

東京外かく環状道路

東京外かく環状道路工事現場付近での
地表面陥没事故について

東日本高速道路(株)

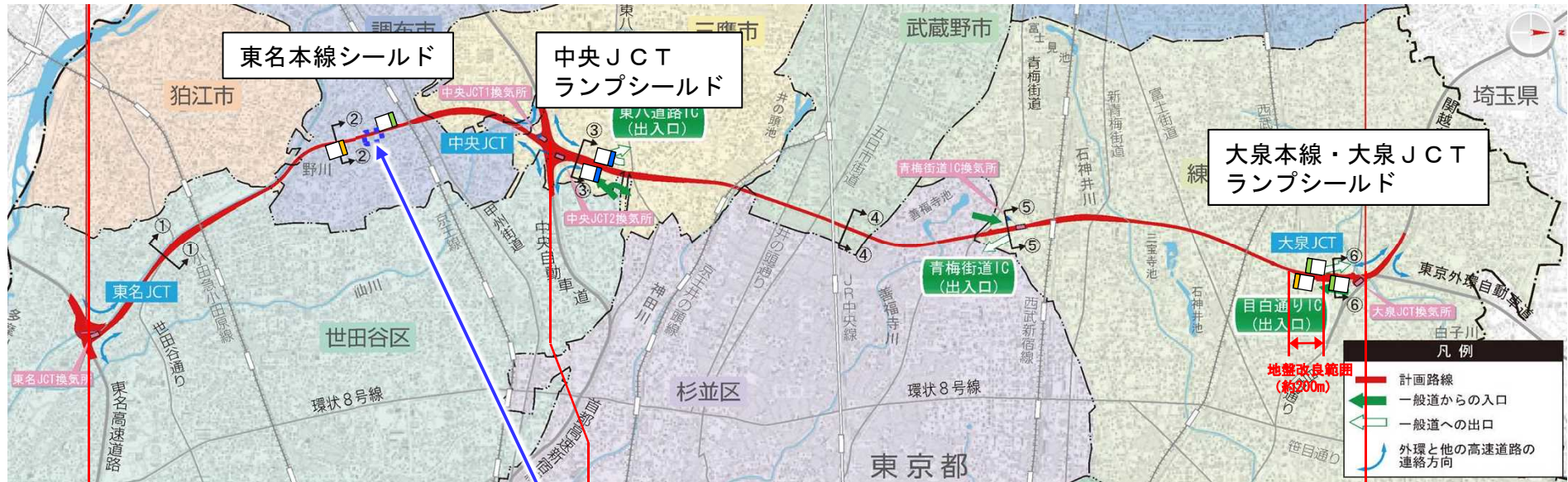
概要

東京外かく環状道路(関越～東名)路線概要

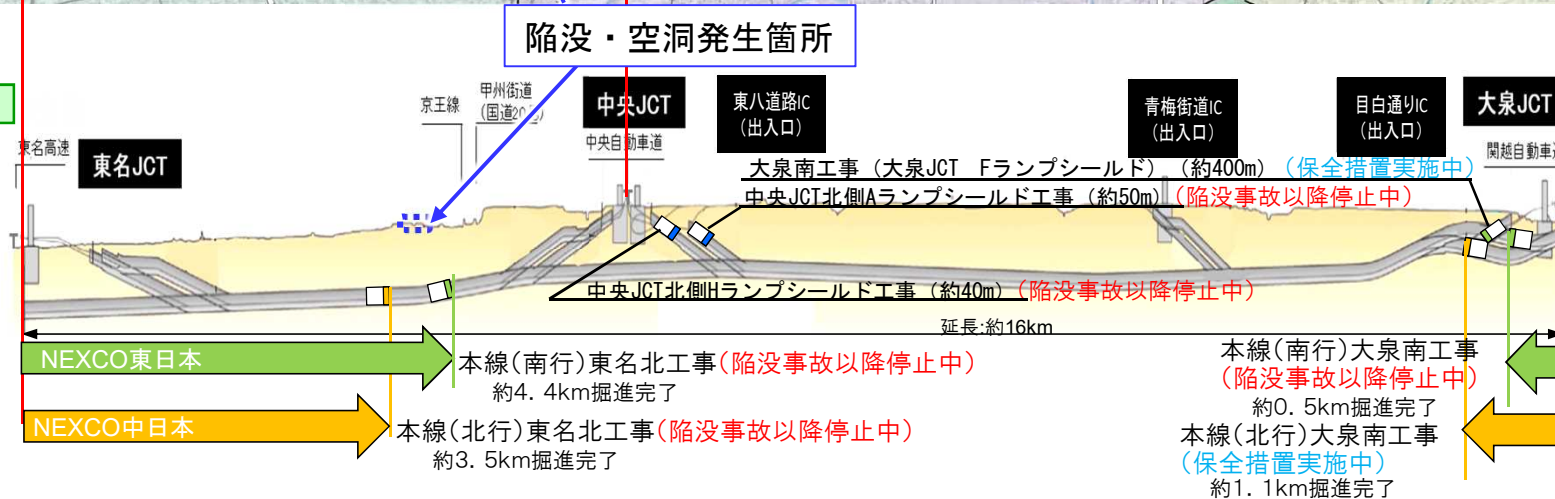


東京外かく環状道路(関越～東名)現在の状況

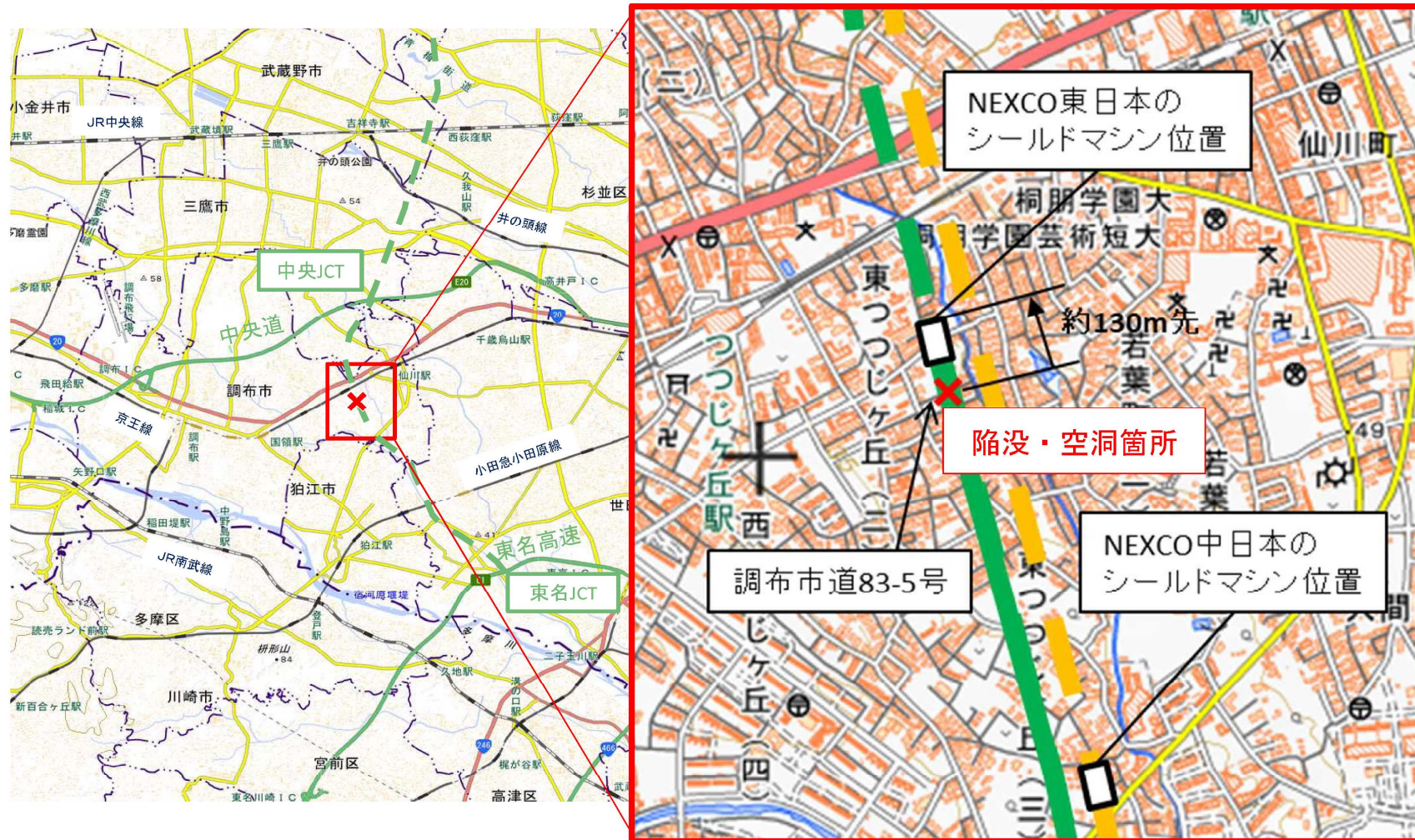
平面図



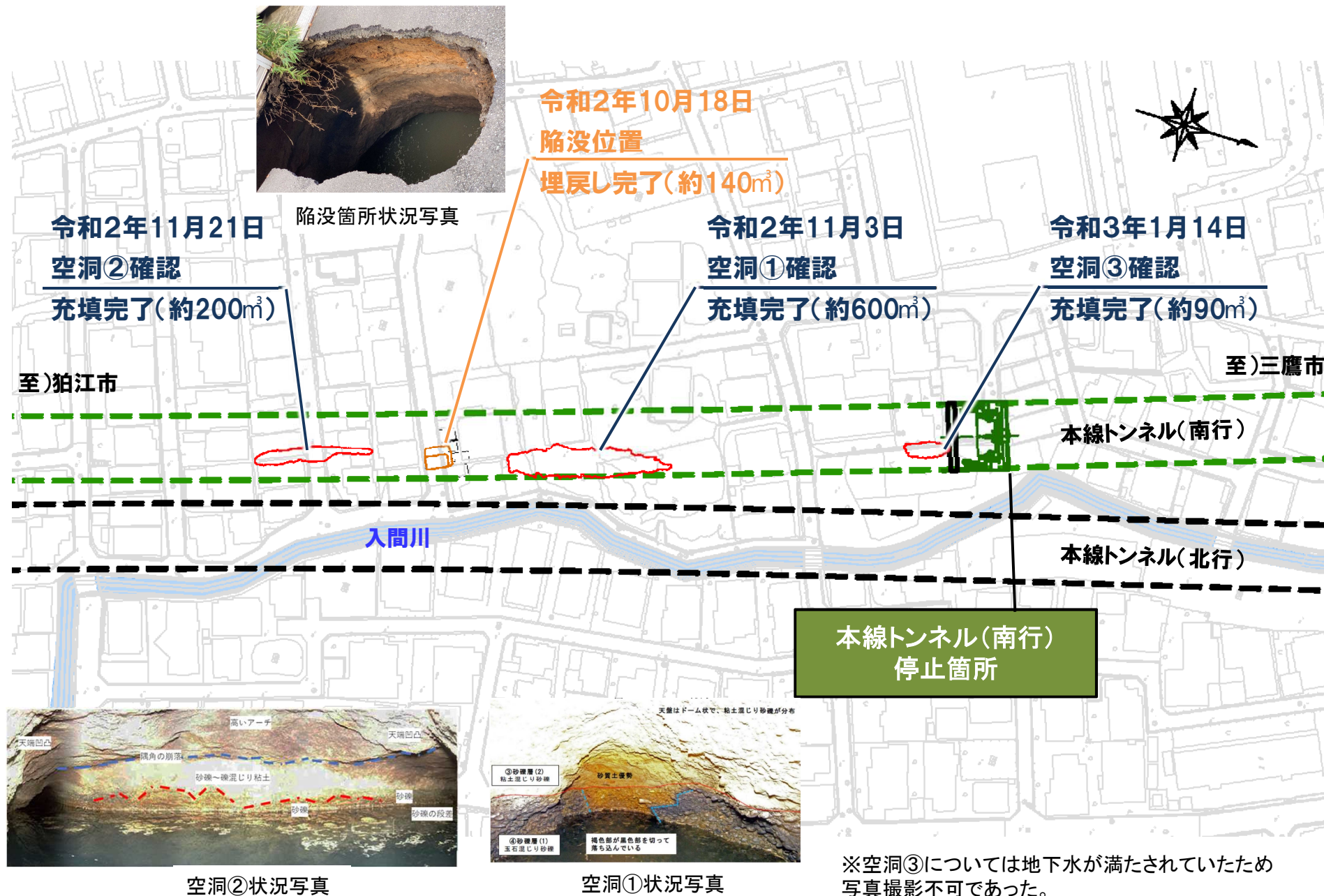
縦断面図



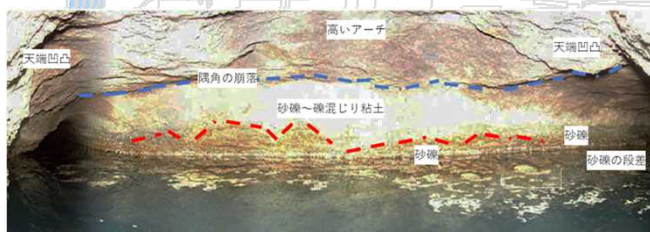
陥没・空洞箇所的位置図



陥没・空洞事故の経緯 [発生箇所の位置]



陥没箇所状況写真



空洞②状況写真



空洞①状況写真

陥没・空洞事故の経緯

■これまでの経緯

2020年

- | | |
|------------|---|
| 10月18日 | 地表面の陥没を確認
応急措置として砂による埋土を実施（翌朝埋土完了） |
| 10月19日 | 第1回 有識者委員会※を開催 |
| 10月23日 | 第2回 有識者委員会を開催 |
| 11月 3日 | 陥没箇所から約40m北にて、空洞①を確認
（11月24日充填作業完了） |
| 11月 5日 | 第3回 有識者委員会を開催 |
| 11月 6日、7日 | 陥没箇所周辺の方を対象とした説明会を開催（計3回） |
| 11月21日 | 陥没箇所から約30m南にて、空洞②を確認
（12月3日充填作業完了） |
| 11月27日 | 第4回 有識者委員会を開催
陥没箇所周辺の方を対象に家屋中間調査の意向確認を開始 |
| 12月18日 | 第5回 有識者委員会を開催
・陥没・空洞の要因分析（中間とりまとめ） |
| 12月20日、21日 | 陥没箇所周辺の方を対象とした説明会を開催（計3回） |
| 12月25日 | 専用フリーダイヤルを開設 |

※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設置。

陥没・空洞事故の経緯

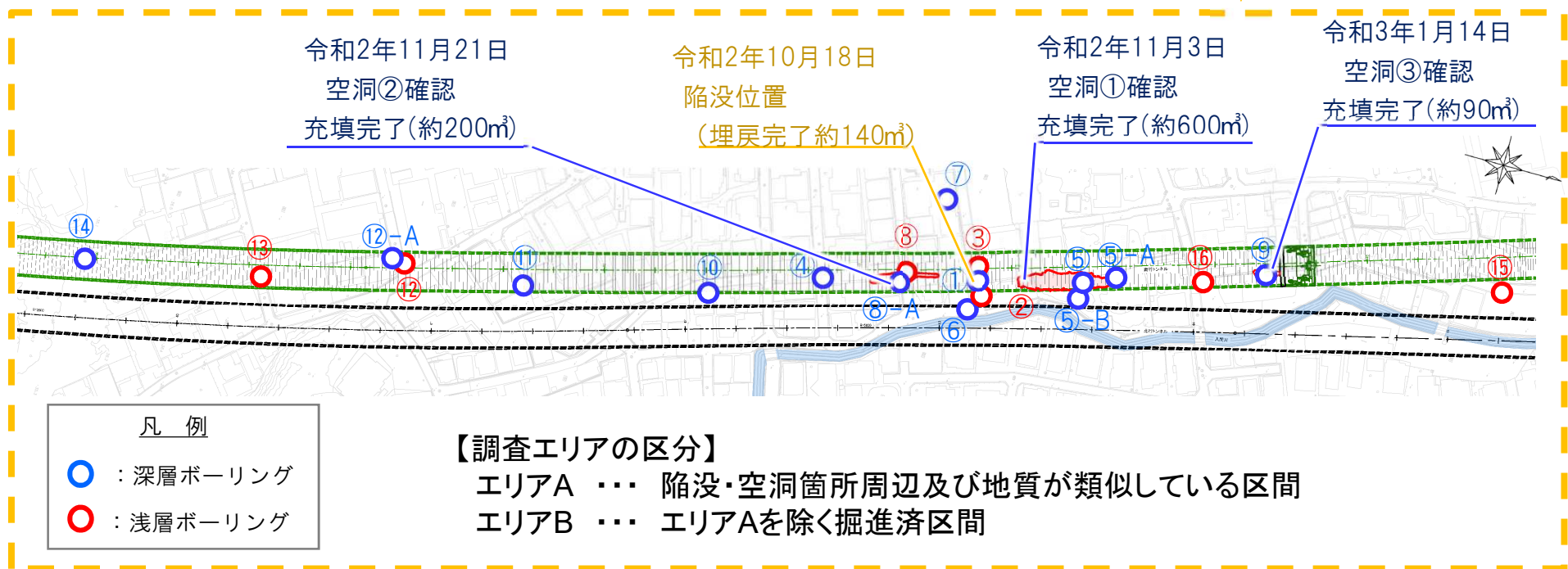
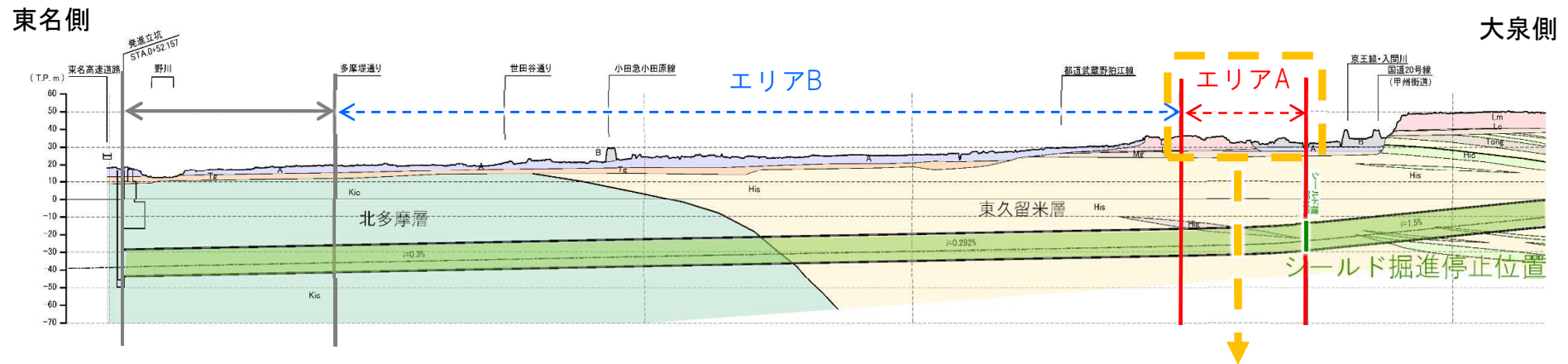
■これまでの経緯

2021年

- | | |
|-----------|---|
| 1月 8日 | 家屋補償等に関する相談窓口を開始
※3月末時点で計18回実施 |
| 1月14日 | 陥没箇所から約120m北にて、空洞③を確認
(1月22日充填作業完了) |
| 2月12日 | 第6回 有識者委員会を開催
[・追加調査等を踏まえたメカニズムの特定
・地盤の補修範囲等の特定
・再発防止対策の基本方針の議論] |
| 2月14日、15日 | 陥没箇所周辺の方を対象とした説明会を開催 (計3回) |
| 2月26日 | 陥没箇所周辺の各戸訪問(約1,000世帯)を開始 |
| 3月19日 | 第7回 有識者委員会を開催
[・再発防止対策の確定
⇒報告書の公表] |
| 4月 2日～7日 | 陥没箇所周辺及び沿線7区市の方を対象とした説明会を開催
(計10回) |
| 4月19日 | 常設の相談窓口(つつじヶ丘相談所)を開設 |
| 7月16日 | 保全措置実施(大泉本線(北行)、大泉JCT Fランプシールドトンネル) |

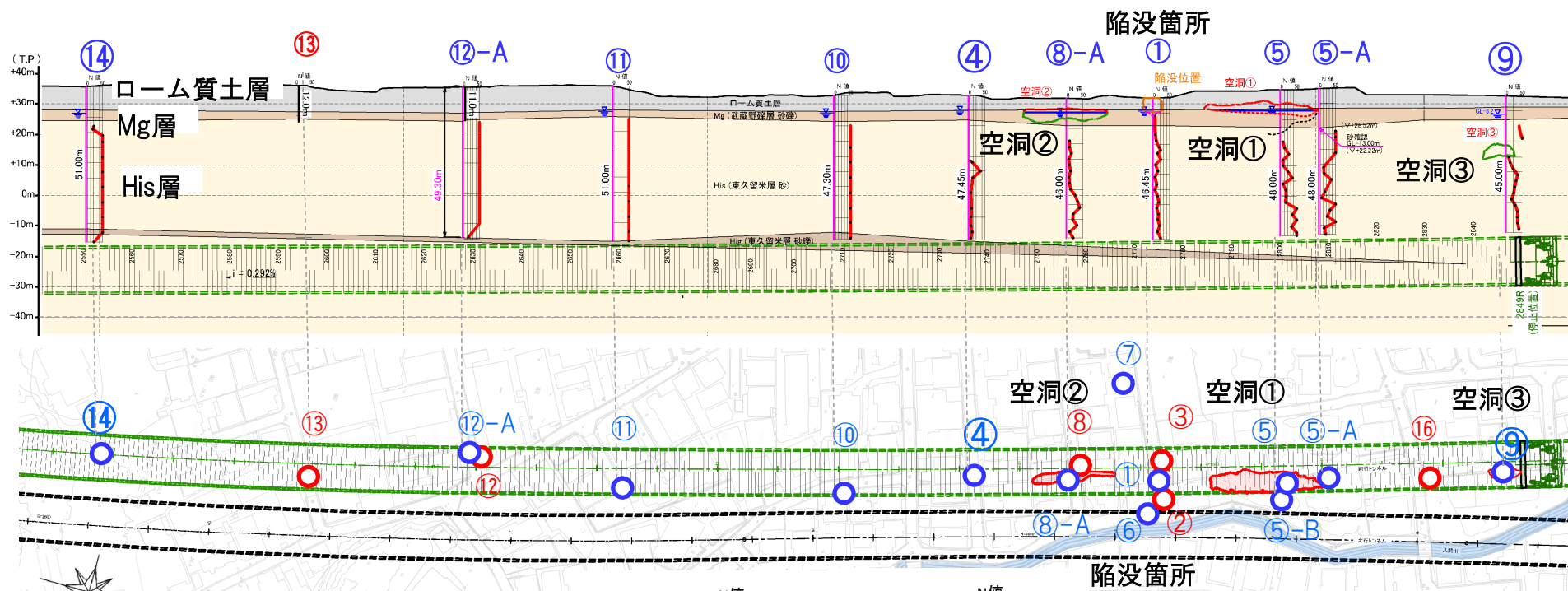
調查結果

調査結果[陥没・空洞箇所周辺の地盤状況（エリアA）]



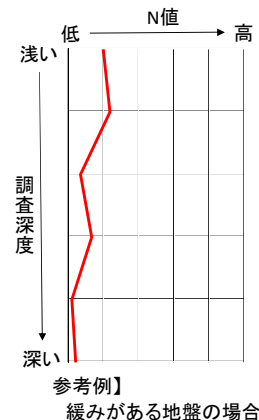
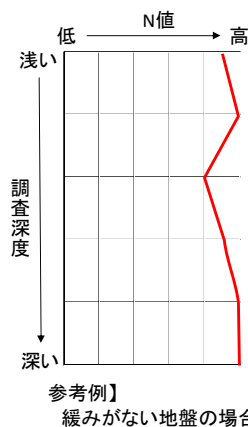
調査結果[陥没・空洞箇所周辺の地盤状況（エリアA）]

- ・トンネル縦断方向について、ボーリング④～⑨までの区間において地盤の緩みが確認されました。
- ・ボーリング④～⑭においては、地盤の緩みは確認されておりません。



N値表示の参考例

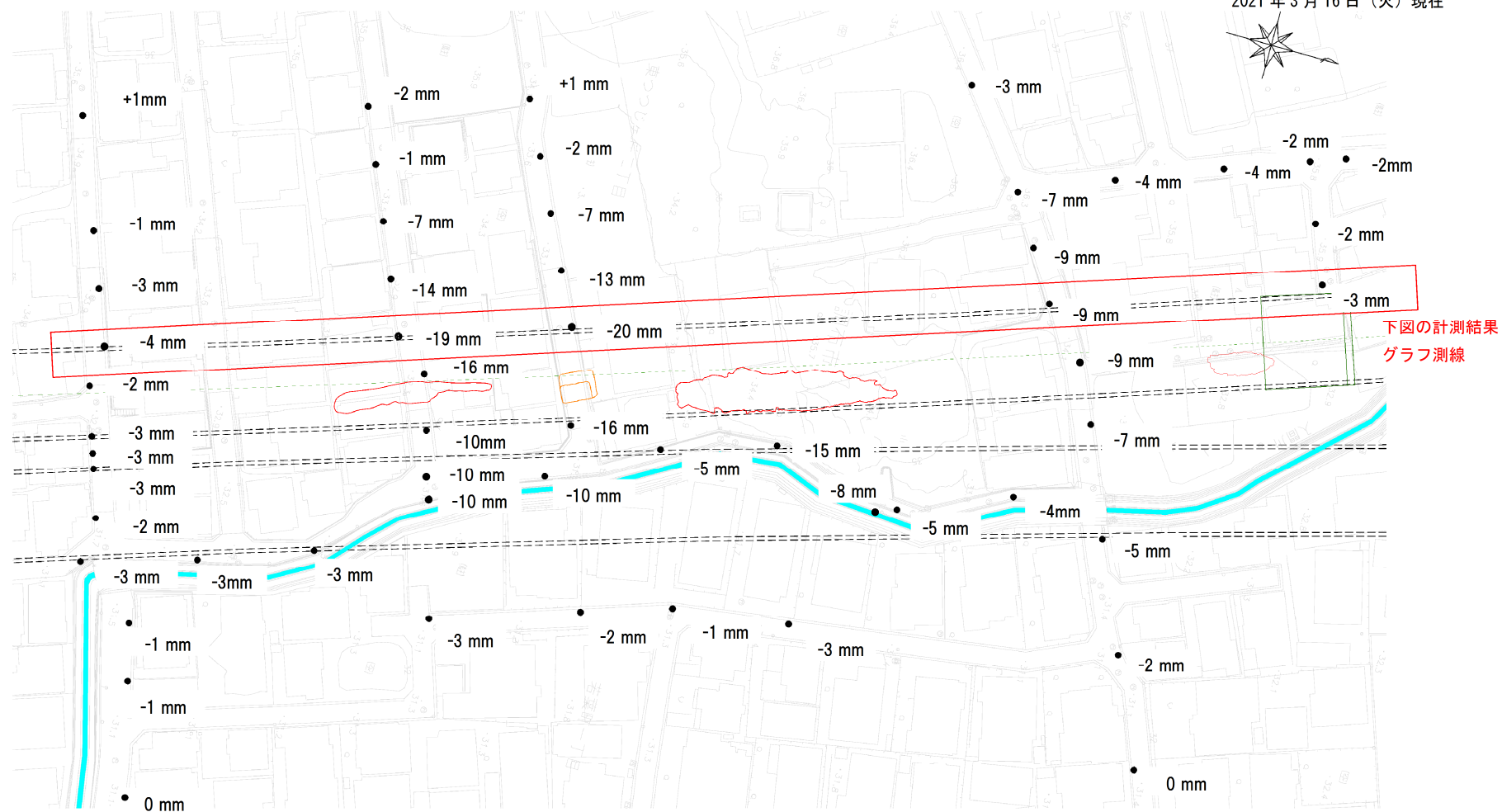
凡 例	
○	： 深層ボーリング
○	： 浅層ボーリング



N値: 地盤の固さの指標で、
数値が高いと固く緩みがない。

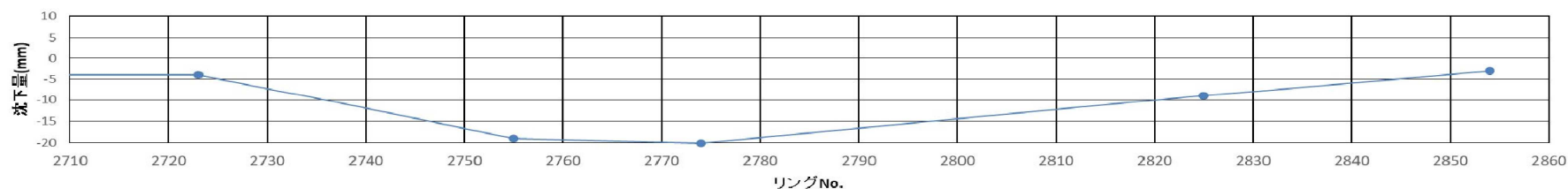
調査結果[陥没・空洞箇所周辺の地表面計測結果]

2021年3月16日(火) 現在



※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

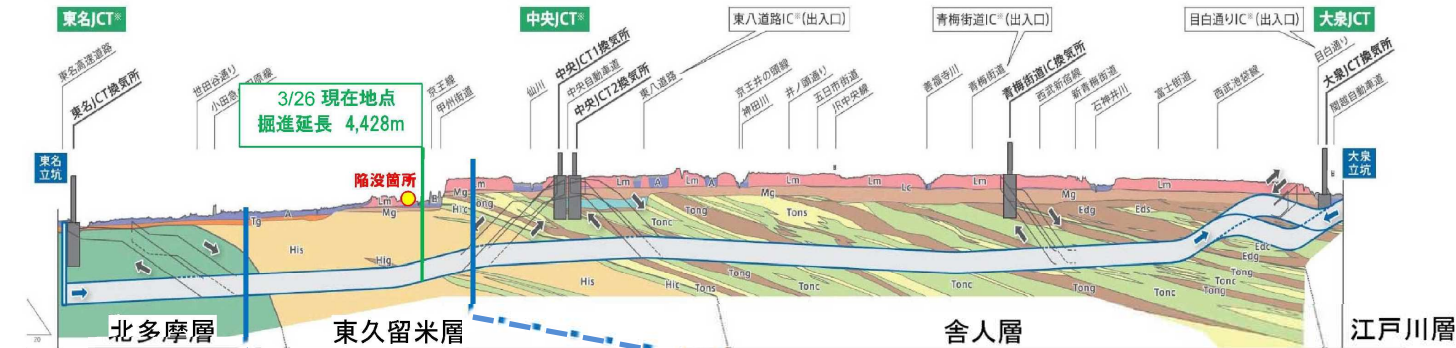


陥没・空洞の推定メカニズム 再発防止対策

陥没・空洞の推定メカニズム [陥没箇所周辺の地盤]

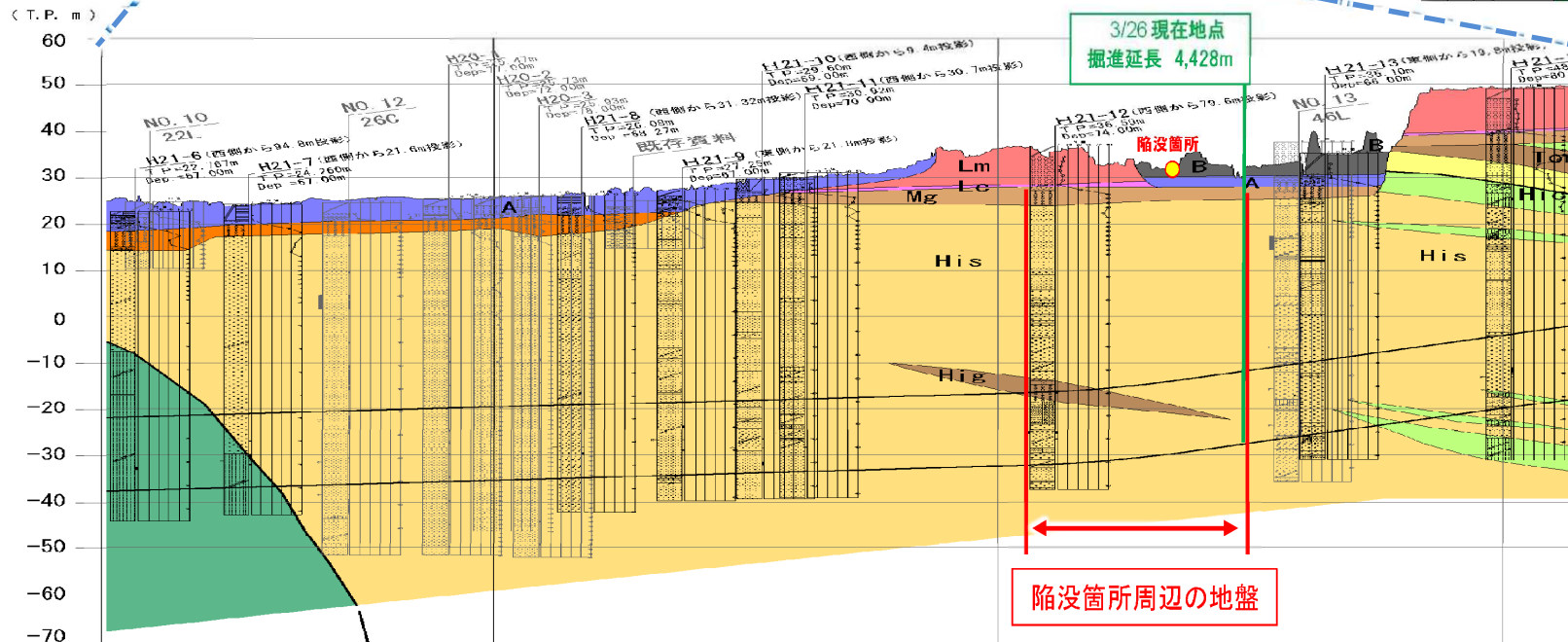
陥没箇所周辺の地盤について示したものです。

地質縦断面図

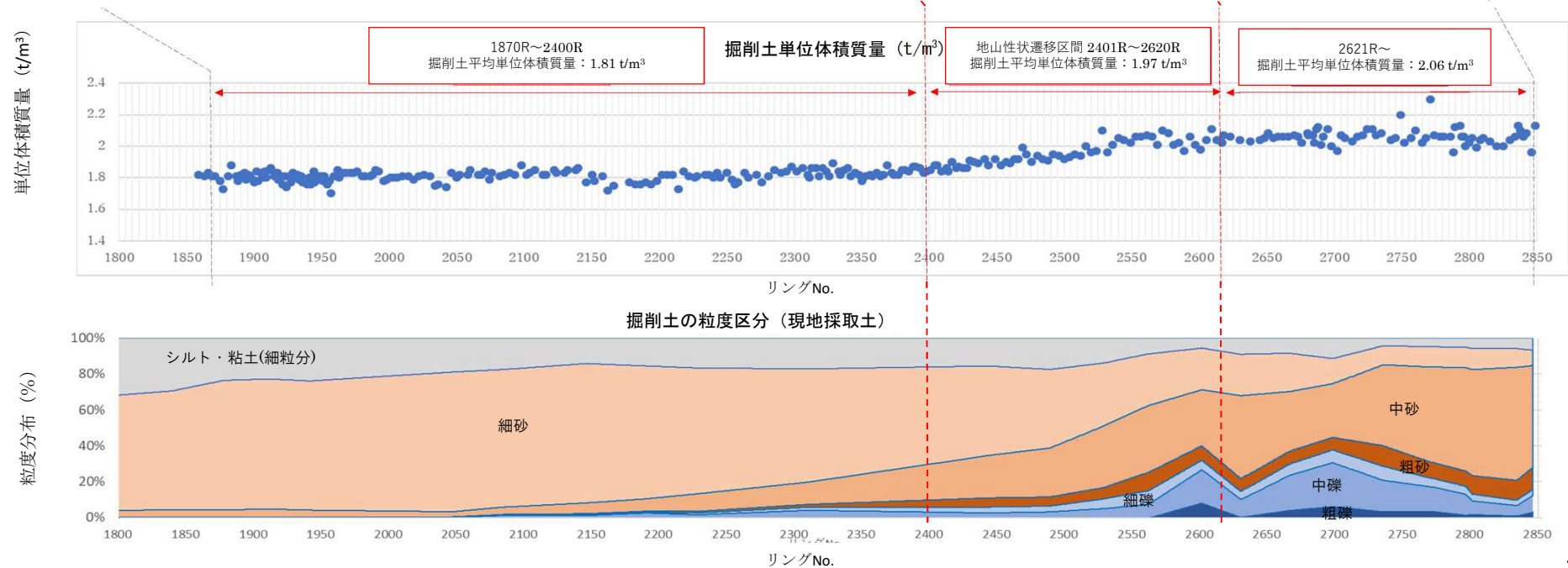
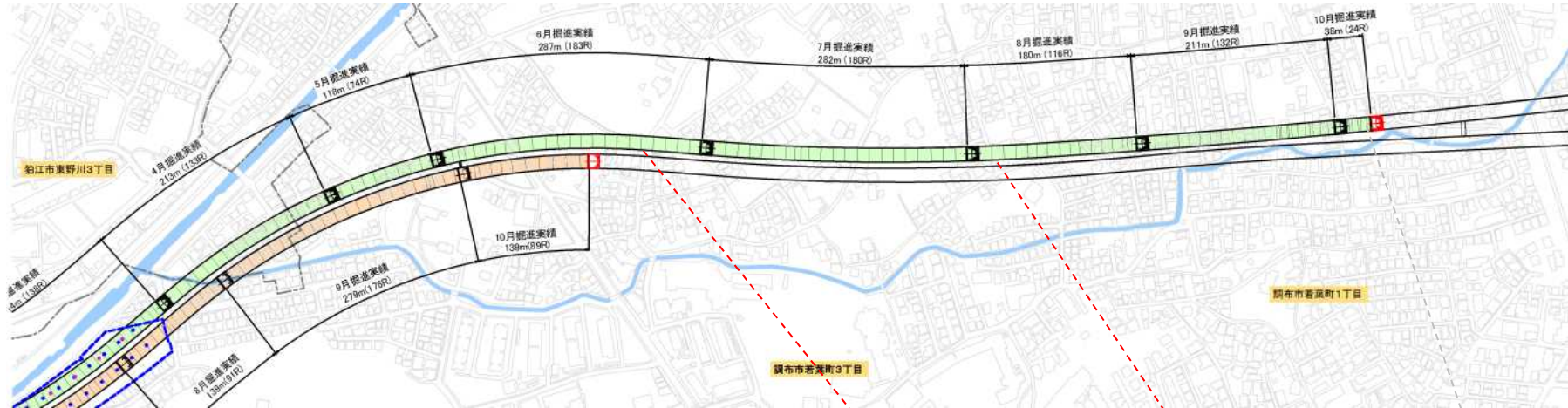


凡 例

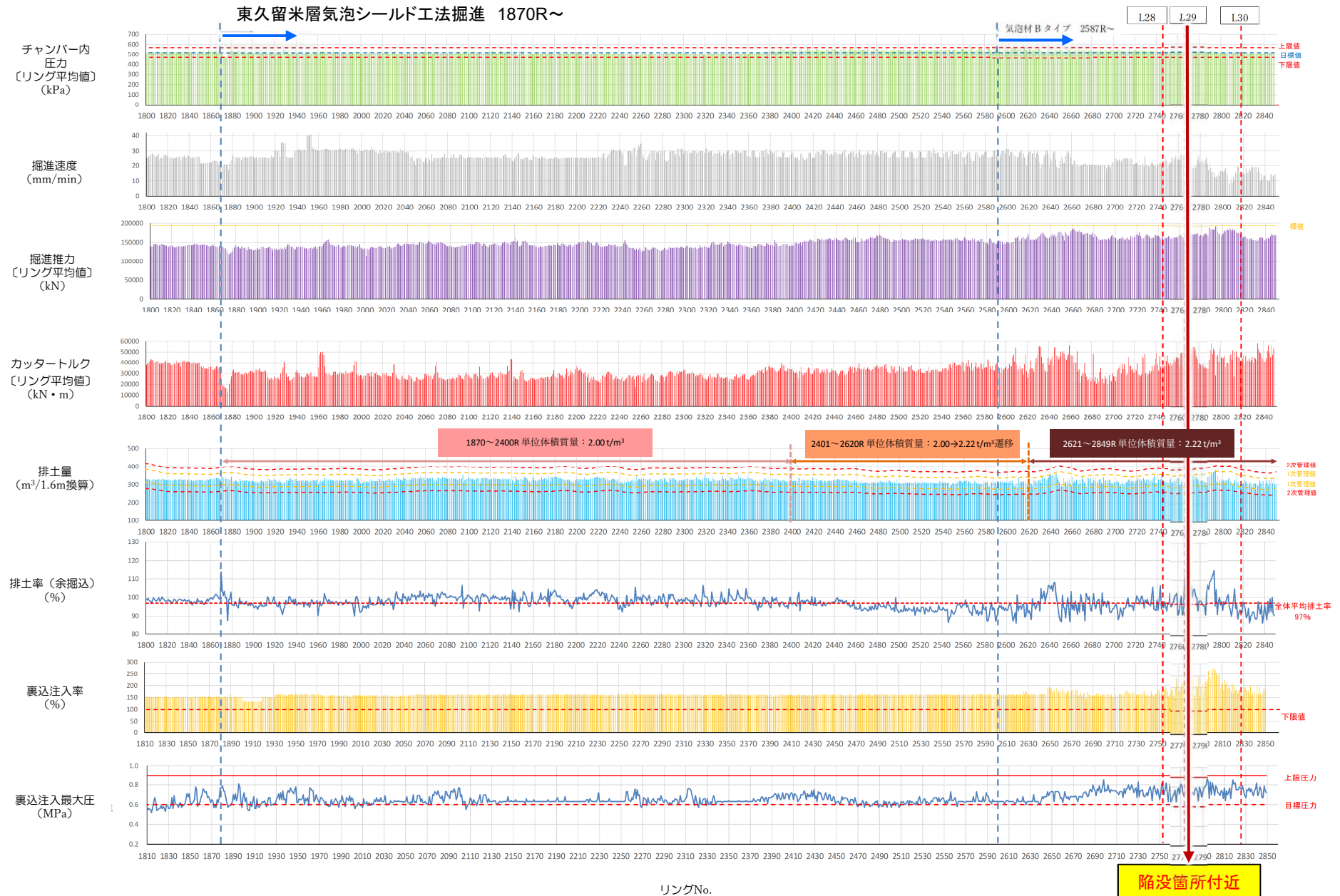
地質時代	地 層 名	地質記号	層 相
完新世	盛土、埋土	B	硬凝り土主体
	沖積層	A	軟質な粘性土、腐植土
	関東ローム層	Lm	火山灰質粘性土
	ローム質粘土層	Lc	粘土化した関東ローム層
	立川礫層	Tg	砂 礫
	武蔵野礫層	Mg	砂 礫
	世田谷層	Seto	細粒分の多い粘性土
第四紀 更新世		Setg	砂 礫
	江戸川層	Edc	粘性土
		Eds	砂
		Edg	砂礫
	舎人層	Tonc	粘性土
		Tons	砂
		Tong	砂礫
上総層群	東久留米層	Hic	粘性土
		His	砂
	北多摩層	Hig	砂礫



陥没・空洞の推定メカニズム [陥没箇所周辺の地盤]

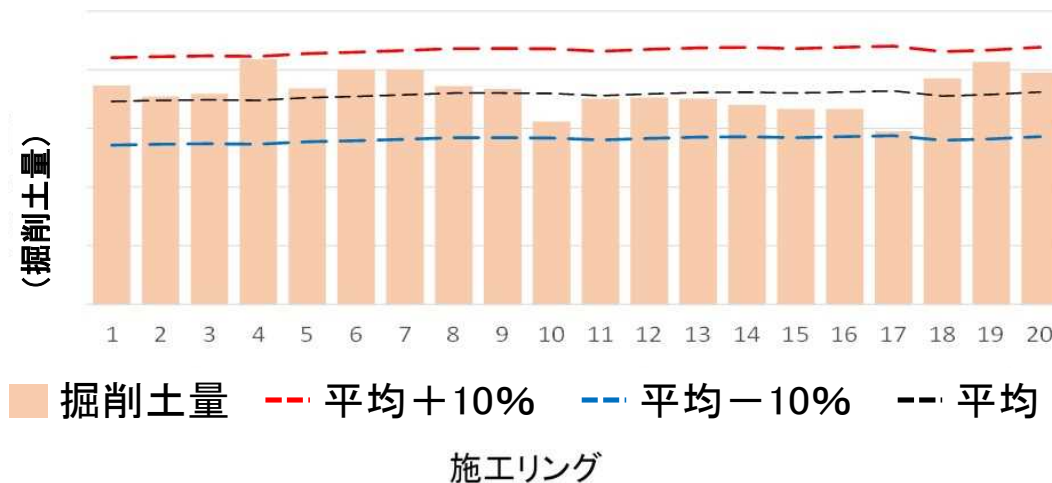
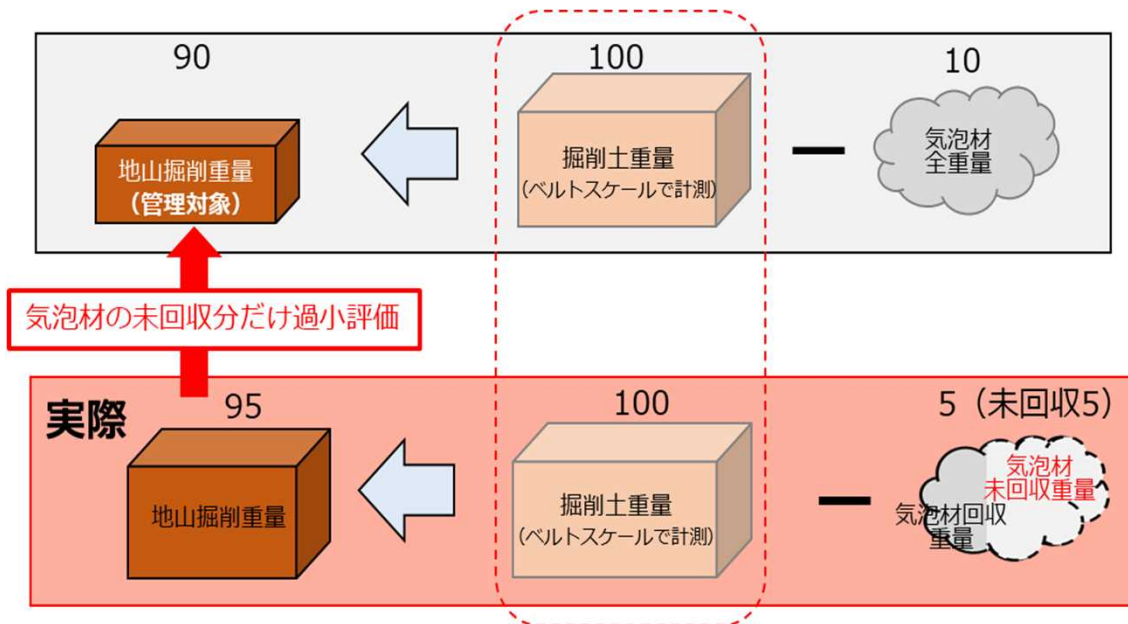


陥没・空洞の推定メカニズム [シールド掘進データ]

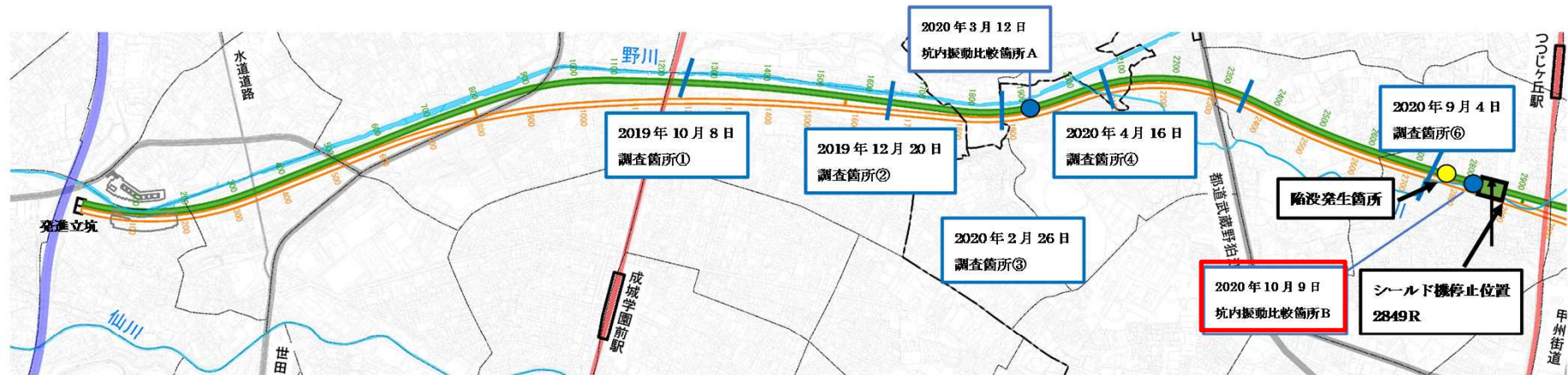


陥没・空洞の推定メカニズム [シールド掘進データ・排土管理]

- 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、 $\pm 10\%$ 以内を1次管理値、 $\pm 20\%$ 以内を2次管理値として設定



陥没・空洞の推定メカニズム [振動計測結果]

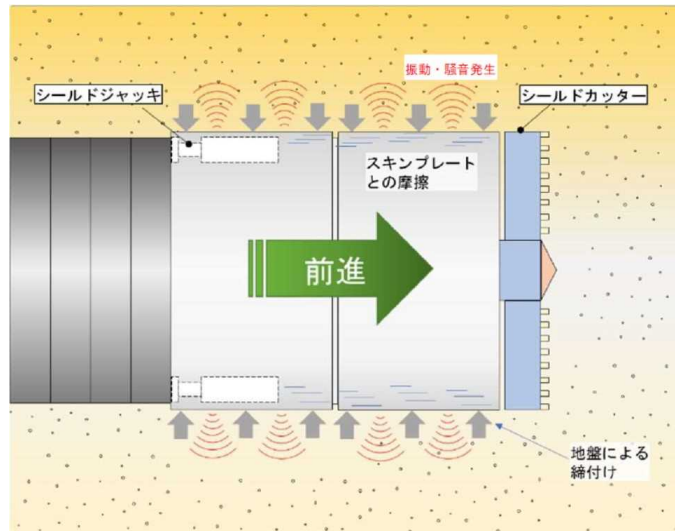


調査箇所	シールド機 先端からの 平面距離	調査日	調査時間	振動レベルL10(dB)	
				停止中最大	掘進中最大
①	掘進方向より左約50m	2019年 10/8(火)	18:00~23:00	27	43
	直上付近			28	41
	掘進方向より右約70m			24	31
②	掘進方向より左約50m	2019年 12/20(金)	18:00~23:00	29	37
	直上付近			24	37
	掘進方向より右約85m			26	33
③	掘進方向より左約100m	2020年 2/26(水)	15:00~23:00	26	40
	直上付近			25	45
	掘進方向より右約85m			27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

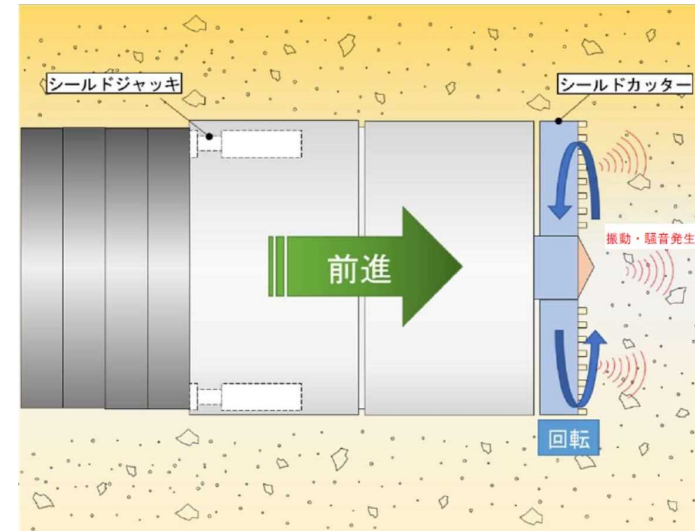
調査箇所	シールド機 先端からの 平面距離	調査日	調査時間	振動レベルL10(dB)	
				停止中最大	掘進中最大
④	掘進方向より左約55m	2020年 4/16(木)	13:00~23:00	37	45
	直上付近			25	42
	掘進方向より右約85m			22	36
⑤	掘進方向より左約80m	2020年 6/23(火)	13:00~23:00	25	39
	直上付近			30	47
	掘進方向より右約95m			25	38
⑥	掘進方向より左約70m	2020年 9/4(金)	13:00~21:00	41	44
	直上付近			31	46
	掘進方向より右約85m			24	36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

陥没・空洞の推定メカニズム [振動メカニズム]

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

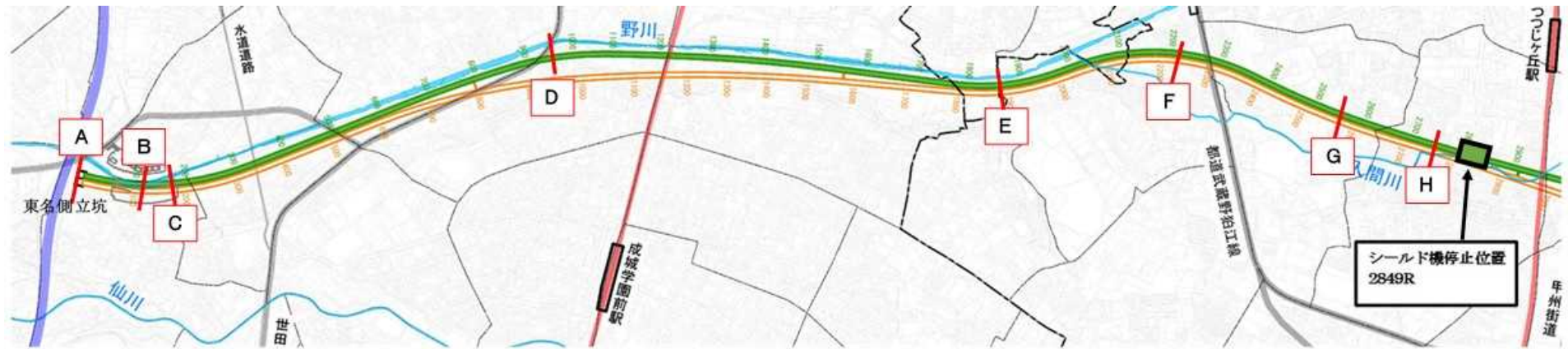


2. シールドマシンのカッターヘッドで、地山を削り取る際に発生する振動・騒音



- ・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。

陥没・空洞の推定メカニズム〔施工に関する経緯〕



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面図を基に、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20％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舎人礫層を流用して気泡材Bタイプ43％まで調整する計画であった。） - 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3～15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） ・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。 ・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 ・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舎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。 - 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。

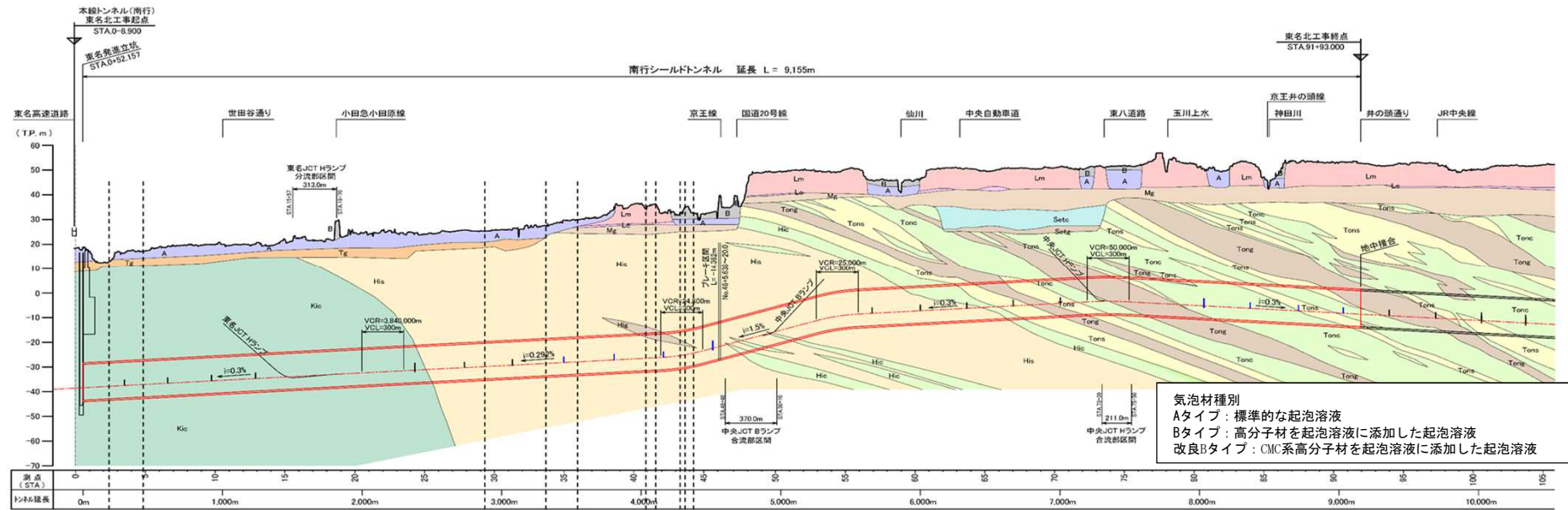
陥没・空洞の推定メカニズム〔施工に関する経緯〕

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）

陥没・空洞の推定メカニズム〔施工に関する経緯〕

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 ・ 振動の間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。
		<u>2667R(8月26日)より、掘進時間 8:00～20:00に変更した。(振動の間合せ増加を踏まえた対応)</u>
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。
		<u>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。(夜間の振動の間合せ増加を踏まえた対応)</u>
		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、鉱物系充填材(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)

陥没・空洞の推定メカニズム〔施工に関する経緯〕



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 Aタイプ 0.5%～2.0%	空気を使用しない起泡溶液 0.1%～1.0%	気泡材 Aタイプ	気泡材 Bタイプ	気泡材 Aタイプ	気泡材 Bタイプ	気泡材 Bタイプ	気泡材 Bタイプ	気泡材 Bタイプ	気泡材 改良Bタイプ	気泡材 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を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弱締めが発生することが多いことからマシン外周部の周囲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攪拌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攪拌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結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										

陥没・空洞の推定メカニズム [カッターヘッド回転不能事象の発生]



※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	28 m ³	33 m ³	23 m ³	20 m ³	33 m ³	36 m ³	28 m ³	14 m ³	24 m ³
カッター 気泡材注入量	起泡溶液 4.8 m ³ 空気 0.5 m ³	起泡溶液 2.4 m ³ 空気 1.0 m ³	起泡溶液 4.3 m ³ 空気 12.1 m ³	起泡溶液 5.9 m ³ 空気 17.3 m ³	起泡溶液 10.4 m ³ 空気 36.2 m ³	起泡溶液 10.7 m ³ 空気 21.9 m ³	起泡溶液 34.0 m ³ 空気 83.2 m ³ ※1	起泡溶液 11.0 m ³ 空気 29.4 m ³	起泡溶液 4.4 m ³ 空気 20.9 m ³
	5.3 m ³	3.4 m ³	16.4 m ³	23.2 m ³	46.6 m ³	32.6 m ³	117.2 m ³	40.4 m ³	25.3 m ³
チャンバー 起泡溶液注入量	-	-	3.6 m ³	5.9 m ³	5.7 m ³	1.8 m ³	3.6 m ³	5.4 m ³	0.6 m ³

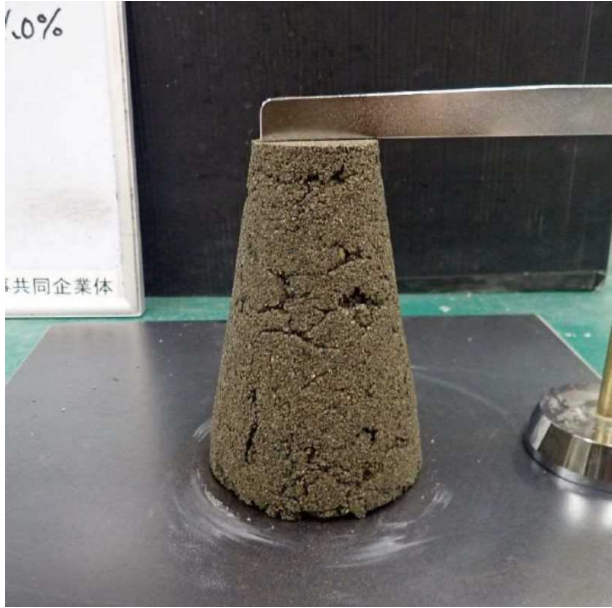
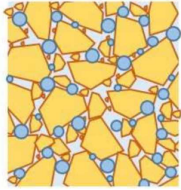
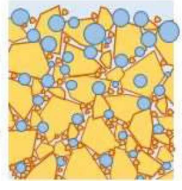
※1：カッタートルク過負荷解除に時間を要したため、他箇所より注入量が多くなっている。

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	25 m ³	28 m ³	17 m ³	5 m ³	5 m ³	11 m ³	108 m ³
カッター 気泡材注入量	起泡溶液 24.2 m ³ 空気 29.9 m ³	起泡溶液 47.7 m ³ 空気 14.9 m ³	起泡溶液 38.4 m ³ 空気 8.2 m ³	起泡溶液 19.0 m ³ 空気 1.2 m ³	起泡溶液 27.4 m ³ 空気 1.3 m ³	起泡溶液 19.2 m ³ 空気 11.2 m ³	起泡溶液 89.9 m ³ 空気 42.9 m ³
	54.1 m ³	62.6 m ³	46.6 m ³	20.2 m ³	28.7 m ³	30.4 m ³	132.8 m ³
チャンバー 起泡溶液注入量	8.8 m ³	2.3 m ³	5.6 m ³	2.7 m ³	4.6 m ³	3.0 m ³	43.1 m ³

ベントナイト溶液：28.6 m³

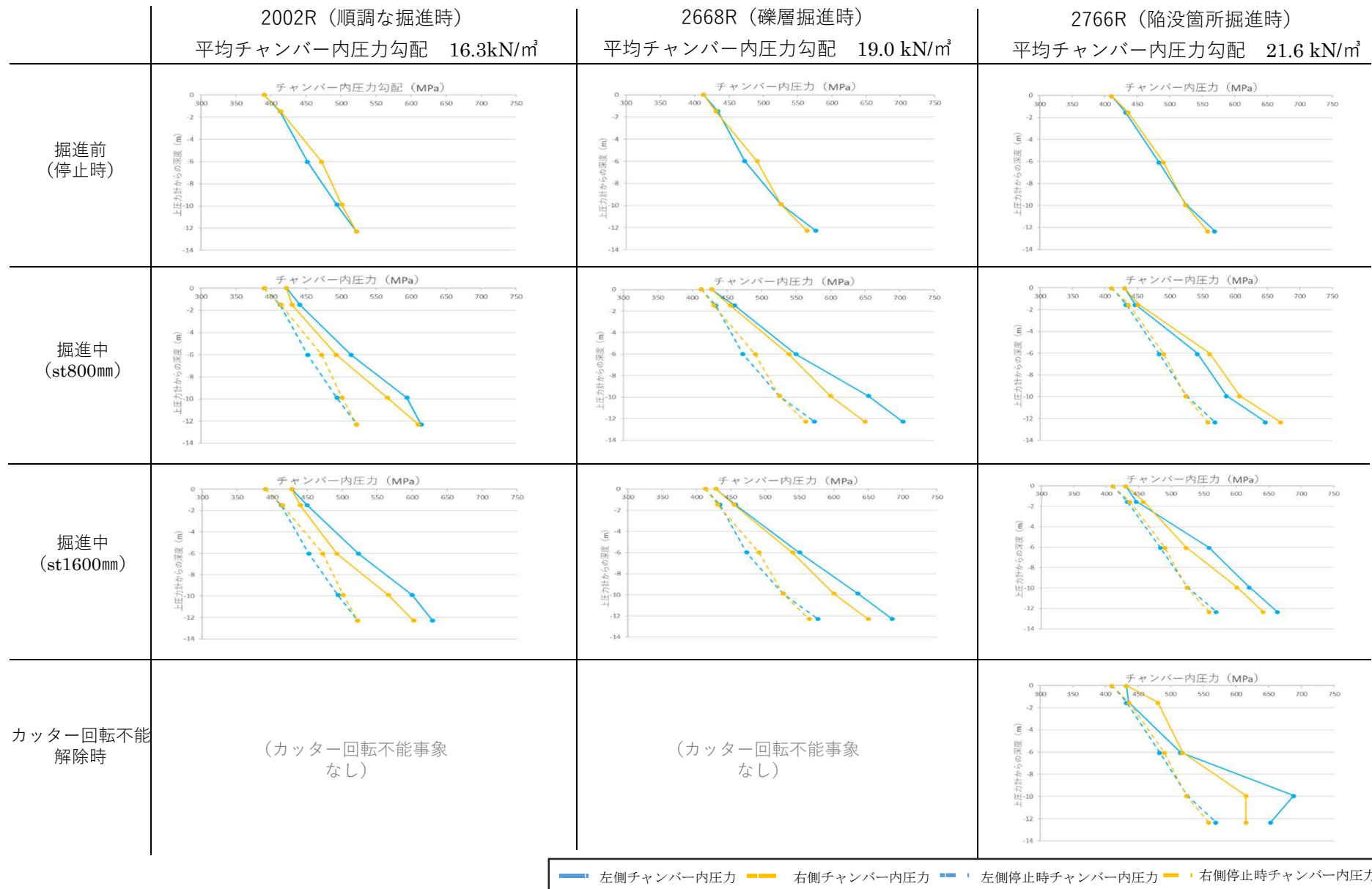
鉱物系充填材：87.0 m³

陥没・空洞の推定メカニズム [カッターヘッド回転不能事象の発生原因]

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)	
		(掘進中のチャンパー内)  気泡材が分離して土砂にまとまりがない (停止中のチャンパー内)  気泡材 上昇 土粒子 沈降 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。	

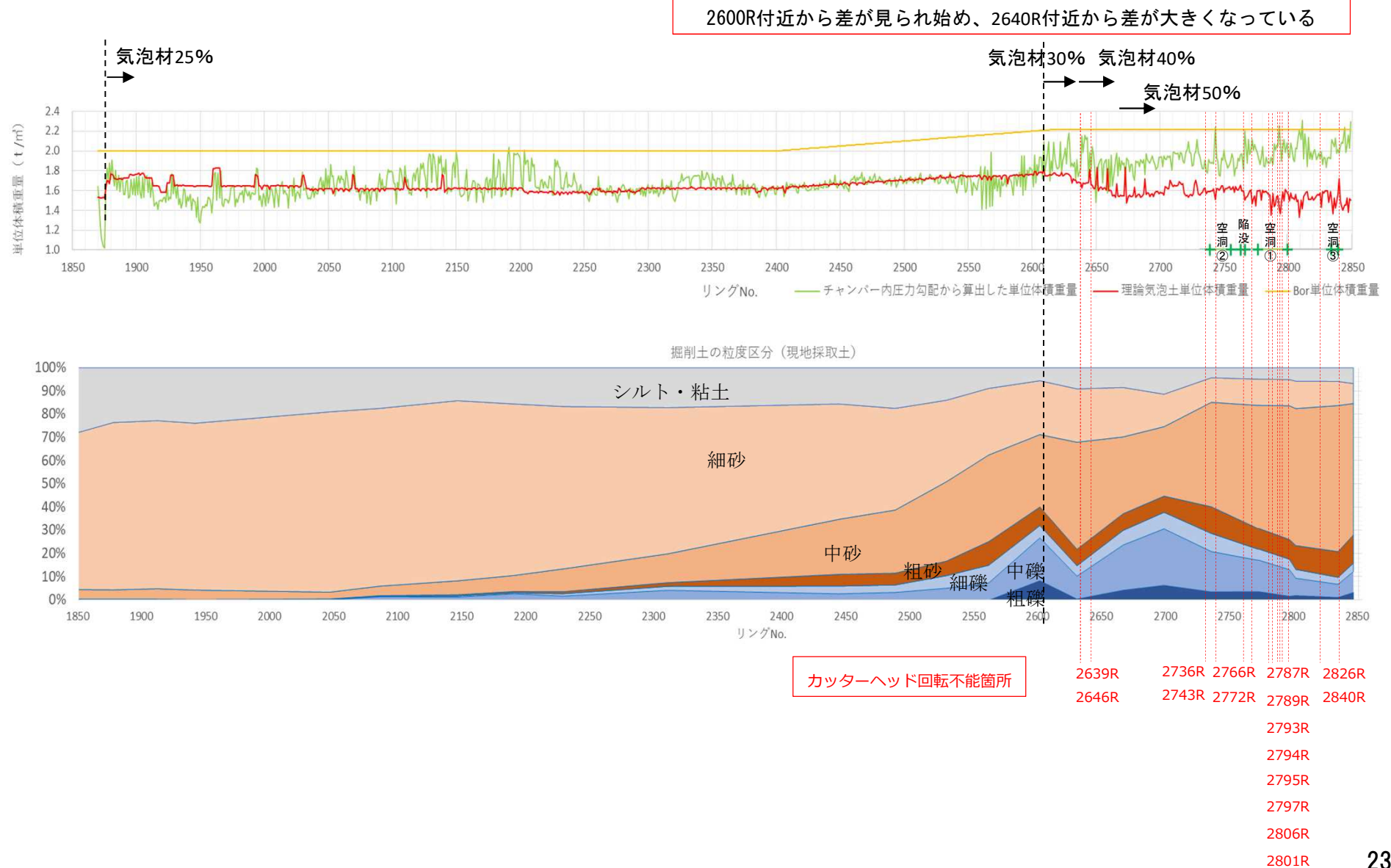
陥没・空洞の推定メカニズム [チャンバー内圧力勾配]

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。



陥没・空洞の推定メカニズム [掘進中の塑性流動化状況の把握]

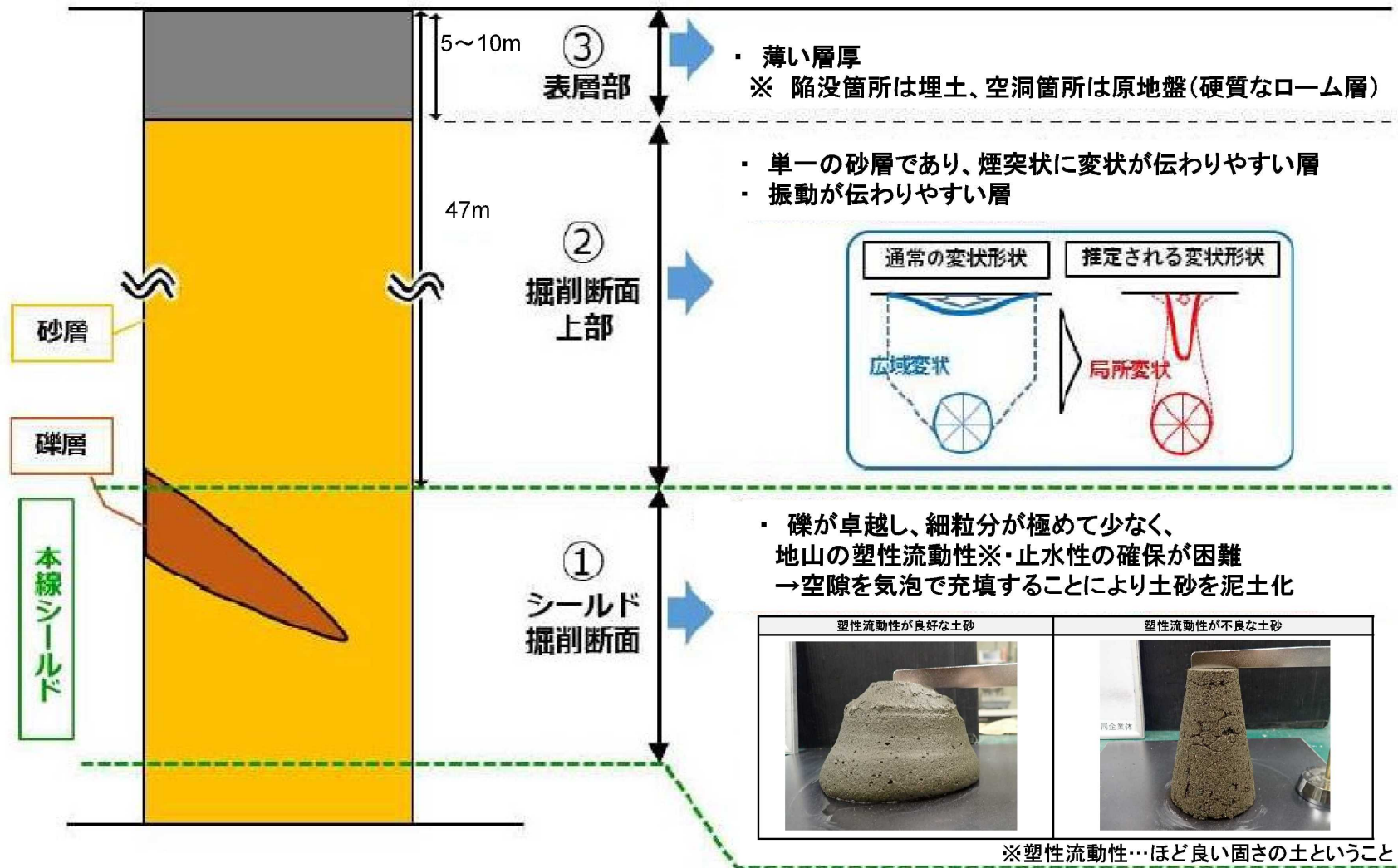
チャンバー内圧力勾配から算定した単位体積重量の比較



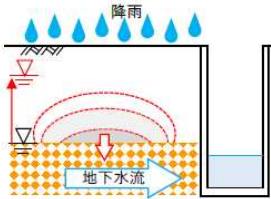
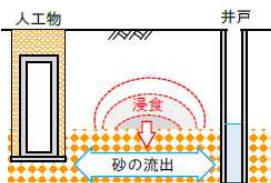
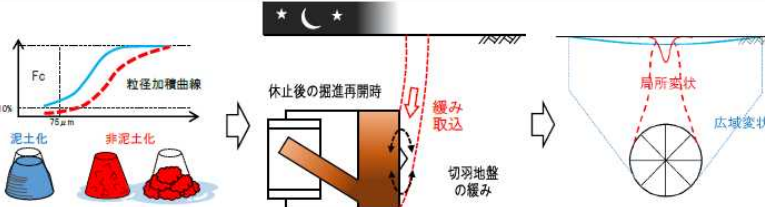
陥没・空洞の推定メカニズム[陥没箇所周辺の特殊な地盤条件]

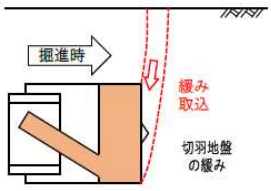
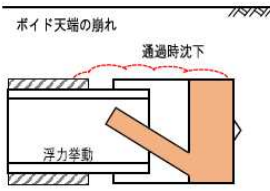
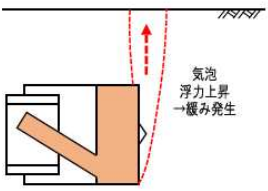
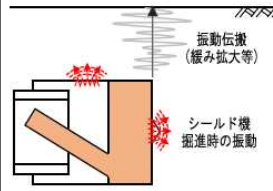
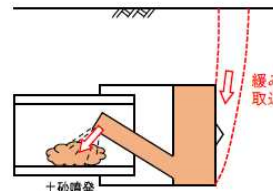
○ 陥没・空洞箇所周辺は、次の全てに該当する、東京外環全線の中で特殊な地盤条件

①塑性流動性・止水性の確保が困難な掘削断面、②変状が伝わりやすい掘削断面上部、③薄い層厚の表層部



陥没・空洞の推定メカニズム [要因の分析]

		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	
概要		 埋設管 接続部漏水・吸い込み	 降雨 地下水流	 人工物 井戸 浸食 砂の流出	 休止後の掘進再開時 掘り取込 切羽地盤の緩み 局所陥伏 広域変状	
		地下埋設物からの漏出・吸い込み ・下水道接続部等の漏水 ・下水道接続部等の吸い込み	地下水流、地下水変動、大雨による浸食 ・自然浅層地下水による浸食	人工物の存在による影響や人工物の埋戻し部の浸食 ・井戸、排水樹、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	閉塞及び閉塞解除作業の影響 ・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	

		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
概要		 掘進時 掘り取込 切羽地盤の緩み	 ボイド天端の崩れ 通過時沈下 浮力挙動	 気泡 浮力上昇 掘り取込	 振動伝達 (掘り取込等) シールド機掘進時の振動	 掘り取込 土砂噴発
		掘進時の影響 ・チャンパ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	掘進後のボイドによる影響 ・ボイド天端の崩れ	空気のかのり上昇による影響 ・気泡に用いる空気の影響による浮力上昇 ・空気の上昇による掘り取込	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 ・カッター付近の振動による締固め・局所的液状化	シールド施工時の土砂噴発等による影響 ・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

陥没・空洞の推定メカニズム〔各要因に関する考察〕

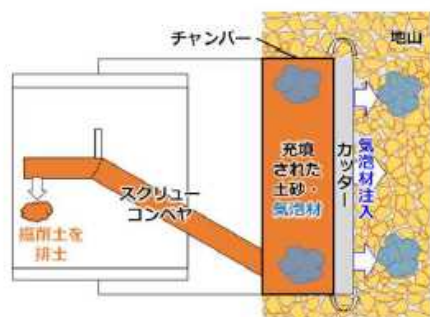
<各要因に関する考察>

	メカニズム	調査・検討で確認された事項	考察
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	・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	・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	・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	・陥没・空洞箇所の下部がトンネル方向に局部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。この過程で局部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、締め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	・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	・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空気の上昇による影響	・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・局部的な液状化による影響	・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	・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。

陥没・空洞の推定メカニズム【カッター回転不能に至る現象と解除作業手順】

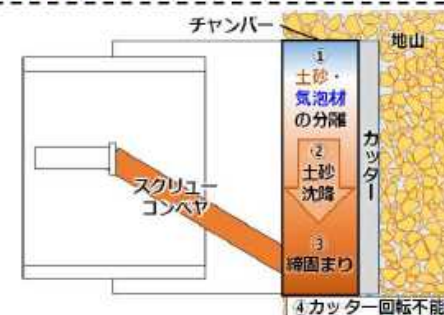
- 特殊な地盤条件下において行われたカッターが回転不能になる閉塞を解除するために行った特別な作業に起因するシールドトンネルの施工が陥没・空洞事故の要因と推定された。
- 具体的には、閉塞に起因して
 - その解除を目的とした特別な作業を行う過程で、地山から土砂がシールドマシンに流入した
 - 閉塞を解除した後の掘進時に、一部の気泡材が回収できず、掘削土量が過小に評価されていた等により、掘削土を想定より過剰に取り込んでいたこと等が陥没・空洞の要因と推定され、施工に課題があったとされた

- (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

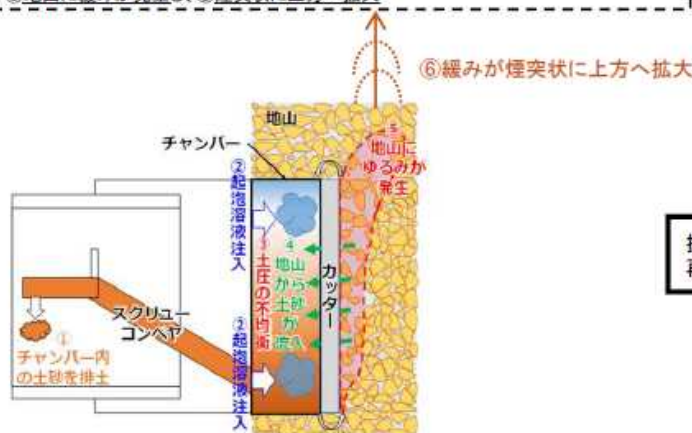


(2) 夜間
休止

- (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

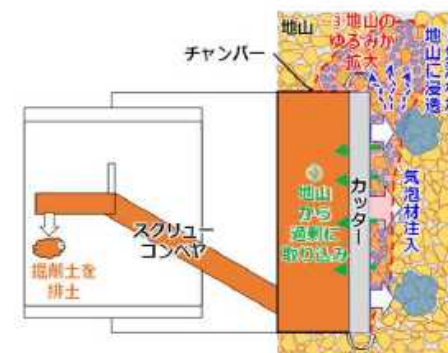


- (4) 閉塞解除作業
- カッターを再回転するため、①チャンバー内の締め固まった土砂を一部排出
 - 排出によるチャンバー内圧力の低下を防止するため、②直ちに排出土砂分の起泡溶液と置き換える必要がある
⇒ この際、③土圧の均衡がとれず、④地山から土砂がチャンバー内に流入すること、結果として、⑤地山に緩みが発生し、⑥地山に上方へ拡大



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小に評価し、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

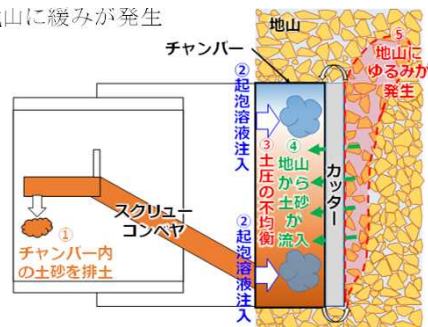


再発防止対策(陥没・空洞を発生させない取り組み)

<推定メカニズム>

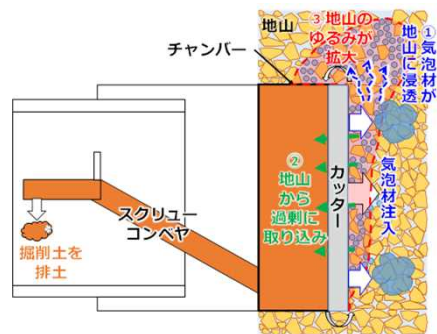
○閉塞及び閉塞を解除するための作業

- ・礫が卓越し、細粒分が少ない地盤では塑性流動性・止水性の確保が難しく、夜間休止時間にチャンパー内の土砂が分離・沈降し、締固まってしまい閉塞
- ・その閉塞解除のために、土砂を一部排出し、直ちに排出土砂分の起泡溶液と置き換える特別な作業を行う過程で、土圧の均衡がとれず
- ・地山から土砂がチャンパー内に流入
- ・地山に緩みが発生



○閉塞解除後の掘進

- ・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
- ・閉塞を解除するための作業により緩んだ地山に気泡材が浸透し、一部が回収されず
- ・掘削した地山重量を過少に評価され、土砂の取り込みが想定より過剰に生じた
- ・地山の緩みが拡大



<再発防止対策>

○掘削土砂を分離・沈降させない、閉塞させない対応

- ・一定時間にわたり掘削土砂の塑性流動性・止水性を確保

○過剰な土砂取り込みを生じさせない対応

- ・切羽を緩めない対応
- ・添加材の未回収傾向を把握
- ・排土量管理の強化

【万が一、閉塞が生じた場合】

○切羽を緩めない対応

(掘進前)

① シールド掘進地盤に適した添加材の選定等

- ・細粒分が少なく、均等係数が小さいなどの特殊な地盤については追加ボーリングを実施
- ・土質調査結果を踏まえ、事前配合試験を実施し、添加材を選定

(掘進中)

② 塑性流動性とチャンパー内圧力のモニタリングと対応

- ・チャンパー内圧力勾配などをリアルタイムに監視
- ・手触に加え、都度、試験により排土性状を確認
- ・適正なチャンパー内圧力の設定

(掘進中)

③ 排土管理の強化

- ・これまでの排土管理に加えて、より厳しい管理値や気泡材を控除しない新しい管理項目を設定
- ・管理値を超過した場合には、添加材の種類変更等の対応を適切に実施

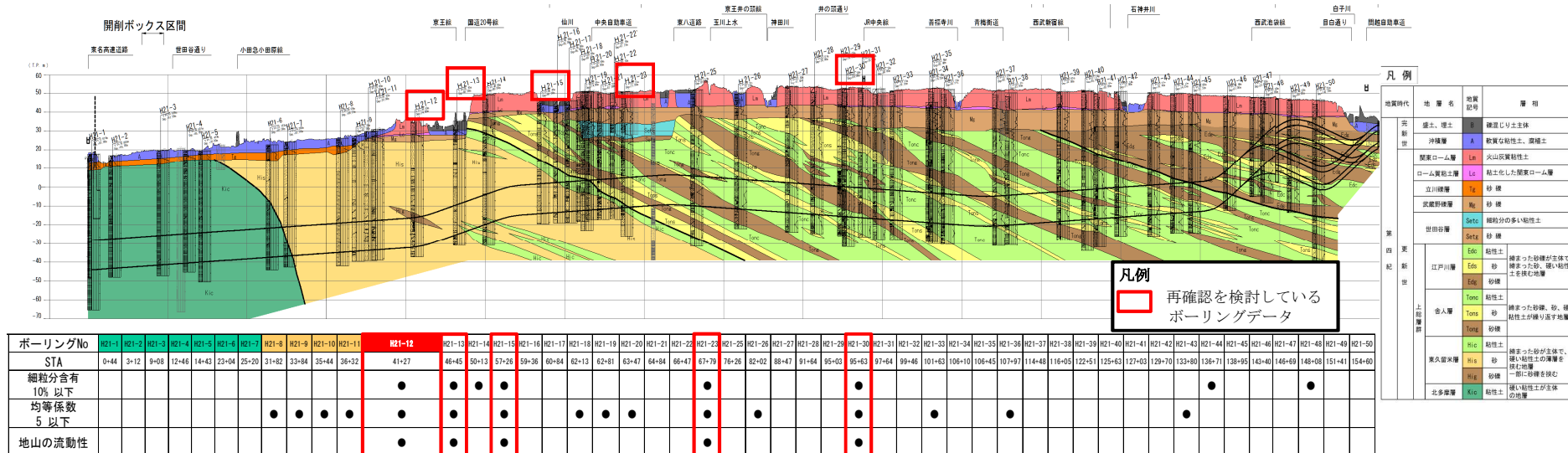
○ カッター回転不能（閉塞）時の対応

- ・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
- ・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

再発防止対策(陥没・空洞を発生させない取り組み)

追加ボーリング箇所

○陥没・空洞箇所周辺と同様の細粒分が少なく、均等係数が小さい地盤について、今後必要に応じて追加ボーリングを実施し、地盤の再確認を行う。



シールド掘進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、地盤に適した添加配合を再確認する。

○ 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

室内配合試験

様々な土質に対して添加材の適用性と注入量の目安等を把握する



様々な種類の添加材を組合せて最適な配合を選定する

塑性流動性が得られた状態



再発防止対策(陥没・空洞を発生させない取り組み)

塑性流動性のモニタリングと対応

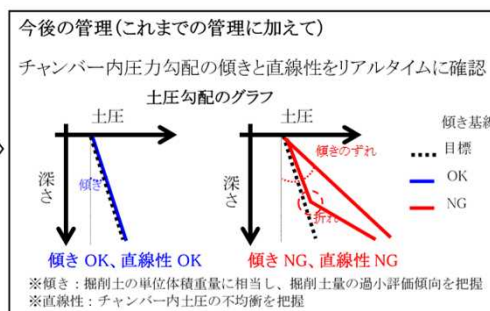
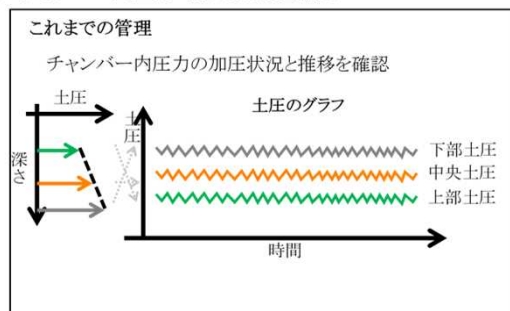
○これまでの塑性流動性の確認項目に加え、新たにチャンバー内の圧力勾配、ミニスランプ、粒度分布での確認を行うこととする。

○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。

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	- 掘進速度の低減（カッタートルク対応） - チャンバー内圧力設定の見直し - 添加材注入量の増加 - ベントナイト溶液を含めた添加材の種類変更 - 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	
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

○ チャンバー内圧力勾配の変化を確認



○ 排土性状の確認



再発防止対策(陥没・空洞を発生させない取り組み)

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。

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	・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 (m)	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)	【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	・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

○掘削土重量の確認

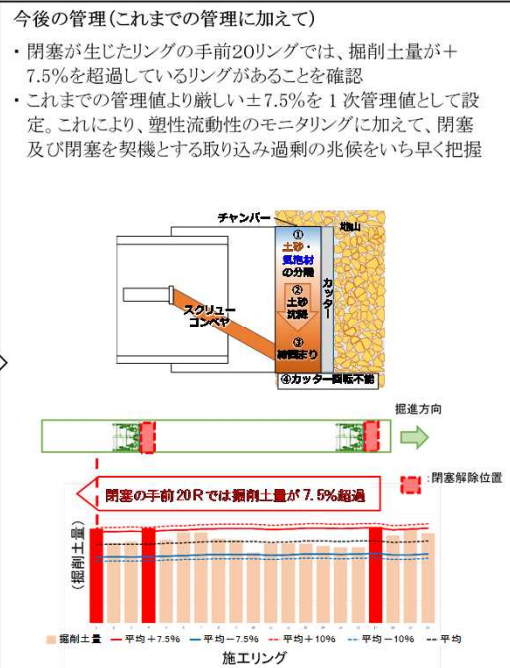
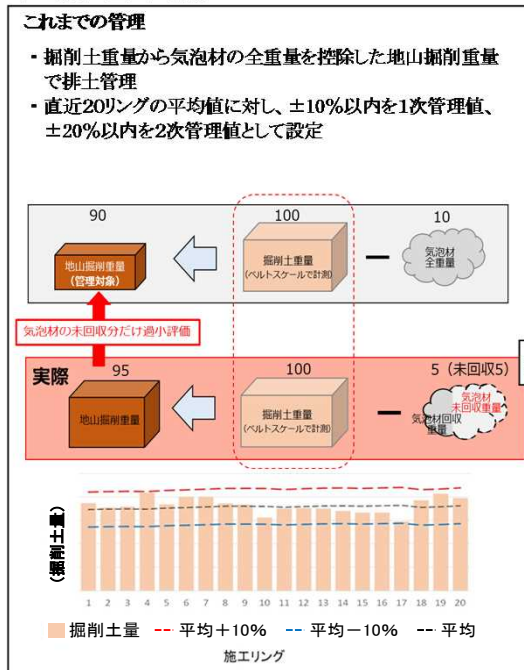


表 8-3 掘削土量の管理値を超過した際の対応

現象	対応
下限値超過	1次管理値 2次管理値
上限値超過	1次管理値 2次管理値

*赤字は追加および変更項目

再発防止対策(地域の安全・安心を高める取り組み)について



※1：状況に応じて実施
 ※2：設置箇所・手法は自治体と調整