910	2.9404	2.3339
5	2.3505	12.5501	2.9258	2.2959	9.4019	2.7295	2.1673
6	2.8740	9.8831	2.5234	1.9871	7.9874	2.4971	1.9897
7	3.4863	7.7101	2.1612	1.7115	6.6975	2.2590	1.8102
8	3.9029	6.9085	2.0105	1.5938	6.1806	2.1461	1.7211
9	4.3620	6.7495	1.9663	1.5538	6.0488	2.0939	1.6728
10	4.7461	6.3521	1.8819	1.4859	5.7602	2.0158	1.6084
11	5.1792	5.6720	1.7464	1.3818	5.2798	1.9041	1.5222
12	5.5679	6.0950	1.8204	1.4333	5.5404	1.9440	1.5456
13	6.3085	5.0365	1.6013	1.2645	4.7628	1.7532	1.3974
14	6.6223	5.1835	1.6198	1.2746	4.8210	1.7426	1.3832
15	7.2160	4.9805	1.5691	1.2331	4.6413	1.6835	1.3339
16	7.7442	4.6526	1.4955	1.1759	4.3828	1.6130	1.2783

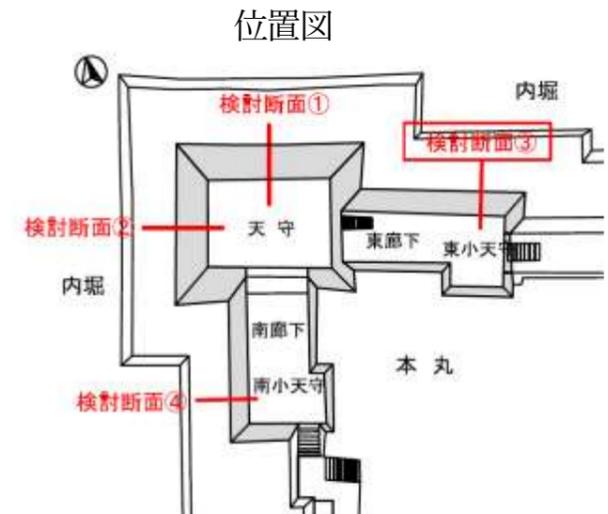
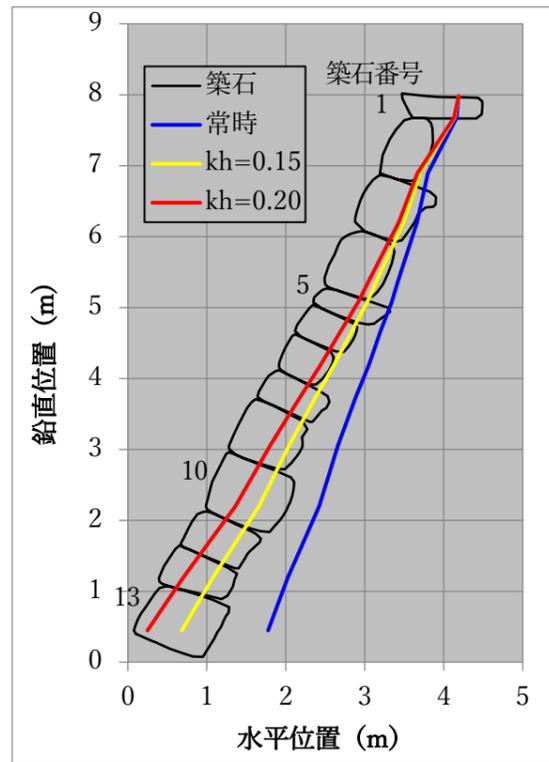


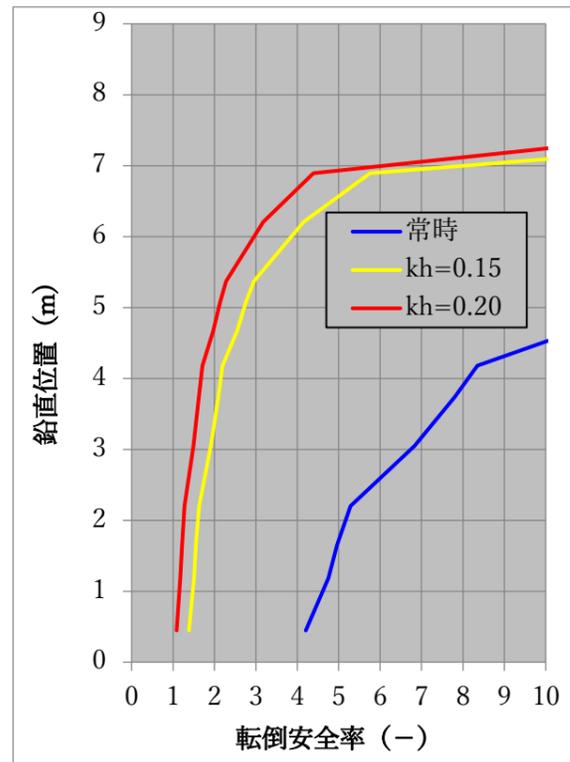
図-4 検討結果 検討断面③ (東小天守台 CASE1)

【解析結果 検討断面④南小天守西面 CASE1 裏込の内部摩擦角：40度】

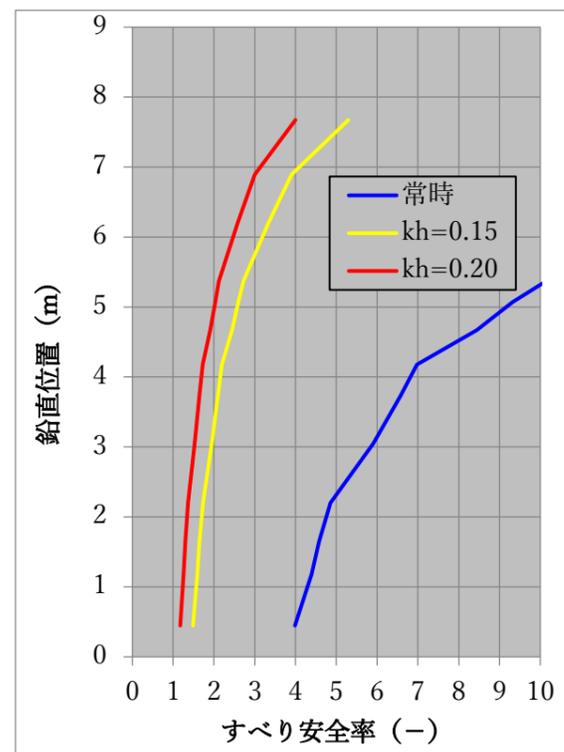
示力線



転倒安全率



すべり安全率



累積示力線法解析結果一覧表

築石番号	石垣天端からの高さ(m)	転倒安全率			すべり安全率		
		常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20	常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20
1	0.3097	828.0457	22.4758	16.9366	133.7304	5.2943	3.9977
2	1.0904	50.1833	5.7586	4.3932	25.3176	3.9070	3.0040
3	1.7785	25.4983	4.1490	3.1797	15.8335	3.3398	2.5811
4	2.6119	13.6823	2.9519	2.2823	10.1452	2.7202	2.1228
5	2.9089	12.2048	2.7608	2.1377	9.3225	2.5985	2.0308
6	3.3144	10.7229	2.5470	1.9724	8.4430	2.4441	1.9096
7	3.8039	8.3487	2.1922	1.7064	6.9793	2.1931	1.7224
8	4.2442	7.8006	2.0904	1.6245	6.5828	2.0958	1.6424
9	4.9343	6.8287	1.9152	1.4899	5.9039	1.9450	1.5251
10	5.7822	5.2878	1.6301	1.2784	4.8589	1.7309	1.3686
11	6.3310	4.9595	1.5543	1.2174	4.5796	1.6476	1.3002
12	6.7980	4.7529	1.5046	1.1772	4.3975	1.5909	1.2533
13	7.5353	4.2051	1.3839	1.0860	3.9863	1.4867	1.1746

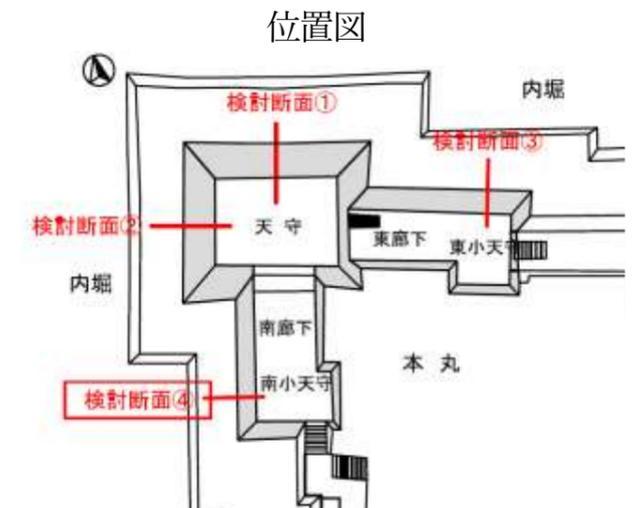
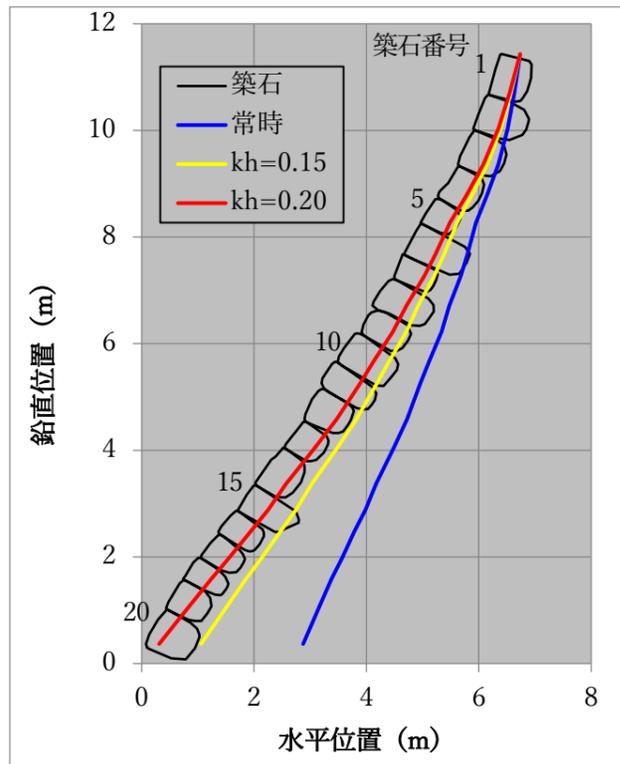


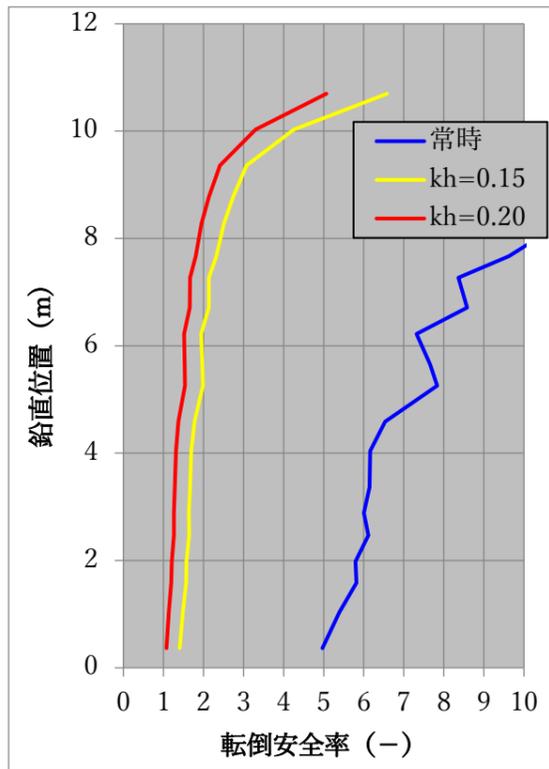
図-5 検討結果 検討断面図④ (東小天守台 CASE1)

【解析結果 検討断面① 天守台北面 CASE2 裏込の内部摩擦角：42度】

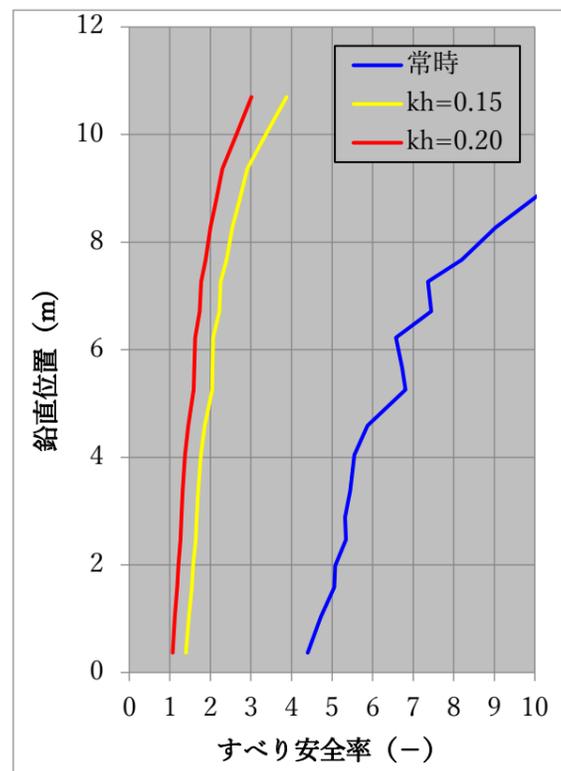
示力線



転倒安全率



すべり安全率



累積示力線法解析結果一覧表

築石番号	石垣天端からの高さ(m)	転倒安全率			すべり安全率		
		常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20	常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20
1	0.7346	63.7899	6.5827	5.0686	27.7503	3.8780	3.0124
2	1.4002	25.3641	4.2542	3.3007	15.4843	3.3888	2.6565
3	2.0697	14.6061	3.0794	2.4090	10.9319	2.9047	2.2980
4	2.6595	12.4171	2.7408	2.1366	9.9069	2.7157	2.1387
5	3.1593	10.9104	2.5070	1.9490	9.0334	2.5423	1.9983
6	3.7635	9.6253	2.3206	1.8063	8.1965	2.3980	1.8835
7	4.1647	8.3650	2.1325	1.6643	7.3612	2.2534	1.7746
8	4.7179	8.5834	2.1358	1.6592	7.4465	2.2191	1.7380
9	5.2097	7.3162	1.9429	1.5149	6.5767	2.0685	1.6261
10	5.7751	7.6559	1.9732	1.5294	6.7336	2.0527	1.6025
11	6.1746	7.8314	1.9865	1.5349	6.8096	2.0412	1.5875
12	6.8447	6.5337	1.7751	1.3758	5.8774	1.8613	1.4517
13	7.3903	6.1574	1.6952	1.3120	5.5495	1.7679	1.3760
14	8.0643	6.1423	1.6669	1.2847	5.4474	1.7013	1.3170
15	8.5451	6.0059	1.6364	1.2595	5.3195	1.6627	1.2849
16	8.9616	6.1195	1.6410	1.2579	5.3449	1.6411	1.2619
17	9.4499	5.7963	1.5768	1.2076	5.0794	1.5732	1.2079
18	9.8496	5.8206	1.5666	1.1971	5.0540	1.5448	1.1827
19	10.3969	5.3912	1.4866	1.1362	4.7238	1.4700	1.1252
20	11.0659	4.9686	1.4060	1.0752	4.3989	1.3960	1.0686

位置図

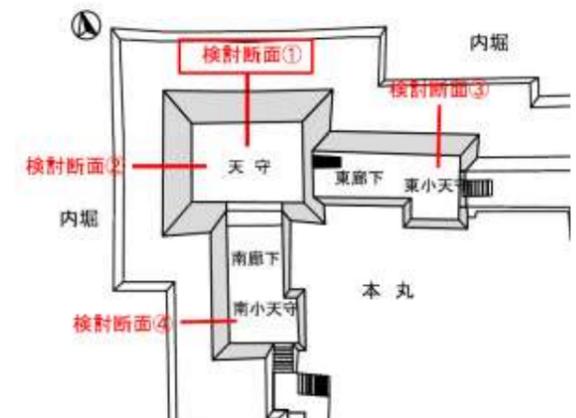
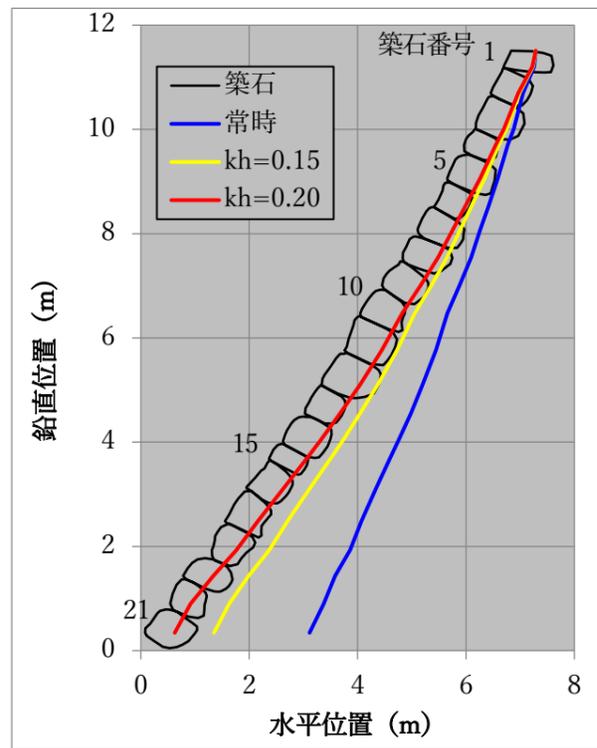


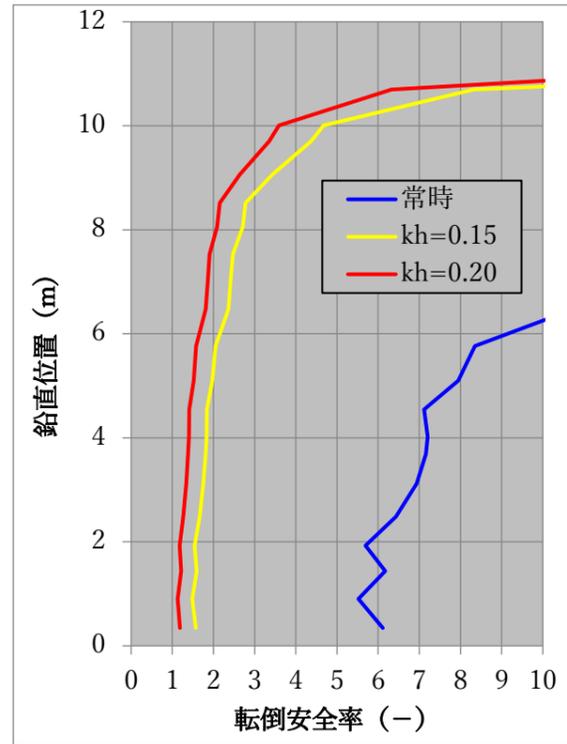
図-6 検討結果 検討断面図① (天守台北面 CASE2)

【解析結果 検討断面② 天守台西面 CASE2 裏込の内部摩擦角：42度】

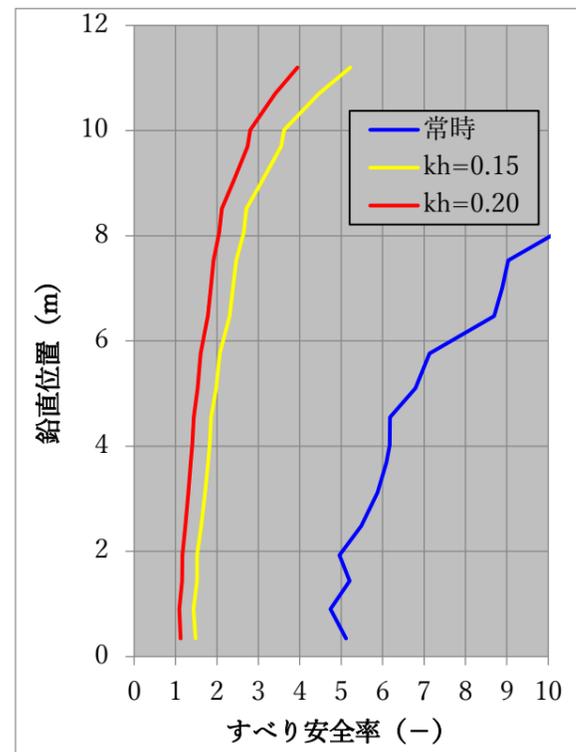
示力線



転倒安全率



すべり安全率



累積示力線法解析結果一覧表

築石番号	石垣天端からの高さ(m)	転倒安全率			すべり安全率		
		常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20	常時	中規模地震 kh=0.15	大規模地震 kh=0.20
1	0.3094	852.9859	23.0570	17.3794	132.3659	5.2207	3.9453
2	0.8106	104.7178	8.3218	6.3251	40.2781	4.4573	3.4082
3	1.4989	32.6058	4.6712	3.5902	19.1322	3.6213	2.8075
4	1.8076	30.4315	4.3724	3.3490	18.7978	3.5473	2.7386
5	2.4438	19.3764	3.4323	2.6417	13.7566	3.1077	2.4123
6	2.9928	13.1799	2.7773	2.1492	10.3804	2.7150	2.1196
7	3.4503	12.9051	2.7093	2.0899	10.2036	2.6455	2.0573
8	3.9774	11.0296	2.4691	1.9071	9.0320	2.4652	1.9191
9	4.4993	10.9055	2.4174	1.8599	8.8857	2.3881	1.8500
10	5.0353	10.7448	2.3641	1.8116	8.6957	2.3060	1.7774
11	5.7459	8.3553	2.0486	1.5790	7.1322	2.0711	1.6062
12	6.4096	7.9435	1.9723	1.5174	6.7907	1.9836	1.5345
13	6.9603	7.1182	1.8364	1.4135	6.1797	1.8575	1.4369
14	7.4864	7.2063	1.8321	1.4041	6.1724	1.8232	1.4029
15	7.8204	7.1594	1.8115	1.3851	6.0952	1.7864	1.3705
16	8.3923	6.9342	1.7559	1.3402	5.8783	1.7140	1.3116
17	9.0230	6.4315	1.6628	1.2684	5.4831	1.6197	1.2379
18	9.5809	5.6923	1.5429	1.1790	4.9553	1.5225	1.1655
19	10.0725	6.1690	1.5941	1.2118	5.2020	1.5230	1.1583
20	10.6081	5.5206	1.4845	1.1301	4.7410	1.4335	1.0916
21	10.8556	6.1124	1.5706	1.1894	5.1148	1.4837	1.1230

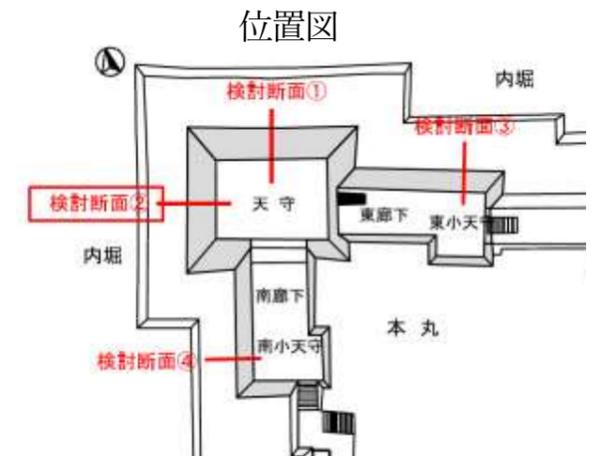


図-7 検討結果検討断面図② (天守台西面 CASE2)