

東京外環トンネル施工等検討委員会
有識者委員会

報 告 書

令和3年3月

東京外環トンネル施工等検討委員会 有識者委員会

はじめに

本報告書は、東京外かく環状道路（関越～東名）（以下、東京外環）のうち、本線トンネル（南行）東名北工事の施工中にその直上で発生した地表面陥没および陥没後に発見された空洞について、その発生メカニズムの特定や再発防止に関して計 7 回開催された「東京外環トンネル施工等検討委員会 有識者委員会」での検討内容を取りまとめたものである。本委員会では、地盤調査やシールドトンネル工事の施工記録等に基づく、陥没や空洞形成に至る複数の要因分析、メカニズムの特定、また、今後このような事象が発生しないようにするための再発防止対策等について、トンネル工学、地質・水文学、地盤工学、施工法を専門とする委員各位のそれぞれの見地から中立的な立場で議論、検討を行い、今回一定の結論を得たものである。

東京外環の本線トンネルは、市街化された地域の大深度地下を国内最大級のシールド機で延長約 16 kmを掘削して構築するものである。基本的に締固まった良好な地盤条件であるが、介在層を有する粘性土層や砂質土層、および、粘性土と砂質土からなる互層など、多種多様な地盤条件下での工事となる。

今回の陥没や空洞形成は、礫が卓越して介在する細粒分が極めて少ない砂層が掘削断面にあり、単一の流動化しやすい砂層が地表付近まで続くという、東京外環全線の中で特殊な地盤条件となる区間において、チャンバー内の良好な塑性流動性・止水性の確保が困難となり、カッターが回転不能になる事象（閉塞）が発生し、これを解除するために行った特別な作業に起因するシールドトンネルの施工が要因であると推定された。また、結果として土砂の取込みが過剰に生じていたと推定され、施工に課題があった。

大断面泥土圧シールドにおいては、切羽の安定性確保に細心の注意を払うことはもちろんのこと、得られる施工データを適切に評価することが重要であり、危険な予兆が確認された場合は、適切に対処することが求められる。

今回、様々な重要な教訓が得られたが、今後の都市部での安全なシールドトンネル工事の参考となることを切に願う。

令和 3 年 3 月

東京外環トンネル施工等検討委員会有識者委員会報告書
— 目次 —

1. 陥没・空洞の概要と発生経緯	
1.1 本線トンネル（南行）東名北工事の概要	1-1
1.2 陥没発生・空洞確認の経緯と概要	1-1
1.3 陥没発生・空洞確認直後の応急復旧	1-2
2. 委員会の設置	
2.1 委員会の目的	2-1
2.2 委員名簿	2-1
2.3 開催経緯	2-1
3. 調査結果	
3.1 調査概要	3-1
3.2 地盤状況の調査結果（エリアA）	3-2
3.3 地下水状況の調査結果について	3-18
3.4 人工物の存在による影響等の調査結果	3-25
3.5 地歴調査結果	3-26
3.6 これまでの掘進区間の地盤状況の調査結果（エリアB）	3-28
3.7 調査結果のまとめ	3-31
4. 地盤の特性	
4.1 事前調査	4-1
4.2 東京外環の地盤状況	4-2
4.3 地盤特性のまとめ	4-3
5. 施工データ	
5.1 施工に関する経緯、施工方法の決定理由	5-1
5.2 掘進の経緯	5-4
5.3 シールド掘進データ（エリアAの確認）	5-7
5.4 シールド掘進に伴う振動計測結果	5-10
5.5 カッターヘッド回転不能事象の発生	5-11
5.6 掘進中の塑性流動化状況の把握	5-24
5.7 落とし戸実験結果	5-26
5.8 シールド掘進・移動時のボイド部による地山の緩みについて	5-29
5.9 空気の塊の上昇による影響について	5-30
5.10 トンネル掘削の振動による締固め（局所的な液状化）による 影響について	5-30
5.11 シールド施工時の土砂噴発等による影響について	5-30
5.12 シールド掘進データ（エリアBの確認）（リング代表値）	5-31
5.13 施工データのまとめ	5-35
6. 陥没・空洞の推定メカニズム	
6.1 陥没・空洞事象に関して議論すべき要因の分析	6-1
6.2 陥没・空洞形成における想定される要因のまとめ	6-3
7. 地盤の緩みの状況および補修について	
7.1 地盤の緩みの状況について	7-1
7.2 地盤の緩みの補修について	7-2
8. 再発防止対策について	
8.1 陥没・空洞の推定メカニズムを踏まえたトンネル再発 防止対策の基本方針	8-1
8.2 管理のフロー	8-6
8.3 掘進管理項目および掘進管理基準の新旧対比表	8-7
8.4 地域の安心を高めるための取り組み	8-8
別冊 参考資料	

1. 陥没・空洞の概要と発生経緯

1.1 本線トンネル（南行）東名北工事の概要

東京外かく環状道路（関越道～東名高速）（以下、東京外環）のうち、本線トンネル（南行）東名北工事は、東名立坑より発進し、井の頭通りまで約 9.2km の南行トンネルを構築する工事である。国内最大級の口径かつ長距離のシールド工事であり、東日本高速道路株式会社（NEXCO 東日本）関東支社が発注し、鹿島・前田・三井住友・鉄建・西武からなる共同企業体（JV）が施工するものである。

1.2 陥没発生・空洞確認の経緯と概要

令和 2 年 10 月 18 日に東名側本線シールド（南行）工事現場の東京都調布市東つつじヶ丘 2 丁目付近シールドトンネル直上地表部において 5m×3m 程度、地中部において 6m×5m 程度、深さは約 5m 程度と推定される地表面陥没が発生した。

また、その後の陥没箇所周辺の調査において、同 11 月 3 日に空洞①（地表面からの空洞深度約 5m、幅約 4m×長さ約 30m、厚さ約 3m）、同 11 月 21 日に空洞②（地表面からの深度約 4m、幅約 3m×長さ約 27m、厚さ約 4m 程度）、令和 3 年 1 月 14 日に空洞③（地表面からの深度約 16m、幅約 4m×長さ約 10m、厚さ約 4m 程度）が確認された。

これら陥没発生や空洞発見時の詳細な経緯を表 1.2.1 に示す。

表 1.2.1 陥没等発生時の詳細経緯

陥没経緯		
日付	時刻	内容
10 月 17 日	夕方	定点観測している地表面観測では、特に変化が無いことを確認
10 月 18 日	9:30	巡回中に当該箇所で地表面沈下を確認
	11:50	NEXCO 東日本・現場担当者が現地に到着
	12:20	調布警察が現場に到着・市道通行規制開始
	12:30	地表面の陥没を確認
	13:30	周辺住民に避難要請を開始
	13:50	上下水道、ガス、電気のライフラインに異常が無いことを確認（ライフライン担当企業が現地で確認）
	16:00	トンネル専門家に応急措置として、砂で埋土する事の見解を伺い、了解を得た
	16:10	調布市から陥没箇所の早期埋土について要望
	16:40	応急措置として、砂による埋土を指示
	17:00	明日以降のシールドトンネル工事の一時中止を指示
	17:00	NEXCO 東日本が当該箇所の陥没について記者発表
10 月 19 日	4:25	応急措置としての砂による埋土が完了

空洞①経緯

日付	時刻	内容
11 月 2 日	12：20	陥没箇所から約 40m 北にて、ボーリング調査中に空洞の可能性を確認（地下約 5m）
	14：00	空洞範囲の調査に着手 ・貫入調査（スウェーデン式サウンディング試験）を実施 ⇒地表面の地盤が固く調査が難航
	17：00～	常時監視体制を構築（以降体制継続）
11 月 3 日	10：00～16：00	レーザースキャナ等による調査実施 ・地下水面上の確認の結果、幅約 4m×長さ約 30m の空洞を確認 NEXCO 東日本が有識者に空洞の対応について見解を伺う。 [有識者見解] ・空洞の状況・大きさから、直ちに地表面に変状を及ぼすものではなく、緊急的な対応は必要ないが、空洞は早期に充填することが望ましい
11 月 4 日	10：00～12：00	NEXCO 東日本から近隣住民へ説明開始
11 月 7 日	9：00～	充填作業開始
11 月 24 日	15：50	充填作業完了

空洞②経緯

日付	時刻	内容
11 月 21 日	14：00	陥没箇所から約 30m 南にて、ボーリング調査中に空洞の可能性を確認（地下約 4m） 空洞範囲の調査の着手を指示（レーザースキャナ等の手配） 常時監視体制を構築（以降体制構築）
	20:00～翌 2:00	空洞範囲の調査に着手 レーザースキャナ等による調査実施 ・地下水面上の確認の結果、幅約 3 m×長さ約 2 7 m の空洞を確認 NEXCO 東日本が有識者に空洞の対応について見解を伺う。 [有識者見解] ・空洞の状況・大きさから、直ちに地表面に変状を及ぼすものではなく、緊急的な対応は必要ないが、空洞は早期に充填することが望ましい NEXCO 東日本から近隣住民へ説明開始
11 月 22 日	9：00～	NEXCO 東日本から近隣住民へ充填作業の実施を説明 充填作業準備の着手
11 月 23 日	9：00～	充填作業開始
12 月 3 日	10：10	充填完了（確認）

空洞③経緯

日付	時刻	内容
1 月 14 日	12：00	陥没箇所から約 110m 北にて、ボーリング調査中に空洞の可能性を確認（地下約 16m） 空洞範囲の調査の着手を指示（音響探査等の手配） 常時監視体制を構築（以降体制構築）
	12：30～22：00	空洞範囲の調査に着手 音響探査等による調査実施 ・地下水面下の確認の結果、幅約 4 m×長さ約 1 0 m の空洞を確認 NEXCO 東日本から近隣住民へ説明開始 NEXCO 東日本が有識者に空洞の対応について見解を伺う。 ・有識者見解 「空洞深度と幅等から、直ちに地表面に変状を及ぼすものではなく、緊急的な対応は必要ないが、空洞は早期に充填することが望ましい」
1 月 15 日	8：00～	NEXCO 東日本から近隣住民へ充填作業の実施を説明 充填作業準備の着手
1 月 18 日	13：00～	充填作業開始
1 月 22 日	10：30	充填作業完了

以降、令和 2 年 11 月 3 日に陥没地点北側で確認された空洞を『空洞①』、令和 2 年 11 月 21 日に陥没地点南側で確認された空洞を『空洞②』、令和 3 年 1 月 14 日に陥没地点北側で確認された空洞を『空洞③』として取扱うものとする。

また、本委員会では、既掘削区間について、地盤の特性の違いから、東久留米層のうち掘削断面において礫層が混ざり合う区間から北側をエリア A と呼び、それより南側をエリア B と便宜上定義している。

1.3 陥没発生・空洞確認直後の応急復旧

陥没箇所は、発生した 10 月 18 日に即日、砂 140m³ で埋戻しが行われ、翌 10 月 19 日に完了した。また、空洞①については、11 月 7 日から流動化処理土および高流動材料（600m³）で充填が行われ、11 月 24 日に完了、空洞②については、11 月 23 日から流動化処理土および高流動材料で充填（200m³）が行われ、12 月 3 日に完了、空洞③については 1 月 18 日から高流動材料で充填（90m³）が行われ、1 月 22 日に完了した。

2. 委員会の設置

2.1 委員会の目的

東京外かく環状道路（関越～東名間）事業においてトンネルの構造、地質・水文、施工技術等について、より中立的な立場での確認、検討することを目的として、「東京外環トンネル施工等検討委員会」の学識委員等から構成する「東京外環トンネル施工等検討委員会 有識者委員会」を設置するものである。

2.2 委員名簿

委員長 小泉 淳 早稲田大学名誉教授
委 員 赤木 寛一 早稲田大学理工学術院教授
砂金 伸治 東京都立大学都市環境学部教授
大島 洋志 （一社）日本応用地質学会名誉会員
日下 敦 （国研）土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループ上席研究員
桑野 玲子 東京大学生産技術研究所教授
小山 幸則 立命館大学総合科学技術研究機構上席研究員
西村 和夫 東京都立大学理事
真下 英人 （一社）日本建設機械施工協会施工技術総合研究所長
水谷 敏則 （一財）先端建設技術センター理事

【五十音順・敬称略】

2.3 開催経緯

【第1回】

日時：令和2年10月19日（月）15:00～16:50
場所：NEXCO 東日本関東支社東京外環工事事務所 会議室
議題：地表面陥没事象について

【第2回】

日時：令和2年10月23日（金）10:00～11:30
場所：NEXCO 東日本関東支社東京外環工事事務所 会議室
議題：調布市地表面陥没に関する調査方針について
シールドマシン停止に伴う保全措置について

【第3回】

日時：令和2年11月5日（木）10:00～11:30
場所：NEXCO 東日本関東支社東京外環工事事務所 会議室
議題：地表面陥没箇所周辺の地盤調査で確認された地中の空洞について

【第4回】

日時：令和2年11月27日（金）持ち回り開催
場所：持ち回り開催
議題：地表面陥没箇所周辺の地盤調査で新たに確認された地中の空洞について
地表面陥没箇所周辺の調査の進捗状況について

【第5回】

日時：令和2年12月18日（金）10:00～12:30
場所：NEXCO 東日本関東支社東京外環工事事務所 会議室
議題：調査状況（中間報告）について
地盤の特性について
施工データについて
陥没・空洞の要因分析について
東京外環（関越～東名）トンネル工事の安全・安心確保の取組みの 見直し（暫定版）について

【第6回】

日時：令和3年2月12日（金）10:00～12:45
場所：NEXCO 東日本関東支社東京外環工事事務所 会議室
議題：調査結果について
地盤の特性について
施工データについて
陥没・空洞の推定メカニズムについて
地盤の緩みの状況および補修について
再発防止対策の基本方針について

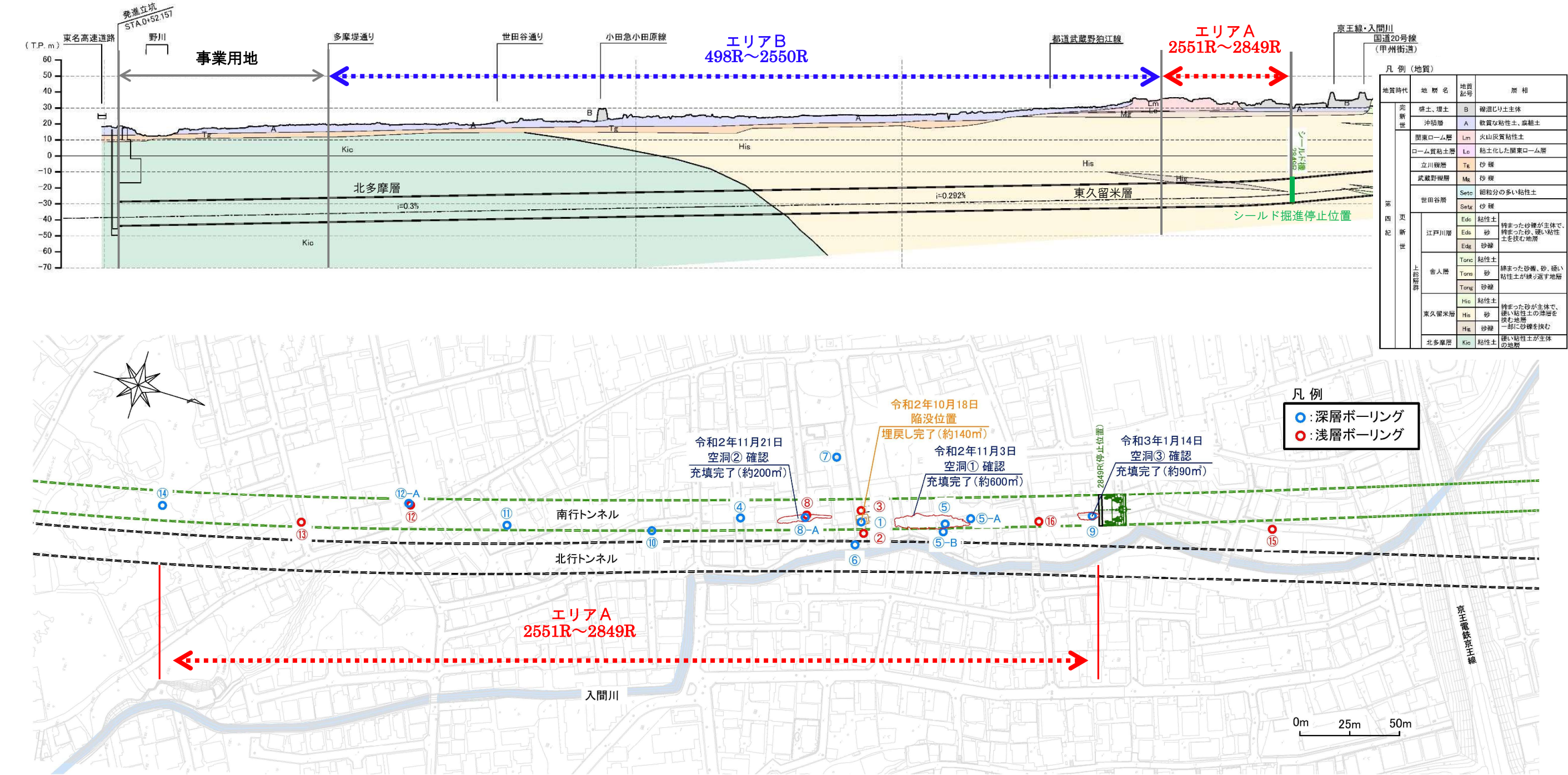
【第7回】

日時：令和3年3月19日（金）10:00～12:20
場所：NEXCO 東日本関東支社東京外環工事事務所 会議室
議題：再発防止対策について
「報告書」のとりまとめ

3. 調査結果

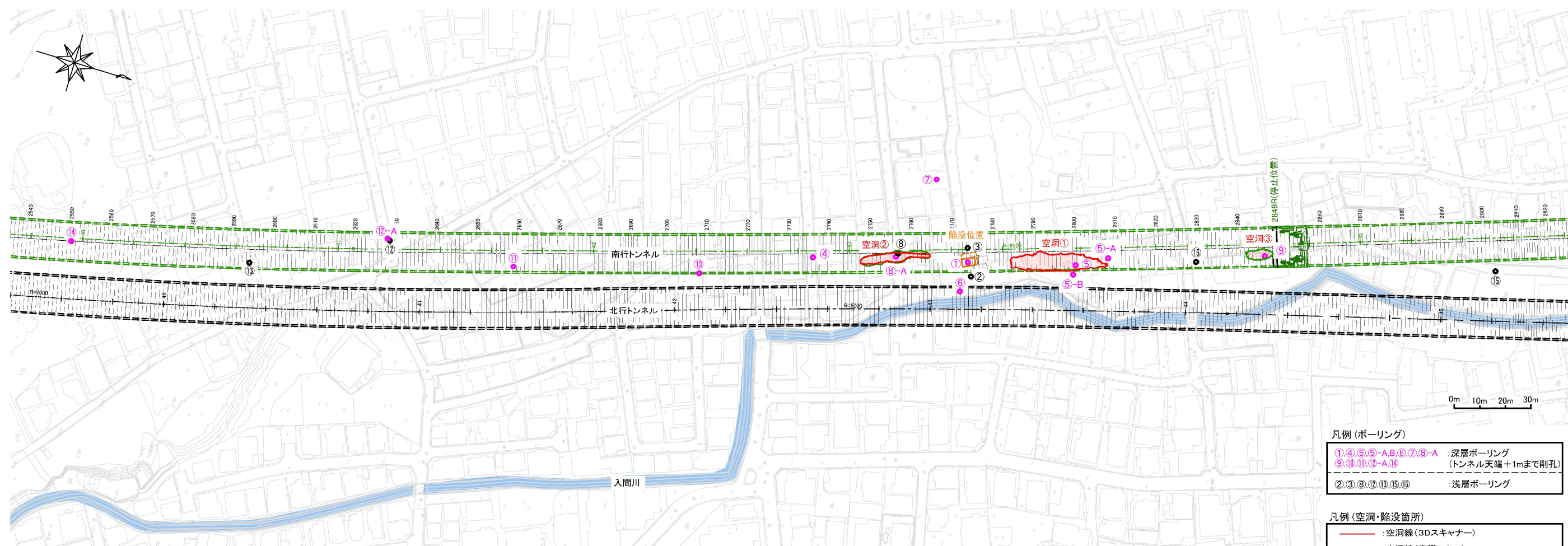
3.1 調査概要

令和2年10月18日に発生した陥没事象等の原因究明のため、「地盤状況の調査」、「地下水状況の調査」、「地歴、文献、埋設物状況の再確認」により当該区域および周辺の地盤状況等の確認を行った。



3.2 地盤状況の調査結果（エリアA）

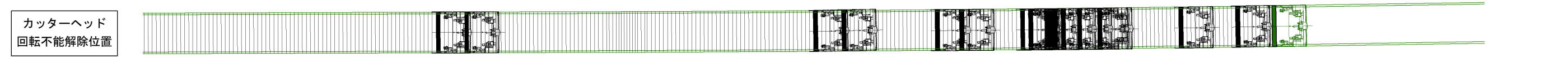
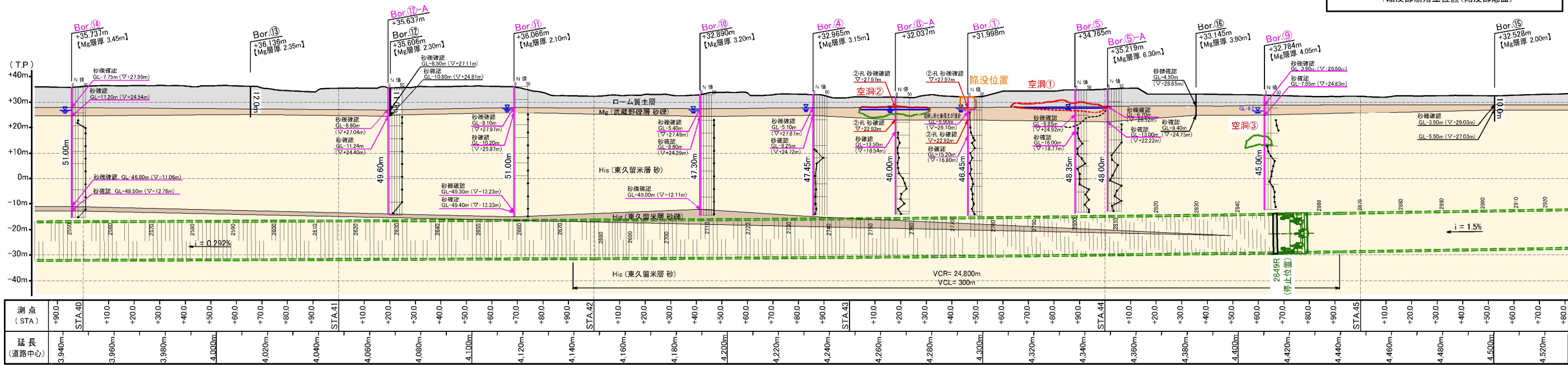
平面図 S = 1:1,600



- 凡例 (ボーリング)
- ①,④,⑤,⑤-A,⑥,⑦,⑧-A : 深層ボーリング
 - ⑨,⑩,⑪,⑫-A,⑬ : 浅層ボーリング
 - ②,③,⑧,⑫,⑬,⑮,⑯ : 浅層ボーリング

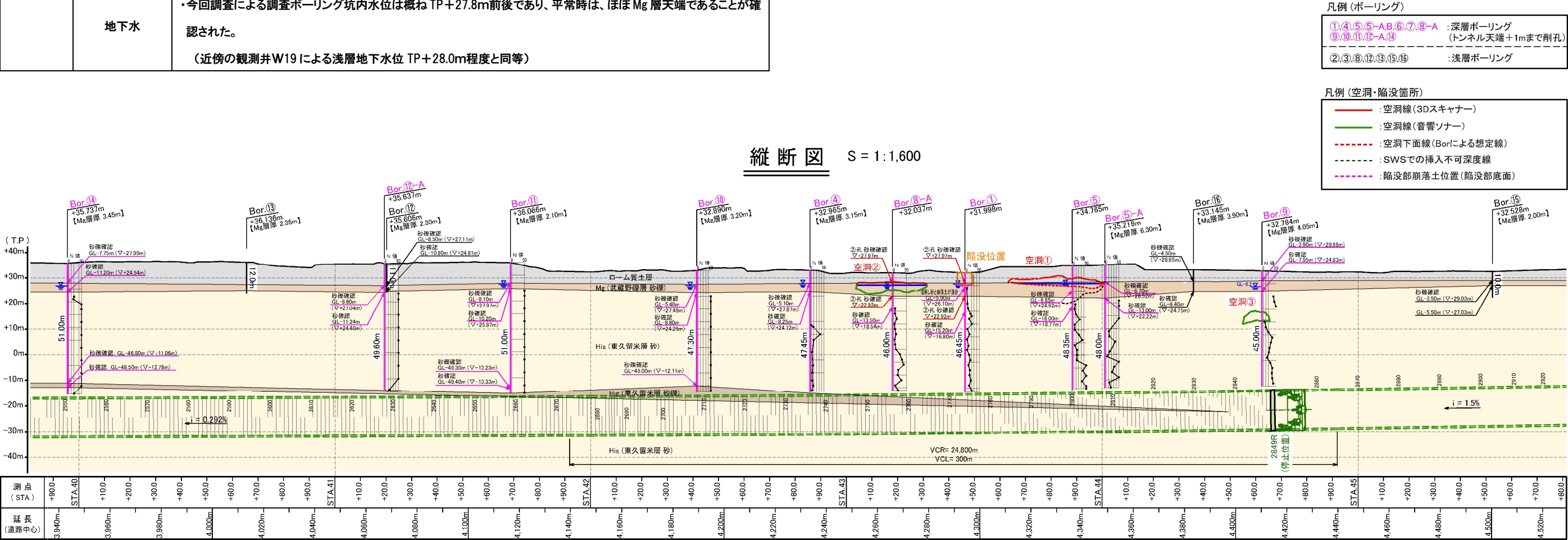
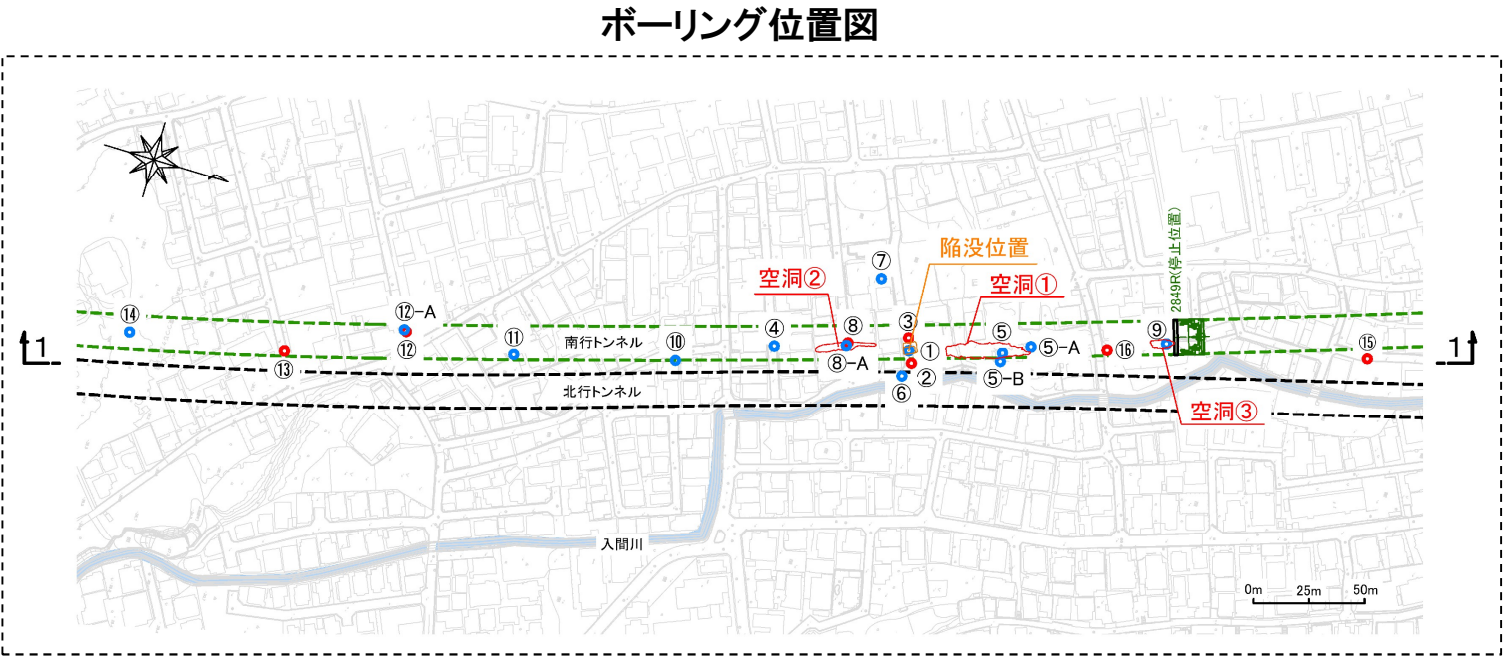
- 凡例 (空洞・陥没箇所)
- : 空洞線 (3Dスキャナー)
 - : 空洞線 (音響ソナー)
 - - - : 空洞下面線 (Borによる想定線)
 - - - : SWSでの挿入不可深度線
 - - - : 陥没部崩落土位置 (陥没底部面)

縦断図 S = 1:1,600

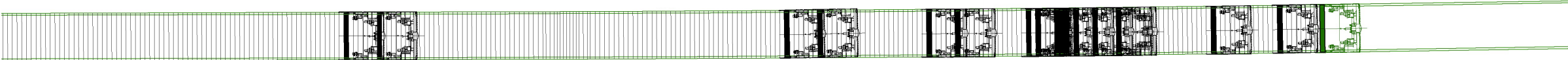


3.2.1 調査により得られた地盤状況（トンネル縦断方向）

項目			調査より判明した事項
調査結果	地盤	表層	・表層はローム層が主体であることが確認された。 ・調査結果範囲では、事前のボーリング調査で想定されていた沖積層(A)は確認されなかった。
		Mg 層	・陥没箇所、空洞箇所の Bor.②、③、⑤-A、⑤-B では、Mg 層が約 5m～6m と厚く堆積している。なお、陥没箇所付近は、Mg 層より上の表層部は、埋土であることが確認された。 ・Mg 層天端レベルは、陥没箇所(Bor.①)、空洞②箇所(Bor.⑧-A)および Bor.④で TP+27.9m～28.0mであり、空洞①箇所付近では TP+28.5m(Bor.⑤-A)程度である。 ・Bor.⑭～⑩の範囲の Mg 層天端レベルは、TP+27.1m～28.0mである。 ・Bor.⑨～⑮の範囲の Mg 層天端レベルは、TP+28.9m～29.0mである。
		His 層	・陥没箇所の Bor.①、空洞①箇所の Bor.⑤、空洞②箇所の Bor.⑧-A、空洞③箇所の Bor.⑨では、トンネル上部まで His 層が緩んでいることを確認した。 ・Bor.④、⑤-Aでは、地表面から深さ 20m程度、Bor.⑨では、地表面から深さ 16m程度までは N 値の低下は確認されなかった。 ・Bor.⑩、⑪、⑫-A、⑬-A、⑭では N 値の低下は確認されなかった。
	地下水		・今回調査による調査ボーリング坑内水位は概ね TP+27.8m前後であり、平常時は、ほぼ Mg 層天端であることが確認された。 (近傍の観測井W19 による浅層地下水位 TP+28.0m程度と同等)

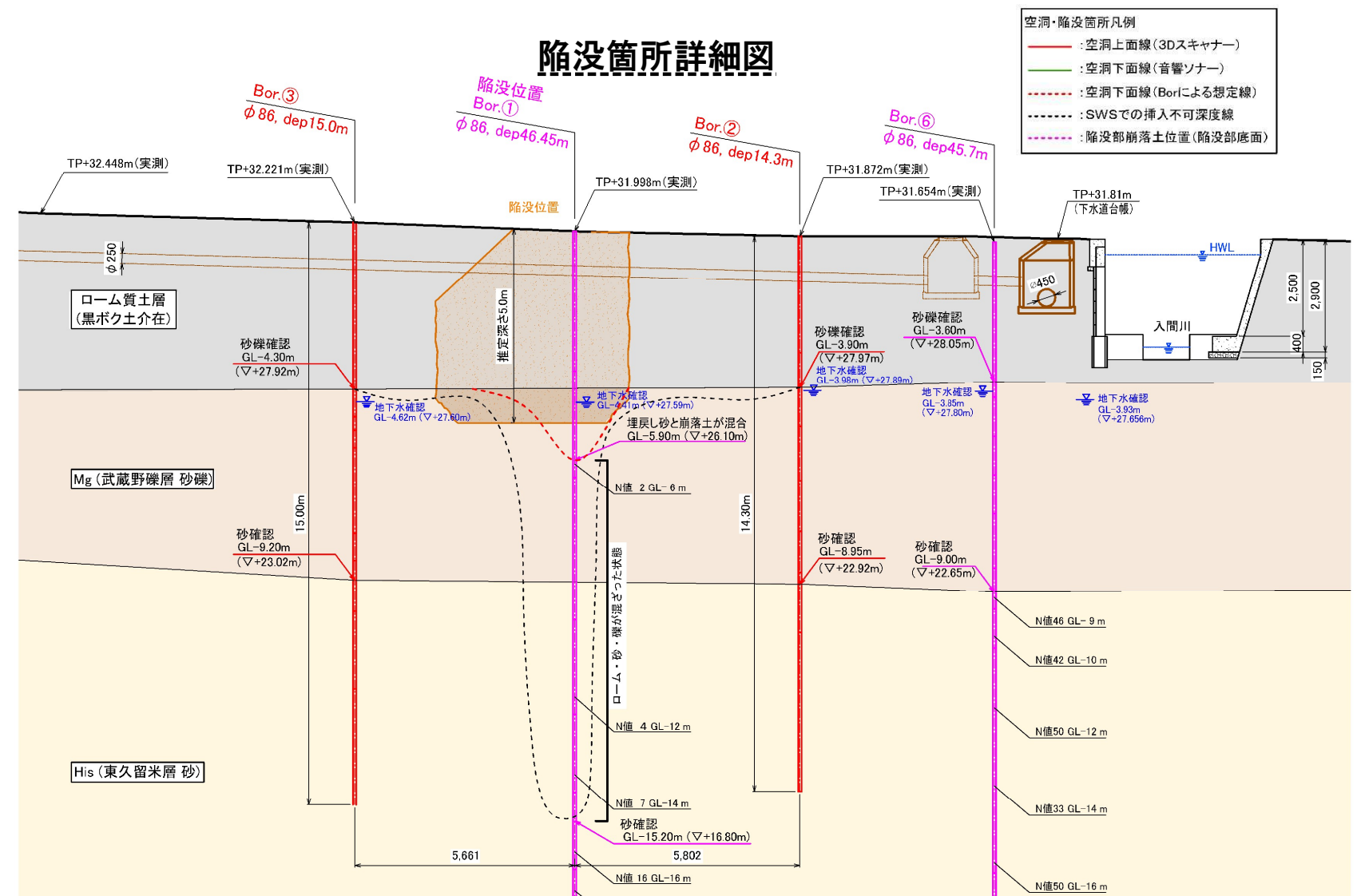
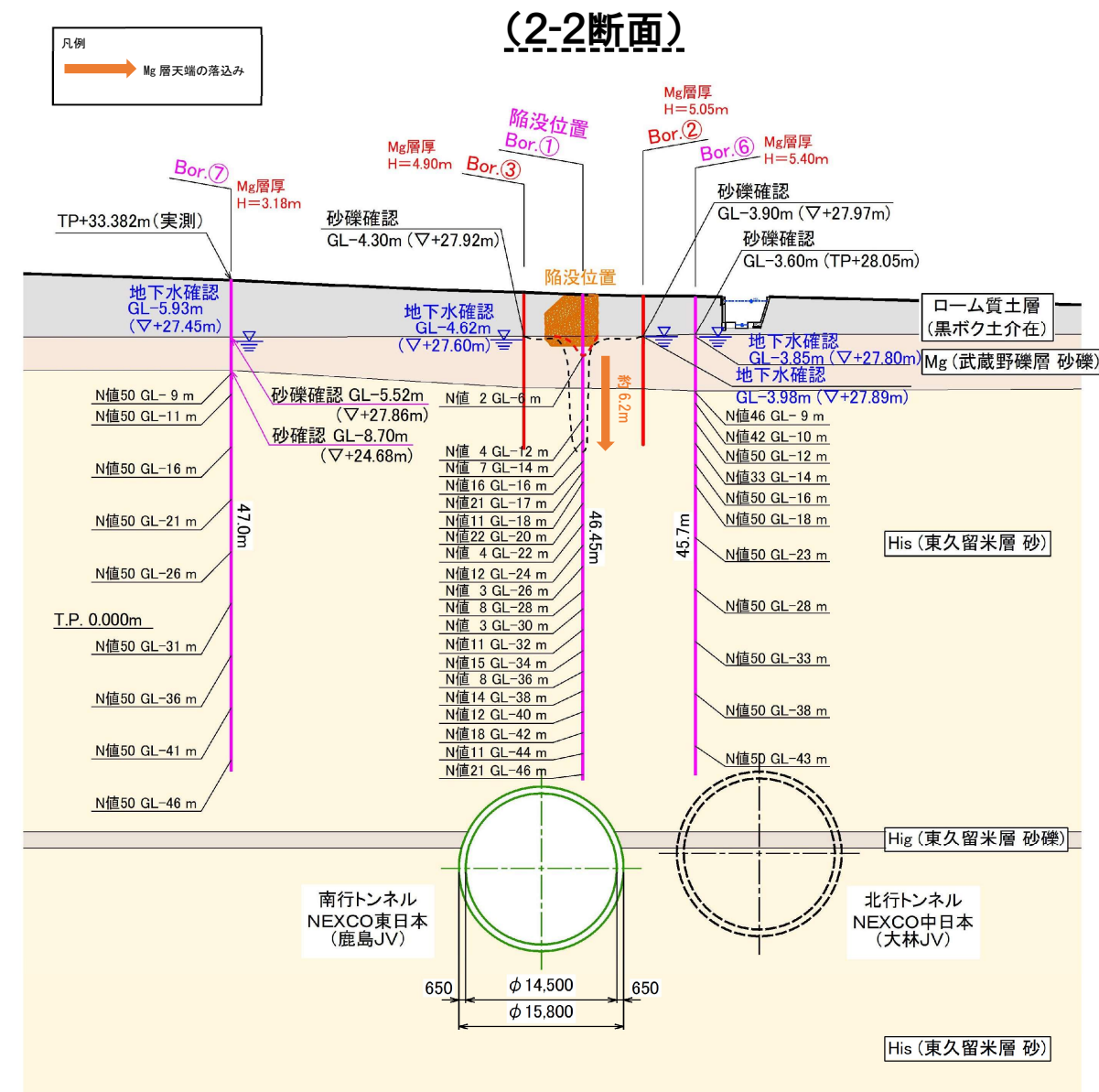
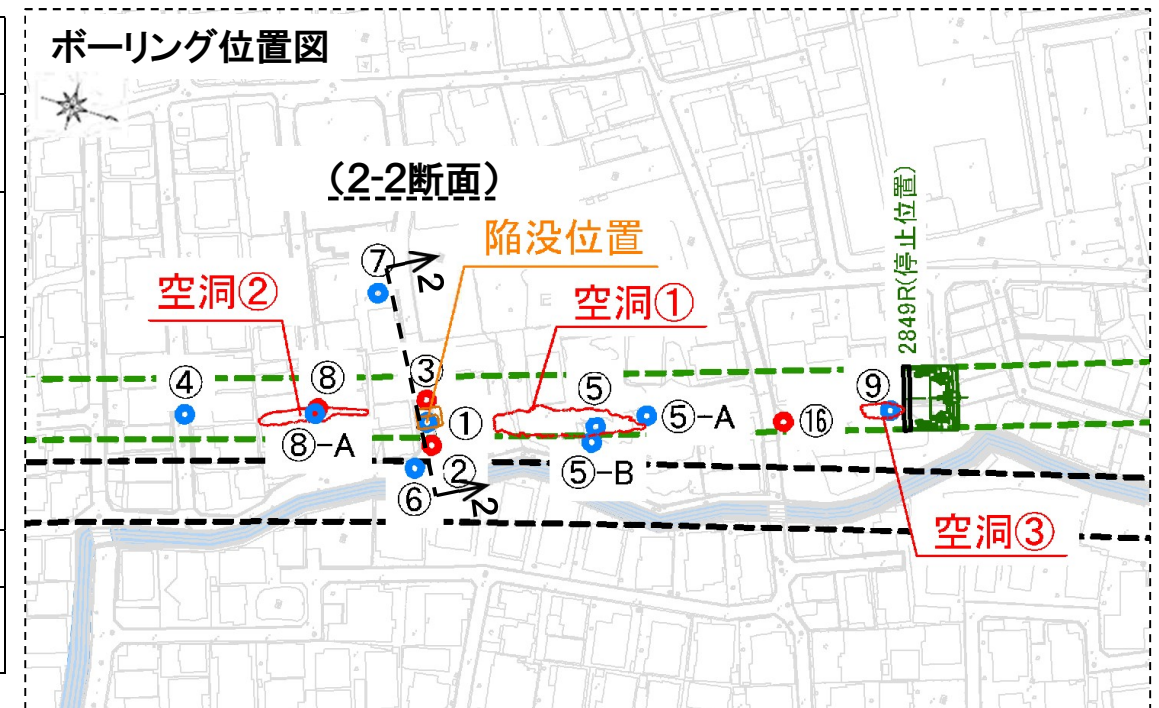


カッターヘッド
回転不能解除位置



3.2.2 調査により得られた地盤状況（陥没箇所）

項目			調査より判明した事項
調査結果	地盤	表層	・表層において、陥没箇所の画像および Bor.②、⑥にて軟らかいローム層と黒ボク土が確認された。 ・当該箇所付近は、埋土造成されたエリアであると判断できる。
		Mg 層	・陥没箇所の Bor.①では、Mg 層天端レベルの落込みと緩みが確認された。 ・陥没箇所付近の Bor.②(Bor.①の東側 6.4m)、Bor.③(Bor.①の西側 5.1m)では、Mg 層は健全であり、周辺の Mg 層天端レベルと同等であることが確認された。
		His 層	・陥没箇所の Bor.①では、His 層天端レベルの落込みが確認された。 ・陥没箇所近傍の Bor.②、③では、His 層天端レベルは、周辺とほぼ同等であることが確認された。 ・トンネル直上から東側に離れた Bor.⑥、および西側に離れた Bor.⑦では、トンネル頂部レベルまでN値が概ね 50 以上であることが確認された。 ・Bor.①およびスクリーウエイト貫入試験結果より、His 層の天端レベルの落込み範囲はトンネル横断方向で 2m～4m程度と限られている。
	地下水	・陥没箇所の地下水位は TP+27.6mであった。成分分析の結果、特異な成分は検出されていない。	
	陥没箇所への土砂投入量	・10 月 18 日(日)から 10 月 19 日(月)未明にかけて陥没箇所に投入埋戻しを行った土砂体積は約 140m ³ である。	



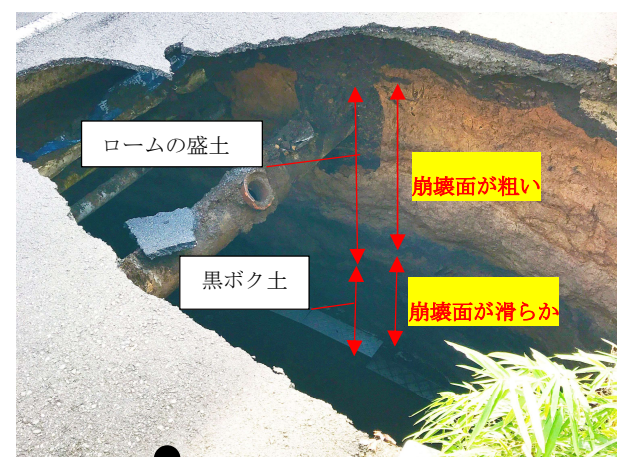
(陥没箇所の写真による確認)

■ 陥没箇所の調査結果

陥没箇所は、1981 年敷設の下水道（φ 250mm）の接続部がある。また下水配管（φ 100 塩ビ管）が折損状態で残存している。

陥没箇所の写真を写真 3-1<フーリエ変換（周波数解析）>による画像分析結果を図 3-1 に示す。

画像分析の結果、断面は同じローム層だが、上部は「粗い断面」、下部は「目の細かい断面」と推定される。画像分析結果を踏まえると、陥没箇所の下方は洗面されている可能性がある。



(東側から撮影)

写真 3-1 陥没箇所 (2020 年 10 月 18 日 13:00 撮影)

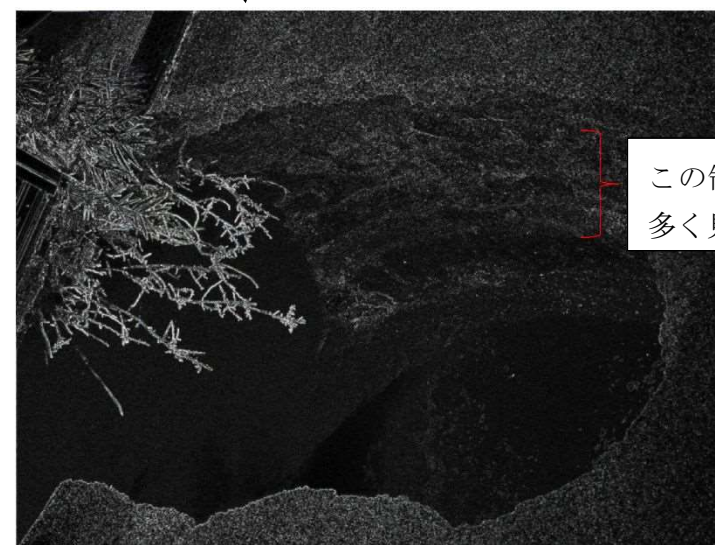


(西側から撮影)



この領域に高周波成分が多く見える

(東側から撮影)



この領域に高周波成分が多く見える

(西側から撮影)

図 3-1 陥没箇所画像分析結果

<フーリエ変換(画像の周波数解析)とは>

…画像には

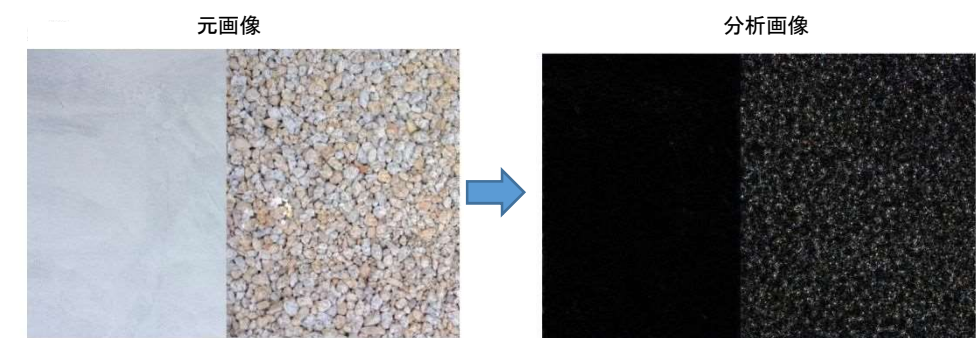
濃淡がなだらかに変化する(表面が細かな断面)場合は、相対的に低い周波数を持つ。

濃淡が激しく変化する(表面が荒い断面)場合は、相対的に高い周波数を持つ。

という特性がある。

画像の持っている波形の情報をフーリエ変換で周波数毎に分解し、その特定の周波数をフィルターで強調し、表面の状態を把握したものである。

凡例：左側はコンクリート（滑らか）、右側は砂利（粗い）の画像



左側はコンクリート（なめらか）、右が砂利（荒い）の画像

■ 現地写真による段差プレート傾斜

- ①写真 3-2 は陥没が発生する 73 日前（2020 年 7 月 30 日撮影）の状況（シールド機は当該地点の 200m 程度手前に位置）であり、シールド機は当該地点直下を 2020 年 9 月 14 日に通過している。
- ②写真 3-3 は当該地点の陥没 3 時間前（2020 年 10 月 18 日 9:30 撮影）の状況（水たまり）であるが、駐車場前の段差プレートの不陸は、写真 3-2（2020 年 7 月 30 日撮影）の時点でも段差が生じているように見える。



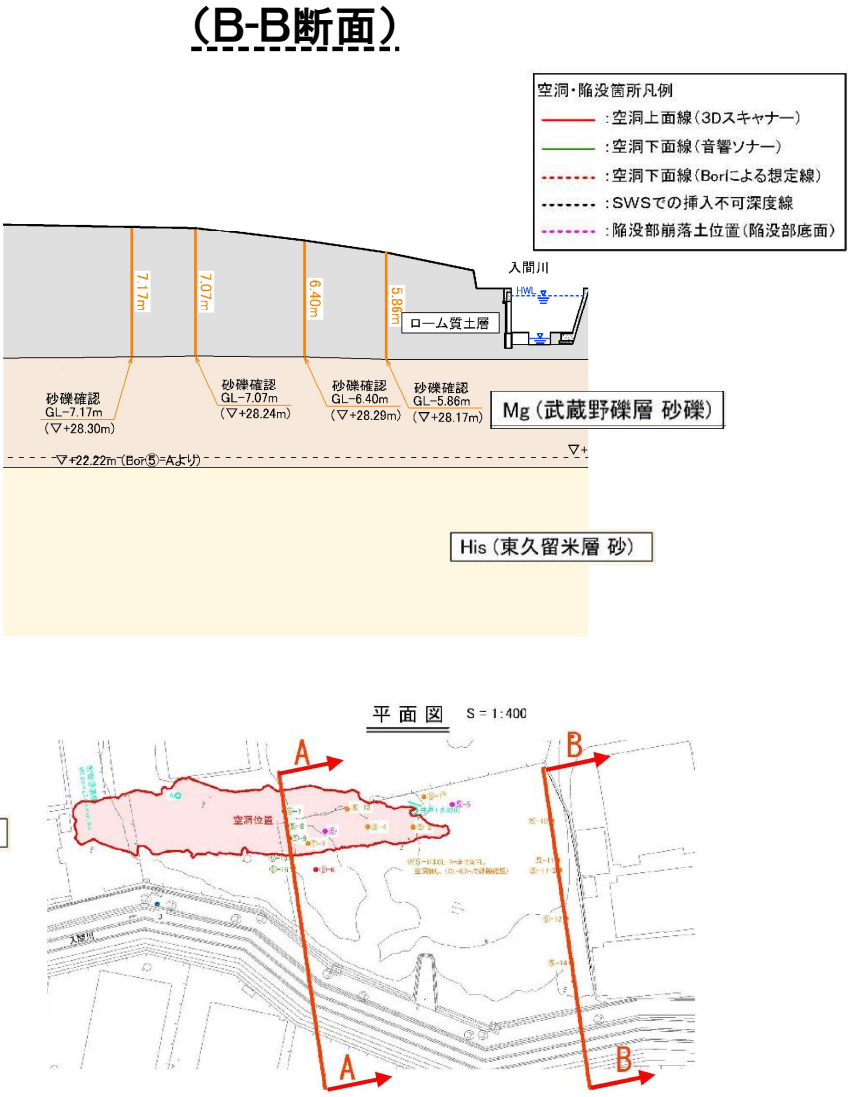
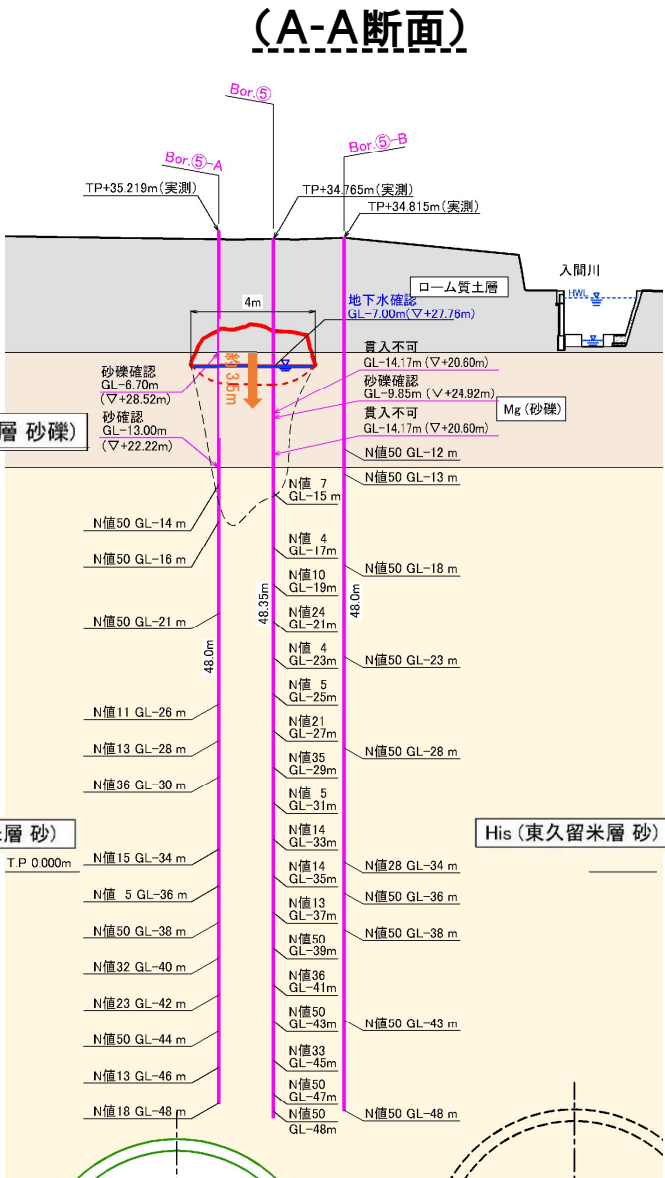
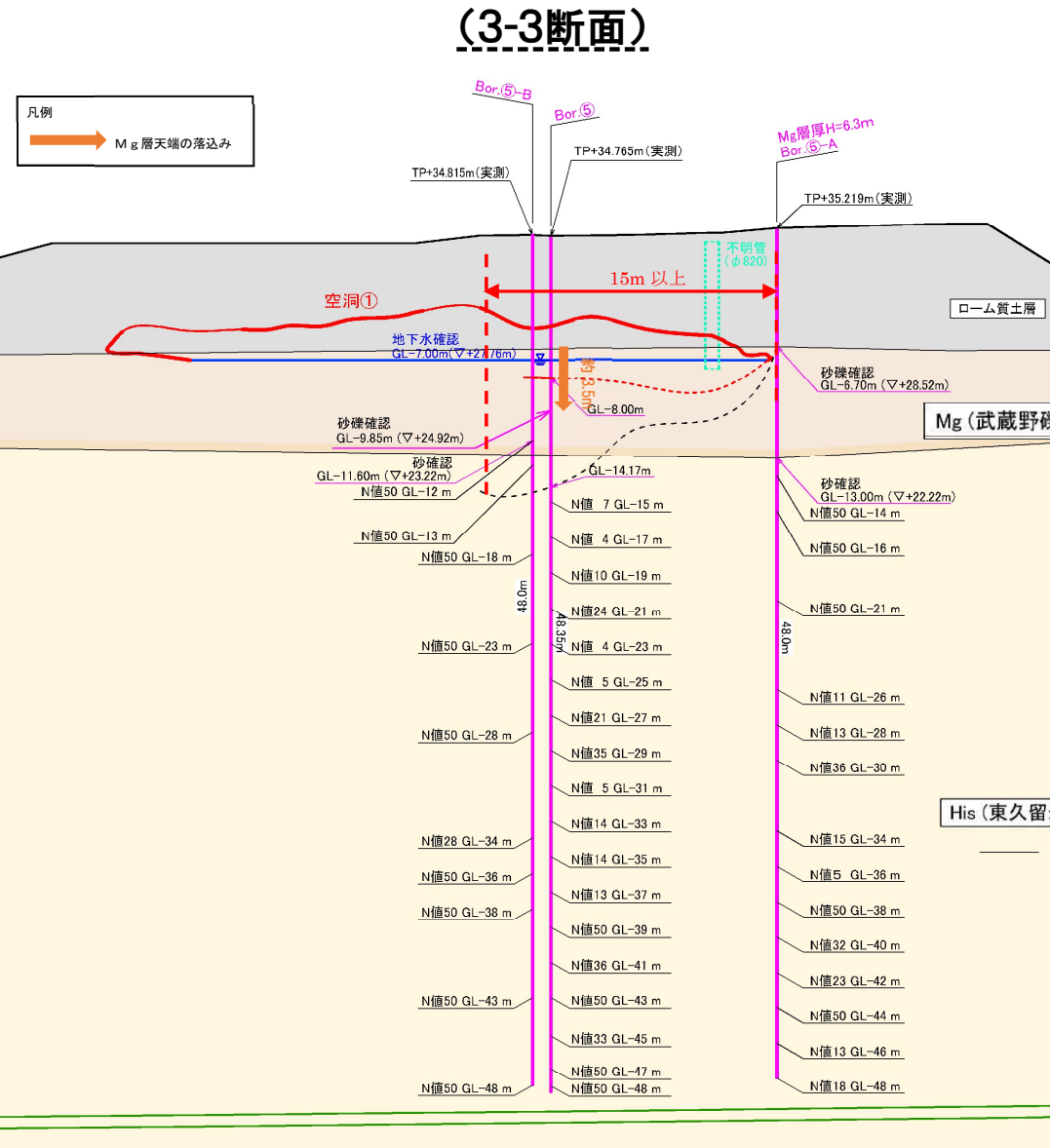
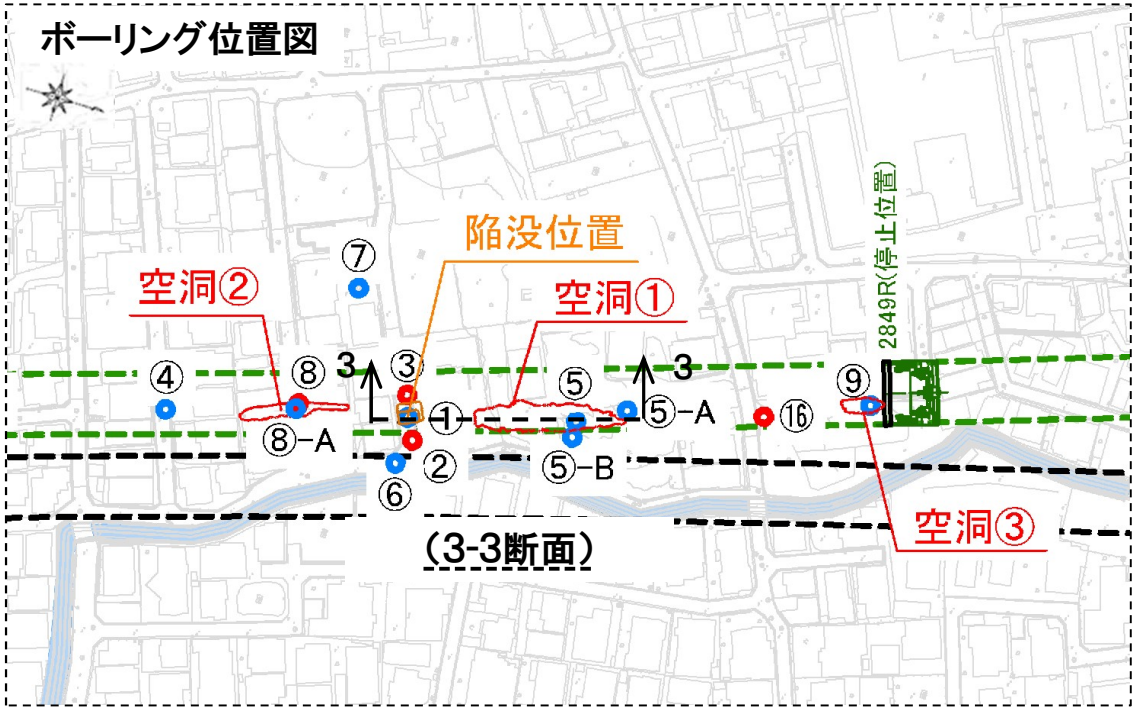
写真 3-2 陥没箇所の事前状況写真（2020 年 7 月 30 日撮影）



写真 3-3 陥没箇所（2020 年 10 月 18 日 9:30 撮影）

3.2.3 調査により得られた地盤状況（空洞①箇所周辺）

項目			調査より判明した事項
調査結果	地盤	表層	・表層の厚さは、約 5mであった。 ・表層地盤はスクリーウエイト貫入試験では固くて貫入できなかった。表層は硬質なローム層(凝灰質粘土層)であることを確認した。 ・表層には、沖積層(A)は確認されなかった。
		Mg 層	・Mg 層の厚さは 6.30m(Bor.⑤-A)であり、当初想定 of 土質縦断面図の 2 倍以上の厚さがあった。 ・空洞①箇所の Bor.⑤では、Mg 層天端レベルの落込みと Mg 層の緩みが確認された。 ・空洞①箇所の Bor.⑤およびスクリーウエイト貫入試験による探針の結果より、Mg 層上面の落込み範囲はトンネル軸直角方向(東西)で約 4m、トンネル軸方向(南北)で 15m以上、最大落込み深度は約 3.5mであった。
		His 層	・空洞①箇所の Bor.⑤では、トンネル上部までの地盤の緩みが確認された。 ・空洞①箇所の Bor.⑤、⑤-B 孔からの探針の結果、His 層の天端レベルが落込んでいることが確認された。 ・空洞①箇所のトンネル直上 Bor.⑤-A では、His 層の天端レベルの落込みは確認されなかったが、TP+9.2m以深は地盤の緩みが確認された。
	地下水		・空洞①箇所の地下水位は TP+27.8mであった。成分分析の結果、特異な成分は検出されていない。
	空洞①箇所への充填体積		・空洞①箇所の充填体積は約 600m ³ であった。



(空洞①箇所の写真による確認)

- ・空洞の北側端部は、天盤はドーム状で、粘土混り砂礫が分布している。
- ・側部には武蔵野礫層が確認され、比較的砂分が無い状態である。
- ・一部砂質土が多い層（武蔵野礫層が平行になってない箇所）と水で洗われた部分が見受けられる。

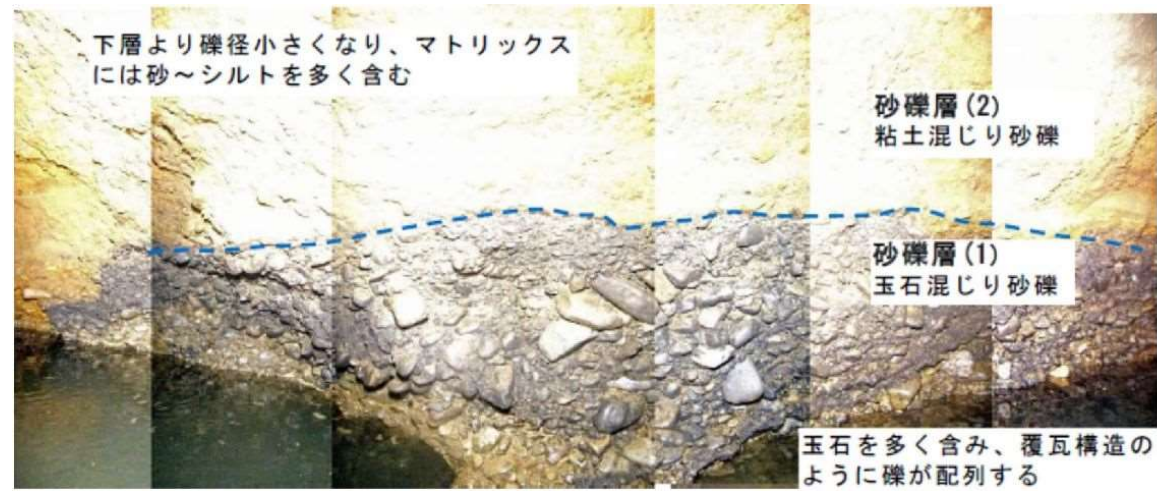


図 3-2 20° ~40° 方向



図 3-3 340° ~20° 方向

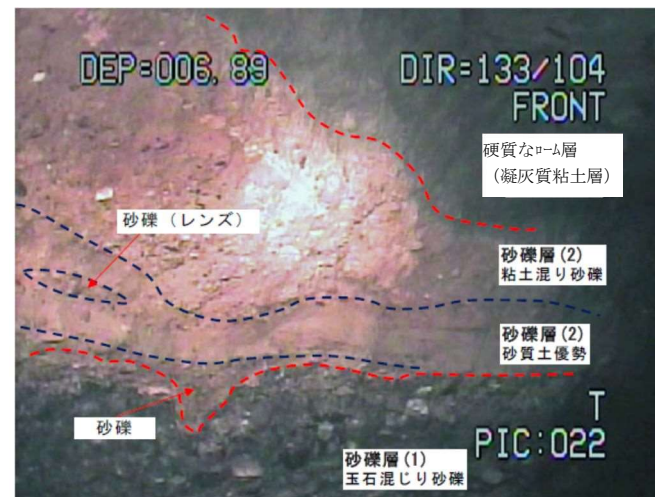


図 3-4 133° 方向

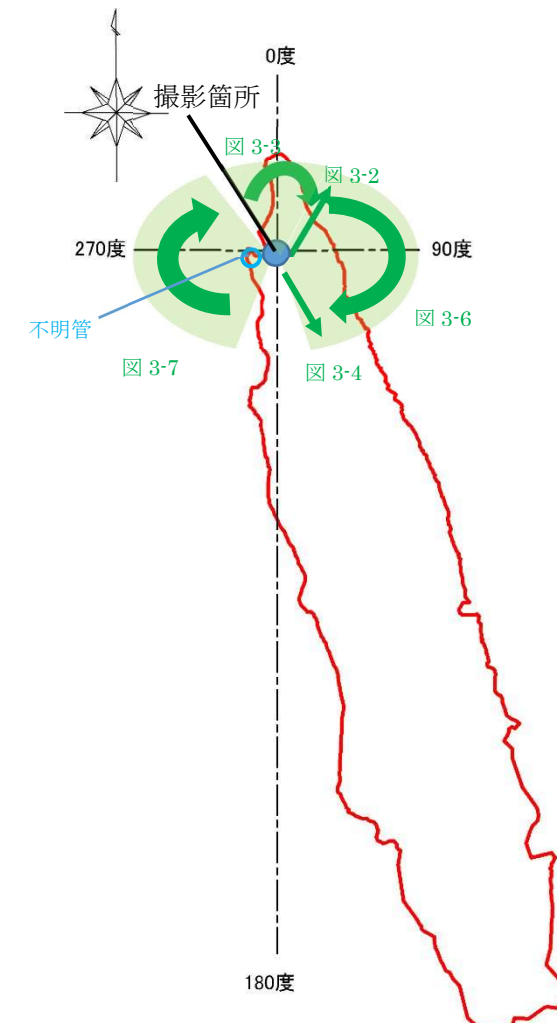


図 3-5 空洞①箇所図

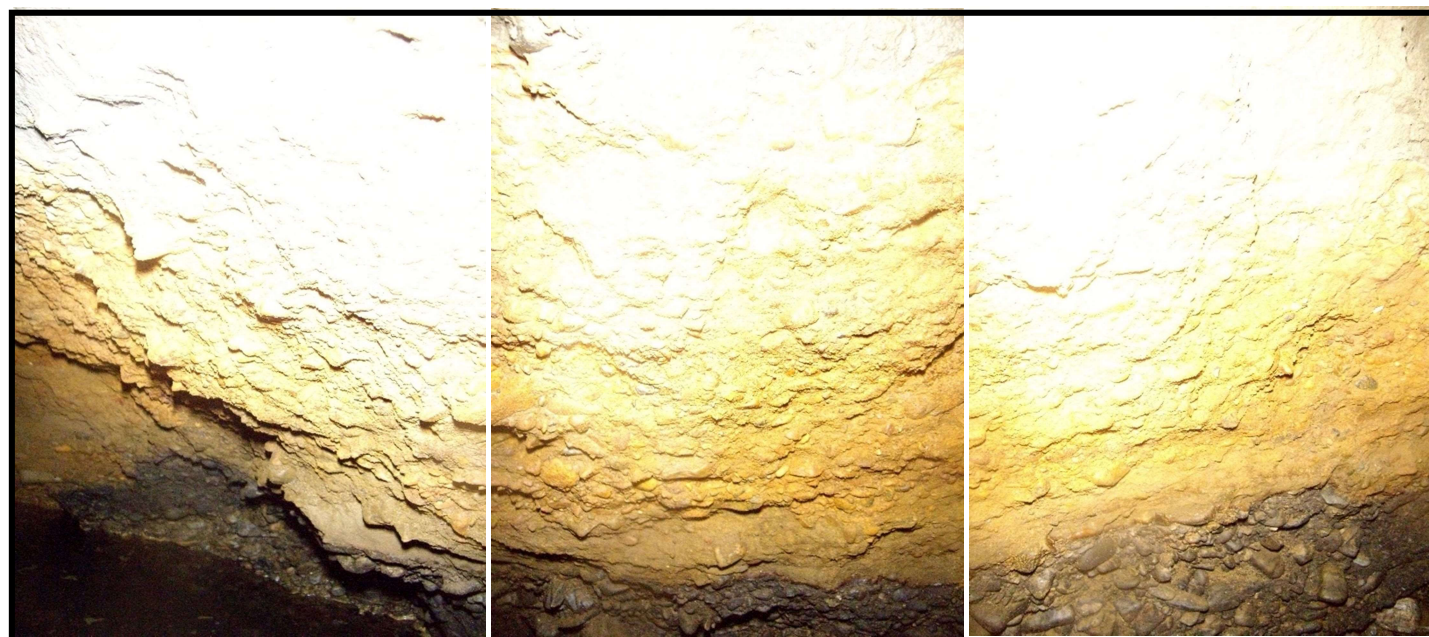


図 3-6 20° ~140° 方向

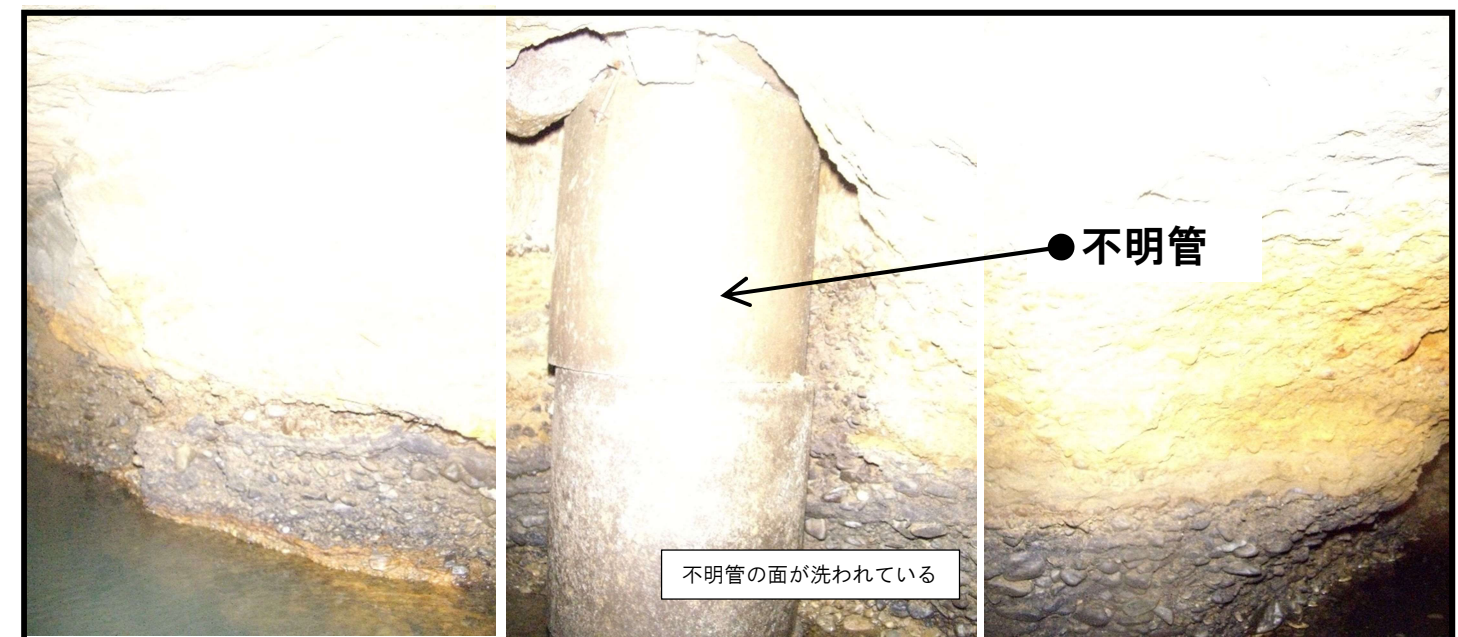


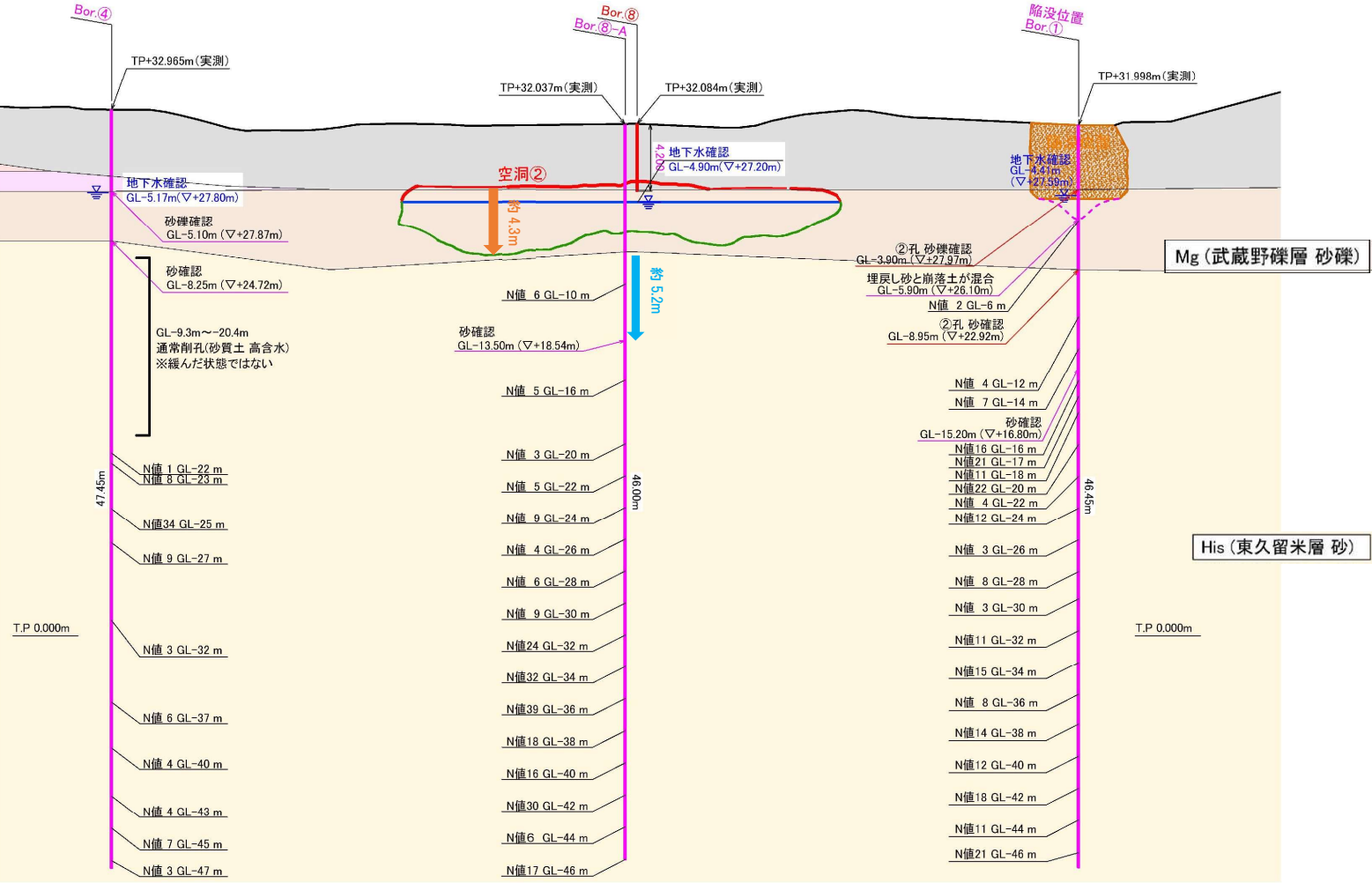
図 3-7 200° ~320° 方向

3.2.4 調査により得られた地盤状況（空洞②箇所周辺）

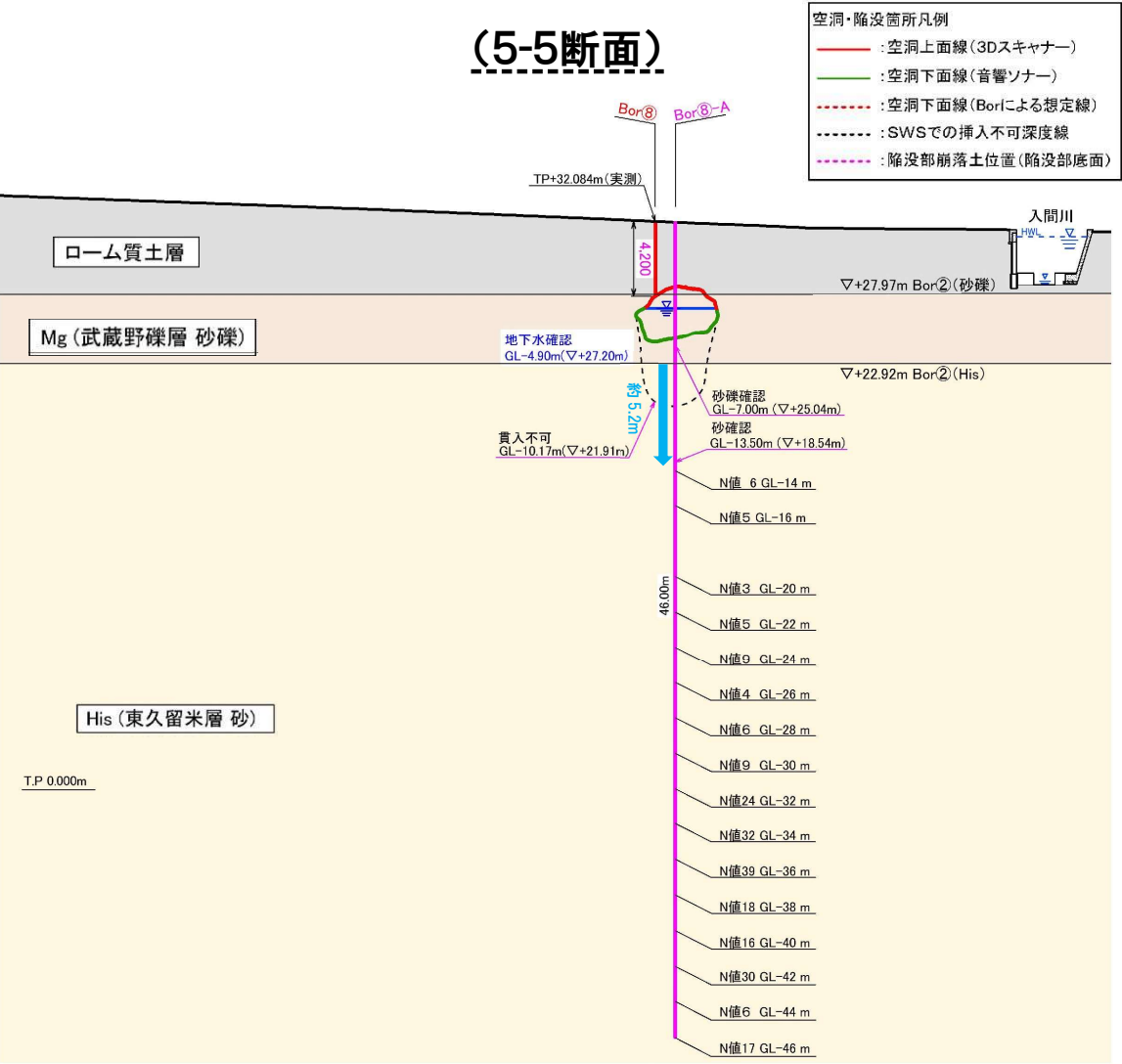
項目			調査より判明した事項
調査結果	地盤	表層	・表層は厚さ4.2mであり、表層は硬質なローム層（凝灰質粘土層）であることを確認した。 ・表層には沖積層(A)は確認されなかった。
		Mg層	・空洞②箇所の底面が上面から約4.3mであることから、Mg層の最大落ち込み深度は約4.3m程度であった。 ・空洞②箇所周辺のMg層の天端レベルは、スクリーウエイト貫入試験による探針の結果、TP+27.9m～28.0mであることを確認し、Mg層の天端の落ち込みは確認されなかった。
		His層	・空洞②箇所のBor.⑧-Aでは、His層天端レベルの落ち込み、トンネル上部までHis層が緩んでいることが確認された。
	地下水		・空洞②箇所の地下水位はTP+27.2mであることを確認した。成分分析の結果、特異な成分は検出されていない。
	空洞②箇所への充填体積		・空洞②箇所の充填体積は約200m ³ であった。



(4-4断面)



(5-5断面)



(空洞②箇所の写真による確認)

- ・天盤は、凝灰質粘土が分布している。
- ・側部の礫層には、細粒分が付着している部分と水で洗われた部分が見受けられる。
- ・部分的に砂礫層の段差、抜け落ちた箇所も見受けられる。



図 3-8 0° 方向の坑壁と北側の空洞



図 3-9 南側 160° 方向の空洞

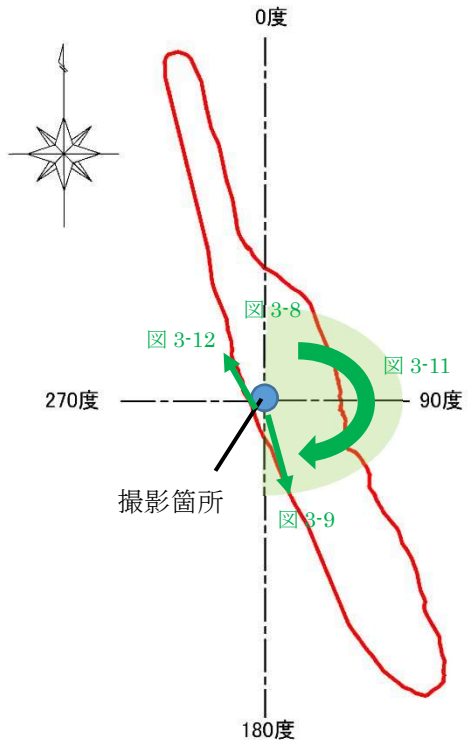


図 3-10 空洞②箇所図

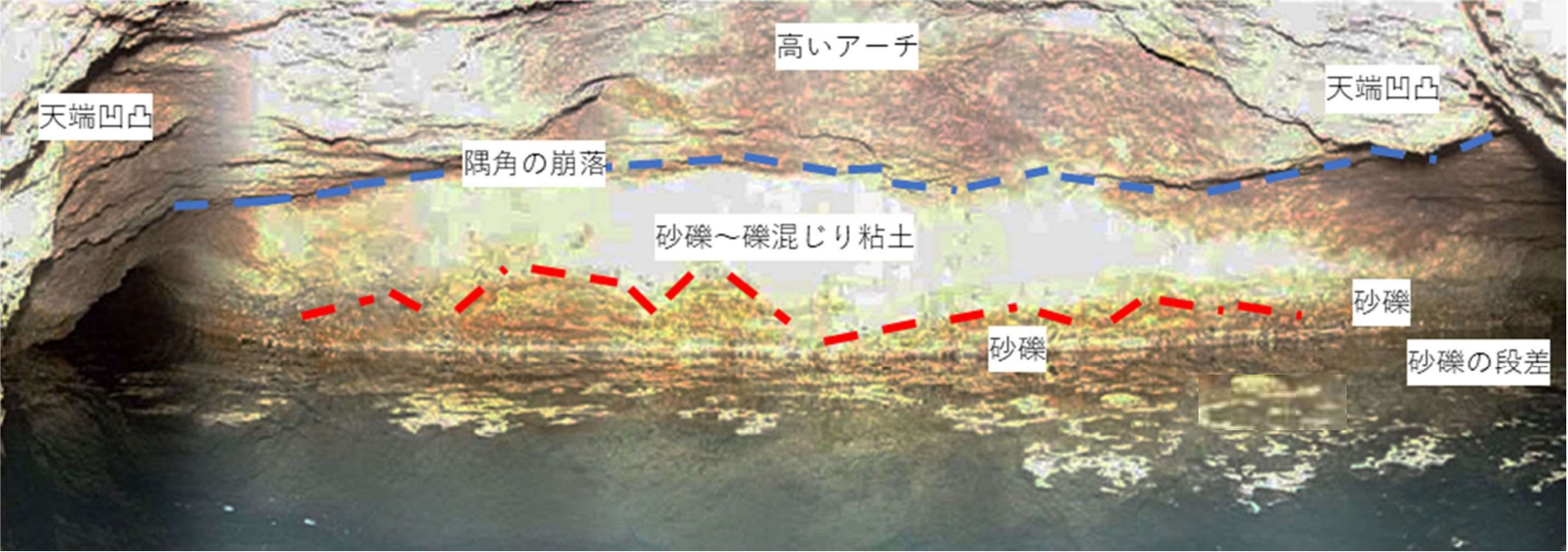
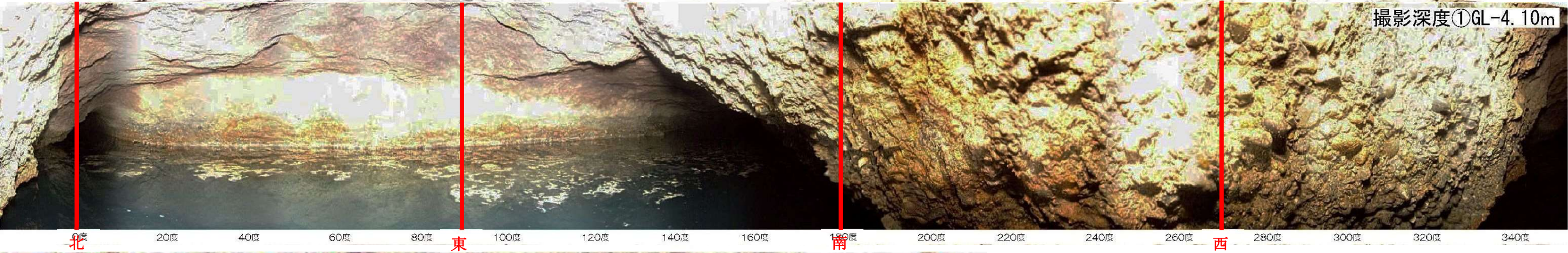


図 3-11 空洞②箇所東側の孔壁と南北に伸びる空洞

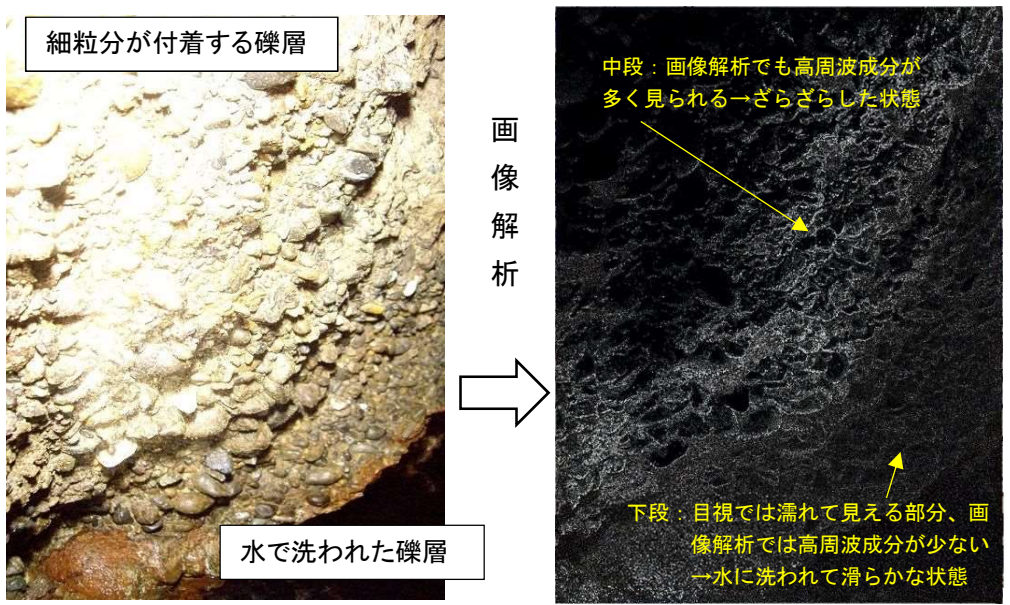
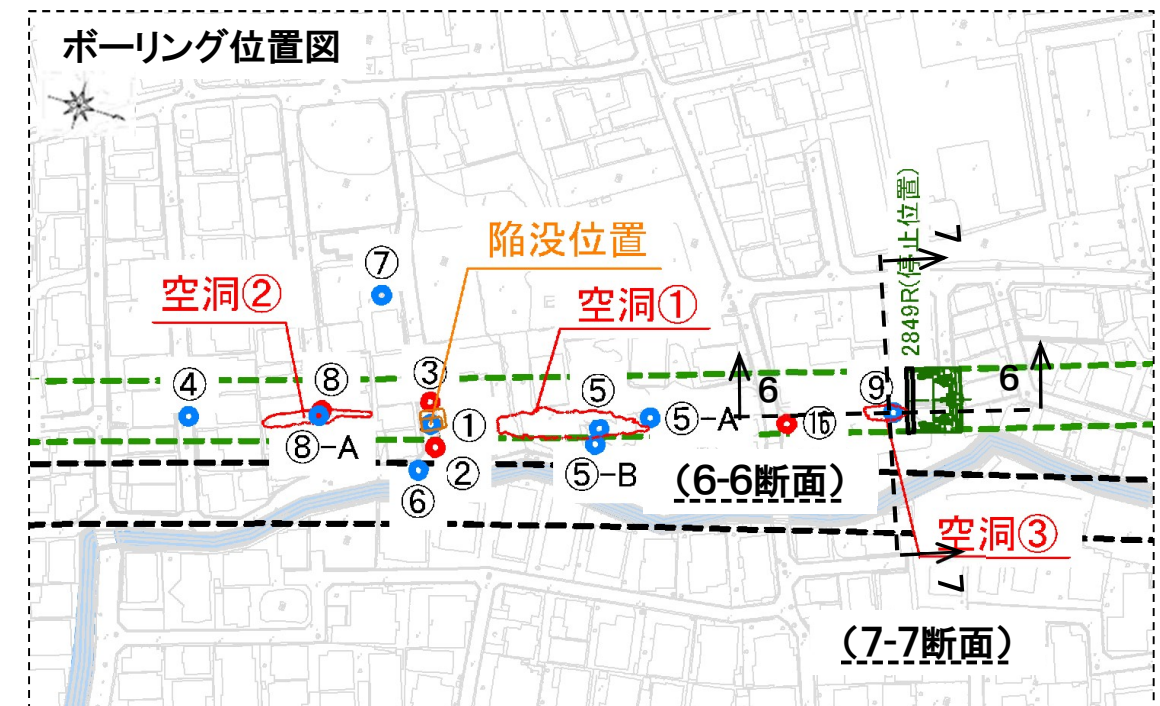


図 3-12 洗われた砂礫層と細粒分の付着する砂礫層(320° 方向)

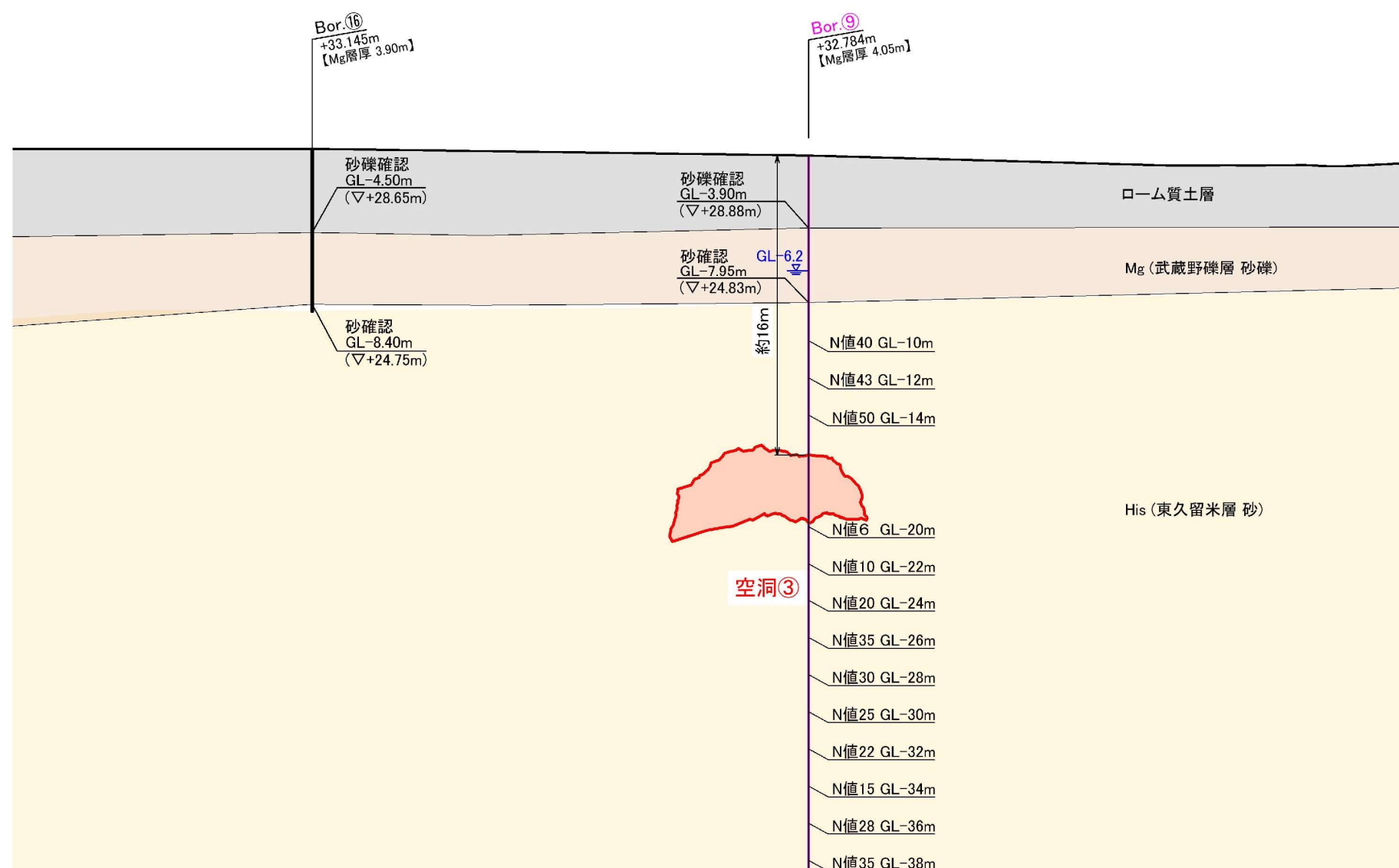
3.2.5 調査により得られた地盤状況（空洞③箇所周辺）

項目			調査より判明した事項
調査結果	地盤	表層	<ul style="list-style-type: none"> ・表層は厚さ 3.9m であり、表層は硬質なローム層(凝灰質粘土層)であることを確認した。 ・表層には、沖積層(A)は確認されなかった。
		Mg 層	<ul style="list-style-type: none"> ・空洞③箇所の Bor.⑨での Mg 層の天端レベルは TP+28.9m、Mg 層の厚さは 4.1m であり、直近地点 Bor.⑯と大きな差は無く、Mg 層の落ち込みは確認されなかった。
		His 層	<ul style="list-style-type: none"> ・空洞③箇所の Bor.⑨での His 層の天端レベルは TP+24.8m であり、直近地点の天端レベル(Bor.⑯:TP+24.8m)と大きな差は無く、His 層天端レベルの落ち込みは確認されなかった。 ・空洞③箇所の Bor.⑨では、空洞下端からトンネル上部まで His 層が緩んでいることが確認された。
	地下水		<ul style="list-style-type: none"> ・空洞③箇所の Bor.⑨での地下水位は TP+26.6m であることを確認した。成分分析の結果、界面活性剤の成分が検出された。
	空洞③箇所への充填体積		<ul style="list-style-type: none"> ・空洞③箇所の充填体積は約 90m³ であった。



(7-7断面)

(6-6断面)



3.2.6 地表面変位計測結果

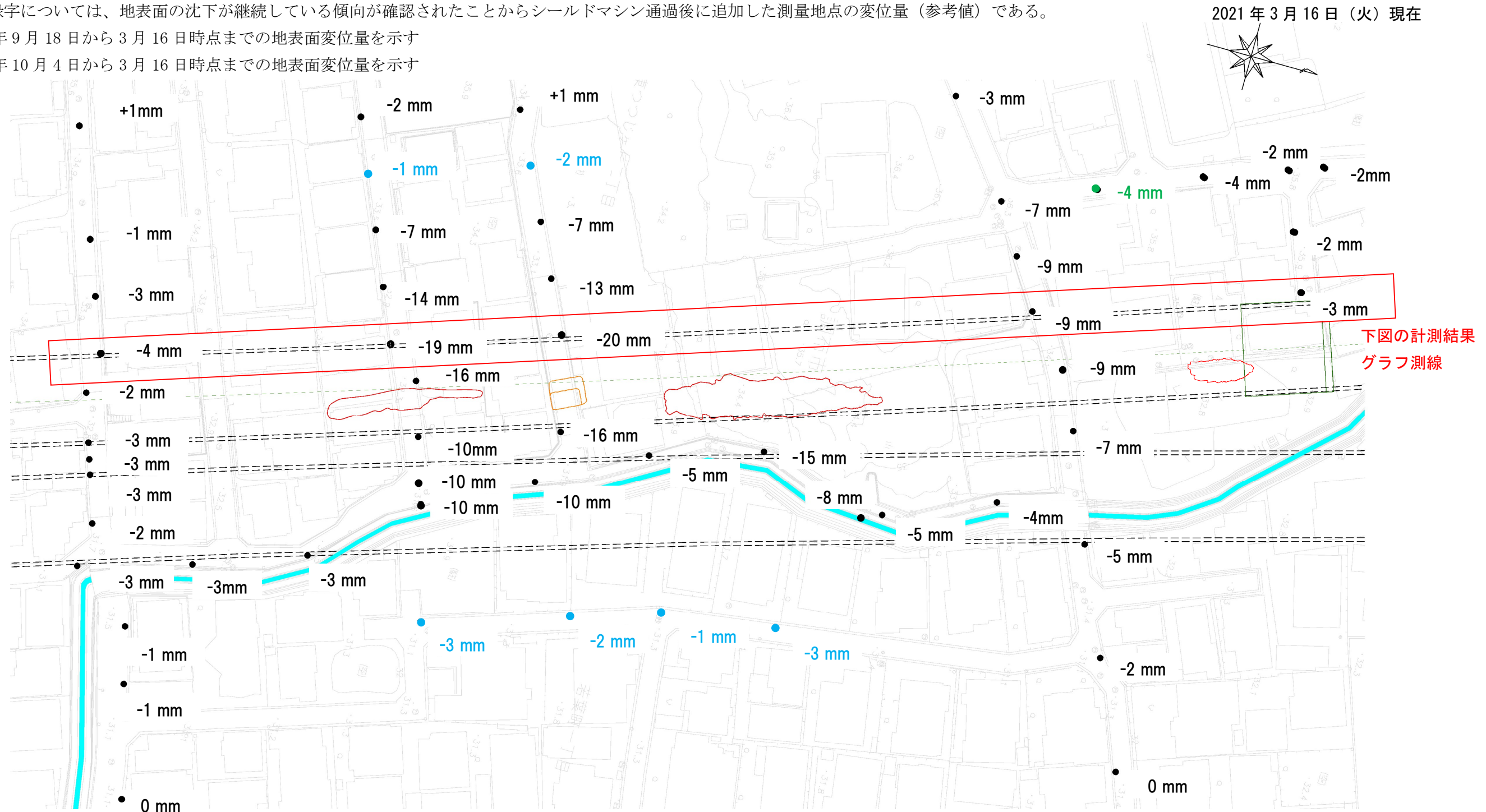
① 陥没・空洞箇所周辺の地表面変位量

トンネル掘進前から3月16日時点までの地表面変位量を下図に示す。

※青字および緑字については、地表面の沈下が継続している傾向が確認されたことからシールドマシン通過後に追加した測量地点の変位量（参考値）である。

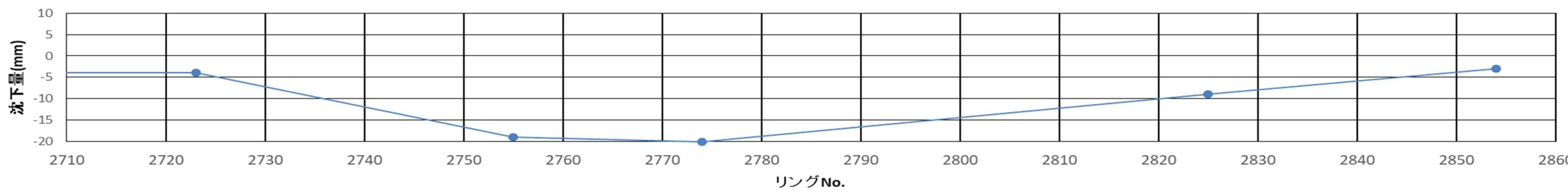
青字：2020年9月18日から3月16日時点までの地表面変位量を示す

緑字：2020年10月4日から3月16日時点までの地表面変位量を示す



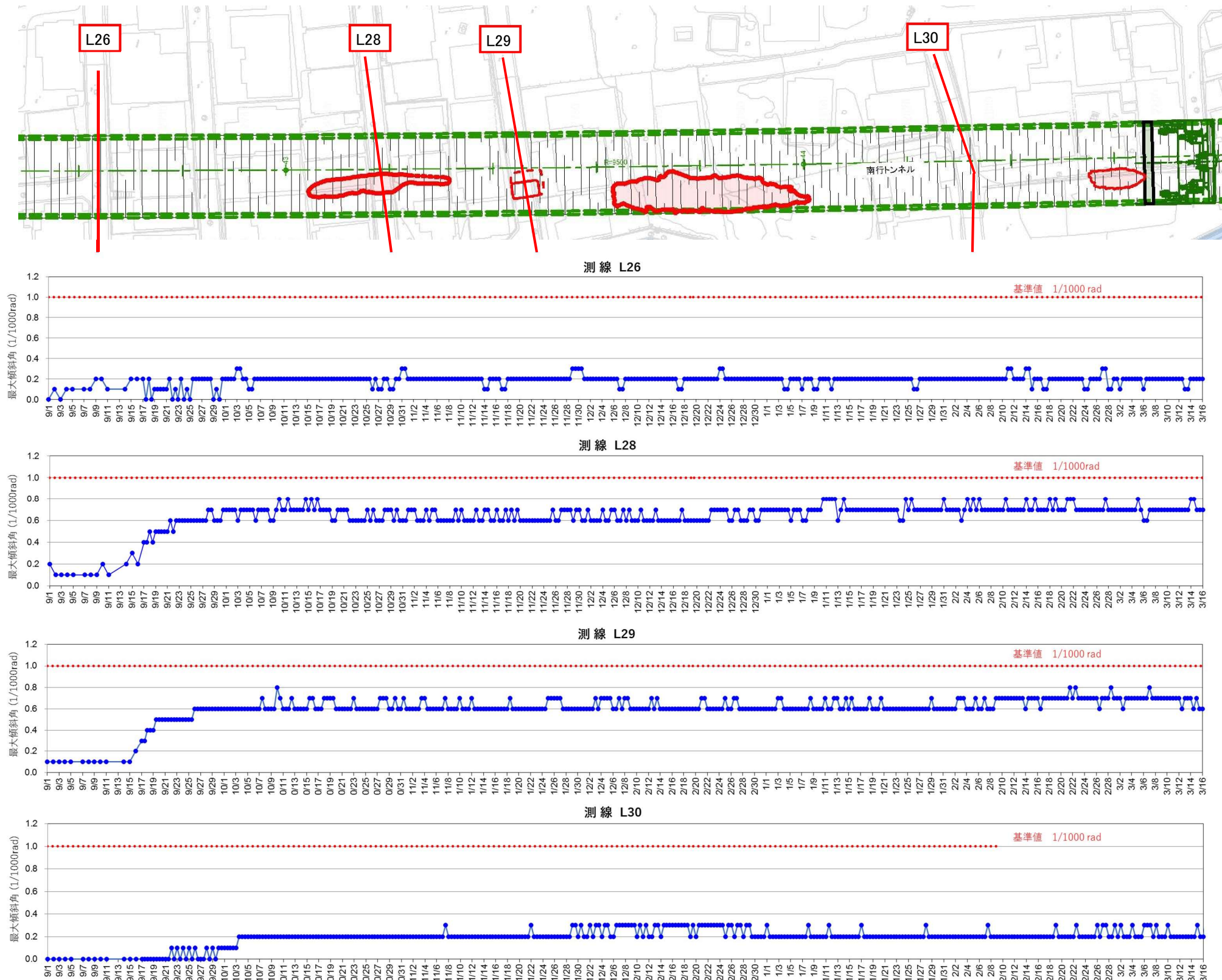
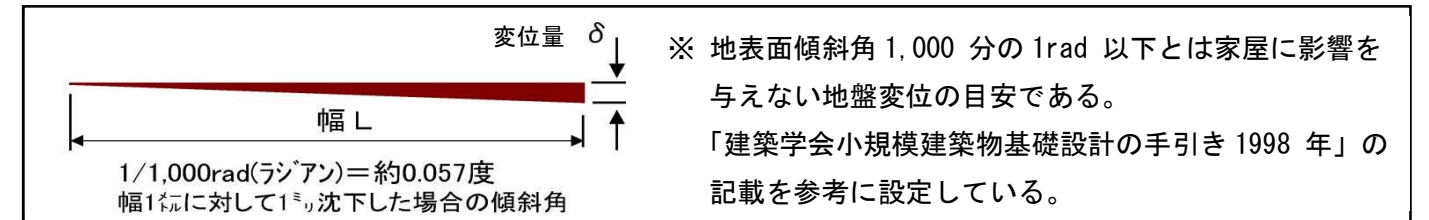
※上図以外の掘り進めてきた区間の地表面変位量は最大-6mm

地表面変位計測結果



② 陥没・空洞箇所周辺の地表面傾斜角の経時変化

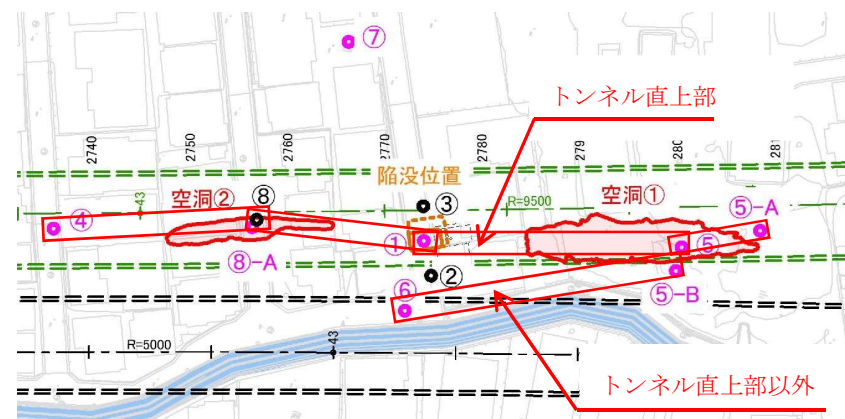
測線 L28、L29 とともにほぼ同時期に地表面傾斜角が大きくなっているが、基準値（1/1000rad）以内であった。



※上図以外の掘り進めてきた区間の地表面傾斜角は最大 0.3/1000rad

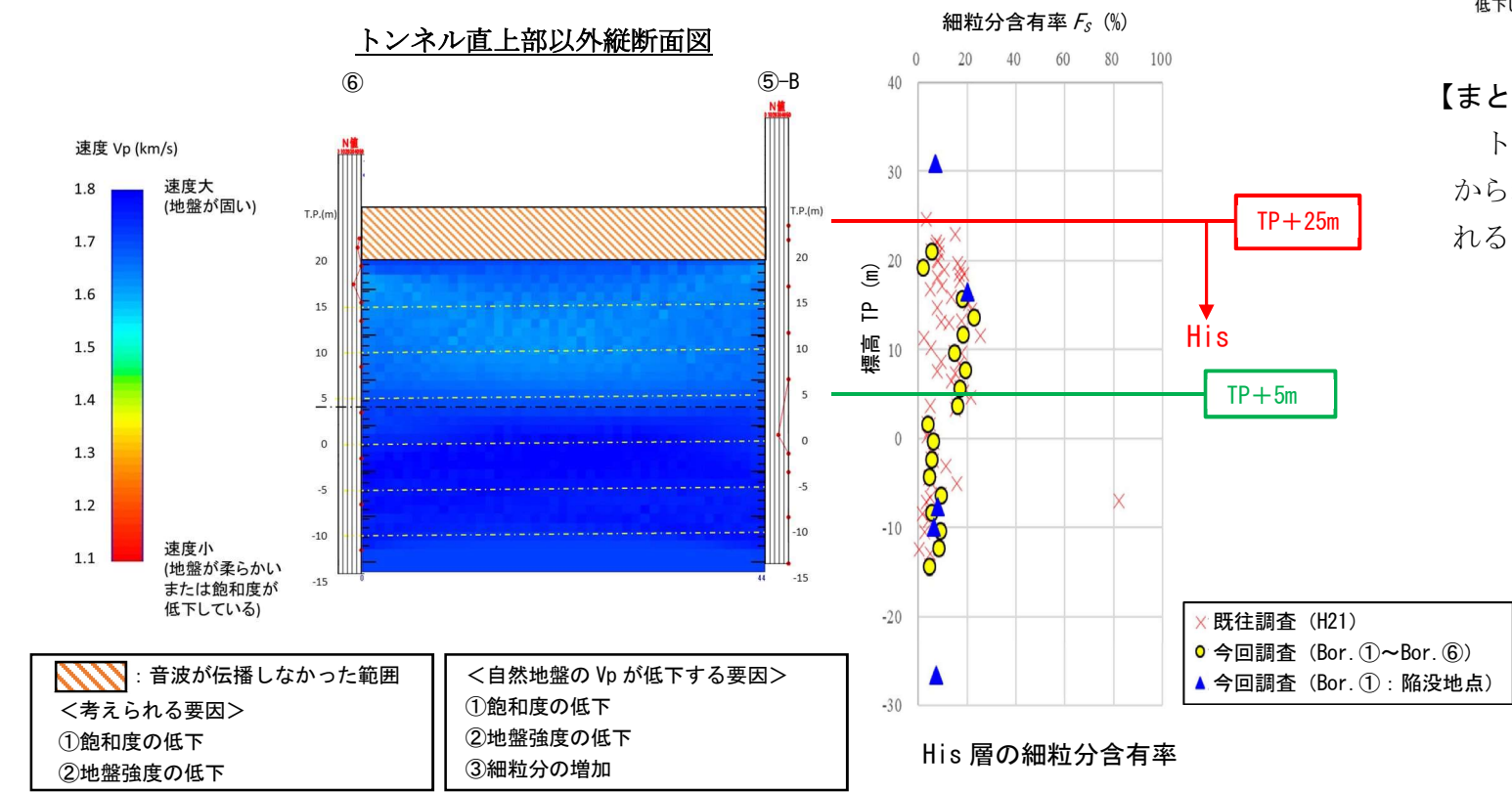
3.2.7 音響トモグラフィ結果

東久留米層（His）の地盤状況を確認するために、音響トモグラフィ探査を実施した。測定される音波（P波）の速度（Vp）で地盤状況を評価した。



① トンネル直上部以外（Bor. ⑥～⑤-B 間）の調査結果及び考察

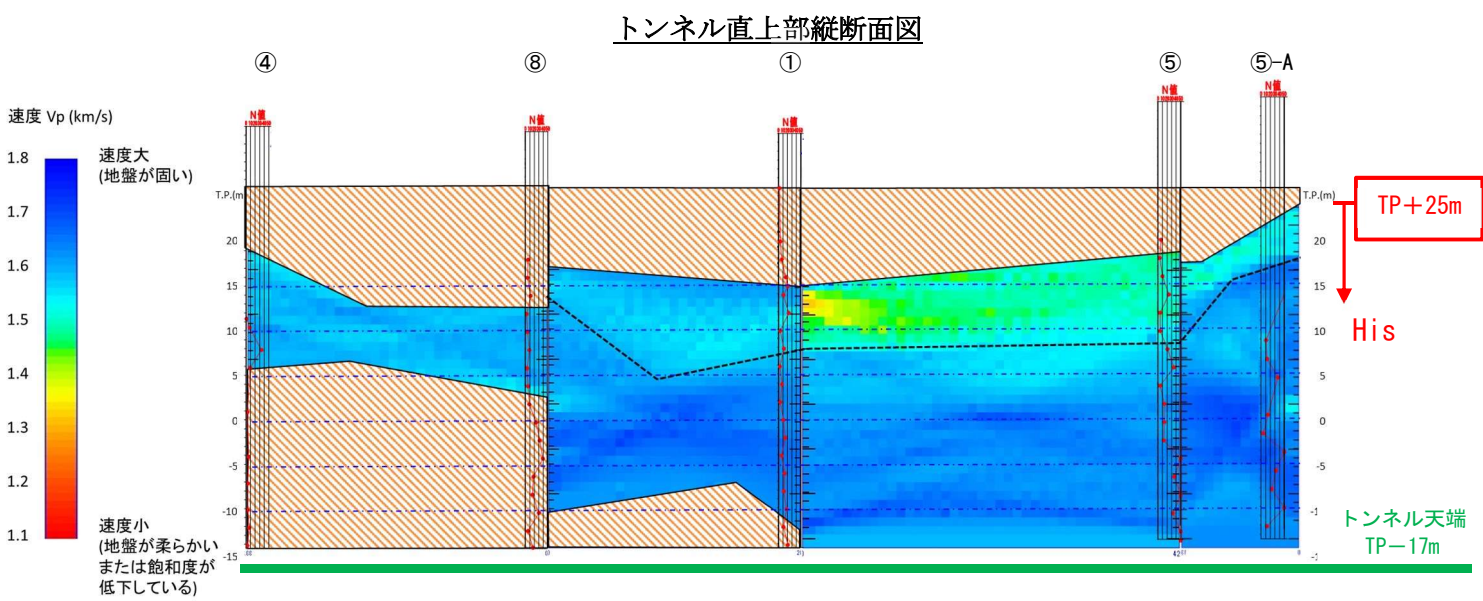
- TP+5m 以浅では、 $V_p=1.7\sim1.6\text{km/s}$ 、TP+5m 以深では $V_p=1.8\text{km/s}$ 程度となっている。
- 既往の地質調査で取りまとめられている PS 検層の結果では、東久留米層の V_p の平均値は 1.77km/s となっている。今回得られた TP+5m 以深の V_p はこれとほぼ同等である。
- ボーリングコア試料の細粒分含有率は、TP+5m 以浅で 15～20%程度、以深で 10%以下程度となっている。 V_p は細粒分が多いと遅くなる傾向にあり、TP+5m 以浅の V_p が TP+5m 以深の V_p よりもやや小さいことはこの傾向に合致する。
- Bor. ⑥～⑤-B 間の V_p の速度分布はほぼ一様で、地盤の緩みや空洞を示唆する低速度域は確認されない。
- 以上の調査結果及び Bor. ⑥、⑤-B での N 値がほぼ全域で 50 以上であることから、トンネル直上部以外は良好な地盤であると判断される。



② トンネル直上部（Bor. ④～⑧～①～⑤～⑤-A 間）の調査結果及び考察

地盤の評価は、トンネル直上部以外（自然地盤と判断）での V_p の状況と比較し、トンネル直上部の地盤状況について考察する。

- TP+12m～15m 以浅で音波が届かず探査できていない範囲がある。この範囲では飽和度の低下と地盤強度の低下が原因と考えられる。
- TP+5m 以深において、トンネル直上部以外の地盤の同深度で $V_p=1.8\text{km/s}$ 程度であったものが $V_p=1.7\sim1.6\text{km/s}$ 程度に低下し、またその分布も不均一になっており、地盤の緩みが生じていると判断される。
- TP+5m 以浅において、トンネル直上部以外の地盤の同深度で $V_p=1.7\sim1.6\text{km/s}$ 程度であったものが $V_p=1.6\text{km/s}$ 以下に低下していることから、この範囲でも地盤の緩みが生じていると判断される。
- Bor. ④～⑧間の TP+5m 以深、Bor. ⑧～①間の TP-10m 程度以深で音波が送受信できていない範囲があり、この範囲で飽和度の低下と地盤強度の低下が原因と考えられる。



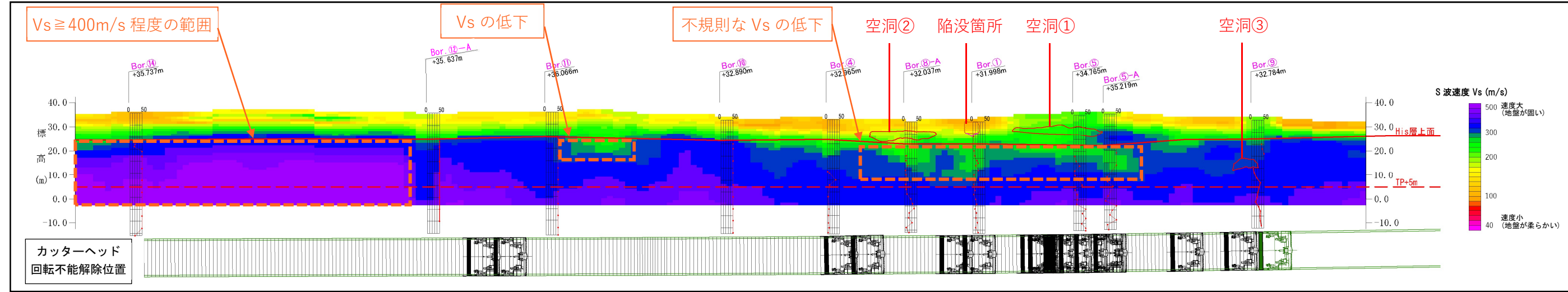
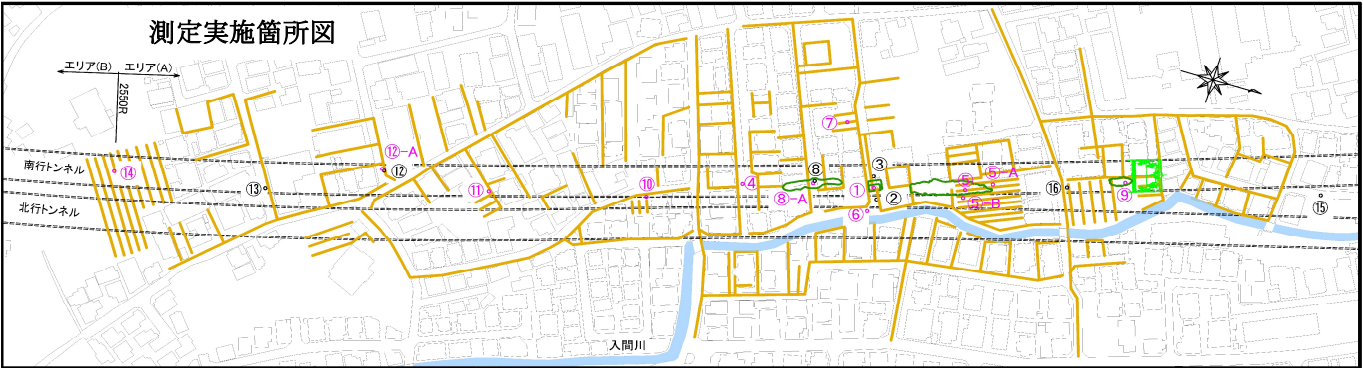
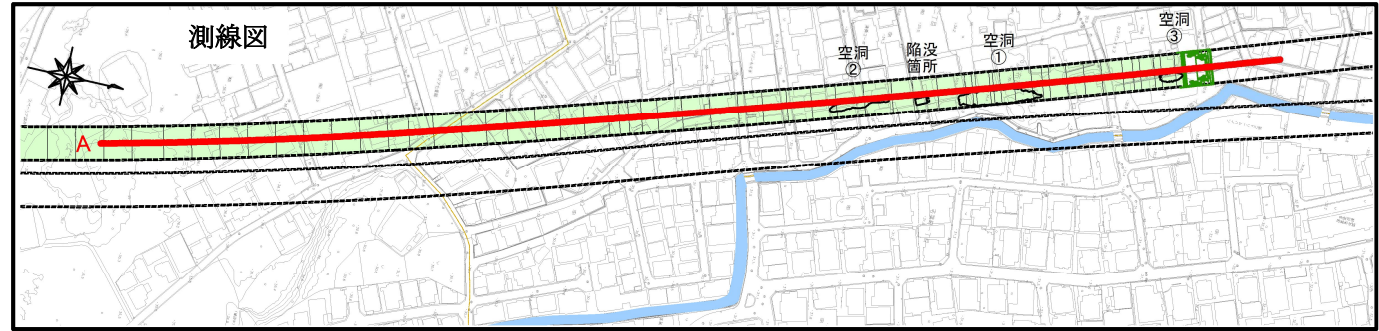
【まとめ】

トンネル際の Bor. ⑤-B およびトンネルから離れた Bor. ⑥では N 値がほぼ全域で 50 以上あることから地盤の緩みはなく、Bor. ⑥～⑤-B 間の音響トモグラフィの結果においても良好な地盤と判断されることから、地盤の緩みはトンネル直上部に限定される。

3.2.8 微動アレイ探査結果

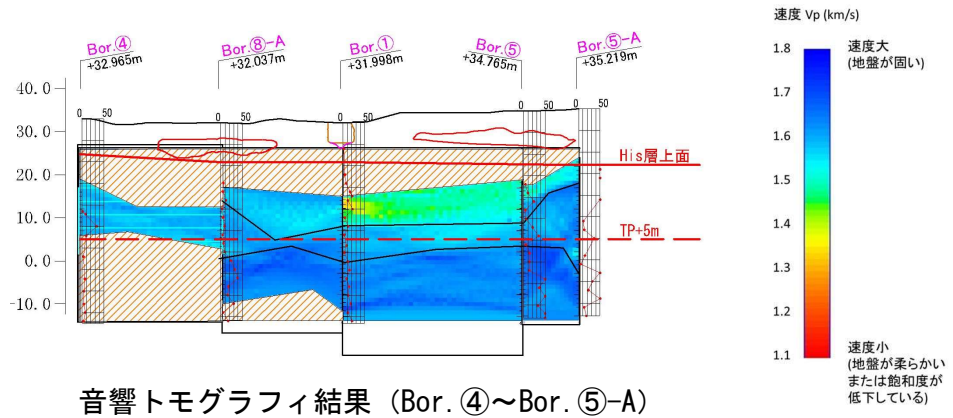
東久留米層（His）の地盤状況を確認するために、微動アレイ探査を実施した。測定される地盤の S 波速度（Vs）の分布状況から地盤状況を評価した。

① トンネル縦断方向の調査結果及び考察



トンネル縦断方向断面（トンネル直上部：測線A）

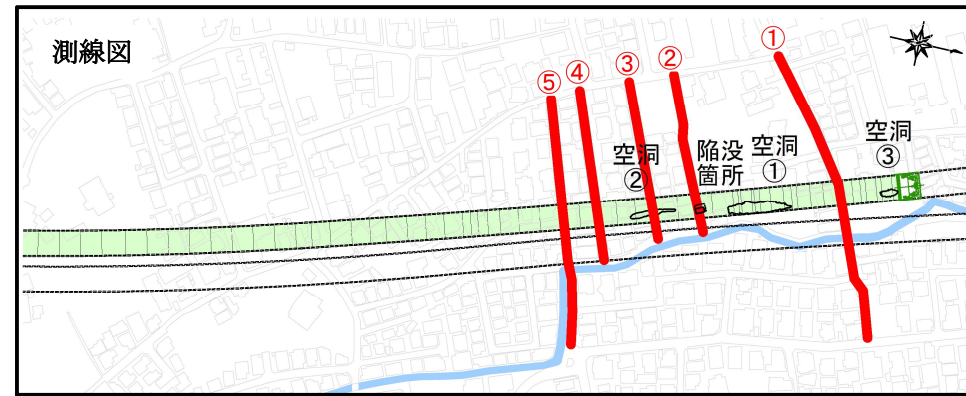
- ・トンネル直上部（測線A）において、空洞①箇所から空洞②箇所にかけての範囲では、不規則な Vs の低下が確認される。これはトンネル直上部での音響トモグラフィ探査結果と対応しており、この範囲で地盤の緩みが生じていると判断される。
- ・Bor. ⑫-A 以南では Bor. ⑫-A 以北と比較して Vs の高い範囲が確認される。
- ・Bor. ⑪～⑩間の TP+25m～TP+30m にかけて、部分的に周囲よりも Vs が低い箇所がある。近傍の Bor. ⑪は N 値 50 以上であり緩みが確認されておらず、また、既往の調査において「東久留米層のごく表層部には風化の影響とみられる N 値 50 以下の箇所が認められる」ことが確認されており、当該箇所も局所的な風化の影響によるものとも考えられるが、地盤の緩みの可能性も否定できない。
- ・空洞③箇所付近で Vs の低下がみられないのは、近接するコンクリート構造物により振動が増幅されて Vs に影響を与えていることが考えらえる。



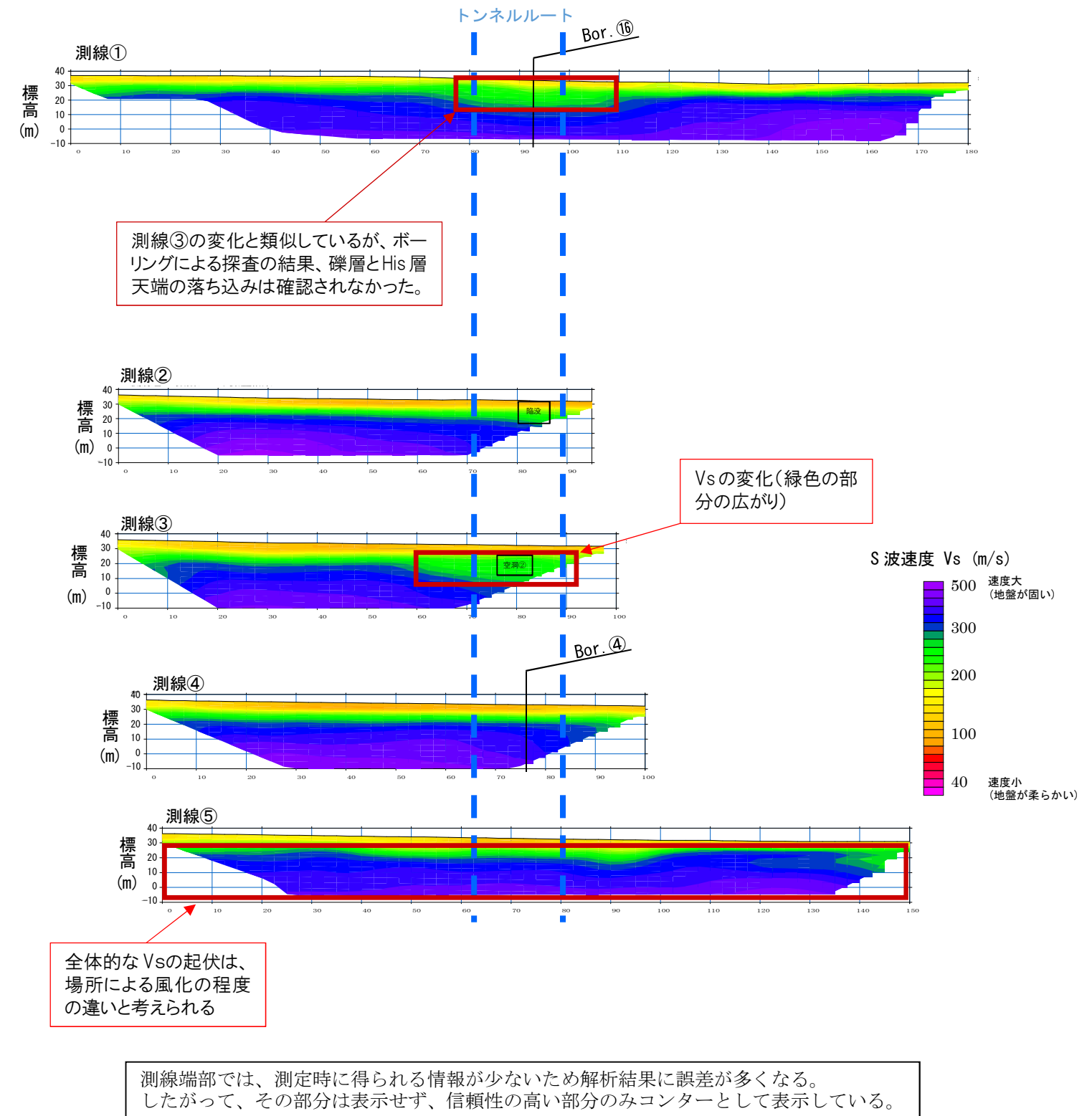
音響トモグラフィ結果（Bor. ④～Bor. ⑤-A）

② トンネル横断方向の調査結果及び考察

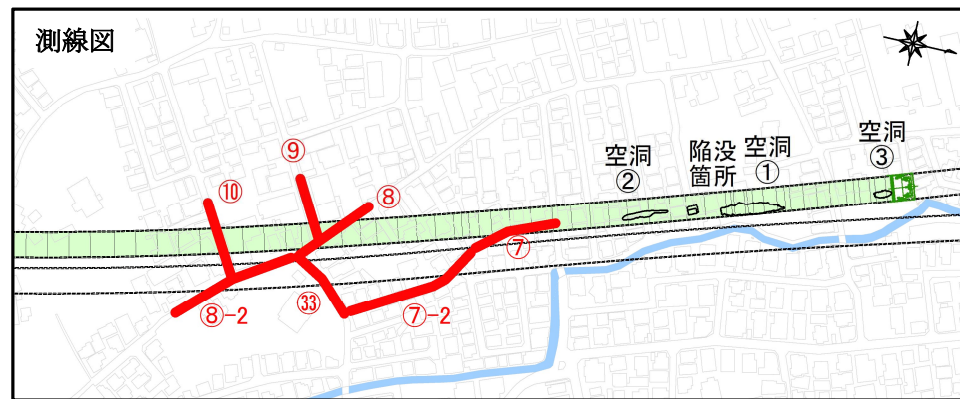
■エリアA北側（入間川近接部：空洞①～空洞②）



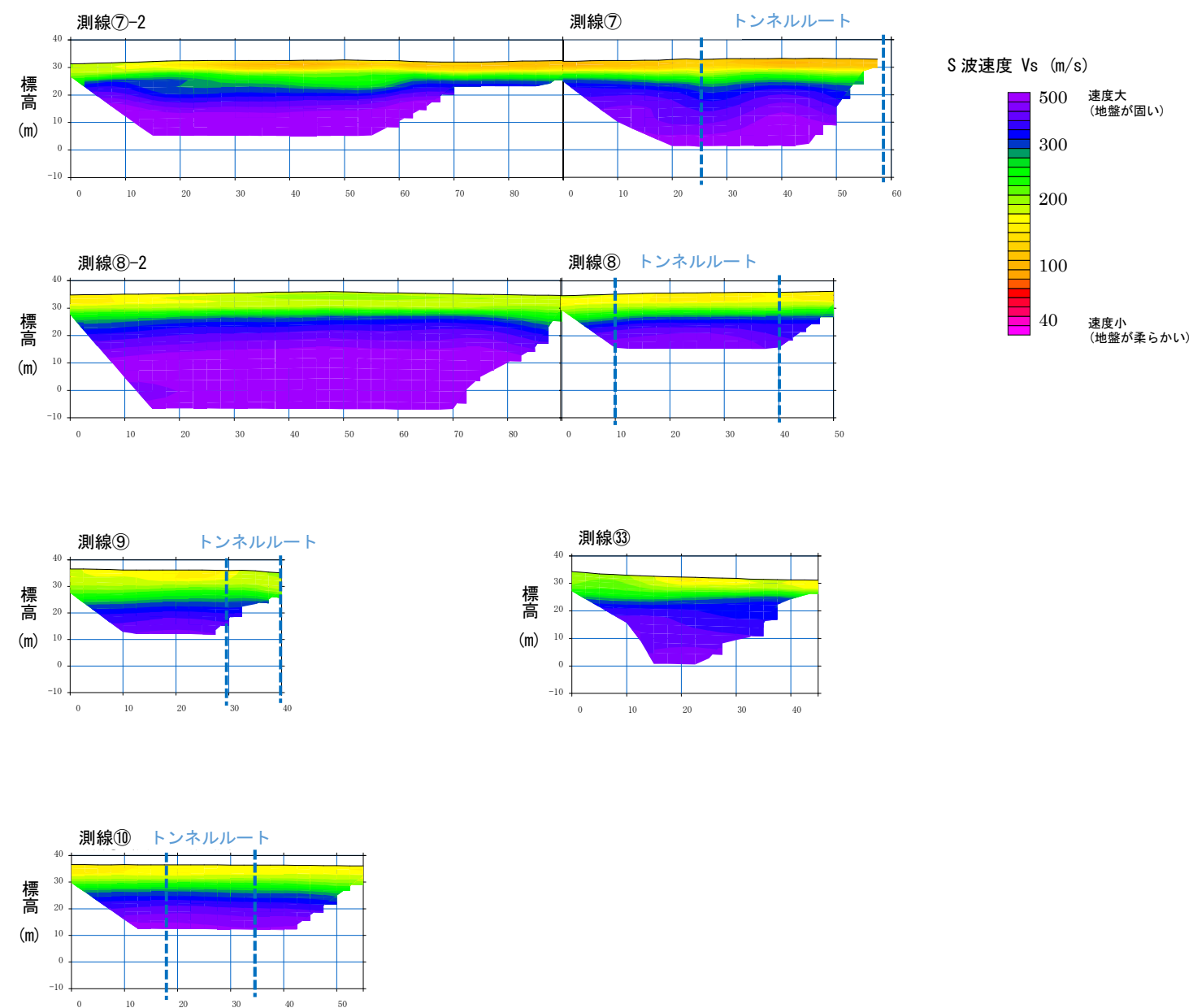
- ・測線①～⑤の範囲では $V_s=300\text{m/s}$ 以上（青色）となる範囲は概ね TP+20m 程度以下となっている。
- ・測線⑤の状況から、このエリアでは S 波速度 (V_s) に全体的に起伏がある。既往の調査において、「東久留米層のごく表層部には風化の影響とみられる N 値 50 以下の箇所が認められる」ことが確認されており、この全体的な V_s の起伏は、場所による風化の程度の違いによって速度構造に起伏が生じている可能性が考えられる。
- ・その一方、測線③でのトンネル直上部での V_s の変化（緑色の部分の広がり）は上記起伏に対してやや大きいように見受けられる。これは空洞②の影響もあるのではないかと考えられる。
- ・測線①のトンネル直上部での V_s の変化は、上記、測線③の変化と類似している。そこで測線の近傍の Bor. ⑯で調査を実施した結果、礫層と His 層天端の落ち込みは確認されなかった。
- ・測線④上の Bor. ④では、TP+5m 以深の N 値が 3～9 と他に比べて低下していた。しかしながら微動アレイの V_s には顕著な低下は見られず、Bor. ④孔周囲の極めて限定的な緩みである可能性が考えられる。



■エリアA南側



- ・測線⑦-2では $V_s=300\text{m/s}$ 以上(青色)となる上面に起伏がみられるが、エリアA北側の測線⑤(P16)の傾向を踏まえると地盤は緩んでいないと考えられる。
- ・エリアA南側の調査した範囲では、特に異常は認められなかった。



3.3 地下水状況の調査結果について

3.3.1 既往の地下水調査により得られている地下水状況

当該地域周辺の地下水状況は設計・施工段階よりも前に調査を実施しており、浅層・深層の地下水の大局的な流向・流速が得られている。

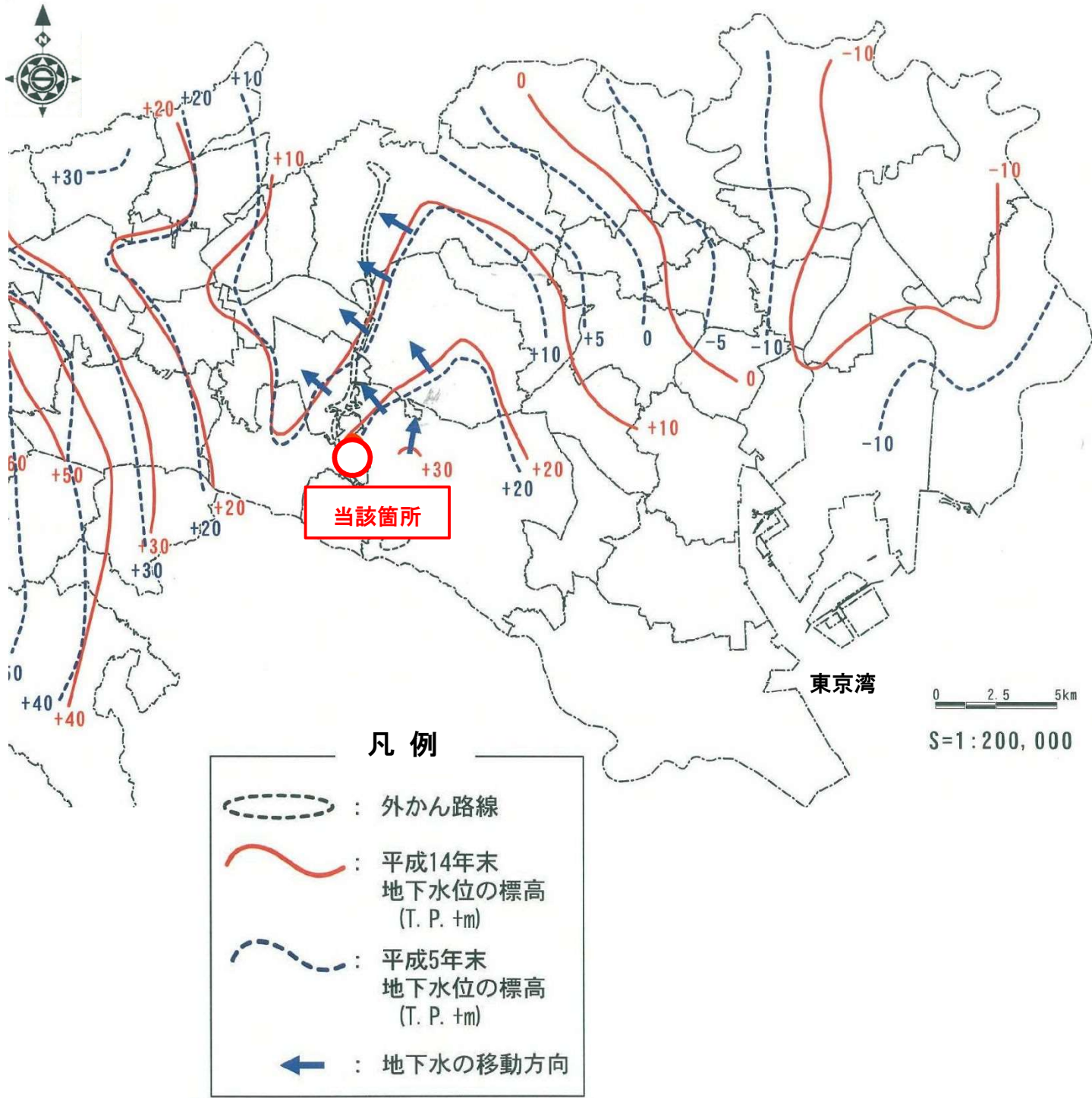
・浅層地下水の水位標高と移動方向

- （流向） 野川沿い～中央道周辺間の国分寺崖線の近くでは北東→南西方向
- （流速） 約30～40cm/日で移動



・深層地下水の水位標高と移動方向

- （流向） 東京湾から離れるように南東→北西方向
- （流速） 約3cm/日以下にてゆっくり移動



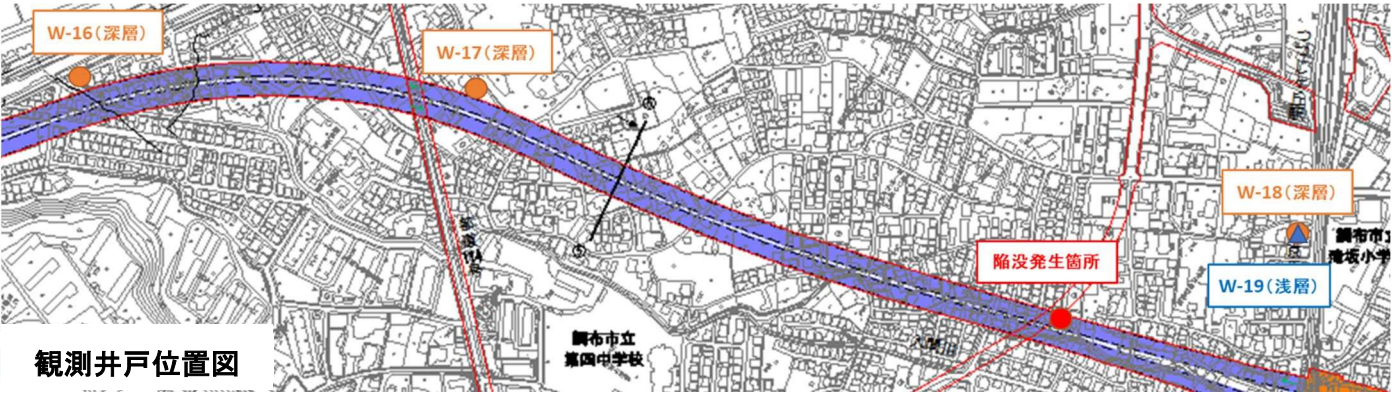
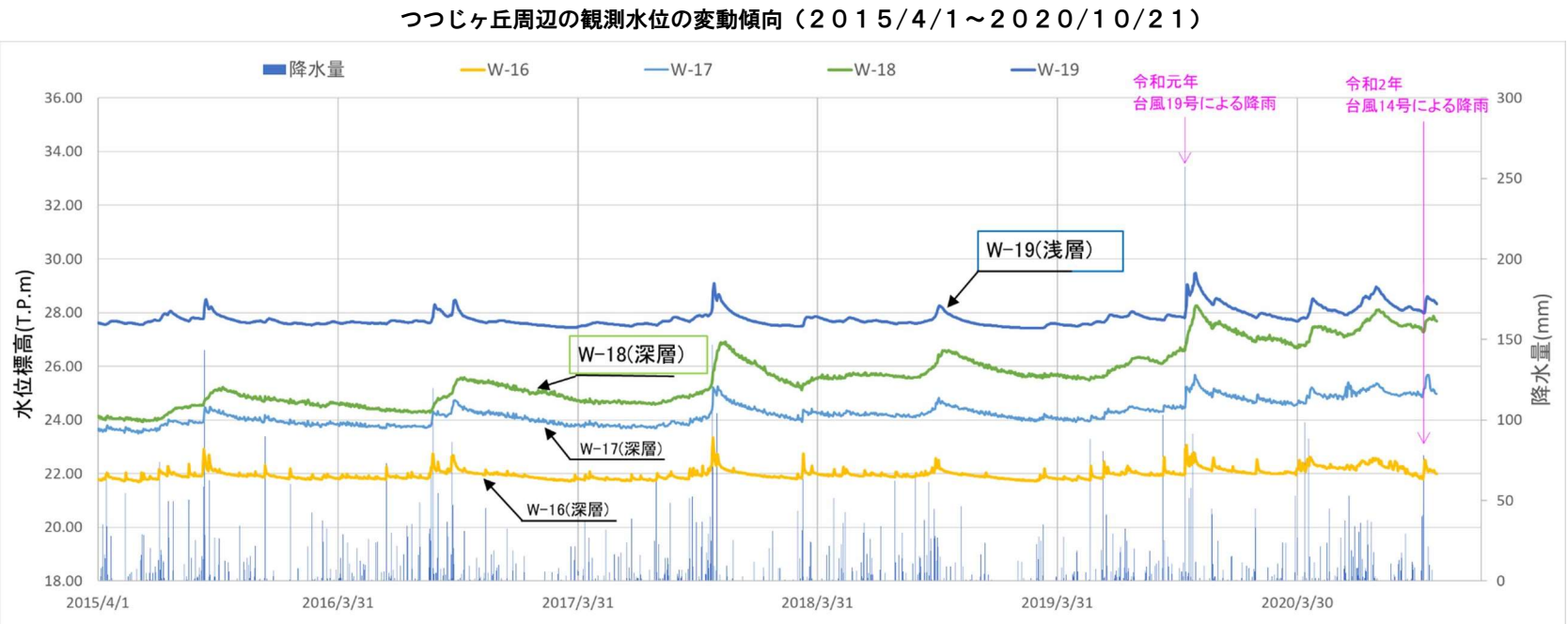
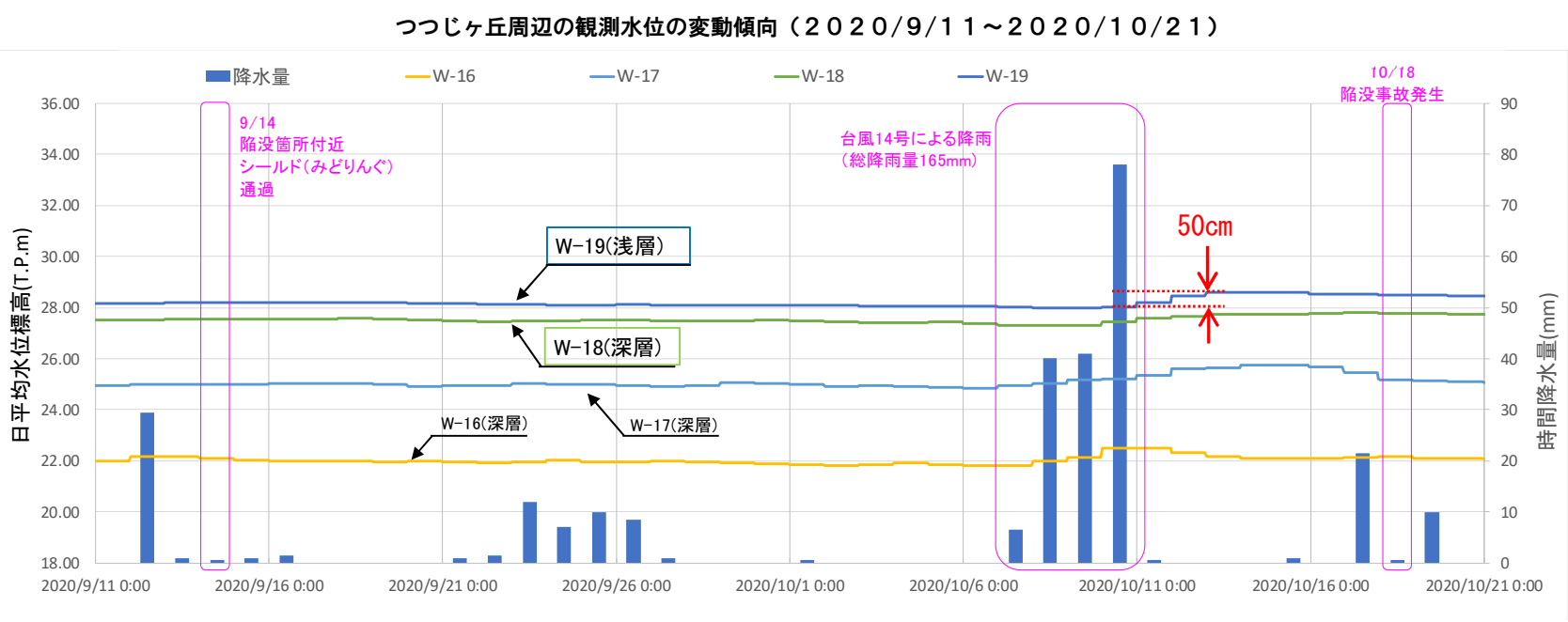
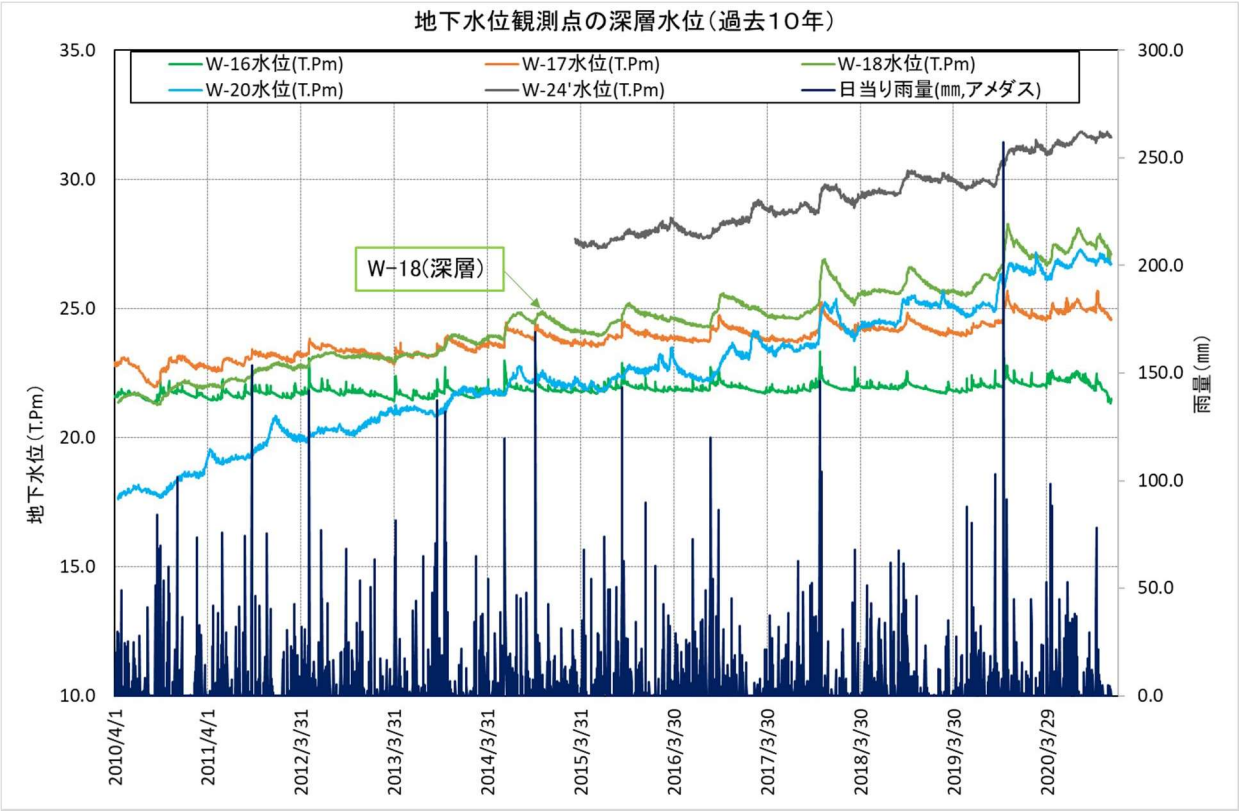
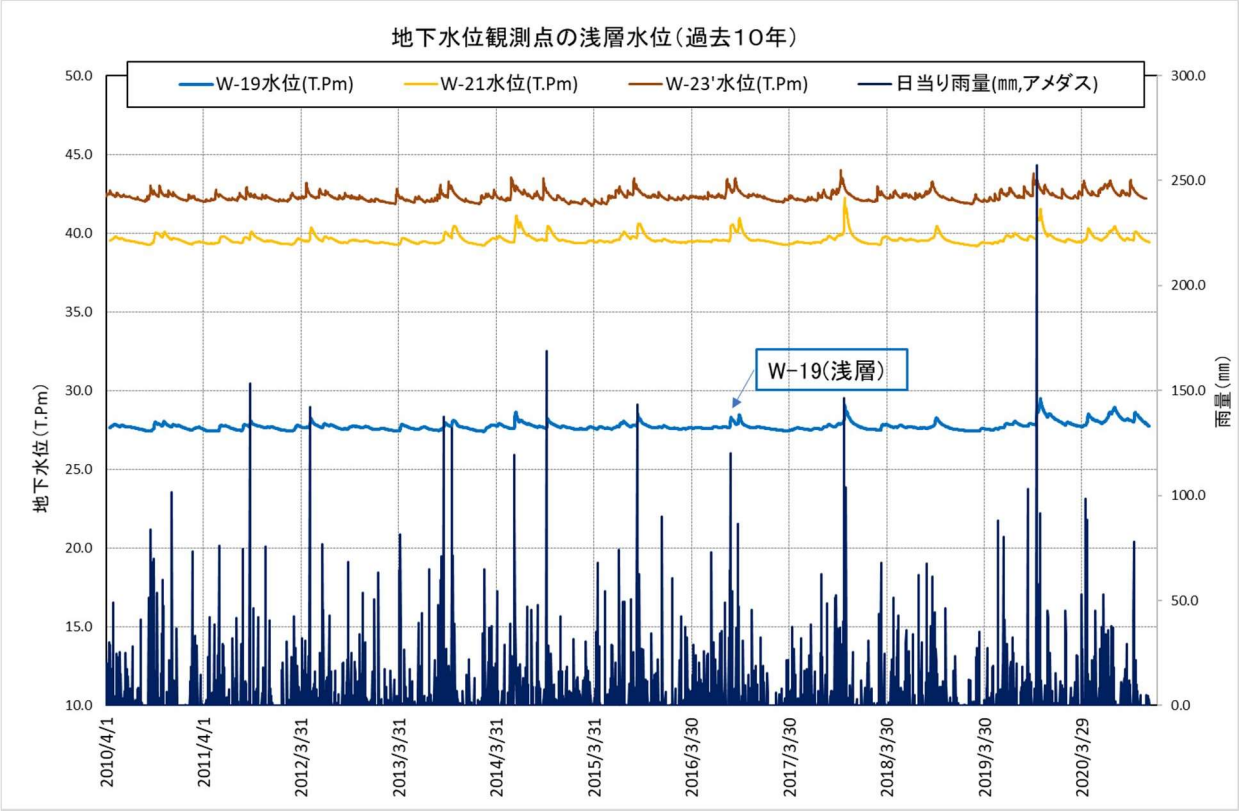
3.3.2 これまで測定してきた地下水位の状況

既往の調査から継続的に地下水位を測定している。

(浅層) 降雨の影響にて敏感に水位が変動しているが、おおむね一定である。

(深層) 降雨の影響はやや受けているが、大局的には水位は上昇している。

- ・ 陥没箇所および空洞箇所をマシンが通過時（9/8～9/24）に直近の観測井戸（W-18（深層）, W-19（浅層））に変動はない。
- ・ 両観測井戸（W-18（深層）, W-19（浅層））とも台風に伴う大雨時には約 50 c m水位が上がっている。
- ・ この5年で W-18（深層）の水位は約 3m 上昇している。
- ・ 陥没箇所および空洞箇所の表面はこれらの水位上昇により洗われた可能性があるものと考えられる。



3.3.3 当該箇所の地下水の流向・流速について

地盤状況の確認に使用した調査ボーリング孔を用いて、地下水の流向・流速を測定した。
陥没箇所、空洞箇所に確認された地下水はほぼ停滞していた。調査期間中（12月2日）に降雨があった後、再度地下水の流向・流速を測定したところ、同一箇所の測定結果ではないものの流速は比較的敏感に増加し、流向も異なる方位を示すことが確認された。

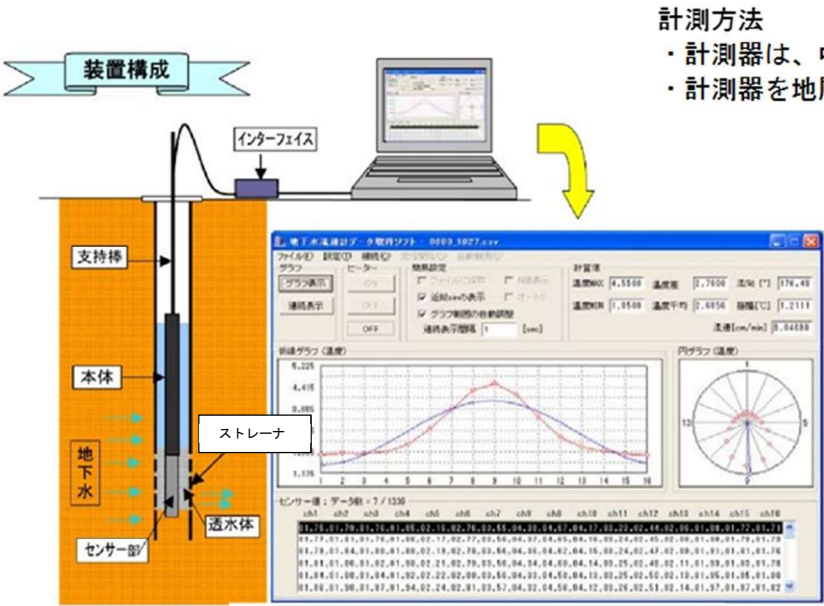
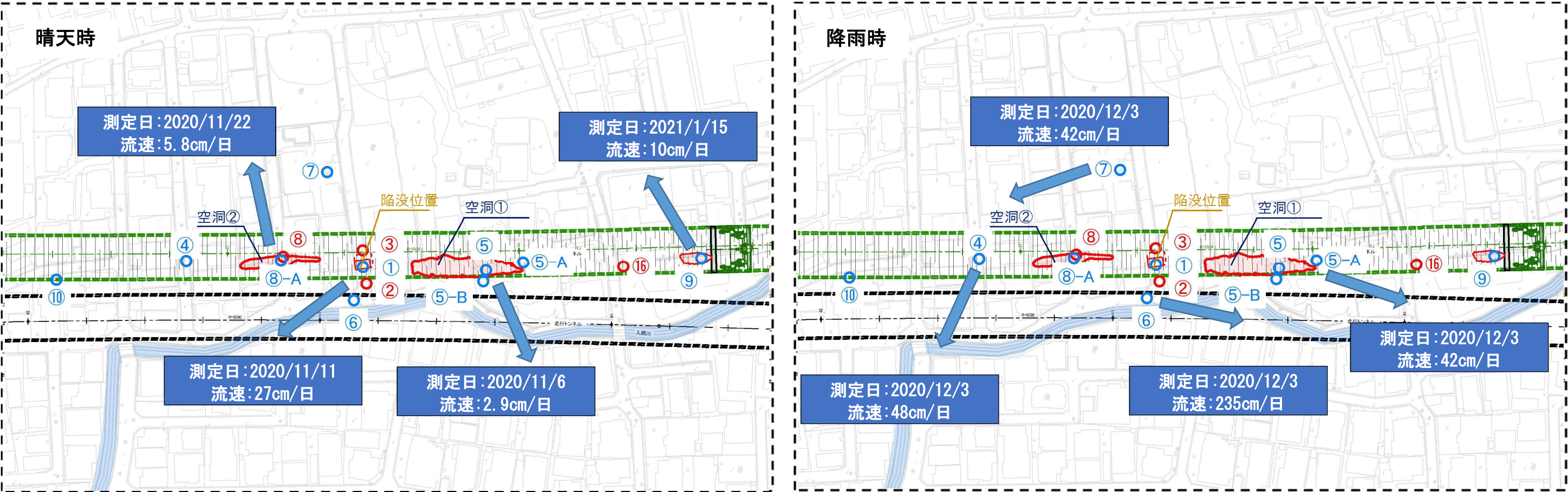


図 3-13 流向・流速計測方法

計測方法
・計測器は、中央部にヒーター（発熱体）、その周囲に円周上にセンサーが配置されている。
・計測器を地層中の測定深度に設置して、各センサーの温度変化により、地下水の流向流速を計測する。

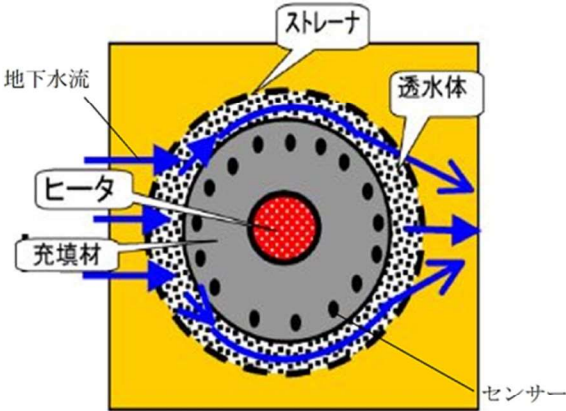


図 3-14 センサー部の構造

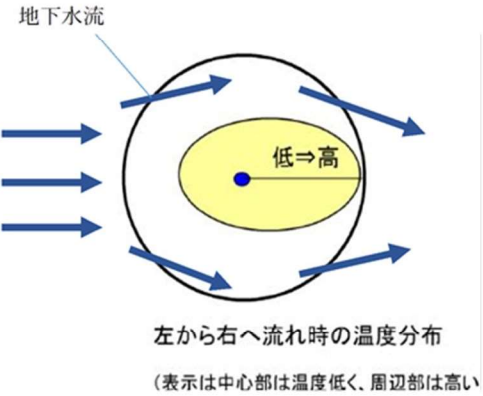
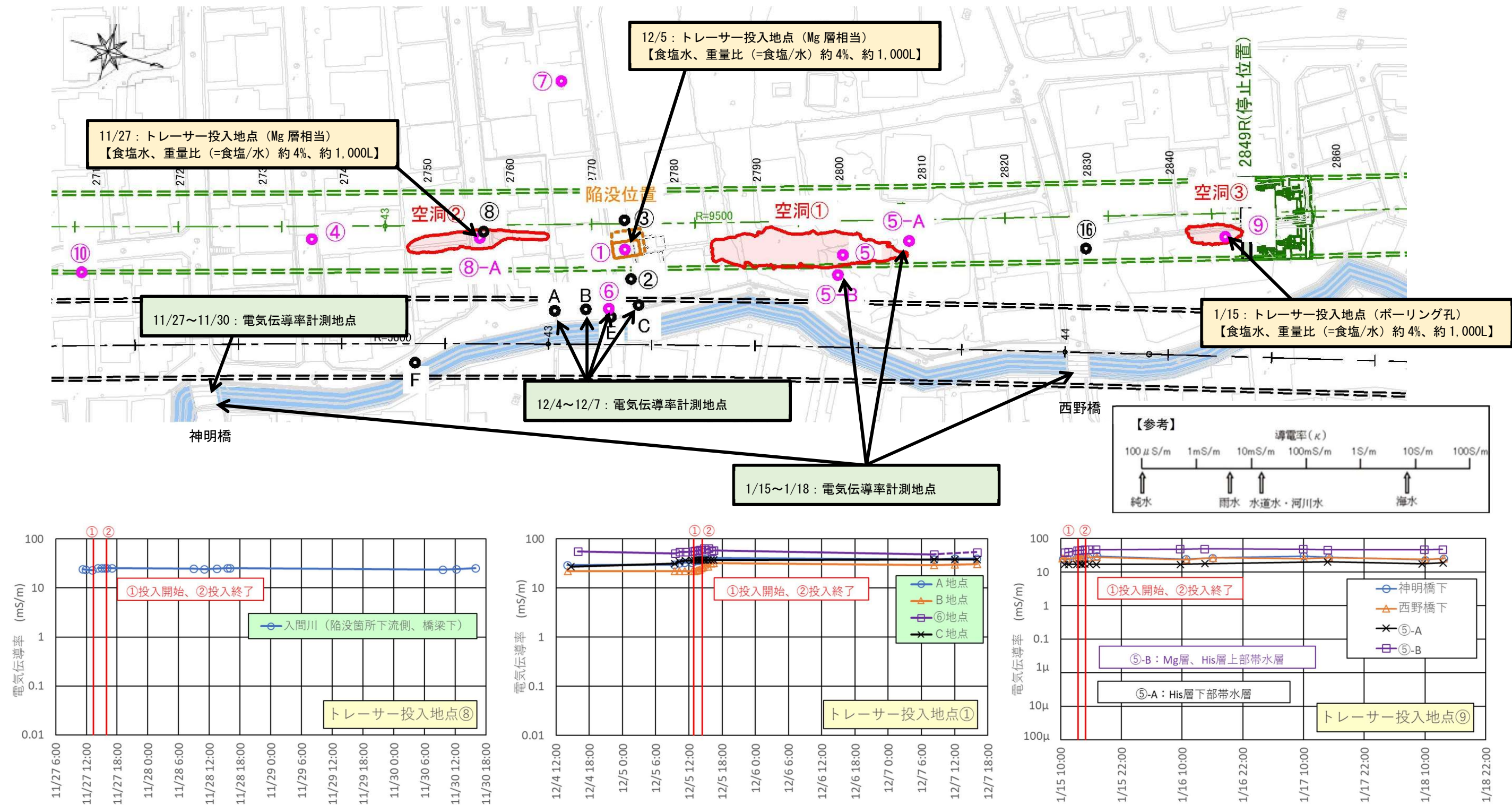


図 3-15 計測時の温度分布例

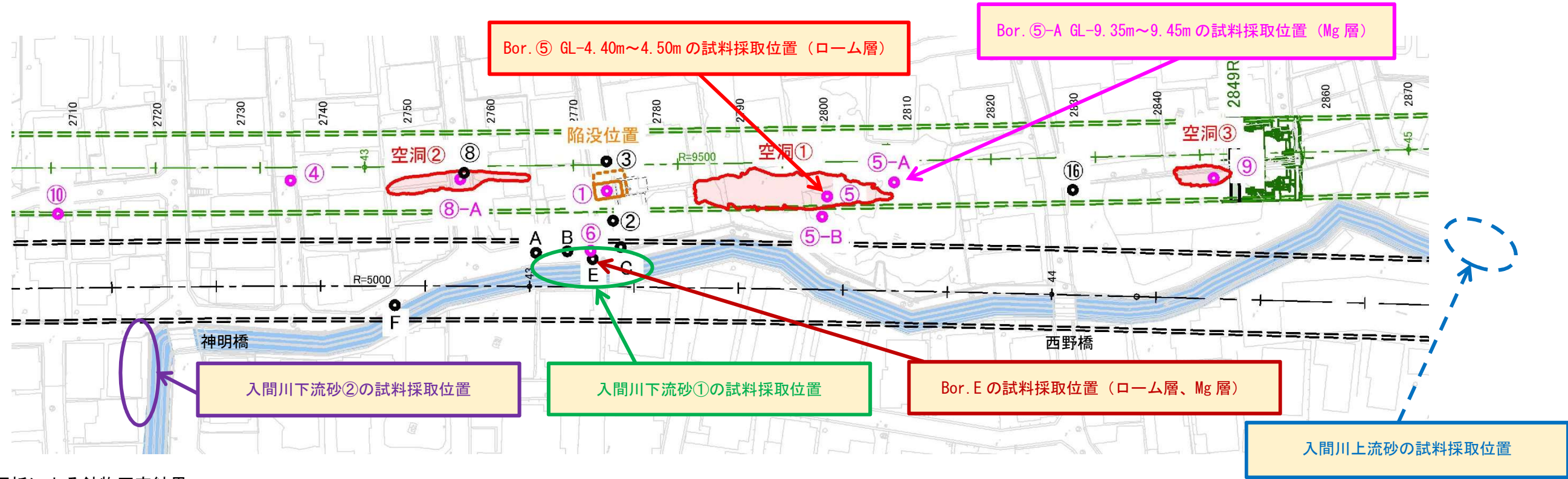
(1) トレーサー試験の結果

地盤状況の確認に使用した調査ボーリング孔を用いて、地下水の流動経路を調査した。 陥没箇所および空洞②、③箇所にトレーサー（食塩水）を投入し、入間川周辺で電気伝導率の計測を行った。計測の結果、電気伝導率の変化はわずかであった。このことから Mg 層の地下水の流れは小さく、入間川に Mg 層の土砂を流出させるものではないと考えられる。



(2) XRD (X 線回折) による分析結果

土砂の入間川への流出を確認するため、X 線回折による採取試料の鉱物分析を実施した。
その結果、Bor. ⑤の試料（#4）で検出されたスメクタイト、かんらん石は入間川試料（#1～#3）には認められなかった。
Bor. ⑤から入間川への土砂流出は無いものと判断される。



X 線回折による鉱物同定結果

表 X 線回折による鉱物同定結果

試料 (読み取りピーク：2θ)			粘土鉱物							珪酸鉱物		珪酸塩鉱物					備考
			スメクタイト	緑泥石／スメクタイト	緑泥	伊利石／混合層鉱物	伊利石	カオリン	ハロイサイト	石	石英	斜長石	単斜輝石	斜方輝石	角閃石	かんらん石	
#	試料名	処理	5.2~6.2°	6.2~7.0°	12.5°	7.0~8.8°	8.8°	12.5°	20.0°	26.6°		27.8~28.0°	29.9°	30.8°	10.5°	32.1°	
1	入間川上流砂	全岩			△*		△*			◎		○	△*	△*	△*		
2	入間川下流砂①	全岩			△*		△*			◎		○	△*	△*	△*		
3	入間川下流砂②	全岩			△*		△*			◎		○	△*	△	△*		
4	Bor. ⑤ GL-4.40~4.50m	全岩	△*		△*		△*			○		○	△			△	コア（ローム）
5	Bor. ⑤-A GL-9.35~9.45m	全岩			△*		△*			◎		○	△*	△*	△*		コア（Mg、マトリクス）
6	Bor. E-ローム層	全岩			△*				△*	○		△	-*				非晶質の水酸化鉄を含むと考えられる。
7	Bor. E-Mg 層（マトリクス）	全岩			△*		△*			◎		○	△*		-*		

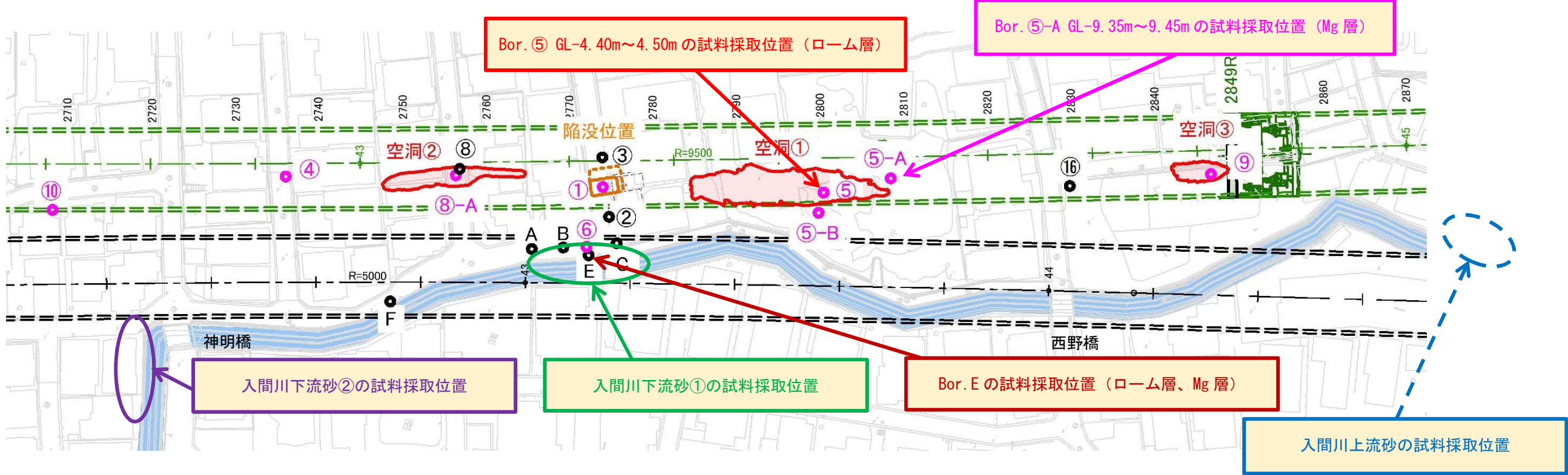
◎：多量【QI】≥10
○：中量 1≤【QI】<10
△：少量 0.1≤【QI】<1
-：微量【QI】<0.1
*：同定が不確定

(3) XRF（蛍光 X 線）による分析結果

土砂の入間川への流出を確認するため、蛍光 X 線による採取試料の元素分析を実施した。

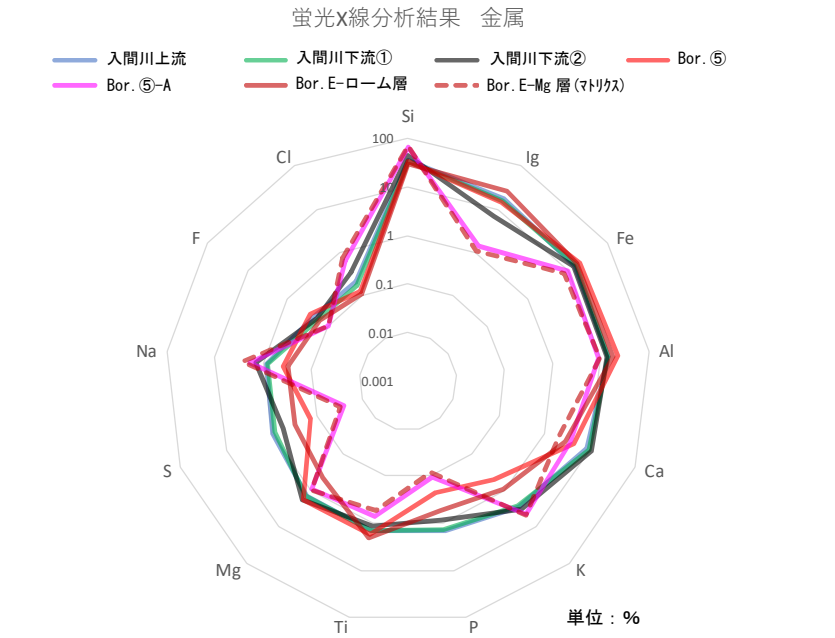
その結果、Bor. ⑤（#4）、Bor. ⑤-A（#5）、Bor. E-ローム（#6）、Bor. E-Mg（#7）の試料の元素構成は入間川試料（#1～#3）とは明確に異なることを確認した。

Bor. ⑤、Bor. ⑤-A、Bor. E-ローム、Bor. E-Mg から入間川への土砂流出は無いものと判断される。

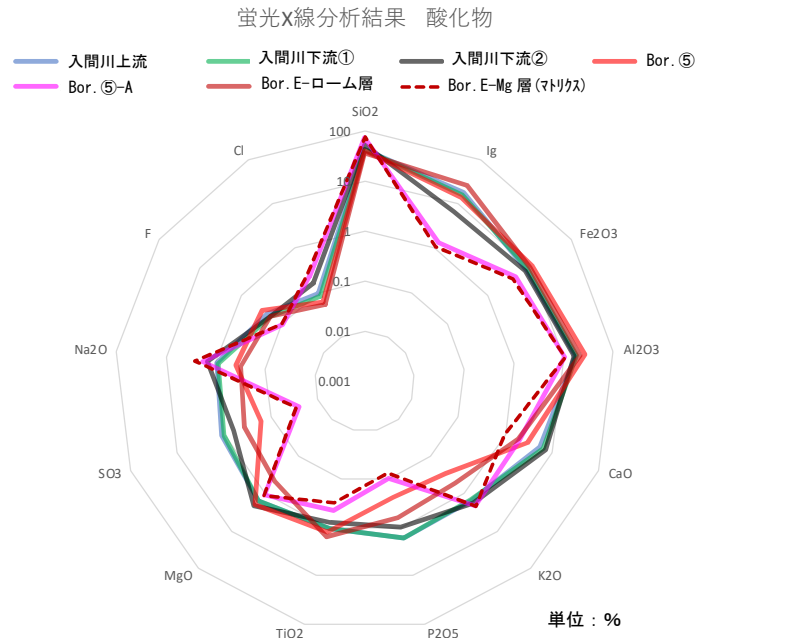


#	1	2	3	4	5	6	7
項目	入間川上流	入間川下流①	入間川下流②	Bor. ⑤	Bor. ⑤-A	Bor. E-ローム	Bor. E-Mg
Si	34.5348	33.9920	43.6525	33.5413	66.6483	30.5339	68.8044
Ig	17.6930	15.9848	6.6233	14.2621	1.3798	25.7433	1.0776
Fe	14.6547	15.7245	14.1384	19.6562	9.6827	17.4439	8.3807
Al	14.0994	14.5203	13.5414	22.4232	9.1721	17.6740	9.4948
Ca	8.4793	9.7372	11.3190	4.5297	3.7833	2.8681	1.9812
K	2.7236	2.5431	3.3158	0.4891	4.4723	0.9305	4.8443
P	1.4573	1.4123	0.8837	0.2251	0.1094	0.5545	0.0865
Ti	1.4437	1.4687	1.1369	1.6941	0.7390	2.0345	0.5509
Mg	1.3999	1.4110	1.8526	1.7352	0.9273	0.4299	0.9705
S	0.9462	0.8327	0.5408	0.1368	0.0257	0.3078	0.0306
Na	0.8349	0.7991	1.4525	0.3948	1.8483	0.3104	2.6001
Zn	0.4074	0.3642	0.2199	0.0349	0.0212	0.0525	0.0187
Mn	0.3350	0.3213	0.3374	0.2524	0.2128	0.2490	0.1558
F	0.2250	0.1750	0.1912	0.2666	-	0.1601	-
Cl	0.2009	0.1694	0.3391	0.1249	0.6065	0.1097	0.7545
Ba	0.1660	0.1444	0.1676	-	0.2307	0.1616	0.1042
Cu	0.0934	0.0906	0.0632	0.0410	0.0165	0.0739	0.0176
Sr	0.0767	0.0778	0.0857	0.0499	0.0725	0.0975	0.0654
Rb	0.0749	0.0743	0.0228	-	0.0288	0.0689	0.0273
Pb	0.0459	0.0450	0.0310	-	-	-	-
Zr	0.0394	0.0311	0.0319	0.0211	0.0000	0.0286	0.0000
Cr	0.0388	0.0463	0.0311	-	-	0.0247	-
Ni	0.0224	0.0272	0.0221	0.0160	0.0148	0.0242	0.0195
Br	0.0075	0.0079	-	-	-	0.0341	-
V	-	-	-	0.0853	-	0.0673	0.0154
Ga	-	-	-	0.0086	-	0.0105	-
Y	-	-	-	0.0073	-	-	-
Co	-	-	-	0.0047	-	-	-
As	-	-	-	-	0.0080	0.0067	-

単位：%



※Bor. ⑤-A と Bor. E-Mg 層 (マトリクス) の F に関しては対数目盛の都合上定量下限値付近の 0.1 を仮入力



※Bor. ⑤-A と Bor. E-Mg 層 (マトリクス) の F に関しては対数目盛の都合上定量下限値付近の 0.1 を仮入力

3.3.4 地下水状況の調査についての考察

降雨時には浅層水位、深層水位ともに上昇や地下水流速の増大が確認されているが、急激な地下水位の上昇や低下による Mg 層や河川への吸出しはなく、土砂が流出していた可能性は低い。

3.3.5 陥没箇所および空洞①、②、③箇所の地下水調査について

陥没箇所および空洞①、②箇所の地下水調査結果から、シールド掘進時に使用する気泡や下水が含まれている結果は得られていない。空洞③箇所の地下水調査結果から、微量の陰イオン界面活性剤が検出された。これは工事の影響による可能性がある。

表 3-1 陥没箇所および空洞①、②、③箇所の地下水成分分析調査結果表

■地下水の水質汚濁に係る環境基準項目				●陥没箇所水質調査	●空洞①箇所充填前水質調査	●空洞②箇所充填前水質調査	●空洞③箇所充填前水質調査	
項目	試験項目		環境基準値	単位	測定値（R2.10.18採取）	測定値（R2.11.05採取）	測定値（R2.11.22採取）	測定値（R3.1.14採取）
					陥没箇所	空洞①	空洞②	空洞③
地下水の水質汚濁に係る環境基準項目	カドミウム		0.003以下	mg/L	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
	全シアン		検出されないこと	mg/L	不検出	不検出	不検出	不検出
	鉛		0.01以下	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	六価クロム		0.05以下	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	ヒ素		0.01以下	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	総水銀		0.0005以下	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
	アルキル水銀		検出されないこと	mg/L	不検出	不検出	不検出	不検出
	PCB		検出されないこと	mg/L	不検出	不検出	不検出	不検出
	ジクロロメタン		0.02以下	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	四塩化炭素		0.002以下	mg/L	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
	クロロエチレン		0.002以下	mg/L	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
	1， 2－ジクロロエタン		0.004以下	mg/L	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004
	1， 1－ジクロロエチレン		0.1以下	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	1， 2－ジクロロエチレン		0.04以下	mg/L	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
	1， 1， 1－トリクロロエタン		1以下	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	1， 1， 2－トリクロロエタン		0.006以下	mg/L	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
	トリクロロエチレン		0.01以下	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	テトラクロロエチレン		0.01以下	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	1， 3－ジクロロプロペン		0.002以下	mg/L	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
	チウラム		0.006以下	mg/L	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
	シマジン		0.003以下	mg/L	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
	チオベンカルブ		0.02以下	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	ベンゼン		0.01以下	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	セレン		0.01以下	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素		10以下	mg/L	3.7	2.9	1.7	1.3
	フッ素		0.8以下	mg/L	<0.08	<0.08	0.08	0.08
	ホウ素		1以下	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	1， 4－ジオキサン		0.05以下	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
水質汚濁に係る環境項目※	水素イオン濃度		-	pH	7.7	6.7	6.0	7.2
	生物化学的酸素要求量	BOD	-	mg/L	0.5	<0.5	0.6	2.3
	浮遊物質質量	SS	-	mg/L	5	5	6	6
	溶存酸素量	DO	-	mg/L	9.5	7.5	5.7	5.3
	大腸菌群数		-	MPN/100mL	3000	500	33	230
	全亜鉛		-	mg/L	0.011	0.016	0.010	0.005
	ノニルフェノール		-	mg/L	0.00010	<0.00006	<0.00006	0.00007
	直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩		-	mg/L	0.0001	0.0003	0.0010	0.0035
イオン項目※	ナトリウム		-	mg/L	12.9	12.4	15.1	30.1
	カリウム		-	mg/L	2.0	2.7	6.9	7.4
	カルシウム		-	mg/L	27.6	25.3	57.5	27.7
	塩化物イオン		-	mg/L	10.9	8.6	9.4	11.8
	硫酸イオン		-	mg/L	55.4	65.2	164	51
	炭酸水素イオン		-	mg/L	67.0	71.3	41.5	112.0
	炭酸イオン		-	mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
調査項目※	水温		-	℃	-	-	-	-
	電気伝導率		-	mS/m	28.2	30.5	45.6	33.6
	酸化還元電位	ORP	-	mV	+320	+310	+200	+300
	硫化物イオン		-	mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	陰イオン界面活性剤	MBAS	-	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	0.200

下水の場合は、公共用水域の水質汚濁に係る環境項目に異常値が出る。

気泡はその他の調査項目に異常値が出る。

3.4 人工物の存在による影響等の調査結果

3.4.1 陥没箇所、空洞箇所の観察結果

空洞内部を観察した結果、空洞北部端部に縦配管（ヒューム管〔内径φ700mm、外径φ820mm〕）の存在が確認された。調査の結果、配管の管底はMg層（GL-7.7）にとどまっており、排水目的で設置されたものと思われる。



3.4.2 人工物の存在

当該箇所付近の入間川の上流付近に入間川分水路が整備されていることを確認した。

また過去の地下水利用のための井戸、防空壕やうど栽培用穴蔵等が設置され、砂等に埋戻されていた可能性も否定できないが、具体的な人工物の設置や埋戻しは確認されなかった。

3.4.3 人工物の存在による影響等の考察

空洞内にMg層内を下端とする人工物の存在が確認されたものの、あらかじめ空洞形成されていたこととの因果関係は、特定できなかった。

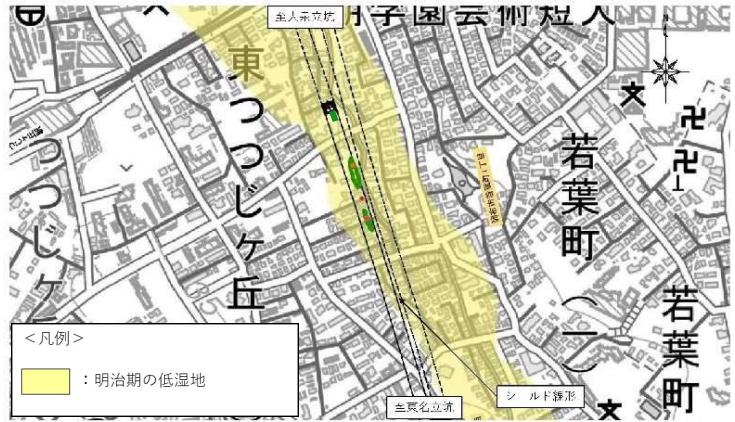
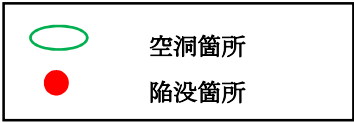
3.5 地歴調査結果

3.5.1 地形・土地利用変遷図に対する考察

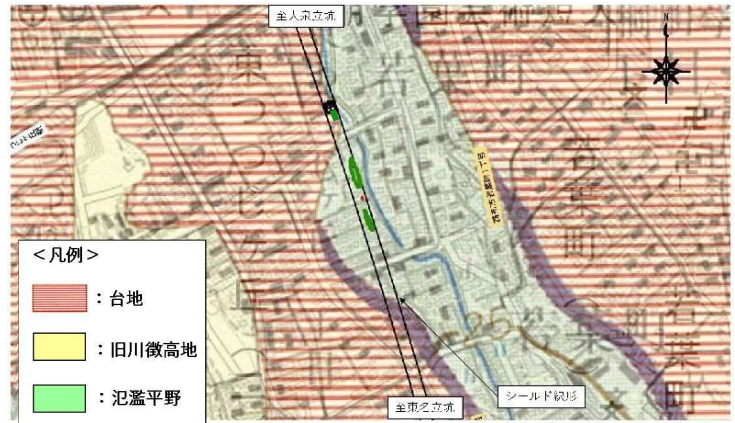
- ・東京都都市計画図（1961 年 11 月）および「明治期の低湿地図」や国土地理院の「治水地形分類図」によれば、陥没があった地点付近は入間川の西に浅く円弧状に入り込んだ谷地形をなしており、入間川の過去の蛇行跡を想像させる地形である。
- ・2m メッシュ DEM からは、今回陥没した箇所は段丘面周辺の緩斜面における小規模な集水域の最下流部にあたることが判る。



東京都都市計画図（1961 年 11 月）

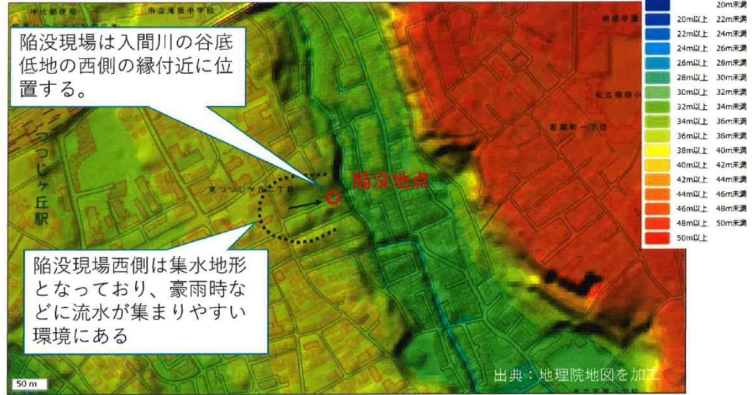


明治期の低湿地地図(1880～1886 年) 出典：地理院地図（電子国土 web）



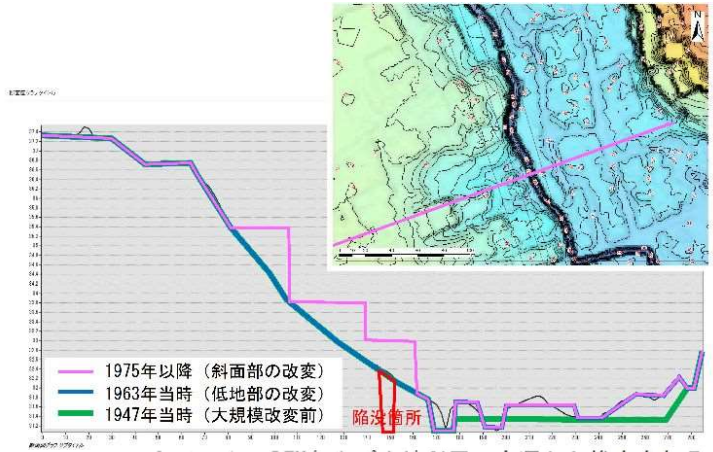
出典：地理院地図（電子国土Web）

治水地形分類図（1976～1978 年） 出典：地理院地図（電子国土 web）



色別標高図

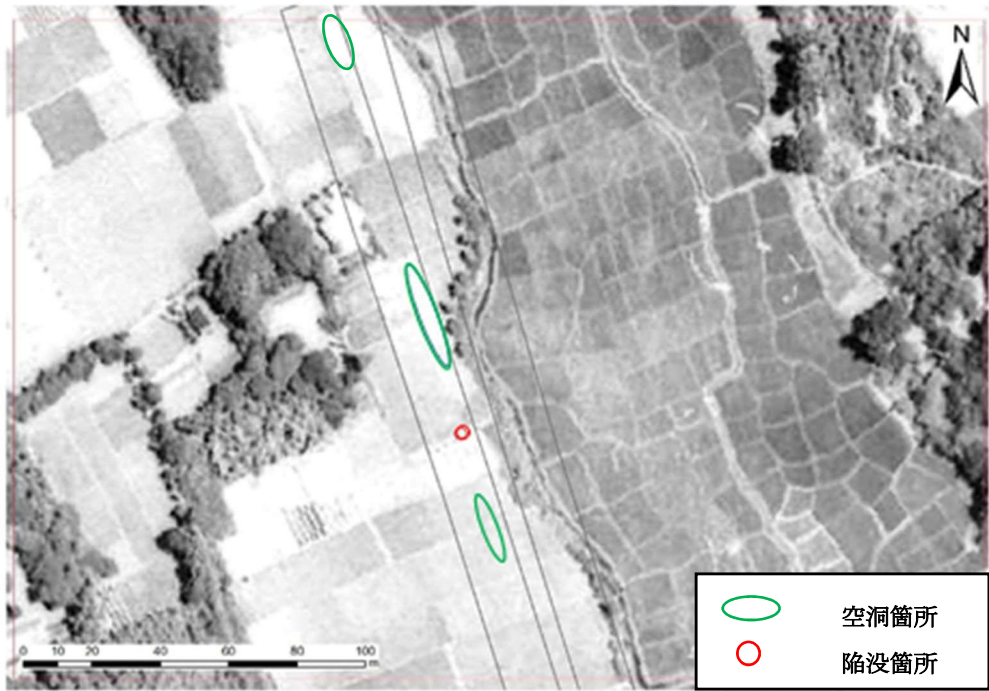
出典：地理院地図を加工



地表面の横断変遷（2m メッシュ DEM） 出典：各年の土地利用から推定

3.5.2 航空写真変遷に対する考察

- ・1947 年時点では、陥没箇所周辺では大規模な地形改変は見られない。
- ・1963 年時点では、陥没箇所から東側の谷底平野で大規模な宅地造成（谷埋盛土）が行われている。
- ・1975 年時点では、今回陥没した箇所の南側の区画がひな壇状に造成されている（盛土のように見える）が、住宅は建設されていない。
- ・1984 年時点では、今回陥没した箇所の北側の一部の区画が造成されている（盛土のように見える）。



航空写真（1947 年）

出典：国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス



航空写真（1975 年）

出典：国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス



航空写真（1963 年）

出典：国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス

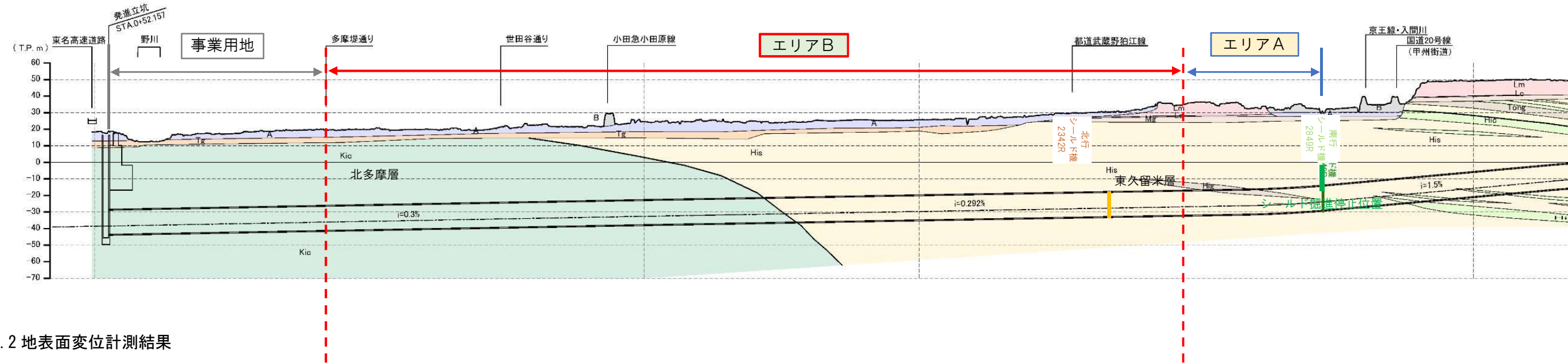


航空写真（1984 年）

出典：国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス

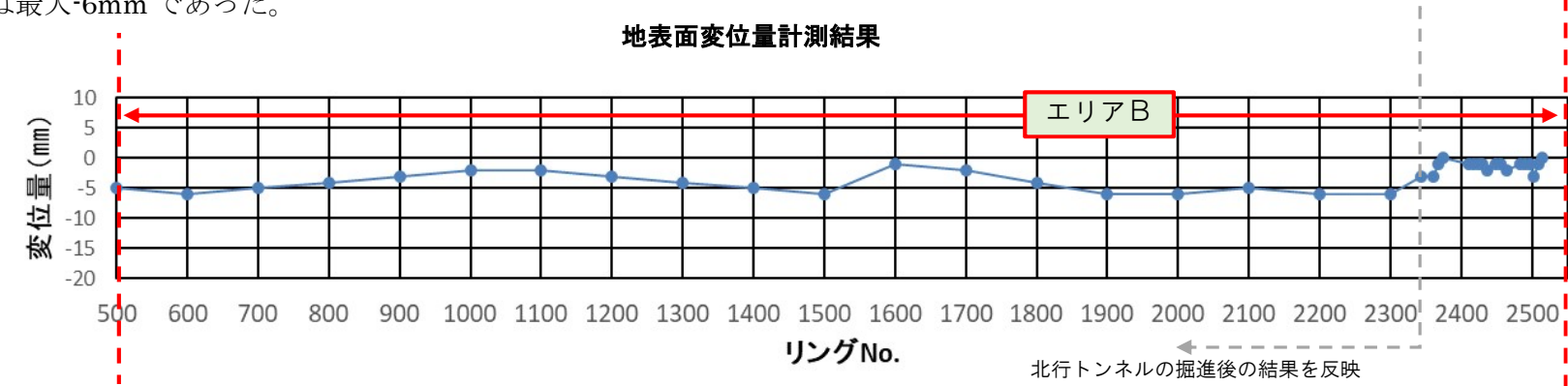
3.6 これまでの掘進区間の地盤状況の調査結果（エリアB）

3.6.1 調査対象範囲区間

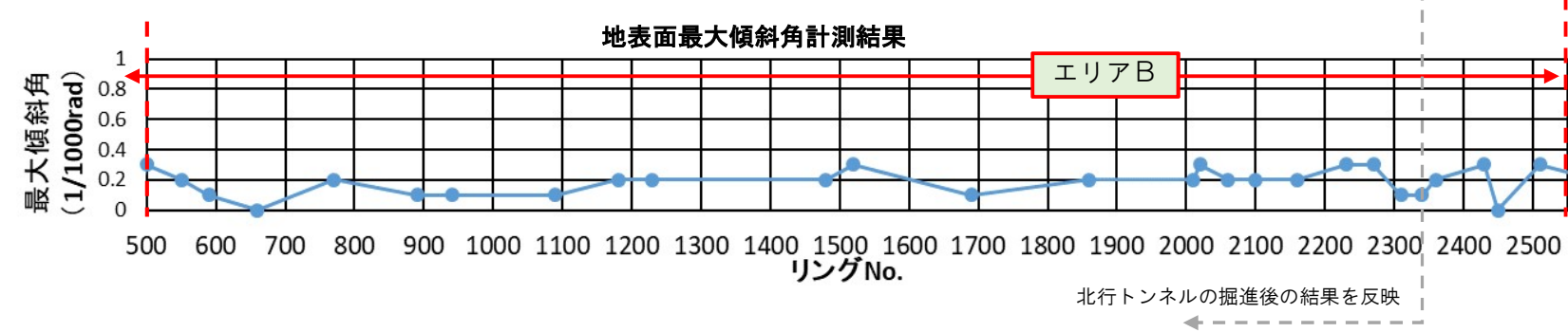


3.6.2 地表面変位計測結果

エリア B において、地表面変位量は最大-6mm であった。



エリア B において、地表面傾斜角は最大 0.3/1000rad であった。



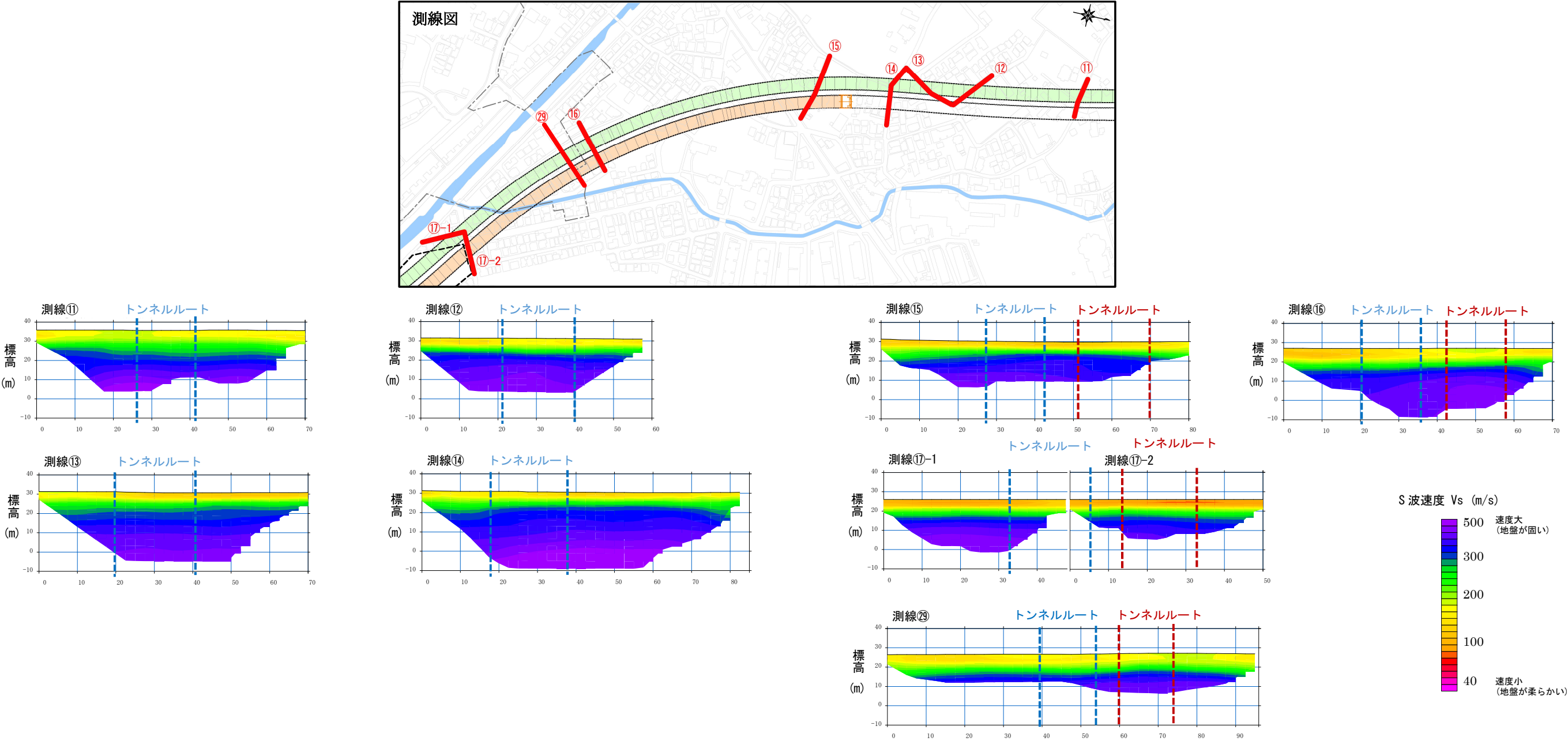
3.6.3 微動アレイ探査結果（エリアB）

エリアBを各測線（⑪～⑲）で微動アレイ探査を実施した。探査の結果で特に異常は認められなかった。

■エリアB（測線⑪～⑲-2、⑲）

- ・測線⑪、⑲では、トンネル直上部にコンターが描かれていない空白部がある。このような箇所は微動アレイ測定時に不確定要素によるノイズ（車両、工場、重機などの過大な振動）が多い場合があり、特に波長が長い波のデータが採取できず深いところが評価出来なかった部分である。

（探査の性質上、波長が短い波で表面付近を、波長が長い波ほど深いところの速度構造を反映する。波長が長い波ほどノイズの影響を受けやすい。）



・測線⑬、⑭のトンネル直上部にコンターが描かれていない空白部がある。このような箇所は微動アレイ測定時に不確定要素によるノイズ（車両、工場、重機などの過大な振動）が多い場合があり、特に波長が長い波のデータが採取できず評価が出来なかった部分である。

（探査の性質上、波長が短い波で表面付近を、波長が長い波ほど深いところの速度構造を反映する。波長が長い波ほどノイズの影響を受けやすい。）



3.7 調査結果のまとめ

（エリアA）

- ・空洞箇所付近において実施したボーリング調査では、空洞の上部付近にはほぼ共通して硬質なローム層（凝灰質粘土層）が存在する一方で、陥没箇所の入間川に向かう道路筋にはこの層が無く、黒ボク土が存在していることから、当該地造成時などにおいて人工的に掘削された可能性があるエリアであることを確認した。
- ・ボーリング調査から、トンネル直上において、トンネル部から緩み領域が徐々に上方に拡大している可能性を確認した。
- ・ボーリング調査および物理探査（微動アレイ、音響トモグラフィ）から、Bor. ⑫より北側のトンネル直上部以外では地盤の緩みや空洞の存在は確認されなかった。
- ・地表面変位計測結果から、最大変位量は-20mm で、地表面傾斜角は最大 0.8/1000rad であることを確認した。
- ・令和2年台風14号（シールドが空洞①箇所を通過した後に接近）の影響により、近傍観測井戸の地下水位が約50cm上昇していることから、空洞形成後に短期間で陥没・空洞箇所の表面が水で洗われた可能性があることを確認した。
- ・表層地下水の降雨時の流速の上昇や流向の変化は、入間川にMg層の土砂を流出させるものではないことを確認した。
- ・空洞①箇所において採取した土砂と入間川護岸に堆積している土砂の成分が異なっていることを確認した。
- ・陥没箇所および空洞①、②箇所の地下水調査結果から、シールド掘進時に使用する気泡や下水が含まれている結果は得られていないが、空洞③箇所の地下水調査結果からは微量の陰イオン界面活性剤が検出されており、工事の影響による可能性がある。

（エリアB）

- ・地表面変位測定結果から、最大変位量は-6mm で収束していること、地表面傾斜角は最大 0.3/1000rad であることを確認した。
- ・物理探査（微動アレイ）から、掘削断面上部において地盤の緩みや空洞の存在は確認されなかった。

4. 地盤の特性

4.1 事前調査

東京外環では、事業区域周辺の地形・地質を把握するため、地形・地質に関する既存資料を収集・整理し、ボーリング調査等による事前調査を実施している。

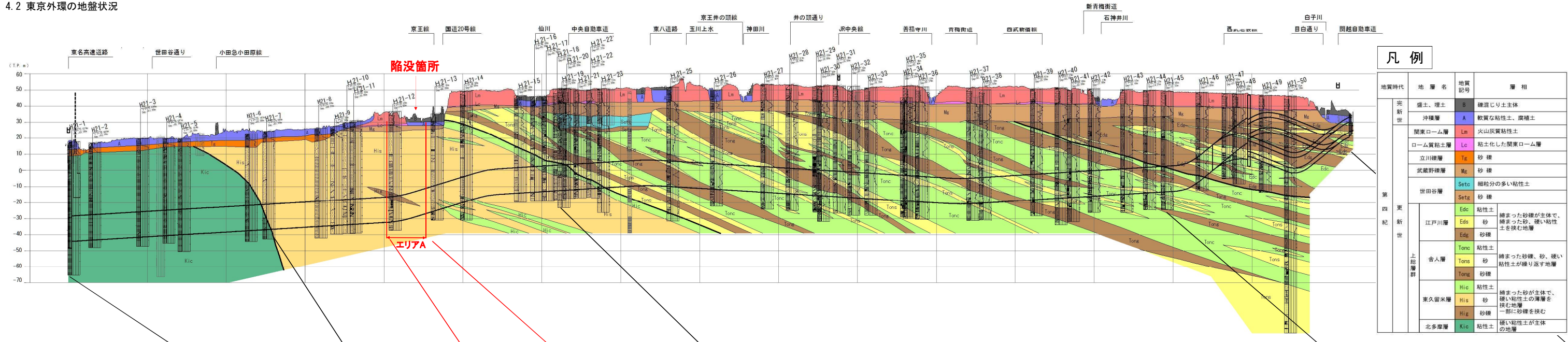
既存のシールドトンネルでは、１００～２００m程度の間隔でボーリング調査を実施している例が多く、また、「トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説」や「鉄道構造物等設計標準・同解説シールドトンネル」等の各種基準・指針等において、１００～２００m程度の間隔のボーリング調査が推奨されている。

東京外環事業においても大深度地下使用認可申請にあたり、調査間隔２００m程度を目安として事業区域周辺で８６本（既存資料を３本含む）のボーリング調査が実施されている（調査間隔は平均１６７m程度）。また、同示方書において、「ボーリングをはじめとする各種調査孔は、シールド工事中に逸泥、噴発の原因となりやすく、調査孔位置の選定や埋戻しを十分配慮して行う必要がある」とされており、ボーリング調査が可能な用地の場所も踏まえ、ボーリング調査位置を決定している。

さらに、ボーリング調査に加えて、ボーリング調査地点間に地盤急変部が存在しないことを確認することを目的とし、物理探査として微動アレイ探査を実施している。微動アレイ探査は、地盤の自然微動を地表に群設置した計測器により観測し、地下の構造を推定するものであり、人工振源を使用する必要がなく周辺環境への影響が小さいことなどを考慮して選定され、周辺環境条件によりボーリングが実施できずボーリング調査間隔が２００m以上となる範囲で重点的に実施している。

これらの工事着手前に行われる事前調査により、東京外環全線に渡り、地上部からシールド掘進断面以深までの地層構成や地盤強度、粒度分布などについて確認していた。

4.2 東京外環の地盤状況



地質		北多摩層	東久留米層	舎人層	江戸川層
概 要	表層	厚さ10m程度の沖積層・立川礫層	厚さ10m程度の埋土・ローム層・沖積層・武蔵野礫層	厚さ10m程度のローム層・武蔵野礫層	厚さ15m～20m程度のローム層・武蔵野礫層
	掘削断面上部	北多摩層で単一の粘性土層になっている	東久留米層で単一の砂層になっている	舎人層の砂、礫、粘性土層が互層になっている	江戸川層の砂、礫、粘性土層が互層になっている
	掘削断面	【粘性土主体】 北多摩層(Kic)は、粘土・シルト分が70%以上のものがほとんどとなっている。	【砂層主体】 多少の粒度のばらつきがあるものの、細砂～中砂がその主体となっていることが特徴的である。	互層礫 砂分と礫分の合計が80～90%を占めており、細粒分に乏しい。	互層礫 礫分が60%以上を占めるものがほとんどであり、一部、砂分が多いものも含まれる。
				互層砂 細砂～中砂が主体となっているが一部、シルト・粘性土の多いものや礫分を含むものが見られ、一部粒度にばらつきがある。	互層砂 礫が多く混じるものからシルト・粘土分が多く混じるものまで、粒度にばらつきがあるものの、細砂～中砂がその主体となっている。

掘削断面における地質概要	ボーリングNo		H21-1	H21-2	H21-3	H21-4	H21-5	H21-6	H21-7	H21-8	H21-9	H21-10	H21-11	H21-12	H21-13	H21-14	H21-15	H21-16	H21-17	H21-18	H21-19	H21-20	H21-21	H21-22	H21-23	H21-25	H21-26	H21-27	H21-28	H21-29	H21-30	H21-31	H21-32	H21-33	H21-34	H21-35	H21-36	H21-37	H21-38	H21-39	H21-40	H21-41	H21-42	H21-43	H21-44	H21-45	H21-46	H21-47	H21-48	H21-49	H21-50	
	STA		0+44	3+12	9+08	12+46	14+43	23+04	25+20	31+82	33+84	35+44	36+32	41+27	46+45	50+13	57+26	59+36	60+84	62+13	62+81	63+47	64+84	66+47	67+79	76+26	82+02	88+47	91+64	95+03	95+63	97+64	99+46	101+63	106+10	106+45	107+97	114+48	116+05	122+51	125+63	127+03	129+70	133+80	136+71	138+95	143+40	146+69	148+08	151+41	154+60	
	細粒分含有率(%)	礫層	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	3	4	2	4	5	-	-	-	-	4	5	8	3	2	-	-	10 7	9 4	4	-	5	17	15	
		砂層	-	-	-	-	-	-	-	16	23	17	18	30	7	6 13	7 10	9 11	16 11	18	9	44	9 12	7 38	36 37	6 9 46	8 26	9	17 54	-	-	11	54	12	8	-	34	10	-	-	14 93	39 95	44 92	64 97	26 97	37	-	-	21 16 50	30	45	-
		粘性土層	91	95	70	81	89	60	37 50 60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	86	70 87	55	71 82	85	89	-	94	96	76 79	48 47	59	-	93	98	98	98	97	53 90	81	84 46	93 92	95 97	71 96	69 85	-	99 89	85	-	-	-	91 81	
		評価①													●	●	●	●								●						●															●					
	均等係数※	砂層								3	3 12	4 6	3 12	3	4 15	6 7	3 5	6 8	8	4 14	5 11	5 11	6 8	10 50	3 4	9	2	7			5	-	10	3		8	3		7	29	-	-	4	12			7 42	93	69			
		評価②								●	●	●	●	●	●	●					●	●	●			●		●				●																				
	地山の流動性														●	●	●									●						●																				

※均等係数 $U_c = D_{60} / D_{10}$ (D_{60} : 通過質量百分率60%粒径、 D_{10} : 通過質量百分の10%粒径)。土砂の粒子が揃っていると値が小さくなる。

評価① 各断面における礫層または砂層の細粒分含有率が10%以下で、かつ粘性土層がない：●
評価② 各断面におけるいずれかの土層の均等係数が5以下：●
地山の流動性評価 評価①かつ評価②に該当：●
(トンネル標準示方書・同解説「山岳工法編」2016年制定の「表2.3.10 地山の流動化を示す指標の例」を基に評価設定)

4.3 地盤特性のまとめ

【掘削断面】

- トンネル標準示方書・同解説〔山岳工法編〕2016によると、地山流動化の指標として、細粒分 10%以下、均等係数 5 以下であるとされているとおり、細粒分が少なく均等係数が小さい砂質層などは自立性が乏しくなる。また、細粒分が少ない場合や礫を含む場合は、シールドトンネル施工における掘削土の塑性流動性の確保にも留意する必要がある。
- 掘削断面では、細粒分 10%以下、均等係数 5 以下である箇所は東久留米層で 3 箇所（ボーリング No：H21-12、H21-13、H21-15）、舎人層で 2 箇所（ボーリング No：H21-23、H21-30）である。

【掘削断面上部】

- 掘削断面上部は、北多摩層は単一の粘性土層、東久留米層は単一の砂層、舎人層及び江戸川層は礫・砂・シルト・粘土が混在する互層で構成されている。
- 単一の砂層は、同様の地質状況が地表面近くまで連続しており、トンネル掘削による地山への影響が地表面まで伝搬しやすい。一方、互層区間は礫層・砂層・粘性土層で構成されるため、トンネル掘削による地山への影響が地表面まで伝搬しにくい。

【表層部】

- 舎人層及び江戸川層は厚さ 15～20m 程度の関東ローム層・武蔵野礫層で構成されている。北多摩層は厚さ 10m 程度の沖積層・立川礫層、東久留米層は厚さ 10m 程度の埋土・ローム層・沖積層・武蔵野礫層であり、特に陥没箇所周辺は埋土・ローム層・武蔵野礫層が 5～10m 程度と、他の区間と比較して表層が薄い箇所である。

ボーリング No	地 層	掘削断面			掘削断面上部	表層部	備考
		細粒分	均等係数	地質状況			
H21-12	東久留米層	10% 以下	5 以下	礫が介在	単一の砂層であり、流動化しやすい層が地表面近くまで連続している	厚さ 5～10m 程度の埋土・沖積層・武蔵野礫層	陥没箇所近傍
H21-13				粘性土が介在	単一の砂層であり、流動化しやすい層が地表面近くまで連続している	厚さ 5～10m 程度の埋土・沖積層・武蔵野礫層	
H21-15				砂層	礫・砂・シルト・粘土が混在する互層で構成されている	厚さ 10m 程度の関東ローム層・武蔵野礫層	
H21-23	舎人層			礫・砂・シルト・粘土が混在する互層	礫・砂・シルト・粘土が混在する互層で構成されている	厚さ 15～20m 程度の関東ローム層・武蔵野礫層	
H21-30				礫・砂・シルト・粘土が混在する互層	礫・砂・シルト・粘土が混在する互層で構成されている	厚さ 15～20m 程度の関東ローム層・武蔵野礫層	

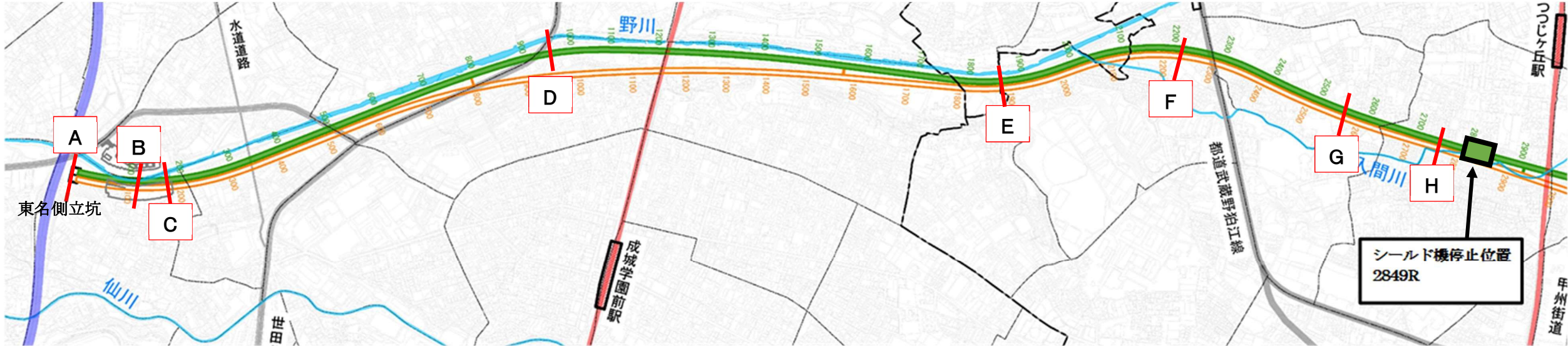


- 事前調査の結果から、陥没・空洞箇所周辺は次の全てに該当する、東京外環全線の中で特殊な地盤条件であることをあらためて確認した。
- 掘削断面は、細粒分が少なく、均等係数が小さいため、自立性が乏しく、礫が卓越して介在することから、シールドトンネル施工における掘削土の塑性流動性の確保に留意すべき地盤であること。
 - 掘削断面上部は、単一の砂層である流動化しやすい層が地表面近くまで連続している地盤であること。
 - 表層部は他の区間と比較して薄い地盤であること。

なお、原因究明のために実施したボーリング調査等の結果は、上記の事前調査の結果と概ね一致しており、工事着手前に行われる地盤状況把握のための事前調査が適切に行われていたことが確認された。

5. 施工データ

5. 1 施工に関する経緯、施工方法の決定理由



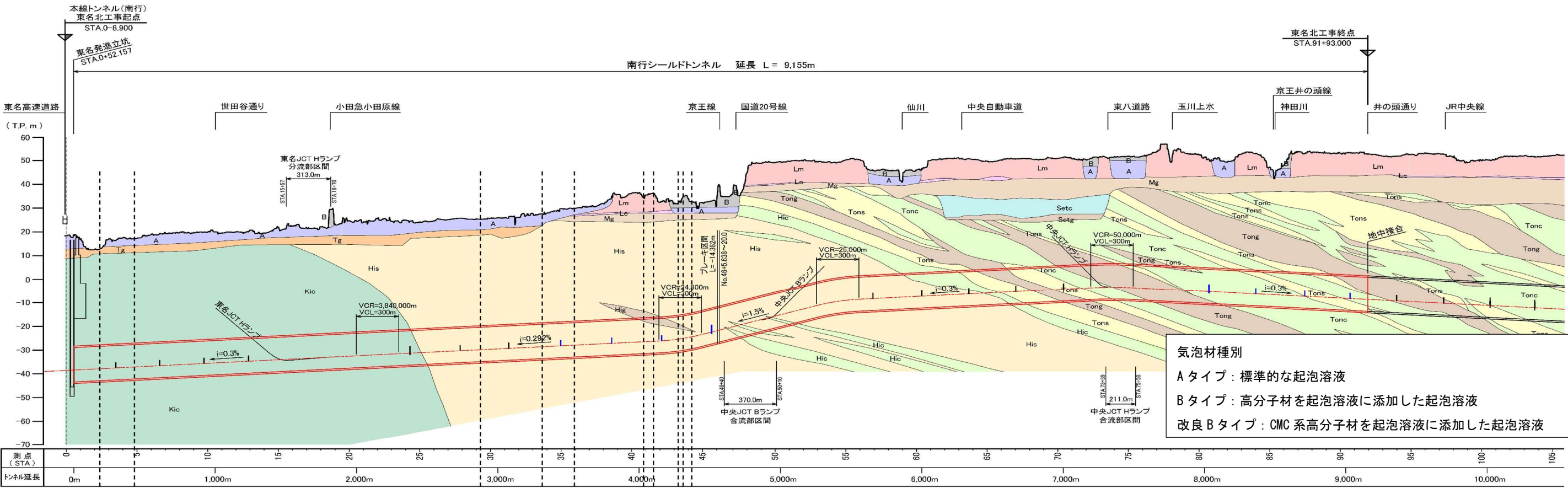
時期	記号	経緯
H24 年 7 月 ～H25 年 9 月		『東京外環トンネル施工等検討委員会』において、長距離かつ大断面の本線トンネル工事を施工するにあたり、近年の施工実績、施工ヤードの規模等から泥土圧シールドの適用について検討
H25 年 9 月		これまでの使用実績を踏まえ、発生土の有効利用の観点より、泥土圧シールド（気泡シールド工法）の適用を事業者にて決定
H25 年 11 月		本線シールドトンネル工事を泥土圧シールド（気泡シールド工法）として発注することとし、発注公告（NEXCO）
H26 年 4 月		本線シールドトンネル工事の契約 【泥土圧シールド（気泡シールド工法）】を指定工法（掘進作業時間は、24 時間施工）として契約
H27 年 7 月		シールドトンネルの掘進時に添加される添加材は、近年のシールドトンネルの施工事例や掘削対象の地層の土質特性等を鑑み、「気泡材」および「増粘材（以下、高分子材）」の 2 種を基本とすることを、東京外環トンネル発生土検討会（有識者委員会）で、『東京外環トンネル発生土に関する対応マニュアル』としてとりまとめた
H29 年 1 月		気泡材注入率の設定は、既往ボーリングデータから設定された土質縦断図を基に、掘削断面の粒径加積曲線を設定し、「気泡工法—技術資料」の算定式をもちいて、気泡材の基本仕様の決定をおこなった。（東久留米砂層では、気泡材 A タイプ 2 0 %で計画、東久留米層の介在礫層については、掘削断面比率からは影響が少ないと考えていたが、礫が多く発生した場合には、類似の粒径加積曲線となる舍人礫層を流用して気泡材 B タイプ 4 3 %まで調整する計画であった。） <ul style="list-style-type: none">各土層の粒径構成は、既往ボーリングデータの中から抽出して設定し、東久留米層の細粒分は平均 11%と設定した。（東久留米層の 12 本のボーリングデータは、細粒分 6～30%で平均 12%であるが、気泡材設定には約 500m 間隔にある 6 本のデータから平均値を用いて設定した。なお、均等係数は 3～1 5 程度である。）細粒分が少ない地盤を想定して、細粒分 4.7%の模擬土を用いた塑性流動性確認試験を行った。
H29 年 2 月	A	シールド機が東名側立坑を発進 （初期掘進：気泡材を用いず、水+0.05%の高分子材での掘進） <ul style="list-style-type: none">掘進作業時間の制限はなく、昼夜 2 交代での施工を行った。（掘進時間：8：00～17：00、20：00～翌 5：00）
H30 年 4 月	B	気泡シールド工法での掘進を行う。 <ul style="list-style-type: none">掘進時間制限の昼間施工を行った。（掘進時間：8：00～19：00）
H30 年 8 月	C	北多摩層では、地上への漏気発生を抑制するため、確認掘進により安全に掘進できることを確認した「空気を使用しない掘進方法」にて掘進 <ul style="list-style-type: none">掘進時間制限の昼夜連続 2 交替での施工を行った。（掘進時間：8：00～17：00、17：00～翌1：00）
R1 年 5 月	D	957R（5月27日）から掘進作業時間8:00～22:00に変更した。（振動の問合せ増加を踏まえた対応）
R2 年 1 月		気泡シールド工法への切替えに先立ち、地上への漏気対策として強い気泡材の改良気泡材を用いた配合試験を舍人層の試料を基に模擬土を用いて実施し、気泡材仕様と添加量の施工計画を立案した。 <ul style="list-style-type: none">配合試験結果より、気泡材注入率20～40%で計画した。気泡材Bタイプでの配合試験も実施した。谷戸橋付近のボーリングデータを基に細粒分13%とした。

時期	記号	経緯
R2 年 3 月	E	北多摩層から東久留米層へ地質変化地点（谷戸橋付近）から気泡シールド工法で掘進した。
		谷戸橋付近にて気泡シールド工法での調整掘進を行い、土砂性状・マシン負荷・振動等データを確認して気泡材仕様（注入率25％）を決定した。 ・ 東久留米層での気泡材は、Aタイプを23～33％の注入率で使用した。
R2 年 5 月	F	急曲線施工時において振動の問合せを確認
		2141R から気泡材 B タイプ 25％注入に変更 ・ 礫の混入が見られ始めた。礫分が今後、増加していくことに対して、材料・設備の確認を含めて施工した。2150R では礫は 6％程度まで上昇した。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：17％程度、礫分：1％程度
		2207R から気泡材 A タイプ 25％注入に変更 ・ 礫分の減少が見られ、A タイプでの掘進でも可能と判断した。（礫分が 6％程度まで混入していたが、3％程度まで減少した。） ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：16％程度、礫分：3％程度
R2 年 8 月	G	2587R から気泡材 B タイプ 25％注入に変更 カッタートルクの上昇も確認されたことから、チャンバー内の土砂の塑性流動性を向上するため、気泡材 B タイプに変更した。配合試験での高分子材を起泡溶液に 0.2％添加を基に添加効果を確認しながら、起泡溶液に 0.1％添加から開始し、0.7％添加まで使用した。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：9％程度、礫分：15％程度となり、排土比重も 1.8 から 2.05 程度まで増大した。土質縦断面図からも Hig 層が確認されており、今後も礫分の増加が想定された。 ・ 2587R 推力：149,000kN → 2588R 推力：146,000kN （3,000kN の改善を確認） ・ 2587R カッタートルク：37,000kN・m → 2588R カッタートルク：33,000kN・m （4,000 kN・mの改善を確認）
		2610R から気泡材注入率を 25％から 30％に変更（気泡材 B タイプ） ・ 2607R には掘進中にカッターが過負荷で停止する事象も発生（再起動で回転）し、振動の問合せ増加を踏まえた対応として気泡材注入率を多くすることで塑性流動性向上を目的に注入率を 30％に変更した。気泡材注入率は「気泡シールド工法-技術資料- シールド工法技術協会 平成 23 年 8 月」に基づく気泡材混合率の算出式によると、38％になることを参考に排土性状を確認しながら調整すべく 30％に変更した。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：6％程度、礫分：32％程度となり排土比重も 2.1 程度まで増大した。 ・ 2609R 推力：168,000kN → 2610R 推力：154,000kN （14,000kN の改善を確認） ・ 2609R カッタートルク：54,000kN・m → 2610R カッタートルク：38,000kN・m （16,000 kN・mの改善を確認）
		2631R からマシン外周部へ滑材として高分子溶液の注入開始（4 m ³ /R） ・ 振動の問合せ増加を踏まえた対応として、推力の増加（170,000kN）と地山探査装置が出にくい事象や砂層では胴締めが発生することが多いことからマシン外周面の周面摩擦の増大が振動要因であると判断し、マシン外周部へ掘進中の滑材注入を開始した。 ・ 緊急的な措置であったため、シールド掘進で使用していた高分子溶液を滑材として使用した。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：6％程度、礫分：32％程度
		2635R から気泡材注入率を 30％から 40％に変更（気泡材 B タイプ） ・ カッタートルク過負荷が発生し、掘削土の触手状況でも握ると固く締まる状態であったこと、さらにカッターとチャンバーの攪拌抵抗が大きくなったことから塑性流動性が低下していると判断し、気泡材注入率を 40％に変更した。気泡材注入率は「気泡シールド工法-技術資料- シールド工法技術協会 平成 23 年 8 月」に基づく気泡材混合率の算出式によると、38％になることを参考に排土性状を確認しながら 40％に変更した。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：6％程度、礫分：32％程度であり、排土比重は 2.05 程度であった。 ・ 2635R 推力：164,000kN → 2636R 推力：161,000kN （3,000kN の改善を確認） ・ 2635R カッタートルク：40,000kN・m → 2636R カッタートルク：33,000kN・m （7,000 kN・mの改善を確認）

時期	記号	経緯
R2 年 8 月		2639R（8 月 20 日_1R 目）、2646R（8 月 21 日_1R 目）でカッター回転が不能となる事象が発生 ・ カッターの寸動運転だけでは、回転起動しない状況となったため、気泡材を注入してチャンバー内圧力を保持しながらスクリーコンベヤから排土することで回転に至り、掘進を再開した。 ・ 前日の掘進終了から当日のカッター起動までのカッター停止時間は 12 時間程度であった。
		2660R から滑材注入量を 6 m ³ /R へ変更 ・ 振動の問合せ増加を踏まえた対応として、滑材注入量を 4 m ³ /R から 6 m ³ /R へ増加させた。 ・ シールド掘進で使用していた高分子溶液を滑材として使用した。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：9%程度、礫分：15%程度
		2667R から気泡材注入率を 40%から 50%に変更（気泡材 B タイプ） ・ 振動の問合せ増加を踏まえた対応として、カッタートルクの上昇、掘削土の触手状況でも握ると固く締まる状態であったこと、さらにカッターとチャンバーの攪拌抵抗が大きくなったことから掘削土の塑性流動性が改善できていないと判断し、気泡材注入率を 50%に変更した。気泡材注入率は「気泡シールド工法-技術資料- シールド工法技術協会 平成 23 年 8 月」に基づく気泡材混合率の算出式によると、49%になることを参考に段階的に調整して 50%に変更した。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：4%程度、礫分：29%程度であり、排土比重は 2.11 程度であった。 ・ 2668R 推力：178,000kN → 2669R 推力：172,000kN （6,000kN の改善を確認） ・ 2667R カッタートルク：34,000kN・m → 2668R カッタートルク：22,000kN・m （12,000 kN・m の改善を確認） ・ 掘進地点より前方 490m の H21-13 のボーリング結果では、礫層は無く、細粒分も 10%となっていること、掘進状況は厳しいものの継続して掘進できている状況からごく狭い地域の限定的な地盤特性との判断から、追加気泡材配合試験は実施していない。
		2667R（8 月 26 日）より、掘進時間 8:00～20:00 に変更した。（振動の問合せ増加を踏まえた対応）
R2 年 9 月	H	2736R（9 月 8 日__1R 目）からカッター回転不能が頻発（この時点での掘削土は、細粒分：4.3%、礫比率 30%程度） ・ 起泡溶液および、気泡材注入によりチャンバー内圧力を保持しながらスクリーコンベヤからの排土を行うことで、掘進を再開した。
		2794R（9 月 21 日）より、土曜・祝日の掘進時間 8:00～18:00 に変更した。（夜間の振動の問合せ増加を踏まえた対応）
		9 月 22 日～10 月 1 日にかけて、改良 B タイプの試験を実施した。（改良 B タイプ：CMC 系高分子材） 配合試験の結果、塑性流動性と気泡材の持続性が良く、適正配合と判断した。
		2809R（9 月 26 日）より振動対策として滑材を高吸水性ポリマーへ変更 2809R 推力 185,000kN → 2810R 推力 181,000kN（4,000kN の改善を確認）
		2811R（9 月 28 日）より振動対策として滑材を吸水性樹脂（高吸水性高分子）へ変更 ・ 2811R 推力 181,000kN → 2812R 推力 175,000kN（6,000kN の改善を確認） ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：6%程度、礫分：13%程度
R2 年 10 月		2832R（10 月 2 日）カッター回転不能が改善されないため、気泡材改良 B タイプを試行 ・ 日々の掘進停止時間（12 時間）に伴うチャンバー内土砂の沈降による締固めを緩和するために高分子材の変更を行った。 ・ 10 月 3～7 日の段取替えによる 5 日間の掘進停止を要するため、再開時のカッター回転不能を防止するためにチャンバー内にベントナイト溶液 25 m ³ を注入して掘進を停止させた。 ・ 10 月 8 日の掘進再開時は、カッター回転不能事象は発生していない。 ・ 掘削土粒度分布は、細粒分：6%程度、礫分：10%程度
		2840R（10 月 12 日）にカッター回転不能が発生（この時点での掘削土は、細粒分：6%程度、礫分：15%程度、掘進停止後 62 時間） 起泡溶液および気泡材注入を伴う排土を実施してもカッター回転の兆候がみられなかったため、排土を継続することは切羽の不安定、地表面沈下の要因となると判断し、鉋物系充填材（ベントナイト溶液+水ガラス）を使用してチャンバー内の土砂を置換することでカッター回転不能解除を実施した。
		10 月 18 日に路面陥没が発生（9 月 14 日の切羽通過箇所）

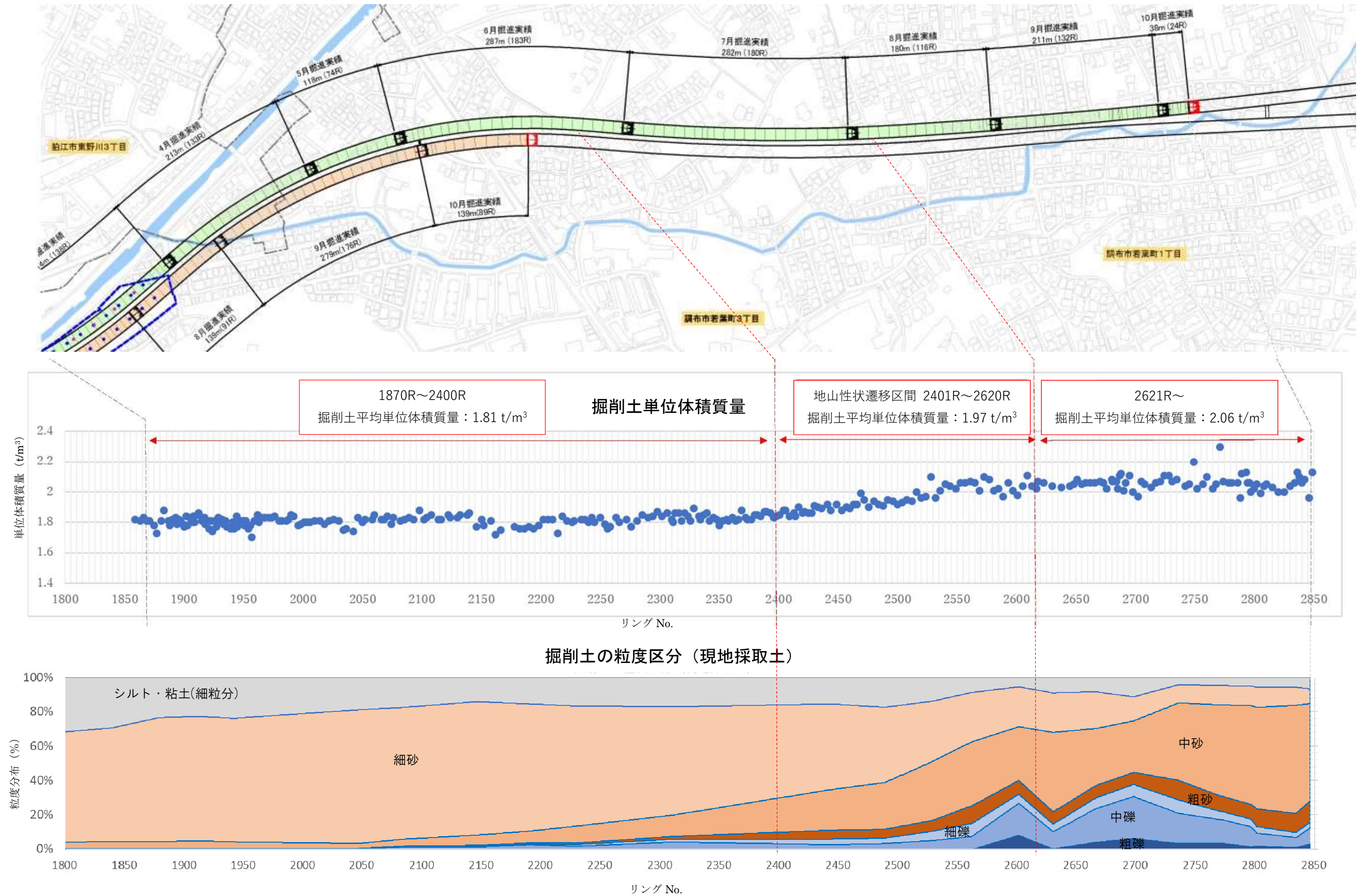
5. 2 掘進の経緯

①添加材・施工計画について



日時	20.18.4.23～2018.8.28	2018.8.30～2020.2.29	2020.3.2～2020.4.23	2020.5.11～2020.5.28	2020.5.29～2020.8.3	2020.8.3～2020.8.5	2020.8.6～2020.8.19	2020.8.19～2020.8.25	2020.8.26～2020.10.2	2020.10.2～2020.10.17	
											2020.10.12～2020.10.14
リング	139R～264R	265R～1869R	1870R～2140R	2141R～2206R	2207R～2586R	2587R～2609R	2610R～2634R	2635R～2666R	2667R～2833R	2834R～2849R	2840R
添加材	気泡材	空気を使用しない起泡溶液	気泡材	気泡材	気泡材	気泡材	気泡材	気泡材	気泡材	気泡材	鉱物系充填材
	Aタイプ 0.5%～2.0%	0.1%～1.0%	Aタイプ	Bタイプ	Aタイプ	Bタイプ	Bタイプ	Bタイプ	Bタイプ	改良Bタイプ	改良Bタイプ
注入率	5%～10%	5%～30%	25%	25%	25%～30%	25%	30%	40%	50%以上	50%以上	50%以上
施工計画	・気泡材を用いての掘進を行う	・北多摩層では、地上への漏気発生を抑制するため、試験掘進により安全に掘進できることを確認した「空気を使用しない掘進方法」にて掘進	・北多摩層から東久留米層へ地質変化地点（谷戸橋付近）から気泡シールド工法で掘進 ・谷戸橋付近にて気泡シールド工法での調整掘進を行い、土砂性状・マシン負荷・振動等データを確認して気泡材仕様を決定 ・東久留米層での気泡材は、Aタイプを23～33%の注入率で使用	・2587Rから気泡材Bタイプ25%注入に変更 カッタートルクの上昇も確認されたことから、チャンパー内の土砂性状の塑性流動性を向上する目的に気泡材に高分子材を添加する気泡材Bタイプに変更した。掘削土粒度分布は、細粒分：9%、礫分：15%程度となり、排土比重も1.8から2.05程度まで増大した。土質縦断面図からもHig層が確認されており、今後も礫分の増加が想定された。、 ・2610Rから気泡材注入率を25%から30%に変更（気泡材Bタイプ） 2607Rには掘進中にカッターが過負荷で停止する事象も発生（再起動で回転）、振動の間合せ増加の対応として気泡材量を多くすることで塑性流動性向上を目的に注入率を30%に変更した。掘削土粒度分布は細粒分：6%、礫分：32%程度となり排土比重も2.1程度まで増大した。 ・2631Rからマシン外周部へ滑材注入開始（4m3/R） 振動の間合せ増加を踏まえた対応として、推力の増加（170,000kN）と地山探査装置が出にくい事象や砂層では胴締めが発生することが多いことからマシン外周面の周面摩擦の増大が振動要因であると判断し、マシン外周部へ掘進中の滑材注入を開始した。 ・2635Rから気泡材注入率を30%から40%に変更（気泡材Bタイプ） カッタートルク過負荷が発生し、掘削土の触手状況でも握ると固く締まる状態であったこと、さらにカッターとチャンパーの攪拌抵抗が大きくなったことから塑性流動性が低下していると判断し、気泡材注入率を40%に変更した。掘削土粒度分布は、細粒分：6%、礫分：32%程度であり、排土比重は2.05程度であった。 ・2639R（8月20日_1R目）、2646R（8月21日_1R目）でカッター回転が不能となる事象が発生 カッターの寸動運転だけでは、回転起動しない状況となったため、気泡材を注入してチャンパー内圧力を保持しながらスクリーコンベヤから排土することで回転に至り、掘進を再開した。前日の掘進終了から当日のカッター起動までのカッター停止時間は12時間程度であった。 ・2660Rから滑材注入量を6m3/Rへ変更 振動の間合せ増加を踏まえた対応として、滑材注入量を4m3/Rから6m3/Rへ増加させた。 ・2667Rから気泡材量を40%から50%に変更 振動の間合せ増加を踏まえた対応として、カッタートルクの上昇、掘削土の触手状況でも握ると固く締まる状態であったこと、さらにカッターとチャンパーの攪拌抵抗が大きくなったことから掘削土の塑性流動性が改善できていないと判断し、気泡材注入率を50%に変更した。 掘進時間 8:00～20:00（振動の間合せが増加したことより掘進作業時間を変更） ・2832R（10月2日）カッター回転不能が改善されないため、気泡材改良Bタイプを試行 日々の掘進停止時間（12時間）に伴うチャンパー内土砂の沈降による締固めを緩和するために高分子材の変更を行った。							2840R（10月12日）にカッター回転不能が発生（この時点での掘削土は、細粒分：6%程度、礫分：15%程度、掘進停止後62時間）起泡溶液および気泡材注入を伴う排土を実施してもカッター回転の兆候がみられなかったため、排土を継続することは切羽の不安定、地表面沈下の要因となると判断し、鉱物系充填材（ベントナイト溶液+水ガラス）を使用してD8:L12チャンパー内の土砂を置換することでカッター回転不能解除を実施した

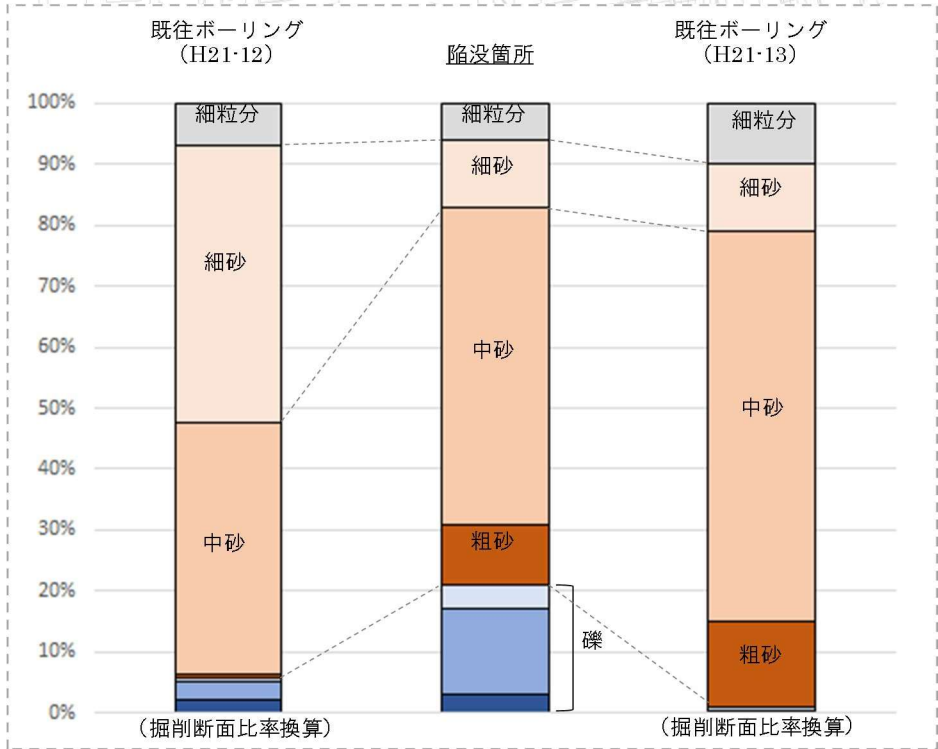
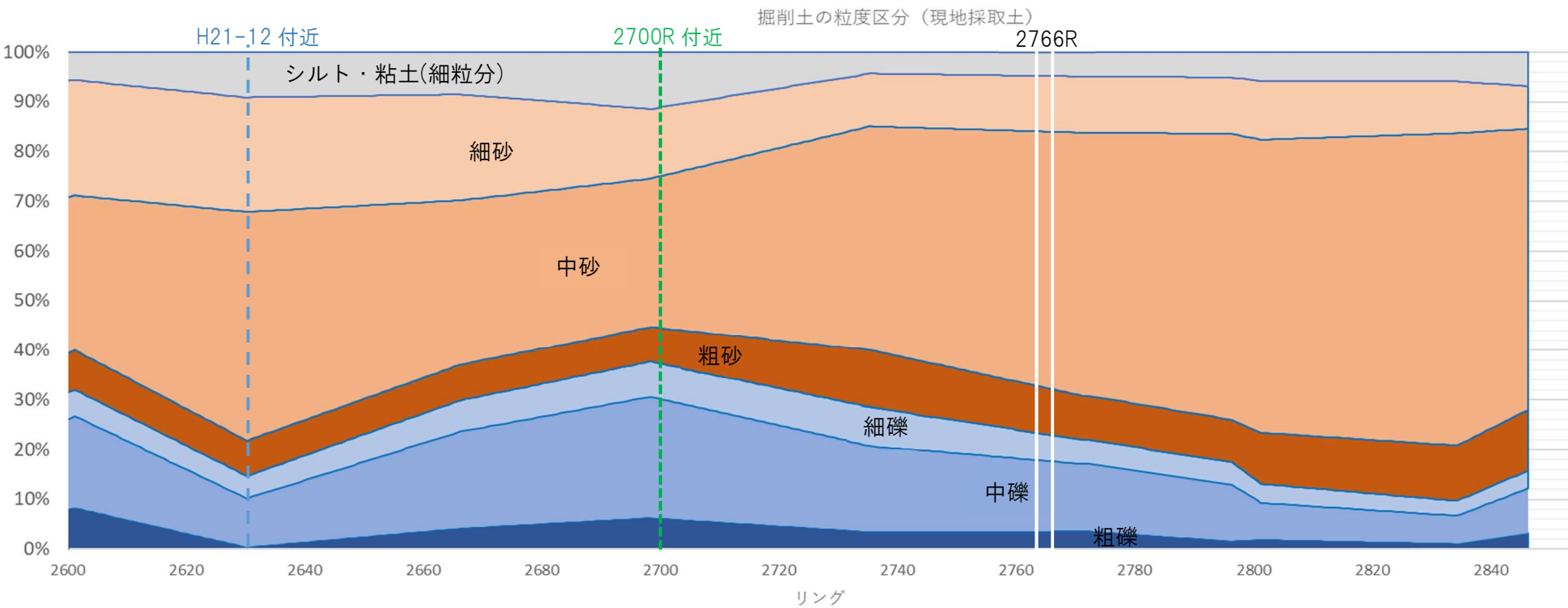
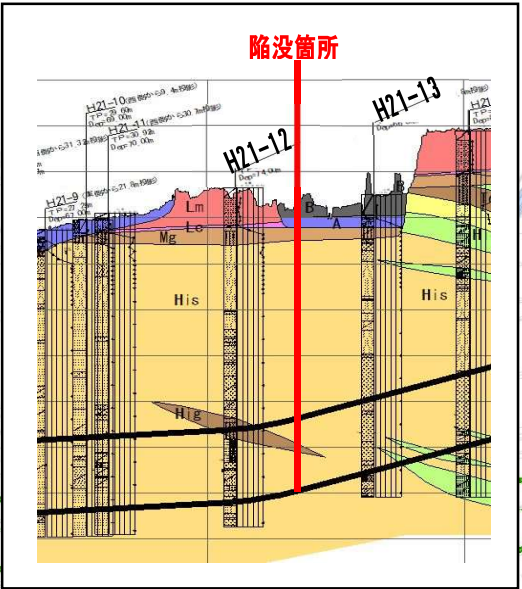
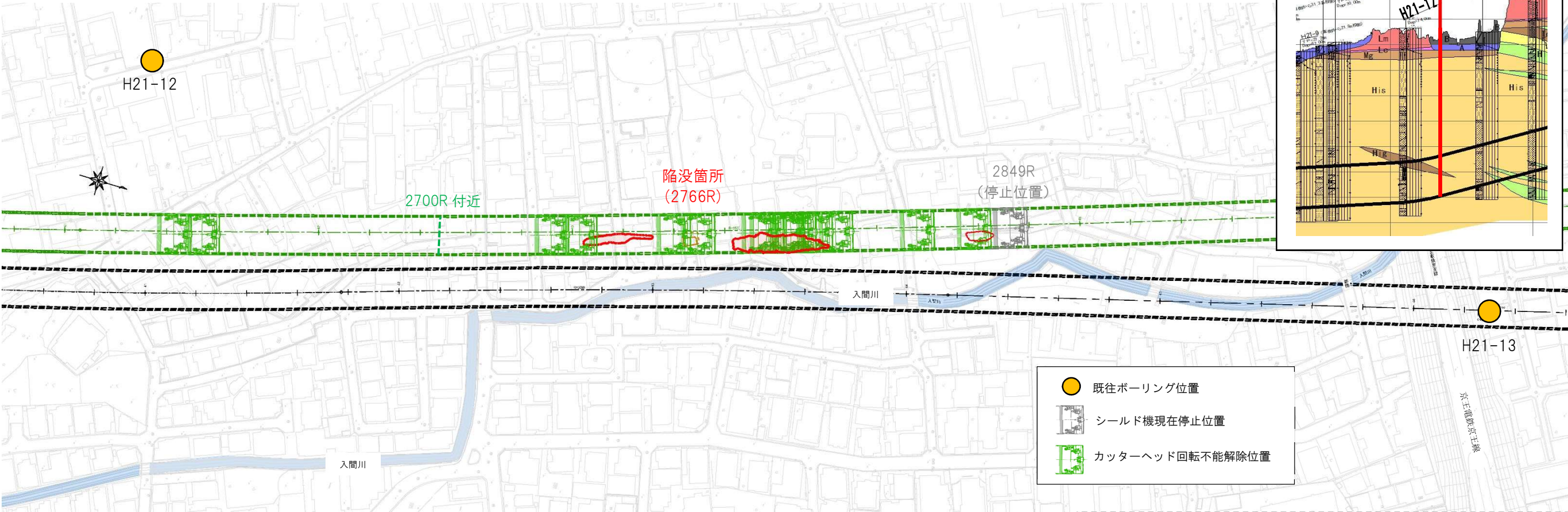
②東久留米層の掘削土砂性状(単位体積質量・粒度分布)



陥没箇所付近の粒度分布について

東久留米層掘進において、掘削土の粒度分布図から以下の特徴が確認できる。

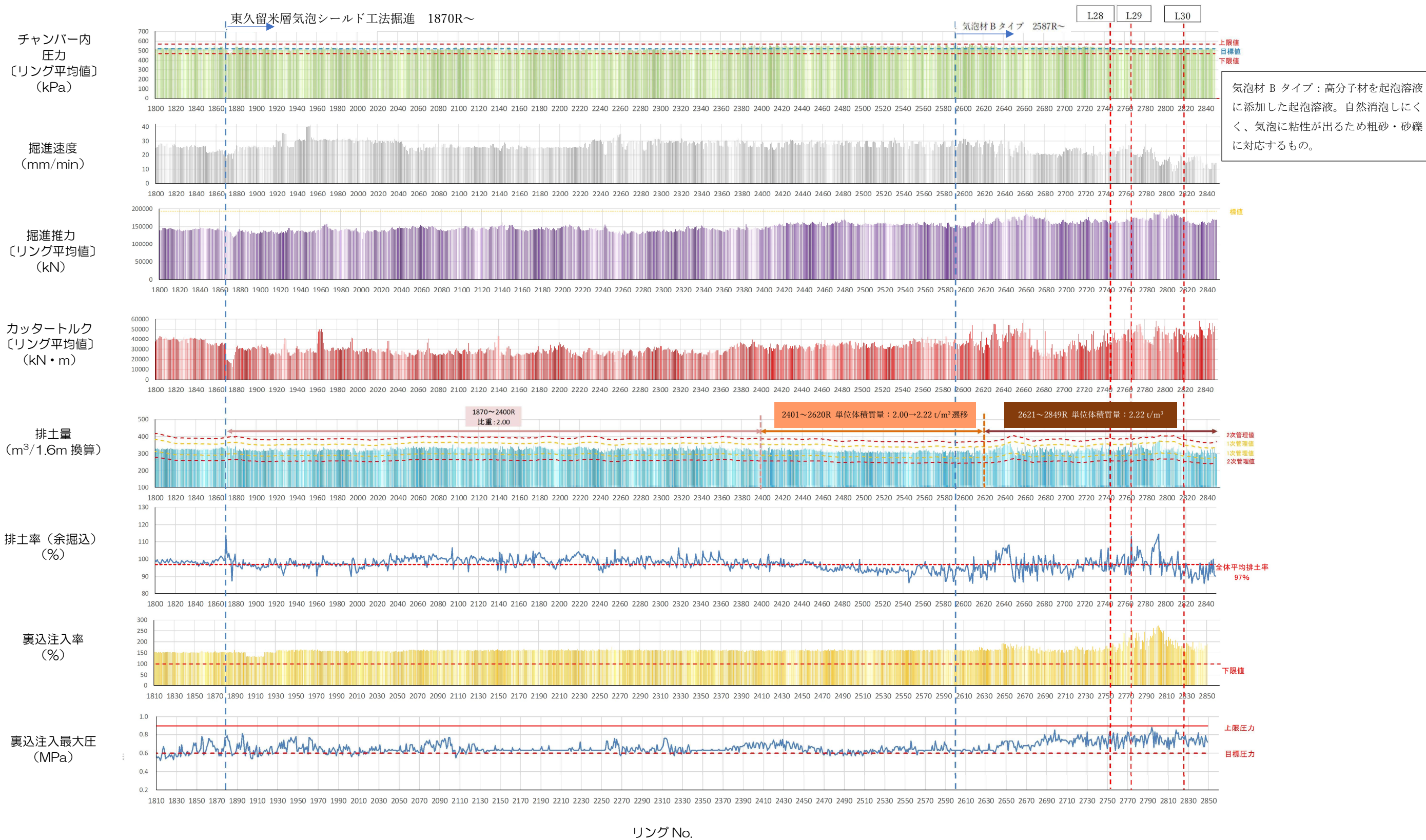
- ① 2600R 付近から、礫の出現に伴い、粘土・シルト（細粒分）及び細砂が徐々に減少している。
- ② 2700R 付近以降、粘土・シルト（細粒分）、細砂が急激に減少している。
- ③ 2700R 付近以降の粘土・シルト（細粒分）、細砂の極端な減少が、他と比べ施工条件が厳しくなった原因であると推定される。



5. 3 シールド掘進データ（エリア A の確認）

①東久留米層（His 層主体：1870R～2849R）掘進時における主な施工データ推移（リング代表値）

チャンバー内圧力は、大きな変動はなく安定した状態である。掘進速度は地上部の振動抑制のため、2640R 以降徐々に低下させている。2400R 付近から推力・トルクが上昇しており、2600R 付近からはさらに推力・トルクが上昇している。カッタートルクは大きなばらつきが見受けられる。2400R 付近から礫層が出現していること、2600R 付近から細粒分が 5%程度へ減少したことが原因と考えられる。特に 2600R 以降はシールドマシンに大きな負荷が作用した状態での掘進であった。排土量は、地山単位体積質量の変化を考慮して算出しており、全区間を通して概ね管理値以内であるが、2600R 付近から排土量が多い箇所が見られる。裏込め注入についても同様に 2600R 付近から、注入量が多い箇所が見られる。なお、チャンバー内に添加した気泡材は全量が排土とともに排出される条件で算定している。



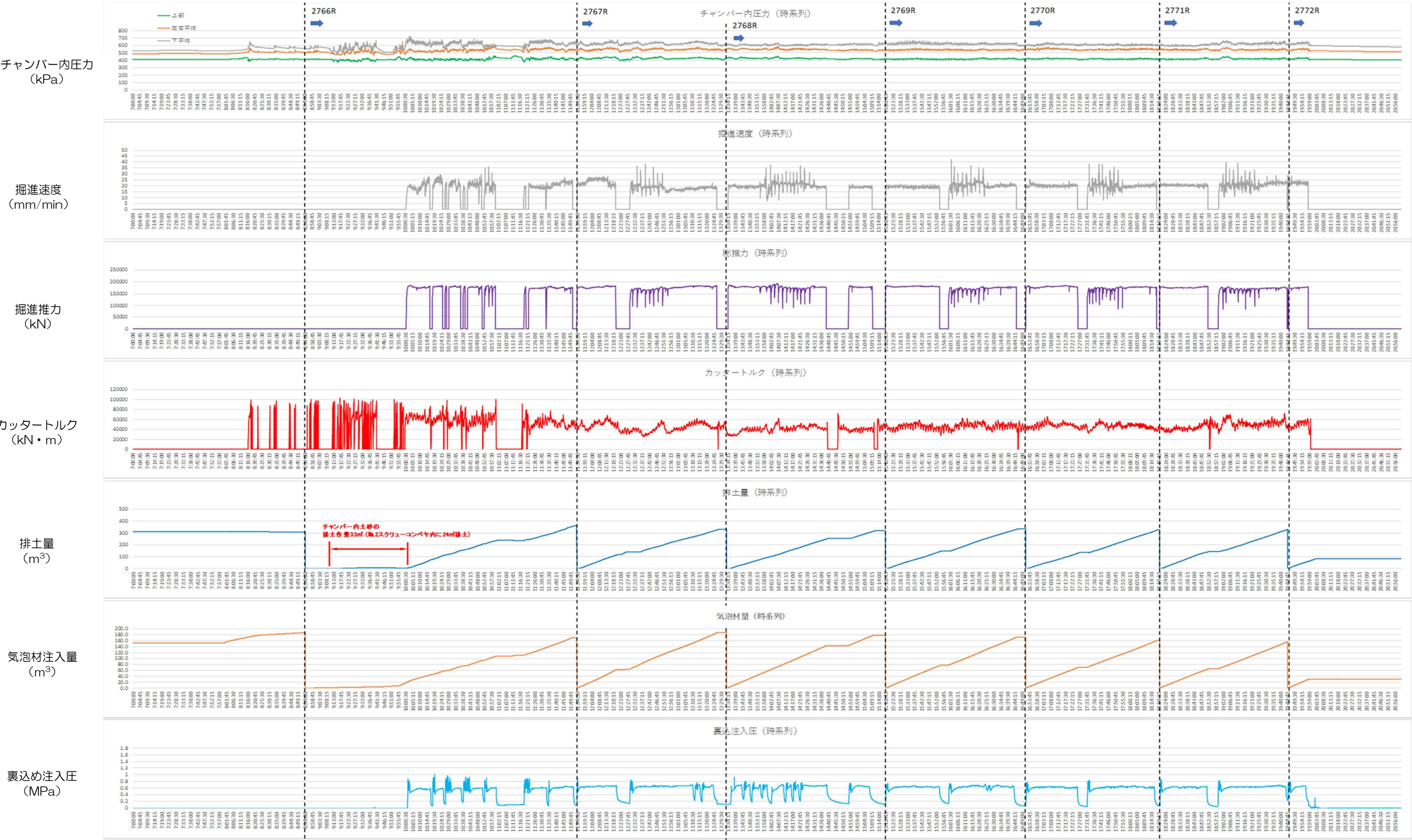
②排土量の計測結果

リング毎の排土量は、全区間を通して概ね管理値以内であるが、2600R 付近から排土量が多い箇所が見られる。

- ・排土量の算定方法
ベルトスケールにて測定した重量を事前ボーリングの単位体積重量で除して算出している。ここでは、21.756kN/m³（単位体積重量 2.22g/cm³）としており、実際の排土を突き固めて計測した 20.188 kN/m³（単位体積重量 2.06g/cm³）より大きい値である。この単位体積重量（2.06g/cm³）を使用すれば排土量（体積）は大きく算出される。
 - ・起泡溶液重量の控除
掘削時に添加する起泡溶液は、掘削時に排土とともに全量排出されることを前提にベルトスケール重量より控除している。
 - ・排土量の管理値の設定方法
掘削断面体積（余掘り考慮・コピーカッター考慮せず）の±10%（16.1²×π/4×1.6m/R×10%=32m³）で以前 20 リングの掘削との差を傾向管理している。

③ 陥没地点における主なシールド掘進データ

陥没地点直下の掘進を行った9月14日（月）におけるシールド掘進時の施工データを以下に示す。週末明けの2766R掘進開始時にカッターヘッドを回転起動できない状況となった。朝の8時から10時までの間に、カッターヘッドを回転起動するためにチャンバー内およびカッター前面から気泡材を注入してチャンバー内圧力を保持しながらスクリーコンベヤからの排土を繰り返し、10:00にカッター回転起動したため掘進を開始した。当該リングではシールド掘進中のカッタートルクの変動およびチャンバー内圧力の変動が大きい、その後2767R以降の連続的な掘進においては施工データの変動が小さく安定した掘進状況となっている。

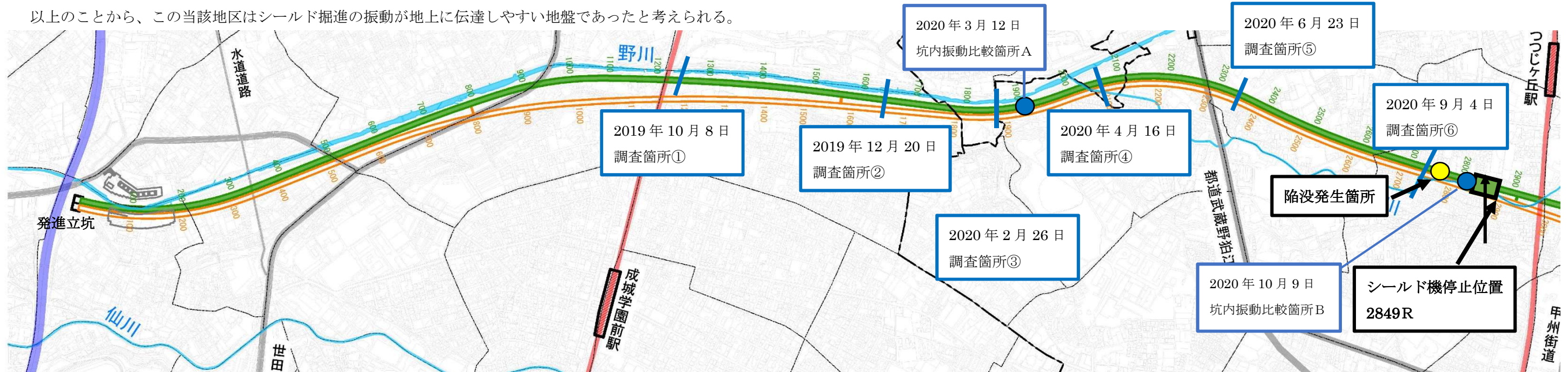


5. 4 シールド掘進に伴う振動計測結果

掘進中の地上での振動計測結果とシールドトンネル坑内と地上における振動計測結果を記載した。陥没箇所付近の調査箇所Bでは直近の調査箇所⑥に比較して、地上の計測値は10 dB程度大きな値が計測されている。

さらに、調査箇所 B では地上振動計測結果と坑内振動計測結果を同時刻に計測比較したが 3 dB しか減衰してないことが確認された。

以上のことから、この当該地区はシールド掘進の振動が地上に伝達しやすい地盤であったと考えられる。



調査箇所	シールド機 先端からの 平面距離	調査日	調査時間	振動レベルL10(dB)	
				停止中最大	掘進中最大
①	掘進方向より左約50m	2019 年 10/8(火)	18:00～23:00	27	43
	直上付近			28	41
	掘進方向より右約70m			24	31
②	掘進方向より左約50m	2019 年 12/20(金)	18:00～23:00	29	37
	直上付近			24	37
	掘進方向より右約 85m			26	33
③	掘進方向より左約 100m	2020 年 2/26(水)	15:00～23:00	26	40
	直上付近			25	45
	掘進方向より右約 85m			27	49
A	地上	2020 年 3/12(木)	9:00～20:00	24	39
	坑内			18	57

調査箇所	シールド機 先端からの 平面距離	調査日	調査時間	振動レベルL10(dB)	
				停止中最大	掘進中最大
④	掘進方向より左約 55m	2020 年 4/16(木)	13:00～23:00	37	45
	直上付近			25	42
	掘進方向より右約 85m			22	36
⑤	掘進方向より左約 80m	2020 年 6/23(火)	13:00～23:00	25	39
	直上付近			30	47
	掘進方向より右約 95m			25	38
⑥	掘進方向より左約 70m	2020 年 9/4(金)	13:00～21:00	41	44
	直上付近			31	46
	掘進方向より右約 85m			24	36
B	地上	2020 年 10/9(金)	9:00～20:00	29	52
	坑内			17	55

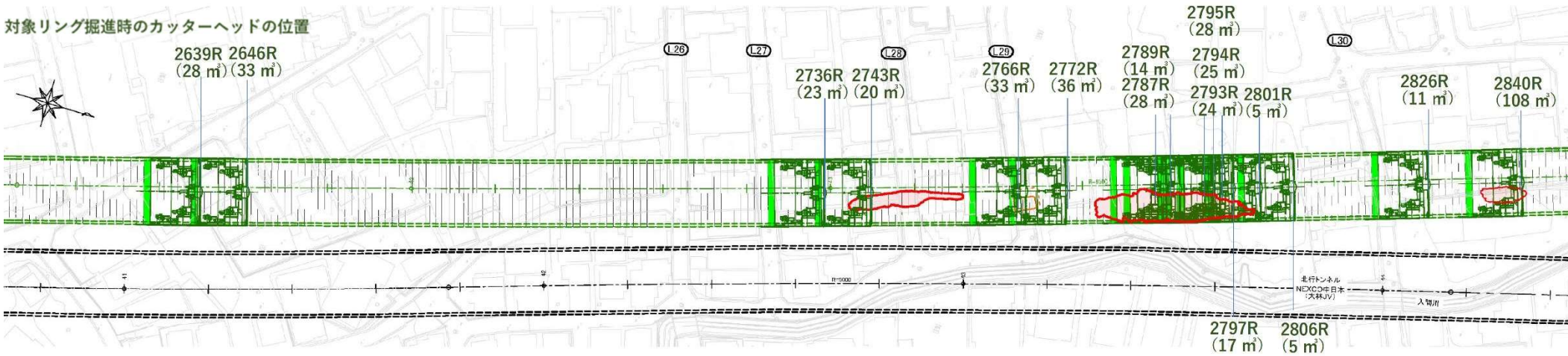
5. 5カッターヘッド回転不能事象の発生

①カッターヘッド回転不能発生経緯・解除箇所

8/20 および 8/21 朝の第 1 リング掘進開始時には、寸動運転だけではカッターヘッドが回転起動しない状況となったため、気泡材を注入してチャンバー内土圧を保持しながらスクリーコンベヤから排土することで掘進を再開した。その後の掘進においても礫率の増加とともにカッタートルク増大と振動の問合せは収まらず、掘進速度抑制などの振動低減対策を取りつつ、8/26 以降は振動の問合せ増加を踏まえた対応として夜間掘進休止時間を拡大（毎日 20:00～8:00 まで 12 時間掘進休止）することとしたが、計 16 回のカッターヘッド回転不能事象を生じた。カッターヘッド回転不能の対応として、チャンバー内圧力を保持するために起泡溶液および気泡材を注入しながら、スクリーコンベヤからの排土を繰り返すことでカッターヘッドの回転起動を行った。また、掘削排土の粒度分布の推移から、礫分増加とともに砂分の粒径も大きくなり（細砂主体から中砂・粗砂比率が次第に増加）、湿潤重量も増加していることが確認された。

②考えられるカッター回転不能の発生原因

- シールド機カッターヘッド回転不能事象の発生原因は次が考えられる。
- ・掘削地盤は、細粒分含有率が減少した特殊な状態となり、掘削対象地盤に気泡材と高分子材を注入して攪拌混合したチャンバー内掘削土砂は塑性流動性の確保が困難であった。
 - ・加えて、礫分などの大きな粒子は沈降して分離しやすく締まりやすい粒度分布であり、振動影響抑止対策として実施していたシールド掘進の夜間休止時間の拡大によりチャンバー内掘削土砂の分離・沈降が時間経過に伴い進行し、より締まった状態となり、掘削土砂性状が更に悪化（塑性流動性・止水性が低下）した。



※対象リング掘進時のカッターヘッドの位置は、対象リング+11.85m前方に位置する。

○カッターヘッド回転不能解除時の起泡溶液および気泡材注入量・排土量

リングNo	2639R	2646R	2736R	2743R	2766R	2772R	2787R	2789R	2793R
掘進日	8月20日(木)	8月21日(金)	9月8日(火)	9月9日(水)	9月14日(月)	9月15日(火)	9月17日(木)	9月18日(金)	9月19日(土)
当日リング	1R目	1R目	1R目	1R目	1R目	1R目	1R目	1R目	4R目
閉塞解除時 排土量	28m³	33m³	23m³	20m³	33m³	36m³	28m³	14m³	24m³
カッター 気泡材注入量	起泡溶液 4.8m³	起泡溶液 2.4m³	起泡溶液 4.3m³	起泡溶液 5.9m³	起泡溶液 10.4m³	起泡溶液 10.7m³	起泡溶液 34.0m³	起泡溶液 11.0m³	起泡溶液 4.4m³
	空気 0.5m³	空気 1.0m³	空気 12.1m³	空気 17.3m³	空気 36.2m³	空気 21.9m³	空気 83.2m³ ※1	空気 29.4m³	空気 20.9m³
	5.3m³	3.4m³	16.4m³	23.2m³	46.6m³	32.6m³	117.2m³	40.4m³	25.3m³
チャンパー 起泡溶液注入量	-	-	3.6m³	5.9m³	5.7m³	1.8m³	3.6m³	5.4m³	0.6m³

※1：カッタートルク過負荷解除に時間を要したため、他箇所より注入量が多くなっている。

リングNo	2794R	2795R	2797R	2801R	2806R	2826R	2840R
掘進日	9月21日(月)	9月22日(火)	9月23日(水)	9月24日(木)	9月25日(金)	10月1日(木)	10月12日(月)
当日リング	1R目	1R目	1R目	1R目	1R目	1R目	1R目
閉塞解除時 排土量	25m³	28m³	17m³	5m³	5m³	11m³	108m³
カッター 気泡材注入量	起泡溶液 24.2m³	起泡溶液47.7m³	起泡溶液 38.4m³	起泡溶液 19.0m³	起泡溶液27.4m³	起泡溶液19.2m³	起泡溶液89.9m³
	空気 29.9m³	空気 14.9m³	空気 8.2m³	空気 1.2m³	空気 1.3m³	空気 11.2m³	空気 42.9m³
	54.1m³	62.6m³	46.6m³	20.2m³	28.7m³	30.4m³	132.8m³
チャンパー 起泡溶液注入量	8.8m³	2.3m³	5.6m³	2.7m³	4.6m³	3.0m³	43.1m³

ベントナイト溶液：28.6m³

鉱物系充填材：87.0m³

③地盤特性に対する気泡材の適応性について

本泥土圧シールドの添加材は、産業廃棄物発生による環境負荷を抑制するため、地盤改良区間等特殊な場合を除き、界面活性剤による気泡材および高分子材を用いることを基本としていた。

一方、泥土圧シールドでは、切羽を安定させるためには、掘削土が泥土化して塑性流動性を保持し、かつ難透水性を維持していることが必要である。この際、掘削土砂中に 30%程度の微細粒分が含有され粒度分布が良好な場合は、泥土の塑性流動性が容易であるが、砂や礫分等が多く、粒度分布が悪い場合は、作泥材を掘削土砂内に注入混合して良質な泥土に改善する必要がある〔泥土圧シールド工法 その理論と応用〕。

気泡シールド工法でも、礫質土などでは気泡材にベントナイト成分なども併用されているとあり〔泥土圧シールド工法 その理論と応用〕、気泡材のみでは十分な効果が得られないことがある。〔気泡材を活用した大口径泥土圧シールドの切羽管理〕

2020 年 11 月 30 日に実施した当該区間の掘削土の粒度分布を再現した模擬土による配合試験結果では、気泡材による掘削土の改善効果（塑性流動化、止水性の向上）が十分に得られないこと、1 時間程度の静置で、性状が悪化することが確認されている。さらに当該区間では振動問合せ対応として、夜間作業を行わず、日々12 時間以上の掘進停止時間があつたことから、チャンバー内土砂の性状悪化が進行し、カッター回転不能事象の発生の要因となったと推定される。

6. 添加材等の配合の考え方

6. 1 基本的な考え方

- (1) 東京外環の事業地内において施工するシールドトンネルの添加材等の配合について、次の基本的な考え方に基づき対応する。
- (2) シールドトンネルの掘進時に添加される添加材は、近年のシールドトンネルの施工事例や掘削対象の地層の土質特性等を鑑み、「気泡材」および「増粘材（高分子材）」（以下、「高分子材」という）の2 種を基本とする。
- (3) シールド発生土は、計画している全ての受入先での有効利用を可能とするため、様々な土質に対して必要となる強度を確保する必要がある。さらに、改質後の pH 上昇を出来る限り抑制する必要があるため、シールド発生土は「中性固化材」による改質を実施する。

- ① 添加材は、「気泡材」および「高分子材」の2 種を基本とし、シールドトンネルの掘進時に、掘削土の流動性や止水性の向上、チャンバ内での掘削土の付着を防止すること等を目的として添加する。
- ② 改質後のシールド発生土のコーン指数は、各受入先の受入基準では、第3 種建設発生土（コーン指数 400kN/m²）以上と設定されている。
- ③ 本マニュアルでいう「中性固化材」とは、改質後の土壌試料の pH が早期に中性域または中性域に近い pH で推移するよう製造された固化材のことをいう。なお、計画している受入先では、周辺の公共用水域への影響や植生への影響を考慮して、受入基準で pH が規定されているところが多い。

〔東京外環トンネル 発生土に関する対応マニュアル 平成 27 年 7 月〕

(c) 界面活性剤系作泥土材

界面活性剤系の作泥土材が起泡材として砂質・砂礫地盤や硬質粘土に用いられている。礫質土などでは起泡材に、ベントナイト成分なども併用されている。気泡によるベアリング効果により掘削土砂が塑性流動化するとされている。

市販されている高分子系作泥土材の成分・比重等の例、および、室内試験法について、第6 章「6.2 ベントナイトおよび高分子系作泥土材」「6.3 高分子系作泥土材の試験項目と試験手順」に示す。

なお、市販品の中から作泥土材を選定するという考え方にとらわれずに、施工の状況を見ながら現地地盤に最も適した材料・配合になるように、独自に工夫を加えていくという姿勢も大切である。その意味では、対象地盤で施工実績が多い材料を用いることも一つの方法である。

2.4.2 作泥土材の使用量

(a) 算定方法の考え方

必要とされる作泥土材の使用量や濃度については、シールドのカッターチャンバー内を常に塑性流動化された泥土で充满・加圧して掘進するという条件を達成するように決定されるものであり、単に試料土に作泥土材を混ぜてできる試験練りの場合と実際の掘進の場合とは異なることが多いので、これを認識して取り扱う必要がある。

作泥土材には、前述のように、ベントナイト、粘土のほか、最近多く用いられるようになった高分子系や、界面活性剤（気泡）等の種類があるが、その使用量の算定方法については、シールド工法技術協会の「泥土加圧シールド工法・技術資料¹⁹⁾」に、ベントナイト、粘土を例として算定方法の考え方が示されている。なお、その他の材料については、各材料について提案されている算定式によりたい。

作泥土材を必要としない土質は一般には軟弱粘性土であるが、砂分などの粒径の大きな土粒子の含有量が増加してくると作泥土材が必要となる。この境界は細粒分の割合で示すことができ、その割合は実績によればおよそ 30 %程度である。言い換えれば、地山の掘削断面に微細粒子（0.075 mm 以下）が 30 %程度含まれていれば作泥土材を必要とせず、これ以下の場合は作泥土材が必要と判断できる。しかし、微細粒子が 30 %程度含まれていても、それより大きな粒径に当たる細砂分（0.075～0.25 mm）が少なく、粗砂と礫で構成されているような土質は、良好な泥土に変換しにくい。すなわち、30 %程度の微細粒子と、それより大きな粒径の細砂分を適量含有して「粒度のバランスの良い土」であることが、良好な泥土となるために必要な条件である。

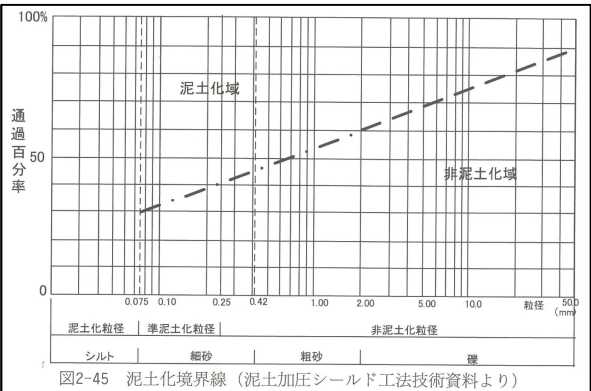


図2-45 泥土化境界線（泥土加圧シールド工法技術資料より）

〔泥土圧シールド工法 その理論と応用 2009 年〕

3・2 添加材

添加材の性状や注入量の選定は泥土圧シールドの成否に大きな影響を与える重要な要素である。添加材には、粘土、ベントナイトを主体とした加泥材や、特殊起泡材と圧縮空気により作成される気泡などがあり、それぞれ一長一短がある。

加泥材は掘削土に最粒土分を付与することにより、塑性流動性と止水性を向上させるものである。加泥材により本工事を施工する場合には、高濃度、高粘性の加泥材とする必要がある、ただし、高濃度、高粘性にすればするほど切削土との均一練り混ぜが難しく、機械的な負荷が大きくなるとともに、ビットや面板などの磨耗も大きくなると考えられる。また、地下水による加泥材の希釈による効果の低減、切削土と加泥材の分離、被圧水による噴発も想定される。

気泡は、ベアリング効果により流動性を、また内圧をもった気泡が地山の間隙に地下水と置き代わって入り込むことにより止水性を向上させる効果がある。気泡注入の場合には、土砂との攪拌混合に要する負荷が少なくすむため、加泥材に比べ混練状態が良好で、流動性も向上すると考えられる。しかし本工事のように礫率が7 0 %程度で、しかも大礫を含む地盤では、間隙が大きいため気泡が浸透したり、気泡の比重が小さいことからチャンバー内で玉石を安定した状態に保持することができないことがあり、気泡注入だけの施工は難しいと考えられた。


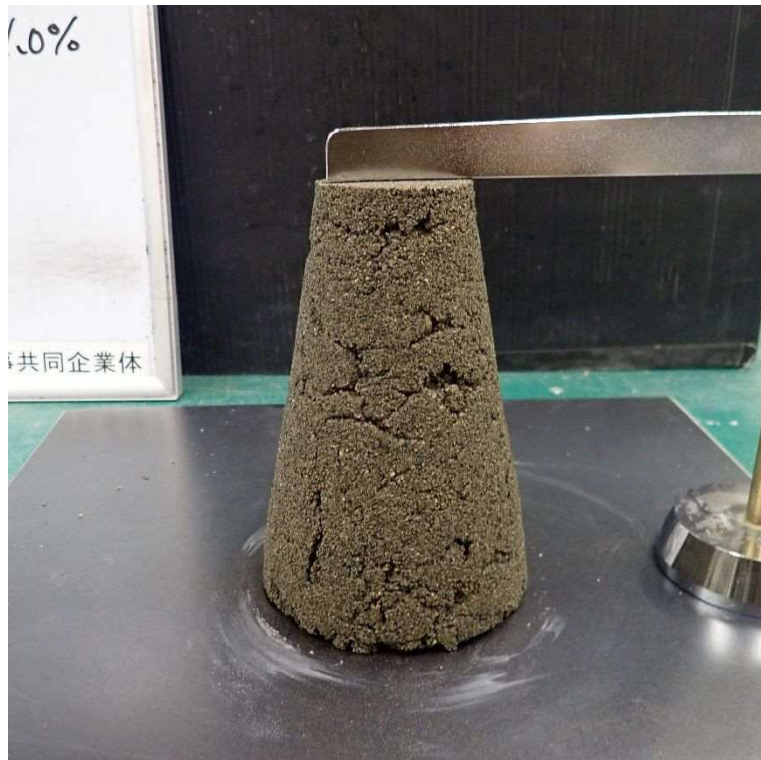
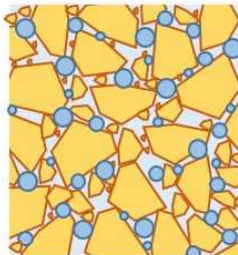
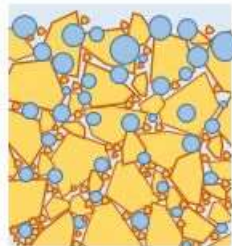
そこで、本工事では加泥材と気泡を併用することで両方の長所をいかし、より確実な切羽の安定を図ることとした。

今までの併用注入の実績は気泡主体注入であって加泥材主体注入は本工事が初めての試みである。計画注入率は、気泡の注入率下限値を掘削土量体積の1 5 %とし、加泥材注入率を掘削土質に合わせ、掘削土量体積の1 6～2 5 %とした。表－1 に加泥材と気泡（特殊起泡材）の標準配合を、また表－2 に気泡と加泥材の計画注入率を示す。なお、注入系統は、フィッシュテール部と外周部の2 系統から加泥材を、面板中間部の1 系統から気泡を注入することとした。

〔大野、川枝：気泡材を活用した大口径泥土圧シールドの切羽管理、トンネル工学研究発表会論文・報告集 1991 年 12 月〕

④材料分離・沈降の要因について

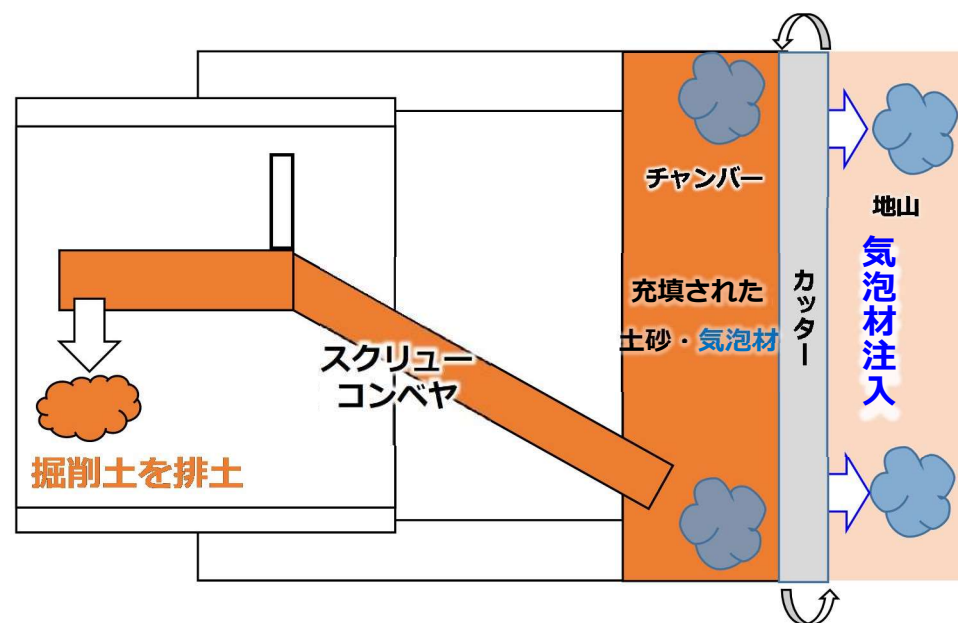
当該事象発生後に実施した気泡材混合土の配合試験により、当該区間のチャンバー内土砂は塑性流動性・止水性が悪い状態になっていたと判断される結果が得られた。
このことから、停止中のチャンバー内では時間経過にともない気泡材の分離（気泡材の上昇）が進行したと想定される。

材料分離・沈降が生じにくい土砂のイメージ		材料分離・沈降が生じやすい土砂のイメージ（実際の施工時の想定）	
		<div>（掘進中のチャンバー内） </div>	気泡材が分離して土砂にまとまりがない。
		<div>（停止中のチャンバー内） 気泡材 ↑ 土粒子 ↓ </div>	停止時に気泡材が上昇し、土粒子が沈降することにより気泡材の分離が進行。
塑性流動性：良好（土砂がまとまって変形が生じる） 止水性：良好（土砂がまとまって気泡材を内包し、透水を妨げる） ⇒土粒子と気泡材のまとまりが保たれる。		塑性流動性：不良（気泡材が分離して土砂にまとまりがない） 止水性：不良（気泡材が分離して土砂にまとまりがなく、水みちができて水が流れやすい） ⇒時間経過にともない気泡材が分離・上昇する。	

⑤カッターヘッド回転不能に至る現象と解除作業手順

①昼間（掘進中）

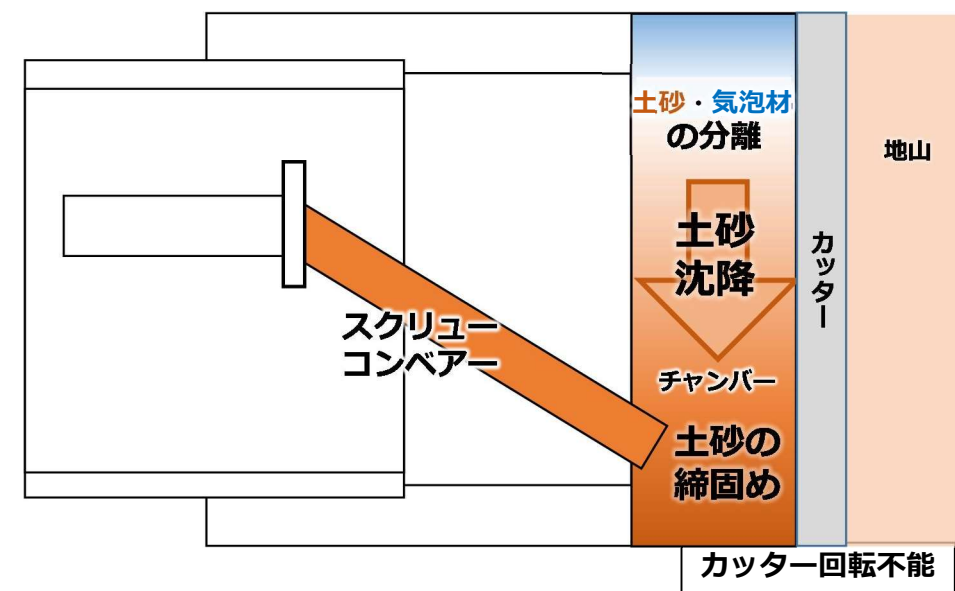
- チャンバー内土圧と地山からの圧力の均衡が取れている状態



②夜間
休止

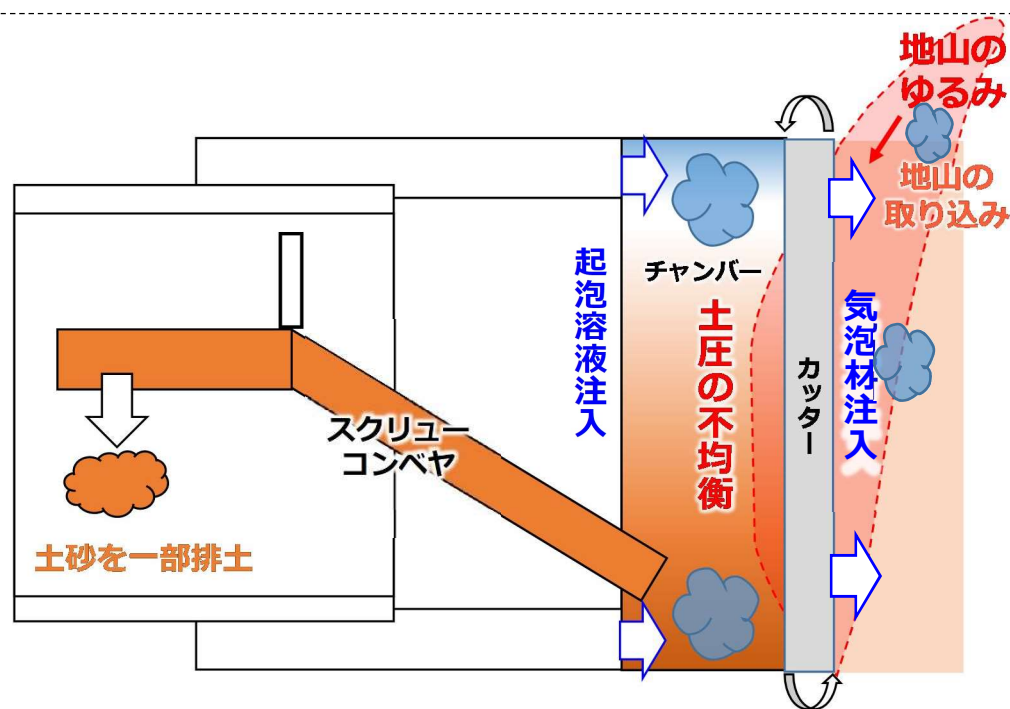
③翌朝（掘進休止後）

- チャンバー内の土砂・気泡材が分離、土砂沈降及び締固まりが発生
⇒ カッター回転が不能に



④復旧作業

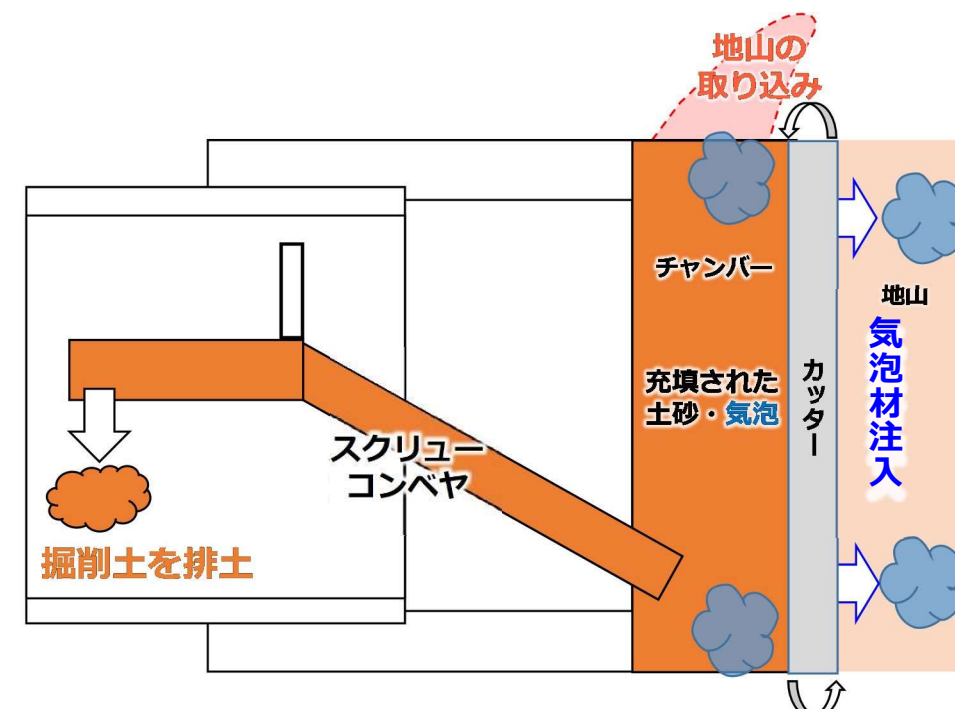
- (1) チャンバー内の土砂の一部を取り込み
- (2) 圧力低下防止のため、気泡材および起泡溶液を注入
⇒ この際、均衡が取れず、地山の一部流入



作業完了

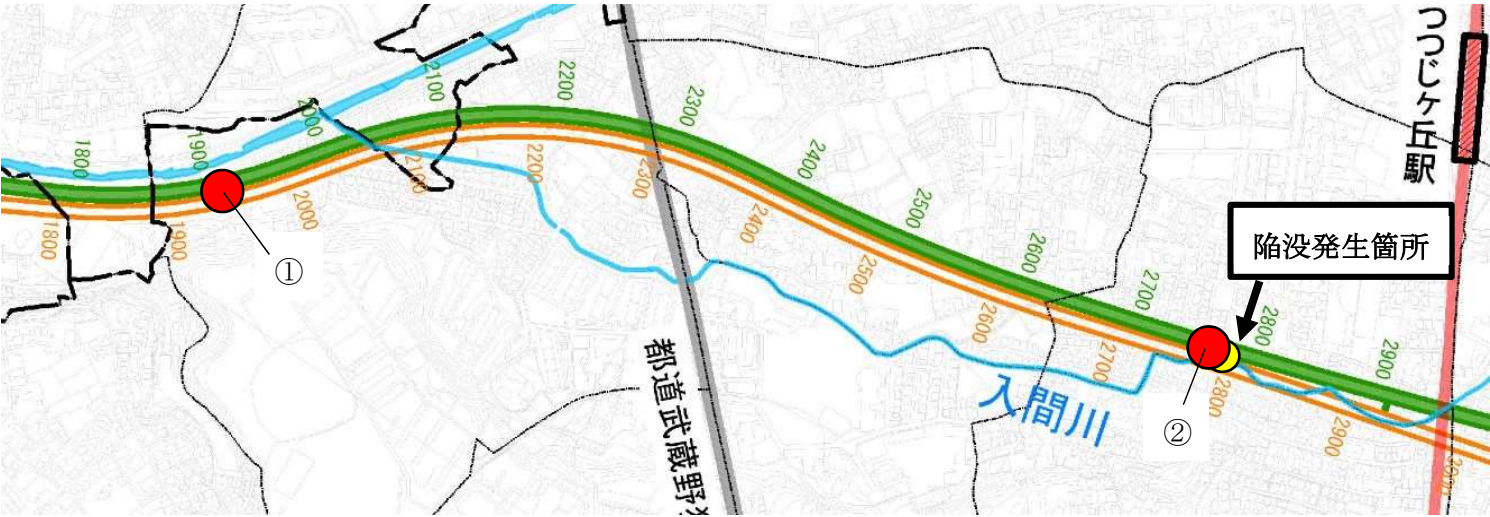
⑤復旧作業完了（再掘進）

- カッター回転が可能となり、地山の取り込みの影響を残しつつ、掘進を再開



⑥ 施工中の粒度分布の変化

東久留米層に切り替わった直後の①谷戸橋付近では、粘土・シルト分が20%強、それ以外は、細砂が70%強と粒径のそろった粒度であったが、②陥没箇所付近では、シルト・粘土分が5%弱と極めて少なく、砂分では中砂が50%強、礫分も20%強と粒径の大きいものが増え、粒径の幅が広い粒度であった。

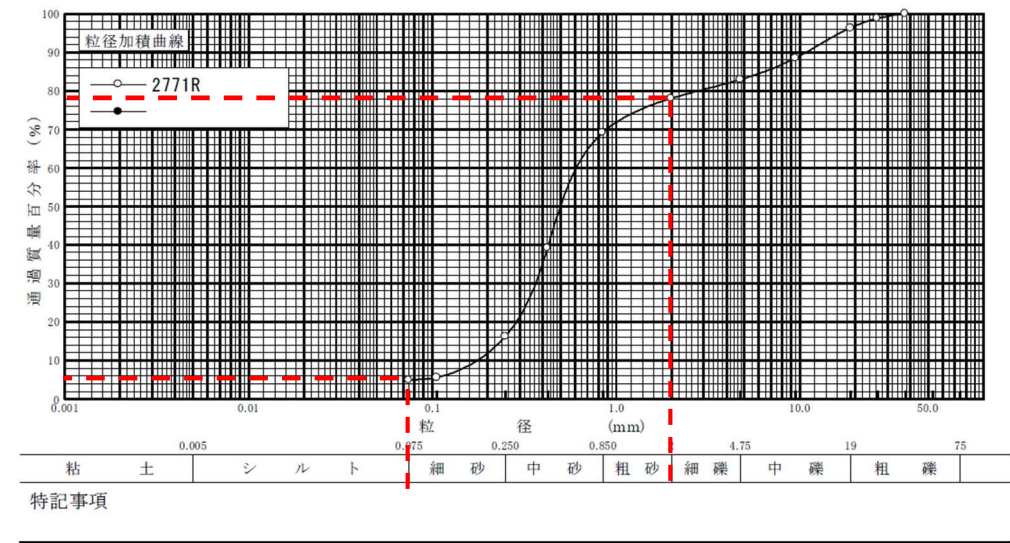
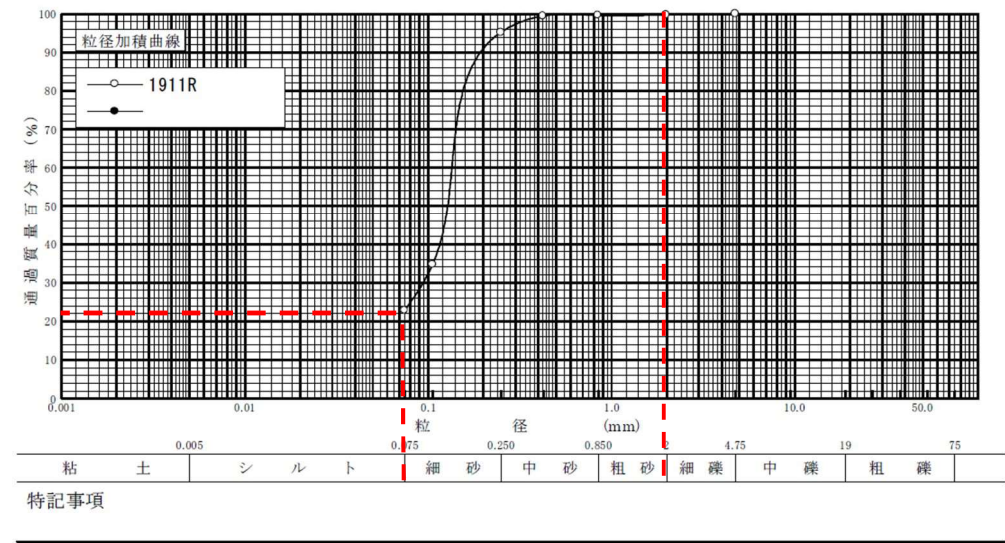


① 2020/3/10 谷戸橋付近

試料番号 (深さ)	1911R				試料番号 (深さ)	1911R	
ふるい分け	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗礫分 %	0.0	
	75		75		中礫分 %	0.0	
	53		53		細礫分 %	0.2	
	37.5		37.5		粗砂分 %	0.1	
	26.5		26.5		中砂分 %	4.5	
	19		19		細砂分 %	72.4	← 細砂
	9.5		9.5		シルト分 %	22.8	← シルト・粘土
	4.75	100.0	4.75		粘土分 %		
	2	99.8	2		2mmふるい通過質量百分率 %	99.8	
	0.85	99.7	0.85		425μmふるい通過質量百分率 %	99.5	
析	0.425	99.5	0.425		75μmふるい通過質量百分率 %	22.8	
	0.250	95.2	0.250		最大粒径 mm	4.75	
	0.106	34.7	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.13	
	0.075	22.8	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.13	
					30 % 粒径 D_{30} mm	0.094	
					10 % 粒径 D_{10} mm	-	
					均等係数 U_c	-	
沈降分					曲率係数 U'_c	-	
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		
					使用した分散剤		
析					溶液濃度、溶液添加量		

② 2020/9/1 陥没箇所付近

試料番号 (深さ)	2771R				試料番号 (深さ)	2771R	
ふるい分け	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗礫分 %	3.7	
	75		75		中礫分 %	13.4	← 礫分計 21.9%
	53		53		細礫分 %	4.8	
	37.5	100.0	37.5		粗砂分 %	8.9	
	26.5	98.8	26.5		中砂分 %	53.0	← 中砂
	19	96.3	19		細砂分 %	11.3	
	9.5	88.5	9.5		シルト分 %	4.9	
	4.75	82.9	4.75		粘土分 %		
	2	78.1	2		2mmふるい通過質量百分率 %	78.1	
	0.85	69.2	0.85		425μmふるい通過質量百分率 %	39.1	
析	0.425	39.1	0.425		75μmふるい通過質量百分率 %	4.9	
	0.250	16.2	0.250		最大粒径 mm	37.5	
	0.106	5.7	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.61	
	0.075	4.9	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.50	
					30 % 粒径 D_{30} mm	0.37	
					10 % 粒径 D_{10} mm	0.18	
					均等係数 U_c	3.38	
沈降分					曲率係数 U'_c	1.24	
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		
					使用した分散剤		
析					溶液濃度、溶液添加量		



⑦気泡材混合土配合試験

① 目的

陥没事故が発生した地盤を掘進する際に用いた気泡材、高分子材の効果、適正確認を目的として気泡材混合土の配合試験を実施した。

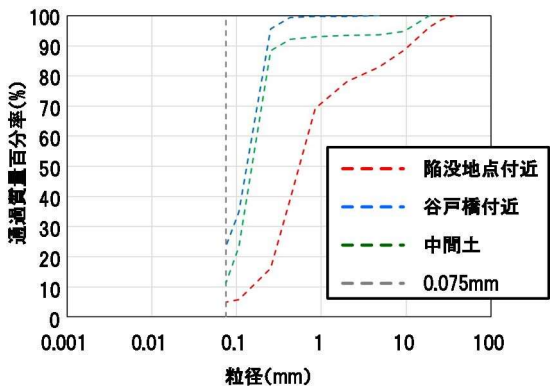
② 実施日

2020 年 11 月 30 日～12 月 16 日

③ 試験に用いる試料の諸元

試料土の設定

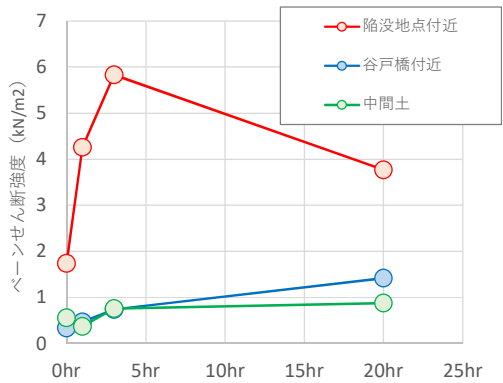
項目	陥没地点付近	谷戸橋付近	中間土	備 考
細粒分含有率	4.9%	23.6%	11.4%	
礫分含有率	21.9%	0.2%	6.6%	
設定地山含水比	12.9%	28.8%	29.1%	陥没地点 : H21-13 ボーリング調査データから設定 谷戸橋付近: H20-1 ボーリング調査データから設定 中間土 : H21-9 ボーリング調査データから設定
現場測定 排土含水比	12.4%	28.8%	30.0%	気泡材混合後の土砂の含水比が現場測定排土含水比になるように、試料土の含水比を調整した。
土粒子密度	2.711	2.693	2.713	地山含水比と同じ調査データから設定



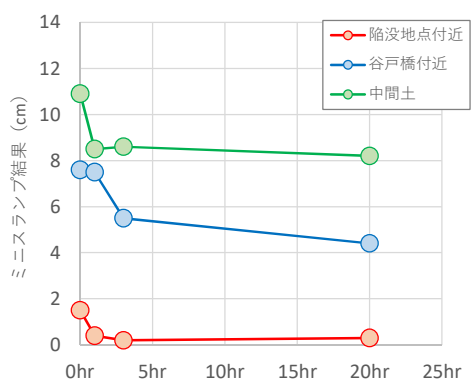
調査対象とした粒度試験結果

④ 試験ケース

対象土	目的	概要	気泡材条件						気泡材 タイプ
			気泡材				高分子材		
			種類	発泡倍率 (倍)	注入率 (%)	濃度 (%)	種類	添加量 (%)	
陥没地点付近 (Fc4.9%)	陥没が発生した 地区を掘進中に 用いた気泡材、高 分子材の適正確 認	各掘進時の気泡 材の設定による 配合試験	改良気泡材	3	50	0.7	高分子材	0.3	Bタイプ
谷戸橋付近 (Fc23.6%)			改良気泡材	8	20	1.0	なし	-	Aタイプ
中間土 (Fc11.4%)			改良気泡材	9	25	1.0	高分子材	0.1	Bタイプ

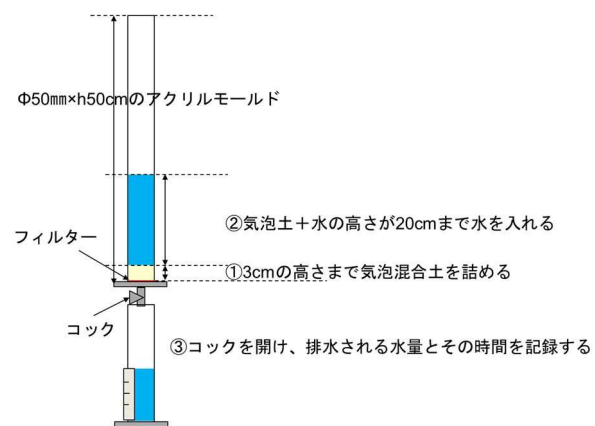


ベーンせん断試験結果

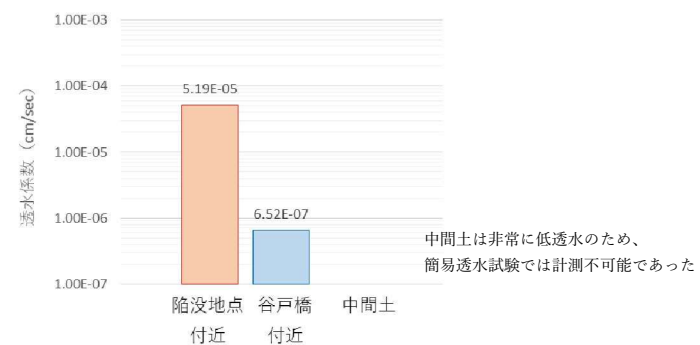


ミニスランプ試験結果

対象土	直後	1 時間後
陥没地点付近 (Fc4.9%)		
谷戸橋付近 (Fc23.6%)		
中間土 (Fc11.4%)		



簡易透水試験



簡易透水試験結果

陥没事象が発生した地盤を掘進する際に用いた気泡材、高分子材の効果確認を目的とした配合試験を行った。試料土は掘進時に採取した原地盤の土試料を用いて実地盤 3 箇所の粒度分布を再現した。

試験項目は、目視・触診、ベーンせん断試験、ミニスランプ試験、透水試験である。

その結果、

- ・谷戸橋付近（Fc23.6%）は、気泡材混合直後と 1 時間経過後のミニスランプ値、ベーンせん断抵抗力はほぼ変わらず、塑性流動性は良好であった。
- ・中間土（Fc11.4%）は、1 時間経過後のミニスランプ値は低下したが、ベーンせん断抵抗力はほぼ変わらず、塑性流動性は良好であった。
- ・陥没地点付近（Fc4.9%）では、気泡材混合直後は塑性流動性があったが、1 時間経過後にはミニスランプ値、ベーンせん断抵抗力ともに急速に悪化し、時間経過とともに塑性流動性が悪化した。また、ミニスランプ試験において 1 時間経過後には溶液の分離がみられ、土砂と気泡材が分離していることが確認された。

（大気中での実験であり、地下水下の条件では気泡材が保持できる時間が延びるため、実機においては塑性流動性の確保できる時間も長くなる。）

以上から、細粒分含有率 Fc が 5%程度と小さくなると、土砂と気泡材の分離がみられ、急激に気泡材混合土の塑性流動性を確保することが困難になったことを確認した。

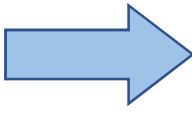
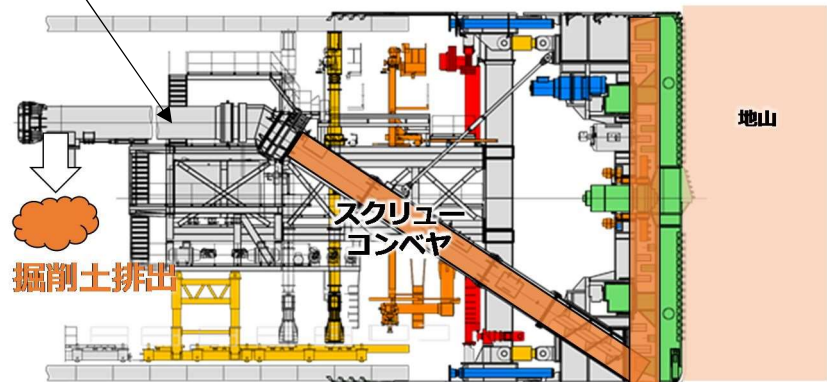
⑧カッターヘッド回転不能時の解除手順について

2766R におけるカッターヘッド回転不能時の解除手順を示す。

STEP 0

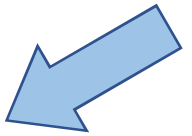
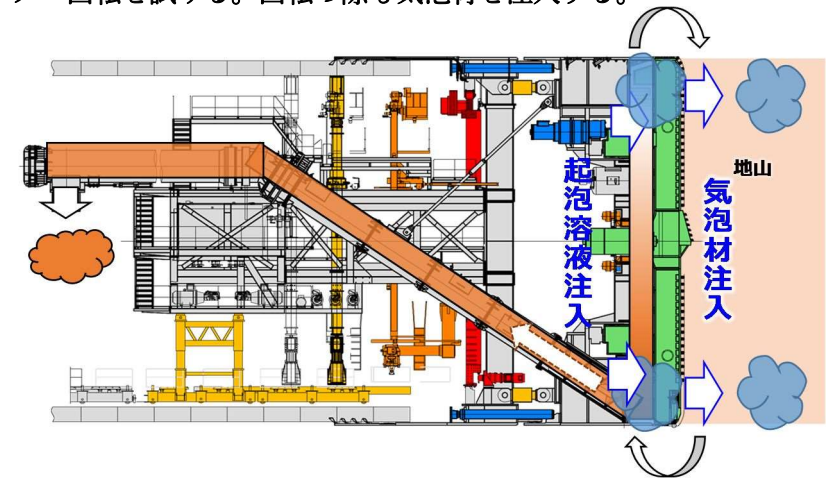
前日の最終リング掘進完了後に No.2 スクリューコンベヤ内の土砂を排出

前日の掘進完了後に No2 スクリューコンベヤ内の土砂は、排出した状態として終了(約 24m³)



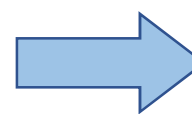
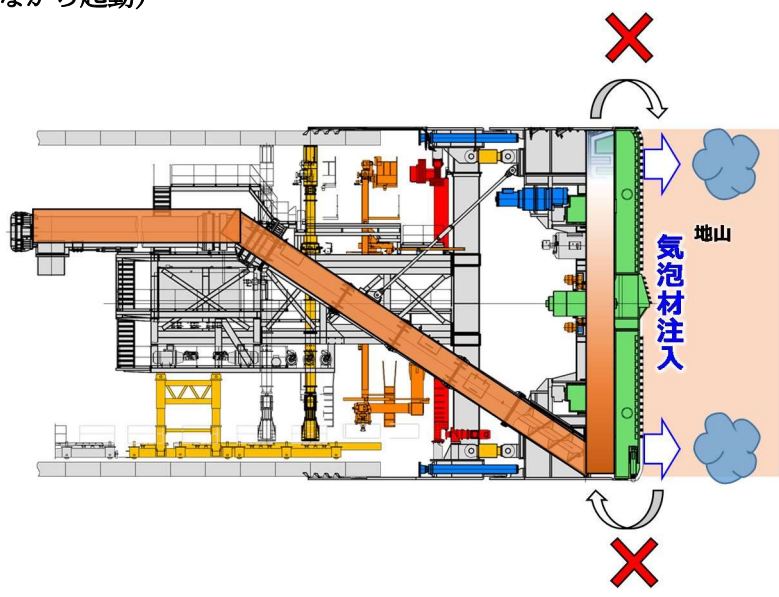
STEP 1

カッターより気泡材およびチャンバーへ起泡溶液を注入し、チャンバー内圧力を上昇させ、スクリューコンベヤからチャンバー内土砂の排土を行ってカッター回転を試みる。回転の際も気泡材を注入する。



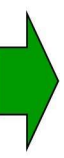
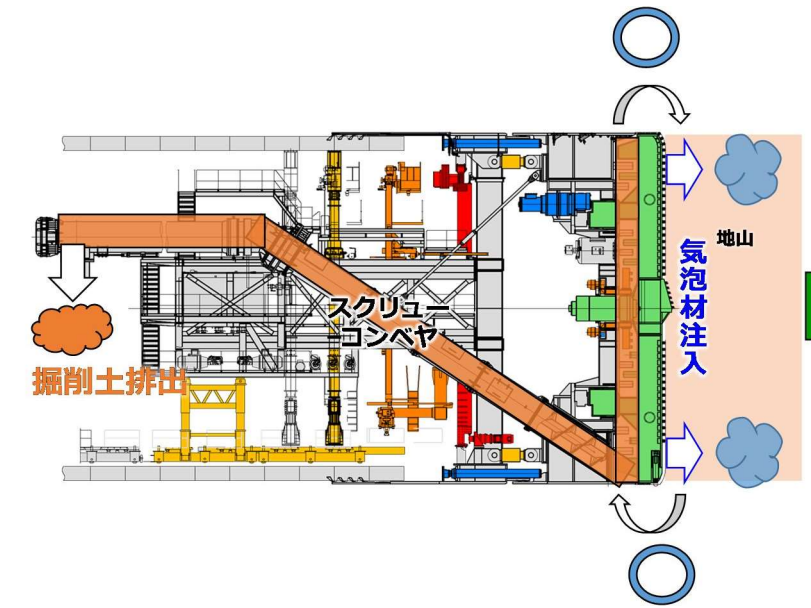
STEP 2

シールド掘進に向けてカッターヘッドの回転を試みたがトルク上限で回転できないことを確認 (カッター前面の摩擦低減を図るため気泡材を注入しながら起動)



STEP 3

STEP 1・2 の繰返し実施によりカッターヘッドが回転でき次第、シールド掘進を実施



掘進再開

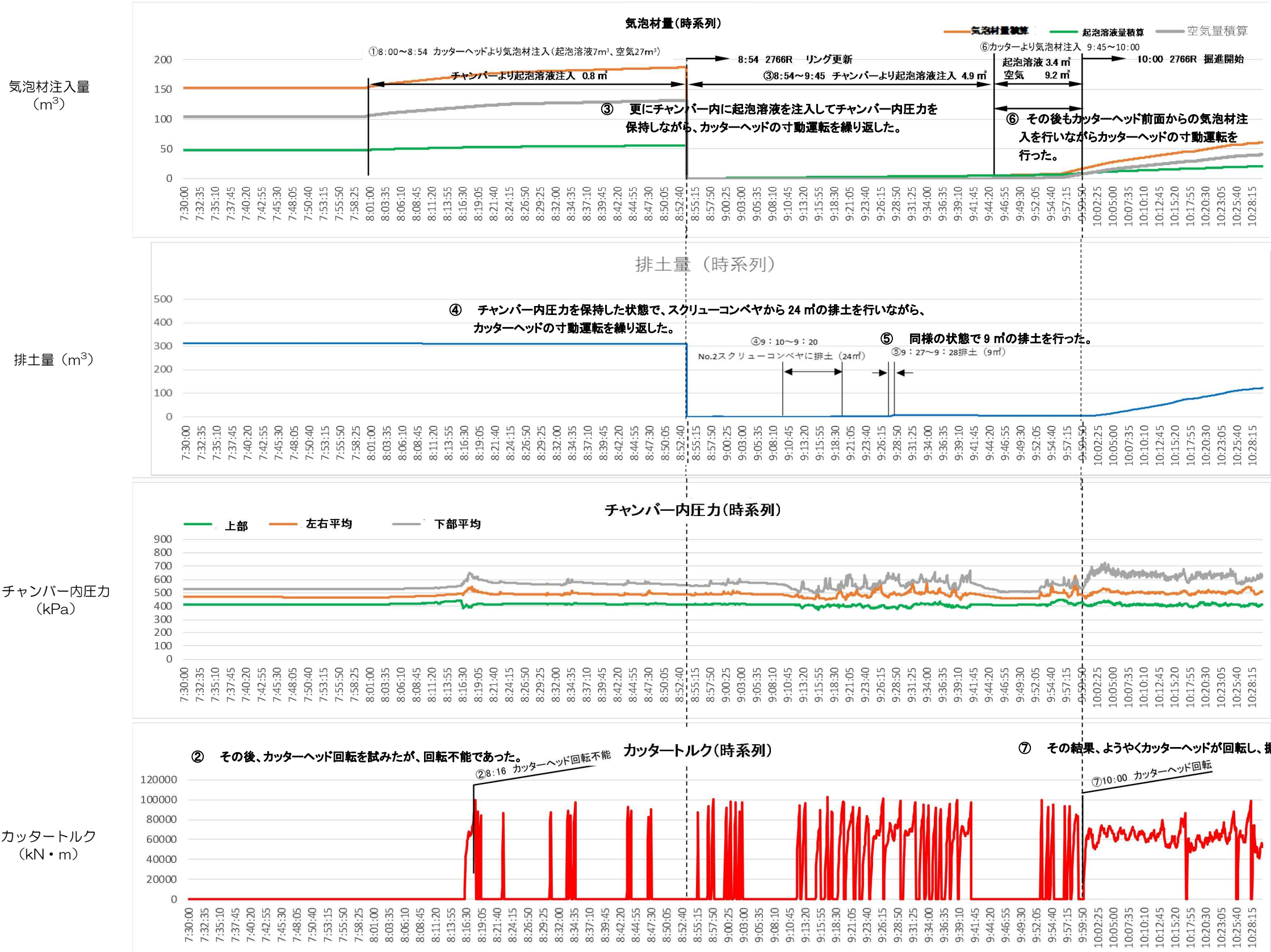
カッターヘッドが回転できないことを確認できたら、STEP1 へ戻る。

⑨2766R のカッターヘッド回転不能時の対応

2766R で①～⑦の手順によって、カッターヘッド回転不能時の解除を行った。

カッターヘッド回転不能時の対処中は、気泡材注入によりチャンバー内の圧力計測に基づき、チャンバー内土圧を保持しながらスクリーコンベヤより土砂を排出する手法で実施した。対処中、一部のチャンバー内圧力計ではチャンバー内土砂を排土する事により瞬間的に下降し、また、カッターヘッドが回転する際、チャンバー内の土砂は掻き回されながら回転する。しかしながら、流動性が低下した締め固まった土砂は、底部からの掻き上げ作用が即座には発揮されず、掻き回されたチャンバー内の土砂は底部へ堆積・充満され、結果としてカッター部材により拘束される力が隔壁に位置するチャンバー内圧力計に伝播するため、瞬間的に上昇する事象が確認された。

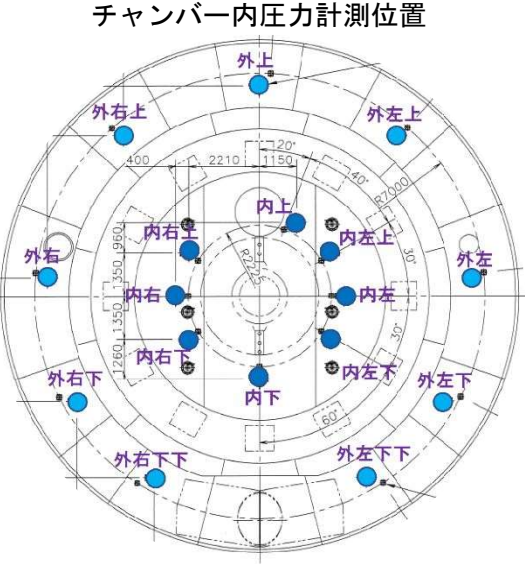
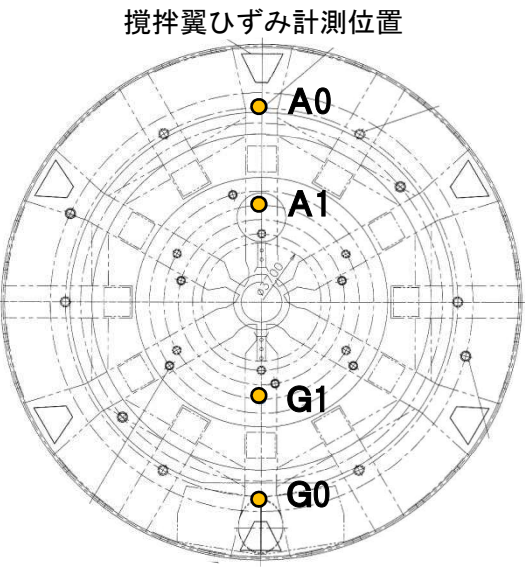
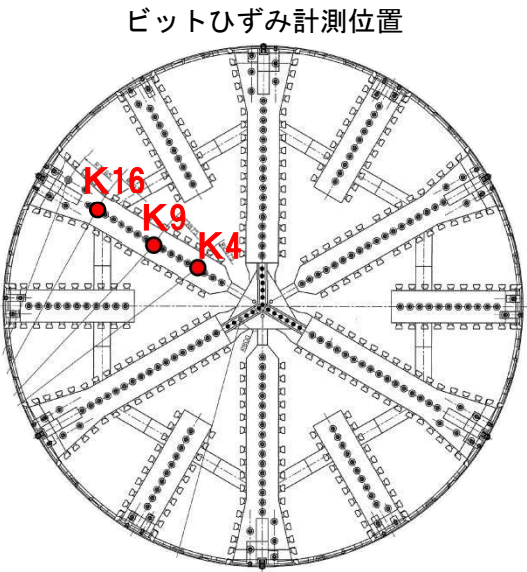
9/14（月） （2766R）カッターヘッド回転不能解除



⑩ 2766R カッタービット・チャンバー攪拌翼ひずみとチャンバー内圧力について（カッターヘッド回転不能時）

カッタービットのひずみ計測値はカッターの寸動運転に相関しているが、掘進時と比較して値は小さい。

攪拌翼のひずみ計測値は、カッターの寸動運転において、カッタートルクがピーク値に達するときに大きな変動が計測されている。①区間ではG フレーム外周部が顕著であるが、この間G フレーム外周部が下部にあったことが想定される。



⑪2766R におけるカッターヘッド回転不能対応時のチャンバー内圧力分布について

カッターヘッド回転不能対応時の各チャンバー内圧力の値を示す。上部はほぼ一定であるが一部のチャンバー内圧力に以下の事象が確認できる。

- ① 排土時にチャンバー内の土砂が動き、一部のチャンバー内圧力（チャンバ外周左下下、右下下等）に低下がみられる。
- ② カッターヘッド寸動運転時に、チャンバー内の土砂が動き、圧密される場所が発生し、一部のチャンバー内圧力に急激な上下動がみられる。

以上のことから、カッターヘッド回転不能時の対応において、切羽前面地盤の不安定化を助長したと推定される。

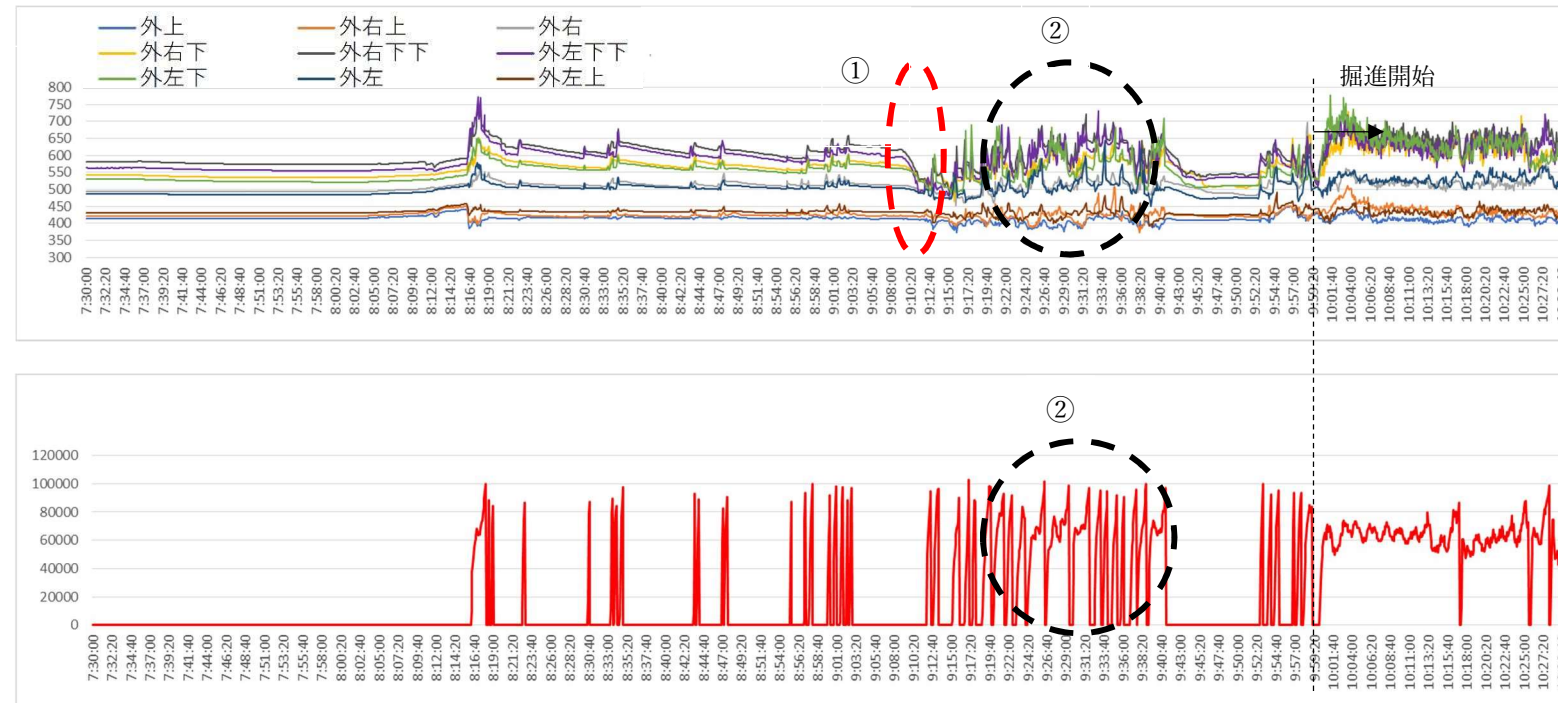


図 2766R チャンバー内外周圧力およびカッタートルク時系列グラフ

(2) カッターヘッド寸動運転時の拡大グラフ

カッターヘッド寸動運転操作時に、カッタートルクが停止直前のピーク値に達するときに、それに合わせて一部チャンバー内圧力計に急激な上下動がみられる。

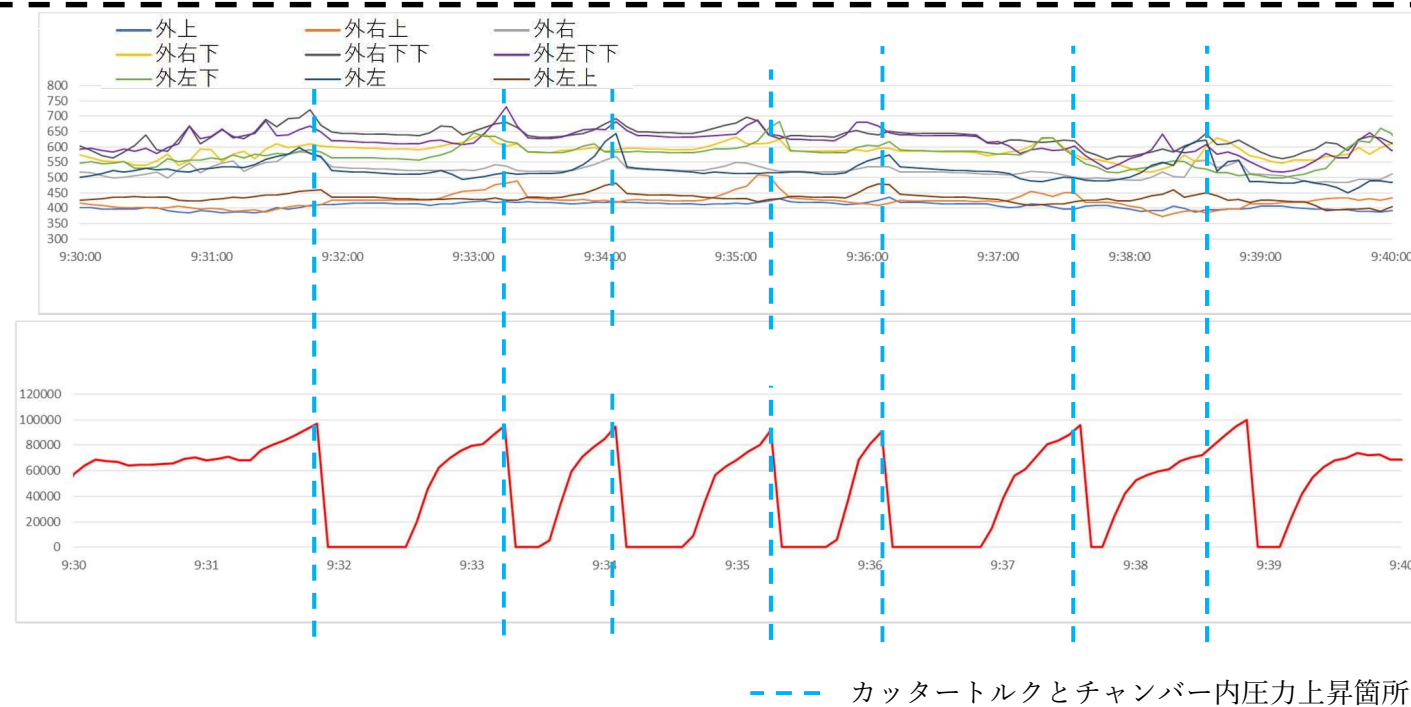


図 カッター回転動作によるチャンバー内圧力変化

(1) 排土時の拡大グラフ

排土を行ったときに一部のチャンバー内圧力に緩やかな下降がみられる。

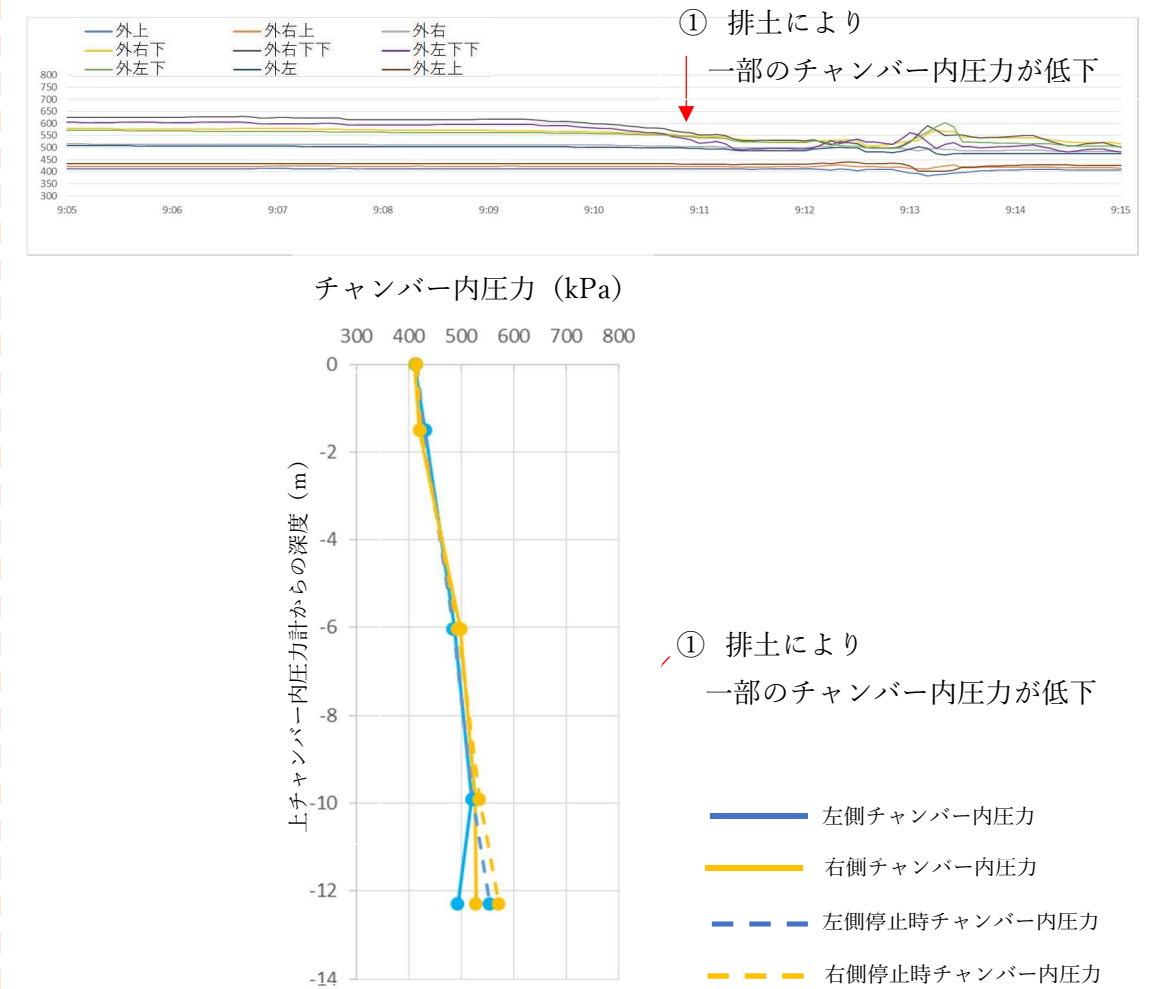


図 排土によるチャンバー内圧力分布

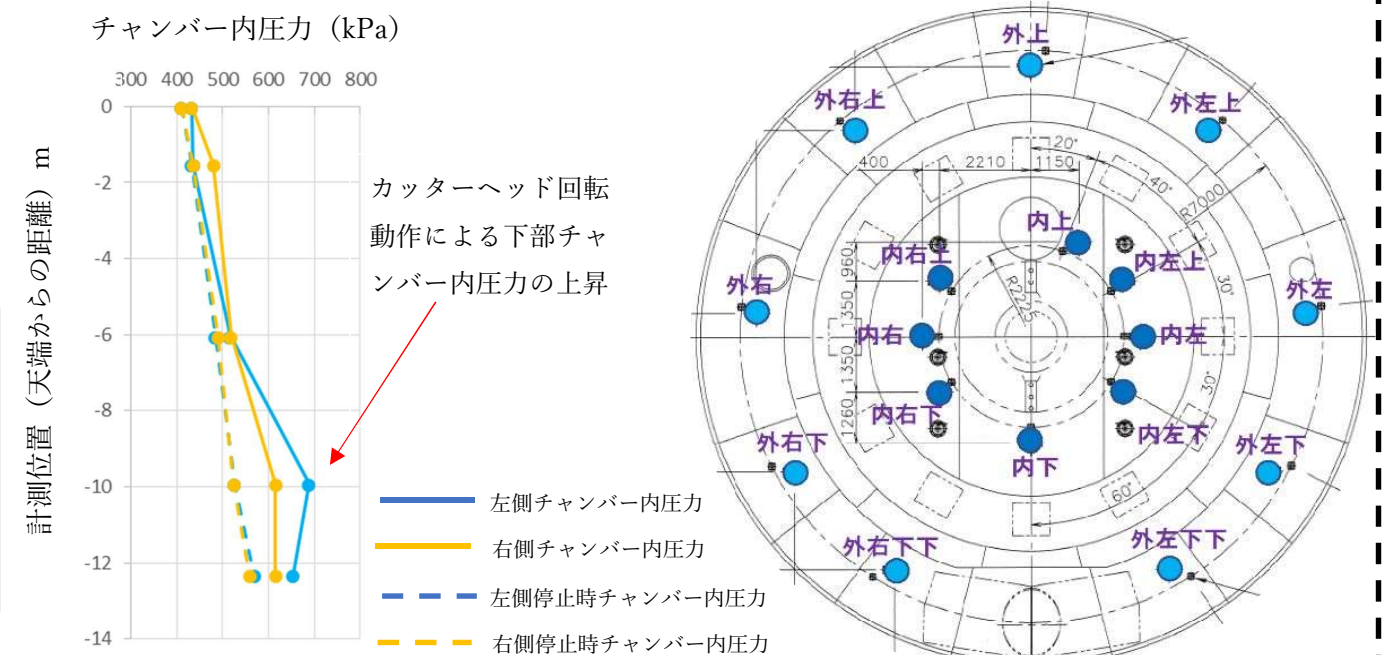


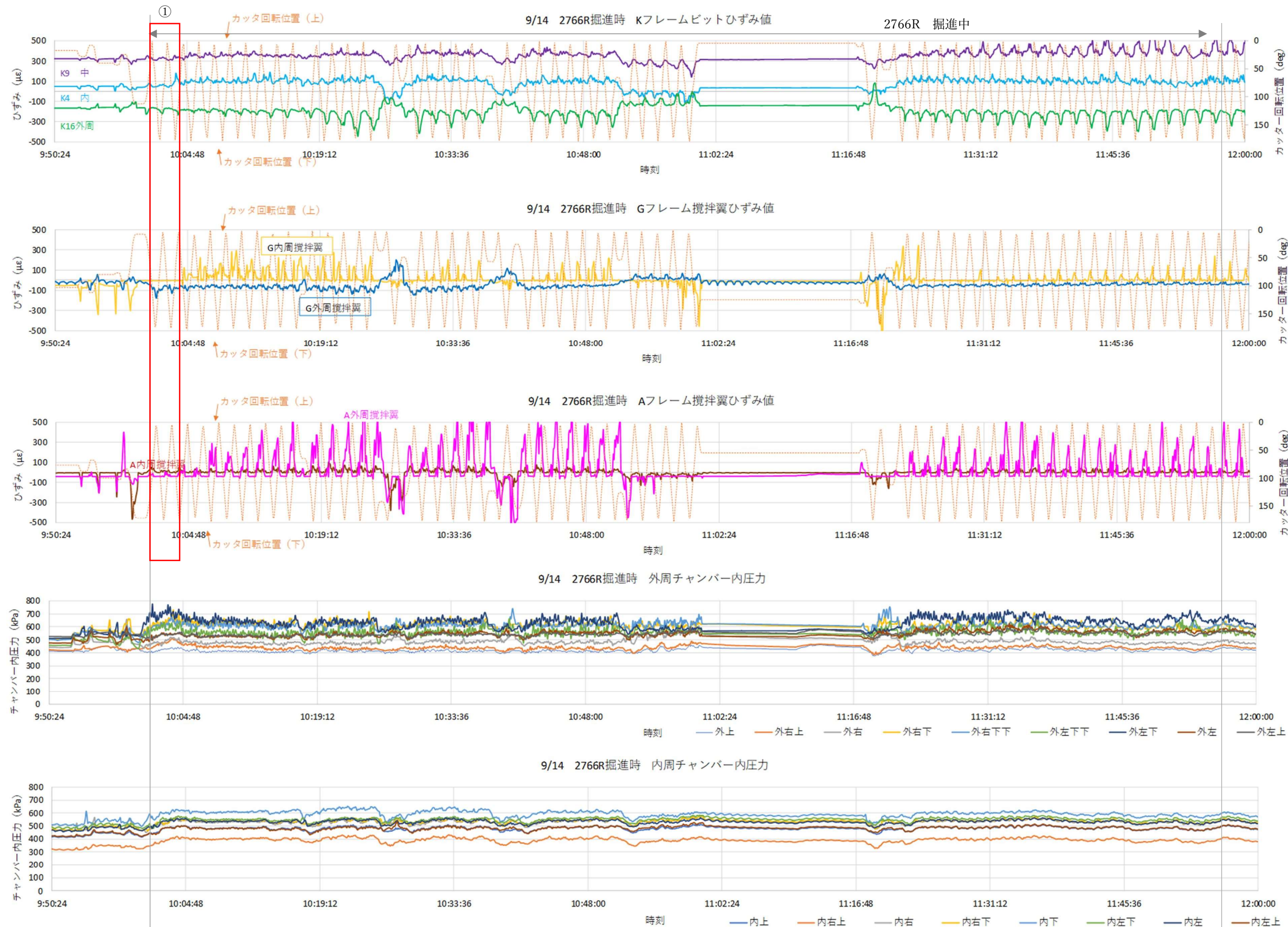
図 カッタートルク上限時直前のチャンバー内圧力分布

⑫ 2766R カッタービット・チャンバー攪拌翼ひずみとチャンバー内圧力について（掘進時）

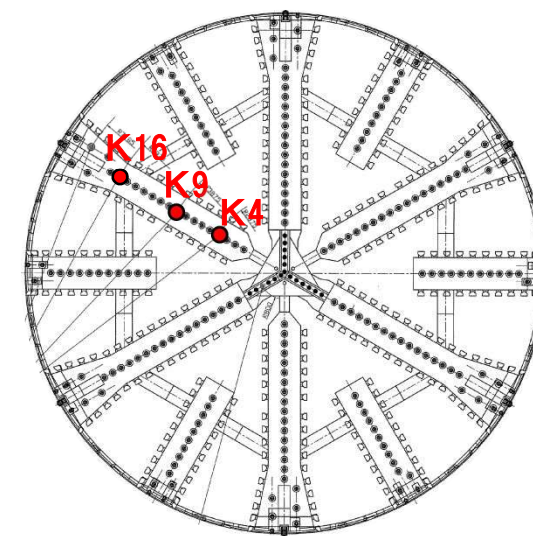
カッタービットひずみ計の計測値はカッターの回転角度と関連しており、上部では小さく、下部では大きな値となっている。下部でチャンバー内圧力が大きくなることによりひずみが増加していると考えられる。

カッター回転不能の解除を行った 2766R においては、回転不能解除後の掘進開始直後は、ひずみ計の計測値の変化が小さく（①部）、カッター前面の地山にゆるみが生じていると推定される。

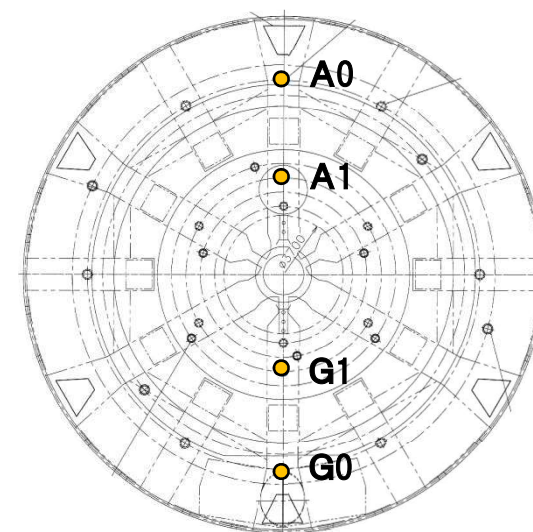
攪拌翼のひずみ計測値は、A と G は 180 度ずれた対極のスポークに設置されているが、A 外周攪拌翼だけが激しい変動が計測されている原因の特定はできていない。



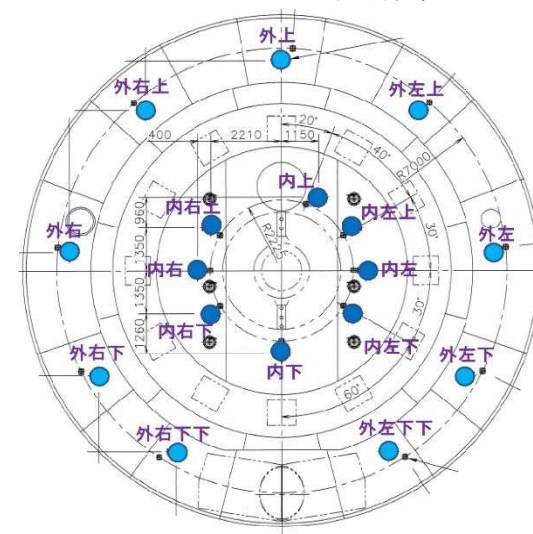
ビットひずみ計測位置



攪拌翼ひずみ計測位置



チャンバー内圧力計測位置



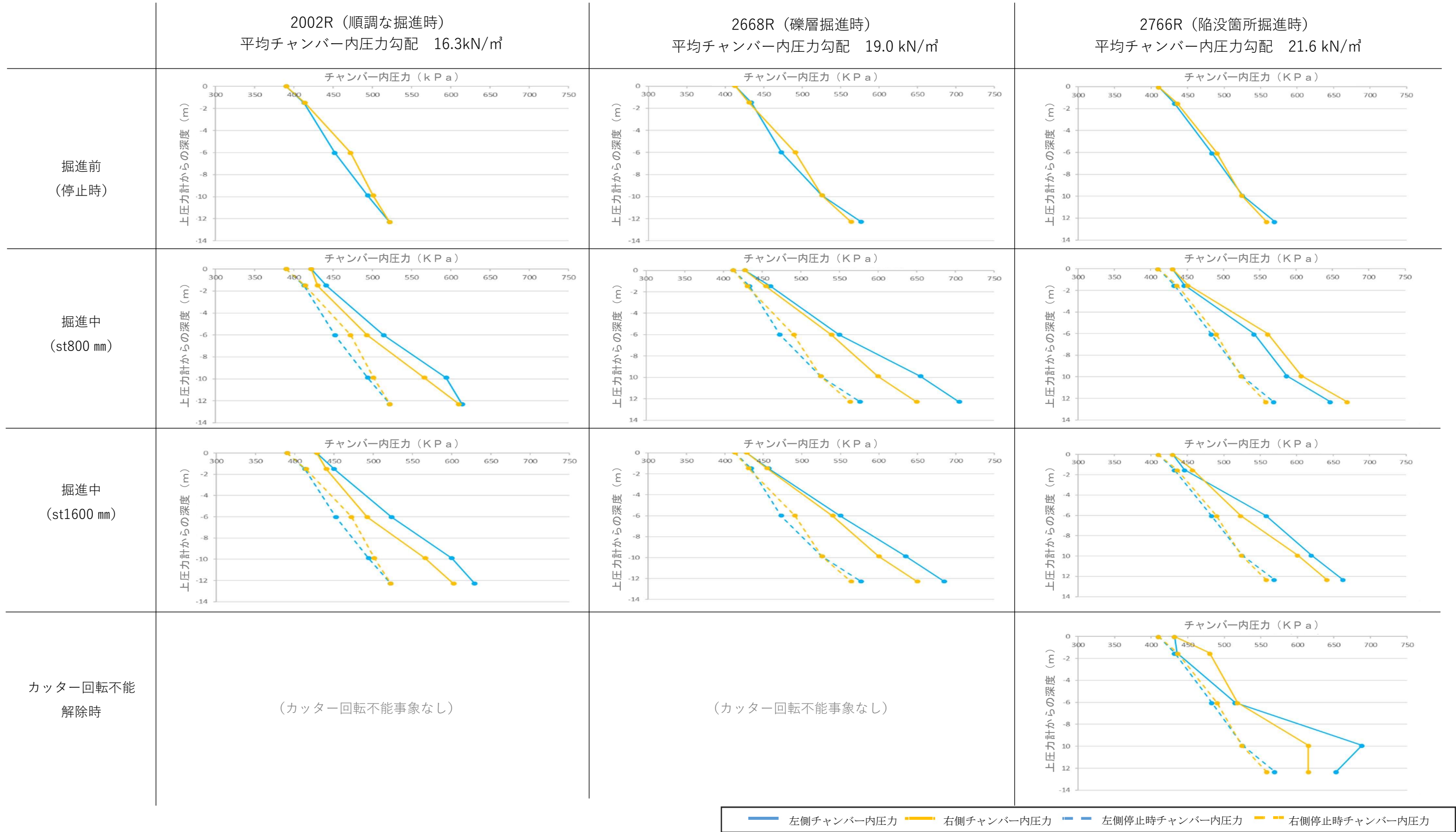
⑬チャンバー内圧力勾配について

東久留米層に入ってから3箇所について、掘進停止時（破線）と掘進中（実線）およびカッター回転不能解除時のチャンバー内圧力分布を示す。

チャンバー内の土砂性状が塑性流動性を有して一様となっている場合、圧力勾配は直線を示すこととなり、下図に示す3箇所全てにおいて、掘進前（停止時）、掘進中ともに、チャンバー内圧力勾配は一定程度の直線性を示している。

一方で、砂礫出現、細粒分の減少に伴って掘進中の圧力勾配は大きくなっているが、2668R、2766Rにおいては、2002Rと比べ、停止時と掘進時の圧力勾配の傾きに差が見られる。これは、停止時にチャンバー内土砂の沈降・分離が進み、締固まったことによりチャンバー内土砂が自立性を有したことから、掘進時と比べ停止時の圧力勾配の傾きが小さくなったものと推定される。なお、2668Rではカッター回転不能事象は発生していない。

また、カッターヘッド回転不能解除時には、チャンバー内圧力勾配が一定ではなく、チャンバー内の圧力バランスに乱れが生じていると考えられる。



5. 6 掘進中の塑性流動化状況の把握

①チャンバー内圧力勾配から算出する単位体積重量と理論気泡土単位体積重量の比較から塑性流動化状況を検討

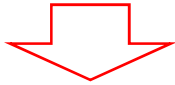
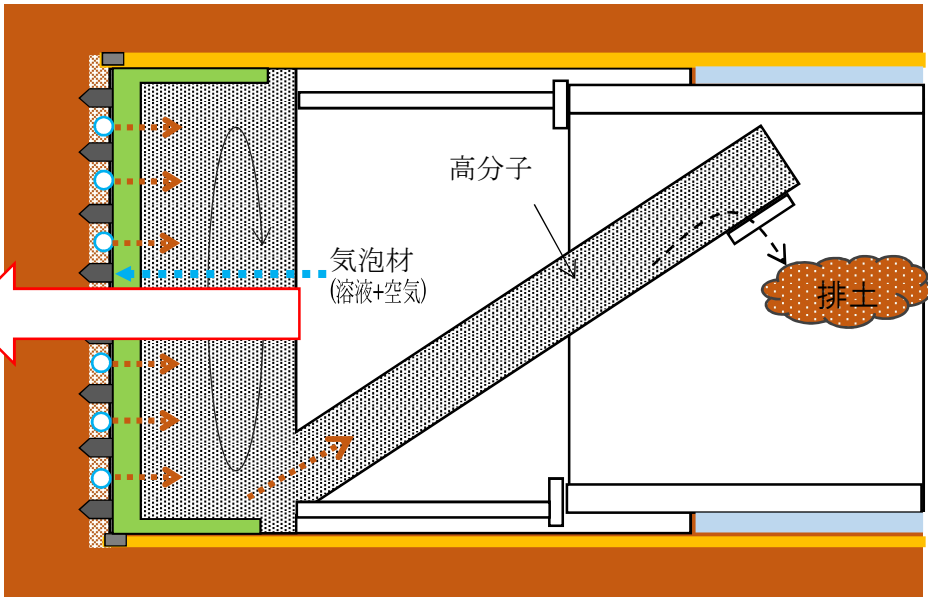
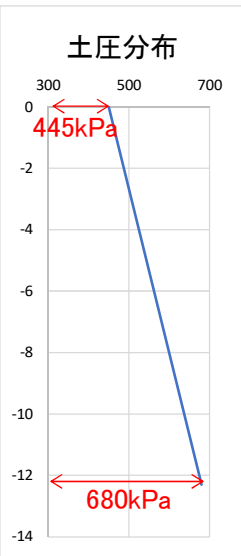
陥没・空洞が発生した付近におけるチャンバー内の塑性流動化状況について、夜間休止時において気泡材と土砂の分離により塑性流動性が損なわれていると推定されたが、掘進時のチャンバー内塑性流動化状況を更に確認するために、チャンバー内の圧力勾配から算出する単位体積重量と理論気泡土単位体積重量の比較から検討を行った。

気泡材混合掘削土（気泡土）はスクリーコンベヤから大気圧下に排出されると、消泡するためチャンバー内と異なる土砂性状になるため、実際に測定されたチャンバー内の圧力勾配からチャンバー内土砂の単位体積重量を求め、注入した気泡材が全量回収できている条件で算出されるチャンバー内土砂の単位体積重量（理論気泡土単位体積重量）と比較するものである。

チャンバー内圧力勾配から算出した単位体積重量(例)

チャンバー内の掘削土砂が塑性流動化している状態では、チャンバー内圧力勾配が掘削土砂の単位体積重量と等しくなると考えられる。右図土圧分布を例にすると、
$$(680\text{kPa} - 445\text{kPa}) \div 12.3\text{m} = 19.1\text{kN/m}^3$$

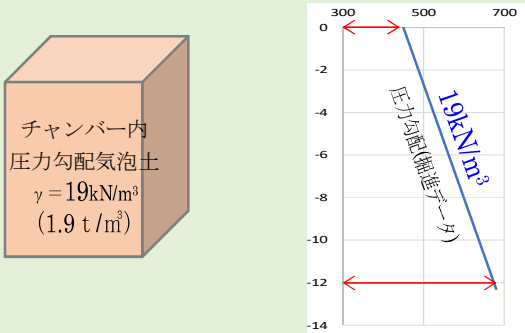
がチャンバー内掘削土(気泡土)の単位体積重量と算出(推定)される。この値から掘削土に含まれている気泡材の量を算出して、添加量と比較することで、塑性流動化状況を推定する。



I. チャンバー内圧力勾配からの塑性流動化状況の評価(例)

注入した気泡材が全量回収される条件で算出する単位体積重量(以下、理論気泡土単位体積重量)と、チャンバー内の圧力勾配から測定される掘削土単位体積重量の比較から塑性流動化状況进行评估する。

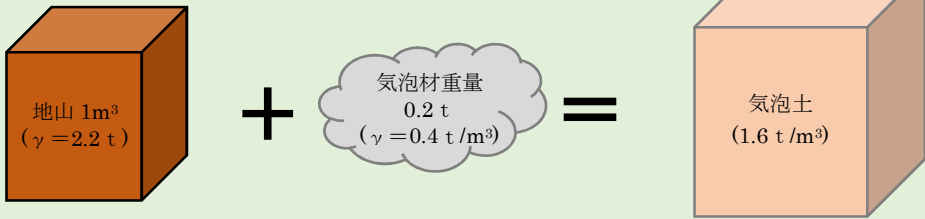
チャンバー内圧力勾配から算定した掘削土単位体積重量(例)



気泡土単位体積重量
 $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$
チャンバー内圧力勾配
例: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3 (1.9 \text{ t/m}^3)$



理論気泡土単位体積重量の算出方法(例)

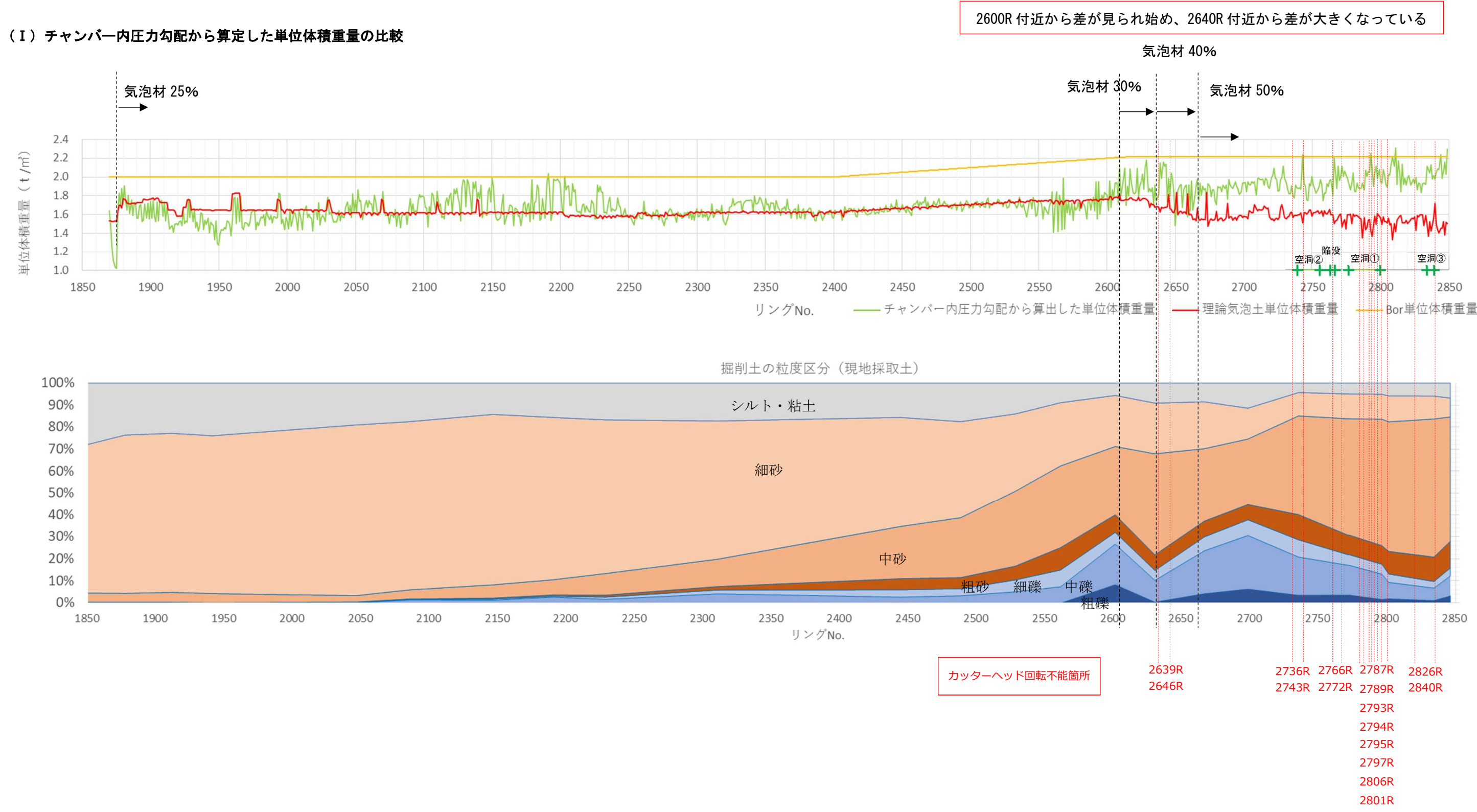


②検討結果

2600R 付近から理論気泡土単位体積重量とチャンバー内圧力勾配から算出した単位体積重量に差が見られ始め、2640R 付近から両者の差が大きくなっていることが確認された。これは、地山の細粒分・細砂分の減少、礫分の増加と符合する。また、チャンバー内圧力勾配から算出した単位体積重量が理論気泡土単位体積重量より大きい値を示しているのは、注入した気泡材が全量チャンバー内にて土砂と混合されないことによる塑性流動性の低下が発生している可能性を示唆している。このことから、特殊な地盤条件下において気泡材の地山への浸透が発生していると推定される。

塑性流動性の改善を目的に、2610R 以降で気泡材添加量を増加させたが、理論気泡土単位体積重量とチャンバー内圧力勾配から算出した単位体積重量の差に改善が見られていない。掘削土の管理においては、理論気泡土単位体積重量からなる気泡土量から注入した気泡材全量を控除して掘削土量を算出しているため、気泡材の地山への浸透発生を考えると、掘削土量を過小に評価していたと推定される。

なお、2130R 付近～2210R 付近で一時的に差が大きくなる箇所があり、掘進時に塑性流動性の若干の変動が生じていたものと想定されるが、2640R 付近以降のようなカッター回転不能事象は発生していない。礫の混入が始まった区間であり、掘削地盤内の細粒分が減少したため、気泡タイプの変更や気泡材注入量の調整を行っている。



5. 7 落とし戸実験結果

5.7.1 1G 重力場での実験

① 目的

細粒分が少ない砂地盤において、シールド掘削時に過剰な土砂の取り込みによる緩みが生じた場合、緩み領域がどのように上方に進展するかについて、原地盤の試料土を用いて実験的に検証した。

② 実施期間

2020 年 12 月 1 日～12 月 10 日

③ 落とし戸実験について

砂地盤におけるトンネル掘削時の緩み領域の検証には、落とし戸実験が活用されている。模型地盤内にトンネル掘進時の緩みを模した空隙を強制的に設けることで、トンネル上に生じる緩み領域を再現する。

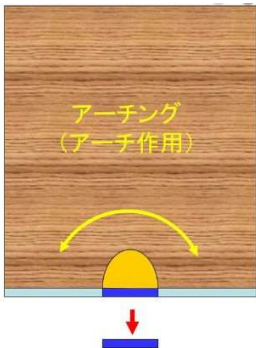


図 5-1 落とし戸実験のイメージ

④ 実験による検証方法

落とし戸実験を行い、過剰な土砂の取り込みによる緩み領域の進展状況を目視で確認した。

⑤ 模型地盤作製方法

陥没地付近の原地盤の土を対象とした（表 5-1）。実験は、シールド切羽を模擬できる切羽可視化実験装置に土槽を取り付けて実験を実施した（写真 5-1）。模型地盤作製において、模型地盤は空中落下法（落下高さ 50cm）で作製した（写真 5-2）。

表 5-1 実験対象とする原地盤の土物性

対象	項目	陥没地
原地盤	乾燥密度 (g/cm ³)	2.008
	土粒子密度 (g/cm ³)	2.711
	間隙比	0.350
模型地盤	乾燥密度 (g/cm ³)	1.600
	間隙比	0.694

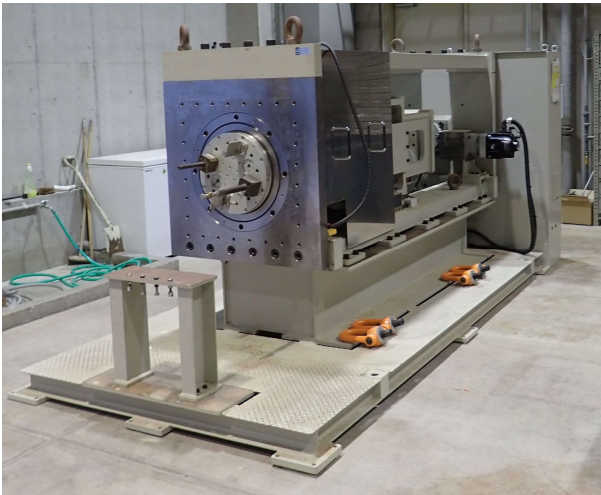


写真 5-1 切羽可視化実験装置外観



写真 5-2 空中落下法による地盤作製状況

⑥ 落とし戸実験の概要

実験の概略図を図 5-2 に示す。落とし戸は奥行方向に移動させることで飽和砂地盤を強制的に 5mm 沈下させ、落とし戸上方に緩み領域を発生させた。なお、本装置は飽和地盤での実験が可能となっている。

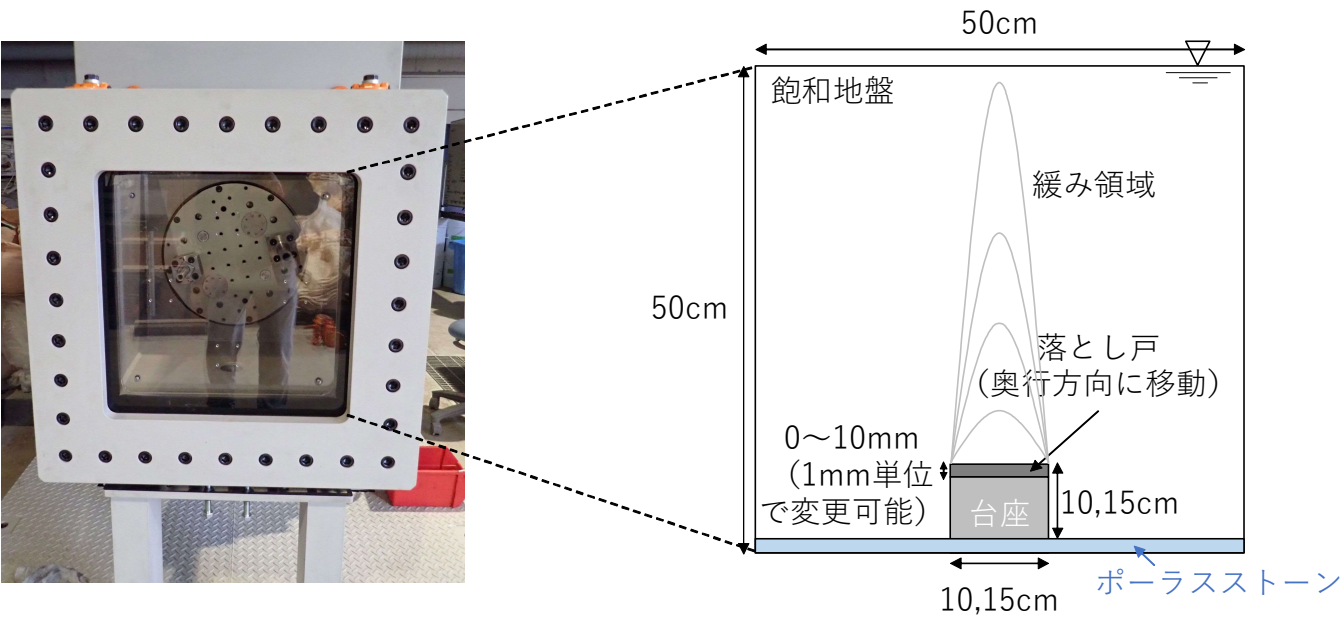


図 5-2 落とし戸実験の概略図

⑦ 落とし戸実験ケース

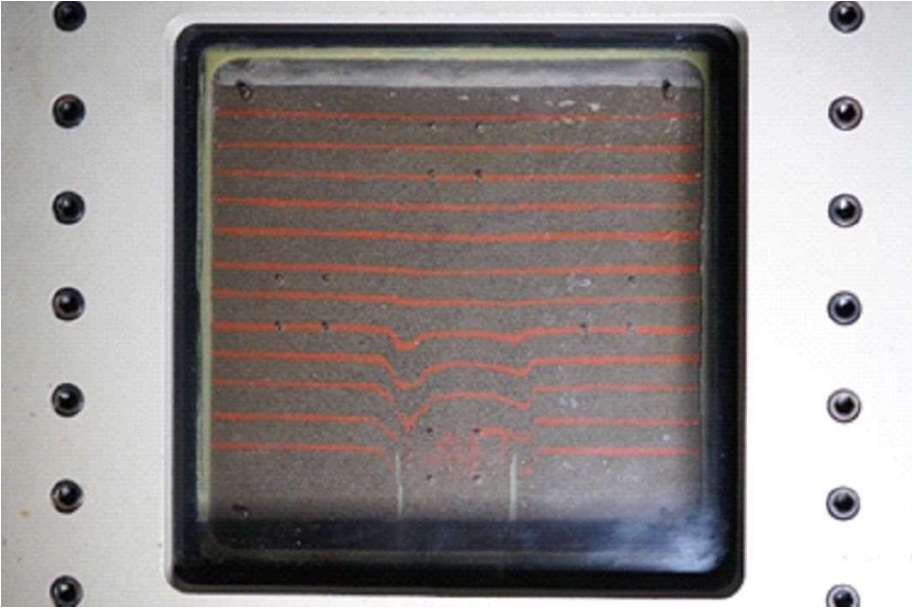
実験ケースを表 5-2 に示す。

表 5-2 落とし戸実験ケース

模型地盤		
対象土	乾燥密度	強制沈下量
陥没地	1.600g/cm ³	5mm

⑧ 実験結果

実験結果を写真 5-3 に示す。写真 5-3 から、落とし戸を引き抜くことで落とし戸上方にゆるみ領域が発生することが確認された。



落とし戸引き抜き終了時
写真 5-3 実験状況

5.7.2 遠心力場での実験

① 目的

1 G 場の実験で確認した現象が、大深度下の高い拘束圧下でも生じるかを確認するために遠心力場での実験（遠心模型実験）を実施した。

② 実施期間

2020 年 12 月 25 日～2021 年 1 月 15 日

③ 遠心模型実験の原理

遠心模型実験は、実験模型（落とし戸実験装置）を搭載したバスケットを回転腕で高速回転することで、模型実験装置に遠心力を作用させ、所定の遠心力に安定した後、遠隔操作にて実験を行う手法である（写真 5-4、図 5-3）。

今回の実験では、100G（地上での重力加速度 1 G の 100 倍）の遠心力を作用させることで、土被り 40m の飽和地盤を再現している（図 5-4）。

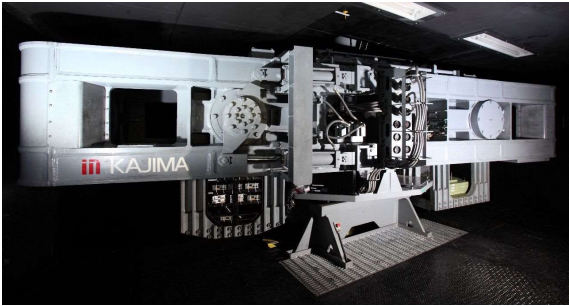


写真 5-4 遠心模型実験装置

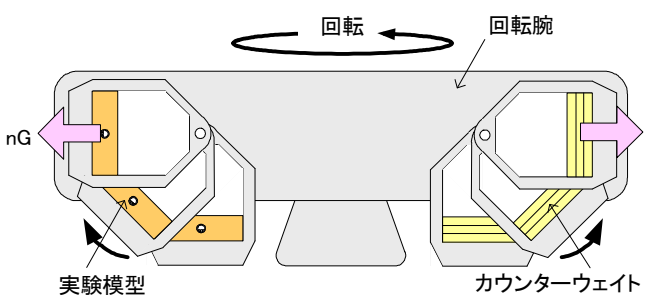
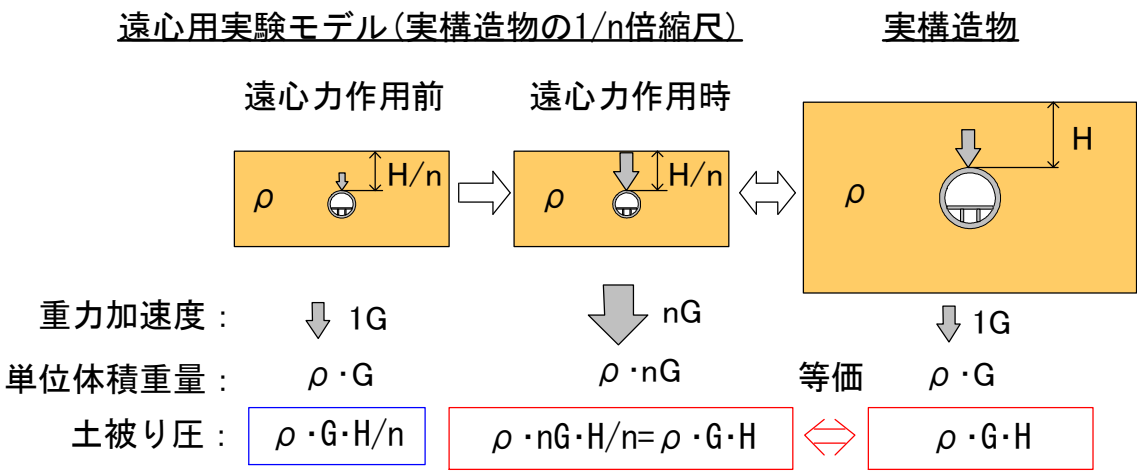


図 5-3 実験模型への遠心力作用方法



今回の実験では、土被り H=40m、倍率 n=100 となる。

図 5-4 実規模相当の地盤内応力を再現する原理

④ 模型地盤作製方法

陥没地付近の原地盤を対象とし、原地盤の粒度に合わせて粒度調整した珪砂を模擬土として使用した。

⑤ 遠心場落とし戸降下実験の概要

遠心実験の概略図を図 5-5 に示す。実験ではシールド径 16m を模した落とし戸を土槽底部に設け、飽和砂地盤を強制的に 10mm 降下させることで、落とし戸上方に緩み領域を発生させた。土槽前面はアクリル窓とし、カメラ撮影を行うことで地盤の変形状況を観察した。

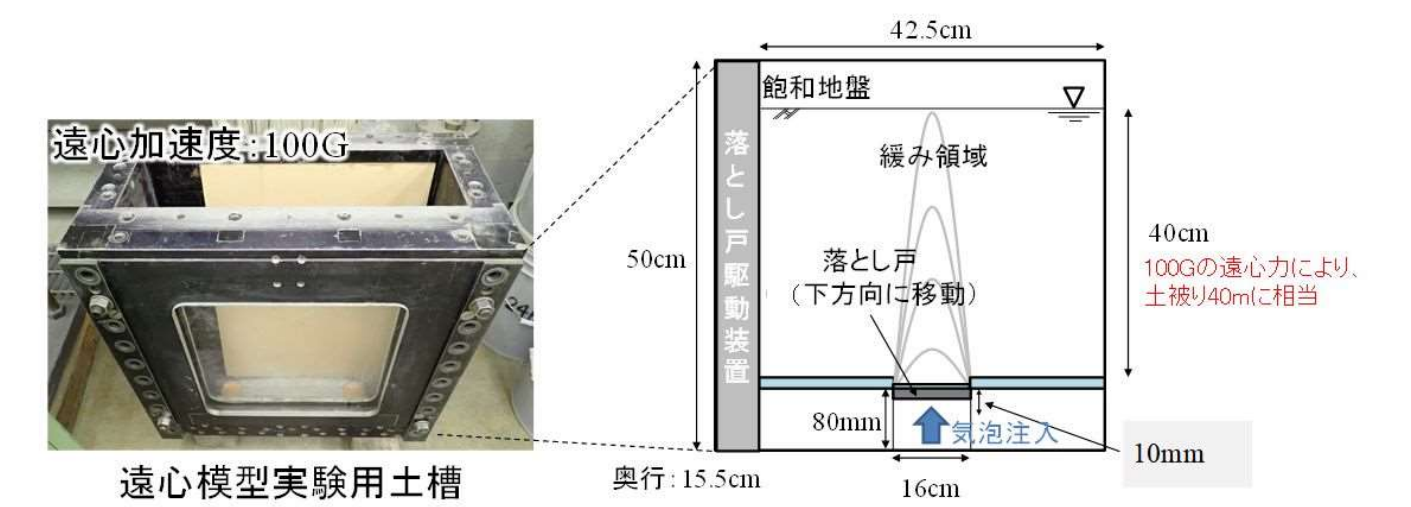


図 5-5 遠心場落とし戸実験の概略図

⑥ 遠心場落とし戸実験ケース

実験ケースを表 5-3 に示す。

表 5-3 遠心場落とし戸実験ケース

模型地盤		
対象土	乾燥密度	強制沈下量
陥没地	1.612g/cm ³	10mm

⑦ 実験結果

実験結果を写真 5-5 に示す。遠心場実験でも 1G 重力場実験同様に落とし戸上方にゆるみ領域が発生することが確認された。

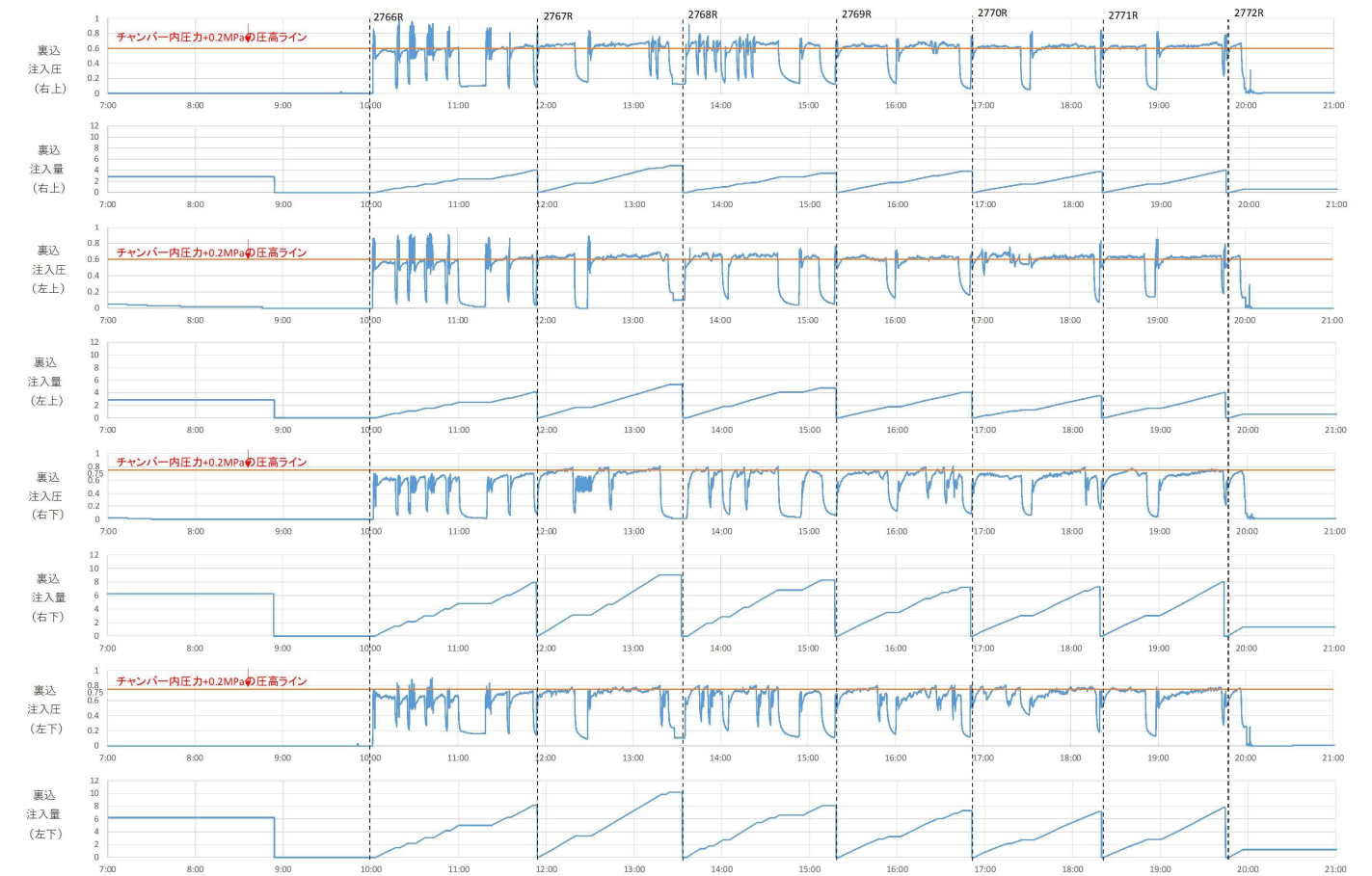
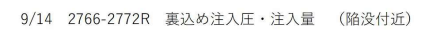


遠心場落とし戸降下実験終了時

写真 5-5 実験状況

① シールド機胴体外周部にある地山探査装置では、装置が突出できない事象が発生していた。これは、探査装置が Cutter 面から 4.5m 後方に位置するため、地盤の緩みや空隙があっても上部地盤がシールド機スキンプレートまで緩むことで検知できず胴締めが発生するような状況でシールド掘進していたことを示していると言える。

③ボイド天端が緩むことで胴締めが発生していた可能性があるものの、裏込め注入に係る施工データに異常値は確認されず、余掘幅はわずか8cm程度であることから、陥没・空洞の要因である可能性は低い。



5. 9 空気の塊の上昇による影響について

一般に、気泡材と掘削土が混錬され、良好な気泡材混合土として塑性流動化し難透水性の性状を確保していれば、気泡材は土砂の間隙内に保持されている。したがって、上方の地盤内への顕著な気泡を形成する空気の塊の上昇は生じないものと想定される。

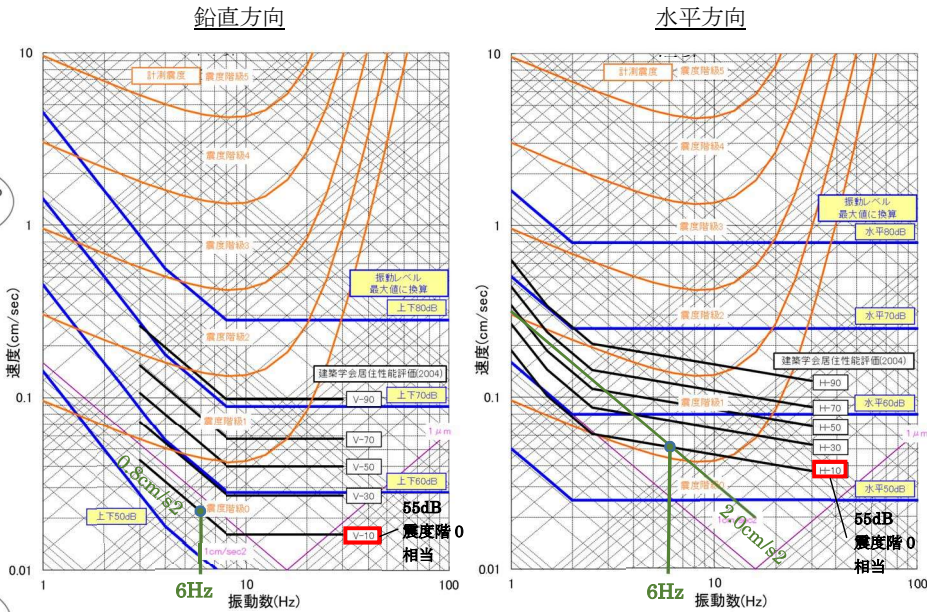
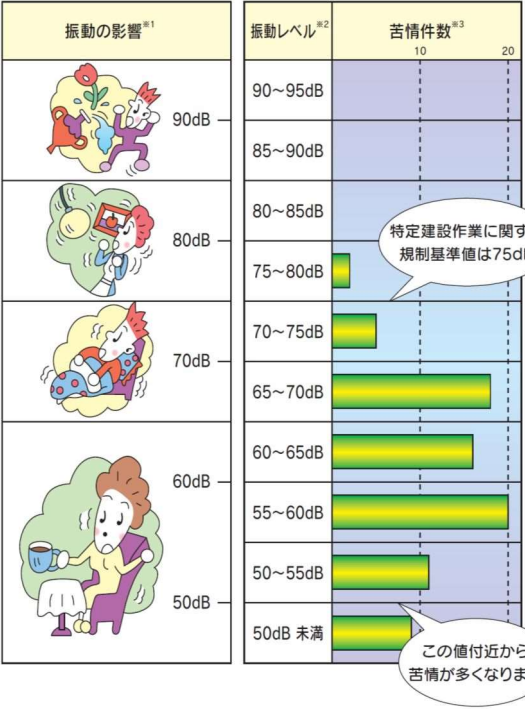
一方、十分な改善効果が得られてない土砂性状でシールド掘進停止状態（チャンバー内土砂の攪拌が無い）が長時間継続した場合、気泡材と土砂が分離するため、空気の塊が上昇傾向にあると想定され、その空気の塊の上昇自体により、細粒分が少なく、固結度が低い上部地盤への緩み進展が助長される可能性はあるが、上昇する空気の圧力は体積膨張とともに土粒子の間隙水圧相当に減少するため、土粒子に与える影響は小さいと考えられる。

5. 1 0 トンネル掘削の振動による締固め（局所的な液状化）による影響について

シールド掘進による振動は最大で 55dB（2gal、震度 0 相当）程度であり、レベル 1 地震動 200～300gal の 1/100 以下であり、地盤に有害なひずみを発生させるほどの加振力ではなく、地盤に緩みを生じさせたり、地盤災害が発生させたりするレベルではないと考えられる。

- ・シールド掘進による振動の最大値 55dB
 - ・規制基準値レベル H-10・V-10（55dB）は地震の震度階級 0 相当
 - ・震度 0≒水平加速度 2.0cm/s²(Gal)（振幅 10.5μm）
≒鉛直加速度 0.8cm/s²(Gal)（振幅 5.5μm）（*家屋の揺れやすい 6Hz 付近）
- 【参考】東日本大震災 2700Gal（約 1300 倍）、阪神淡路大震災 800Gal（約 400 倍）

よくわかる建設作業振動防止の手引き、環境省 HP より



※1 東京都が公表している資料を引用
※2 振動レベルは数地境界付近での実測値
※3 平成15年度に実施した振動苦情に関する全国自治体アンケート結果

5. 1 1 シールド施工時の土砂噴発等による影響について

シールド機スクリーコンベヤからの土砂噴発、テールからの土砂噴出、施工時から現時点におけるセグメントの損傷や変状はなく、陥没・空洞の要因ではない。

＜参考＞トンネル掘進状況について

トンネル坑内の状況(11月4日9時頃撮影)

掘進を行った区間のトンネル坑内にセグメントのひび割れ・漏水などは発生していないことを確認した。



写真1 坑内状況写真(マシン上部)



写真2 坑内状況写真(マシン下部)



写真3 坑内状況写真(空洞発見箇所付近右側)



写真4 坑内状況写真(空洞発見箇所付近左側)



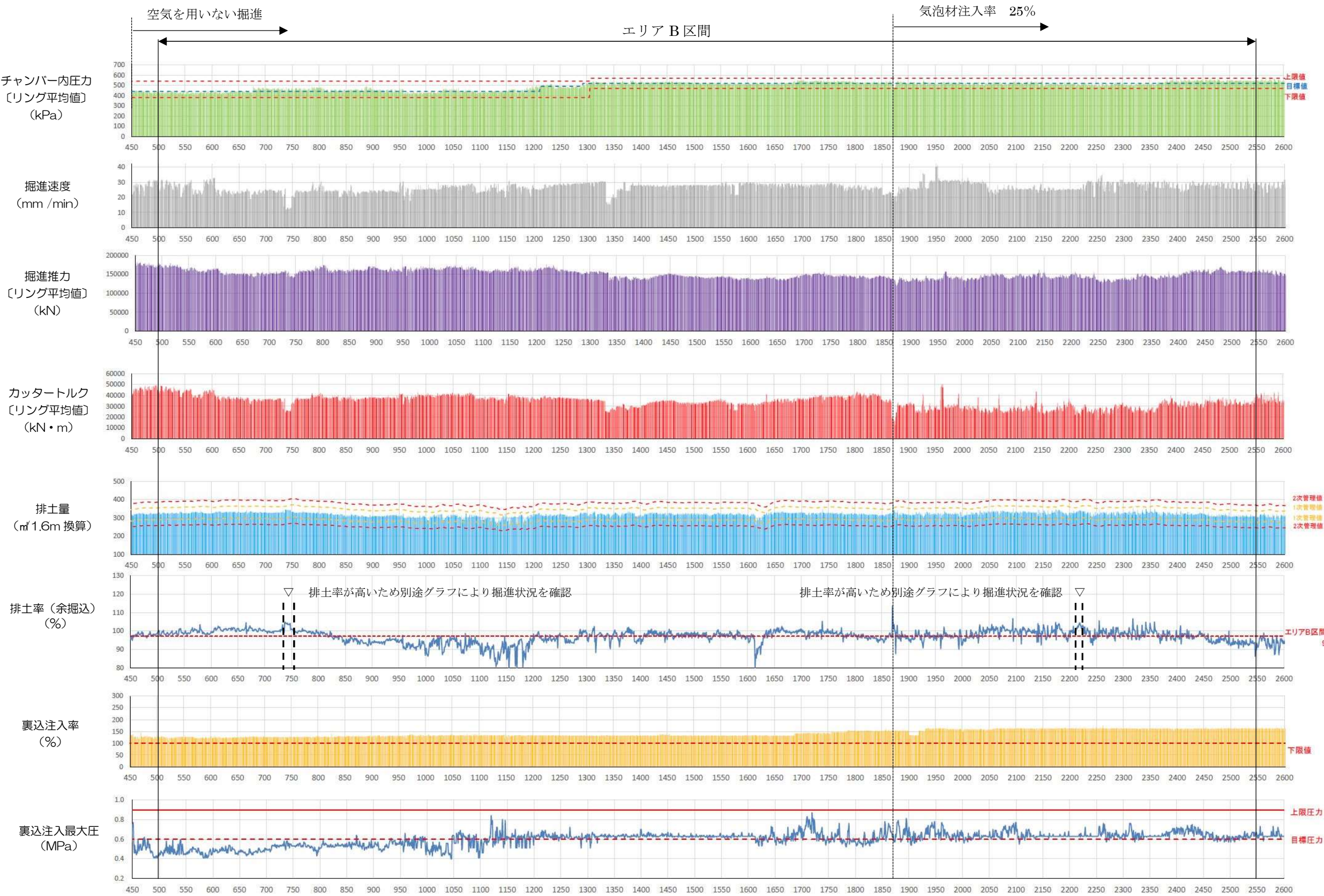
写真5 坑内状況写真(空洞発見箇所付近セグメント状態)

5. 1 2 シールド掘進データ（エリア B の確認）（リング代表値）

エリア B では、北多摩層と東久留米層の掘進を行っている。北多摩層では平成 30 年 8 月（265 リング）から地上への漏気発生を抑制するために空気を使用しない掘進方法を行っている。東久留米層において気泡材を使用した区間では注入率は 25% であり標準的な使用量であることを確認した。

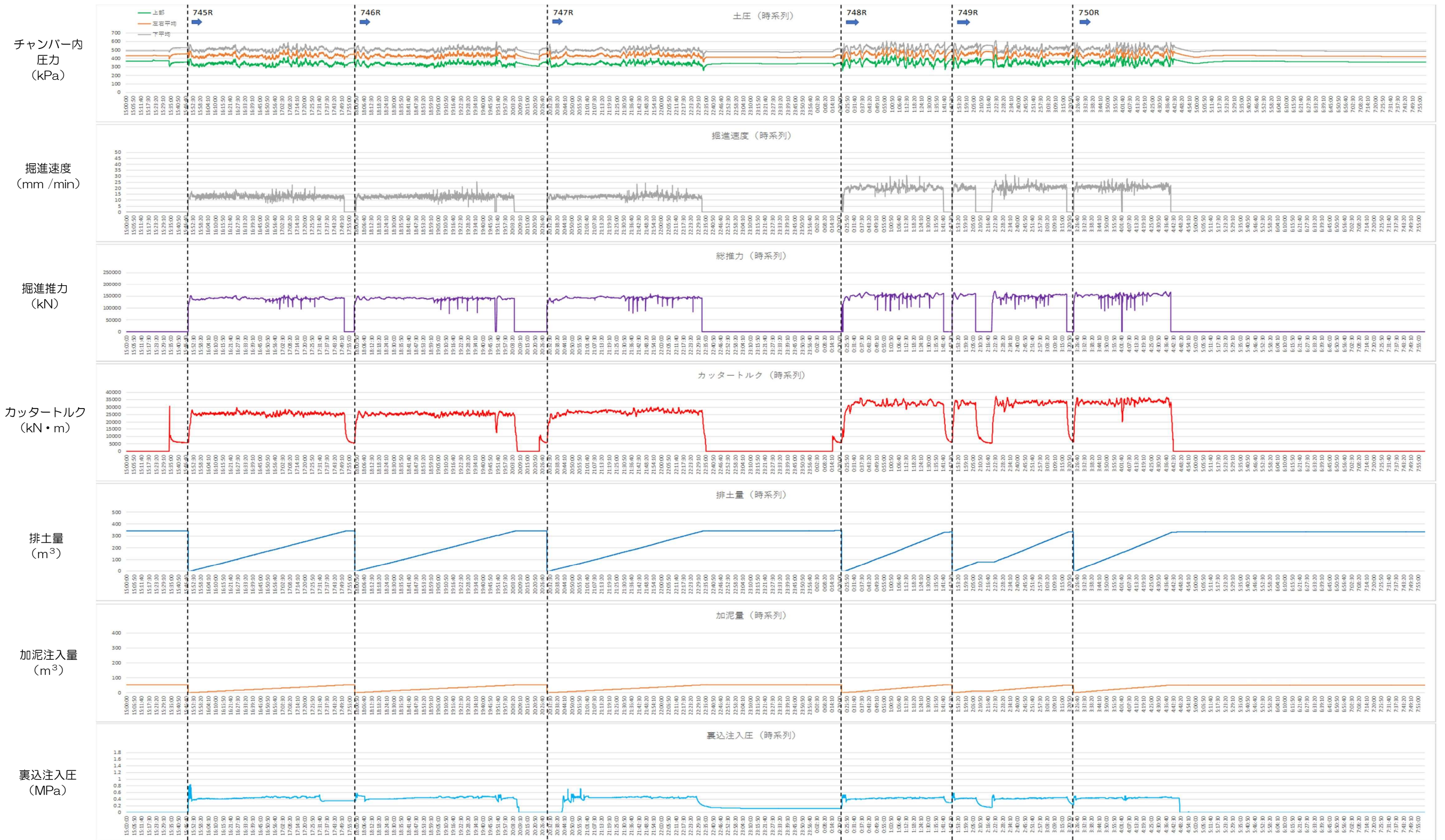
エリア B の施工データをエリア A の施工データと比較すると、掘進推力は概ね 150,000kN 以下、カッタートルクは概ね 40,000kN・m 以下と掘進時の負荷が小さい。また、排土量においてもバラつきが小さく、安定した土量となっている。その中でも排土量がやや多く計測されている 7 4 5 R 付近と 2 2 1 5 R 付近において詳細データの確認を行った。

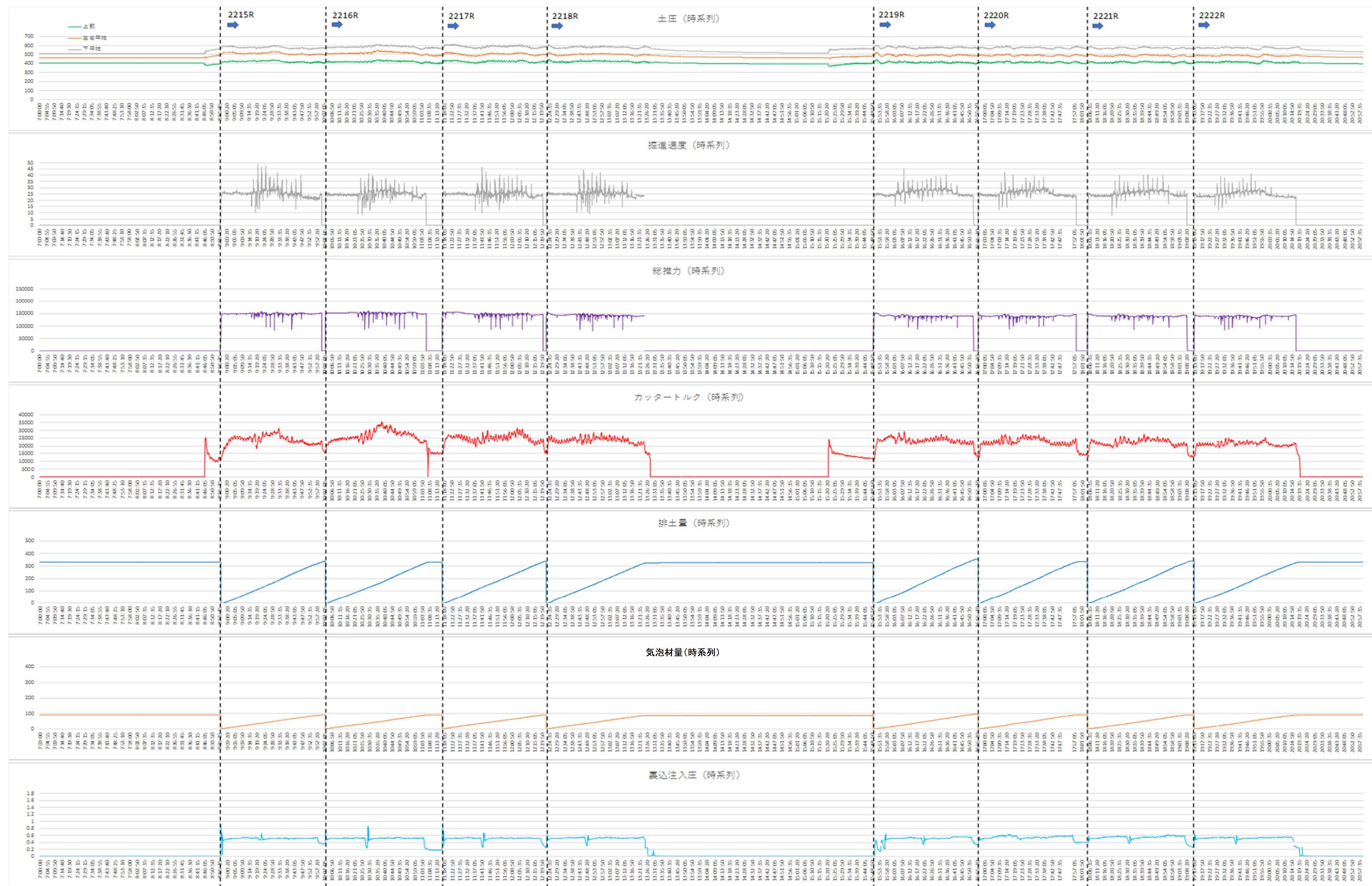
1 1 0 0 R ～ 1 2 0 0 R 付近、及び 1 6 1 0 R 付近の排土率が低く計測されているが、土層内の一部に介在砂層等の存在により地山単位体積重量が小さい箇所であったと考えられる。排土量は減少側で管理値以内であり掘進時のマシン負荷の増大にもなっていない。なお、エリア B において、カッター回転が不能となる事象は発生していない。



エリアBにおいて、排土率が比較的高い2019年3月2日の掘進データ【745～750R】、2020年6月1日の掘進データ【2215～2222R】を以下に示す。両日とも施工データに大きな変動はなく、カッター回転不能事象が発生していないため、問題なく掘進ができていると判断できる。

2019年3月2日掘進データ【745～750R】

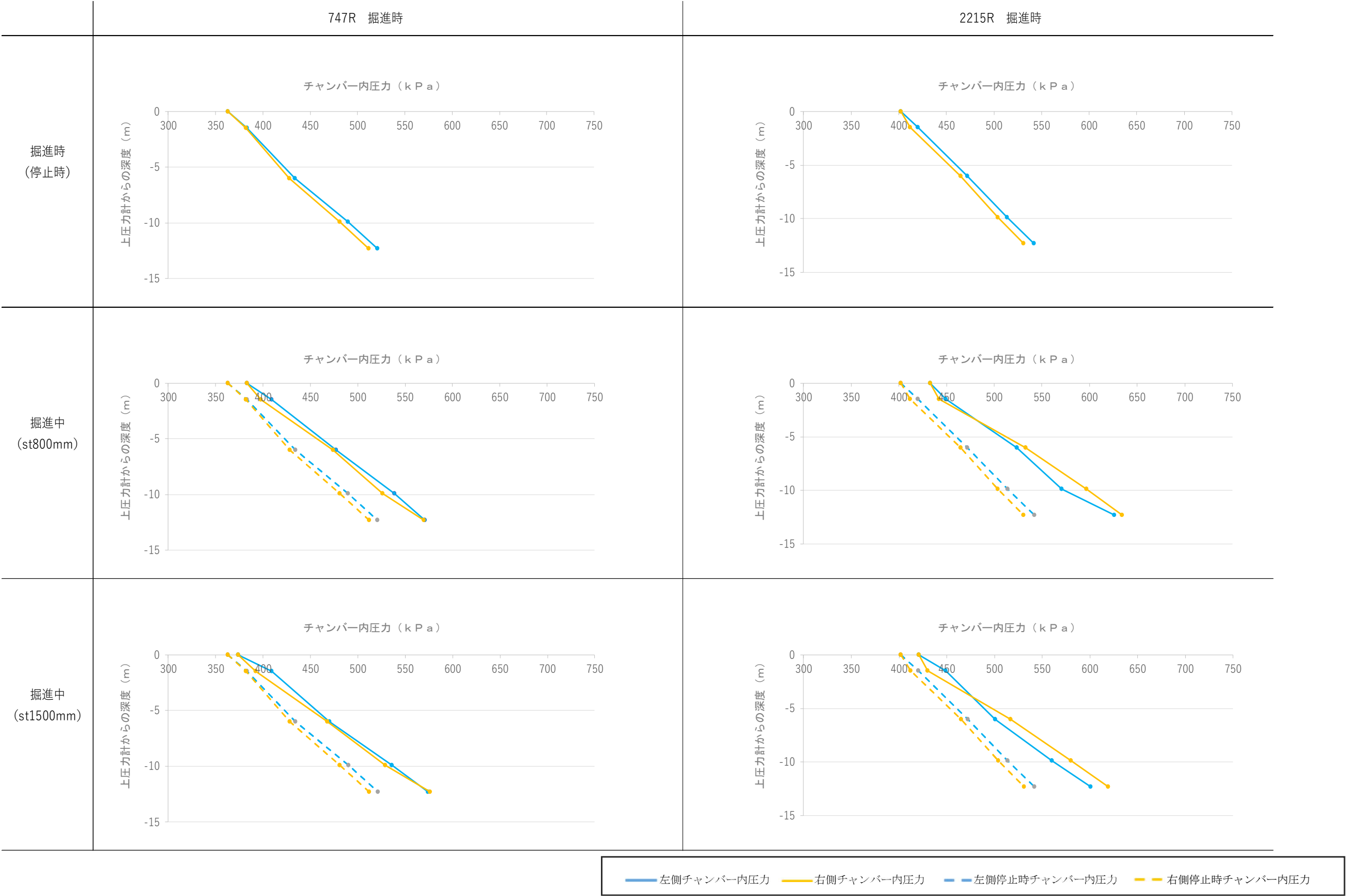


チャンバー内
圧力
(kPa)掘進速度
(mm /min)掘進推力
(kN)カッタートルク
(kN・m)排土量
(m³)気泡材注入量
(m³)裏込注入圧
(MPa)

チャンバー内圧力分布について（エリア B）

7 4 7 R（2019 年 3 月 2 日施工）と 2 2 1 5 R（2020 年 6 月 1 日施工）の掘進停止時と掘進中のチャンバー内圧力分布を示す。両日とも掘進停止時、掘進中も一様なチャンバー内圧力勾配を示し、塑性流動性は確保できていると判断できる。

エリア Bにおいて、施工データに特異な点もなく、カッター回転が不能となる事象は発生していないことから掘削土量は適正に評価できていると考えられる。



5. 1 3 施工データのまとめ

（エリアA）

- ・時系列データの分析からは取り込み過多は確認されておらず、さらに詳細に別の要因の分析を行った。
- ・陥没・空洞箇所周辺では、夜間休止時間にチャンバー内の土砂が分離し、沈降・締め固めることで掘進再開時にカッターが回転不能となる事象（閉塞）が生じていたことを確認した。
- ・事後的に行った地盤を再現した配合試験では、試験直後は塑性流動性・止水性が確保されていたものの、時間経過により土砂と気泡材が分離することを確認した。
- ・陥没・空洞箇所直下付近では、特殊な地盤条件により施工部の振動が地上部に届きやすく、トンネル上部の住居から振動に関する問合せが増加したため、施工時間を段階的に短縮することにより夜間休止時間を延長したところ、閉塞が生じる頻度が増加したことを確認した。
- ・掘進再開時に閉塞を解除するため、チャンバー内の圧力を保持しながら、沈降して締め固まった砂礫を排土しながら気泡材を注入するという特別な作業を行った。この過程で局所的にチャンバー内の圧力が低下したことが確認され、切羽部の緩みが生じ、土砂の取込みを発生させ、この土砂の取り込みにより緩んだ地盤の間に、気泡材が多く混入したと推定される。
- ・チャンバー内の土圧勾配から推定されるチャンバー内掘削土の単位体積重量から掘進中の塑性流動性を評価したところ、2640R 付近以降で塑性流動性の低下が発生していると推定される。このことから、閉塞解除作業が行われていた箇所付近から、気泡材が全量回収されず掘削土量を過少評価していたと推定される。
- ・事後的に行った実験により、土砂取り込み過多により、トンネル直上に煙突状の緩み領域が生じうることを確認した。

（エリアB）

- ・掘進再開時にカッターが回転不能となる事象（閉塞）は生じていないことを確認した。
- ・北多摩層では、平成 30 年 8 月（265 リング）から地上への漏気発生を抑制するために空気を使用しない掘進を行っていたことを確認。なお、東久留米層において気泡材を使用した区間では注入率は 25% であり標準的な使用量であることを確認した。
- ・エリア B の掘進において、施工データに特異な点はなく、塑性流動性も確保され、掘削土量が適正に評価されていることを確認した。

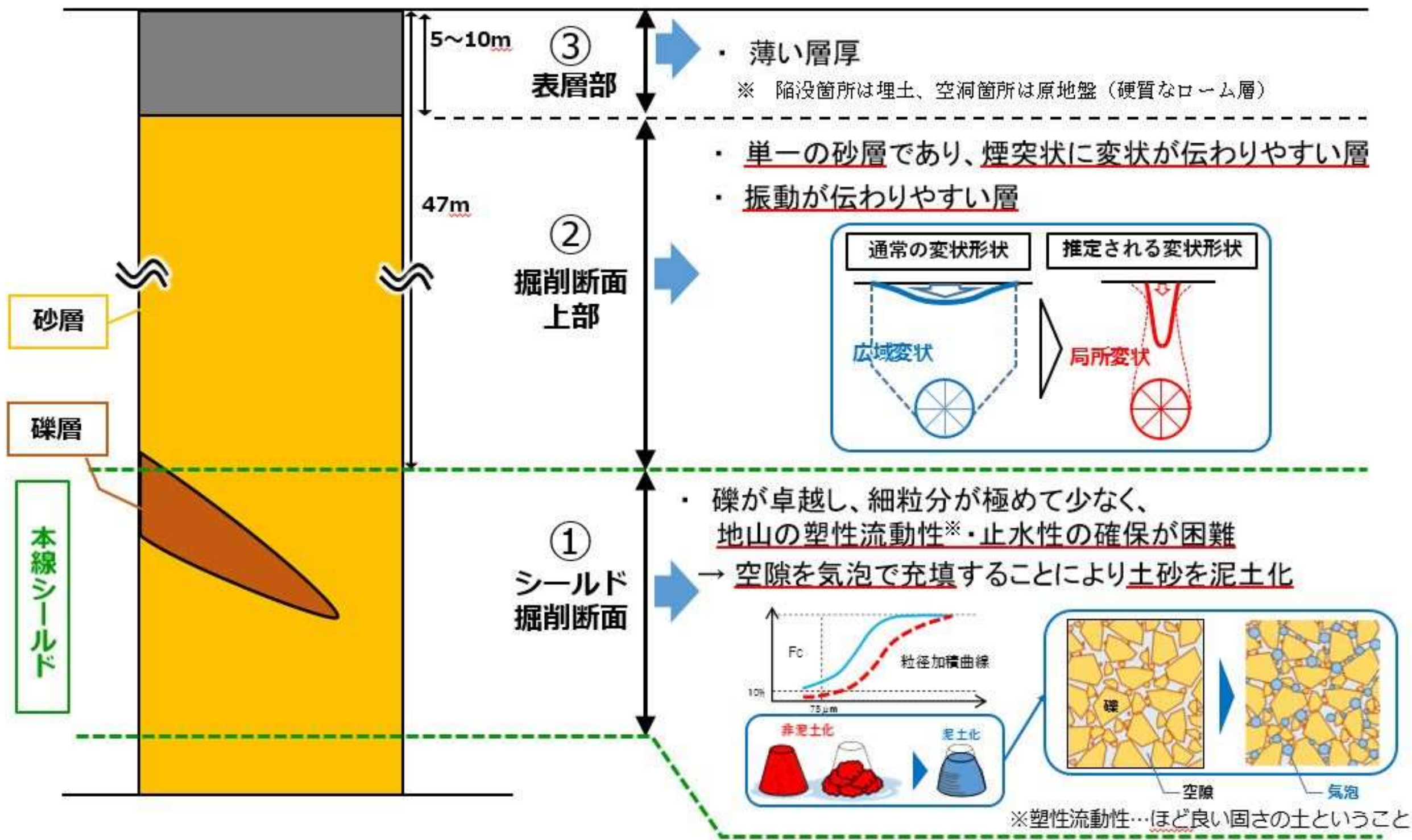
6. 陥没・空洞の推定メカニズム

6.1 陥没・空洞事象に関して議論すべき要因の分析

① 今回発生した陥没・空洞箇所周辺の地盤の特性

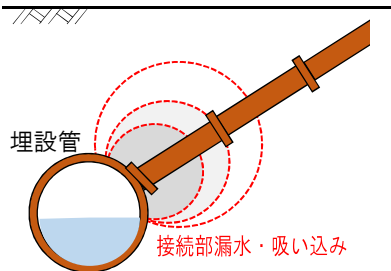
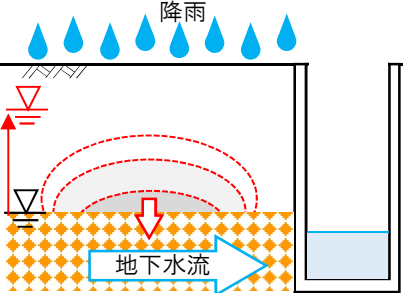
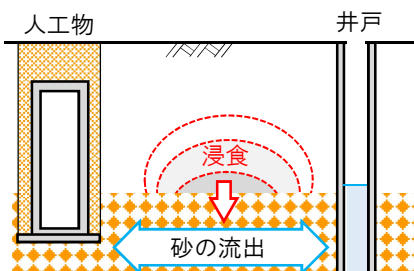
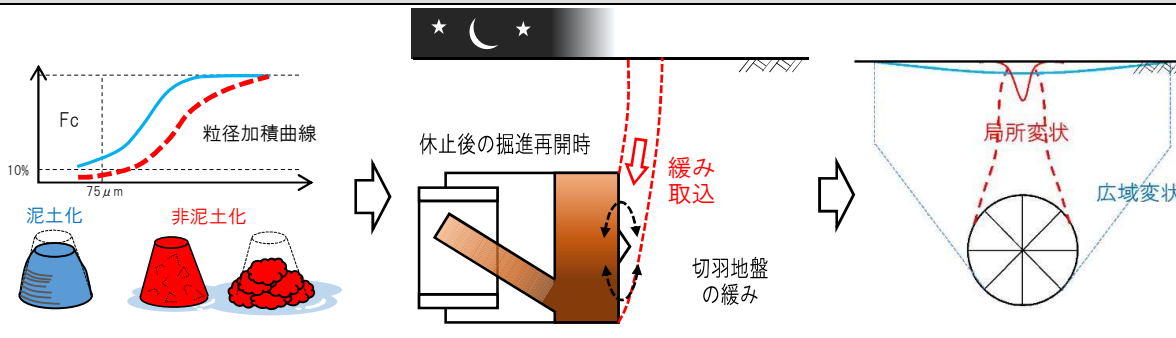
過年度に実施している地質調査結果と今回の調査より、陥没・空洞箇所周辺は次の全てに該当する、東京外環全線の中で特殊な地盤条件であり、掘削断面上部の単一の砂層は、煙突状に変状が伝わりやすく、振動が伝わりやすい層であることを確認した。

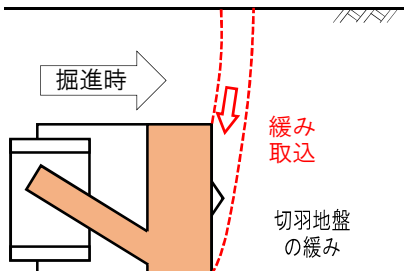
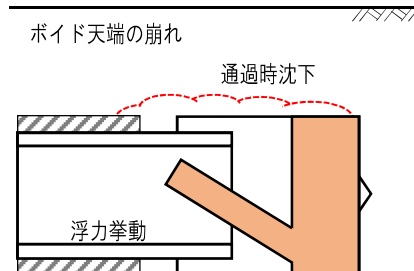
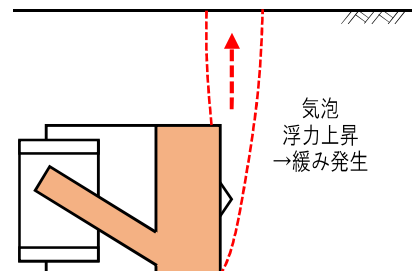
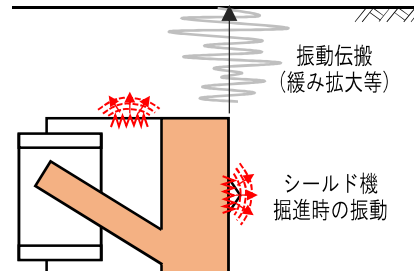
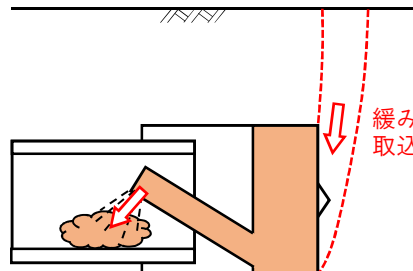
- ・掘削断面は、細粒分が少なく、均等係数が小さいため、自立性が乏しく、礫が卓越して介在することから、シールドトンネル施工における掘削土の塑性流動性の確保に留意すべき地盤であること。
- ・掘削断面上部は、単一の砂層である流動化しやすい層が地表面近くまで連続している地盤であること。
- ・表層部は他の区間と比較して薄い地盤であること。



② 陥没・空洞事象に関して議論すべき要因の分析

今回発生した陥没・空洞事象に関し、想定されるメカニズムを網羅的に検討する。

概要	Ⅰ．掘削前の表層地盤の状況			Ⅱ．シールド施工の影響
	想定されるメカニズム①	想定されるメカニズム②	想定されるメカニズム③	想定されるメカニズム④
	 <p>埋設管 接続部漏水・吸い込み</p> <p>地下埋設物からの漏出・吸い込み</p> <ul style="list-style-type: none">・下水道接続部等の漏水・下水道接続部等の吸い込み	 <p>降雨 地下水流</p> <p>地下水流、地下水変動、大雨による浸食</p> <ul style="list-style-type: none">・自然浅層地下水による浸食	 <p>人工物 井戸 浸食 砂の流出</p> <p>人工物の存在による影響や人工物の埋戻し部の浸食</p> <ul style="list-style-type: none">・井戸、排水桝、地下放水路等の人工物による影響・過去に存在した構造物の埋戻し砂の流出	 <p>休止後の掘進再開時 緩み取込 切羽地盤の緩み 局所変状 広域変状</p> <p>閉塞及び閉塞解除作業の影響</p> <ul style="list-style-type: none">・細粒分が極めて少なく、かつ礫が卓越する特殊な地盤における掘削土の塑性流動性・止水性が低下し、夜間休止時間において土砂分離・沈降が生じるなどにより、掘進再開時にカッターが回転不能となる事象（閉塞）が発生・閉塞を解除するため、沈降した砂礫を排土しながら気泡材を注入する等の特別な作業を行ったことにより切羽の緩みを生じさせ、単一の砂層が掘削断面上部に厚く堆積する特殊な地盤において煙突状にゆるみ領域が上方に拡大

概要	Ⅱ．シールド施工の影響				
	想定されるメカニズム⑤	想定されるメカニズム⑥	想定されるメカニズム⑦	想定されるメカニズム⑧	想定されるメカニズム⑨
	 <p>掘進時 緩み取込 切羽地盤の緩み</p> <p>掘進時の影響</p> <ul style="list-style-type: none">・チャンバー内の塑性流動性の不足による天端や切羽土圧の不安定化・掘削土砂の過大な取込み	 <p>ボイド天端の崩れ 通過時沈下 浮力挙動</p> <p>掘進後のボイドによる影響</p> <ul style="list-style-type: none">・ボイド天端の崩れ	 <p>気泡 浮力上昇 →緩み発生</p> <p>空気のかげりによる影響</p> <ul style="list-style-type: none">・気泡に用いる空気の顕著な浮力上昇・空気の上昇による緩み拡大	 <p>振動伝搬（緩み拡大等） シールド機掘進時の振動</p> <p>トンネル掘削の振動による締固め・局所的な液状化による影響</p> <ul style="list-style-type: none">・カッター付近の振動による締固め・局所的液状化	 <p>土砂噴発 緩み取込</p> <p>シールド施工時の土砂噴発等による影響</p> <ul style="list-style-type: none">・シールド機テール・スクリーコンベヤからの出水による土砂噴発・セグメント継手面からの出水・セグメントの損傷

6.2 陥没・空洞形成における想定される要因のまとめ

＜各要因に関する考察＞

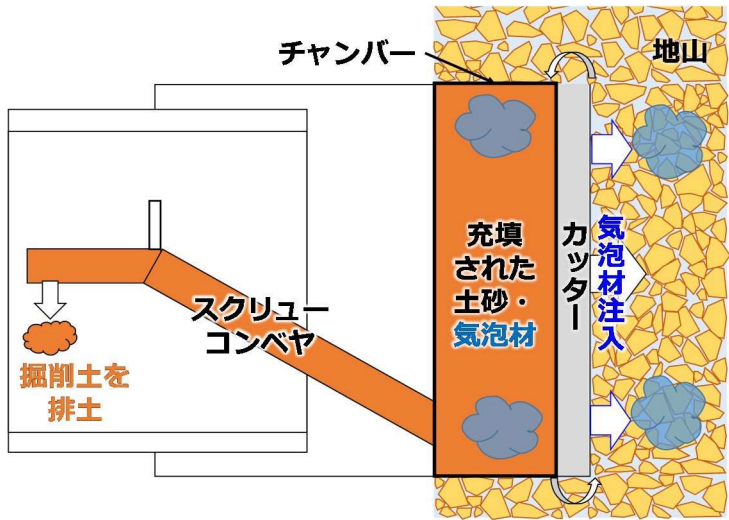
	メカニズム	調査・検討で確認された事項	考察
Ⅰ 掘削前の 表層地盤の 状況	①地下埋設物からの漏出・吸い込み	<ul style="list-style-type: none">・ 陥没箇所において下水管の損傷を確認。・ 陥没・空洞箇所における地下水から下水成分は検出されなかった。	地下水の成分調査により下水成分が確認されなかったことから、陥没・空洞形成の要因である可能性は低い。
	②地下水流、地下水変動、大雨による浸食	<ul style="list-style-type: none">・ 陥没、空洞箇所の断面において、水で洗われた部分を確認。・ 令和２年台風１４号（シールドが空洞①箇所を通過した後に接近）の影響により、近傍観測井戸の地下水位が約５０ｃｍ上昇していることから、空洞形成後に短期間で陥没・空洞箇所の表面が水で洗われた可能性があることを確認。・ 当該地域は入間川の西に浅く円弧状に入り込んだ谷地形であることを確認。・ 表層地下水の降雨時における流速の上昇や流向の変化は、入間川に武蔵野礫層の土砂を流出させるものではないことを確認。・ 空洞①箇所において採取した土砂と入間川護岸に堆積している土砂の成分が異なっていることを確認。	当該地域は緩やかな集水地形となっているが、空洞・陥没箇所の表層土砂が入間川に向かって流出している可能性は確認できておらず、陥没・空洞形成の要因である可能性は低い。
	③人工物の存在による影響や人工物の埋め戻し部の浸食	<ul style="list-style-type: none">・ 空洞①箇所において、用途不明のヒューム管を確認。	空洞①箇所内部に人工物の存在が確認されたものの、あらかじめ空洞形成されていたこととの因果関係は、現時点では特定できなかった。
Ⅱ シールド 施工の 影響	④閉塞及び閉塞解除作業の影響	<ul style="list-style-type: none">・ 陥没・空洞箇所の下部がトンネル方向に局所的に引き込まれている現象が調査によって確認されており、特殊な地盤条件下においてカッターが回転不能になる事象（閉塞）が生じていた。当該特殊な地盤条件では塑性流動性・止水性の確保が難しく、かつ、時間経過により土砂と気泡材が分離する傾向にあることを確認。・ 陥没・空洞箇所周辺では、特殊な地盤条件により施工時の振動が地上部に届きやすく、トンネル上部の住居から振動に関する問合せが増加したため、施工時間を段階的に短縮することにより夜間休止時間を延長したところ、閉塞が生じる頻度が増加。・ 掘進再開時に閉塞を解除するため、チャンバー内の圧力を保持しながら、沈降して締め固まった砂礫を排土しながら起泡溶液を注入するという特別な作業を行った。この過程で局所的にチャンバー内の圧力が低下したことが確認され、切羽部の緩みが生じ、土砂の取込みを発生させたと推定される。・ 陥没・空洞箇所直下付近では、閉塞解除作業が行われており、事後的に行った実験により、煙突状の緩み領域が生じたと推定される。	夜間休止時間にチャンバー内の土砂が分離・沈降し、締固まってしまうことで掘進再開時に閉塞が生じ、その解除のために、沈降した土砂を排土しながら起泡溶液を注入する等の特別な作業を行う過程で、土圧の不均衡が生じて地山から土砂がチャンバー内に流入し、結果として地山に緩みが発生したことにより、緩み領域が煙突状に上方に進展し、陥没・空洞形成の要因となったと推定される。 また、陥没・空洞箇所周辺の掘進時において、掘削土の塑性流動性を保つため、通常より多くの気泡材を注入していたが、閉塞解除作業により生じた地山の緩みに気泡材が浸透することにより、塑性流動性・止水性が低下し、閉塞解除作業により生じた地山の緩みに対する切羽土圧の不均衡が生じていたと推定される。また、一部の気泡材は回収できず、掘削した地山重量は過少に評価され、土砂の取り込みが想定より過剰に生じていたと推定されることから、緩み領域が煙突状に上方に進展し、陥没・空洞形成の要因となったと推定される。
	⑤掘進時の影響	<ul style="list-style-type: none">・ チャンバー内の土圧勾配から推定される気泡土単位体積重量より施工時のチャンバー内土砂性状を評価したところ、細粒分・細砂分が著しく少ない特殊な地盤では塑性流動性が低下しており、閉塞解除作業が行われていた箇所付近から、添加した気泡材が全量回収できていなかったと推定される。・ 陥没・空洞箇所周辺では、トンネル上部の上方まで砂層が緩んでいることを確認。	
	⑥掘進後のボイドによる影響	<ul style="list-style-type: none">・ 裏込め注入量や注入圧は管理値に適合していることを確認。・ 地山探査装置が突出できない事象が発生していたことを確認。	裏込め注入に係る施工データに異常値は確認されず、余堀幅はわずか（８ｃｍ程度）であること等から、陥没・空洞形成の要因である可能性は低い。
	⑦空気の塊の上昇による影響	<ul style="list-style-type: none">・ 空気の上昇により、掘削断面上部の緩みの進展が助長される可能性はあるが、上昇する空気の圧力は体積膨張とともに減圧するため、土粒子に与える影響は小さいと考えられる。	上昇する空気の圧力は体積膨張とともに減圧するため、土粒子に与える影響は小さいと考えられることから、陥没・空洞形成の要因である可能性は低い。
	⑧トンネル掘削の振動による締固め・局所的な液状化による影響	<ul style="list-style-type: none">・ トンネル施工に伴う振動は５５ｄＢ程度であり、振動エネルギーは地震動と比較して極めて小さいことを確認。・ 振動は、特殊な地盤条件により施工の振動が地上部に届きやすいことを確認。	トンネル施工に起因する振動エネルギーは地震動と比較して極めて小さく、液状化が発生したとは考えにくい。また、締固めへの影響は小さいものと考えられることから、陥没・空洞形成の要因である可能性は低い。
	⑨シールド施工時の土砂噴発等による影響	<ul style="list-style-type: none">・ セグメントの損傷等の変状、シールド機スクリーコンベヤからの土砂噴発やテールからの土砂噴出は生じていないことを確認。	土砂噴発やセグメントの損傷等はないことから、陥没・空洞形成の要因ではない。

<総括>

- 地下埋設物や地下水による影響により空洞があらかじめあった可能性は低い。
- 陥没・空洞箇所下部がトンネル方向に局所的に引き込まれている現象が調査によって確認されており、特殊な地盤条件下においてカッターが回転不能になる事象（閉塞）を解除するために行った特別な作業に起因するシールドトンネルの施工が陥没・空洞事象の要因と推定される。また、陥没・空洞形成の要因となったメカニズムについては次のとおり推定される。

(1) 昼間（掘進中）

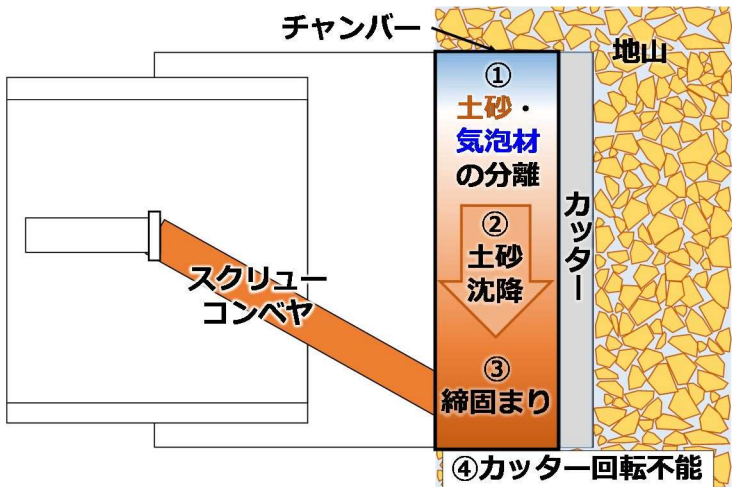
- チャンバー内土圧と地山からの圧力の均衡が取れている状態
- 細粒分・細砂分の減少、礫の介在してくる中で、気泡材の種別変更及び添加量の調整、掘進速度の調整を行いながら掘進を実施



(2) 夜間
休止

(3) 翌朝（掘進休止後）

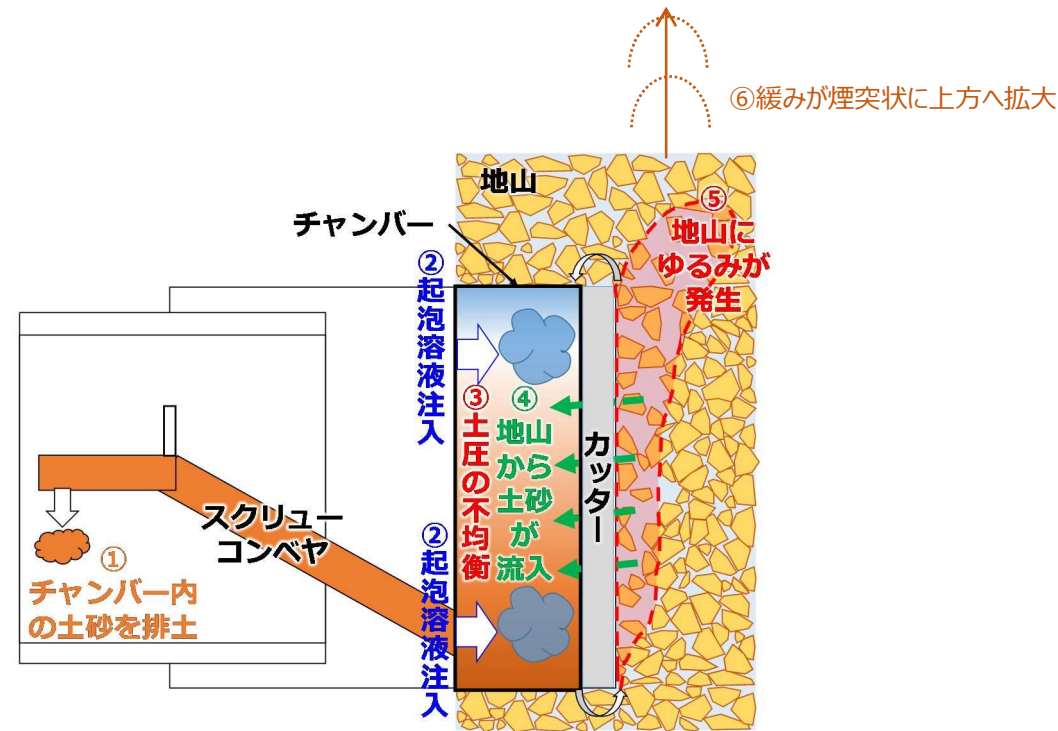
- チャンバー内の①土砂・気泡材が分離、②土砂沈降及び③締固まりが発生
⇒ ④カッター回転不能（閉塞）が発生



※振動に関する問合せを受け、
作業休止時間を拡大

(4) 閉塞解除作業

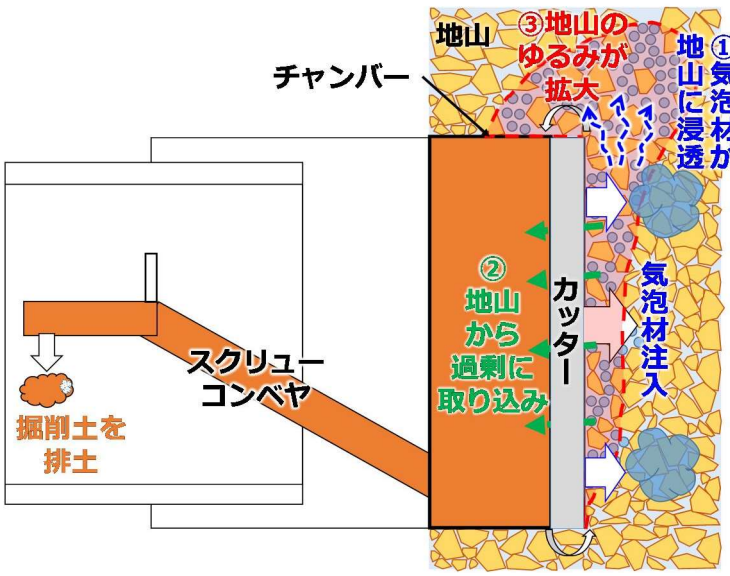
- カッターを再回転するため、①チャンバー内の締め固まった土砂を一部排出
- 排出によるチャンバー内圧力の低下を防止するため、②直ちに排出土砂分の起泡溶液と置き換える必要がある
⇒ この際、③土圧の均衡がとれず、④地山から土砂がチャンバー内に流入することで、結果として、⑤地山に緩みが発生し、⑥煙突状に上方へ拡大



掘進
再開

(5) 掘進再開後

- 特殊な地盤下で塑性流動性を保つため、通常より多くの気泡材を地山に注入し、掘進を再開
- 掘進を再開後、①気泡材が(4)閉塞解除作業で緩んだ地山に過度に浸透
⇒ 塑性流動性・止水性が低下し、閉塞解除作業で緩んだ地山に対する切羽土圧の不均衡
⇒ 一部の気泡材は回収できず、掘削した地山重量を過少に評価し、②土砂の取り込みが想定より過剰に発生
⇒ 繰り返し行われた閉塞解除作業により生じた地山の緩みを掘進時にさらに助長し、③地山の緩みが拡大し、地表面付近に硬質のロームをアーチとする空洞が地中に形成
⇒ 硬質ロームが欠如している箇所で陥没に至った



7. 地盤の緩みの状況および補修について

7. 1 地盤の緩みの状況について

空洞①、②、③箇所はボーリング調査において地表面に硬質なローム層（凝灰質粘土層）の存在が確認されており、空洞の状況・大きさから、直ちに地表面に変状を及ぼすものではなく、緊急的な対応は必要ないが、空洞の早期充填を実施し、恒久的な対応として流動化処理土等を用いた充填を完了している。また、地盤が砂層の場合、変形や緩みの進展は即時的であり、地表面計測において変位の進行が確認されていないことから、現時点では安定が損なわれているものではないと考えられる。

一方で、長期的な地盤の安定確保のため、今回の事象において生じた地盤の緩みに対しての補修を実施していく必要があり、確認された調査結果、施工データの結果および陥没・空洞の推定メカニズムに基づき、地盤の緩みが生じていると推定される範囲は次のいずれかに該当する。

（ア）カッター回転が不能となる閉塞が生じ、その解除のために特別な作業を実施した範囲

（イ）ボーリング調査によりN値の低下が確認された範囲

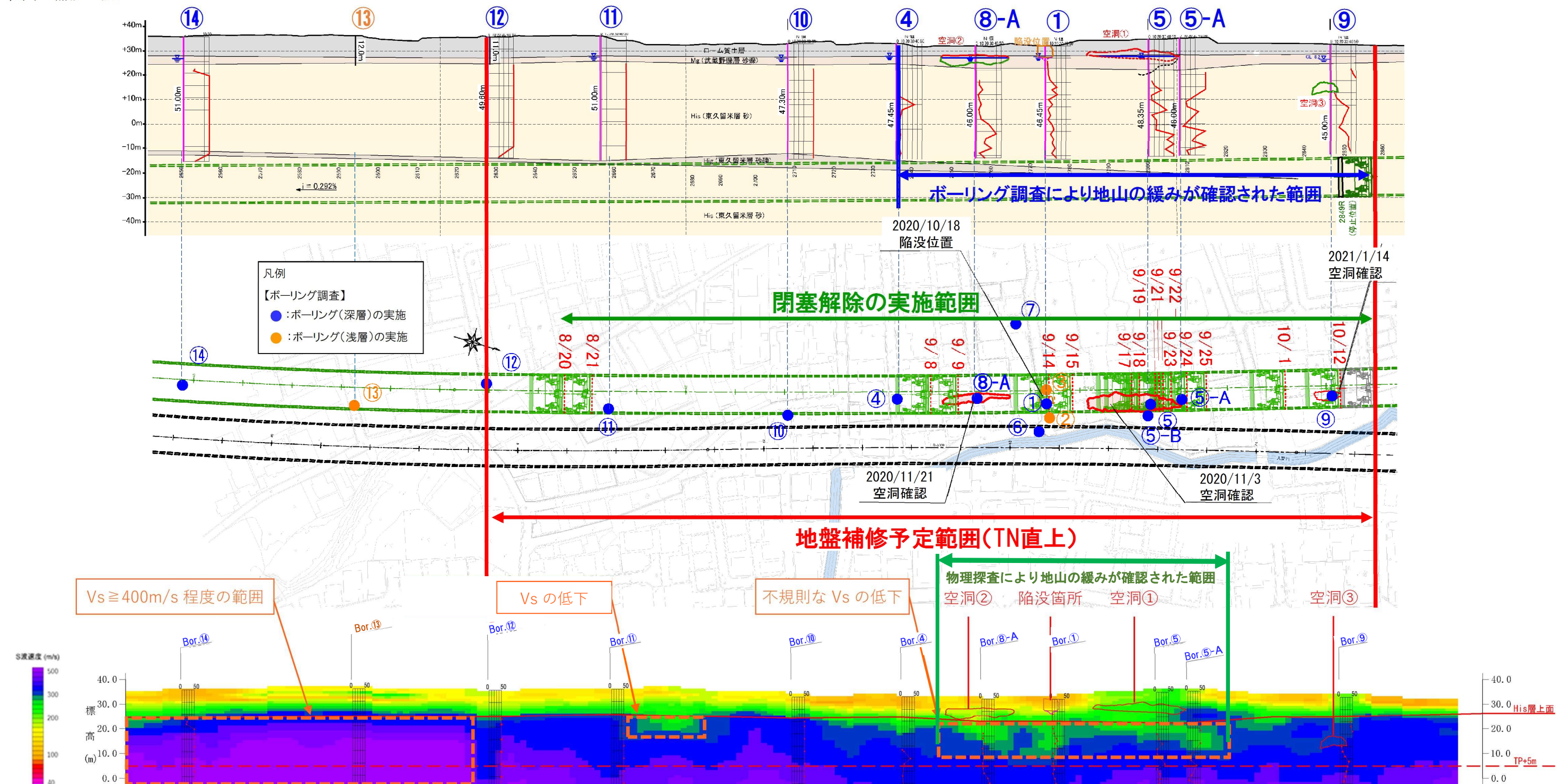
（ウ）物理探査により不規則な計測波速度の低下が確認された範囲

<エリアA（陥没箇所周辺と地質が類似している区間）>

トンネル縦断方向では、2639R～2840Rにおいて閉塞が生じるとともに解除のために特別な作業を実施しており、Bor. ④、⑧-A、①、⑤、⑤-A、⑨の間においてN値の低下及び不規則な計測波速度の低下が確認されている。一方で、Bor. ⑫より南側では、（ア）～（ウ）のいずれも確認されていない。従って、Bor.⑫より北側からシールドマシンまでの間が地盤の緩みが生じている範囲と推定される。

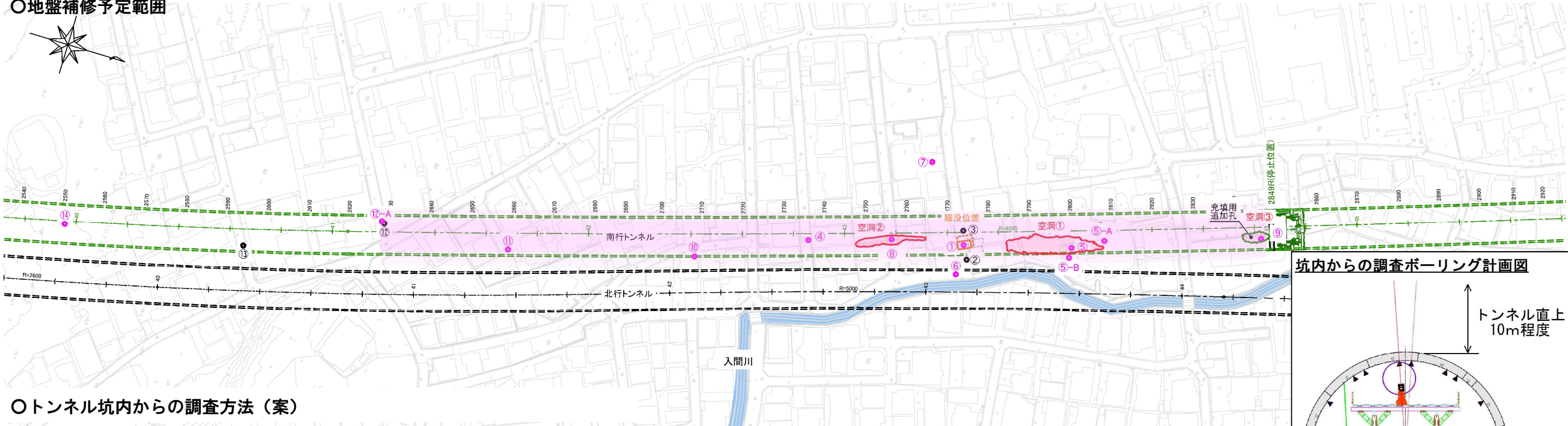
また、トンネル横断方向では、ボーリング調査や物理探査の結果及び推定メカニズムを踏まえ、南行トンネル直上が地盤の緩みが生じている範囲と推定される。

地盤の緩みが生じている可能性のある範囲については、地盤補修予定範囲として、事業者において引続き調査を実施し、補修等の措置が必要となる地盤を特定するとともに、これら地盤の緩みが生じていると推定される範囲の補修工法については、今後具体的に検討していく必要があるが、補修期間は概ね2年程度と想定している。

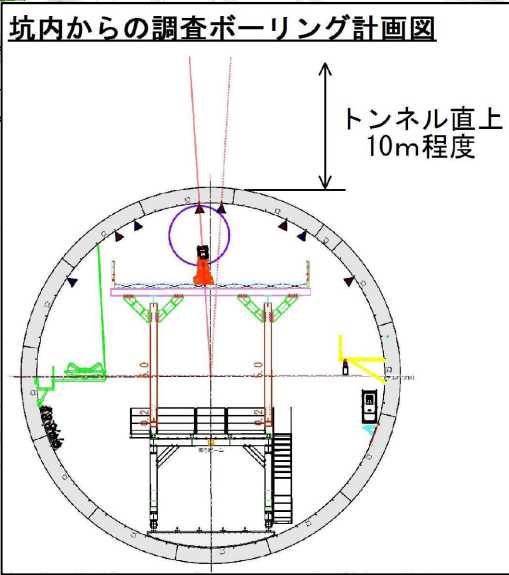
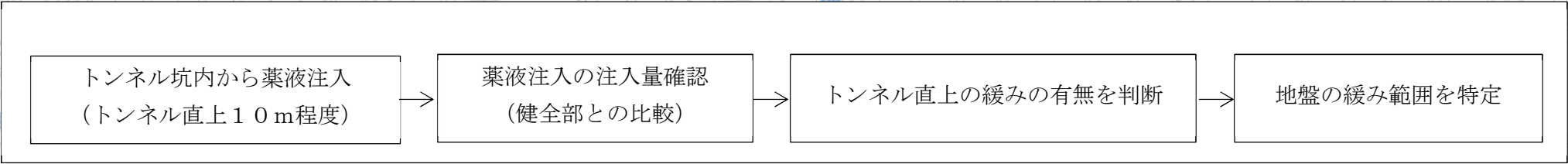


7. 2地盤の緩みの補修について

○地盤補修予定範囲



○トンネル坑内からの調査方法（案）



○地上からの地盤の補修工法

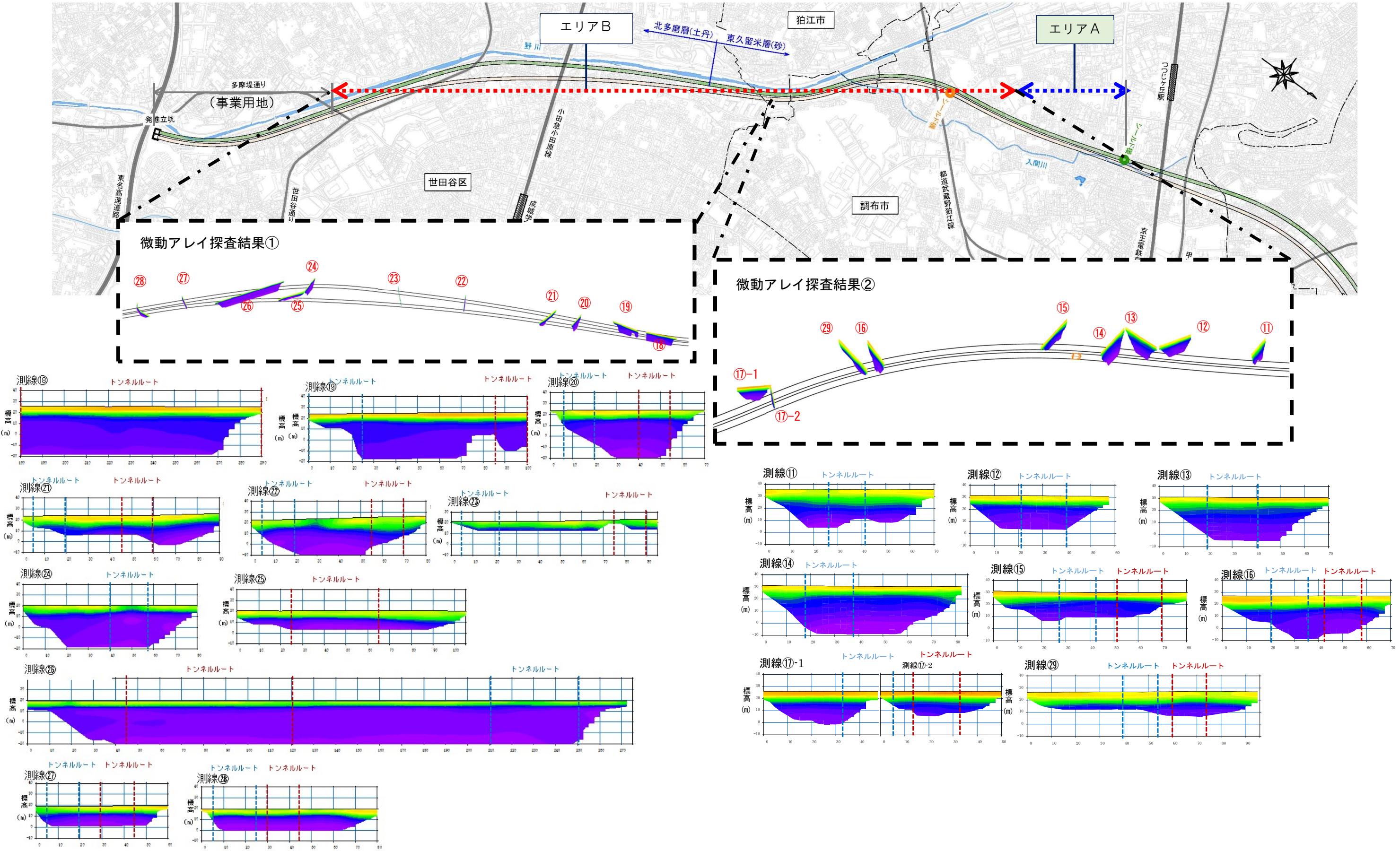
地上からの地盤の補修は、薬液注入工法、機械攪拌工法、高圧噴射攪拌工法などがあり、今後具体的に検討していく。

	薬液注入工法	機械攪拌工法	高圧噴射攪拌工法
施工概要	ボーリングマシンを用いて地盤に薬液を浸透注入して地盤強化を図る。	機械攪拌翼によって、固化材と地盤を混合して円柱状の固結体を造成する。	地盤内に空気と固化材を高圧で噴射させ、地盤を強制的に切削しながら円柱状の固結体を造成する。
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none">・比較的狭い場所での施工が可能である。・地盤の強度が弱い箇所に薬液が浸透して改良する工法である。	<ul style="list-style-type: none">・大型重機による施工となる。・地盤に改良体を造成する工法である。	<ul style="list-style-type: none">・大型の施工設備が必要となる。・地盤に改良体を造成する工法である。

＜エリアB（その他の区間）＞

- ・物理探査結果から掘切断面上部での地盤の緩みや空洞は確認されておらず、また、閉塞及びその解除のための特別な作業も実施されていないことから、エリアBでは、シールドトンネルの施工が要因となる空洞の形成や補修等の措置を必要とする地盤の緩みは生じていないと推定される。
- ・なお、詳細な調査等を必要とする変動が確認された場合は、速やかな措置を講じることができるよう、事業者においてG N S S等による常時監視を継続することとしている。

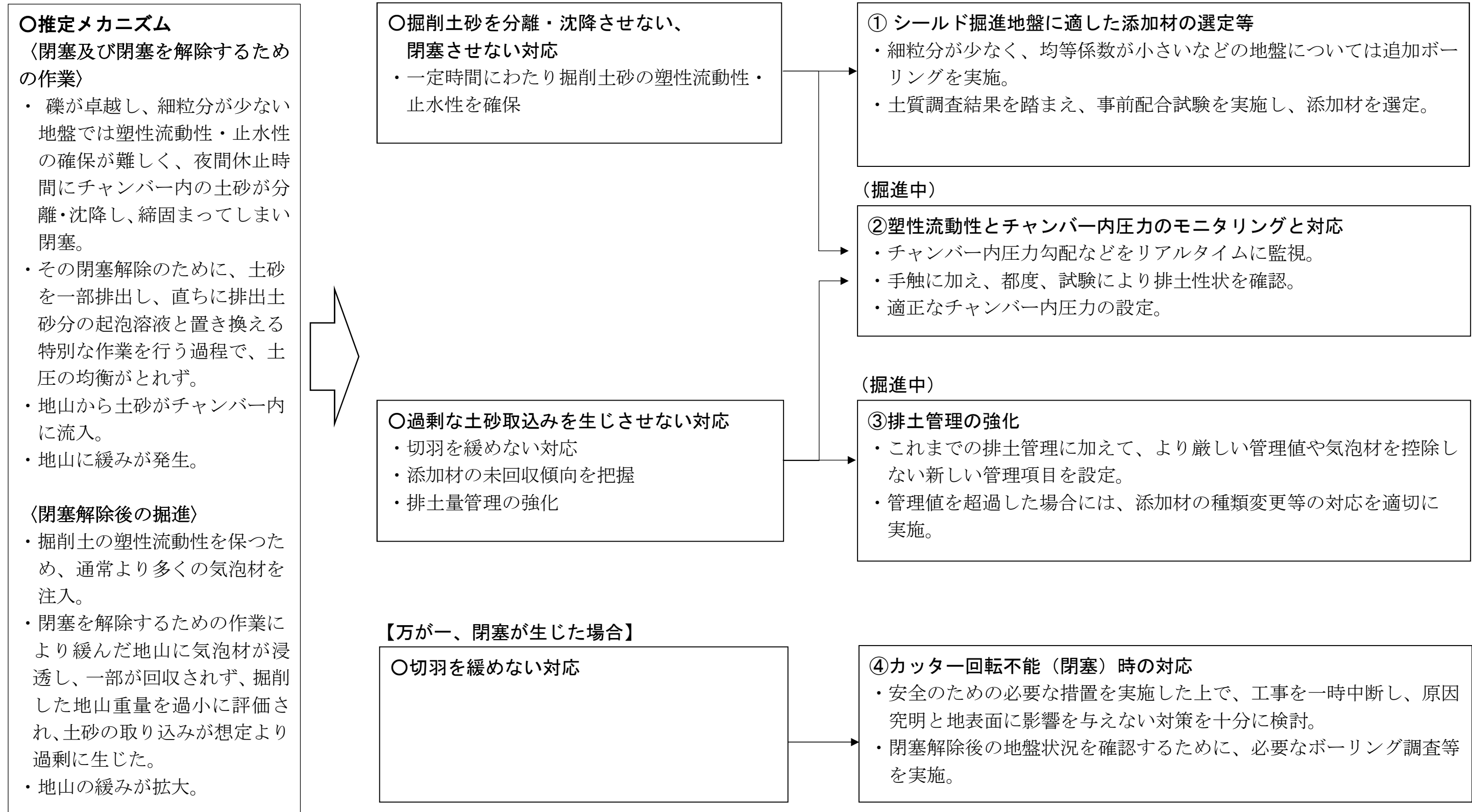
平面図



8. 再発防止対策について

陥没・空洞の推定メカニズムを踏まえた、東京外環事業における今後のシールドトンネル施工を安全に行うための再発防止対策は以下のとおりである。空洞・陥没が発生したことでシールドトンネル工事に起因した陥没等に対する懸念や、振動・騒音等に対する不安の声等が多く寄せられていることを受け、地盤変状の監視強化や振動計測箇所の追加、振動・騒音対策の強化など、「地域の安全・安心を高める取り組み」を加え、再発防止対策として実施していくこととする。

1. 陥没・空洞の推定メカニズムを踏まえたトンネル再発防止対策

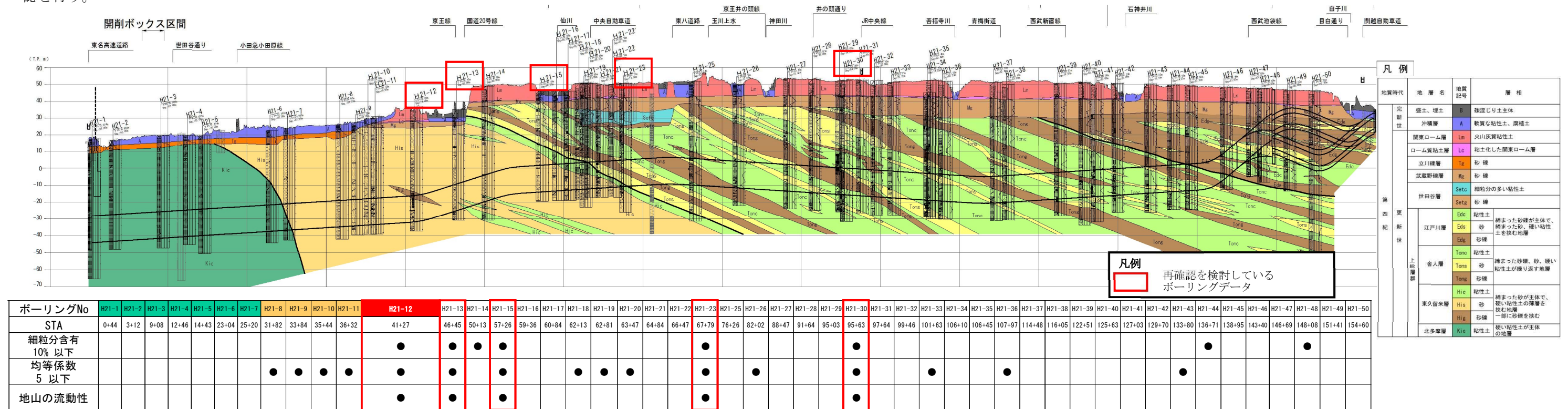


①-1 シールド掘進地盤の再確認

陥没・空洞箇所周辺は、①掘削断面は細粒分が少なく、均等係数が小さいため、自立性が乏しく、礫が卓越して介在、②掘削断面上部は単一の砂層、③表層部は他の区間と比較して薄い地盤、の全てに該当する、東京外環全線の中で特殊な地盤条件である。

トンネル標準示方書・同解説〔山岳工法編〕2016によると、地山流動化の指標は細粒分10%以下、均等係数5以下であり、細粒分が少なく均等係数が小さい砂質層などは自立性が乏しくなるとされており、陥没・空洞箇所周辺以外においても細粒分が少ない場合や礫を含む場合は、シールドトンネル施工における掘削土の塑性流動性・高い止水性の確保にも留意する必要がある。

今後の掘進区間において、掘削断面の細粒分含有率が10%以下でかついずれかの土層の均等係数が5以下の地盤は5箇所確認しており、安全をみてこれらの箇所などにおいて今後必要に応じ追加ボーリングを実施し、地盤の再確認を行う。



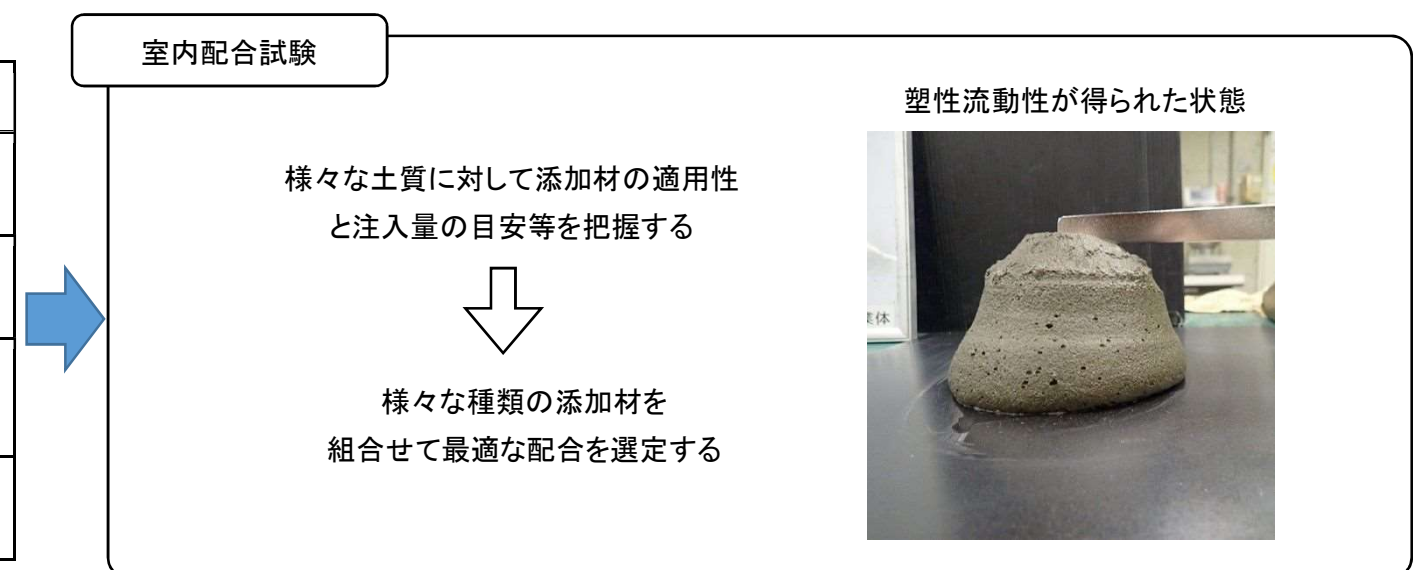
①-2 シールド掘削地盤に適した添加材の選定

追加ボーリングなどから得られる土質調査結果を踏まえて事前配合試験を行い、地盤に適した加泥配合を再確認する。

掘削土砂が塑性流動性・止水性を有した良好な泥土となるためには細粒分が必要となり、これを粘土・ベントナイト等を主材として補給するものが鉱物系添加材である。このため、細粒分（粘土・シルト）の割合が10%以下の地盤に対しては、ベントナイト溶液を含めた鉱物系添加材の使用についても十分検討する必要がある。

○ 添加材の種類

種類	特徴
界面活性剤系(気泡材)	気泡材を掘削土砂へ混合させることにより、塑性流動性・高い止水性を確保
鉱物系(ベントナイト等)	鉱物(微細粒子)を掘削土砂へ混合させることにより、塑性流動性・高い止水性を確保
高吸水性樹脂系	水を吸収してゲル状態となり、掘削土砂へ混合させることにより、塑性流動性・高い止水性を確保
水溶性高分子系	粘性のある水溶液と掘削土砂を混合させることにより、塑性流動性・高い止水性を確保



② 塑性流動性のモニタリングと対応

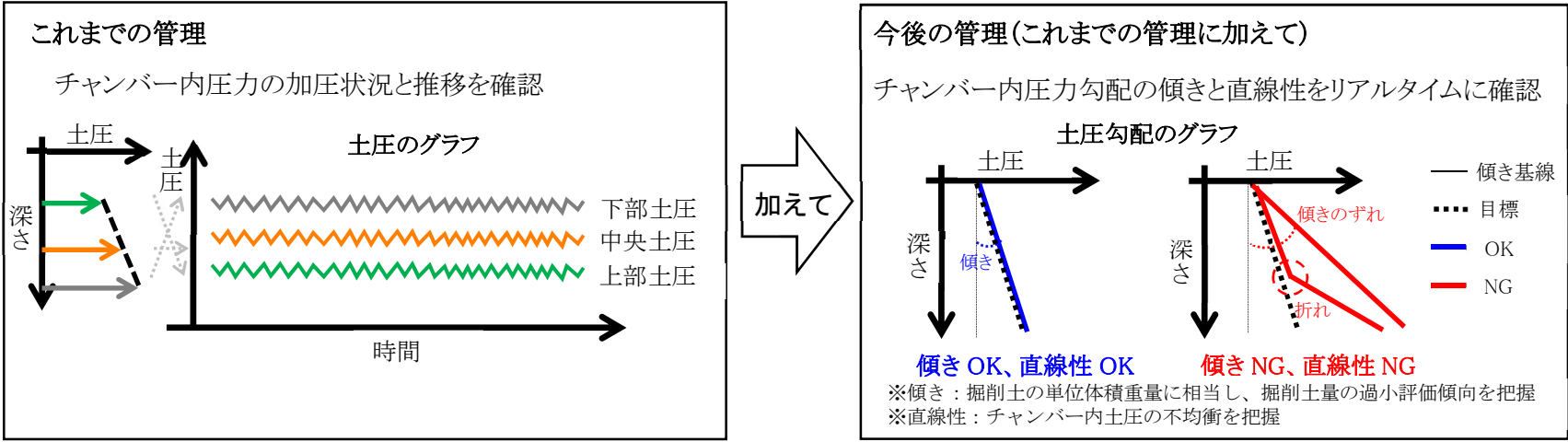
- ・これまでの塑性流動性の確認項目に加え、新たにチャンバー内の圧力勾配、ミニスランプ、粒度分布での確認を行うこととする。
- ・塑性流動性のモニタリングをしながら、添加材注入量や添加材の種類を適切に調整し、塑性流動性・止水性の確保を行う。なお、塑性流動性の確保が困難となる兆候が確認された場合は原因の解明と対策を検討する。

表 8-1 掘進データからの塑性流動性確認方法

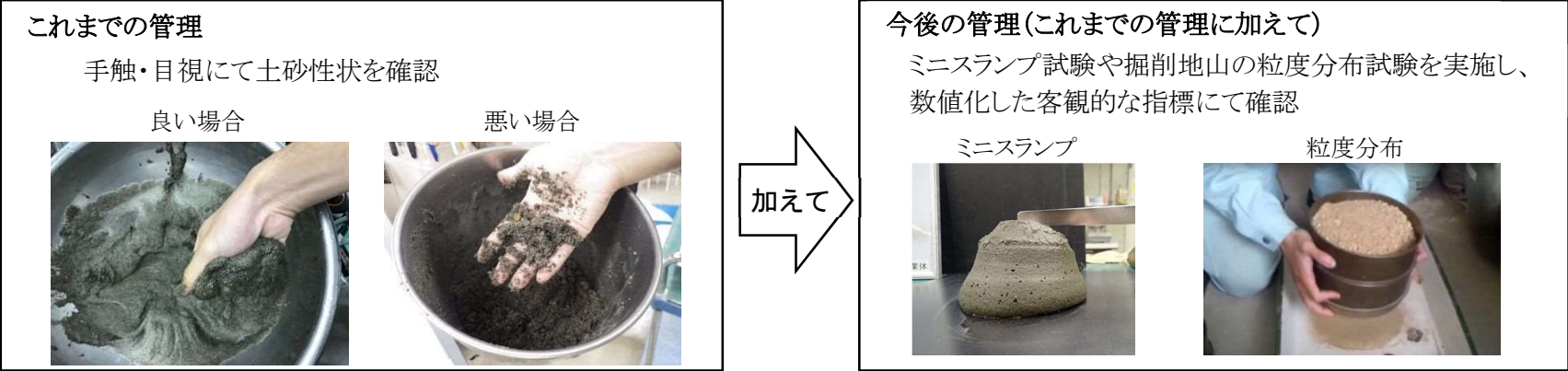
管理項目	管理内容	管理値・確認内容	対応	備考
カッタートルク	カッターヘッドを回転させるために必要なトルク値であり、地盤状況ごとの想定トルク値および装備能力に対して計測トルクの割合と計測トルクの変動についても確認を行う（確認頻度_リアルタイム）	管理値：装備トルク 80%以下	<div>・掘進速度の低減（カッタートルク対応）</div> <div>・チャンバー内圧力設定の見直し</div> <div>・添加材注入量の増加</div> <div>・ベントナイト溶液を含めた添加材の種類変更</div> <div>・夜間等掘進休止時において、チャンバー内土砂の分離を防ぐため、定期的にチャンバー内土砂の攪拌を実施</div>	
チャンバー内圧力勾配	チャンバー内圧力勾配の変化を確認する（確認頻度_リアルタイム、毎リング）	圧力勾配の傾きと直線性を確認する 例) 下部チャンバー内圧力が大きくなるなどの異常がないことを確認		傾きが想定以上に大きい場合は、気泡材の地山への過度な浸透が生じている可能性 傾きが小さい場合や直線性が損なわれている場合は、土砂の分離・沈降が生じている可能性
手触 目視	掘削土のまとまり具合を手触と目視で確認する（確認頻度_目視：リアルタイム、手触：2回/日）	添加材の添加量や種類、濃度変更による掘削土の排土性状の変化を確認する 例) 気泡材注入量増加に見合う湿潤状態など		掘削土には高分子材が添加
ミニスランプ試験	掘削土のスランプ値を計測し、値と変化を傾向管理する（確認頻度_2回/日）	直近の掘削土の性状と比較する		掘削土には高分子材が添加
粒度分布	掘削地山の土層を把握するために試験室にて粒度分布試験を実施し添加材の注入率設定のデータとする（確認頻度_20リングに1回を基本とし、塑性流動性のモニタリングに応じて適宜実施）	既往ボーリング結果と比較する		細粒分や礫分の比率など地層の変化を確認

*赤字は追加および変更項目

○ チャンバー内圧力勾配の変化を確認



○ 排土性状の確認



③排土管理について

排土管理として、これまでの実績を踏まえ、従来の1次管理値よりも厳しい±7.5%を新たな1次管理値とする。また、ベルトスケール重量による掘削土量管理に加えて、排土率（地山掘削土量と設計地山掘削土量の比率）による管理を追加する。

表 8-2 掘削土量管理項目と管理値

管理項目	計測内容	計測目的	管理値の考え方	単位	1次管理値	2次管理値	備考
掘削土重量 (掘削土体積)	掘削土の重量 (掘削土の体積) (確認頻度_リアルタイム、 毎リング)	【取込み過多】 切羽が不安定になり、地表面沈下等周辺地盤への影響が大きくなる 【取込み不足】 地表面隆起が発生する可能性がある ジャッキ推力などのシールドマシンへの負荷が増大する	・ベルトスケール重量から掘削土量の管理を行う ・前 20 リング平均の掘削土量と比較して、大きなバラツキがないことと管理値内で掘進できていることを確認する ・掘削土量の 1 次管理値±7.5%、2 次管理値±15%として、管理を行う	t (m³)	前 20 リング平均±7.5%以内	前 20 リング平均±15%以内	・添加材の重量を控除しない重量も併せて管理 ・ボーリングデータおよび掘削土の単位体積重量をもとに換算した掘削土体積も管理
排土率	地山掘削土量と設計地山掘削土量の比率 (確認頻度_毎リング)		・掘削土重量を掘削土の単位体積重量で除して地山掘削土量(体積)を算出し、シールド断面と掘削長から求めた設計地山掘削土量との比率を 1 リング毎に確認・管理する	%	設計地山掘削土量の±7.5%以内	設計地山掘削土量の±15%以内	・ボーリングデータおよび掘削土の単位体積重量をもとに体積換算

*赤字は追加および変更項目

○ 掘削土重量の確認

これまでの管理

- 掘削土重量から気泡材の全重量を控除した地山掘削重量で排土管理
- 直近20リングの平均値に対し、±10%以内を1次管理値、±20%以内を2次管理値として設定

加えて

今後の管理(これまでの管理に加えて)

- 閉塞が生じたリングの手前20リングでは、掘削土量が+7.5%を超過しているリングがあることを確認
- これまでの管理値より厳しい±7.5%を1次管理値として設定。これにより、塑性流動性のモニタリングに加えて、閉塞及び閉塞を契機とする取り込み過剰の兆候をいち早く把握

掘進方向

閉塞の手前 20 R では掘削土量が 7.5%超過

閉塞解除位置

表 8-3 掘削土量の管理値を超過した際の対応

現象	対応	
下限値 超過	1 次管理値	・マシン負荷の確認・調整
	2 次管理値	・掘進を一時停止し、原因究明・対策検討
上限値 超過	1 次管理値	・地表面変状の確認・地上の巡回頻度を増加 ・次リングの掘削土量を注視、必要に応じて、チャンバー内圧力の再設定を行う ・掘削土砂性状を確認、添加材注入量や添加材の種類を調整 ・裏込め注入量・注入圧を注視、必要に応じて坑内から追加注入 ・改善が見られない場合、工事を一時中断し、原因究明
	2 次管理値	・工事を一時中断し、原因究明・対策検討(地上からの充填注入の検討等)

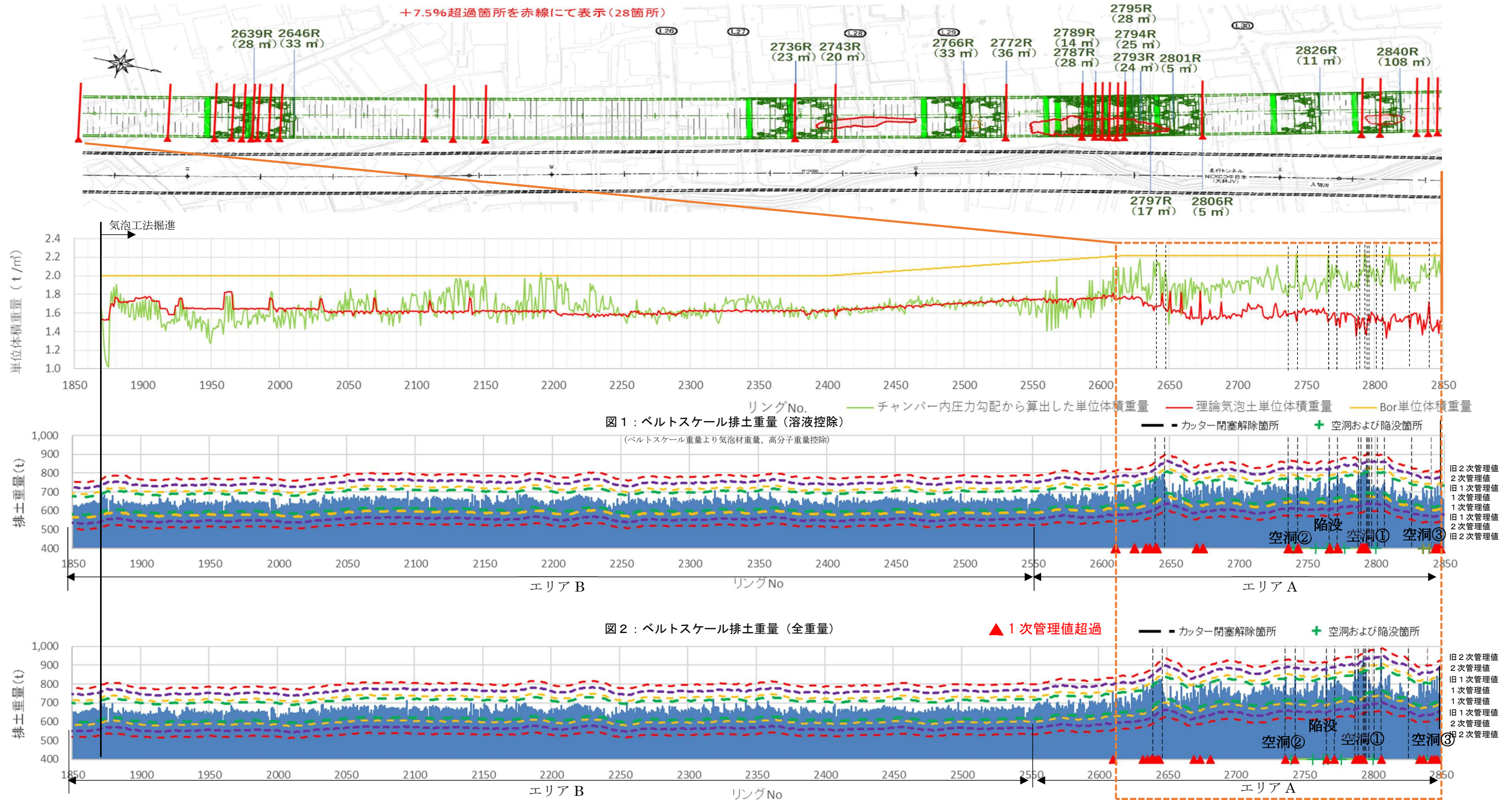
*赤字は追加および変更項目

排土管理において、1次管理値（±7.5%）、2次管理値（±15%）を設定し、管理を行っていくことの妥当性を確認するため、今回事象における排土重量データを図に示す。

図1は、気泡材をすべて回収することを前提とした地山重量に相当する重量を示したグラフであるが、今回、気泡材が地山に過度に浸透したことにより未回収となったと推定されることから、気泡材重量を控除しない排土重量についても整理を行った（図2）。

これらより、細粒分・細砂分の減少が見られ始め、掘削土の良好な塑性流動性の確保が困難となってきた2600R以降、断続的に1次管理値とした7.5%を超過する排土量となっていることが確認できる。

また、閉塞が生じたリングの手前20リングでは、掘削土量が+7.5%を超過しているリングがあることを確認した。このことから、±7.5%を1次管理値として設定し、チャンバー内の圧力勾配の確認と合わせて添加材重量を控除しない排土重量も管理することにより、大断面シールドにおける閉塞および閉塞を契機とする取り込み過剰の兆候をいち早く把握することが可能となり、より安全な掘進管理につながるものと考えられる。



④ カッター回転不能(閉塞)時の対応

前記①～③によりチャンバー内土砂の塑性流動性を改善させることでカッター回転不能を生じさせないよう対策を講じるが、万が一閉塞事象が発生した場合には、工事を一時中断し、原因究明と地表面に影響を与えない対策を十分に検討する。また、閉塞解除後の地盤状況を確認するために、必要なボーリング調査等を実施する。

①掘進管理のフロー

```

graph TD
    Start([掘進準備]) --> AddMat[添加材選定]
    AddMat --> SetVol[添加材注入量、配合設定]
    SetVol --> CheckPress1[停止中のチャンバー内圧力値確認]
    CheckPress1 --> CheckPress2[掘進時のチャンバー内圧力値設定確認]
    CheckPress2 --> CutterRot{カッターヘッド  
回転}
    CutterRot -- NG --> StopWork[工事の一時中断  
→原因の究明・対策検討]
    StopWork --> AddMat
    CutterRot -- OK --> CutterMgt([切羽管理])
    CutterMgt --> Plasticity{塑性流動性  
カッタートルク  
チャンバー圧力勾配(傾き・直線性)  
ミニスランプ・粒度分布  
手触・目視}
    Plasticity -- NG --> CheckAddMat[添加材設定の見直し]
    CheckAddMat --> SetPress[掘進時のチャンバー内圧力値設定]
    Plasticity -- OK --> SetPress
    SetPress --> PressureMaint{チャンバー内圧力の保持}
    PressureMaint -- 高い --> HighPress[スクリーコンベヤ回転数増  
シールドジャッキ掘進速度減  
(スクリー開度大)]
    PressureMaint -- 低い --> LowPress[スクリーコンベヤ回転数減  
シールドジャッキ掘進速度増  
(スクリー開度小)]
    HighPress --> SetSpeed[掘進速度、シールド負荷上限の設定]
    LowPress --> SetSpeed
    SetSpeed --> Force{推 力}
    Force -- 上限値オーバー --> ReduceSpeed[掘進速度減]
    ReduceSpeed --> SetSpeed
    Force -- OK --> End([掘削土量の管理へ])
  
```

The flowchart illustrates the Cutter Management (切羽管理) process, which is divided into three main vertical sections:掘進準備 (Preparation for Advancing),塑性流動化の管理 (Management of Plastic Flow), andチャンバー内圧力の管理 (Management of Chamber Internal Pressure). The process begins with掘進準備 (Preparation for Advancing), which includes steps for adding material (添加材選定), setting injection volume and mix (添加材注入量、配合設定), and confirming chamber internal pressure values (停止中のチャンバー内圧力値確認, 掘進時のチャンバー内圧力値設定確認). A decision point (カッターヘッド回転) checks if the cutter head is rotating. If NG (No Good), the process stops (工事の一時中断) for investigation and countermeasures, then returns to the material selection step. If OK, it proceeds to切羽管理 (Cutter Management). This section includes a decision point for plastic flowability (塑性流動性), which considers cutter torque, chamber pressure gradient, mini-slurp, grain size distribution, and touch/sight. If NG, it leads to reviewing material settings (添加材設定の見直し) and then to setting chamber internal pressure (掘進時のチャンバー内圧力値設定). If OK, it proceeds to maintaining chamber internal pressure (チャンバー内圧力の保持). This step branches into two paths: '高い' (High) leading to increasing conveyor rotation and decreasing jack advance speed, and '低い' (Low) leading to decreasing conveyor rotation and increasing jack advance speed. Both paths then lead to setting advance speed and shield load limits (掘進速度、シールド負荷上限の設定). A final decision point (推 力) checks if the thrust is over the upper limit. If '上限値オーバー' (Over upper limit), it leads to reducing advance speed (掘進速度減) and then back to setting limits. If OK, the process ends at掘削土量の管理へ (To management of excavated soil quantity).



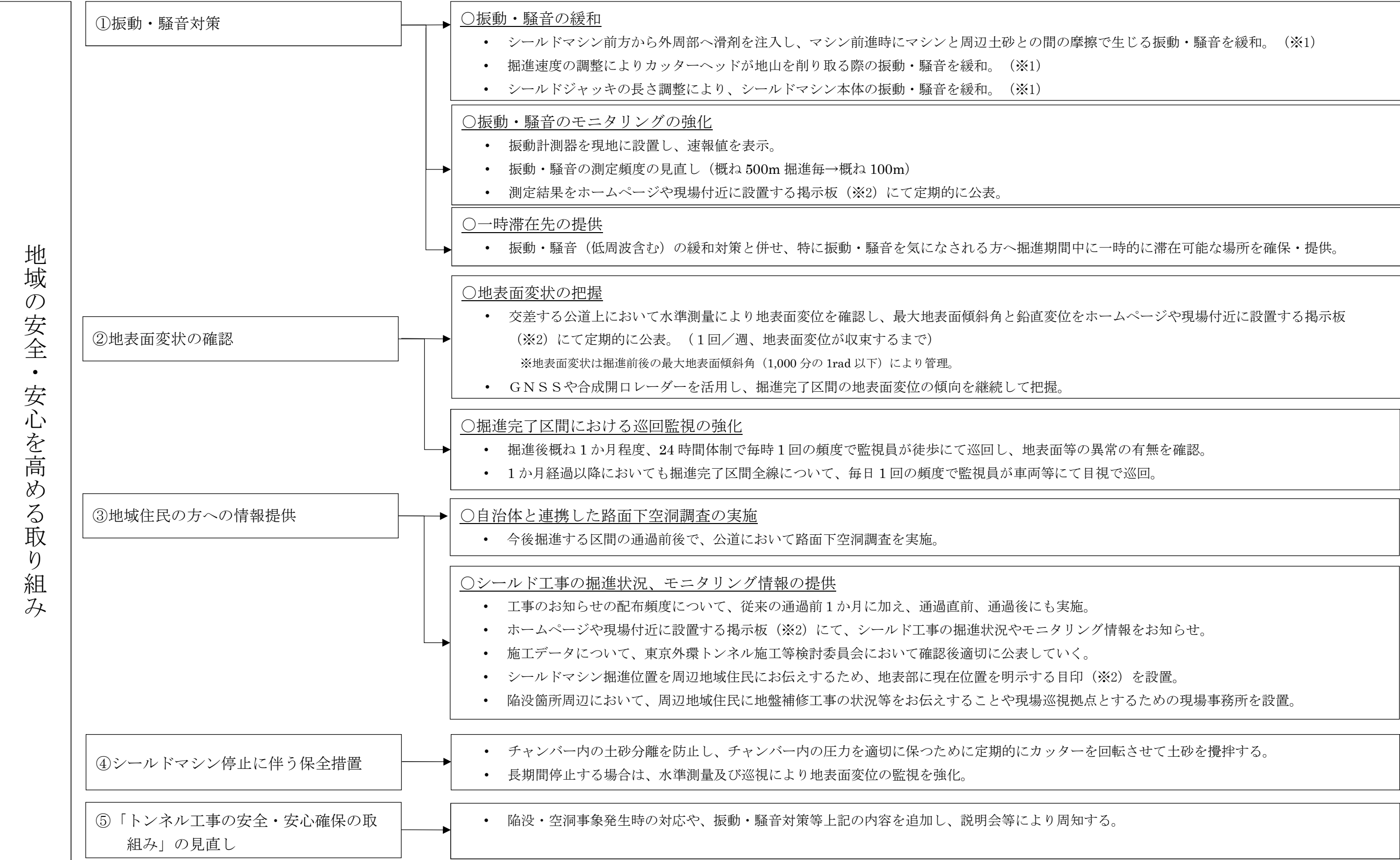
8.3 掘進管理項目および掘進管理基準の新旧対比表

管理項目	監視・測定項目等	(旧) これまでの管理	(新) 今後の管理
カッター	カッタートルク	管理値: 装備トルクの80%以下	変更なし
		管理方法: モニターでリアルタイムで管理	※カッターヘッド回転不能(閉塞)時は、工事を一時中断し、原因究明・対策検討を十分に実施
			管理方法: モニターでリアルタイムで管理
シールドジャッキ	推力	推力: 装備推力の80%以下	変更なし
		管理方法: モニターでリアルタイムで管理	
掘進速度	掘進速度	標準掘進速度: 40mm/min	変更なし
		管理方法: モニターでリアルタイムで管理	
マシン方向制御	方位	一次管理値: 設計値±0.2°	変更なし
		二次管理値: 設計値±0.4°	
	ピッチング	一次管理値: 設計値±0.2°	変更なし
		二次管理値: 設計値±0.4°	
	ローリング	一次管理値: ±0.2°	変更なし
		二次管理値: ±0.35°	
	位置計測	一次管理値: 蛇行量30mm	変更なし
		二次管理値: 蛇行量40mm	
		管理値: 蛇行量50mm	
土圧	チャンバー内土圧	管理土圧: 主働土圧+水圧+予備圧(0.02MPa)	管理土圧: 主働土圧+水圧+予備圧(0.02MPa)
		管理方法: 切羽圧力計計測結果をリアルタイムで管理	チャンバー内圧力値をリアルタイムにて管理(チャンバー内圧力分布から圧力勾配の傾きと直線性を確認、必要に応じて改善を実施)
排土管理	掘削土量	1次管理値: 前20R平均掘削土量±10%以内	1次管理値: 前20R平均掘削土量±7.5%以内
		2次管理値: 前20R平均掘削土量±20%以内	2次管理値: 前20R平均掘削土量±15%以内
		管理方法: ベルトスケールの計量結果をリアルタイムで管理	管理方法: ベルトスケールの計量結果をリアルタイムで管理
	排土率	-	1次管理値: 設計掘削土量の排土率±7.5%以内
		-	2次管理値: 設計掘削土量の排土率±15%以内
チャンバー内土砂性状 (塑性流動性確認)	土砂性状	手触、目視により、土砂性状や地山土層の変化を確認	手触、目視により、土砂性状や地山土層の変化を確認
		-	ミニスランブ試験値: 事前配合試験結果および直近の掘削土の性状と比較
		粒度分布試験を実施し、掘削地山の土層を把握(確認頻度: 1回/週を基本)	粒度分布試験を実施し、掘削地山の土層を把握(確認頻度: 20リングに1回を基本とし、塑性流動性のモニタリングに応じて適宜実施)
裏込注入工	注入圧	注入圧: 切羽圧+0.2Mpa	変更なし
	注入量	注入率: 100%以上	
		管理方法: モニターでリアルタイムで管理。基本的に設定注入圧以上、100%以上の注入率、地山によって注入量は変化する	
地表面変位	掘進時、掘進停止中、事後	管理値: 地表面傾斜角 1.0/1000rad以下	変更なし

*赤字は追加および変更項目

8.4 地域の安全・安心を高める取り組み

振動・騒音対策や地盤変状の確認、地域住民の方への情報提供、緊急時の運用の見直しについて、シールドトンネル工事に伴う地域の安全・安心を高める取り組みとして、事業者において陥没地域で実施した説明会や相談窓口等においていただいたご意見、沿線区市よりいただいた要請書等を参考に次のとおりとりまとめた。引き続き、沿線住民からの問い合わせ等に対し、適切に対応するとともに、不安を取り除くことに努めていく必要がある。



※1：状況に応じて実施
※2：設置箇所・手法は自治体と調整

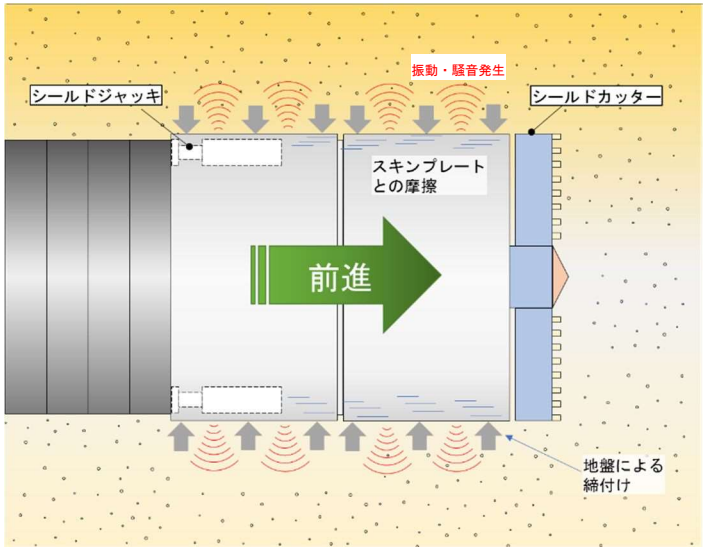
① 振動・騒音対策

シールドマシンの掘進による振動・騒音は最大で55dB（2gal、震度0 相当）程度で、レベル1地震動200～300gal の1/100 以下であるため、地盤に有害なひずみを発生させるほどの加振力はなく、地盤に緩みや地盤災害を発生させるレベルではないと考えられる。 振動・騒音は、規制基準（東京都条例）の55dB※を超過していないものの、今回の陥没・空洞発生箇所周辺は振動・騒音が減衰せず地上に伝搬しやすい地盤であったと考えられ、振動・騒音や低周波に対するお問い合わせを多くいただいた。今後の掘進においては、振動・騒音対策を地域の安全・安心を高める取り組みの一部として実施していく。

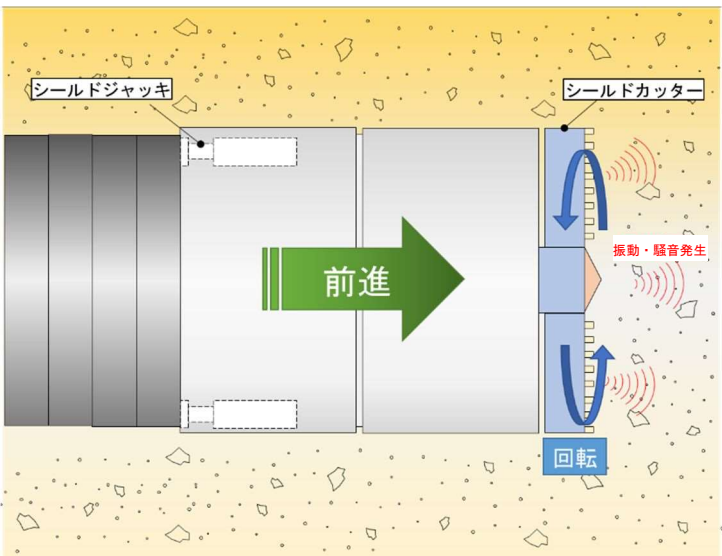
※（東京都 都民の健康と安全を確保する環境に関する条例）
第136条_日常等生活等に適用する規制基準[振動] （第1種低層住居専用地域の夜間19時～8時）

＜想定される振動・騒音発生メカニズム＞

1. 前進する際に、シールドマシンのスキンプレートと周辺の土砂の摩擦から発生する振動・騒音



2. シールドマシンのカッターヘッドで、地山を削り取る際に発生する振動・騒音



- ◆ 東つつじが丘周辺では、礫が卓越して介在し、単一の砂層が地表面近くまで連続しており振動・騒音が地上に伝達しやすい地盤であったと考えられる。
- ◆ 東つつじが丘周辺では、細粒分が少なく均等係数が小さい自立性が乏しい地盤であり、砂礫によるマシンの締付けが大きかったと考えられる。

＜振動・騒音抑制対策＞

- ・ スキンプレートと地山との間に滑剤を充填することにより摩擦低減。
- ・ シールドジャッキの可動長を短い状態で運用することで、ジャッキの振れ幅を抑制しシールドマシン本体の振動・騒音を緩和。（状況に応じて実施）

◆ 滑剤

摩擦の低減効果が大きい安定性に優れた材料を選定。

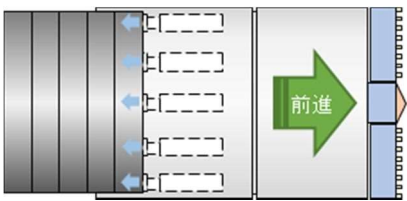
材料	①鉱物系 淡黄色粉体	②水溶性高分子系 乳白色～淡黄色液体
外観		
比重	2.5～2.7	1.02～1.08(25℃)
pH	9.0～11.0(2%懸濁液)	6.0～8.0(1%液)
特徴	持続性が高く、継続的な摩擦低減効果が期待できる	粘性土において、摩擦低減効果が期待できる

滑剤例

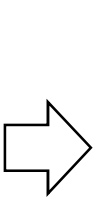
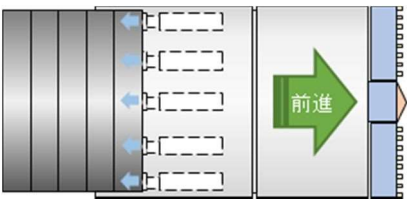
- ・ 掘進速度の調整によりカッターヘッドが土砂礫を削り取る際の振動・騒音を緩和。（状況に応じて実施）

◆ ジャッキ長さの調整による掘進

【調整前】



【調整後】

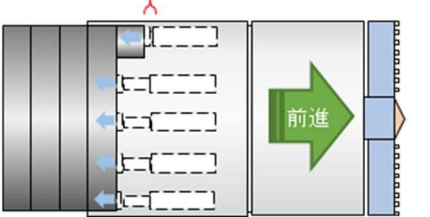


シールドジャッキ伸長大

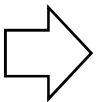


全ジャッキ伸長後にセグメントを組立

シールドジャッキ伸長小



ジャッキ伸長途中でセグメントを組立



② 地表面変状の確認

＜水準測量結果の定期的な公表＞

公道上にて水準測量により工事前後の地表面変位を確認し、最大地表面傾斜角と鉛直変位を定期的に公表。



水準測量

③ 地域住民の方への情報提供

＜路面下空洞調査＞

マシン通過前後に、空洞探査車の走行（狭隘部は作業員によるハンディ型の探査機使用）を行い、路面の空洞調査を実施。



路面下空洞探査車(車載型レーダー)



ハンディ型地中レーダー

④ シールドマシン停止に伴う保全措置

- チャンバー内の土砂分離を防止し、チャンバー内の圧力を適切に保つために定期的にカッターを回転させて土砂を攪拌する。
- 長期間停止する場合は、水準測量及び巡視により地表面変位の監視を強化。

⑤ 「トンネル工事の安全・安心確保の取組み」の見直し

- 「トンネル工事の安全・安心確保の取組み」について、陥没・空洞事象発生時の対応や、振動・騒音対策等上記の“地域の安全・安心を高める取り組み”を追加し、説明会等により周知するとともに、確実に実施する。

＜巡回監視の強化＞

掘進後概ね1か月程度、24時間体制で毎時1回の頻度で監視員が徒歩による巡回を実施。また、1か月经過以降においても掘進完了区間全線について、毎日1回の頻度で監視員が車両等による巡回を実施。



巡回員



警戒車両

＜情報提供＞

掲示板やホームページ、お知らせチラシ等を活用し、シールド工事の掘進状況やモニタリング情報をお知らせ。



掲示板(イメージ)



HP(イメージ)