

■対象石垣

重要文化財宇土櫓続櫓下石垣

■これまでの経緯

【2018平成30年度 文化財修復検討部会】

- ・(10/18) 続櫓下石垣(西面)は積み直しを含めた復旧を検討

【2019令和元年度 石垣・構造合同WG及び石垣・構造・建築合同WG】

- ・(7/12) 続櫓周辺石垣履歴・被害状況の提示
- ・(12/25) 続櫓下石垣の復旧措置は盛土ではない非解体工法を再検討する
- ・(3/26) 続櫓下石垣の方針を合同WGで検討し直す

【2020令和2年度 石垣・構造・建築合同WG】

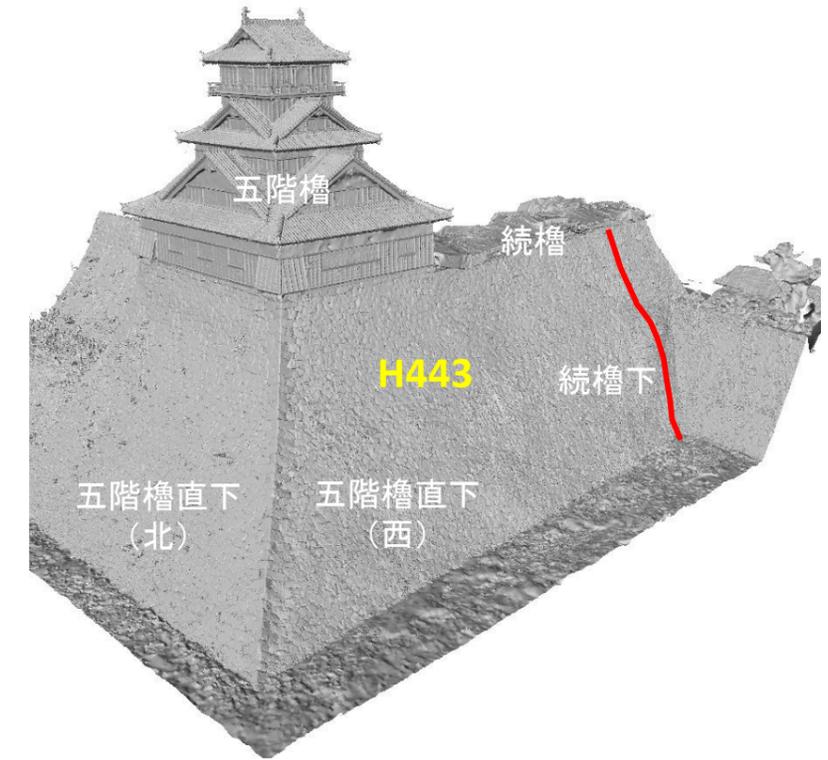
- ・(7/3) 続櫓周辺石垣:解体修理が必要(H443上部・H446・H456・H458・H461)
- ・(10/9) 続櫓下石垣:外部補強(鉄骨等の構造物)+上部解体修理で承認
- ・(12/15) 続櫓周辺レーダ探査・発掘調査箇所を承認
- ・(2/22) 続櫓下石垣:大規模解体修理案の再提示⇒継続審議

【2021令和3年度 文化財修復検討委員会】

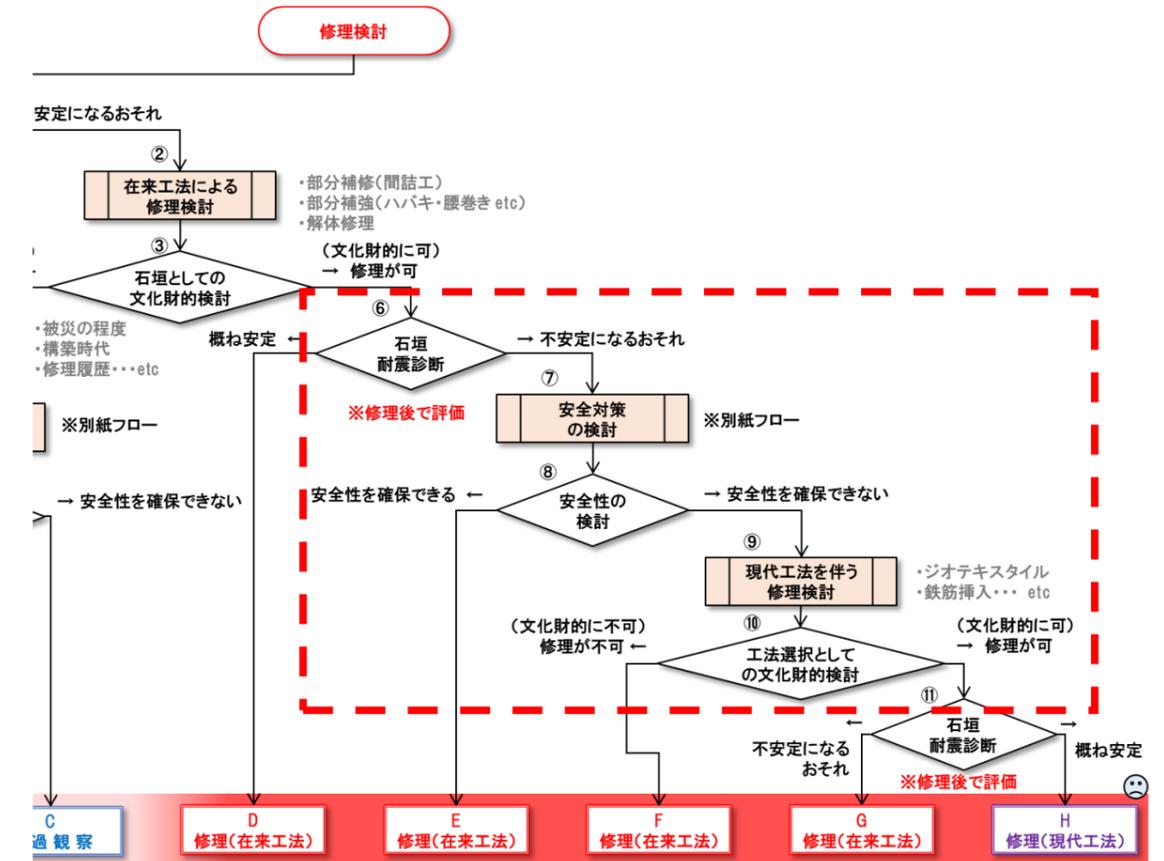
- ・(5/31) 外部補強(石垣前面押え補強)+西面解体修理案で検討を進めることで承認
- ・(10/18) 平左衛門丸発掘調査成果の報告

■今回の委員会での報告・審議事項

1. 熊本城石垣耐震診断指針(案)に基づく基礎診断結果(H443)【報告】
2. 石垣復旧措置(案)(H443)【審議】
3. 宇土櫓下空堀確認調査(案)【審議】



宇土櫓続櫓下石垣



石垣の修理検討フロー

累積示力線法の設計条件

項目		単位	値	備考
設計水平震度	背面地山	中規模地震	Kh	0.15
		大規模地震	Kh	0.20
	背面盛土 (総栗石含む)	中規模地震	Kh	0.20
		大規模地震	Kh	0.25
安全率	滑動	常時		$F_s > 1.5$
		地震時		$F_s > 1.2$
	転倒	常時		$d > B/2$
		地震時		$d \geq B/3$
物性値	築石	密度	γ N/m ³	26,500
		底面摩擦角	ψ 度	35.0
	裏込め (栗石)	密度	γ_1 N/m ³	20,000
		内部摩擦角	ϕ_1 度	35.0
		背面摩擦角 (常時)	δ 度	23.3
	裏込め (山砂)	背面摩擦角 (地震時)	δ 度	17.5
		密度	γ_2 N/m ³	19,000
		内部摩擦角	ϕ_2 度	30.0
		背面摩擦角 (常時)	δ 度	20.0
		背面摩擦角 (地震時)	δ 度	15.0
上載荷重	建物	kN/m		11.06
	群集荷重	kN/m		3.50

※熊本城天守閣復旧整備事業に伴う設計業務委託(その2)大型三軸圧縮試験 平成29年 株式会社大林組

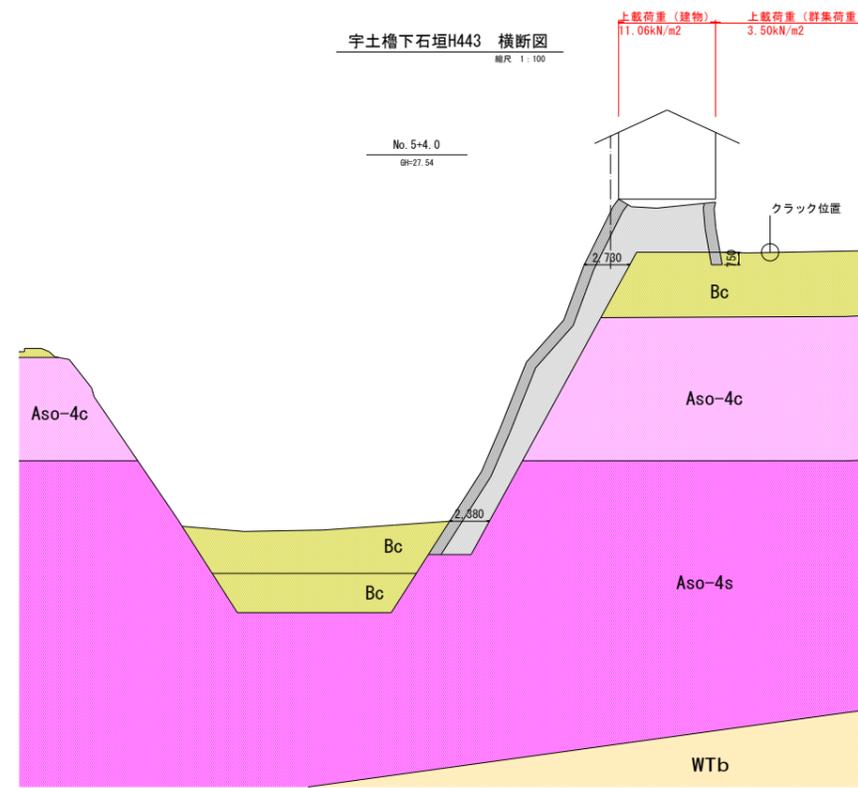
円弧すべりの設計条件

項目		単位	値	備考
設計水平震度	背面地山	中規模地震	Kh	0.15
		大規模地震	Kh	0.20
	背面盛土 (総栗石含む)	中規模地震	Kh	0.20
		大規模地震	Kh	0.25
安全率	現状	常時		$F_s > 1.2$
		地震時		$F_s > 1.0$
	在来工法	常時		$F_s > 1.2$
		地震時		$F_s > 1.0$
現代工法	常時		$F_s > 1.2$	
	地震時		$F_s > 1.0$	
物性値	築石	密度	γ N/m ³	26,500
		内部摩擦角	ϕ 度	35.0
	裏込め栗石	密度	γ_1 N/m ³	20,000
		摩擦角	ϕ 度	35.0
	Bc 粘性土	単位体積重量	γ kN/m ³	18.0
		粘着力	c kN/m ²	43.7
		内部摩擦角	ϕ 度	0.0
	Bs 砂質土	単位体積重量	γ kN/m ³	19.0
		粘着力	c kN/m ²	0.0
	Bg 礫質土	内部摩擦角	ϕ 度	28.4
		単位体積重量	γ kN/m ³	20.0
		粘着力	c kN/m ²	0.0
	Aso-4c	内部摩擦角	ϕ 度	29.1
		単位体積重量	γ kN/m ³	14.0
		粘着力	c kN/m ²	37.5
	Aso-4s	内部摩擦角	ϕ 度	0.0
		単位体積重量	γ kN/m ³	14.9
		粘着力	c kN/m ²	14.8
	Dc 固結粘土	内部摩擦角	ϕ 度	45.8
		単位体積重量	γ kN/m ³	17.0
粘着力		c kN/m ²	100.0	
WTb1 強風化凝灰角礫岩	内部摩擦角	ϕ 度	0.0	
	単位体積重量	γ kN/m ³	16.5	
	粘着力	c kN/m ²	96.4	
WTb2 風化凝灰角礫岩	内部摩擦角	ϕ 度	20.4	
	単位体積重量	γ kN/m ³	19.0	
	粘着力	c kN/m ²	235.7	
Tb 凝灰角礫岩	内部摩擦角	ϕ 度	21.0	
	単位体積重量	γ kN/m ³	20.1	
	粘着力	c kN/m ²	356.2	
上載荷重	建物	kN/m		11.06
	群集荷重	kN/m		3.50

平面図



断面図



診断内容、結果、設計条件等

診断内容

診断手法	運用	理由	判定	総合判定
(1)築石の安定性	○	必ず実施する。	NG	C
(2)石垣根入れ部の安定性	×	根入れ部の安定性に起因する破損変状が確認されないため	-	
(3)石垣背面全体の安定性	×	背面地山地形であるため	-	

設計条件 築石の安定性

項目	区分	値
設計水平震度 (背面地山)	中規模地震	0.15
	大規模地震	0.20
安全率 (転倒)	常時	$d > B/2$
	地震時	$d > B/3$
安全率 (滑動)	常時	$F_s > 1.5$
	地震時	$F_s > 1.2$

設計条件 石垣背面全体の安定性

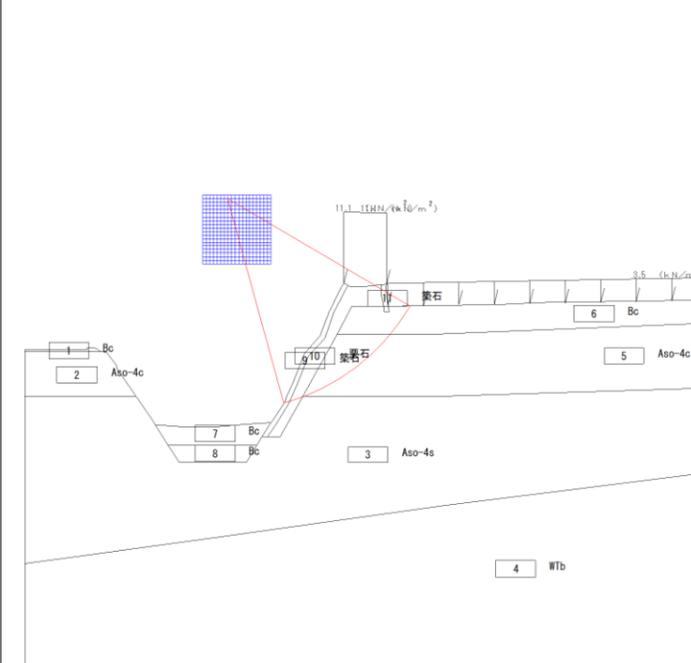
項目	区分	値
設計水平震度 (背面地山)	中規模地震	0.15
	大規模地震	0.20
安全率	常時	$F_s > 1.2$
	地震時	$F_s > 1.0$

d : 擁壁つま先と荷重合力作用位置の距離
 B : 擁壁底面幅

築石の安定性評価 (累積示力線解析)

	背面栗石の場合		背面山砂の場合	
	示力線位置	すべり安全率	示力線位置	すべり安全率
常時	安全率: $d > B/2$ 判定: NG 5.0m以下	安全率: $F_s > 1.5$ 判定: NG 7.0m以下	安全率: $d > B/2$ 判定: NG 8.3m以下	安全率: $F_s > 1.5$ 判定: NG 13.0m以下
地震時	安全率: $d > B/3$ 判定: NG 16.5m以下	安全率: $F_s > 1.2$ 判定: NG 16.3m以下	安全率: $d > B/3$ 判定: NG 18.0m以下	安全率: $F_s > 1.2$ 判定: NG 17.0m以下
判定	NG			

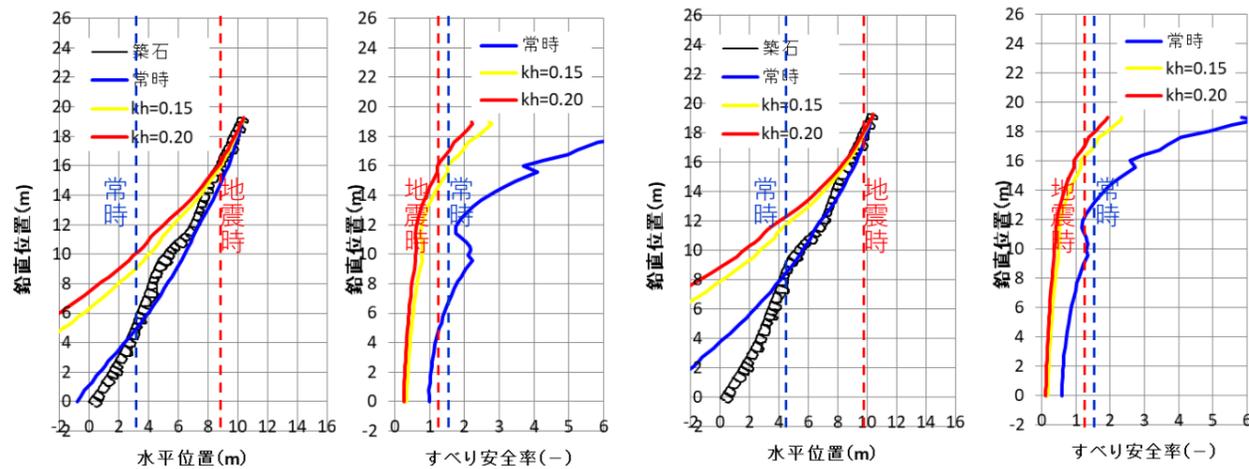
【参考】石垣背面全体の安定性評価 (円弧すべり解析)



背面構造	周辺のボーリング調査結果より地山と判断
すべり面の設定	栗石層より内側のクラックを起点とした。

区分	許容安全率 (Fs)	安全率 (Fs)	判定
常時	1.2	0.670	NG
地震時	1.0	0.561	NG

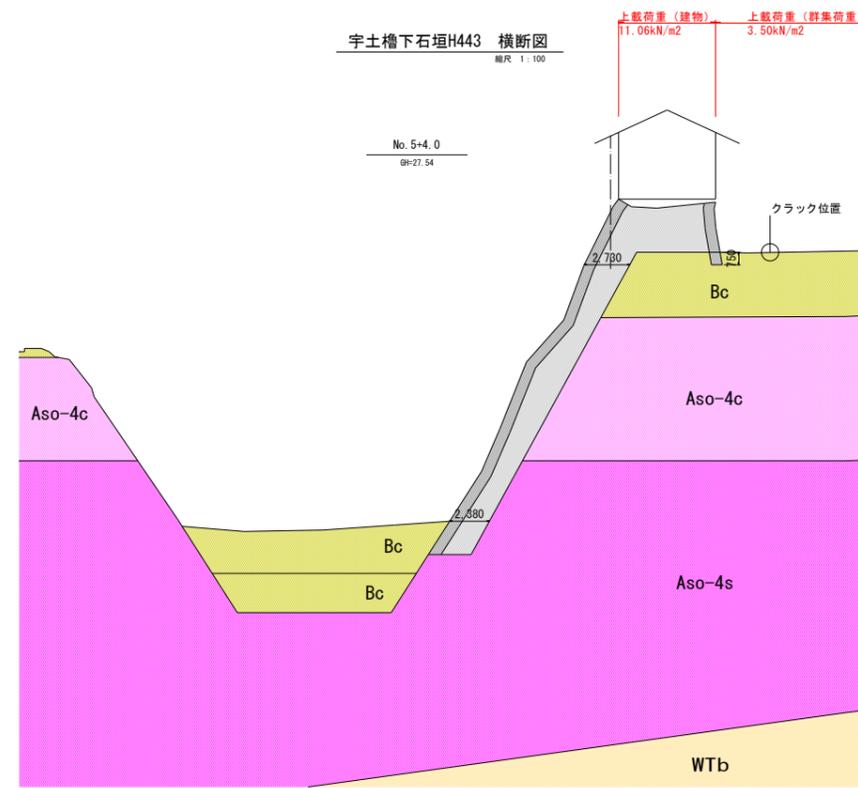
記号	地質名	記号	地質名
Bc	盛土 (粘性土)	Aso-4s	火山灰質砂質土
Bs	盛土 (砂質土)	Dc	固結粘土
Bg	盛土 (礫質土)	WTb1	強風化凝灰角礫岩
Aso-4c	火山灰質粘性土	WTb2	風化凝灰角礫岩
		Tb	凝灰角礫岩



平面図



断面図



診断内容、結果、設計条件等

診断内容

診断手法	運用	理由	判定	総合判定
(1)築石の安定性	○	必ず実施する。	NG	C
(2)石垣根入れ部の安定性	×	根入れ部の安定性に起因する破損変状が確認されないため	-	
(3)石垣背面全体の安定性	×	背面地山地形であるため	-	

設計条件 築石の安定性

項目	区分	値
設計水平震度 (背面地山)	中規模地震	0.15
	大規模地震	0.20
安全率 (転倒)	常時	$d > B/2$
	地震時	$d > B/3$
安全率 (滑動)	常時	$F_s > 1.5$
	地震時	$F_s > 1.2$

設計条件 石垣背面全体の安定性

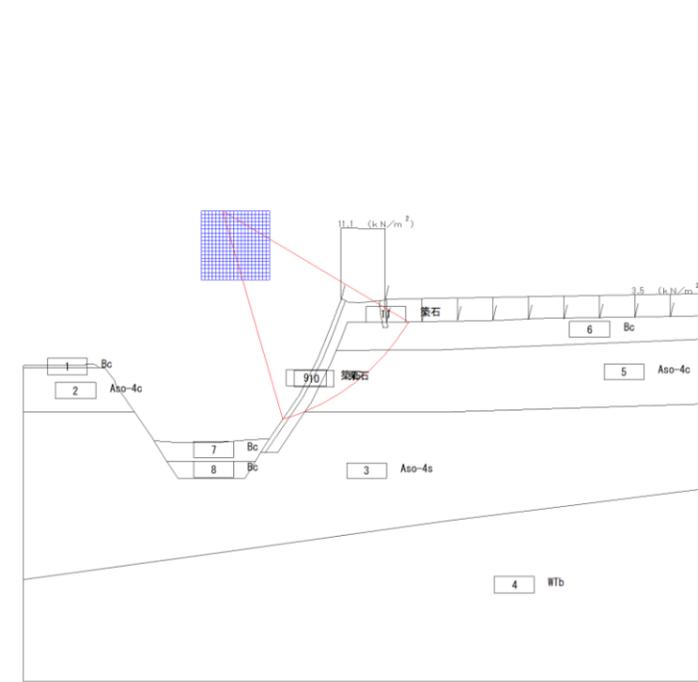
項目	区分	値
設計水平震度 (背面地山)	中規模地震	0.15
	大規模地震	0.20
安全率	常時	$F_s > 1.2$
	地震時	$F_s > 1.0$

d : 擁壁つま先と荷重合力作用位置の距離
 B : 擁壁底面幅

築石の安定性評価 (累積示力線解析)

	背面栗石の場合		背面山砂の場合	
	示力線位置	すべり安全率	示力線位置	すべり安全率
常時	安全率: $d > B/2$ 判定: NG 13.0m以下	安全率: $F_s > 1.5$ 判定: NG 12.0m以下	安全率: $d > B/2$ 判定: NG 15.0m以下	安全率: $F_s > 1.5$ 判定: NG 14.0m以下
地震時	安全率: $d > B/3$ 判定: NG 17.0m以下	安全率: $F_s > 1.2$ 判定: NG 16.3m以下	安全率: $d > B/3$ 判定: NG 18.0m以下	安全率: $F_s > 1.2$ 判定: NG 17.0m以下
判定	NG			

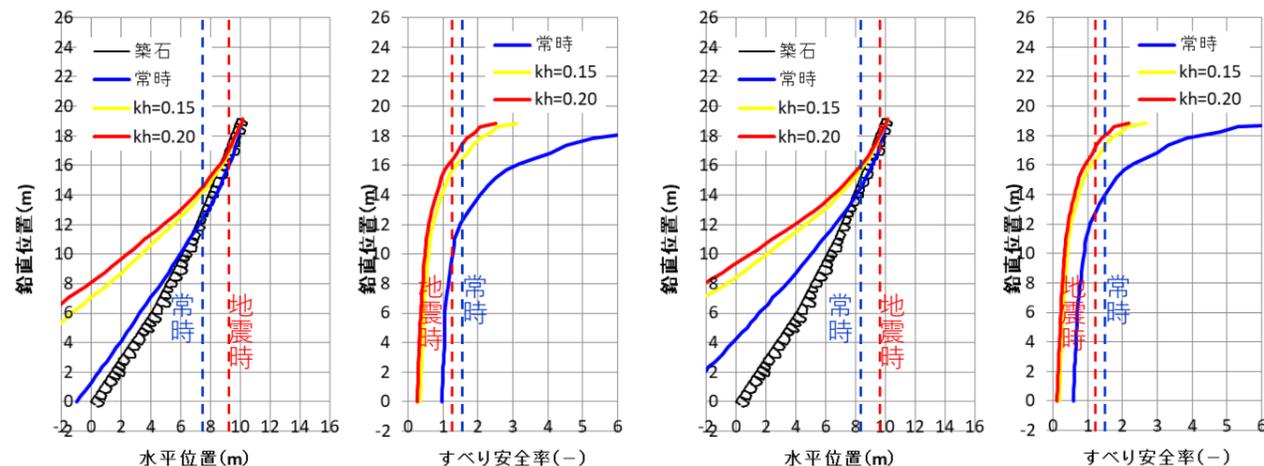
【参考】石垣背面全体の安定性評価 (円弧すべり解析)



背面構造	周辺のボーリング調査結果より地山と判断
すべり面の設定	栗石層より内側のクラックを起点とした。

区分	許容安全率 (Fs)	安全率 (Fs)	判定
常時	1.2	0.660	NG
地震時	1.0	0.558	NG

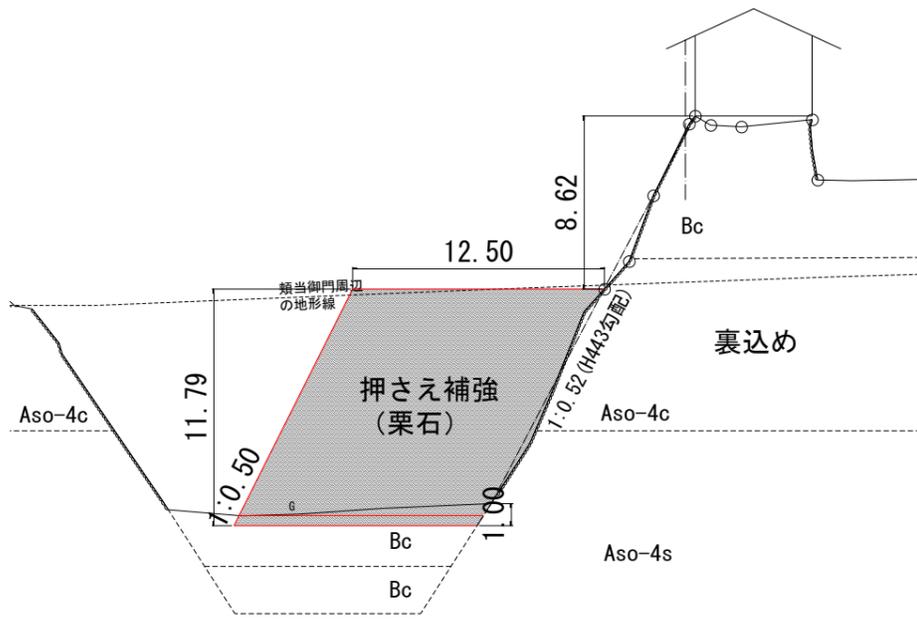
記号	地質名	記号	地質名
Bc	盛土 (粘性土)	Aso-4s	火山灰質砂質土
Bs	盛土 (砂質土)	Dc	固結粘土
Bg	盛土 (礫質土)	WTb1	強風化凝灰角礫岩
Aso-4c	火山灰質粘性土	WTb2	風化凝灰角礫岩
		Tb	凝灰角礫岩



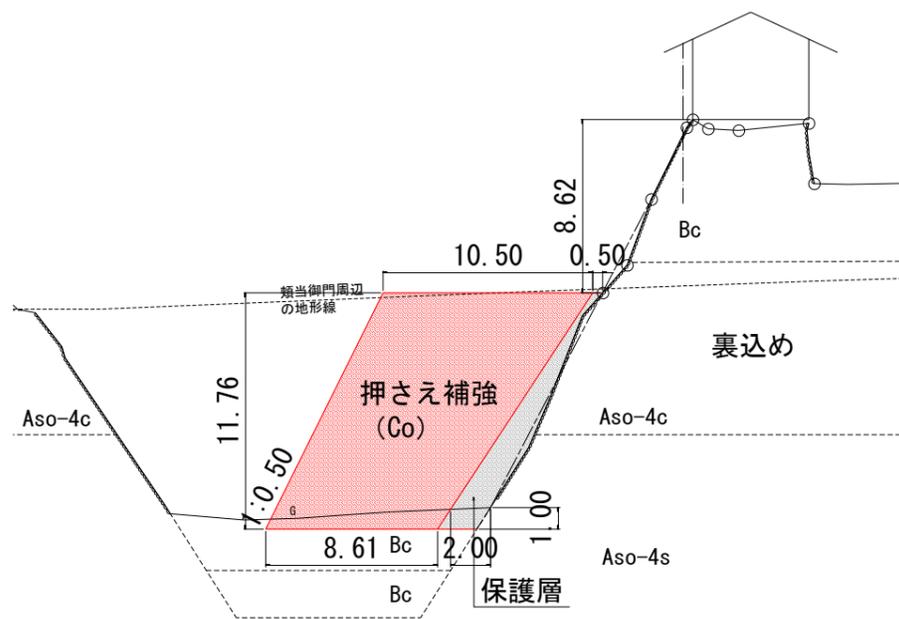
比較案		パターン1		パターン2		パターン3		パターン4		パターン5								
比較条件	外側	築石		築石		築石		築石		築石								
	内部	栗石		コンクリート		コンクリート		コンクリート		コンクリート								
	形状決定方法	勾配固定		勾配固定		底版拡張		勾配固定		勾配固定/底版拡張								
	その他							※背面土圧の軽減		※受働土圧考慮								
石垣前面押さえ補強	形状																	
	備考	<ul style="list-style-type: none"> 石垣根入れの安定性を考慮し、掘底の掘削を1.0mに固定 石垣と押え補強の間に保護層を設置 		<ul style="list-style-type: none"> 石垣根入れの安定性を考慮し、掘底の掘削を1.0mに固定 石垣と押え補強の間に保護層を設置 		<ul style="list-style-type: none"> 石垣根入れの安定性を考慮し、掘底の掘削を1.0mに固定 石垣と押え補強の間に保護層を設置 		<ul style="list-style-type: none"> 石垣根入れの安定性を考慮し、掘底の掘削を1.0mに固定 石垣と押え補強の間に保護層を設置 網状鉄筋挿入工により背面土圧の軽減を図る 		<ul style="list-style-type: none"> 石垣根入れの安定性を考慮し、掘底の掘削を1.0mに固定 石垣と押え補強の間に保護層を設置 対面石垣まで底版を延伸し受働土圧を考慮 要：鉄筋照査 								
裏込め材	物性値	単位体積重量	kN/m ³	20	砂及び砂礫	23	コンクリート	23	コンクリート	23	コンクリート							
	底面摩擦係数			0.5	支持地盤：粘性土	0.5	支持地盤：粘性土	0.5	支持地盤：粘性土	0.5	支持地盤：粘性土							
裏込め材	物性値	内部摩擦角	度	38	※1	38	※1	38	※1	38	※1							
		単位体積重量	kN/m ³	19	砂質土_密なもの	19	砂質土_密なもの	19	砂質土_密なもの	19	砂質土_密なもの							
		粘着力	kN/m ²	0		0		0		0								
		安全率	許容値	判定	計算結果	許容値	判定	計算結果	許容値	判定	計算結果	許容値	判定	計算結果				
安定計算結果	滑動	常時		1.5	OK	5.64	1.5	OK	7.25	1.5	OK	6.79	1.5	OK	5.2	1.5	OK	5.91
		地震時		1.2	OK	1.23	1.2	OK	1.27	1.2	OK	1.24	1.2	OK	1.2	1.2	OK	1.21
	転倒 (示力線位置)	常時	m	6.036	OK	8.741	4.305	OK	7.526	6.641	OK	11.199	3.555	OK	6.688	5.422	OK	8.317
		地震時	m	4.024	OK	6.937	2.87	OK	5.668	4.427	OK	9.528	2.37	OK	4.874	3.615	OK	6.461
	支持	常時	kN/m ²	100	NG	325.21	100	NG	383.28	100	NG	231.66	100	NG	386.13	100	NG	212.88
		地震時	kN/m ²	150	NG	315.41	150	NG	375.5	150	NG	224.54	150	NG	380.32	150	NG	203.26
支持対策	地盤改良 深さ2.5m	常時		判定	必要支持力 = <> 支持力	判定	必要支持力 = <> 支持力	判定	必要支持力 = <> 支持力	判定	必要支持力 = <> 支持力	判定	必要支持力 = <> 支持力	判定	必要支持力 = <> 支持力	判定	必要支持力 = <> 支持力	
		地震時		-	-	-	-	-	-	-	-	-	NG	3,850.06kN > 2,053.13kN	NG	5,713.30kN > 4,197.86kN		
	地盤改良 深さ5.0m	常時		-	-	-	-	-	-	-	-	-	OK	3,283.06kN < 13,441.36kN	OK	8,556.40kN < 80,624.03kN		
		地震時		-	-	-	-	-	-	-	-	-	OK	8,103.80kN < 48,038.62kN	OK	13,486.57kN < 13,3058.78kN		
	網状鉄筋挿入	常時		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		地震時		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
備考	掘底の遺構面を把握するために発掘調査が必要																	
空堀残存率 (残存断面積/現状断面積)		46% 残存：110㎡/現状：240㎡			50% 残存：120㎡/現状：240㎡			50% 残存：120㎡/現状：240㎡			58% 残存：140㎡/現状：240㎡			63% 残存：150㎡/現状：240㎡				
文化財への影響	外観への影響	× 城郭平面構造が変化する			× 城郭平面構造が変化する			× 城郭平面構造が変化する			× 城郭平面構造が変化する			× 城郭平面構造が変化する				
	材料内部への影響	○ 影響なし			○ 影響なし			○ 影響なし			× 栗石層へ固化剤を注入する			○ 影響なし				
	可逆性	○ 可逆性あり			○ 可逆性あり			○ 可逆性あり			× 可逆性なし			○ 可逆性あり				
施工性											栗石層への削孔により栗石を押しわけ築石が動く可能性がある			構造の複雑化により鉄筋施工に多大な時間を要する				
総合評価																		

※1：累積示力線解析プログラムを用い、内部摩擦角を変化させ「H443石垣に現在作用している土圧」を再現していると考えられる内部摩擦角を設定

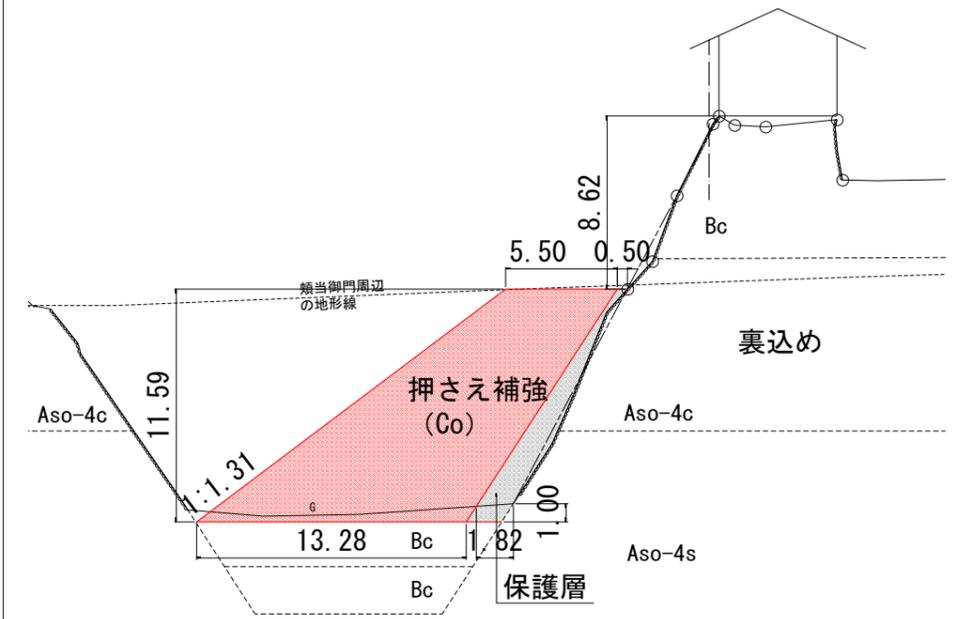
パターン1



パターン2



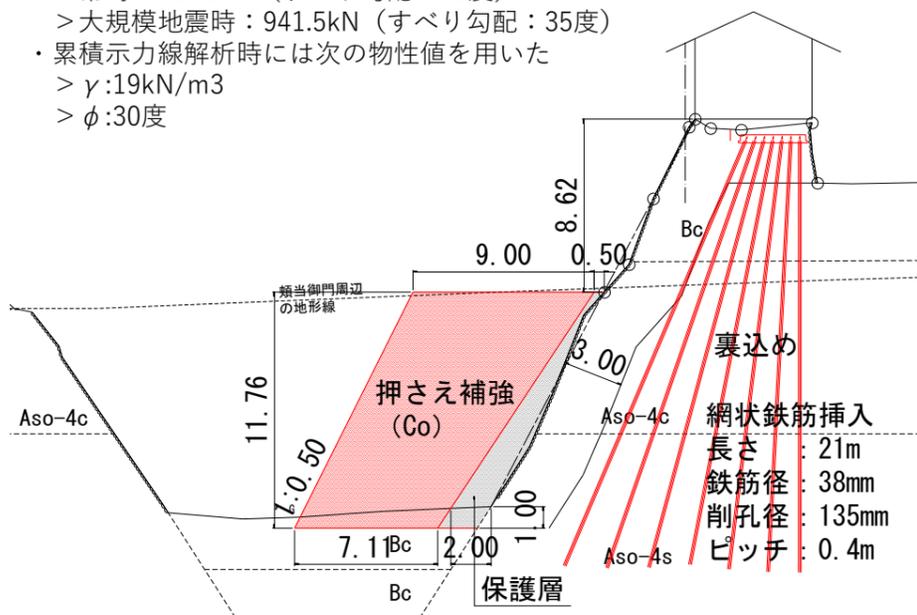
パターン3



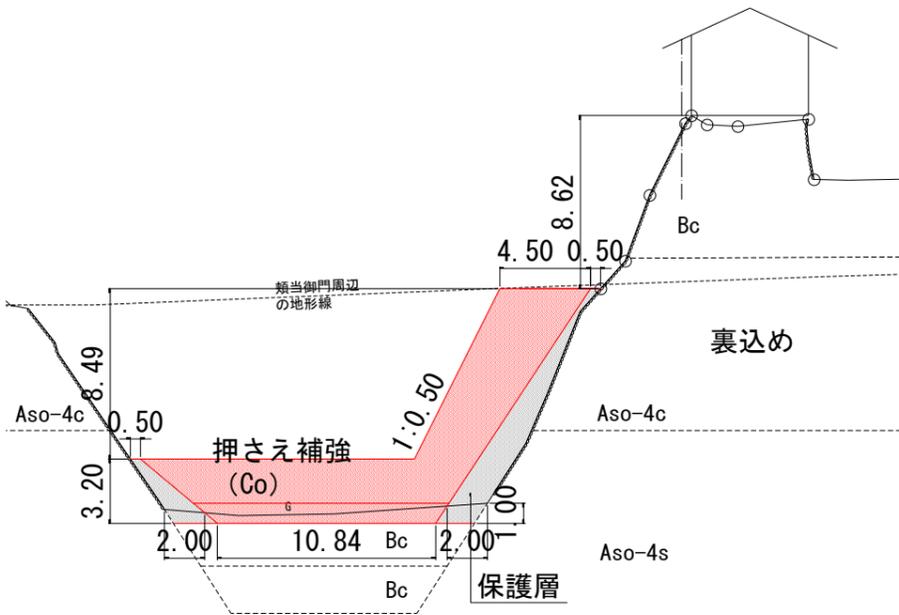
パターン4

【網状鉄筋挿入工の設計における土圧の設定】

- ・ H443の累積示力線解析時に算出した下記主動土圧を用いた
 - > 常時：433.2kN (すべり勾配：43度)
 - > 大規模地震時：941.5kN (すべり勾配：35度)
- ・ 累積示力線解析時には次の物性値を用いた
 - > γ : 19kN/m³
 - > ϕ : 30度



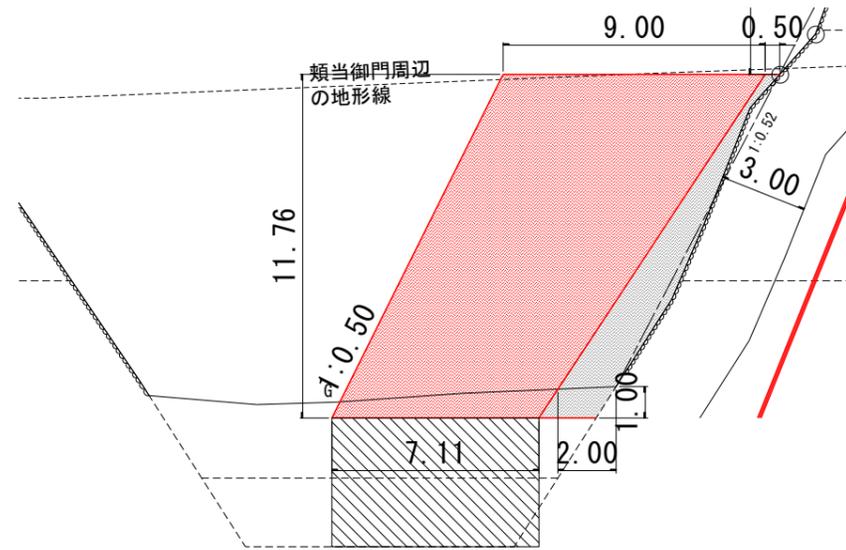
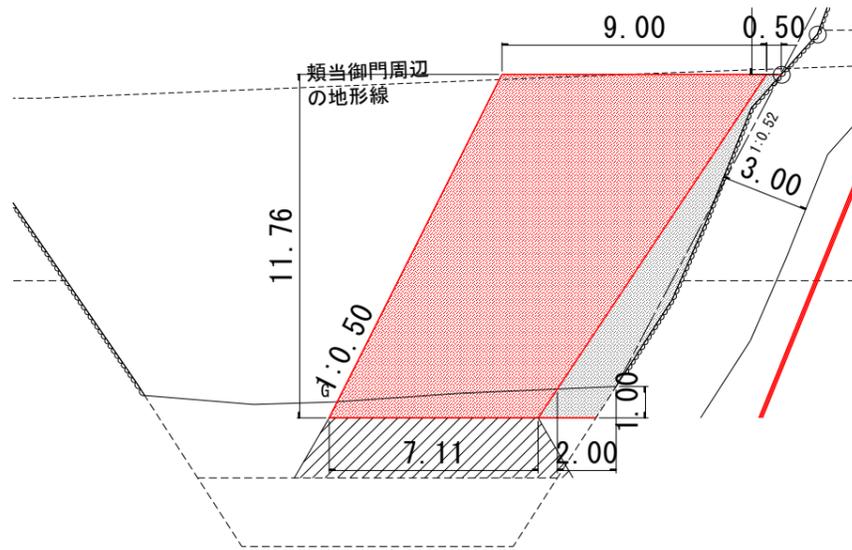
パターン5



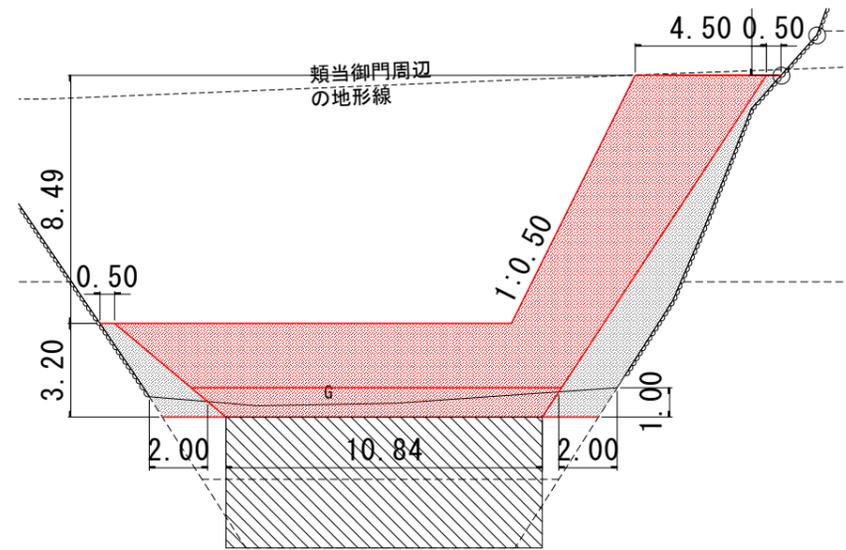
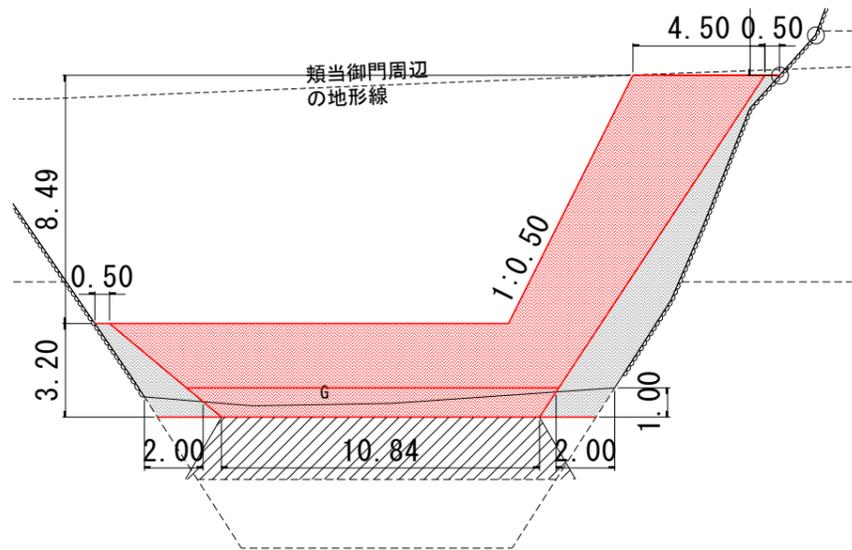
地盤改良 深さ2.5m

地盤改良 深さ5.0m

パターン4



パターン5





↙ パターン2のパース (骨組み)

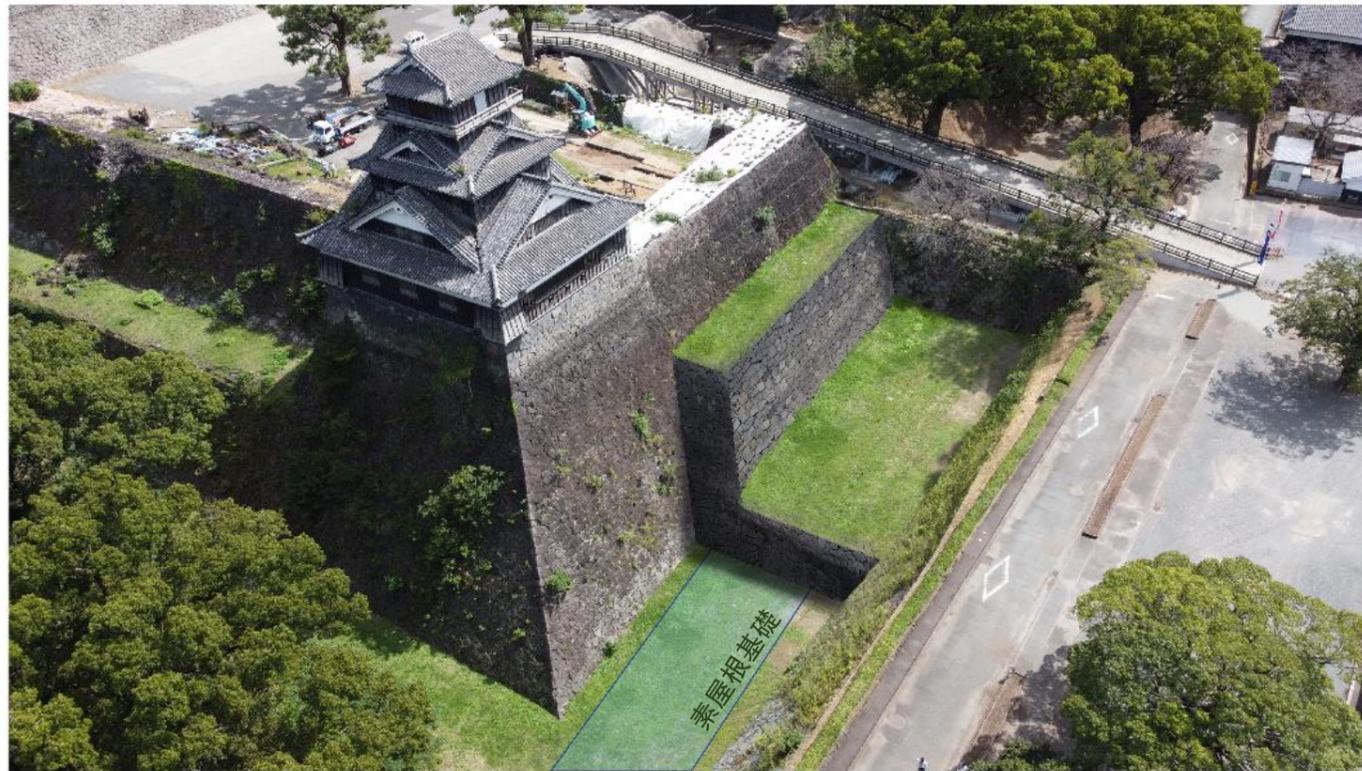
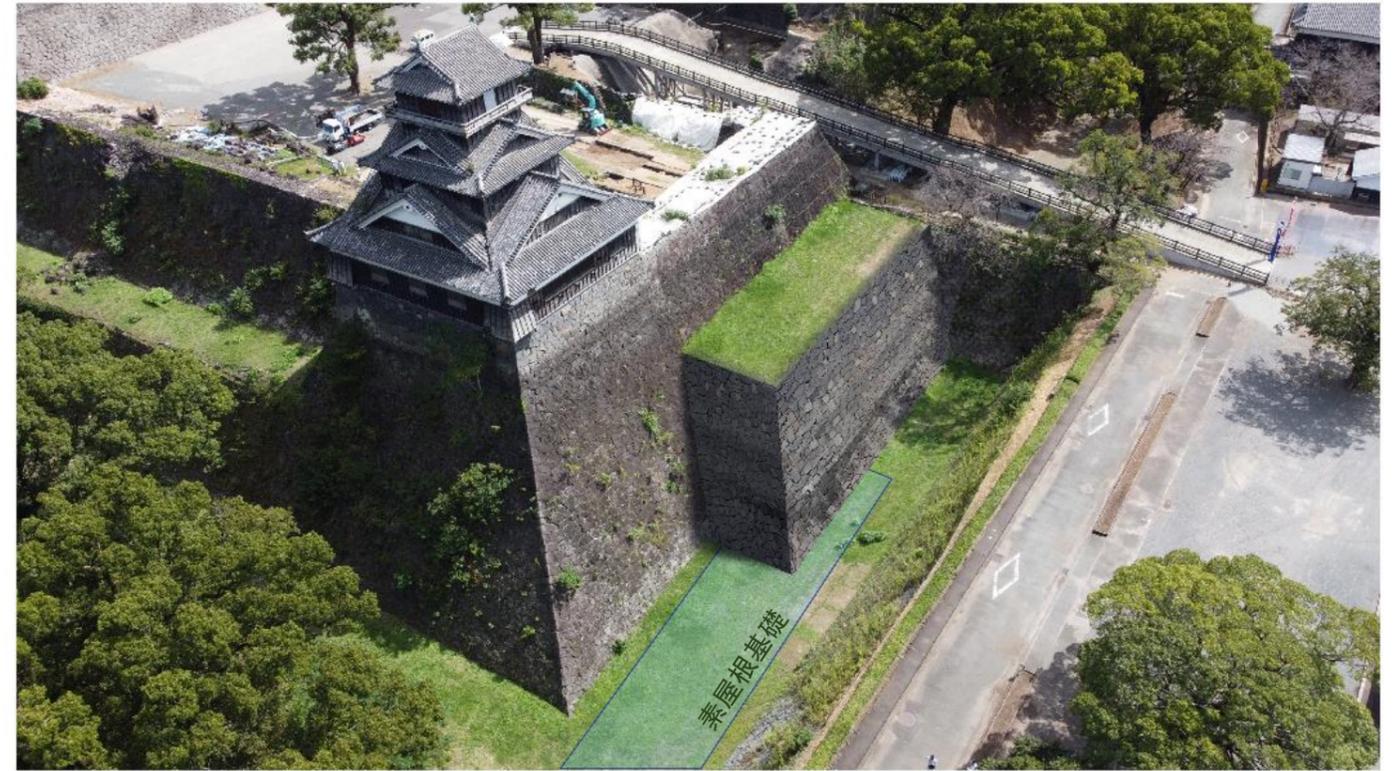
内部：Co
勾配：固定 (1 : 0.5)

↑ パターン4のパース (骨組み)

内部：Co
勾配：固定 (1 : 0.5)
※網状鉄筋挿入工を切土とみなす

← パターン5のパース (骨組み)

内部：Co
勾配：固定 (1 : 0.5)
※受働土圧考慮



↙ パターン2のパース

内部：Co
勾配：固定 (1 : 0.5)

↑ パターン4のパース

内部：Co
勾配：固定 (1 : 0.5)
※網状鉄筋挿入工を切土とみなす

← パターン5のパース

内部：Co
勾配：固定 (1 : 0.5)
※受働土圧考慮

【調査目的】

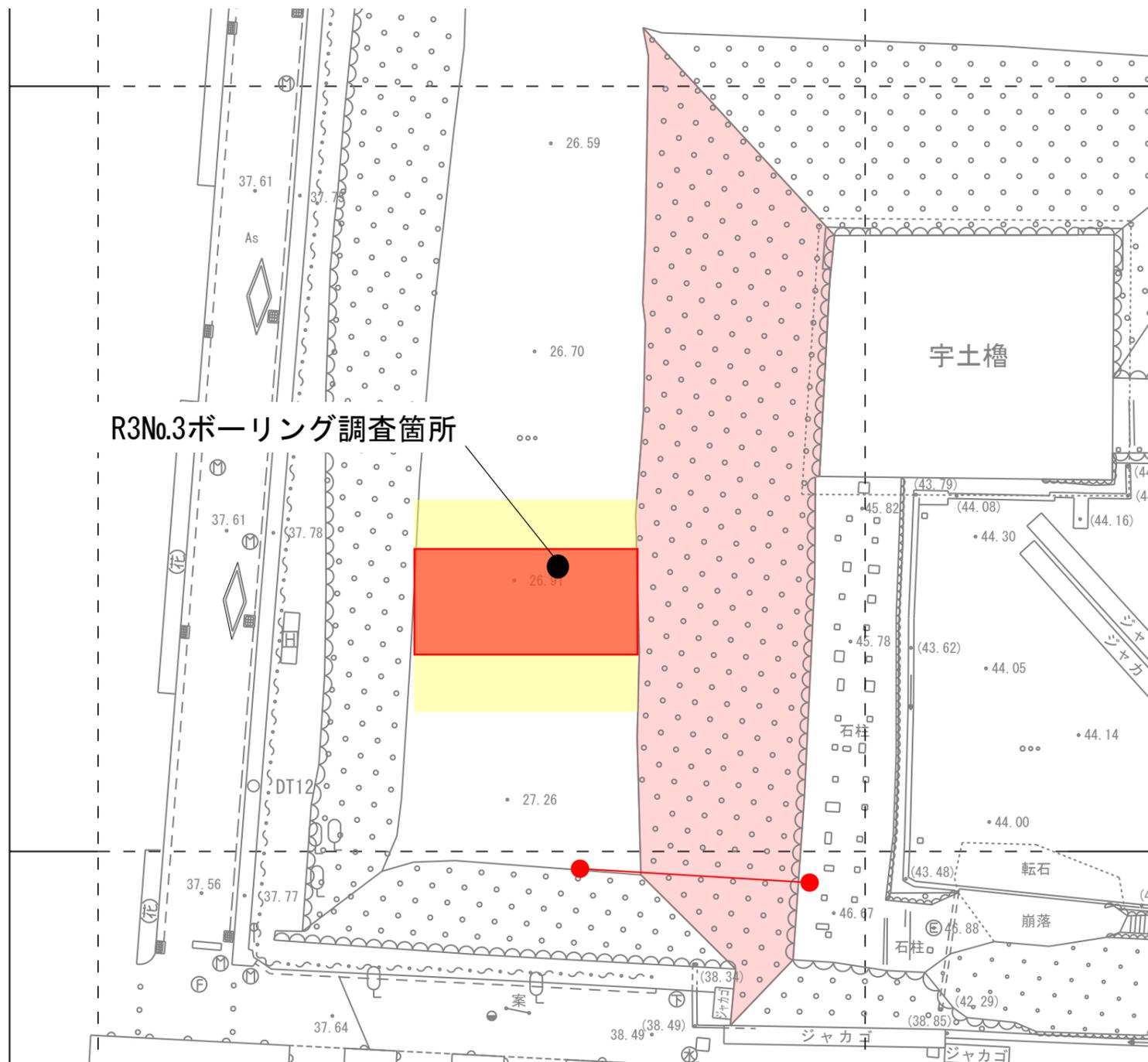
先行して実施した地質調査成果より、空堀内の地山であるAso-4s(阿蘇火砕流砂)の上部に、約5mの盛土を確認した。盛土は粘性土を主体とする①Bc(約2.5m)、阿蘇火砕流シルトを主体とする②Bc(約2.5m)の2層に分けられる。②Bcについては遺構面形成土の可能性ある。宇土櫓下空堀の最終遺構面、形状の確認を行い、今後の復旧事業を遺構保護の観点から円滑にできるように本質的価値の情報を取得することを目的とする。

【調査手法】

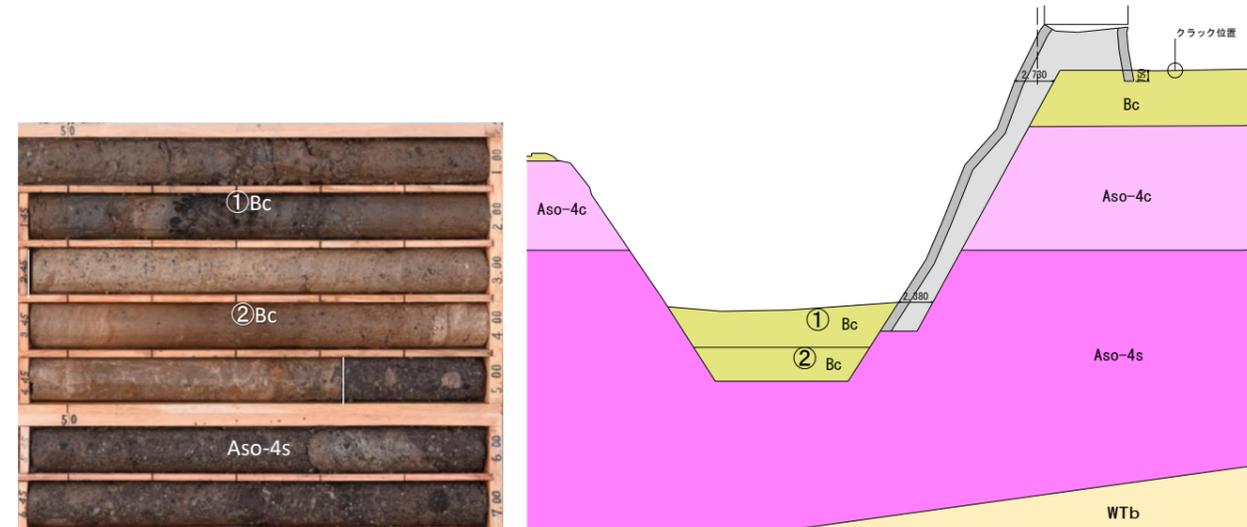
平成28年熊本地震により被災している石垣前面で発掘調査を行なうため、安全性を考慮して石垣面の変状が小さい箇所の下部で調査を行なう。

黄色塗りつぶし範囲内で赤枠の調査区を設定する。

○調査区1(幅6m×長さ14m)



平面図



R3No.3コア写真7mまで

土質断面図 (断面位置は平面図赤線箇所)



調査箇所周辺写真 (南東から)

①土圧計算方法

試行くさび法とする。

※試行くさび法：擁壁背面に作用する力の釣り合い条件を作成し、すべり角を変化させた時に最大となる土圧を主働土圧とする手法

②物性値

- ・土圧計算にあたって、本来は裏込めの物性値（内部摩擦角、粘着力、単位体積重量）を適切に与える必要がある。
- ・しかし、背面が複層構造（上からBc:粘性質盛土、Aso-4c: 火山灰質粘性土、Aso-4s:火山灰質砂質土）となっており、単純に物性値を設定することはできない。

③土圧の考え方と物性値

- ・「押さえ補強に作用する土圧」＝「H443石垣に現在作用している土圧」と考え、この土圧を生じさせる物性値を設定する。

④H443石垣に現在作用している土圧

- ・累積示力線解析プログラムを用い、内部摩擦角を変化させ「H443石垣に現在作用している土圧」を再現していると考えられる内部摩擦角を設定（ ϕ :38度）
- ・現在H443石垣は崩落していないため、常時の示力線位置が石垣最下段の内側にくる土圧を「H443石垣に現在作用している土圧」とする。

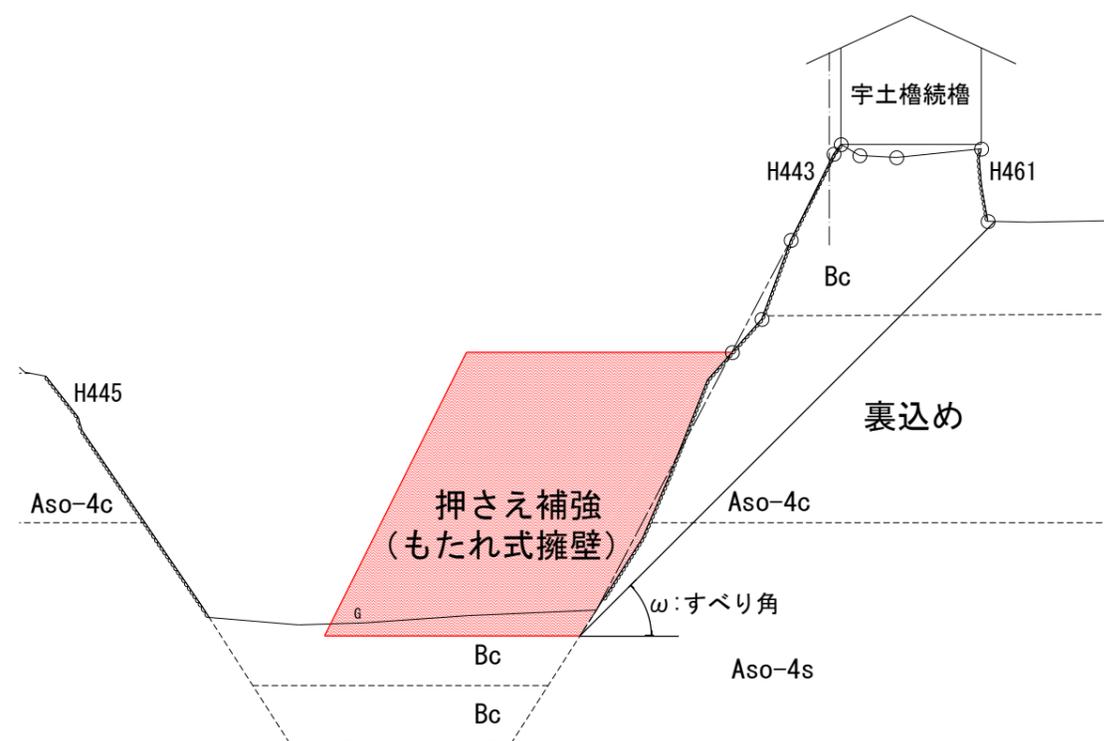


図1 全体イメージ図

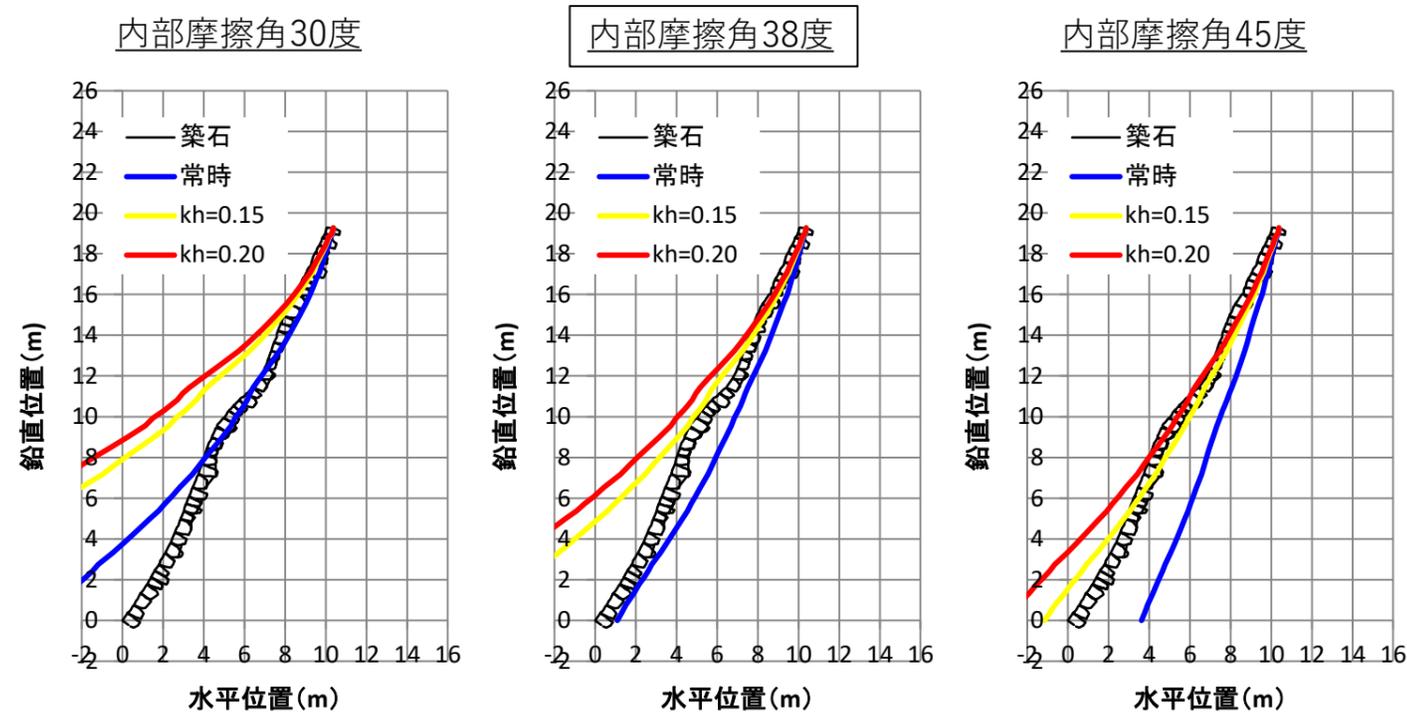
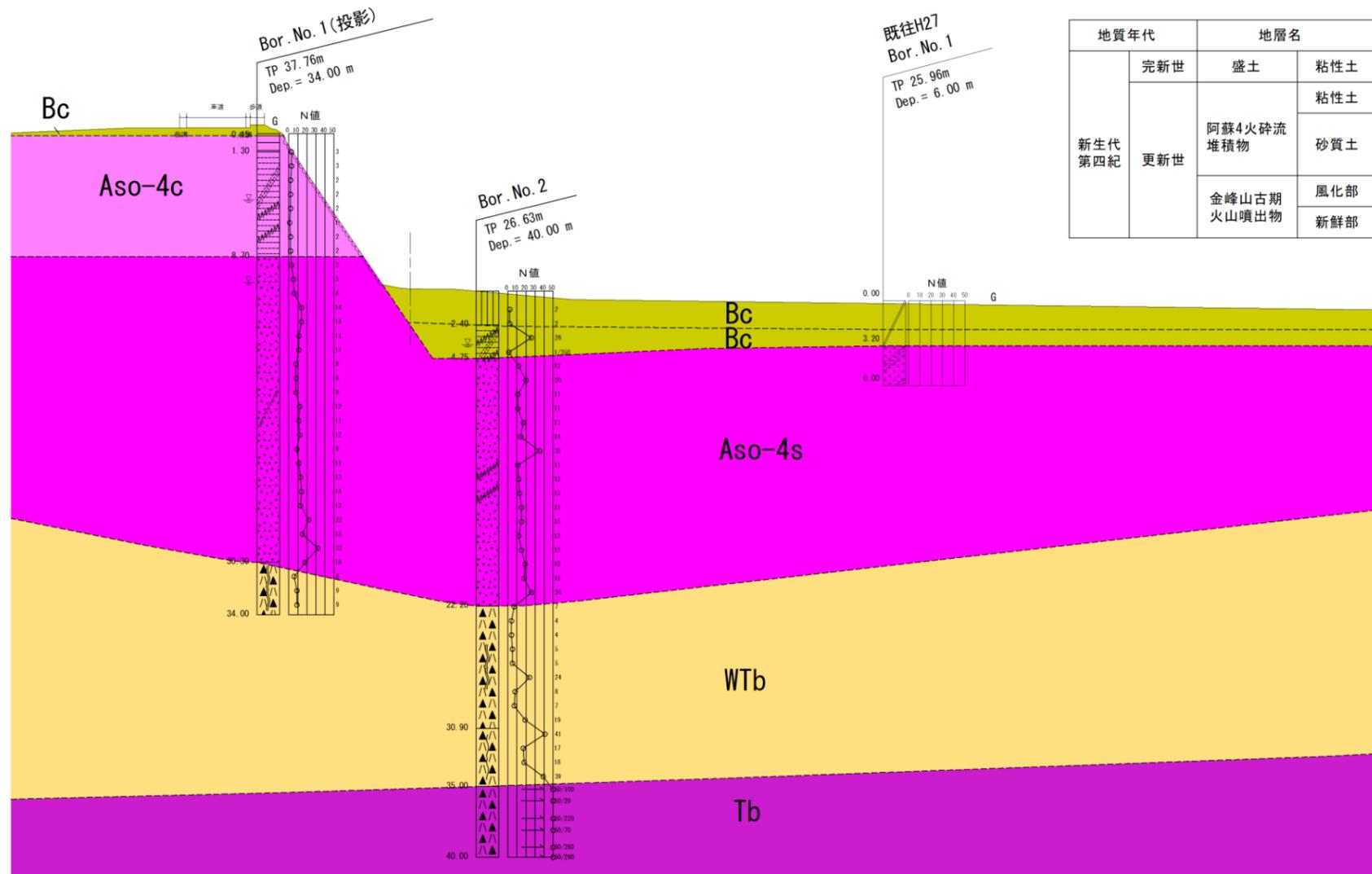
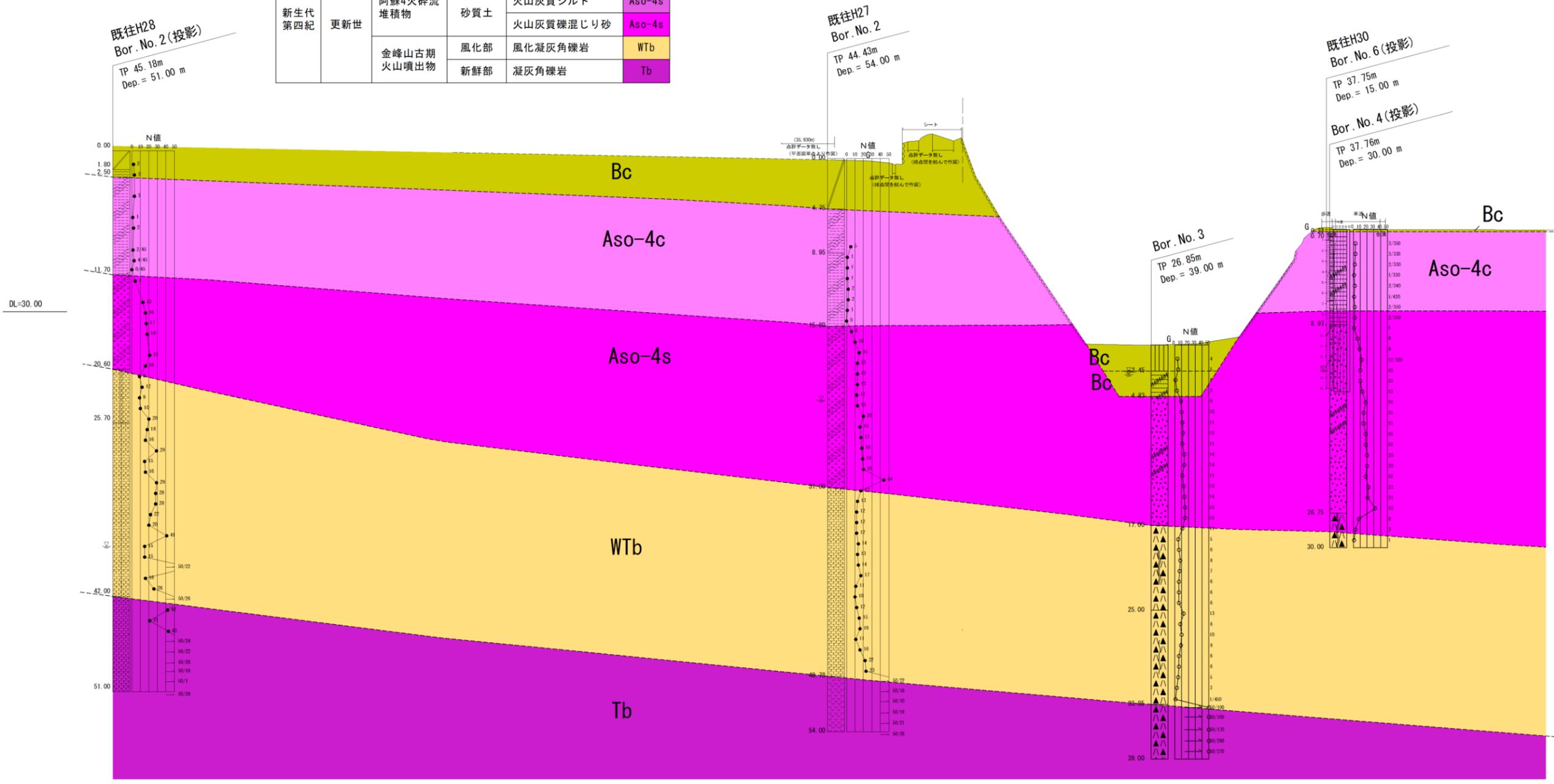


図2 「H443石垣に現在作用している土圧」を生じさせる物性値

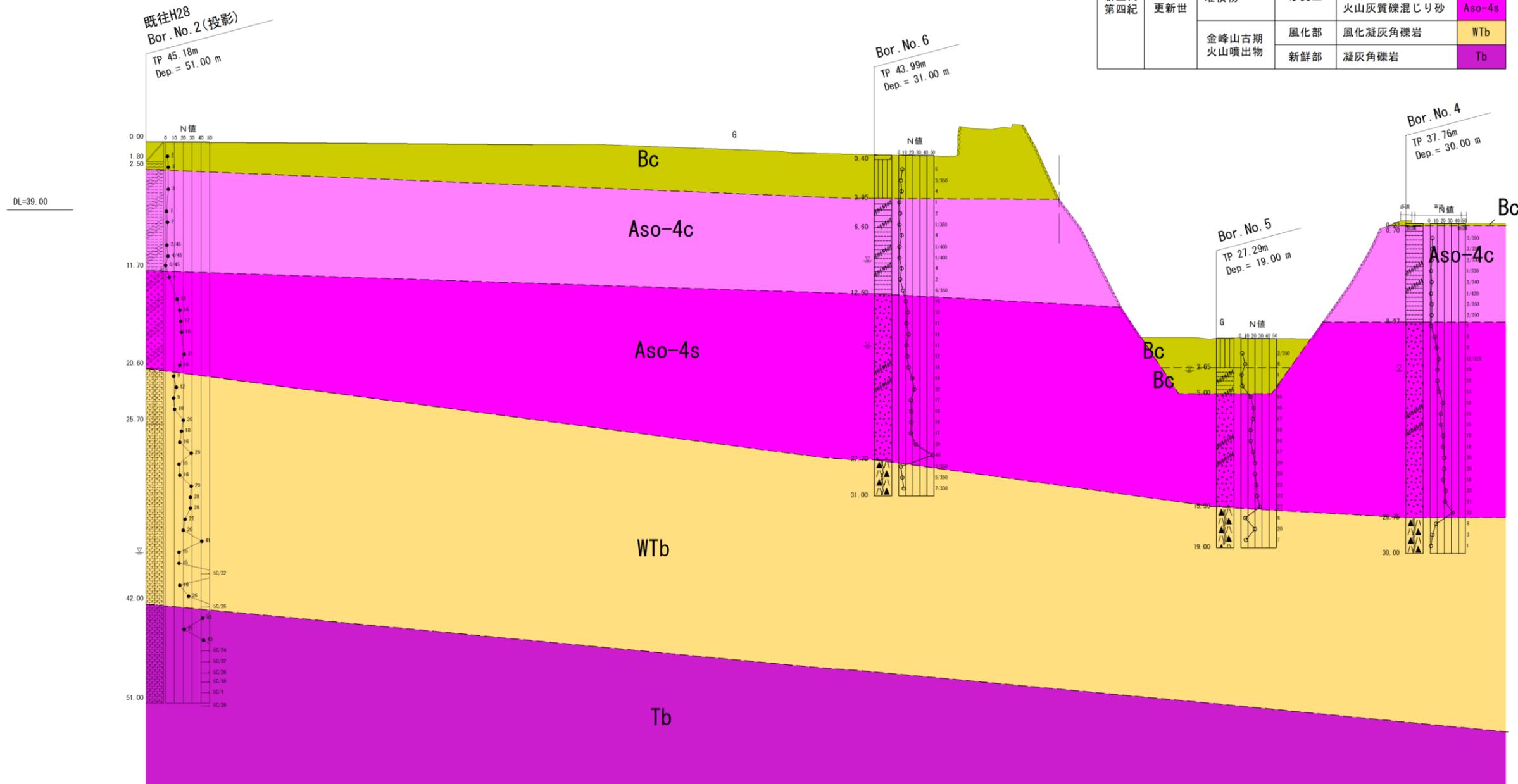


地質年代	地層名	層相	記号		
新生代 第四紀	完新世	盛土	粘性土 礫混じり粘土	Bc	
		阿蘇4火砕流 堆積物	粘性土	火山灰質シルト	Aso-4c
	砂質土		火山灰質シルト	Aso-4s	
			火山灰質礫混じり砂	Aso-4s	
	更新世		金峰山古期 火山噴出物	風化部	風化凝灰角礫岩
		新鮮部		凝灰角礫岩	Tb

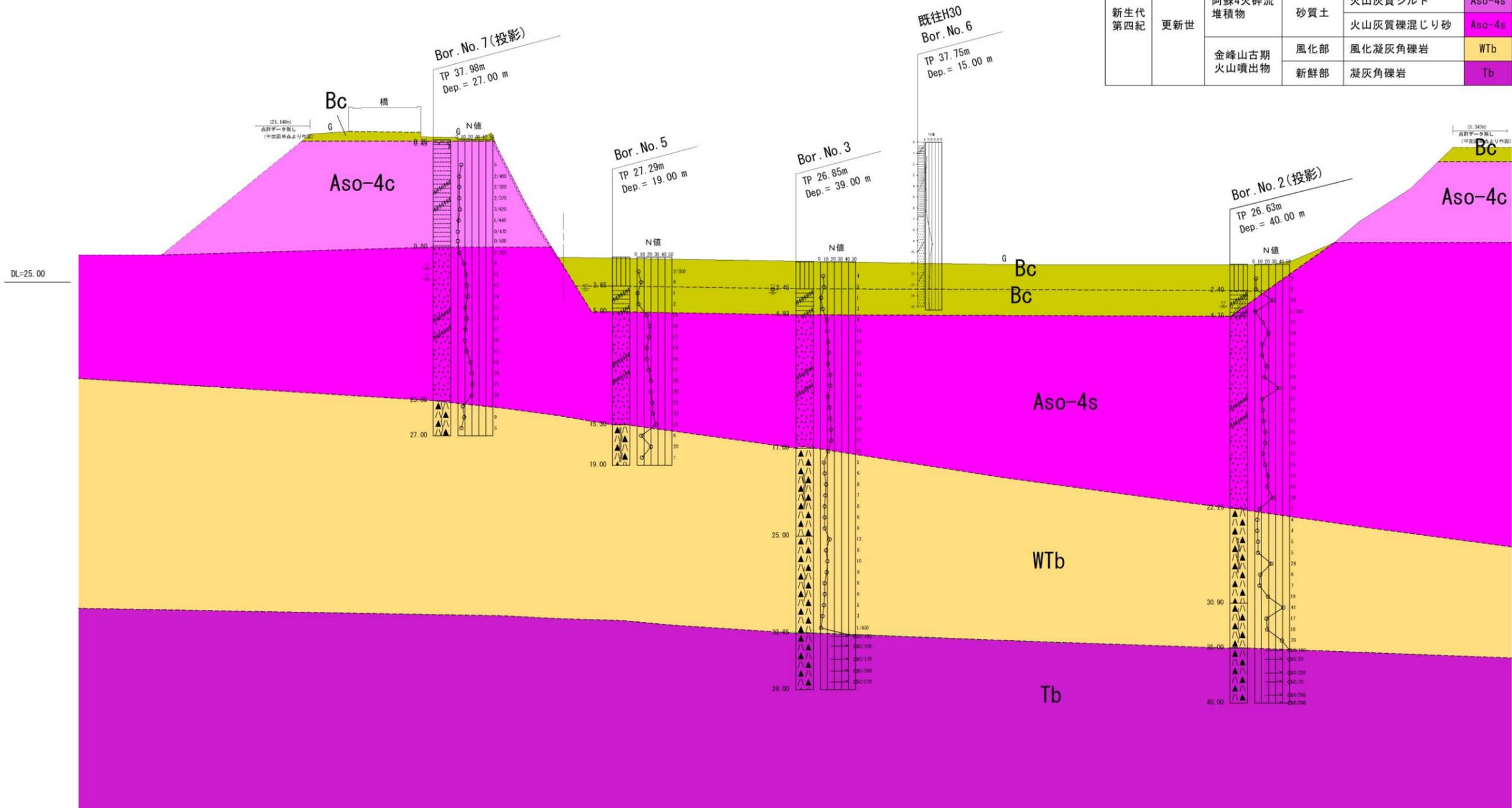
地質年代	地層名	層相	記号	
新生代 第四紀	完新世	盛土	礫混じり粘土	Bc
		阿蘇4火砕流堆積物	粘性土	火山灰質シルト
	砂質土		火山灰質シルト	Aso-4s
			火山灰質礫混じり砂	Aso-4s
	金峰山古期火山噴出物		風化部	風化凝灰角礫岩
		新鮮部	凝灰角礫岩	Tb



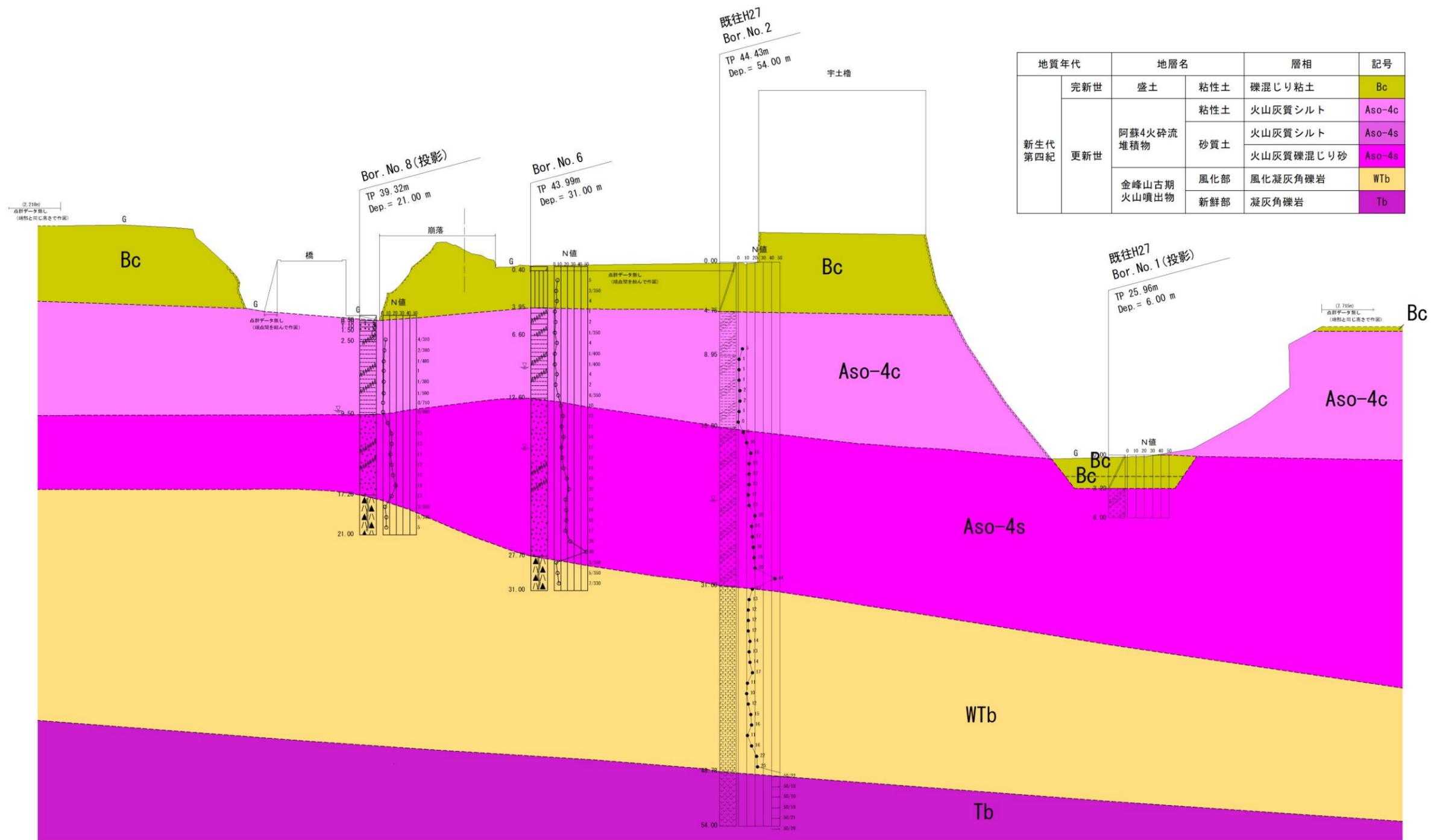
地質年代	地層名	層相	記号		
新生代 第四紀	完新世	盛土	粘性土	礫混じり粘土	Bc
	更新世	阿蘇4火砕流堆積物	粘性土	火山灰質シルト	Aso-4c
			砂質土	火山灰質シルト	Aso-4s
				火山灰質礫混じり砂	Aso-4s
	金峰山古期火山噴出物	風化部	風化凝灰角礫岩	WTb	
		新鮮部	凝灰角礫岩	Tb	

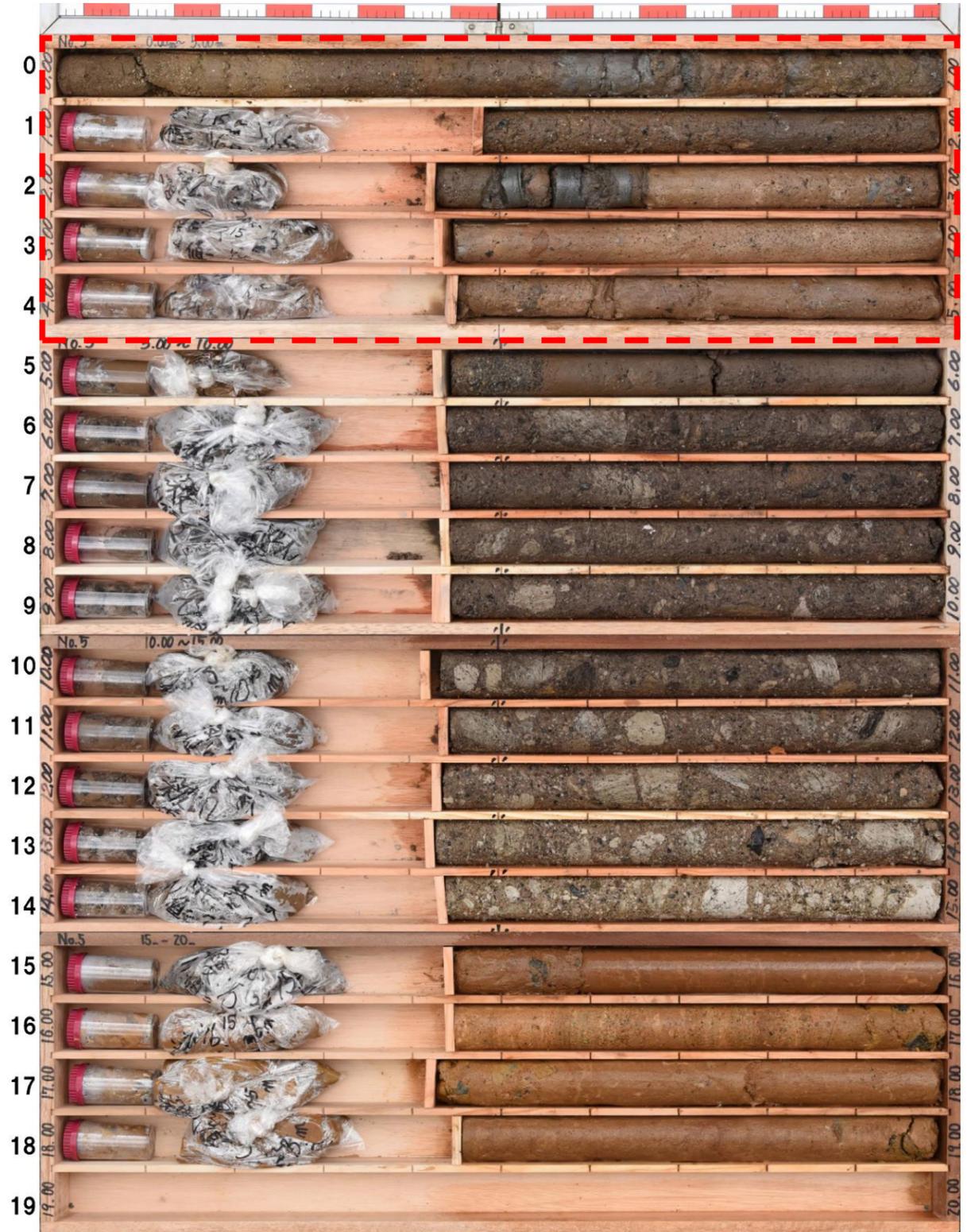


地質年代	地層名		層相	記号	
新生代 第四紀	完新世	盛土	粘性土	礫混じり粘土	Bc
		更新世	阿蘇4火砕流堆積物	粘性土	火山灰質シルト
	砂質土			火山灰質シルト	Aso-4s
	金峰山古期火山噴出物		風化部	風化凝灰角礫岩	WTb
			新鮮部	凝灰角礫岩	Tb



DL=45.00





標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	現場土質名 (模様)	現場土質名	地盤材料の工学的分類	色調	相対密度	相対稠度	記事	孔内水位 / 測定月日	標準貫入試験									
											深度 - N 値 図			N 値 (m)	100mmごとの打撃回数	打撃ごとの貫入量	50回の貫入量	自沈時の貫入量		
			0	100	200	300														
0									火山灰質粘性土や礫混じり砂質粘性土を主体とする。φ20mmの軽石等礫を多く混入する。深度0.55~0.7m、2.5~2.65mに礫を多く含む。											
1				盛土		褐灰茶褐														
2																				
3		24.64	2.65						火山灰質粘性土。粘土化しているが、φ2~10mmの未風化軽石や礫を含む。											
4				盛土(火山灰質シルト)		淡灰		rc1												
5		22.29	5.00						阿蘇-4火砕流堆積物。中~粗砂を主体とする。全体にφ5~10mm程度の礫、軽石を含む。特に10~15.3mで多く見られる。											
6																				
7																				
8																				
9																				
10				火山灰質礫混じり砂		灰		rd3												
11																				
12																				
13																				
14																				
15		11.99	15.20																	
16									シルト状の棒状コアで採取される。φ40mm程度の岩片を含む。											
17				風化凝灰角礫岩		黄褐														
18																				
19		8.29	19.00																	

