

事例 1 - 3 (切羽圧管理、掘進停止再開に関する事例)

シールド概要	地表部への 予期せぬ影響	トラブル発生状況	トラブル対応・工夫事例	
泥水式シールド	有 (歩道部での 泥水流出、 地表面沈下)	・2018年8月、距離程 2,895m地点において、地上歩 道部で泥水が流出するトラブ ルが発生。 ・トラブル停止約2ヶ月後の再 発進以降、2,900m付近で地 表面沈下の累計量が一次管 理値である10mmに達し、そ の後、一時再開したものの管 理値に達する測点が多数発 生し、10月、作業時に距離程 2,950m、2,955mのシールド中 心地点で地表面沈下の累計 が14mmに達しシールド掘進 を停止。	■地盤の再調査 ・トラブル個所以前において切羽管理、泥水管理に 特段の不具合がなかったため、泥水流出、地表面 沈下増大の原因として、地盤の緩みを想定し、追加 の地盤調査を実施。着目点は、地盤強度(N値)、 土質構成、粒度分布、透水性、文献調査(地歴調 査)。 ■泥水品質の改良 ・地盤調査より、当初想定よりも全体的に緩い地盤 であることが判明したため、原因を泥膜形成の不具 合、逸泥増大による地盤の緩みの誘発と推定。その 対策として、泥水品質の改良とモニタリングを実施し た。また、泥水品質維持のため、地上泥水プラントや、 坑内泥水輸送設備を増強した。 ■シールド通過時の可塑状充填材による地山保持 と裏込め注入の増加 ・シールドのオーバーカットによる通過中の地盤沈下 を防止するため、地山とシールドとの空隙に可塑状 充填材を注入した。注入はシールド前胴に装備して いる外周部への注入管から実施した。 ■地表面変状観測の強化(頻度増大と人員態勢) ・道路上にて地表面沈下測定の頻度を大きくし、掘 進と地表面沈下の相関をリアルタイムで把握した。	
シールド径： Φ5～10m				
土被り： 12.8m				
地下水位： GL-4.8m				
地質概要： (シールド断面) N値3～29の沖 積砂質シルト層 (シールド上部) N値30～45の 沖積砂礫層が介 在				
地表部の土地利用： 道路				

泥水式シールドのトラブル事例とその対応

【事例1-3】

1.トラブルの概要：泥水噴出（地表面への予期せぬ影響「あり」）

泥水の地表面噴出の発生

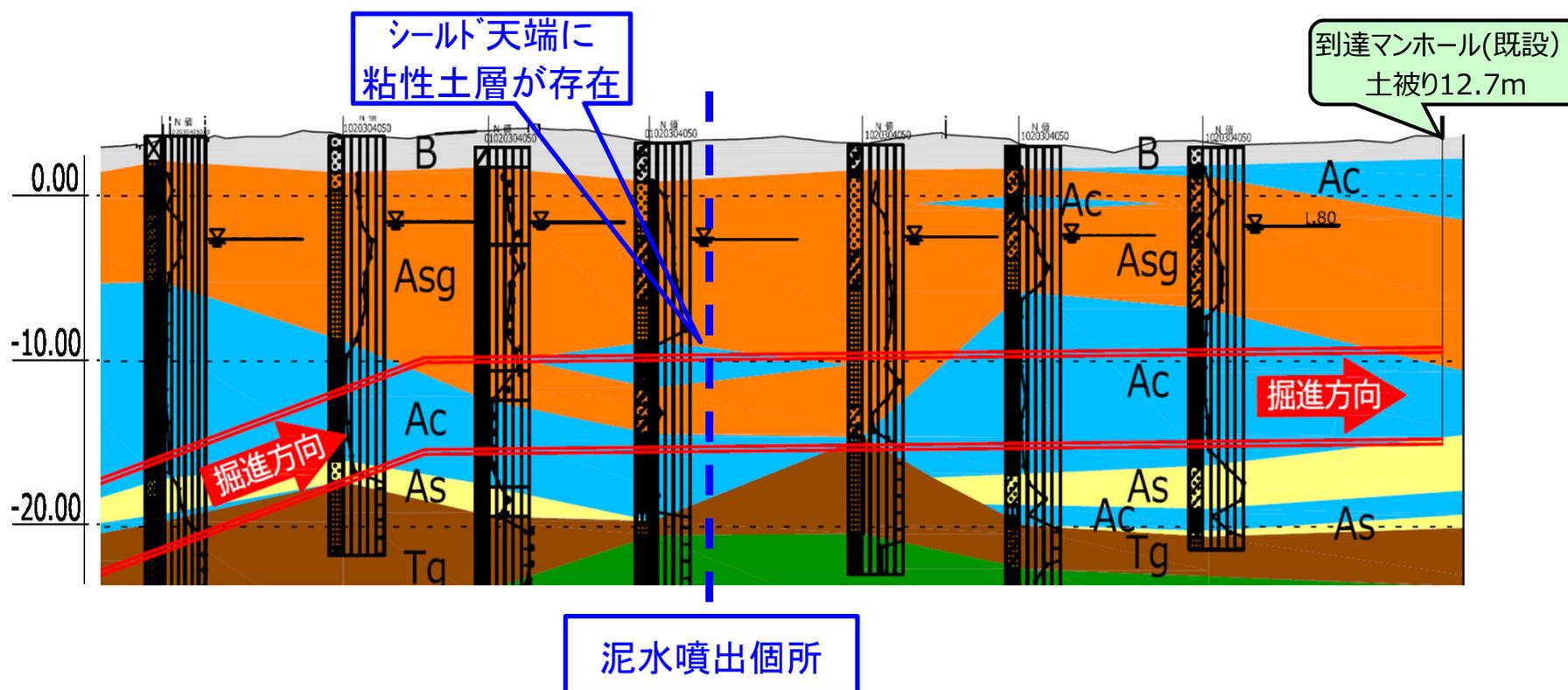
■ 地表面への泥水の噴出



2.トラブル発生前：地盤の把握状況

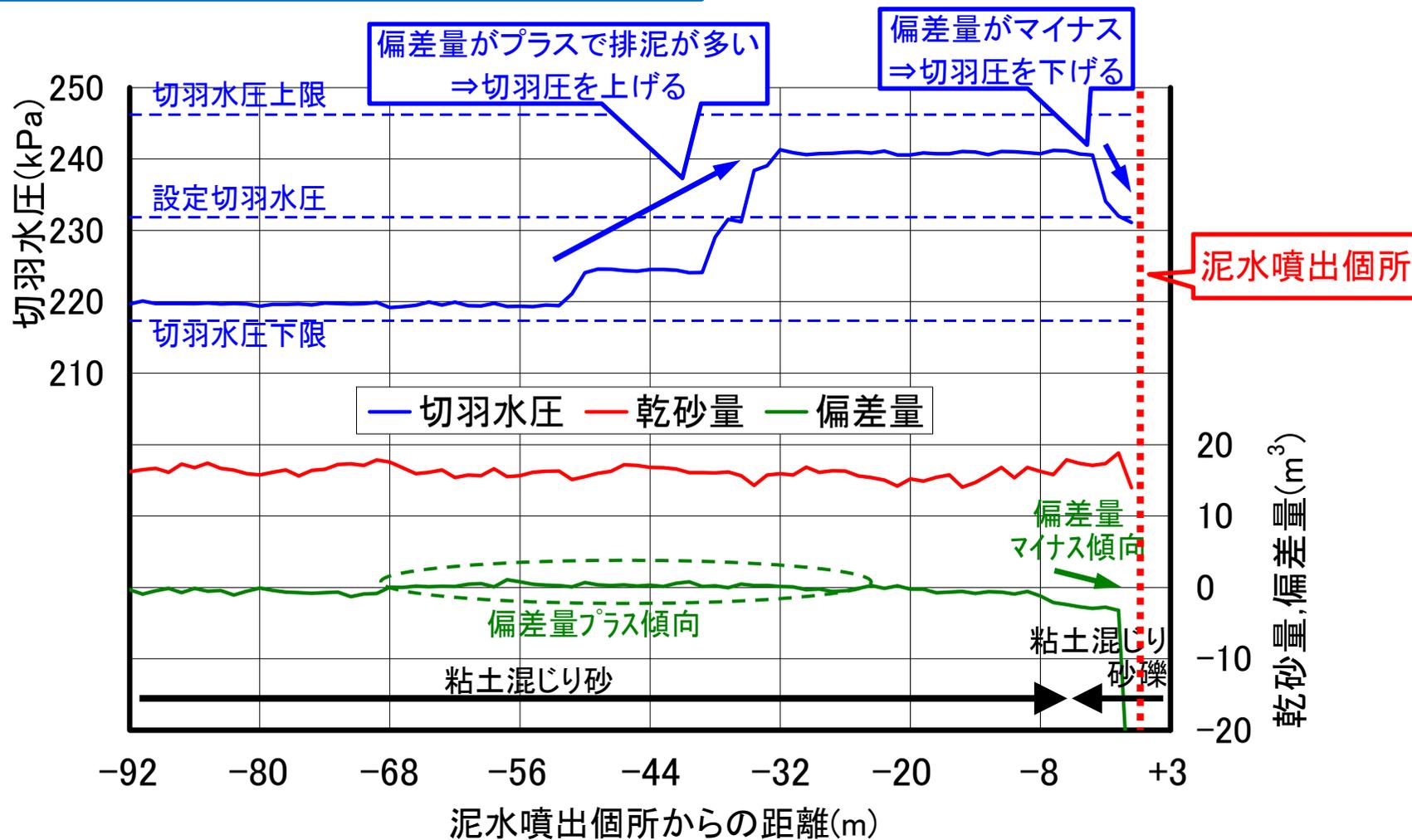
地質概要

- ◆ (土被り小区間)：砂・砂礫層(As,Asg)主体、到達付近は粘性土層(Ac,N=3~7)



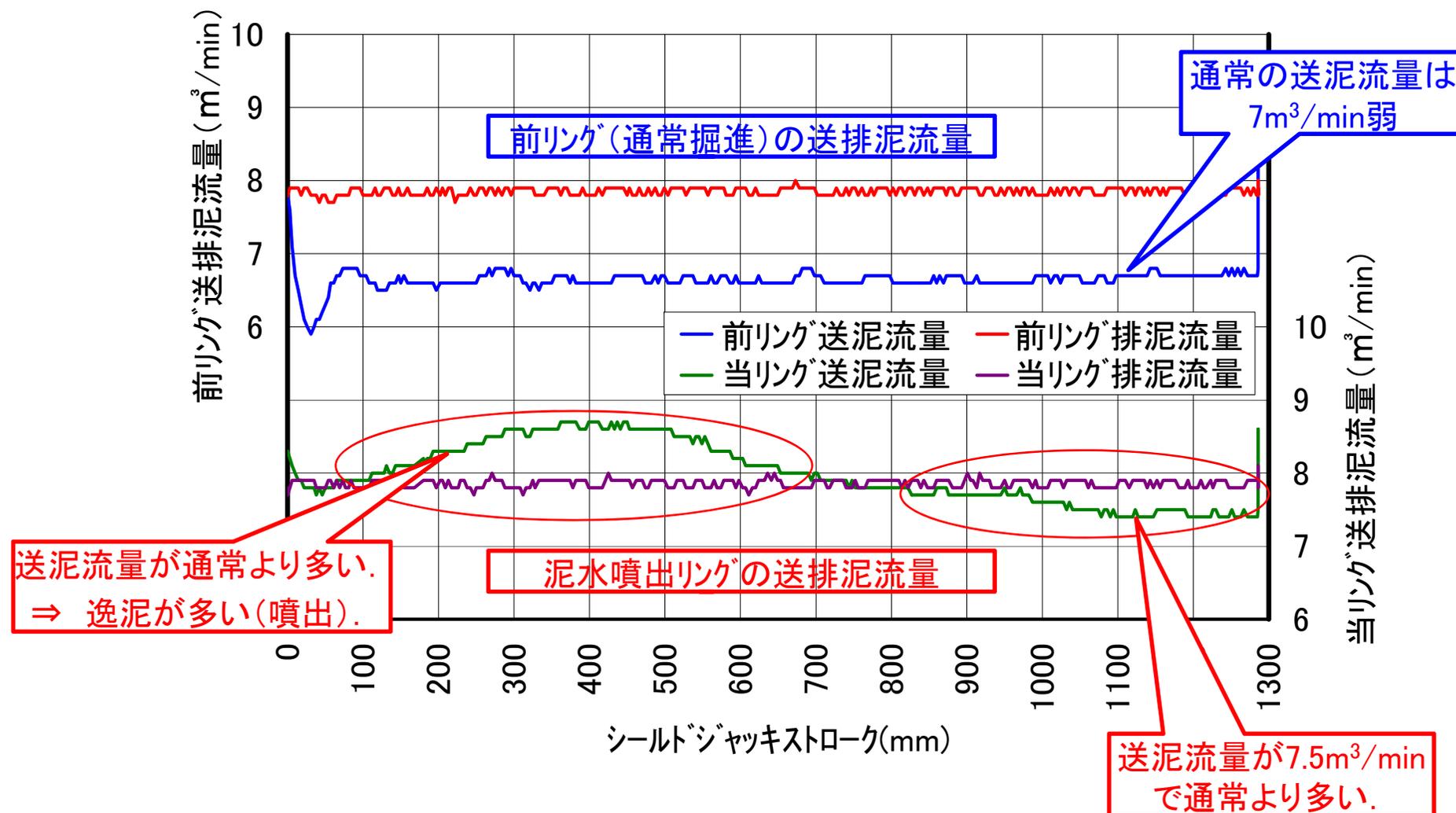
3.トラブル発生時：泥水噴出個所 切羽圧

泥水噴出前の切羽水圧と偏差量



3.トラブル発生時：泥水噴出箇所 排出土量

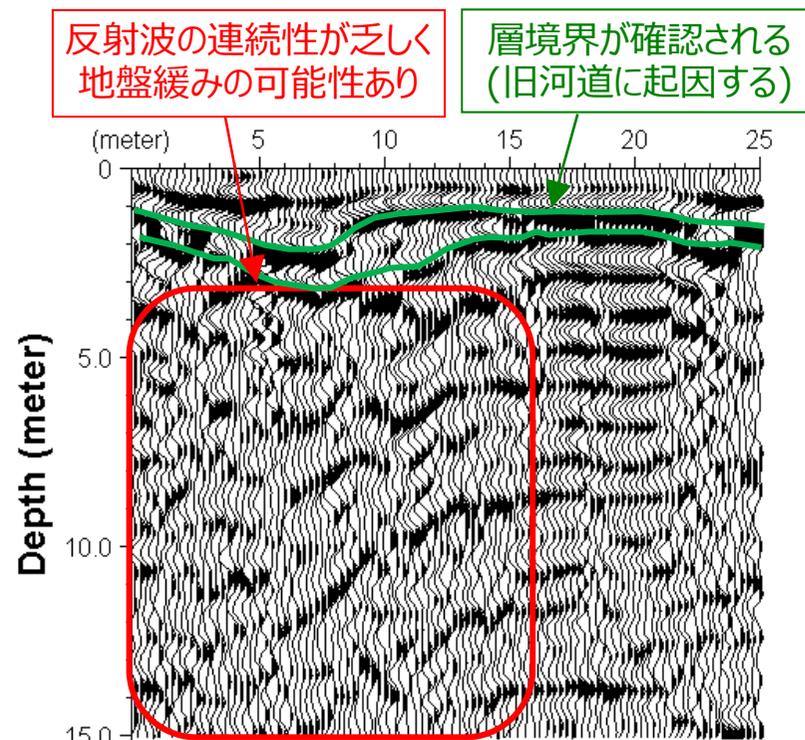
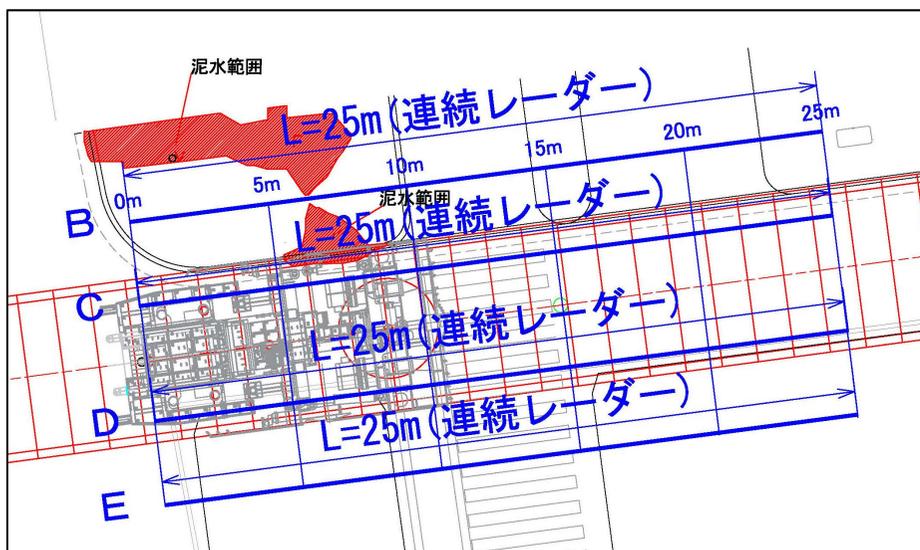
泥水噴出前，噴出時の排出土量(送排泥流量)



3.トラブル発生時：泥水噴出個所 レーダー探査

泥水噴出個所での埋設物，空洞に対するレーダー探査調査

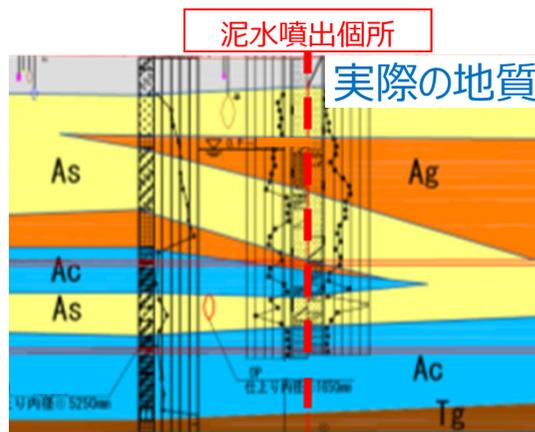
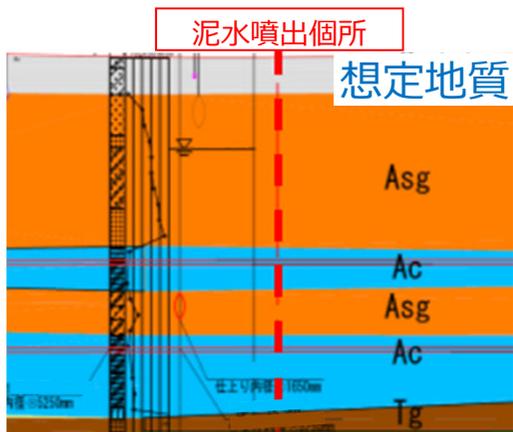
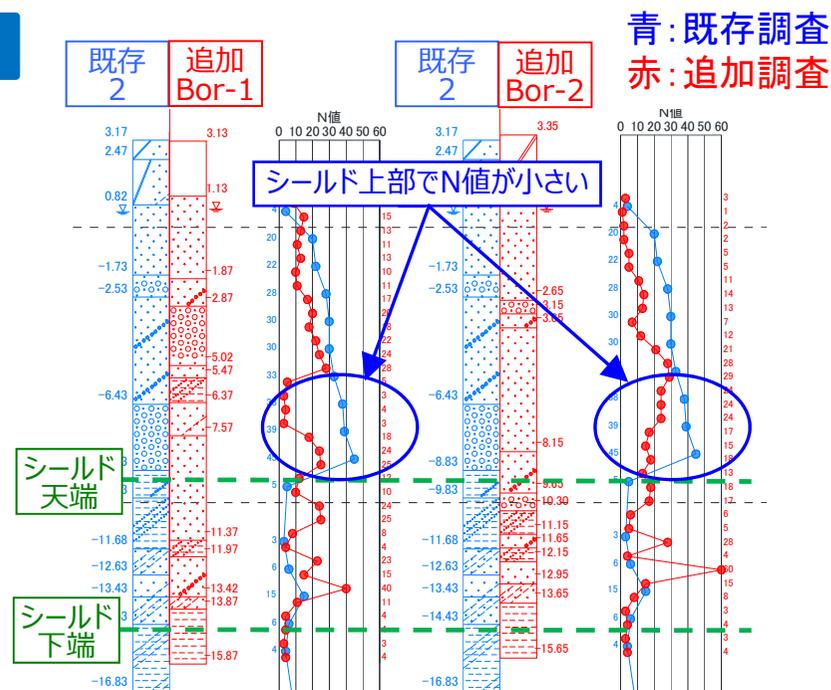
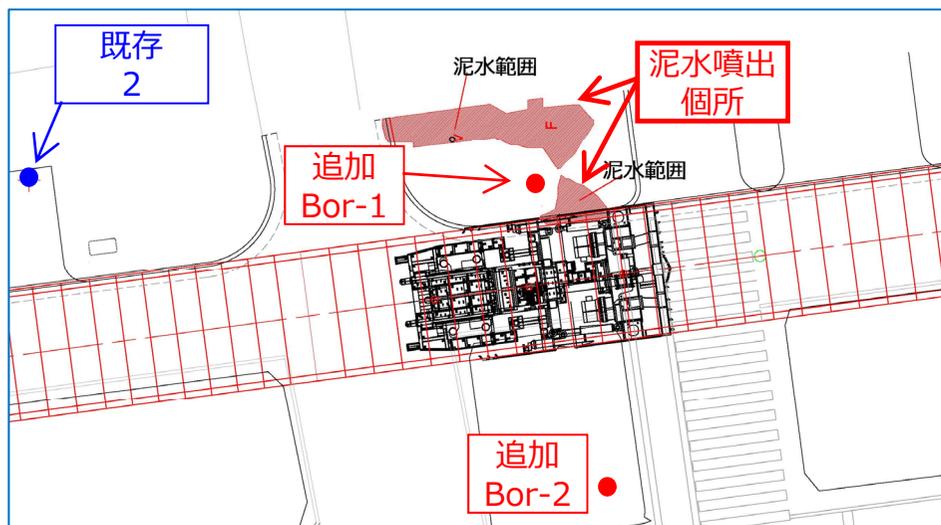
- 噴出の原因として，空洞や井戸の有無を懸念。
 - ⇒ 空洞や井戸の存在は認められない。
 - 一方で，地盤の緩みや層境界の存在が判明。



◆ 連続波レーダー探査結果

3.トラブル発生時：泥水噴出個所 ボーリング調査と土質再評価

ボーリング調査と地質の再評価



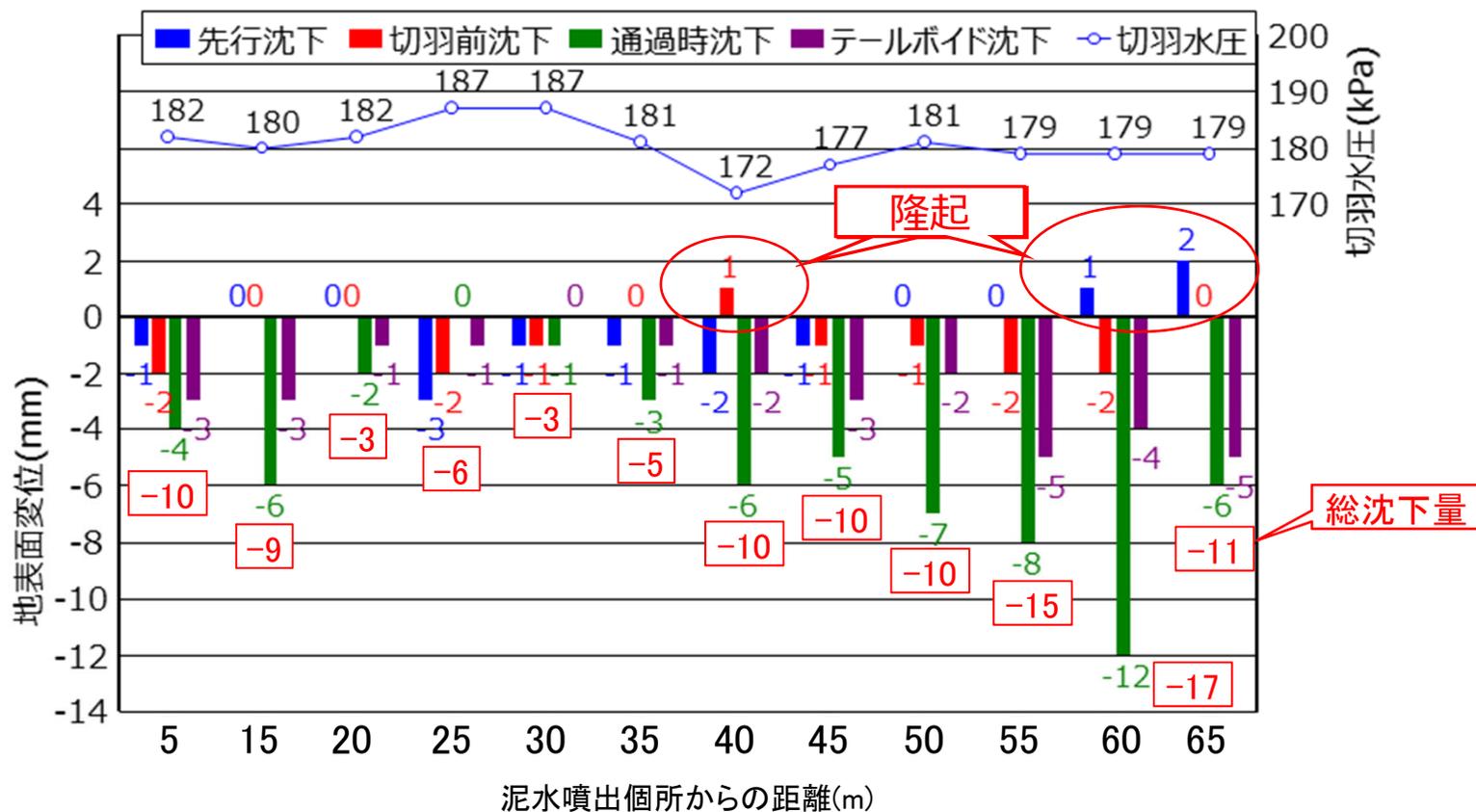
- 切羽水圧の見直し，調整で再発進
- 240kPa ⇒ 180kPa
- 下限値を地下水圧160kPa+a(20kPa)

3.トラブル発生時：地表面沈下の増大

泥水噴出個所以降の地表面沈下の増大

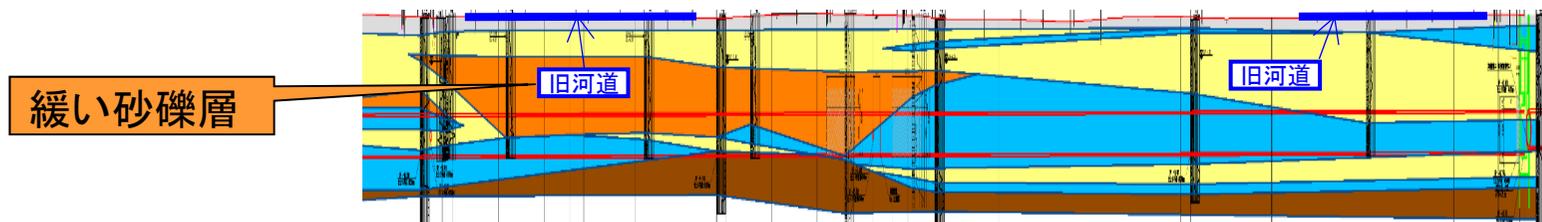
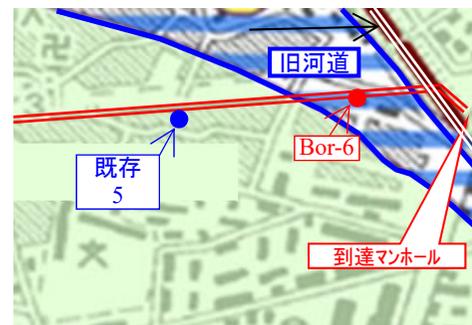
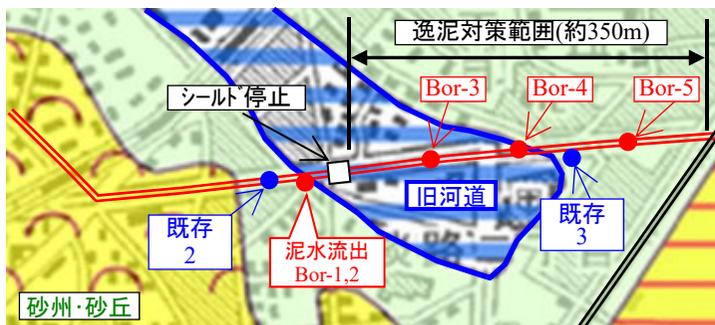
■地表面沈下の発生，増大

⇒ 緩い砂地盤に対応するため，泥水品質の抜本的な改質，設備増強で対応。



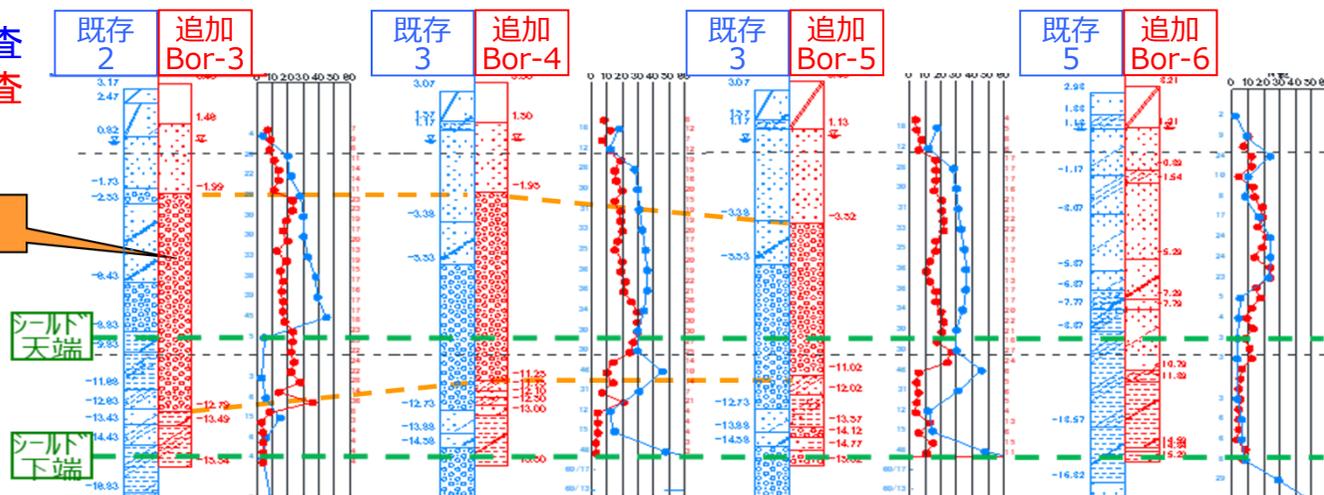
3.トラブル発生時：地表沈下増大区間 ボーリング調査

地歴調査，ボーリング調査による旧河道の存在確認



青：既存調査
赤：追加調査

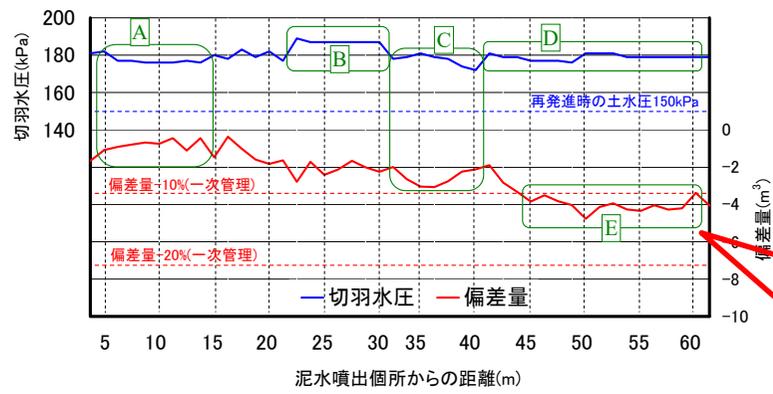
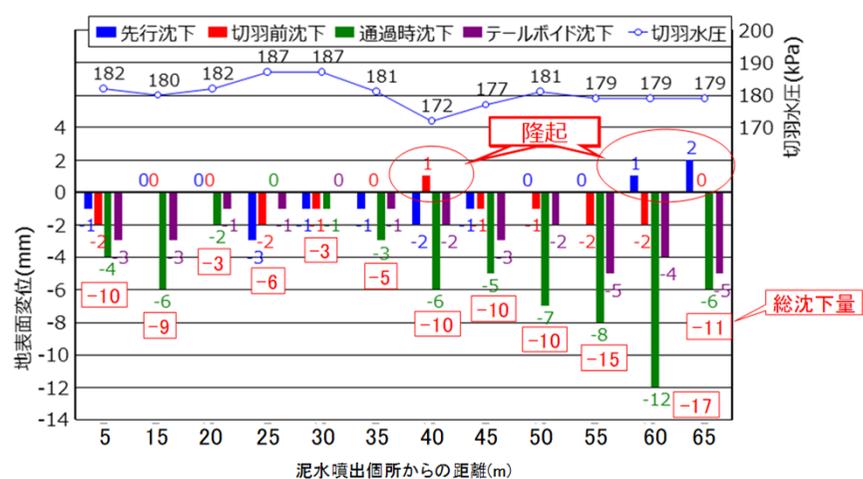
緩い砂礫層



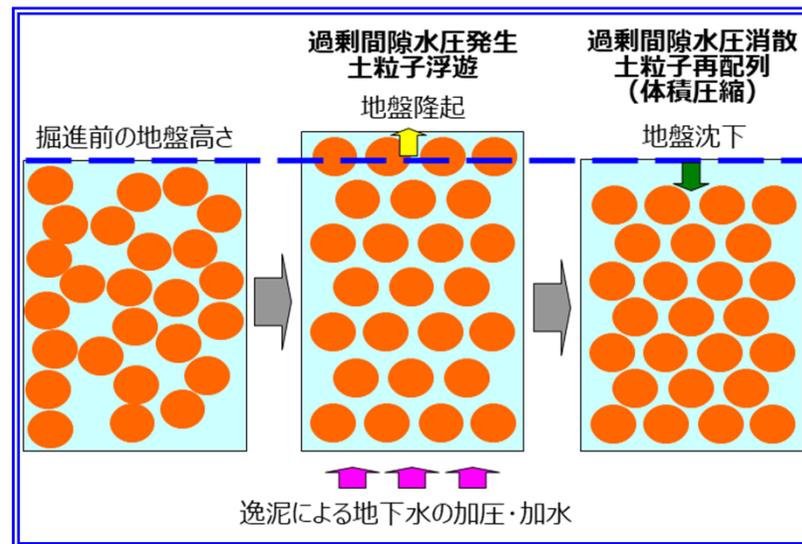
3.トラブル発生時：地表沈下増大区間 切羽圧

地表面沈下，切羽水圧，偏差量と想定メカニズム

◆地表面沈下と切羽水圧，偏差量



◆地下水変動時の土粒子挙動（想定）

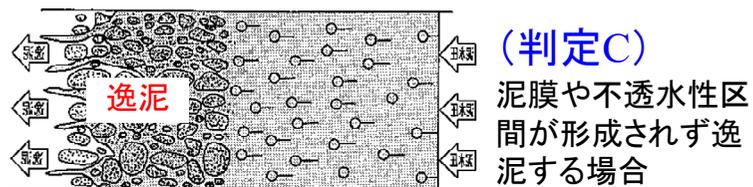
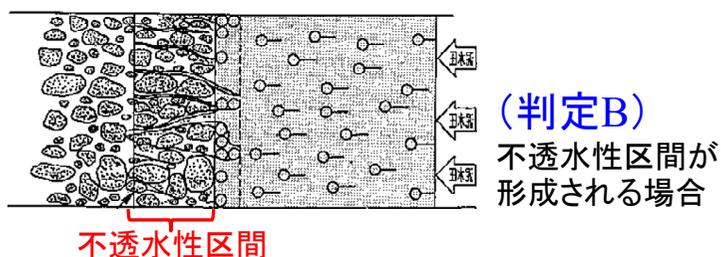
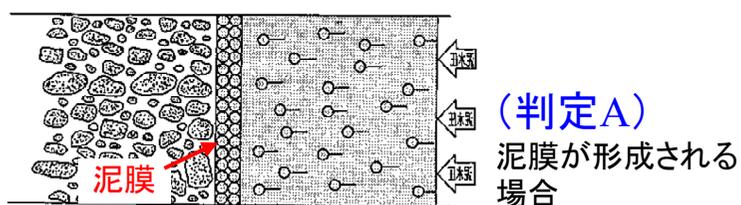


切羽水圧増加は隆起に繋がるので
180kPaを継続
⇒偏差量を-10%を超過，継続。
⇒地表面沈下の増大。

4.掘進停止再開時の対応と工夫

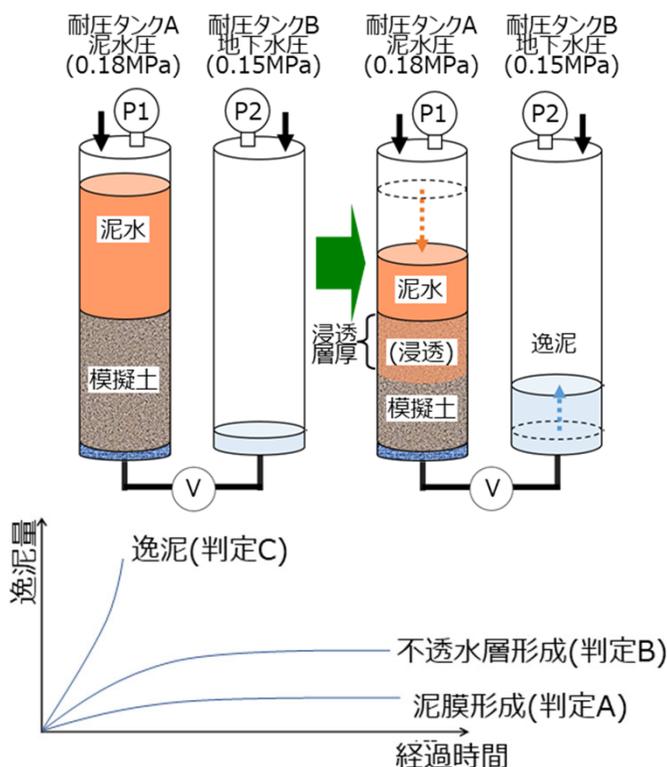
泥水浸透試験による泥水品質の改良

- ◆ 地山への泥水の浸透の考え方
特に緩い砂層や砂礫層では逸泥に注意



- ◆ 泥水浸透試験により泥水品質を確認
目的：比重，粘性の向上
(ただし，泥水輸送設備の負担を考慮)

材料・配合：
増粘剤，ゲル化材，粘土系鉱物
これらの組合せ



No.1(Bor-3,4)
判定B
浸透層厚12mm



No.19(Bor-5)
判定C
逸泥

4.掘進停止再開時の対応と工夫

泥水浸透試験による泥水品質の改良

No.	対象地盤	模擬土		泥水					浸透層厚 mm	判定		
		1~7号の重量比率	透水係数 k	配合							性状	
				増粘剤	ゲル化剤	粘土系鉱物 (ヘントナイト)					比重 ρ	ファンネル粘性 Fv
				CMC	ホリマー	βII	α	αII				
g(合計2,000g)	×10 ⁻⁴ m/s	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	—	秒				
1	Bor-3,4	0:1150:400 :250:0:0 :200	1.36	2				1.22	44.08	12	B	
2			1.00	2				1.22	40.19	59	B	
3			1.47	2				1.22	42.62	30	B	
4			1.65	1.5				1.22	36.06	60	B	
5			1.58	1				1.22	32.81	80	B	
6			1.04	1			15		1.22	44.12	逸泥	C
7			1.35	1				2.5	1.22	36.19	*	B
8			1.43	1				5	1.22	41.9	*	B
9			1.75		0.5				1.22	29.21	逸泥	C
10			1.58		2				1.22	33.28	逸泥	C
11			1.31		0.5			30	1.24	41.45	逸泥	C
12			1.09		0.75			30	1.24	43.16	*	B
13			1.30		1			30	1.24	47.31	*	B
14			1.52			50			1.24	37.32	87	B
15			1.25				35		1.24	32.81	逸泥	C
16			1.26				45		1.24	44.54	逸泥	C
17			1.57					30	1.24	38.65	逸泥	C
18			1.31					40	1.24	46.31	逸泥	C
19	Bor-5	1100:360:250 :130:100:0 :60	1.10	2				1.22	44.21	逸泥	C	
20			1.49	3				1.22	73.9	逸泥	C	
21			0.95	4					1.22	測定不能	*	B
22			1.29	1				5	1.22	41.75	65	B
23			1.20	1				10	1.23	45.82	50	B
24			1.07	1	1				1.22	30.59	90	B
25			1.01	1	2				1.22	60.9	80	B
26			1.31		3				1.22	45.23	逸泥	C
27			1.02		0.5			5	1.22	30.56	85	B
28			1.51		1			5	1.22	33.68	75	B
29	Bor-6	0:530:420 :730:130:70 :120	1.59					1.22	27.18	20	B	
30			1.47	1				1.22	41.69	15	B	
31			1.46					5	1.22	29.11	15	B

*:未測定

選定根拠

- 判定がA(泥膜形成), またはB(不透水層形成)である.
- 比重, 粘性が施工可能な範囲である.
- 材料が1種類で作泥しやすい.



- 増粘剤CMC, 添加量1kg/m³を採用
- 比重1.22, 粘性33秒以上を選定
(一般的な値: 比重1.15~1.2, 粘性20~25秒)



No.5(Bor-3,4)
判定B
浸透層厚80mm

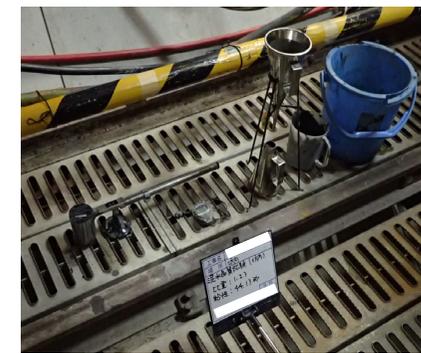
4.掘進停止再開時の対応と工夫

施工上の対策

- ①泥水粘性を35～40秒に増加し、地上の調整槽と坑内切羽で品質測定、管理.
- ②高粘性泥水に対する作泥設備、流体輸送設備の増強.
- ③地表面変位測量の頻度増大（昼夜1時間毎）と路面監視体制の強化.
- ④シールド回りへの可塑状充填材の打設.
- ⑤裏込めの強度増加.

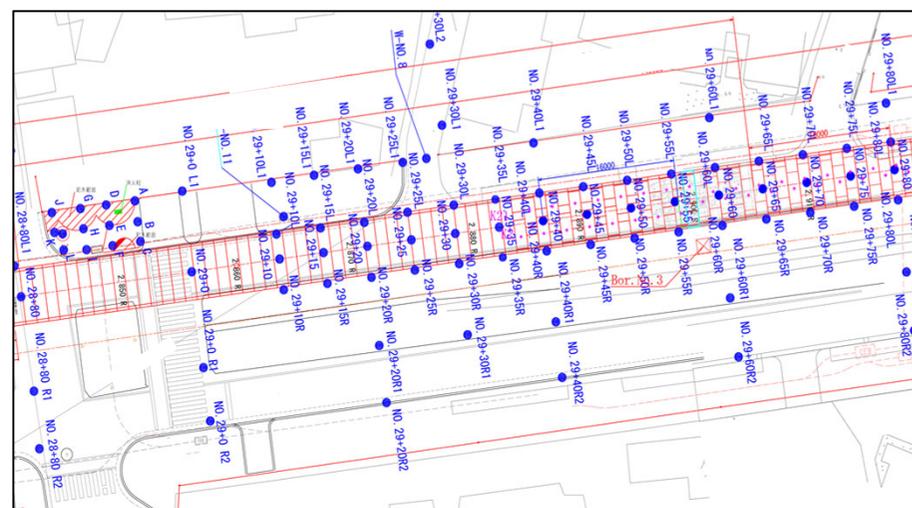


(a)調整槽



(b)坑内

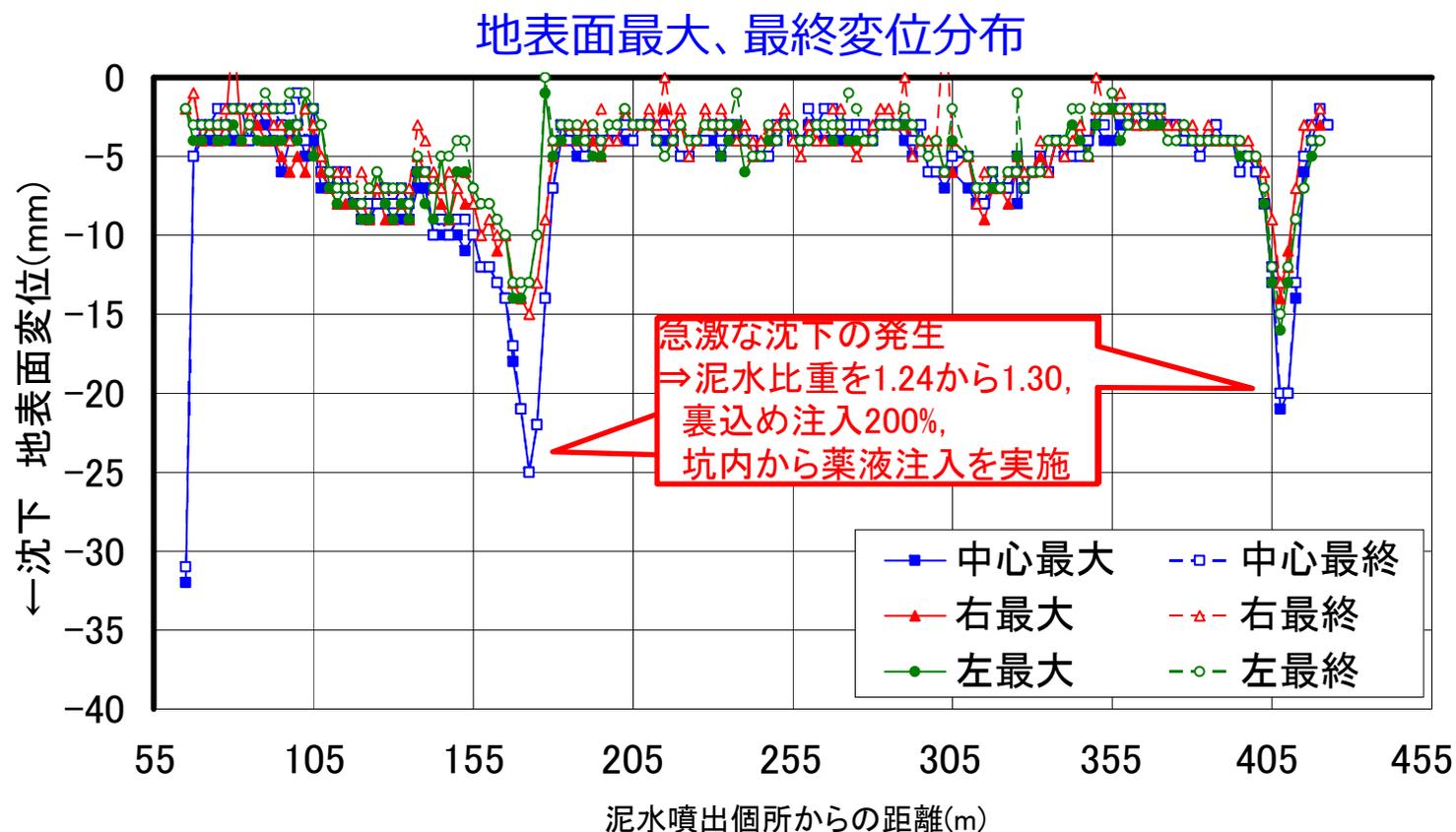
泥水品質管理状況



地表面沈下測定点（例）

4.掘進停止再開時の対応と工夫

施工上の対策と結果



概ね10mm以内でシールド掘進.

一部で局所的な地表面沈下が発生.

⇒ 泥水比重の増加, 裏込め200%, 坑内から薬液注入を実施.

※このページはアンケート結果より事務局が作成

事例 2 - 1 4 (掘進停止再開に関する事例)

シールド概要	地表部への 予期せぬ影響	トラブル発生状況	トラブル対応・工夫事例
<p>泥土圧シールド</p>	<p>有(河川での漏気と小陥没)</p>	<p>・当初計画では、風化花崗岩を硬質な土砂相当と評価していた。そのため、シールド掘進は、強化型先行ビットによる切削を主体とし、路線内でのビット交換は不要と判断していた。しかし、シールド発進後に約60m掘進後、カッタートルクの増大および掘進速度の低下に陥った。これにより、ビットの早期摩耗および面板、チャンバーの閉塞が推定された。</p>	<p>■トラブル対応策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・計画的に2カ所でのビット交換を行う計画へ変更 ・強化先行ビットの増設とビットの高低差配置によるビットの長寿命化 ・面板の改造(開口率のアップ34%→38%) ・カッター中心付近への攪拌翼の追加 ・高分子系とベントナイトを併用した添加材へ変更
<p>シールド径: φ5 ~10m</p>		<p>・また、当初計画では、添加材として気泡材を選定していたが、風化花崗岩の方状節理(割れ目)を通じて、河床への漏気と小陥没が観察されたため、添加材を見直した。</p>	<p>■対応後の状況</p> <ul style="list-style-type: none"> ・結果としてカッタートルクの増大傾向は解消されなかったが、添加材の変更により河床への漏気や小陥没は抑制できた。また、ビット交換計画および長寿命化により変更計画どおり、シールド掘進を完了した。
<p>土被り: 9.3 ~14.4m</p>		<p>・シュミットロックハンマーによる原位置地山の調査結果では、事前調査を上回圧縮強度(平均16MPa)を確認。風化岩においては、ボ-リングによるコアサンプリングでは強度低下が生じ、事前調査時点で正確なデータが得られなかったと推察される。</p>	
<p>地下水位: GL-4.8m</p>			
<p>地質概要: シールド断面は概ねN値50~300を示すDH級の風化花崗岩が分布し、一部区間で掘削断面下半にCL級風化花崗岩を想定</p>			
<p>地表部の土地利用: 河川</p>			

泥土圧シールドのトラブル事例とその対応

【事例2-14】

1. トラブルの概要（地表面への予期せぬ影響「あり」）

トラブル①: 河床への漏気および小陥没

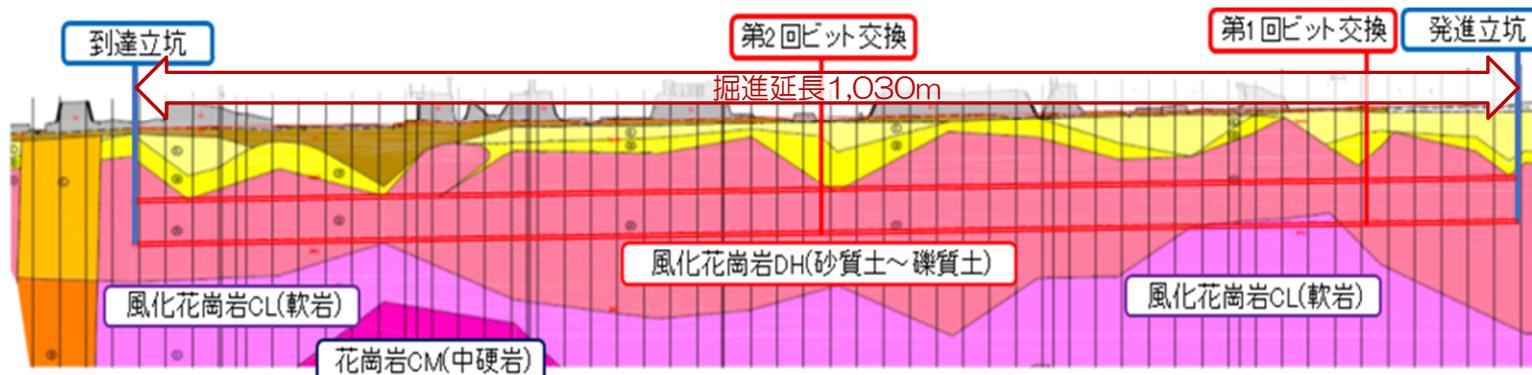
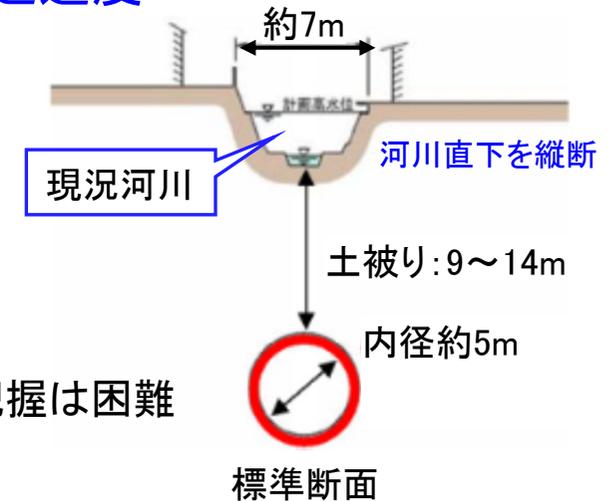
トラブル②: 硬質地盤(風化花崗岩)での高トルク・低掘進速度

◆事前の地質調査結果

シールド断面の地質(施工前の想定)

- ・D_H級の風化花崗岩(N値50~300)が主体
- ・一部、C_L級の風化花崗岩(一軸圧縮強度5MN/m²以下)

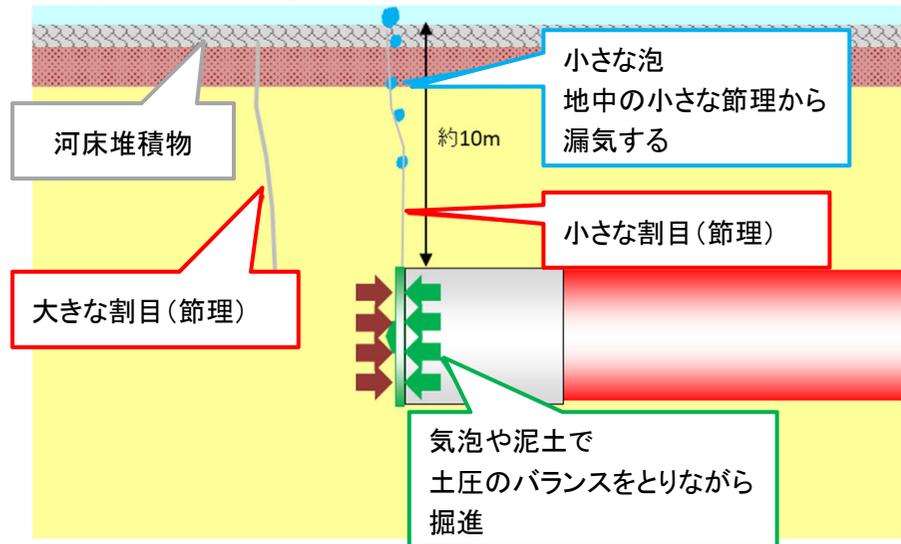
- ・河床への漏気、小陥没の原因と推定される「方状節理」の事前把握は困難(過去にも同様の原因と考えられる陥没事例は複数ある)
- ・当初計画時は、硬質な土砂相当の地盤と評価(コア観察含む)
- ➡ビット交換時の原位置試験より16MN/m²の軟岩を確認(想定より3倍上の強度)
- ・強化型先行ビットを主体とした摩耗対策によりビット交換は不要と想定
- ➡2回のビット交換へ計画変更(ローラーカッターは地盤の強度不足による回転不良と切削土の付着による偏摩耗リスクを考慮し不採用)



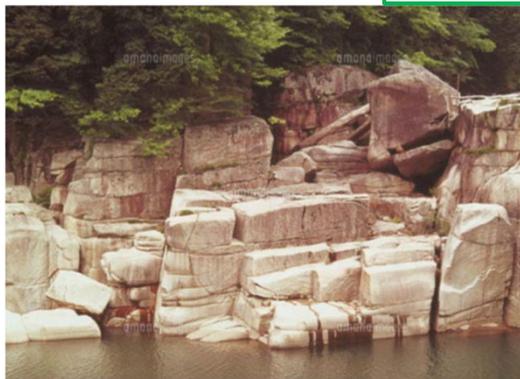
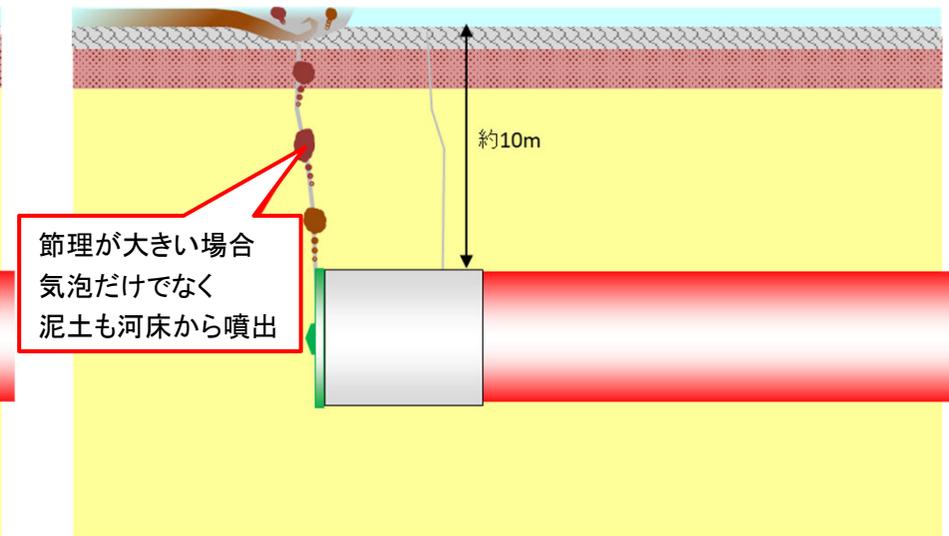
2. トラブル①の概要：河床への漏気および小陥没

- ・細粒分の多い硬質地盤に適した添加材として気泡材を使用
→風化花崗岩の特徴である方状節理と気泡に起因する漏気、小陥没が発生

＜方状節理が小さい場合（漏気）＞



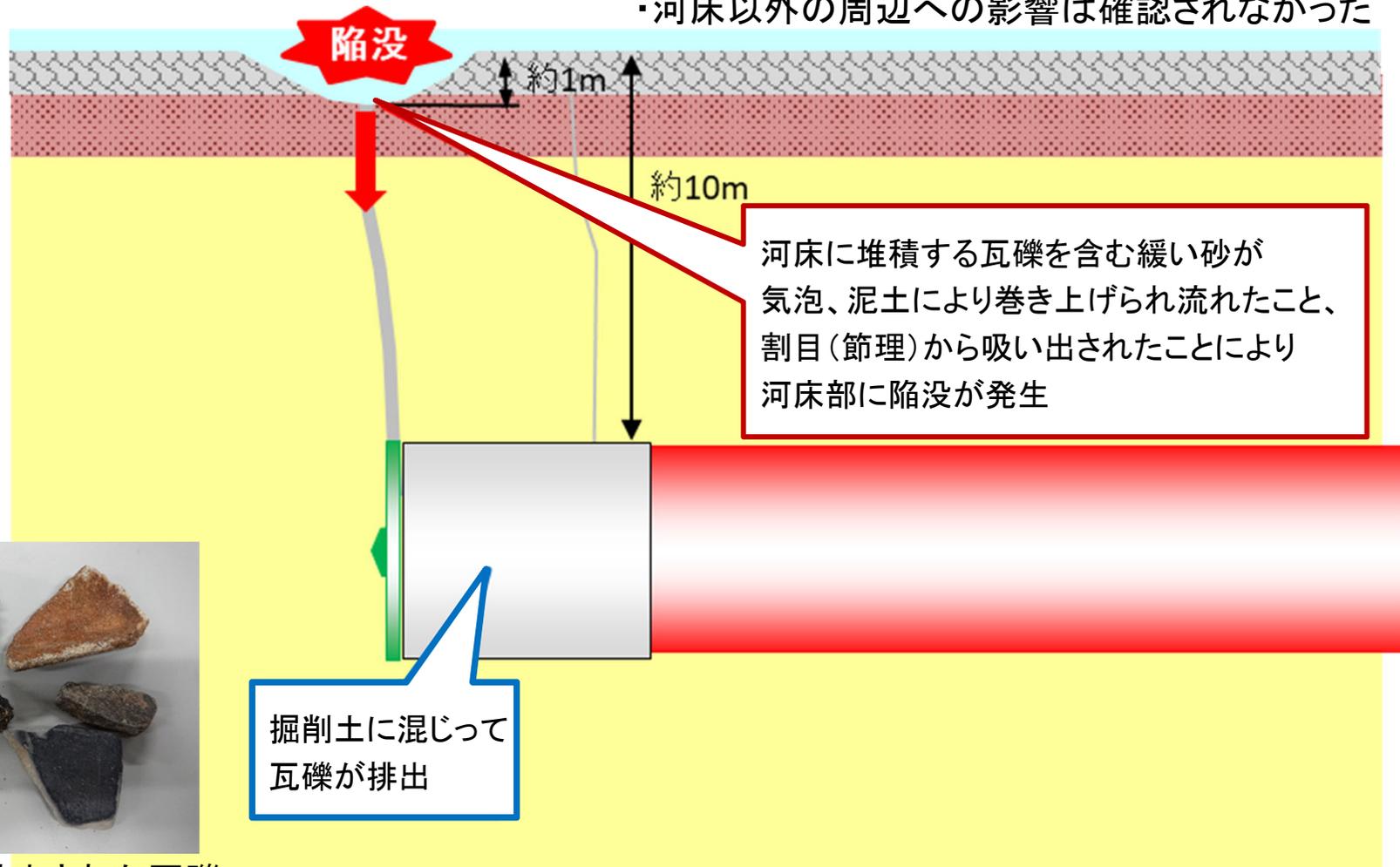
＜方状節理が大きい場合（泥土の噴出）＞



方状節理のイメージ

2. トラブル①の概要：河床への漏気および小陥没

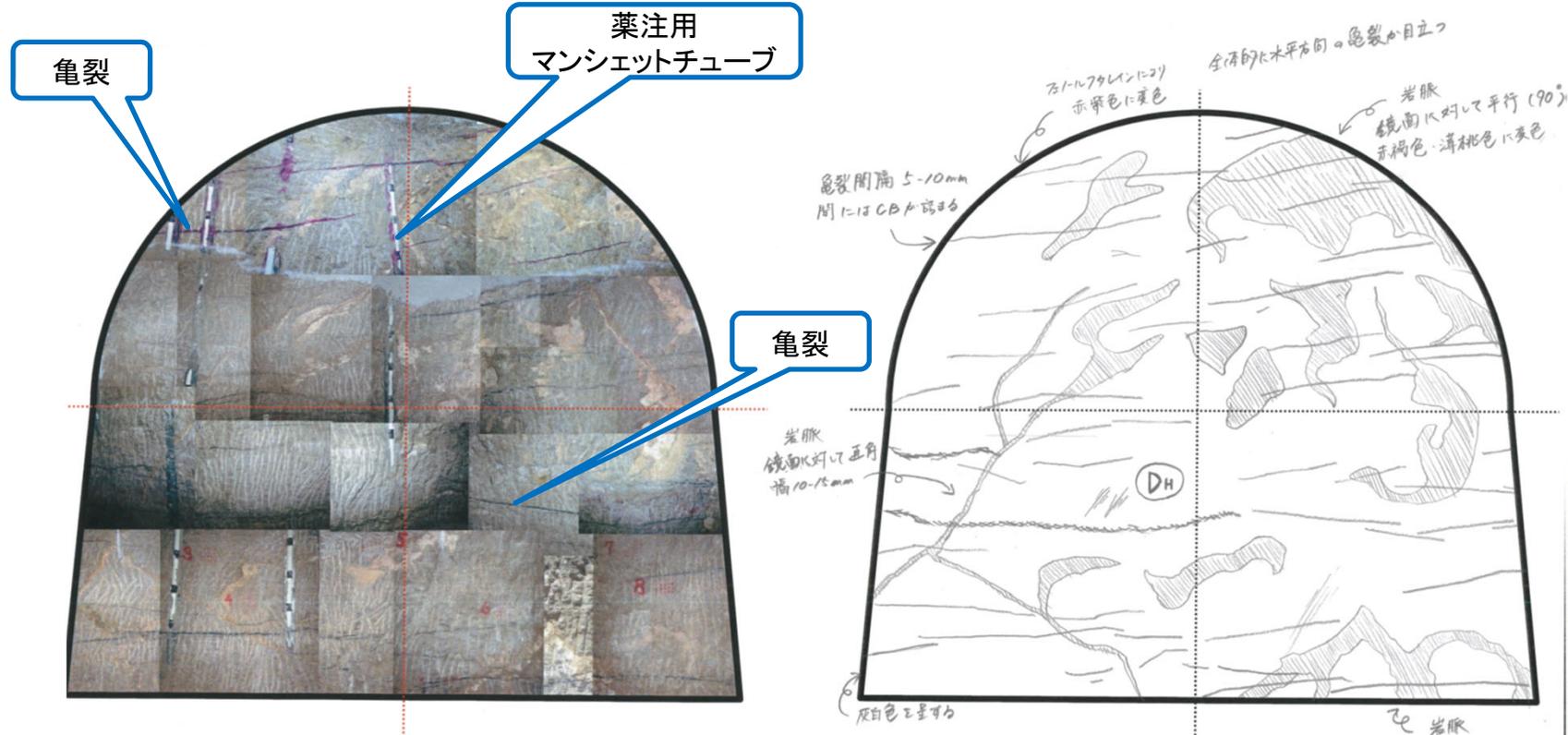
- ・漏気・逸泥の確認後2時間程度で陥没
- ・河床以外の周辺への影響は確認されなかった



掘削土と共に排出された瓦礫

2. トラブル①の概要：河床への漏気および小陥没

◆切羽観察結果（第二回ビット交換時に実施）



- ・亀裂(節理)は5～10mm幅の水平方向へ発達したものが多く
- ・全体的に硬質でハンマーの強打により叩いた部分の表面のみ崩れる
- ・深層部は硬く、機械掘削を行う場合はリッパが必要となる程度の強度を示す
- ・掘削断面で一様ではなく、部分的に想定以上に硬い個所あり
- ・第二回ビット交換時に原位置試験を実施 → 平均16MN/m²(想定以上の強度)

3. トラブル①発生時：河床への漏気・小陥没対策

◆ 添加材の変更による漏気(逸泥)・小陥没対策

当初計画：硬質地盤に適した添加材として**気泡材**を採用



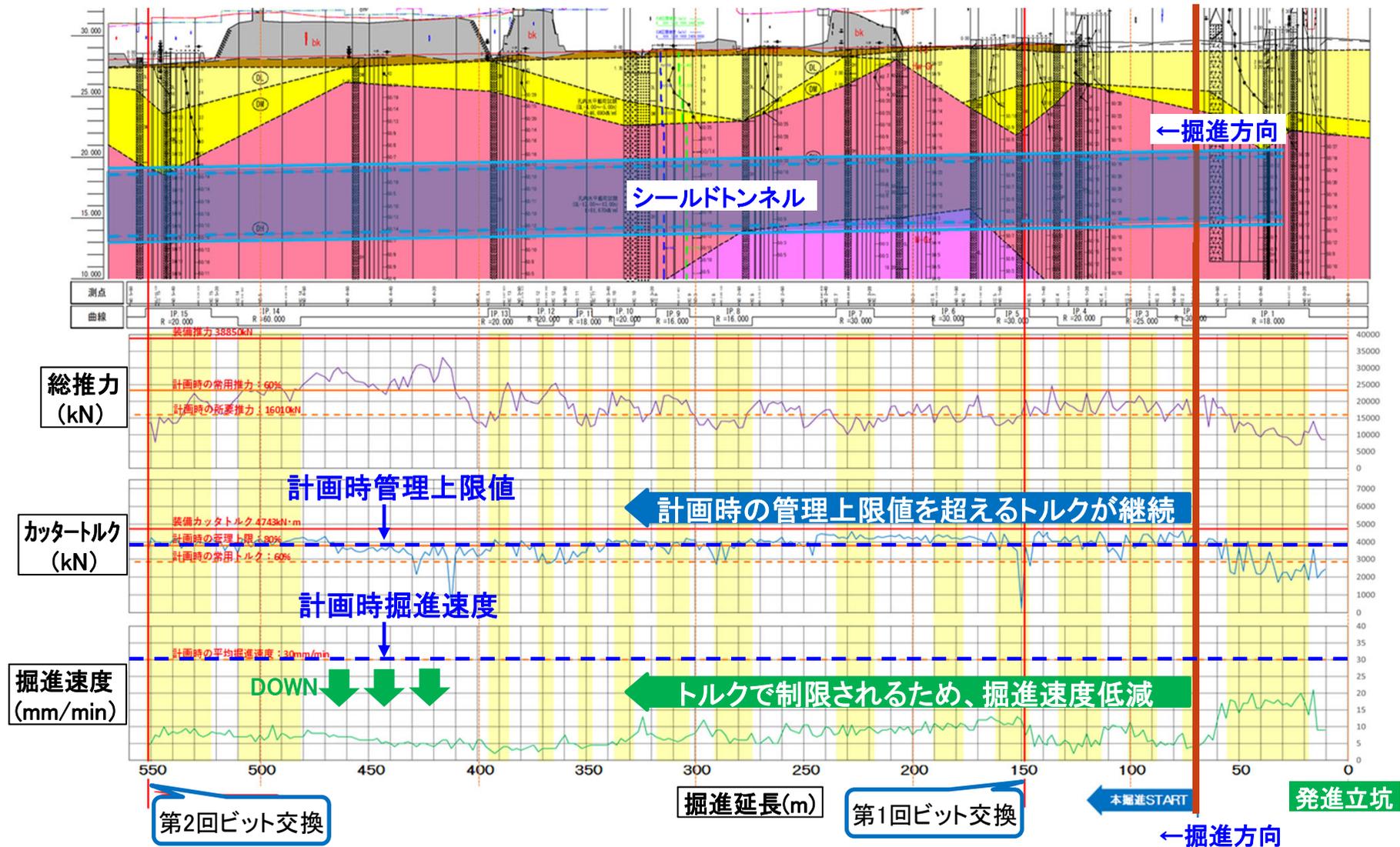
風化花崗岩の亀裂(節理)等を通じた漏気(逸泥)、小陥没を確認



1回目ビット交換以降、添加材を変更

高分子系(凝集剤, 邂逅剤, 界面活性剤)+ベントナイト+加水
➡河床への漏気・小陥没を抑制

4. トラブル②の概要:硬質地盤(風化花崗岩)での高トルク・低掘進速度



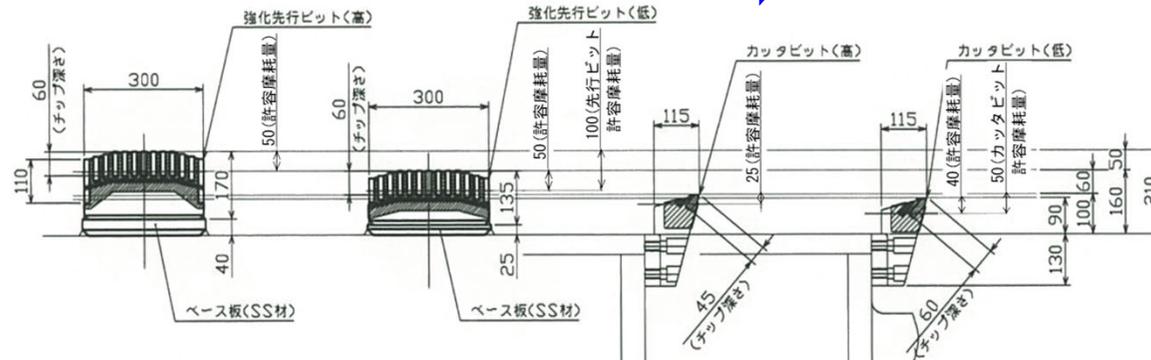
カッタートルク上昇に伴う掘進速度低下 → ビット早期摩耗対策・閉塞対策が必要

5. トラブル②発生時:硬質地盤(風化花崗岩)の掘進対策

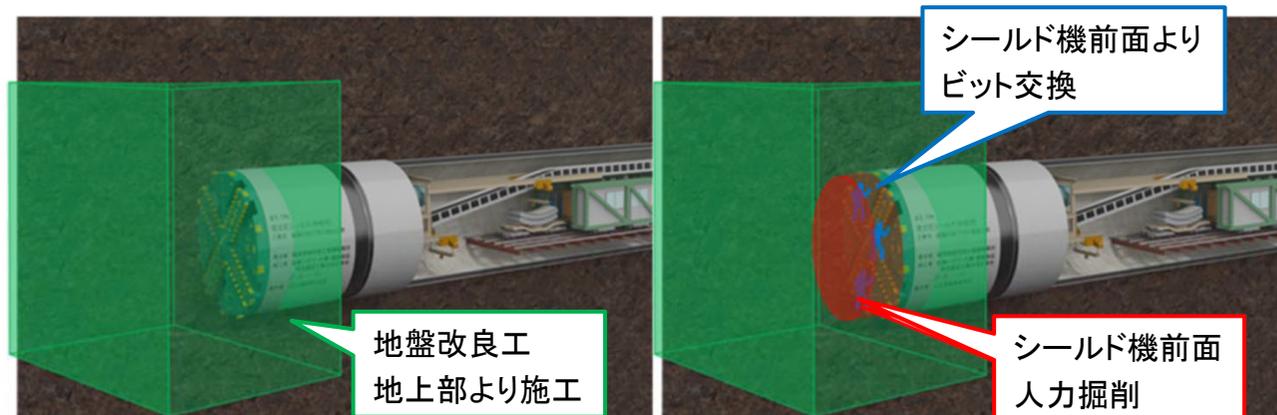
◆ビットの早期摩耗対策

- ・強化型先行ビット: 増設および高低差配置
- ・カタビット: 高低差配置

➡ ビットの長寿命化



- ・2回のビット交換(地上から地盤改良可能な箇所に限定)を実施する計画へ変更
 第1回:掘進延長136m地点(ビット改造, 面板改造等含む)
 第2回:掘進延長542m地点(残り約500mをビット交換なし)

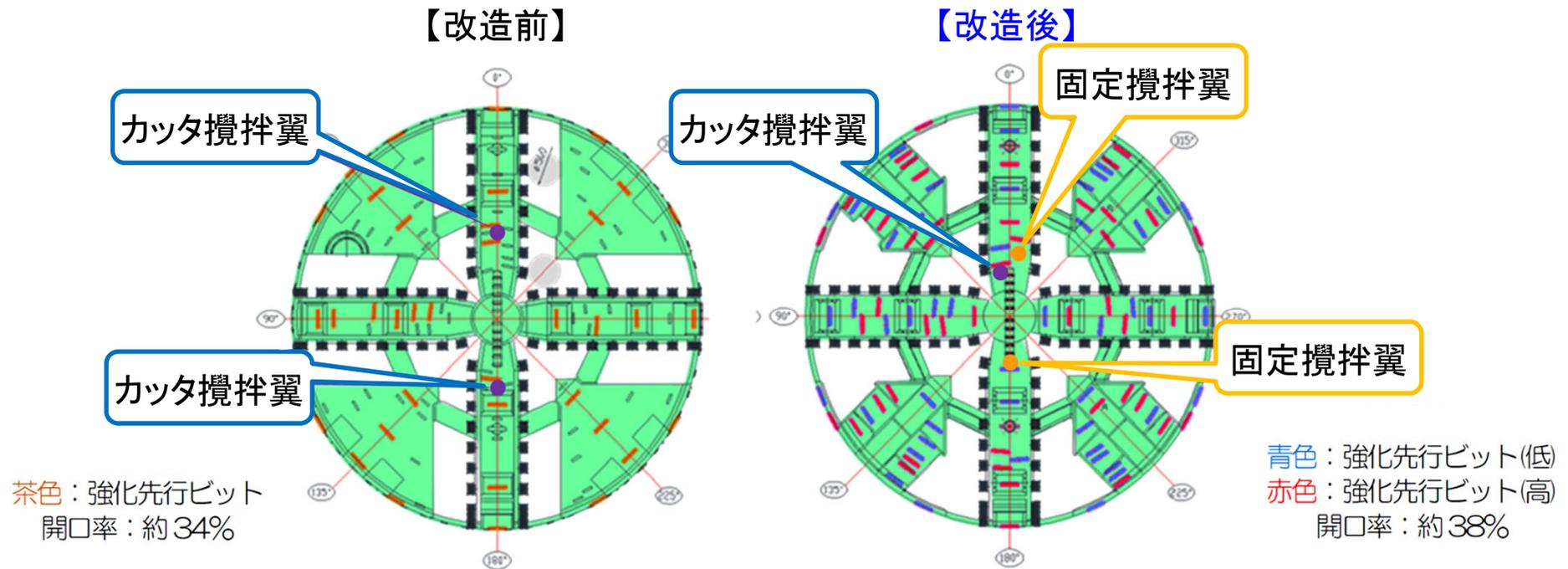


ビット交換イメージ

5. トラブル②発生時：硬質地盤（風化花崗岩）の掘進対策

◆ 面板・チャンバーの閉塞対策

- ・1回目のビット交換時にカッタ中央部に掘削土砂の閉塞を確認
- ➡補助面板の一部を切り欠き，面板の開口率を34%から38%に拡大
カッタ中心付近への攪拌翼の追加等を実施



面板の改造と攪拌翼の追加

5. トラブル②発生時:硬質地盤(風化花崗岩)の掘進対策

◆添加材の変更による高トルク・低掘進速度対策(河床への漏気対策含む)

- ・室内試験(切削土、泥土の性状確認)を実施し、1回目のビット交換以降は気泡材から**高分子系(凝集剤, 邂逅剤, 界面活性剤)とベントナイトを併用した添加材に変更**

【室内試験】

- ・分散剤添加による分散確認(分散剤添加試験)を実施
切削土や泥土の土粒子の凝集による固結化、粘性化に起因する攪拌抵抗の増加を想定
切削土、泥土(現場配合)に市販の分散剤を添加し、土粒子の沈降状況を確認

土粒子が沈降する
⇒分散剤が効果を発揮せず、土粒子の団粒化が発生。
・土粒子が沈降しない
⇒分散剤が効果を発揮し、土粒子が団粒化しない。



分散剤添加による分散確認(切削土)

時間経過で、一部の分散剤で土粒子が沈降したもののほとんどの場合で分散しており、土粒子の団粒化は認められない



分散剤添加による分散確認(泥土)

時間経過で、いずれもの泥土も分散しており、団粒化は認められない

➡チャンバー内で分散しており、攪拌抵抗の増大にはならない

5. トラブル②発生時：硬質地盤（風化花崗岩）の掘進対策

◆硬質地盤（風化花崗岩）の掘進結果

- ・高低差配置によるビットの長寿命化と2回のビット交換で全線掘進完了
- ・高トルク、低掘進速度の状態は解消されず
- ・第2回ビット交換時に原位置試験を実施 → 一軸圧縮強度 $16\text{MN}/\text{m}^2$ を確認
- ・第1回目に実施した面板改造、攪拌翼の追加、添加材の変更により面板・ビットへの掘削土砂の固着やチャンバーやスリットの閉塞はほぼなくなった

カッタ前面の作業スペース



ビット溶接状況

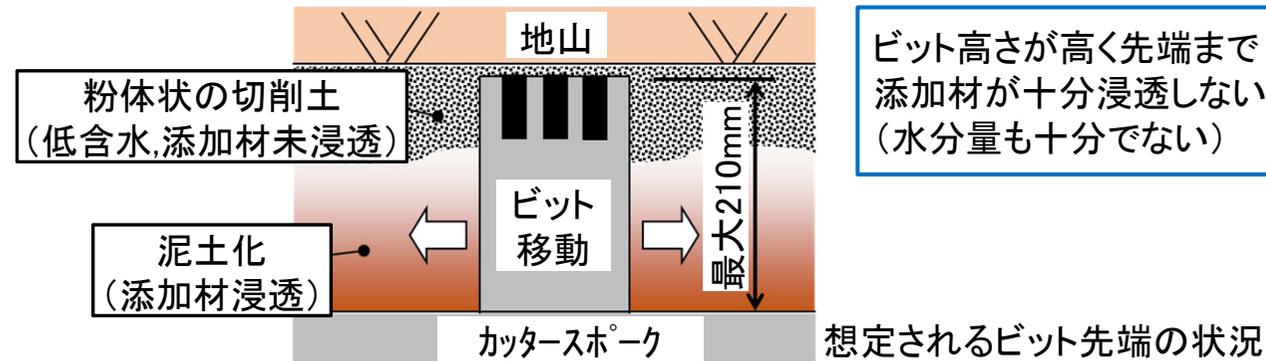


ビット交換状況

5. トラブル②発生時:硬質地盤(風化花崗岩)の掘進対策

◆ 添加材の変更による高トルク状態への対策結果

- ・塑性流動性の確保により、**面板やチャンバーへの掘削土砂の固着・閉塞は改善**
(カッタートルクにおける摩擦抵抗、攪拌抵抗は低下)
- ・一様な地山ではなく、**部分的に想定以上の強度を有していた**
(切削抵抗増。ただし、ビット交換後の再掘進開始時や、毎リングの掘削開始時にはトルクは小さく、地山強度の影響は限定的)
- ・**高トルク, 低掘進速度の状態は解消されず**



【カッタートルクの増大の推察】

- ・ビット高さが大きく、添加材注入孔から離れていると切羽面に添加材が浸透しにくい
 - ・**含水量の小さい岩盤が対象で、地山からの地下水の供給が期待できない**
 - ・泥土圧で拘束されている
- ➡ 仮説: 岩盤の切削ズリの**塑性流動性が十分確保できず、ダイレイタンシー効果によりせん断抵抗が増大**

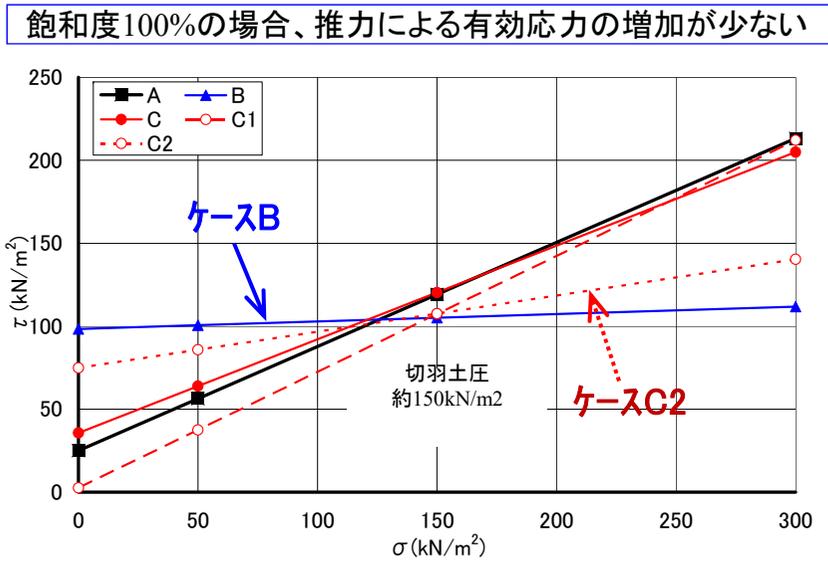
5. トラブル②発生時:硬質地盤(風化花崗岩)の掘進対策

【室内試験による検証】

・切削土, 泥土のせん断抵抗確認(三軸試験)

切羽での添加材の不浸透による切削土の非泥土化に起因する攪拌抵抗の増加を想定し
 切削土や泥土のジャッキ推力による圧縮に起因する、せん断抵抗の増大を確認

試験ケース		A	B	C	C1	C2
		切削土	切削土の 含水比調整	泥土(切削土+添加材)		
		—	Aと比較	Aと比較	Cと比較	
目標含水比	%	15 自然含水比	30	—	—	—
添加材添加量	体積%	—	—	50	25	50
試料作成方法	—	締固め	水中落下 通水飽和	締固め	締固め	水中落下 通水飽和
試料の状態	—	不飽和	飽和	飽和	不飽和	飽和
試験方法	—	UU	UU	UU	UU	UU
土粒子密度	ρ_s g/cm ³	2.627	2.627	2.627	2.627	2.627
湿潤密度	ρ_t g/cm ³	1.926	1.933	2.034	1.981	2.054
乾燥密度	ρ_d g/cm ³	1.673	1.674	1.666	1.675	1.667
間隙比	e	0.57	0.57	0.58	0.57	0.58
含水比	w %	15.1	23.0	22.1	18.2	23.3
飽和度	S_r %	63	100	96	81	100
粘着力	c_u kN/m ²	25.08	98.36	35.75	2.68	74.95
内部摩擦角	ϕ_u 度	32.1	2.6	29.4	34.9	12.3



切削土 (砂状)

【試験ケース】

- A: 切削土.....ビットで切削された直後の土の含水比を自然含水比(15%程度)に調整した試料. 不飽和.
- B: 飽和切削土...Aを飽和させた試料
- C: 泥土.....Aに現場配合の添加材を添加した試料
- C1: 泥土.....Cに対して添加材が不足した試料. 不飽和
- C2: 泥土.....Cを強制的に通水飽和させた試料

有効応力の増加により圧縮、固結⇒かみ合わせによりせん断抵抗増
 ⇒切羽全面でビット先端にまで十分な添加材や水分の供給が必要

6. 今後の課題

- ・ビット交換時に実施した、原位置試験では事前の調査結果を大きく上回る強度が確認された。このことから、風化花崗岩や軟質泥岩において、ボーリングによるコアサンプリングでは強度低下が発生し、正確なデータが得られない可能性が懸念される。
- ・泥土圧シールド工法で「切羽付近だけ」の塑性流動性が十分でない場合であっても、密閉かつ加圧された空間であるため、ダイレイタンシーによる切削土のせん断抵抗の増加（それに伴うカッタートルク増大）が生じる可能性がある。
- ・上記の状態は、含水比の小さい軟岩、砂・砂礫の硬質地盤において、特に長距離施工向けにビット高さが大きい泥土圧シールドの場合、生じやすい。
- ・対策としては、切羽近傍でも塑性流動性を得るため、添加材注入孔を切羽に近づける等の配慮、工夫が必要。

今後のシールド工事に向けた改善点

大断面泥水式シールドでの改善

①事前調査

- 土質急変部のボーリング等の追加調査.
- 周辺工事等のトラブル事例調査.
- リスクが大きい土質の泥水配合・品質の確認試験.

②切羽圧，排土量管理への対応

- 乾砂量算出において，従来型と新横浜方式を併用.
- 掘進停止時の土量測定・積算を実施.
- 土質情報を3次元CIMに登録し，リアルタイムに利用.
(切羽の土質構成や理論乾砂量の計算区間を細分化)

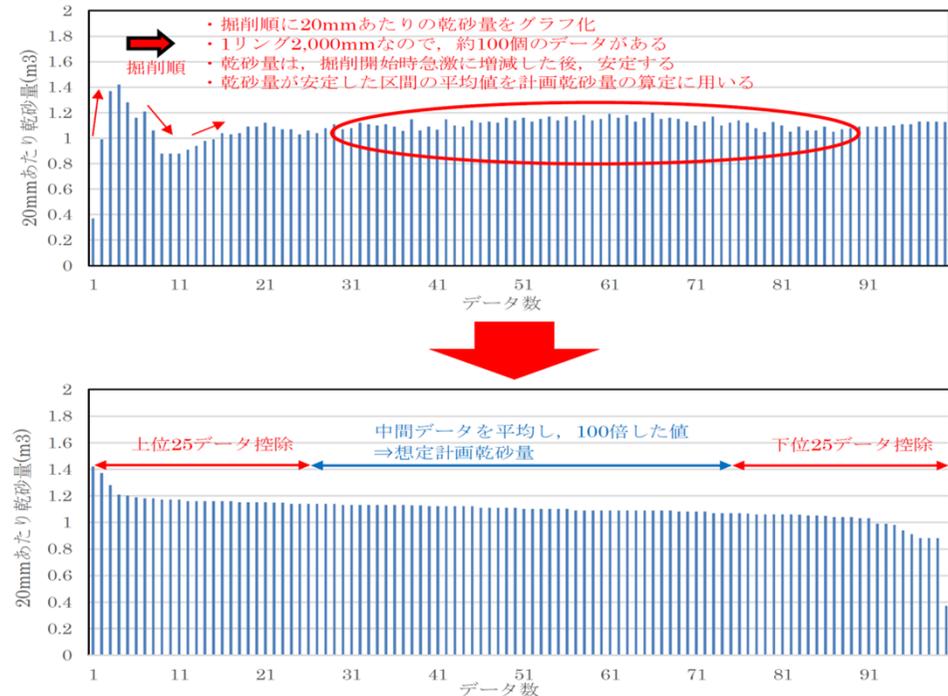
③泥水品質の管理

- 土質変化や泥水の品質低下に対応した地上プラント設備の増設（調整槽の二槽化 等），増強（増粘剤，目詰め材 等への対応）.
- 長距離では，地上プラントと切羽で泥水の品質確認.
- カッター面板に添加材注入口を装備し，切羽に直接添加材（増粘剤 等）を注入.

④閉塞防止・除去対策

- チャンバー排泥口付近へのアジテータの装備，硬質地盤におけるクラッシャーの装備
- バルクヘッドへの高圧洗浄用バルブの装備

■乾砂量の評価



大断面泥土圧シールドでの改善

①事前調査

- 土質急変部のボーリング等による追加調査.
- 周辺工事等のトラブル事例調査.
- リスクが大きい土質の添加材配合の確認試験.

②塑性流動性確保への対応

- 破泡した時の対応（気泡以外の添加材の準備）.
- 低含水比の硬質地盤に対する事前試験の実施，適切な添加材・配合と注水量の選定（含水比30%以上）.
- 圧力変動（上下の圧力差と泥土の攪拌に起因する変動）や経時に対する気泡の強度と耐久性の確保.
- 土質変化に対応して，鉍物系，高分子系，分散材，水等の複数の添加材ラインの準備.
- 切削面への直接の添加材注入，注入孔数の増加.
- チャンバー中央部へのアジテータの装備.

③切羽圧，排土量管理への対応

- チャンバー内土圧と鉛直方向の土圧分布を把握し，塑性流動管理や土圧制御に反映，土量（体積）管理の指標に利用.
- 複数手法の土量計測（ベルトスケール，レーザースキャナー，圧送時は電磁流量計）により排土量を把握.
- チャンバー内掘削土（チャンバー土砂サンプリング装置），スクルーコンベヤー排土の性状確認，記録.
- 排土量と理論掘削土量の比較と統計処理（添加材が地山に逃げることを想定）.
- 土質情報を3次元CIMに登録し，リアルタイムに利用.

