

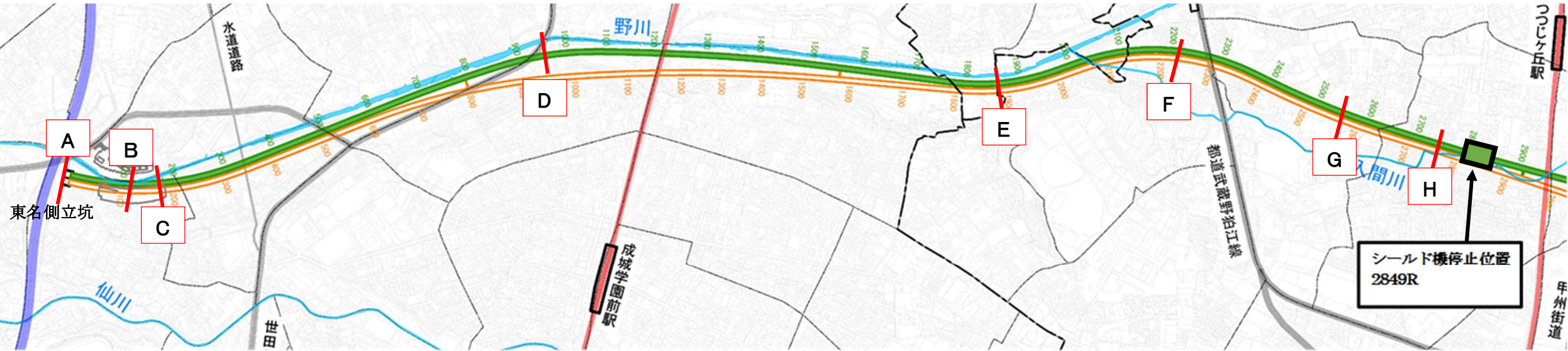
第6回 東京外環トンネル施工等検討委員会 有識者委員会

施工データ

令和3年 2月 12日

東日本高速道路株式会社関東支社東京外環工事事務所
鹿島・前田・三井住友・鉄建・西武特定建設工事共同企業体

1. 施工に関する経緯、施工方法の決定理由



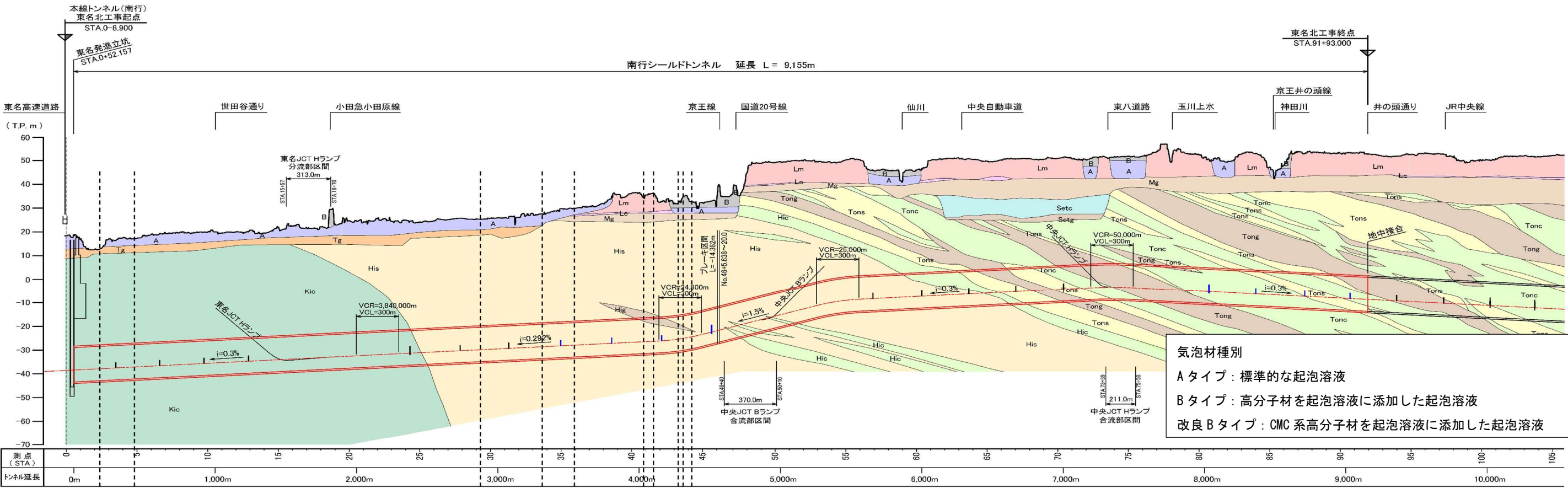
時期	記号	経緯
H24 年 7 月 ～H25 年 9 月		『東京外環トンネル施工等検討委員会』において、長距離かつ大断面の本線トンネル工事を施工するにあたり、近年の施工実績、施工ヤードの規模等から泥土圧シールドの適用について検討
H25 年 9 月		これまでの使用実績を踏まえ、発生土の有効利用の観点より、泥土圧シールド（気泡シールド工法）の適用を事業者にて決定
H25 年 11 月		本線シールドトンネル工事を泥土圧シールド（気泡シールド工法）として発注することとし、発注公告（NEXCO）
H26 年 4 月		本線シールドトンネル工事の契約 【泥土圧シールド（気泡シールド工法）】を指定工法（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舎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。） ・ 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） ・ 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。

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）

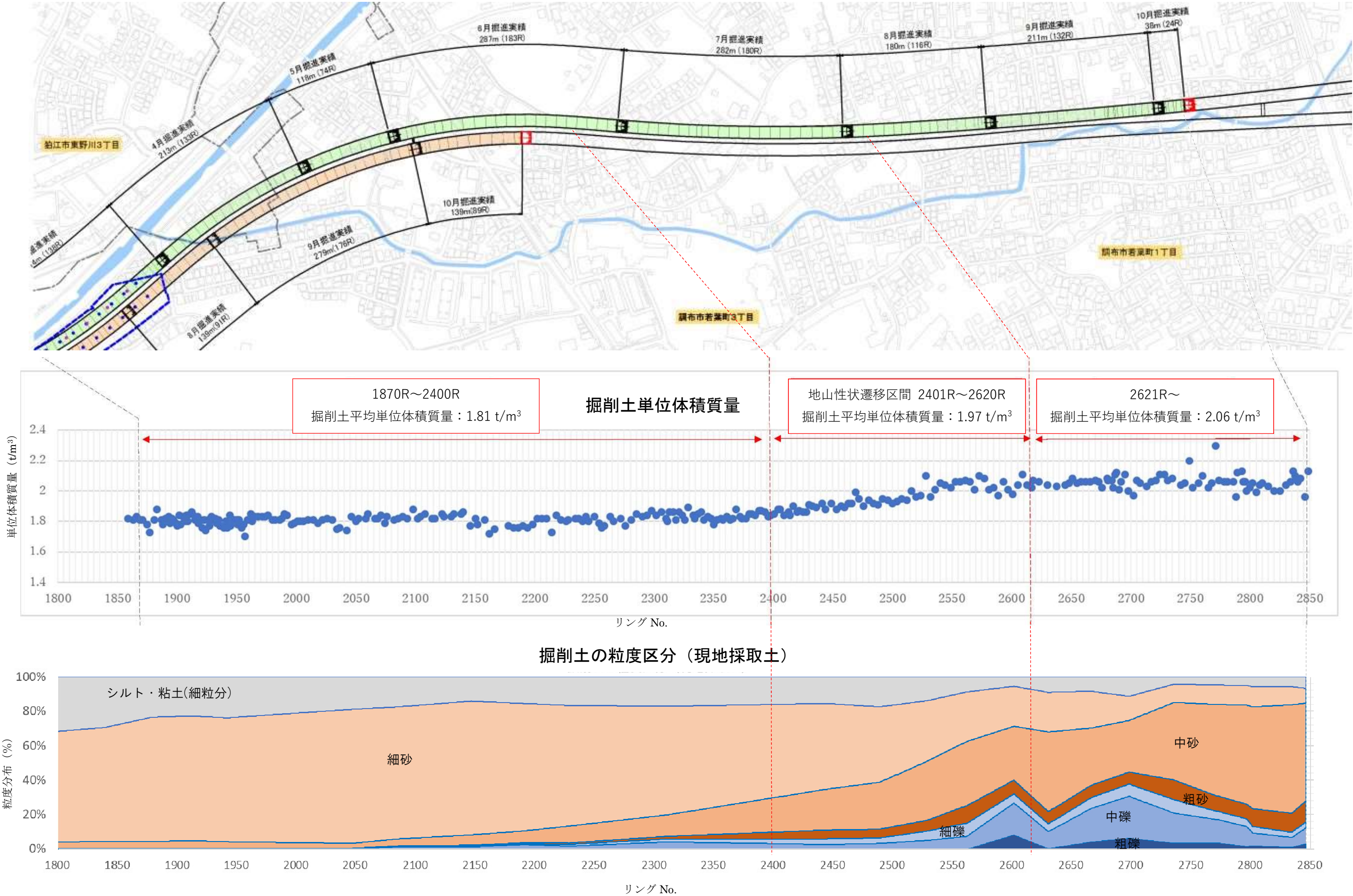
2. 掘進の経緯

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、チャンバ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。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。 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。							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

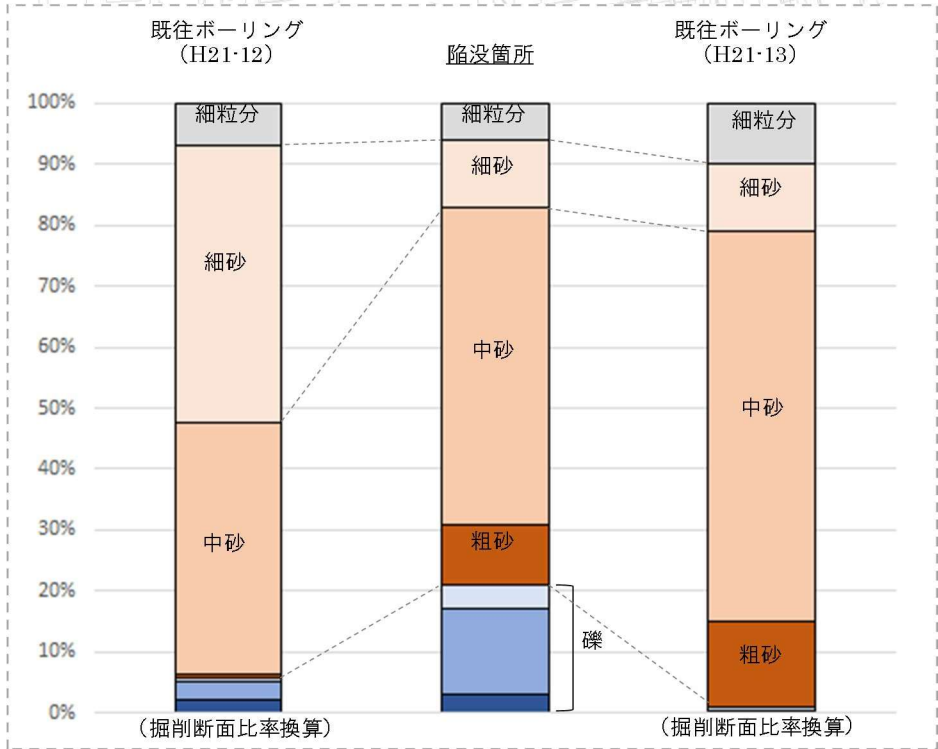
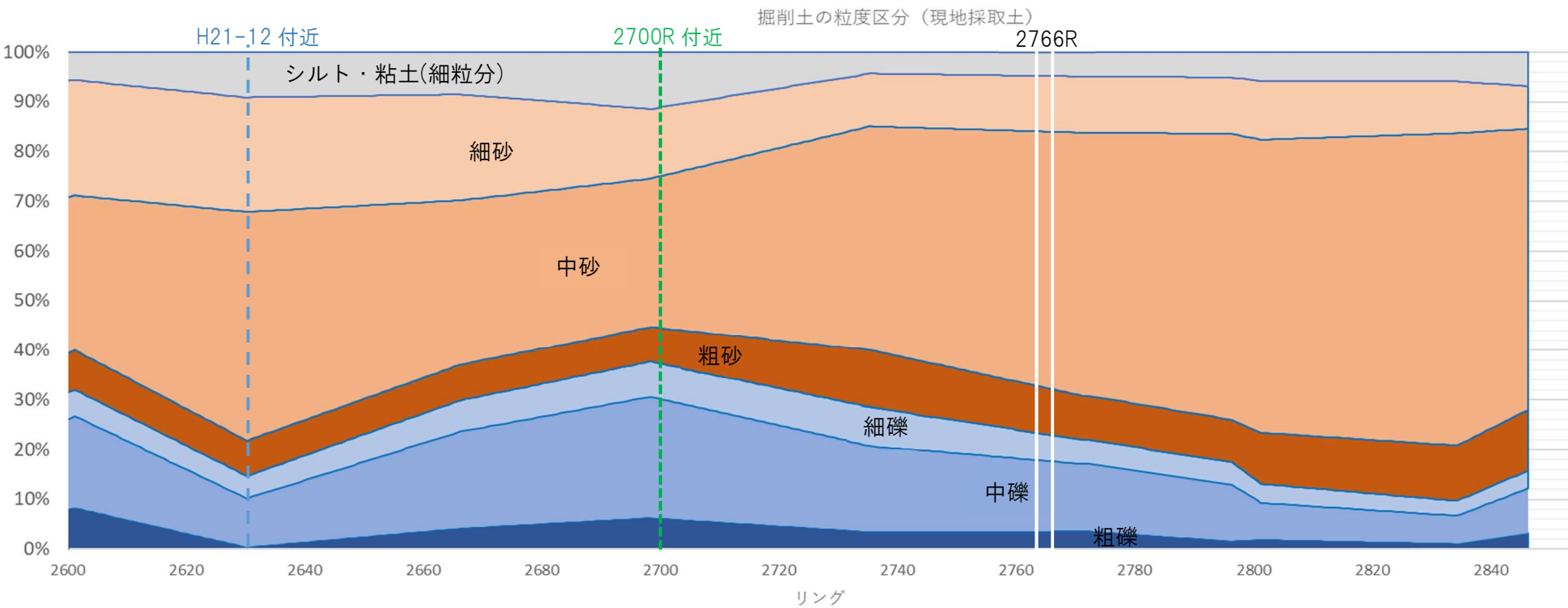
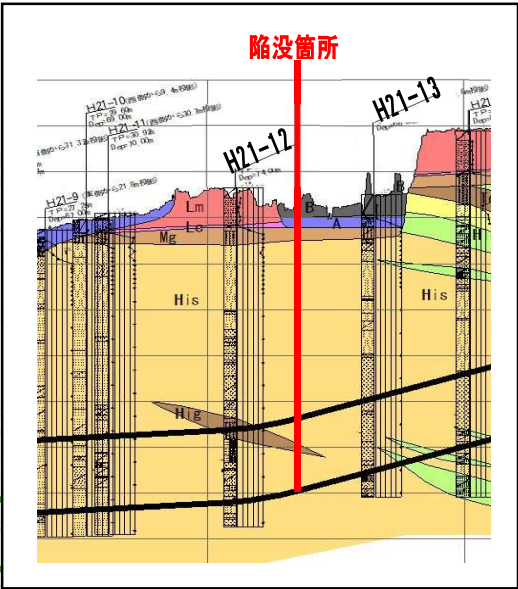
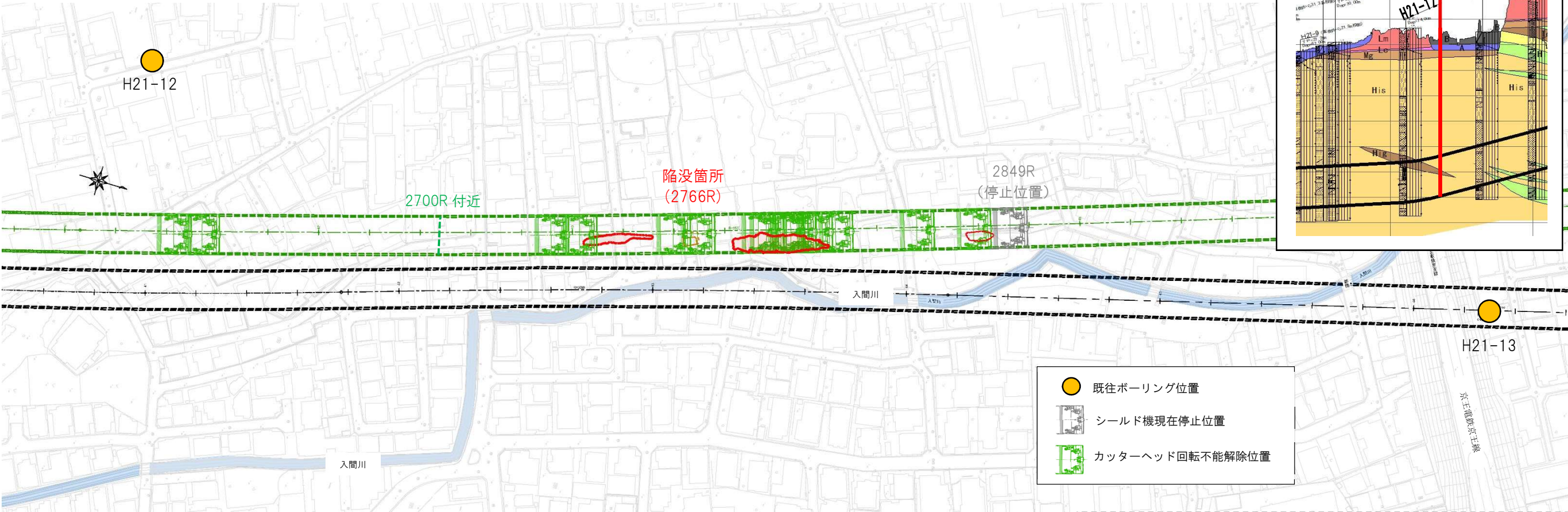
②東久留米層の掘削土砂性状(単位体積質量・粒度分布)



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。

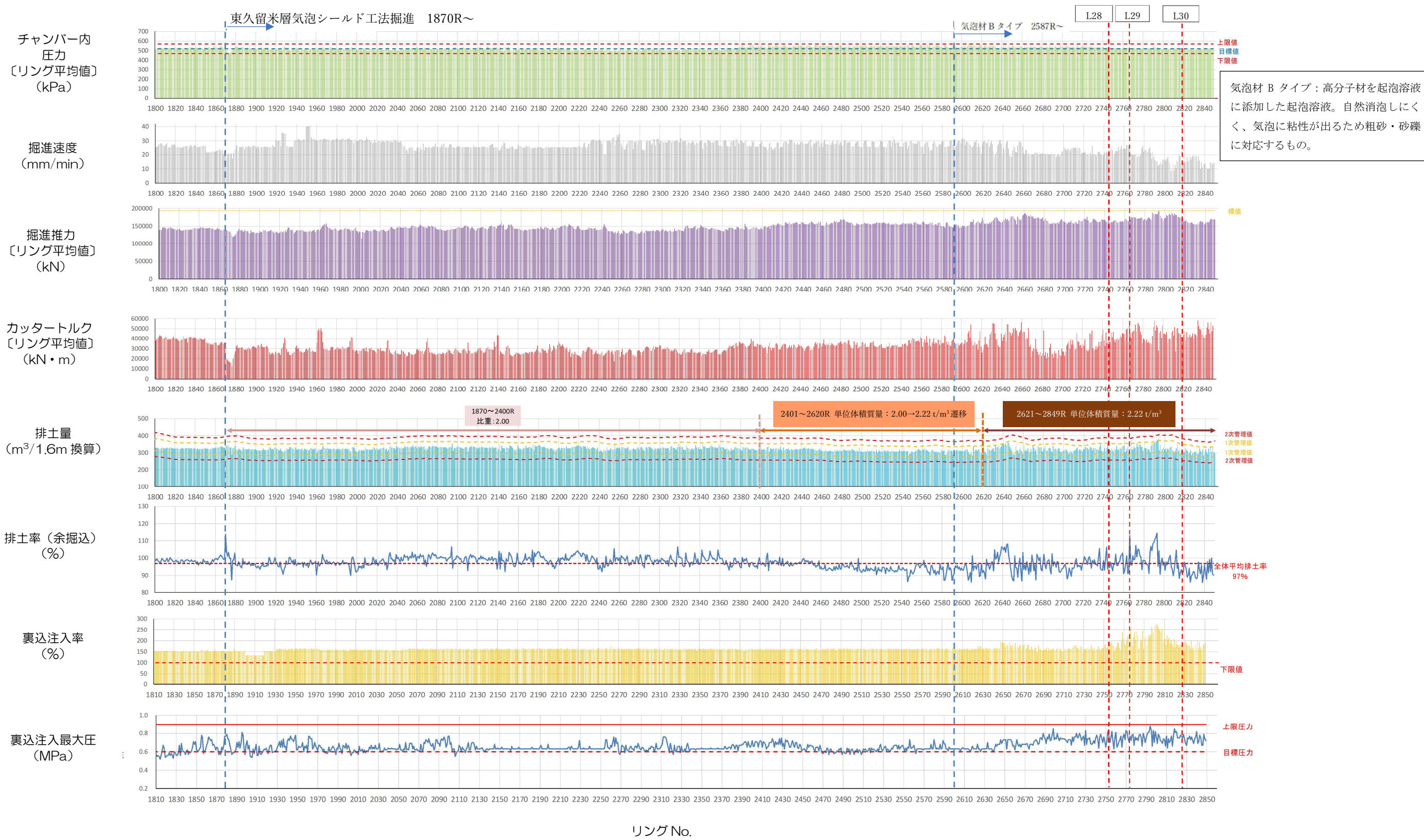
- ① 2600R 付近から、礫の出現に伴い、粘土・シルト（細粒分）及び細砂が徐々に減少している。
- ② 2700R 付近以降、粘土・シルト（細粒分）、細砂が急激に減少している。
- ③ 2700R 付近以降の粘土・シルト（細粒分）、細砂の極端な減少が、他と比べ施工条件が厳しくなった原因であると推定される。



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。

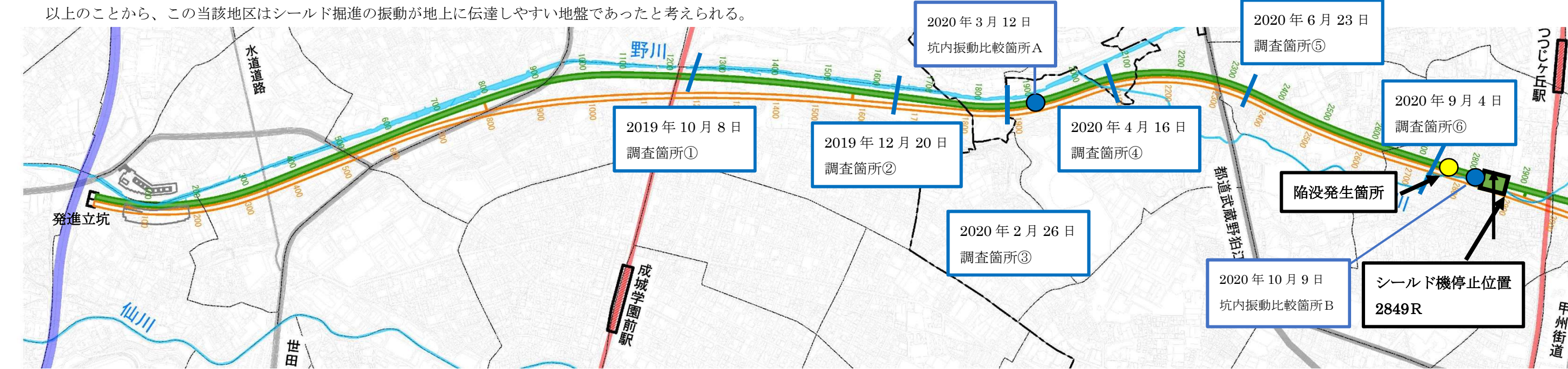


4. シールド掘進に伴う振動計測結果

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しか減衰してい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

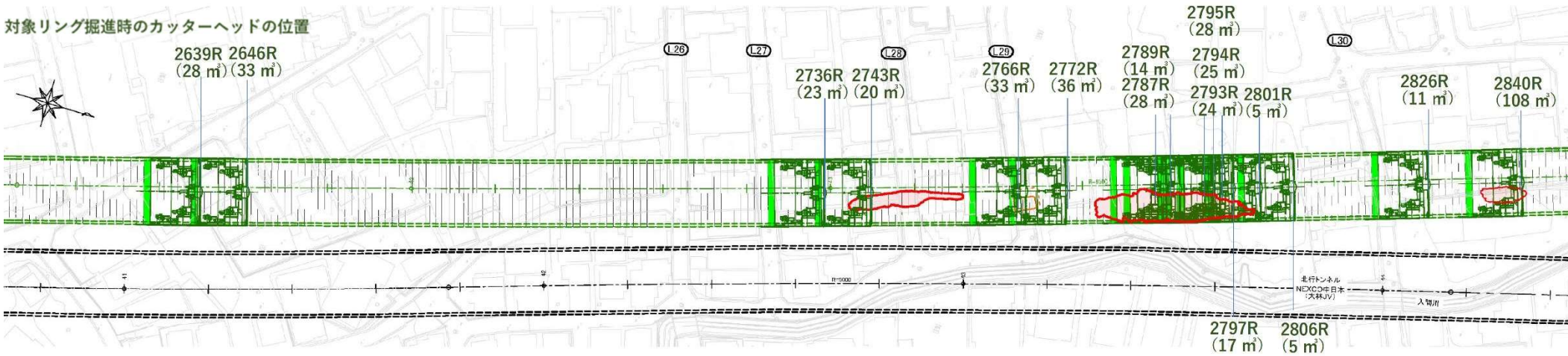
5. カッターヘッド回転不能事象の発生

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休止による停止中の時間経過とともにチャンバー内掘削土砂が分離・沈降が進行し、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	28㎡	33㎡	23㎡	20㎡	33㎡	36㎡	28㎡	14㎡	24㎡
カッター 気泡材注入量	起泡溶液 4.8㎡ 空気 0.5㎡	起泡溶液 2.4㎡ 空気 1.0㎡	起泡溶液 4.3㎡ 空気 12.1㎡	起泡溶液 5.9㎡ 空気 17.3㎡	起泡溶液 10.4㎡ 空気 36.2㎡	起泡溶液 10.7㎡ 空気 21.9㎡	起泡溶液 34.0㎡ 空気 83.2㎡ ※1	起泡溶液 11.0㎡ 空気 29.4㎡	起泡溶液 4.4㎡ 空気 20.9㎡
	5.3㎡	3.4㎡	16.4㎡	23.2㎡	46.6㎡	32.6㎡	117.2㎡	40.4㎡	25.3㎡
チャンパー 起泡溶液注入量	-	-	3.6㎡	5.9㎡	5.7㎡	1.8㎡	3.6㎡	5.4㎡	0.6㎡

※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㎡	28㎡	17㎡	5㎡	5㎡	11㎡	108㎡	
カッター 気泡材注入量	起泡溶液 24.2㎡ 空気 29.9㎡	起泡溶液47.7㎡ 空気 14.9㎡	起泡溶液 38.4㎡ 空気 8.2㎡	起泡溶液 19.0㎡ 空気 1.2㎡	起泡溶液27.4㎡ 空気 1.3㎡	起泡溶液19.2㎡ 空気 11.2㎡	起泡溶液89.9㎡ 空気 42.9㎡	
	54.1㎡	62.6㎡	46.6㎡	20.2㎡	28.7㎡	30.4㎡	132.8㎡	
チャンパー 起泡溶液注入量	8.8㎡	2.3㎡	5.6㎡	2.7㎡	4.6㎡	3.0㎡	43.1㎡	

ベントナイト溶液：28.6㎡

鉱物系充填材：87.0㎡

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。〔東京外環トンネル 発生土に関する対応マニュアル（H27.7）〕

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ったことから、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可能性がある。

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パ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らねたい。

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。

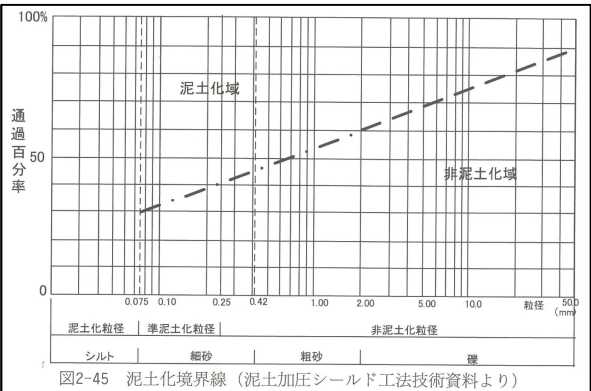


図2-45 泥土化境界線（泥土加圧シールド工法技術資料より）

〔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パ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。


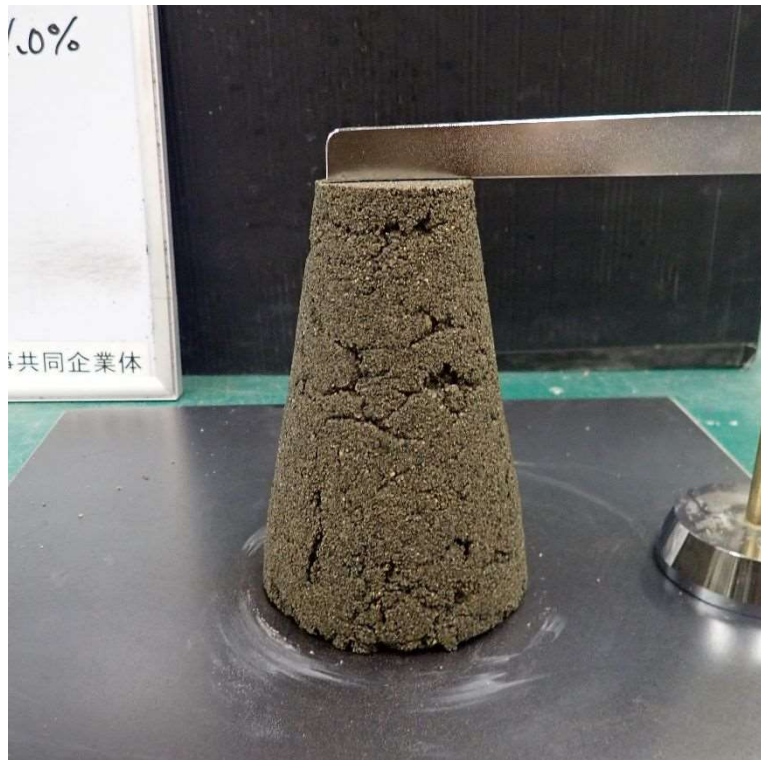
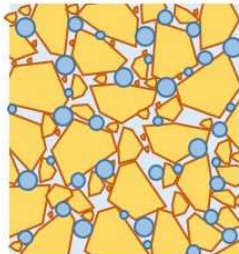
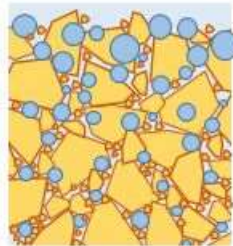
そこで、本工事では加泥材と気泡を併用することで両方の長所をいかし、より確実な切羽の安定を図ることとした。

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

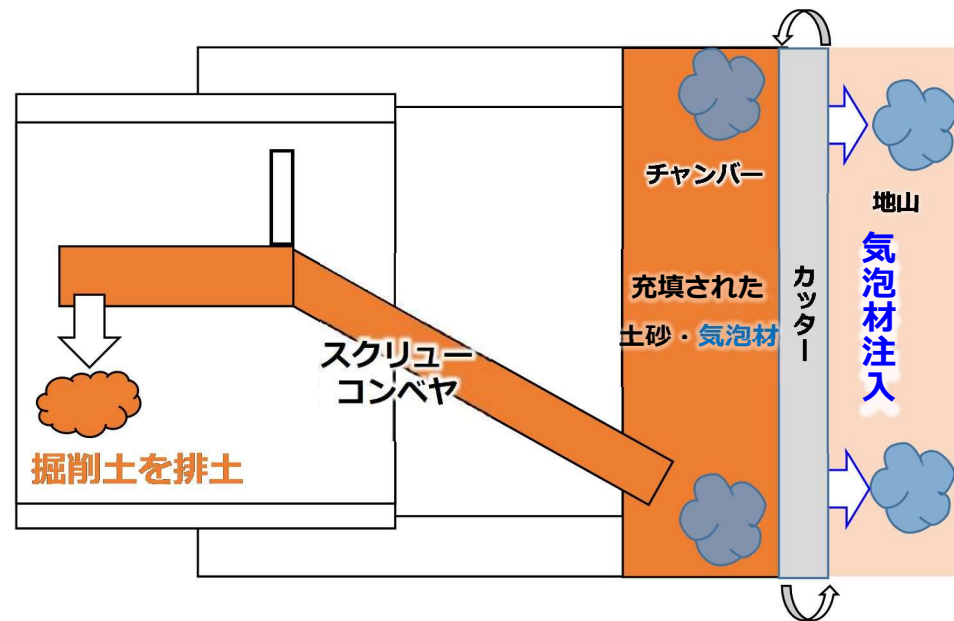
当該事象発生後に実施した気泡材混合土の配合試験により、当該区間のチャンバー内土砂は塑性流動性・止水性が悪い状態になっていたと判断される結果が得られた。
このことから、停止中のチャンバー内では時間経過にともない気泡材の分離（気泡材の上昇）が進行したと想定される。

当初想定イメージ	実際の施工時の想定状況		
		<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）</div> <div>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）

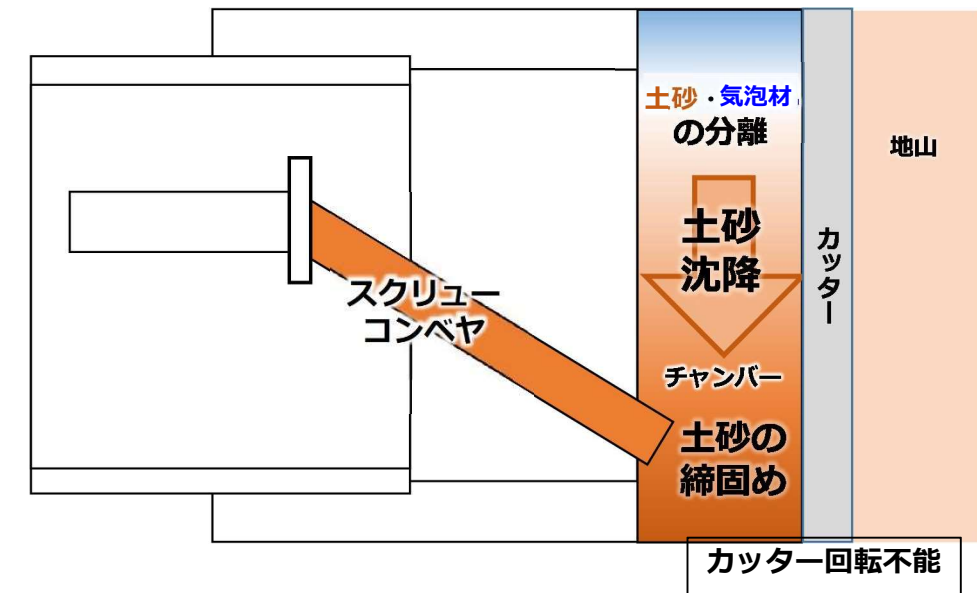
- チャンバー内土圧と地山からの圧力の均衡が取れている状態



②夜間
休止

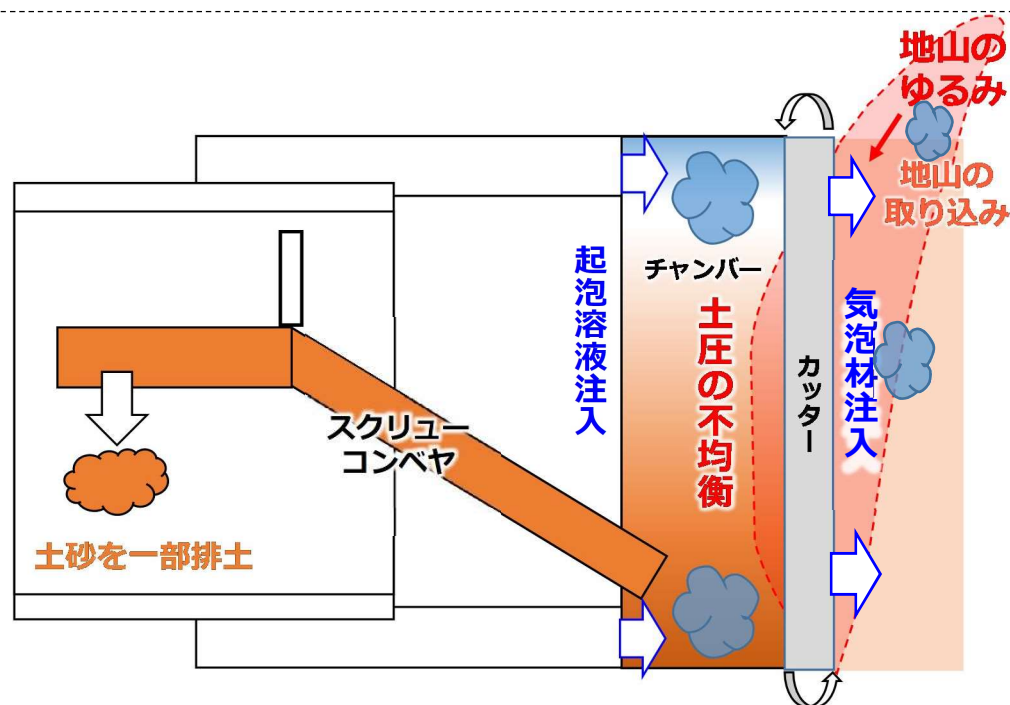
③翌朝（掘進休止後）

- 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

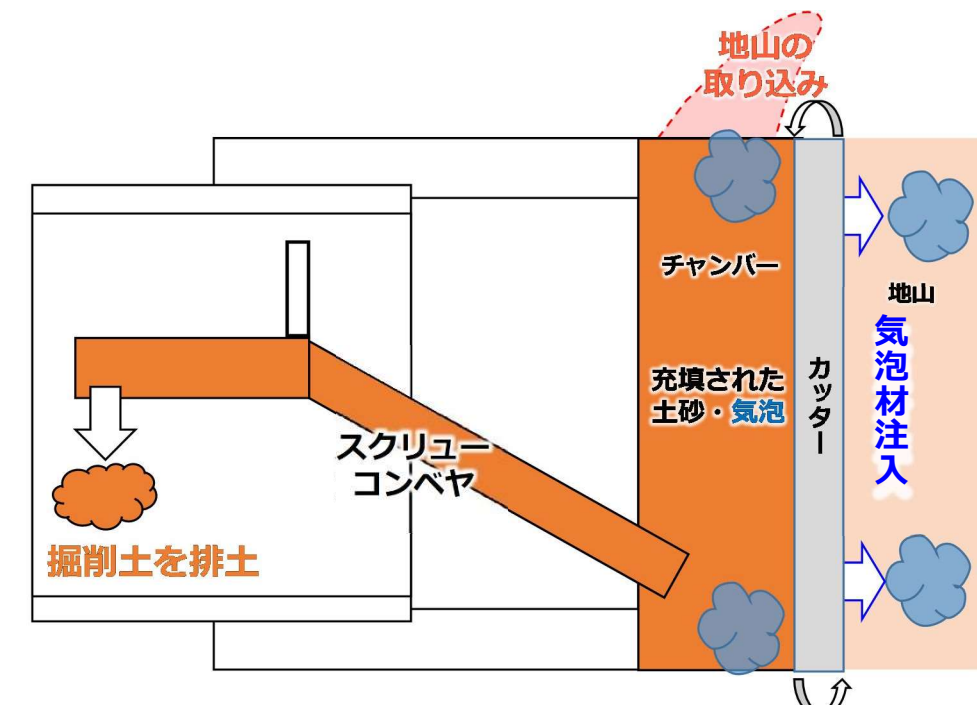
- (1) チャンバー内の土砂の一部を取り込み
- (2) 圧力低下防止のため、気泡材および起泡溶液を注入
⇒ この際、均衡が取れず、地山の一部流入の可能性



作業完了

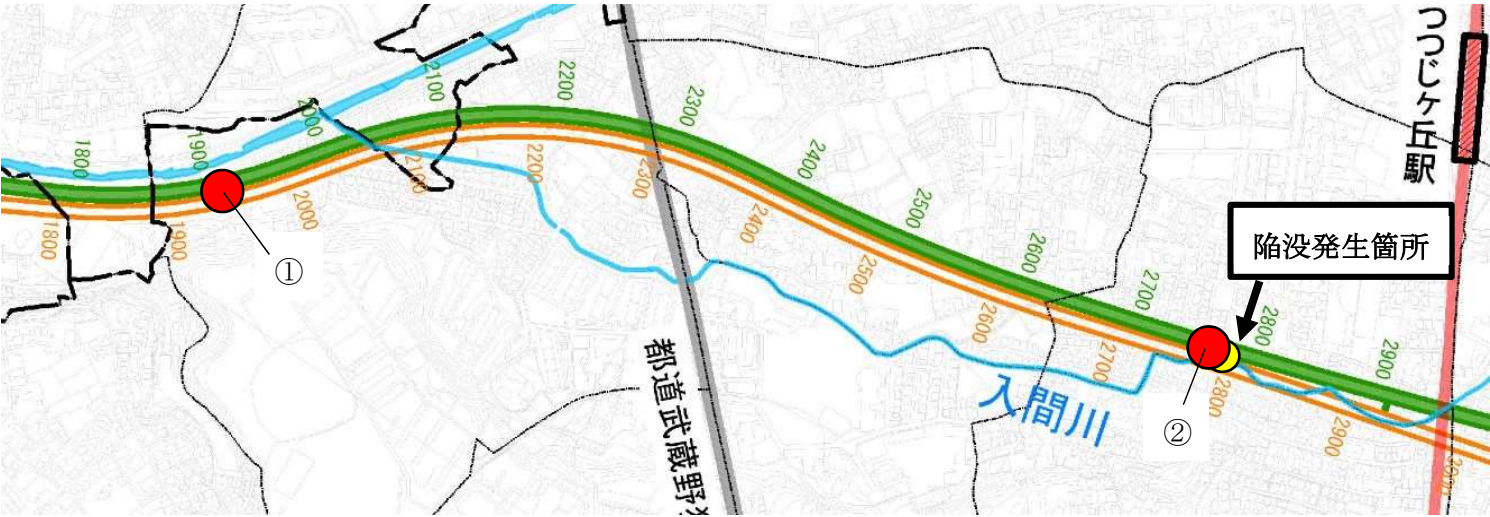
⑤復旧作業完了（再掘進）

- 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。

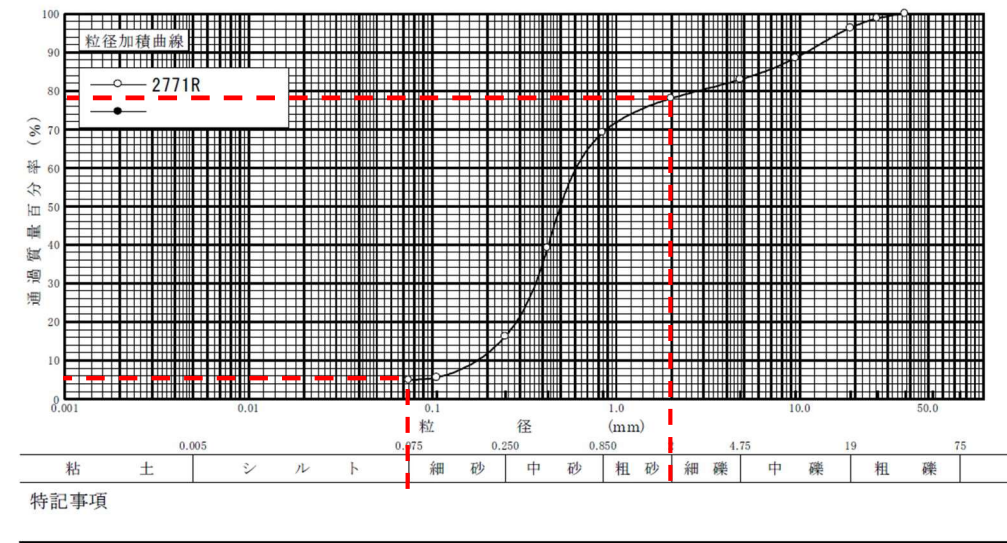
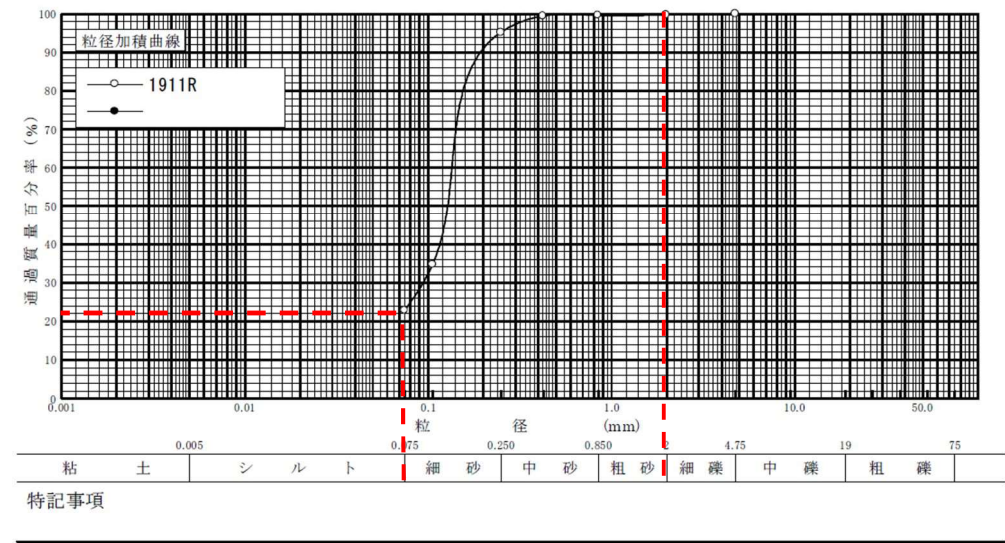


① 2020/3/10 谷戸橋付近

試料番号 (深さ)	1911R		試料番号 (深さ)	1911R	
	粒径mm	通過質量百分率%		粒径mm	通過質量百分率%
ふるい分け	75		粗礫分	0.0	
	53		中礫分	0.0	
	37.5		細礫分	0.2	
	26.5		粗砂分	0.1	
	19		中砂分	4.5	
い	9.5		細砂分	72.4	← 細砂
	4.75	100.0	シルト分	22.8	← シルト・粘土
	2	99.8	粘土分		
	0.85	99.7	2mmふるい通過質量百分率%	99.8	
	0.425	99.5	425μmふるい通過質量百分率%	99.5	
析	0.250	95.2	75μmふるい通過質量百分率%	22.8	
	0.106	34.7	最大粒径mm	4.75	
	0.075	22.8	60%粒径D ₆₀ mm	0.13	
			50%粒径D ₅₀ mm	0.13	
			30%粒径D ₃₀ mm	0.094	
沈降分			10%粒径D ₁₀ mm	-	
			均等係数U _c	-	
			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	
	粒径mm	通過質量百分率%		粒径mm	通過質量百分率%
ふるい分け	75		粗礫分	3.7	
	53		中礫分	13.4	← 礫分計 21.9%
	37.5	100.0	細礫分	4.8	
	26.5	98.8	粗砂分	8.9	
	19	96.3	中砂分	53.0	← 中砂
い	9.5	88.5	細砂分	11.3	
	4.75	82.9	シルト分	4.9	
	2	78.1	粘土分		
	0.85	69.2	2mmふるい通過質量百分率%	78.1	
	0.425	39.1	425μmふるい通過質量百分率%	39.1	
析	0.250	16.2	75μmふるい通過質量百分率%	4.9	
	0.106	5.7	最大粒径mm	37.5	
	0.075	4.9	60%粒径D ₆₀ mm	0.61	
			50%粒径D ₅₀ mm	0.50	
			30%粒径D ₃₀ mm	0.37	
沈降分			10%粒径D ₁₀ mm	0.18	
			均等係数U _c	3.38	
			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。

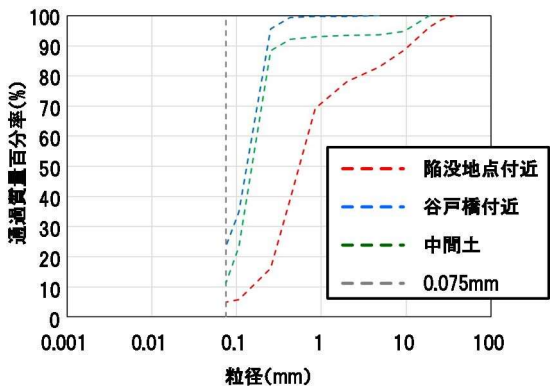
② 実施日

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

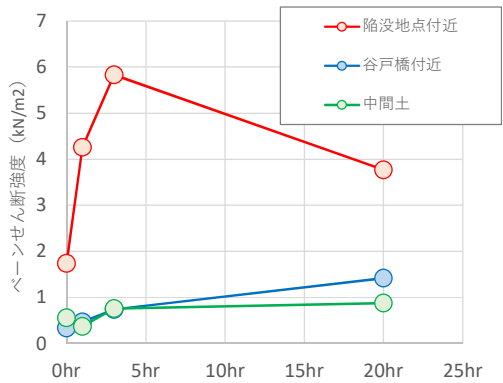
項目	陥没地点付近	谷戸橋付近	中間土	備 考
細粒分含有率	4.9%	23.6%	11.4%	
礫分含有率	21.9%	0.2%	6.6%	
設定地山含水比	12.9%	28.8%	29.1%	陥没地点 : H21-13 ボーリング調査データから設定 谷戸橋付近: H20-1 ボーリング調査データから設定 中間土 : H21-9 ボーリング調査データから設定
現場測定 排土含水比	12.4%	28.8%	30.0%	気泡材混合後の土砂の含水比が現場測定排土含水比になるように、試料土の含水比を調整した。
土粒子密度	2.711	2.693	2.713	地山含水比と同じ調査データから設定



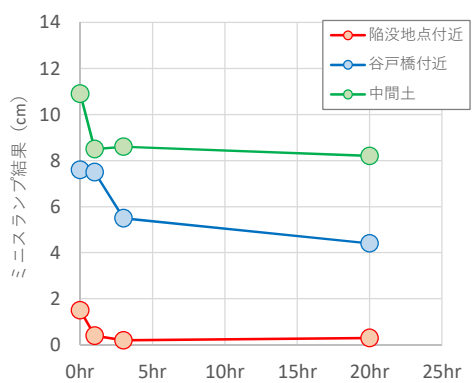
調査対象とした粒度試験結果

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

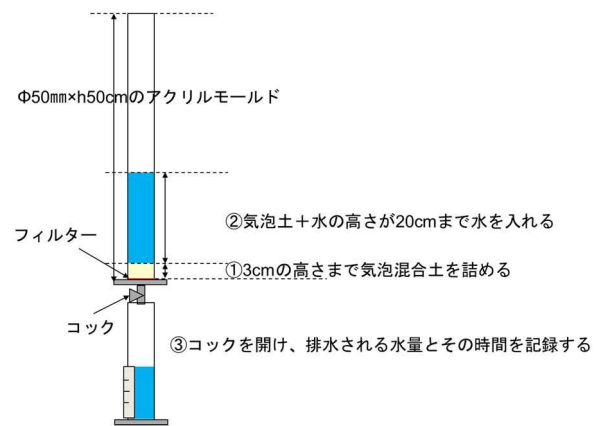


ベーンせん断試験結果

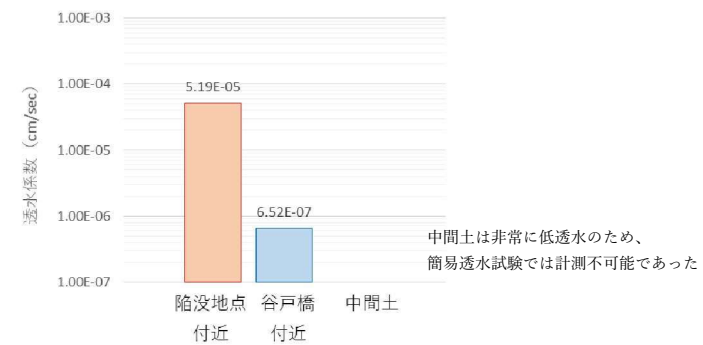


ミニスランプ試験結果

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。

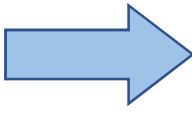
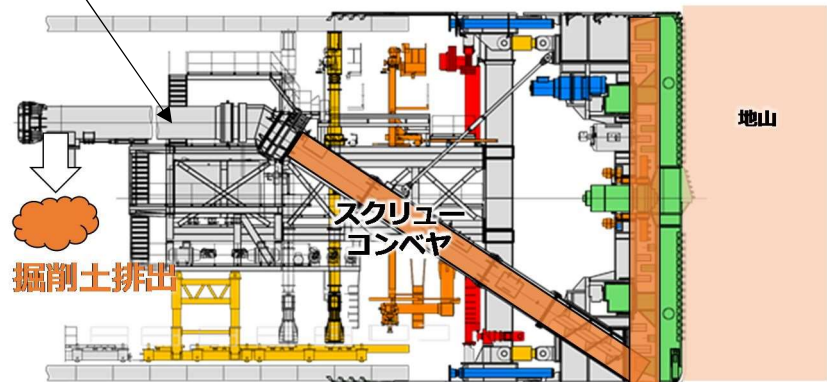
⑧カッターヘッド回転不能時の解除手順について

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

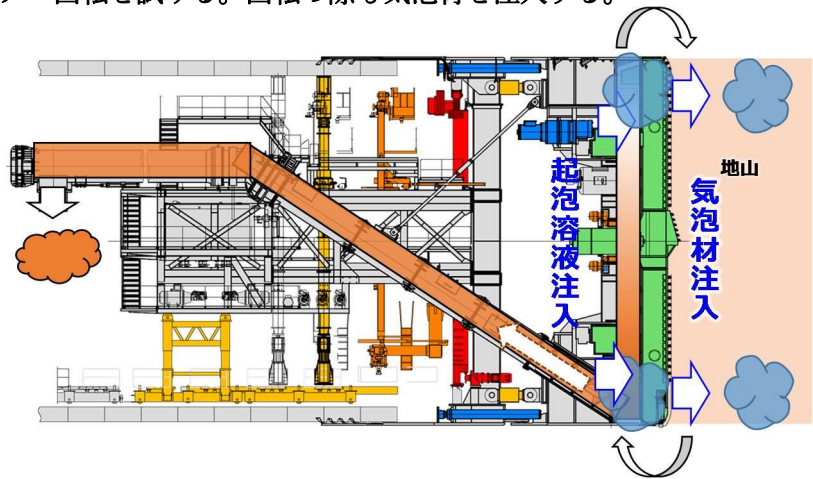
前日の最終リング掘進完了後に No.2 スクリューコンベヤ内の土砂を排出

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)



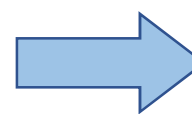
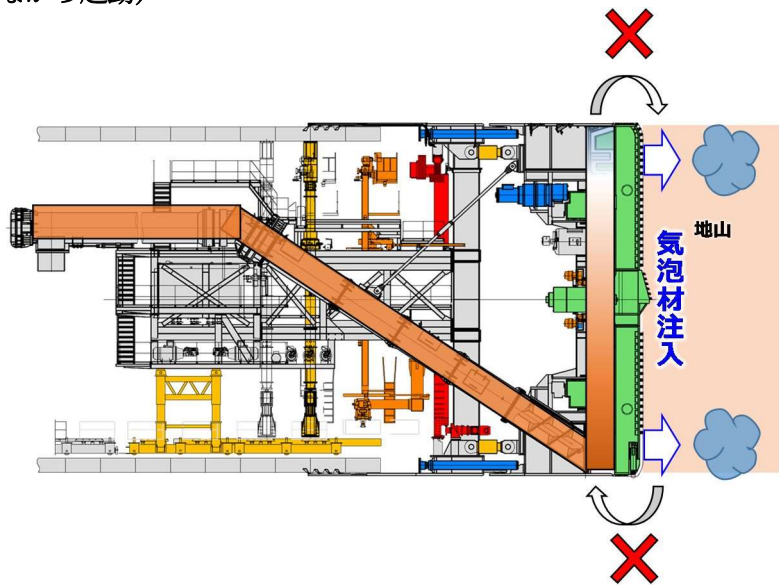
STEP 1

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。



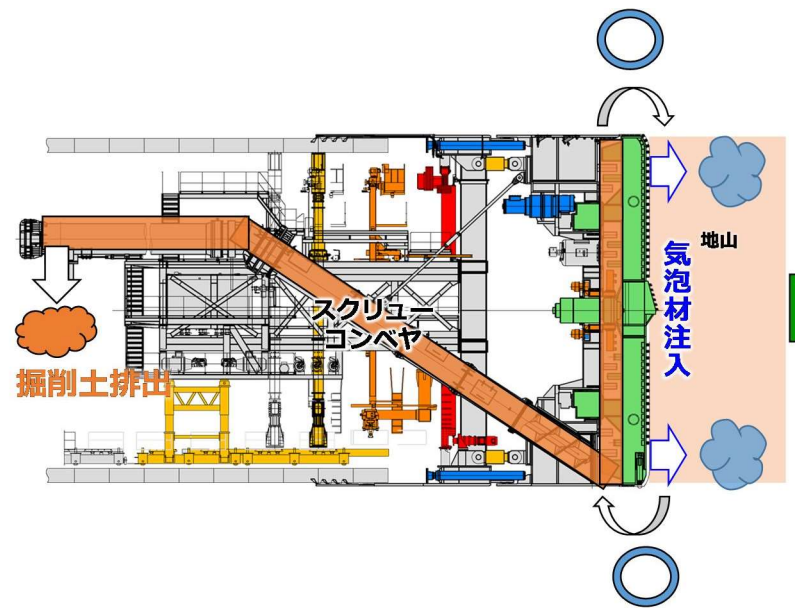
STEP 2

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

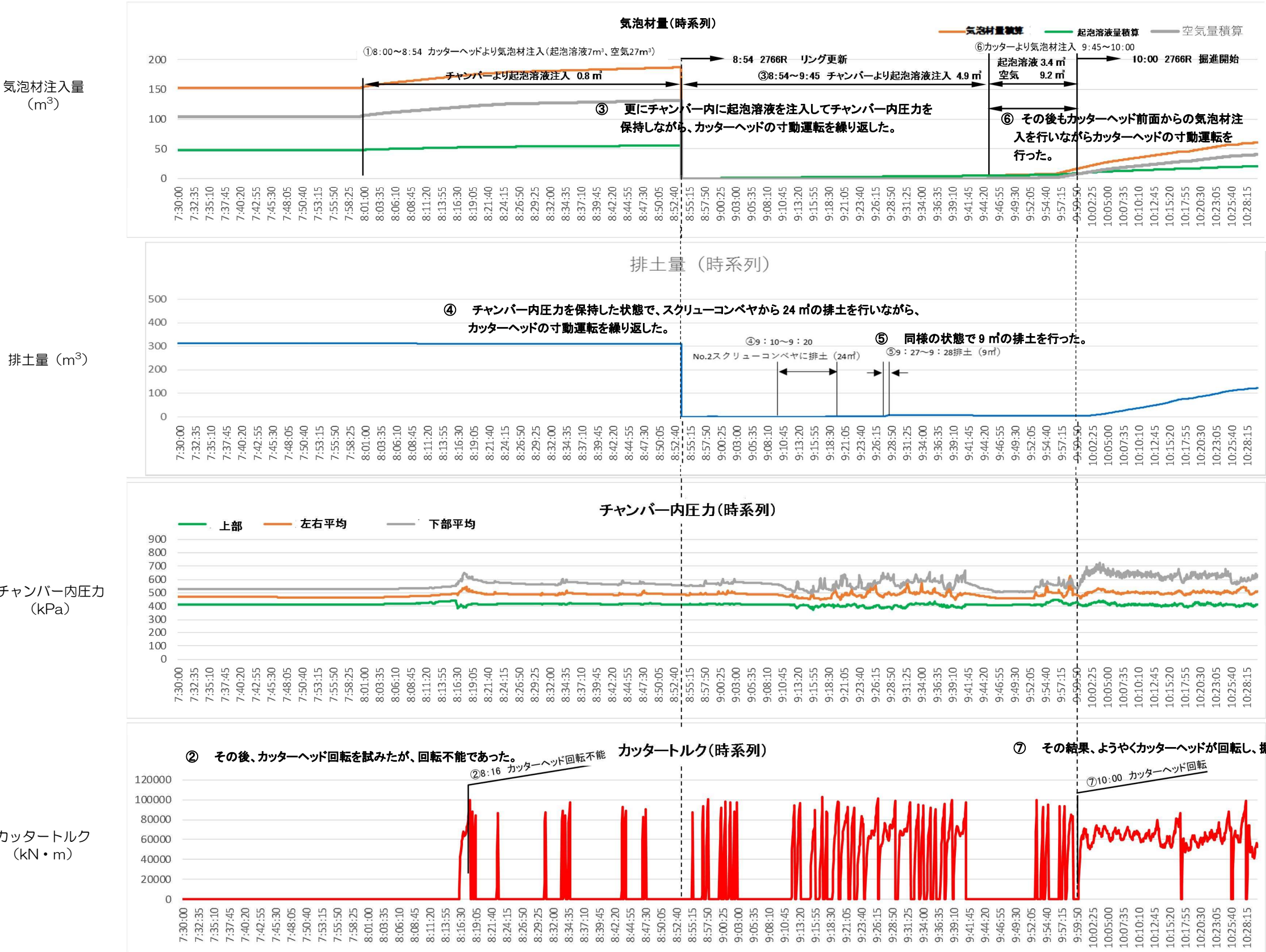
カッターヘッドが回転できないことを確認できたら、STEP1 へ戻る。

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。

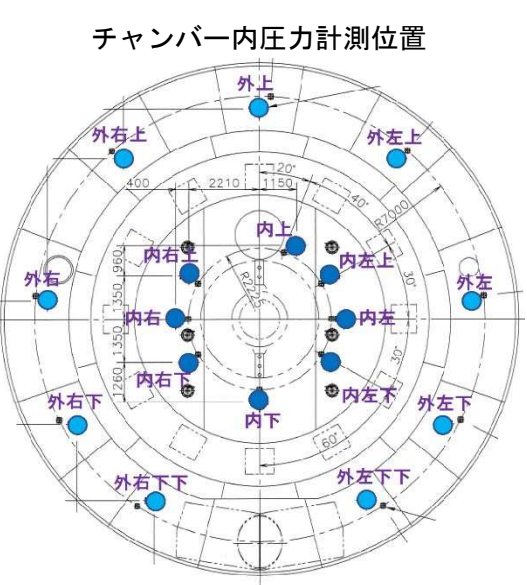
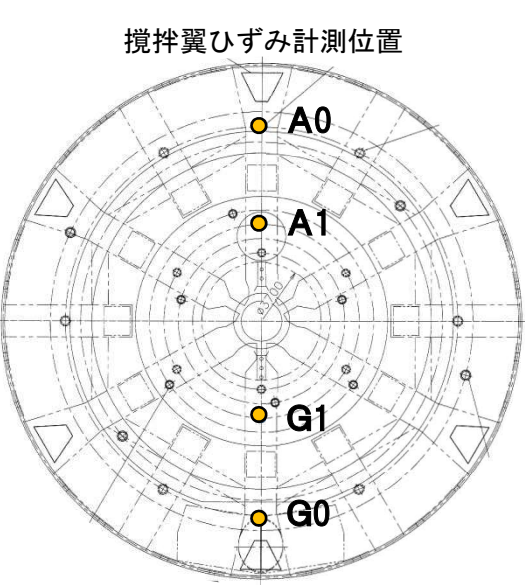
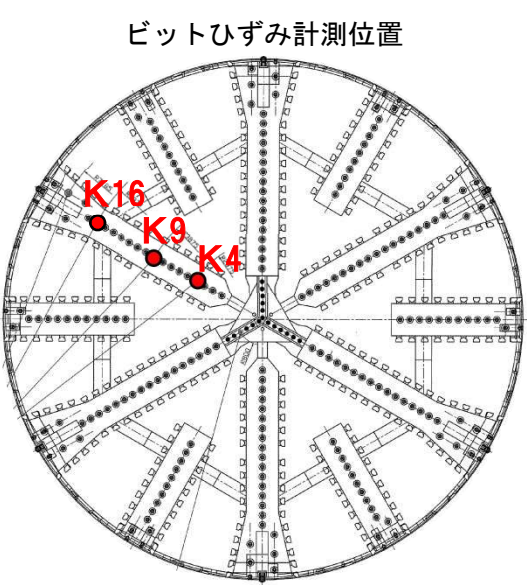
9/14（月） （2766R）カッターヘッド回転不能解除



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可能性が考えられる。

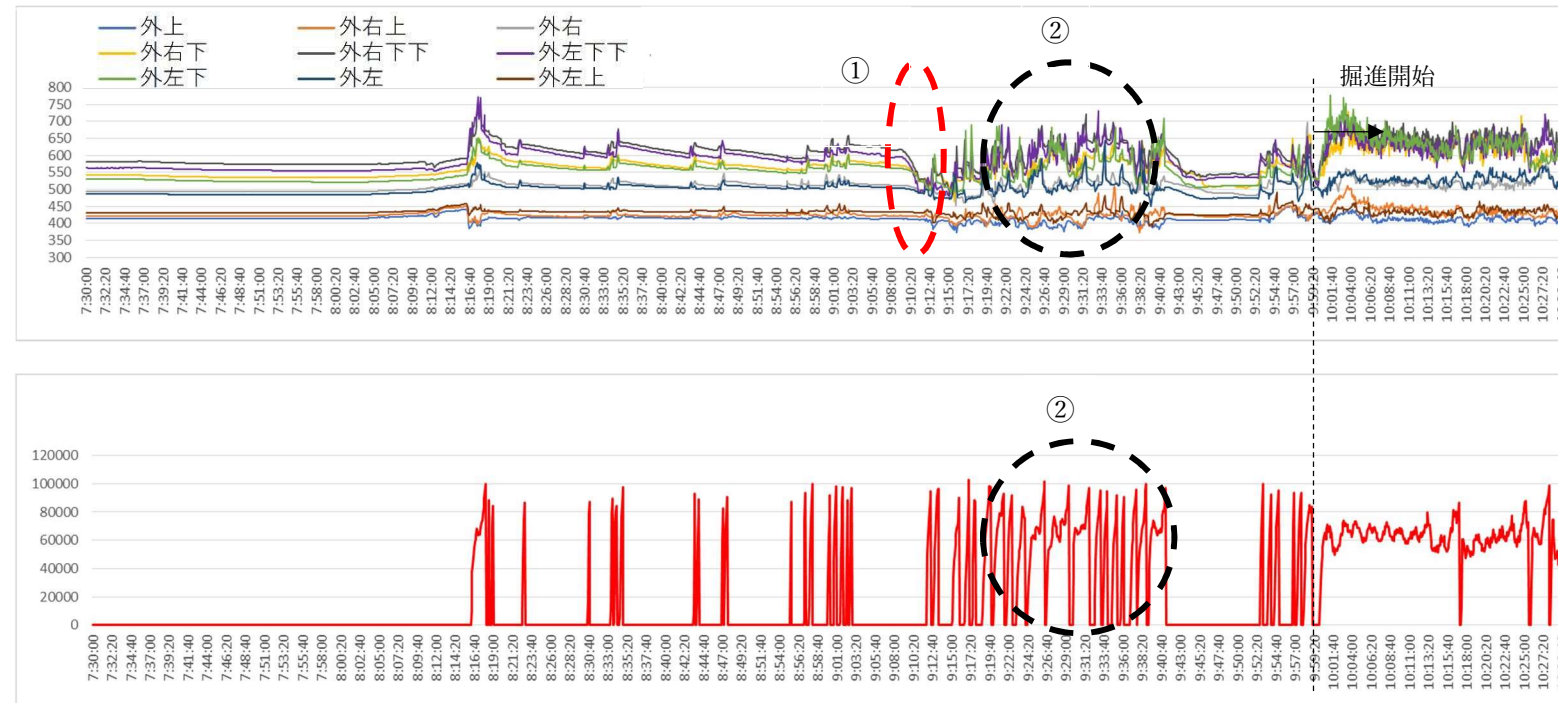


図 2766R チャンバー内外周圧力およびカッタートルク時系列グラフ

(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。

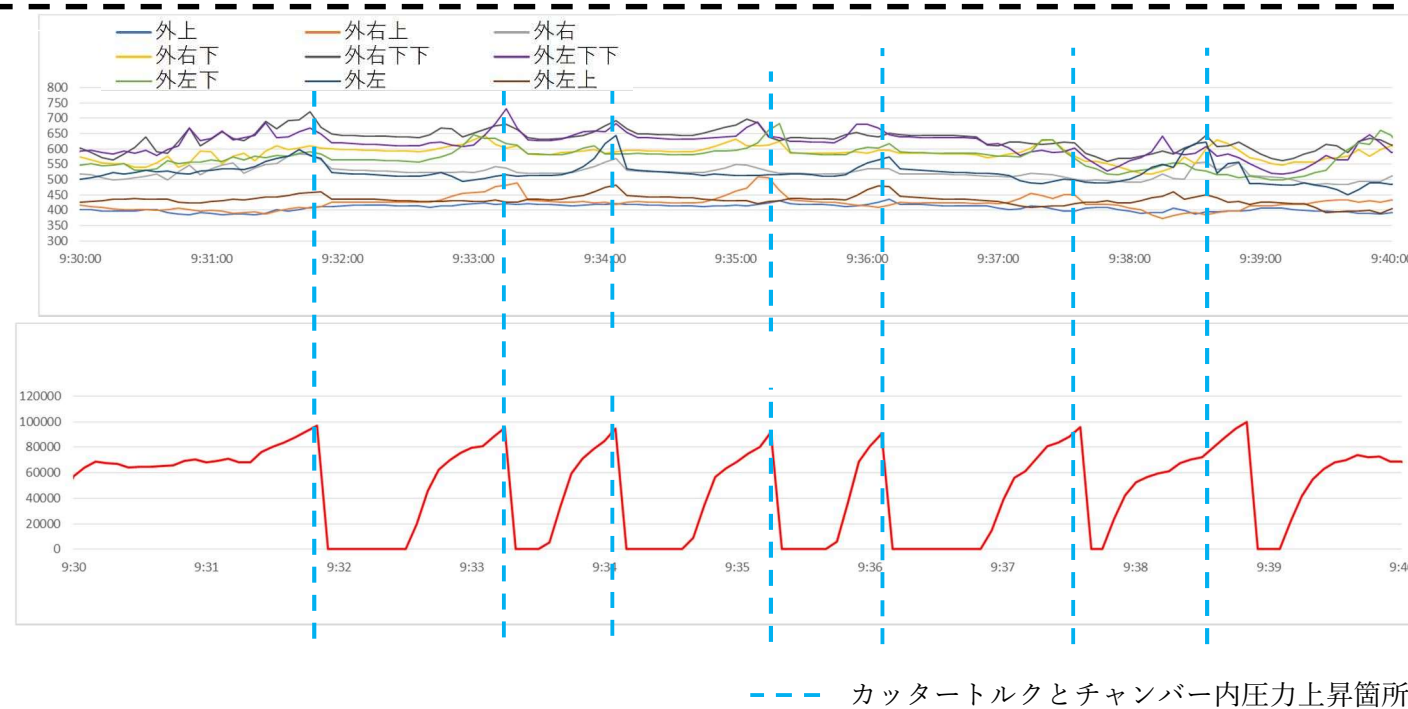


図 カッター回転動作によるチャンバー内圧力変化

(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。

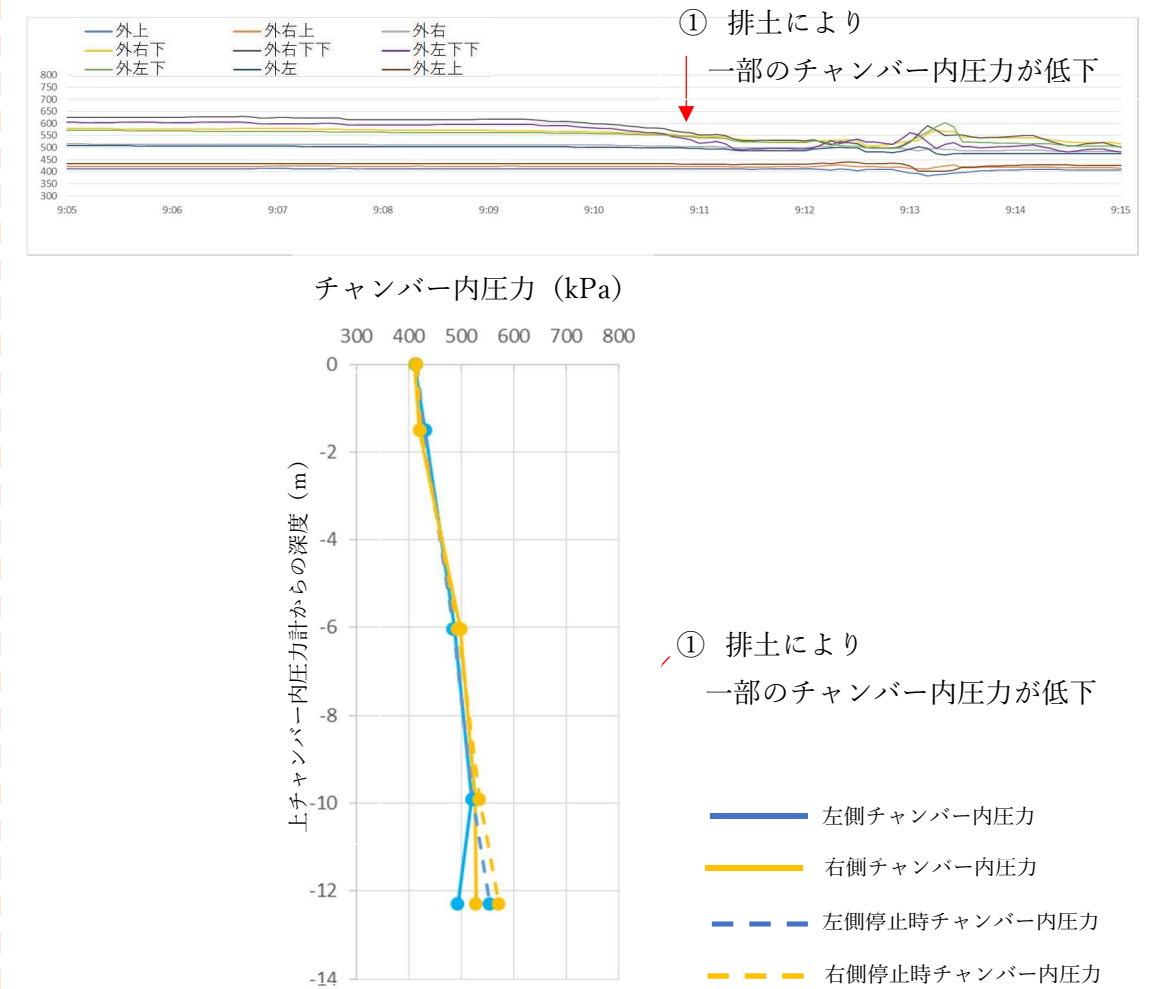


図 排土によるチャンバー内圧力分布

チャンバー内圧力 (kPa)

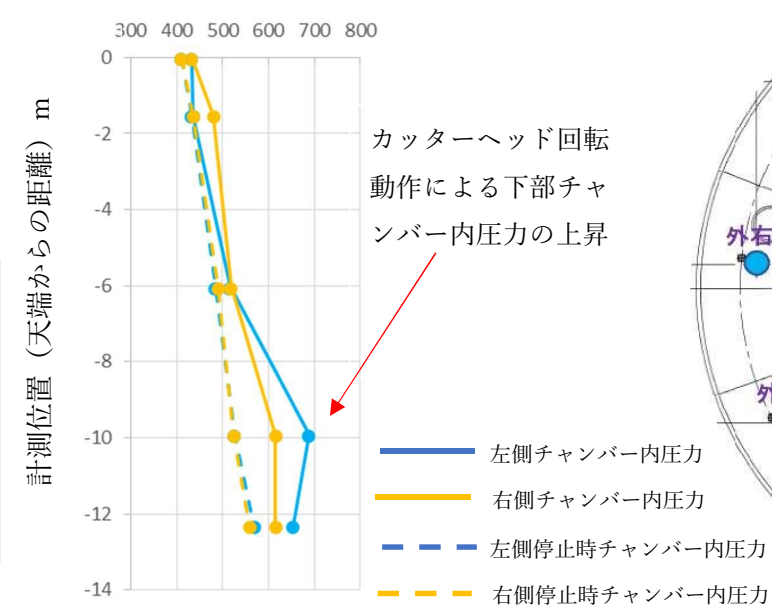


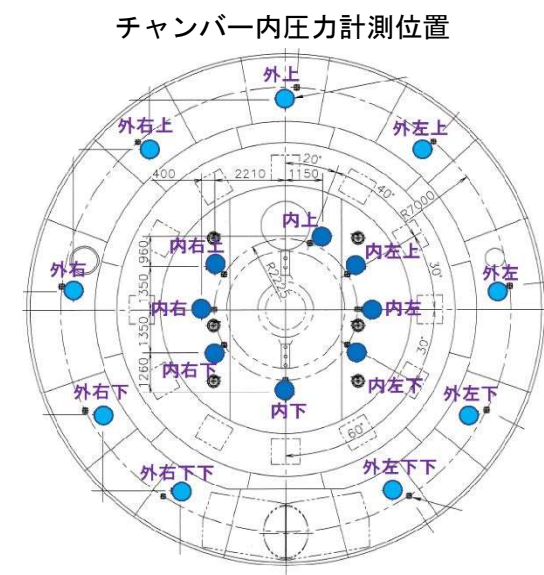
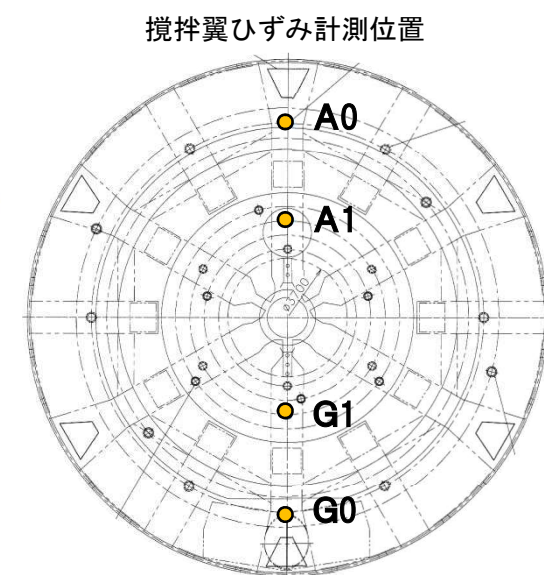
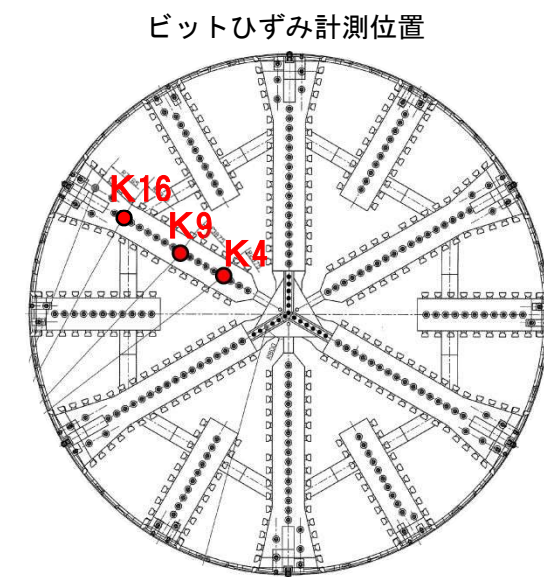
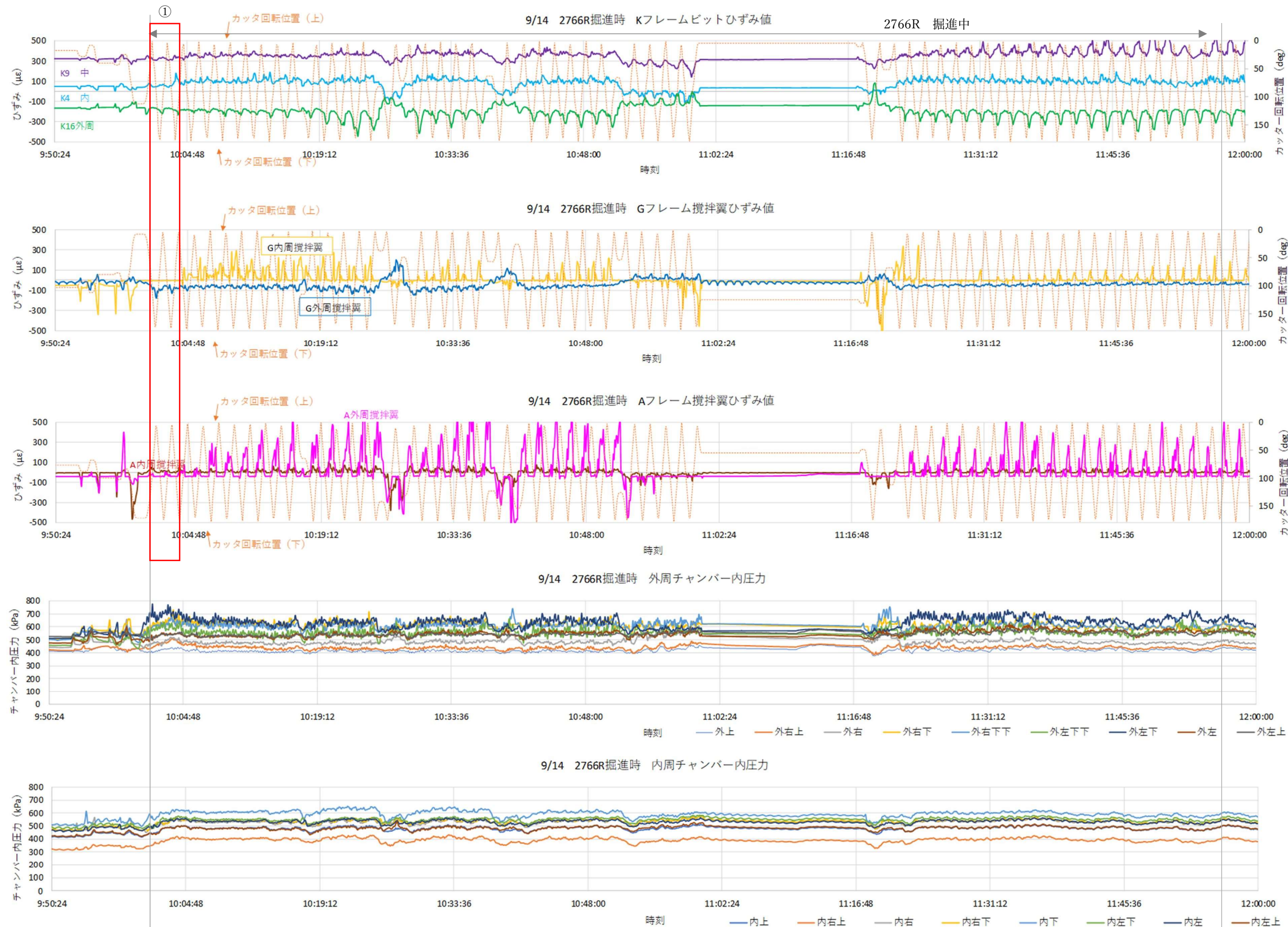
図 カッタートルク上限時直前のチャンバー内圧力分布

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可能性を示唆している。

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が、原因の特定はできていない。



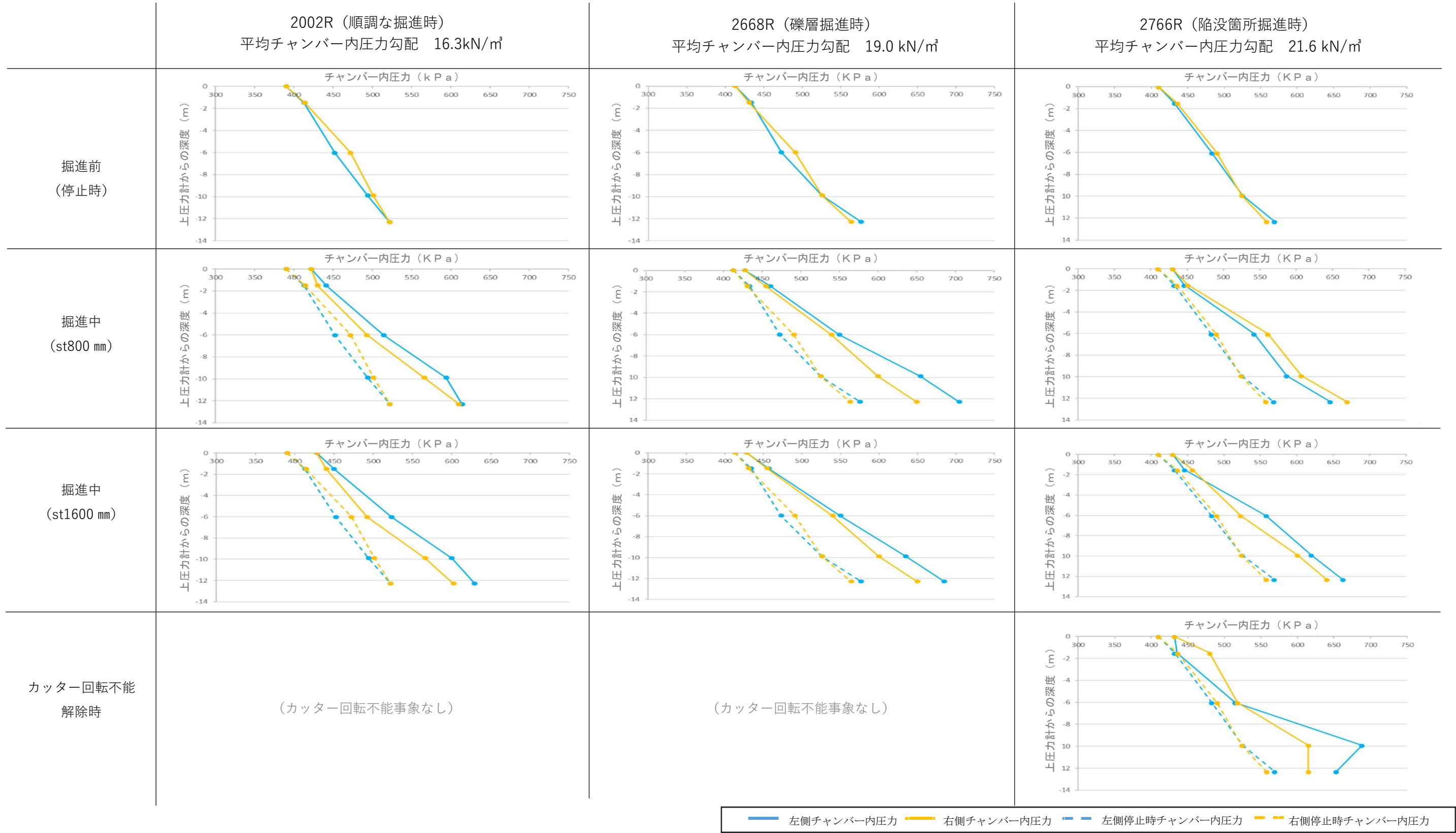
⑬チャンバー内圧力勾配について

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、停止時の圧力勾配の傾きが小さくなった可能性が考えられる。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。



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

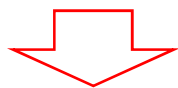
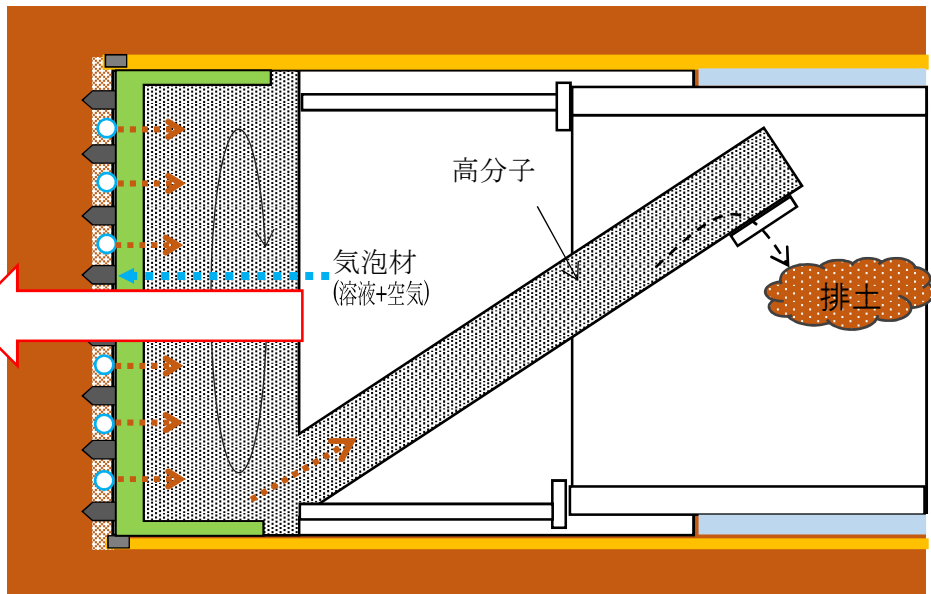
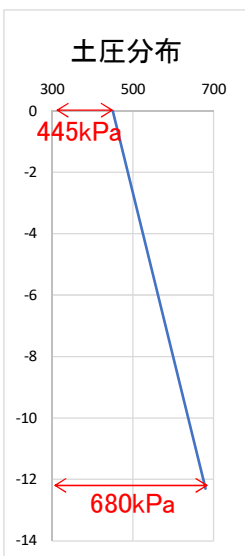
陥没・空洞が発生した付近におけるチャンバー内の塑性流動化状況について、夜間休止時において気泡材と土砂の分離により塑性流動性が損なわれていた可能性を確認したが、掘進時のチャンバー内塑性流動化状況を更に確認するために、チャンバー内の圧力勾配から算出する単位体積重量と理論気泡土単位体積重量の比較から検討を行った。

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、
$$(680\text{kPa} - 445\text{kPa}) \div 12.3\text{m} = 19.1\text{kN/m}^3$$

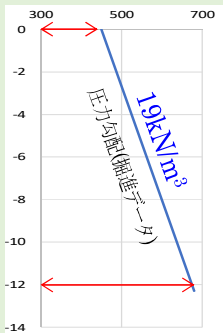
がチャンバー内掘削土(気泡土)の単位体積重量と算出(推定)される。この値から掘削土に含まれている気泡材の量を算出して、添加量と比較することで、塑性流動化状況を推定する。



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の評価する。

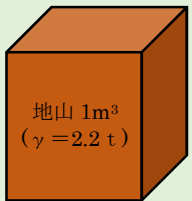
チャンバー内圧力勾配から算定した掘削土単位体積重量(例)



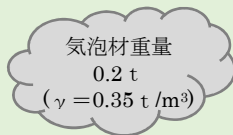
気泡土単位体積重量
 $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$
チャンバー内圧力勾配
例： $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ (1.9 t/m^3)



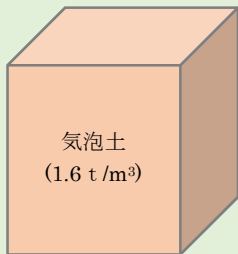
理論気泡土単位体積重量の算出方法(例)



+



=

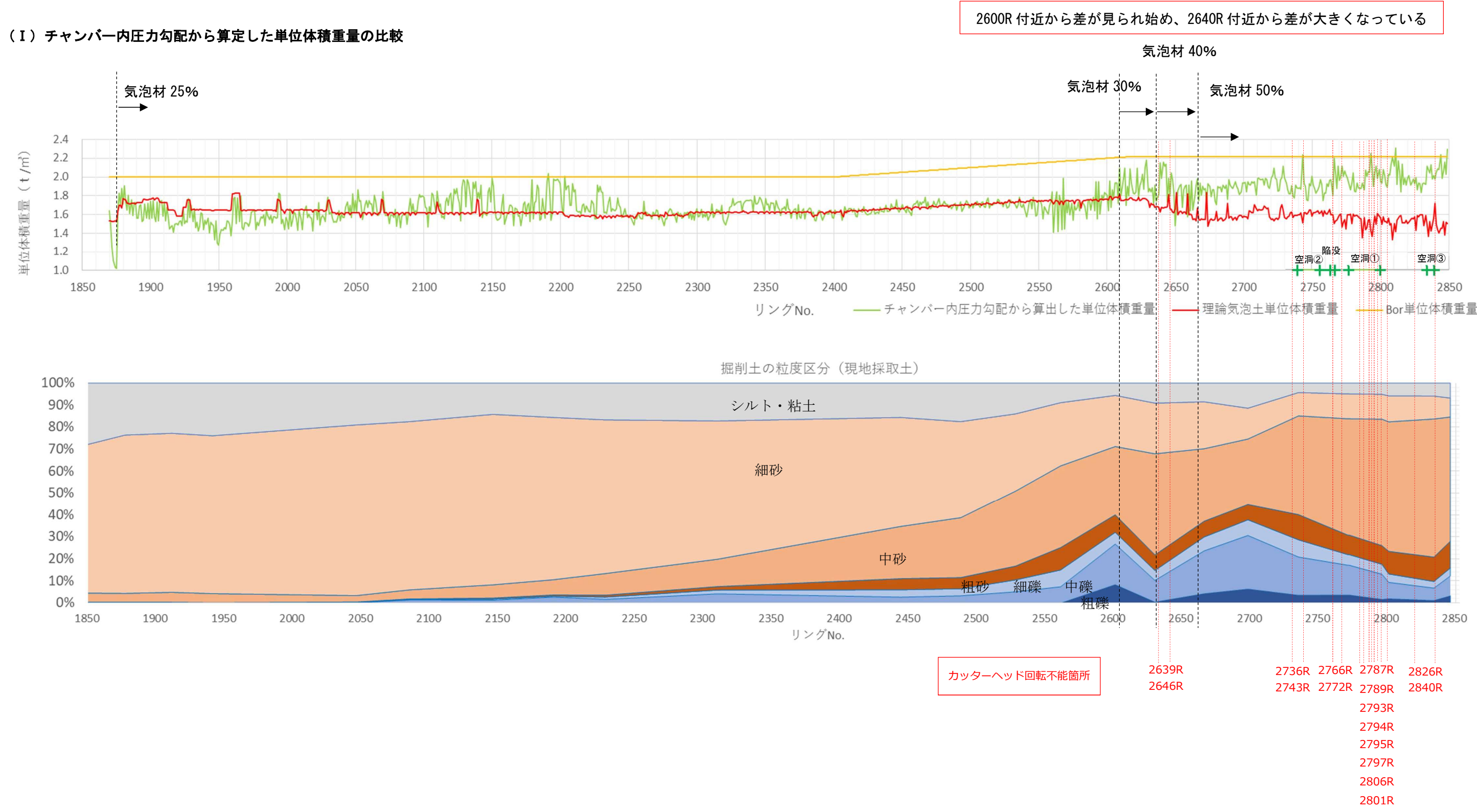


②検討結果

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可能性が考えられる。

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の可能性を考えると、掘削土量を過小評価している可能性があることが確認された。

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。



7. 落とし戸実験結果
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。模型地盤内にシールド掘進時の緩みを模した空隙を強制的に設けることで、シールドトンネル上に生じる緩み領域を再現することができる。

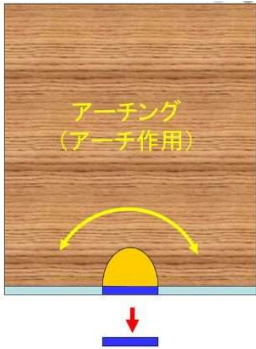


図 1 落とし戸実験のイメージ

④ 実験による検証方法
落とし戸実験を行い、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 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 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 2）。

表 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

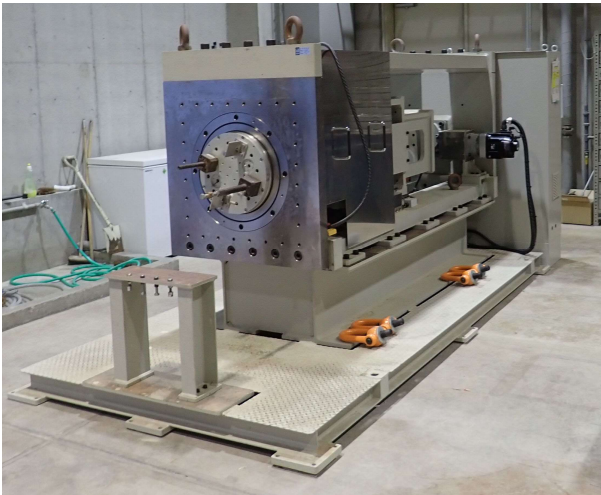


写真 1 切羽可視化実験装置外観



写真 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 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。

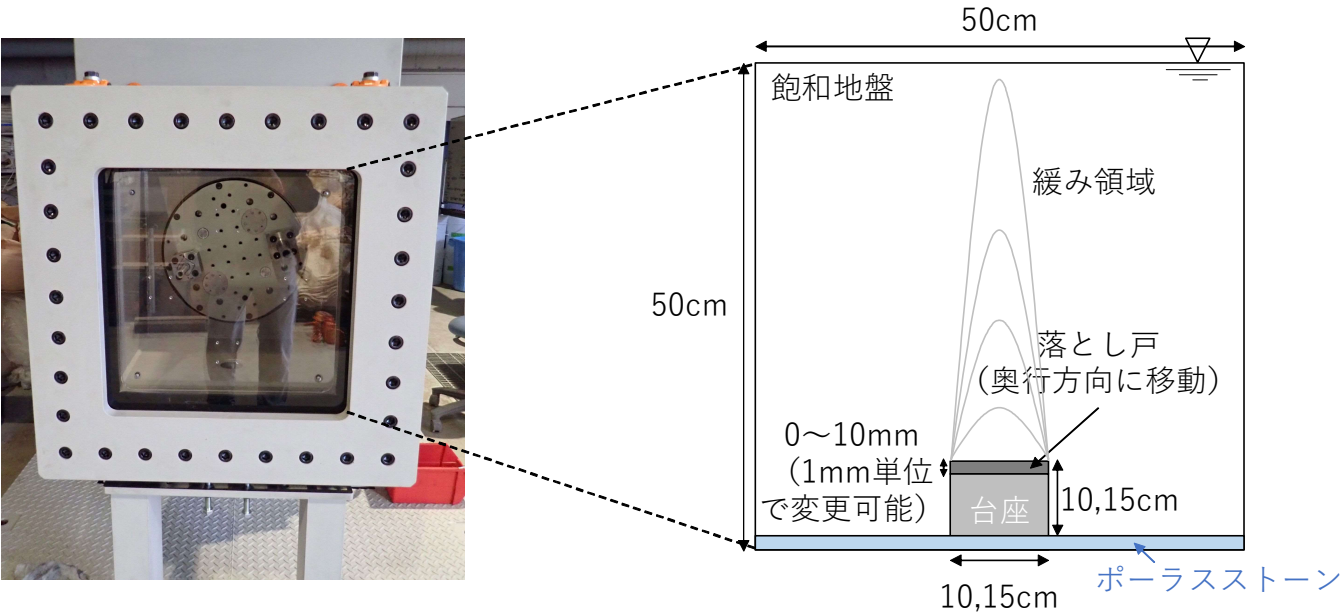


図 2 落とし戸実験の概略図

⑦ 落とし戸実験ケース

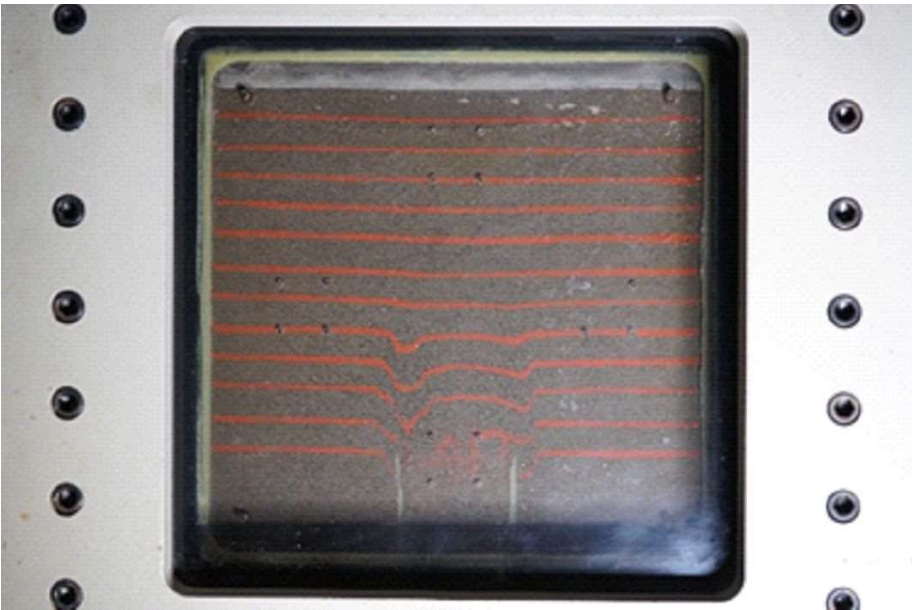
実験ケースを表 2 に示す。

表 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 3 に示す。写真 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 3 実験状況

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 4、図 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 4）。

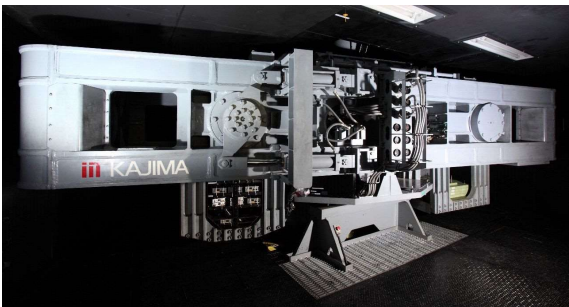


写真 4 遠心模型実験装置

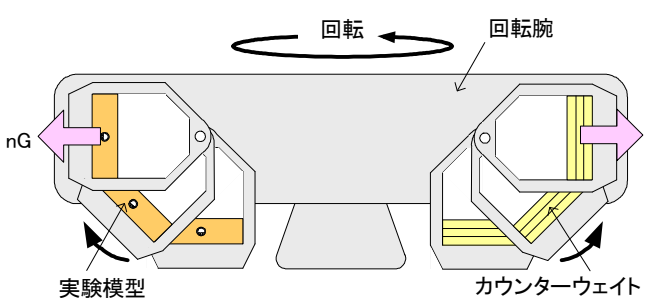
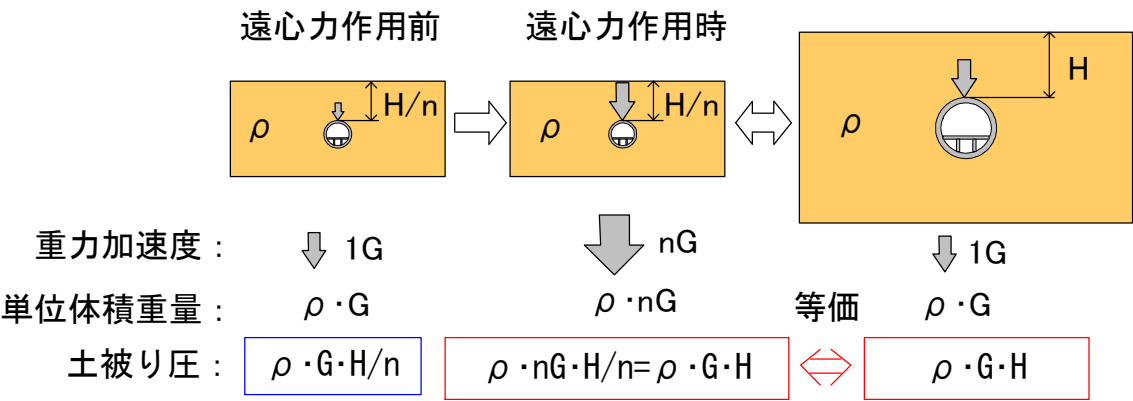


図 3 実験模型への遠心力作用方法

遠心用実験モデル(実構造物の1/n倍縮尺)

実構造物



今回の実験では、土被り H=40m、倍率 n=100 となる。

図 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。

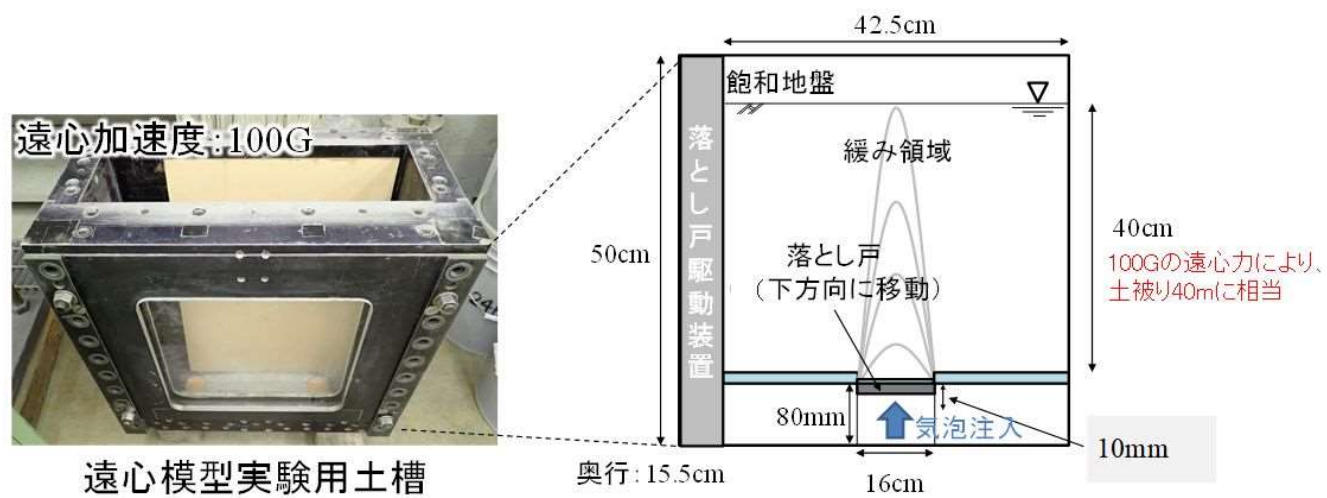


図5 遠心場落とし戸実験の概略図

⑥ 遠心場落とし戸実験ケース

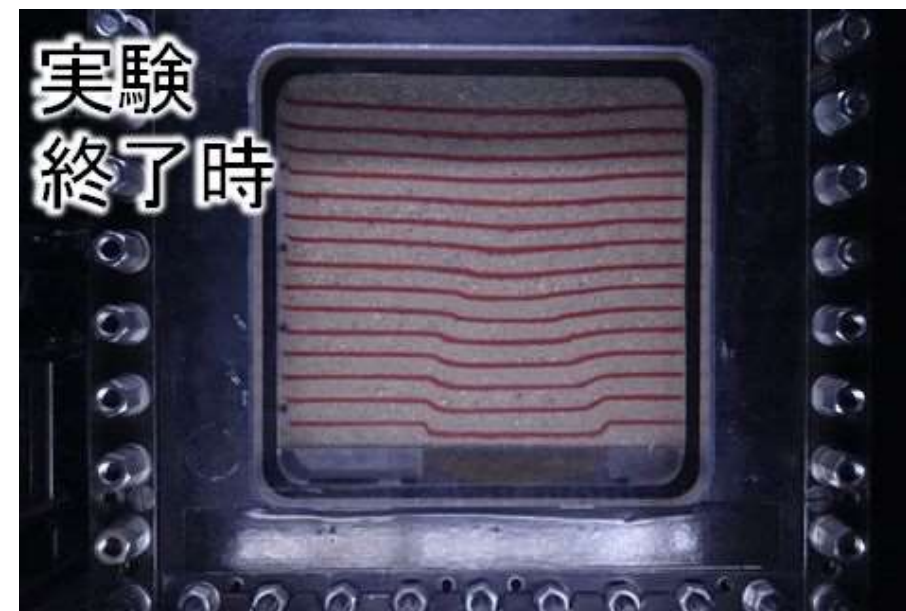
実験ケースを表 3 に示す。

表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**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。

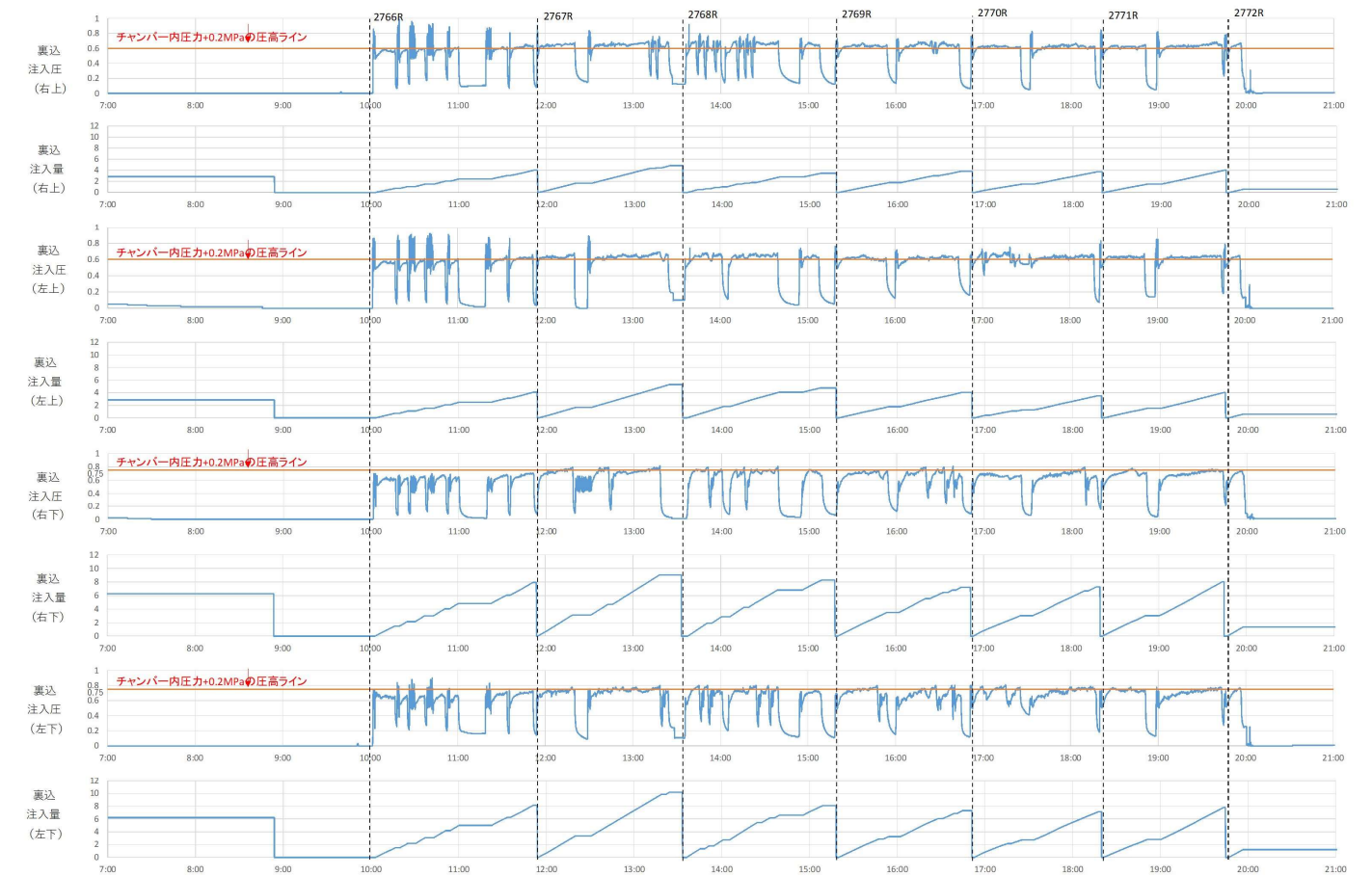
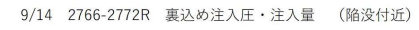


遠心場落とし戸降下実験終了時

写真 5 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、探査装置がカッター面から 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。



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。

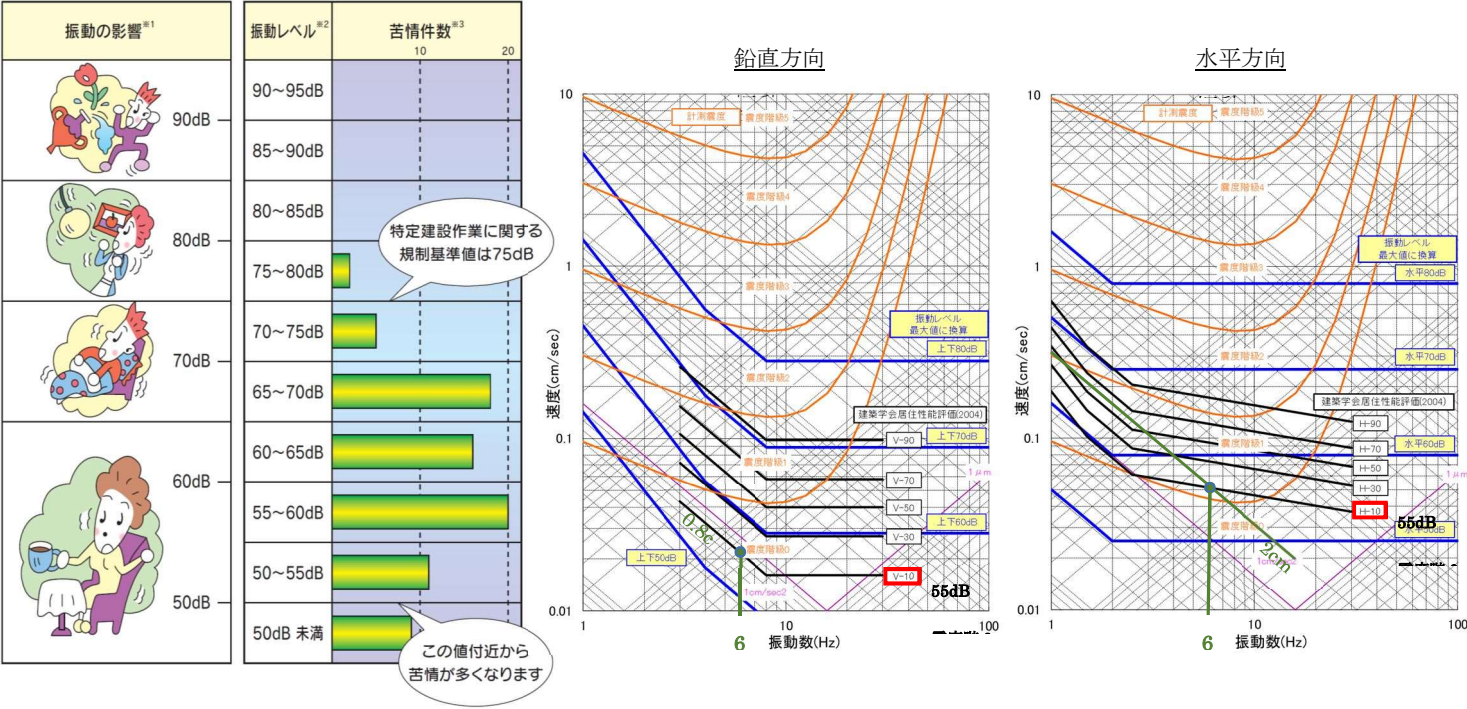
一方、十分な改善効果が得られてない土砂性状でシールド掘進停止状態（チャンバー内土砂の攪拌が無い）が長時間継続した場合、気泡材と土砂が分離するため、空気の塊が上昇傾向にあると想定され、その空気の塊の上昇自体により、細粒分が少なく、固結度が低い上部地盤への緩み進展が助長される可能性はあるが、上昇する空気の圧力は体積膨張とともに土粒子の間隙水圧相当に減少するため、土粒子に与える影響は小さいと考えられる。

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

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 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 振動レベルは敷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

11. 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・空洞の要因となった可能性はない。

＜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)



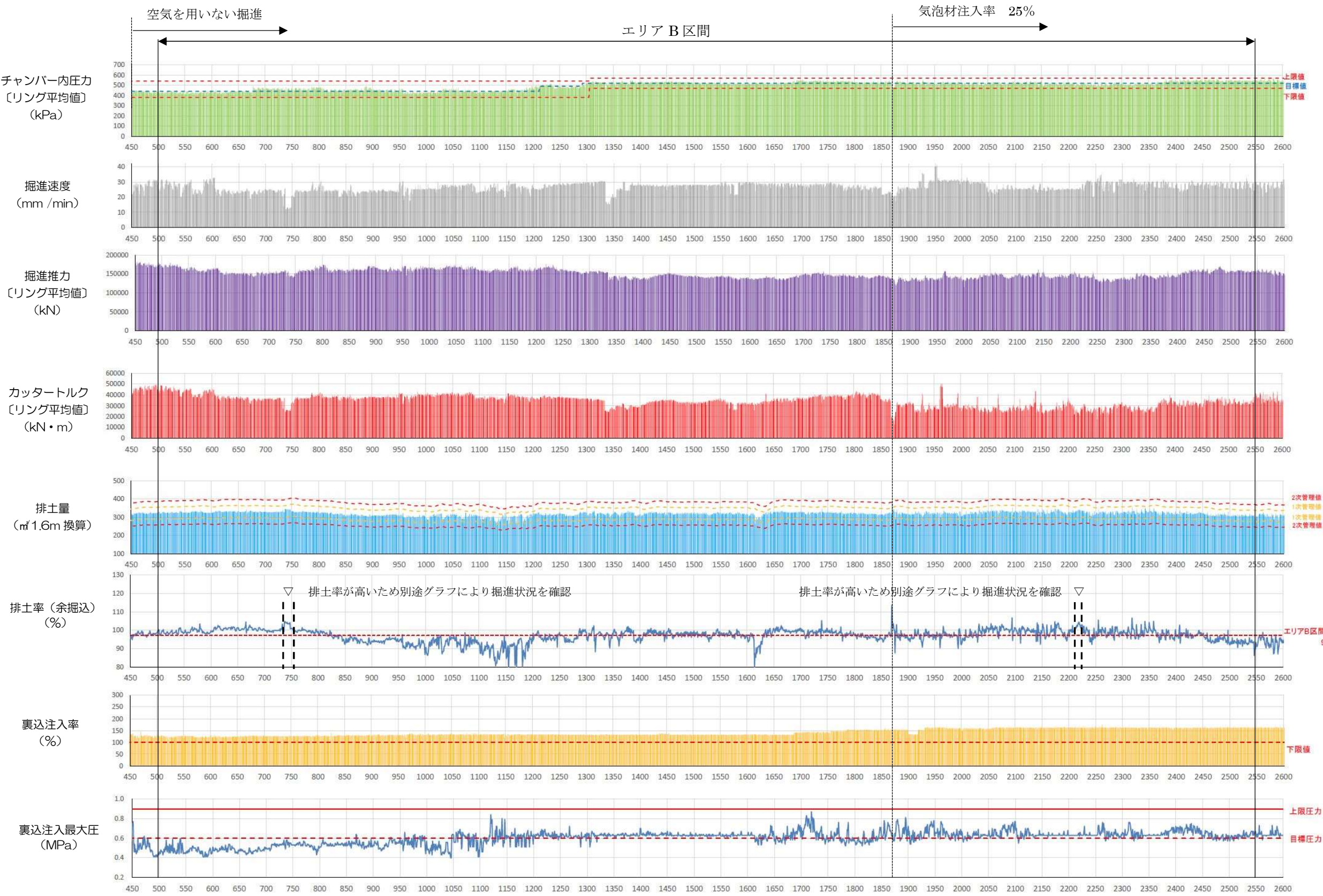
写真5 坑内状況写真(空洞発見箇所付近セグメント状態)

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。

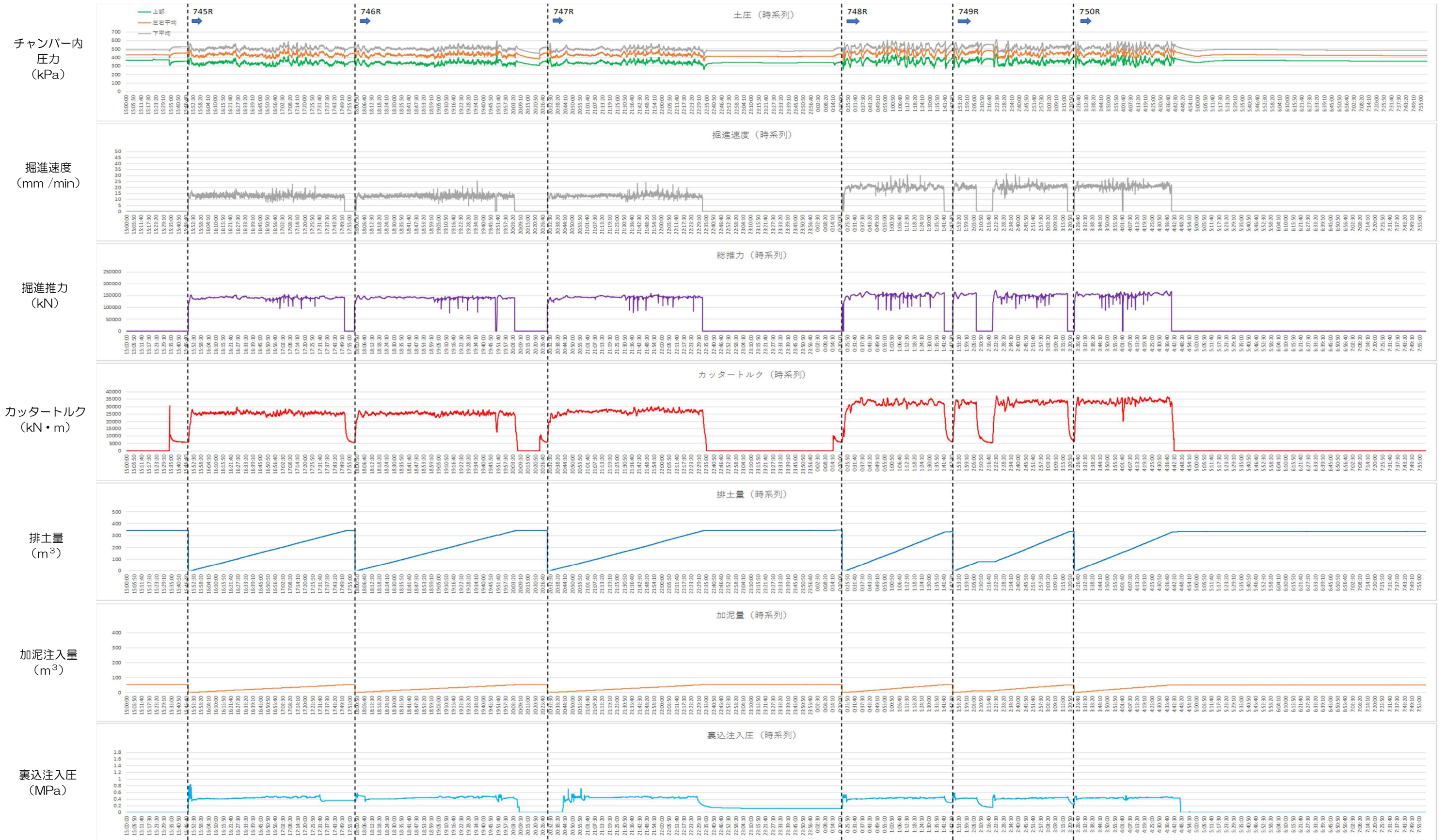
エリア B の施工データをエリア A の施工データと比較すると、掘進推力は概ね 150,000kN 以下、カッタートルクは概ね 40,000kN・m 以下と掘進時の負荷が小さい。また、排土量においてもバラつきが小さく、安定した土量となっている。その中でも排土量がやや多く計測されている 7 4 5 R 付近と 2 2 1 5 R 付近において詳細データの確認を行った。

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)

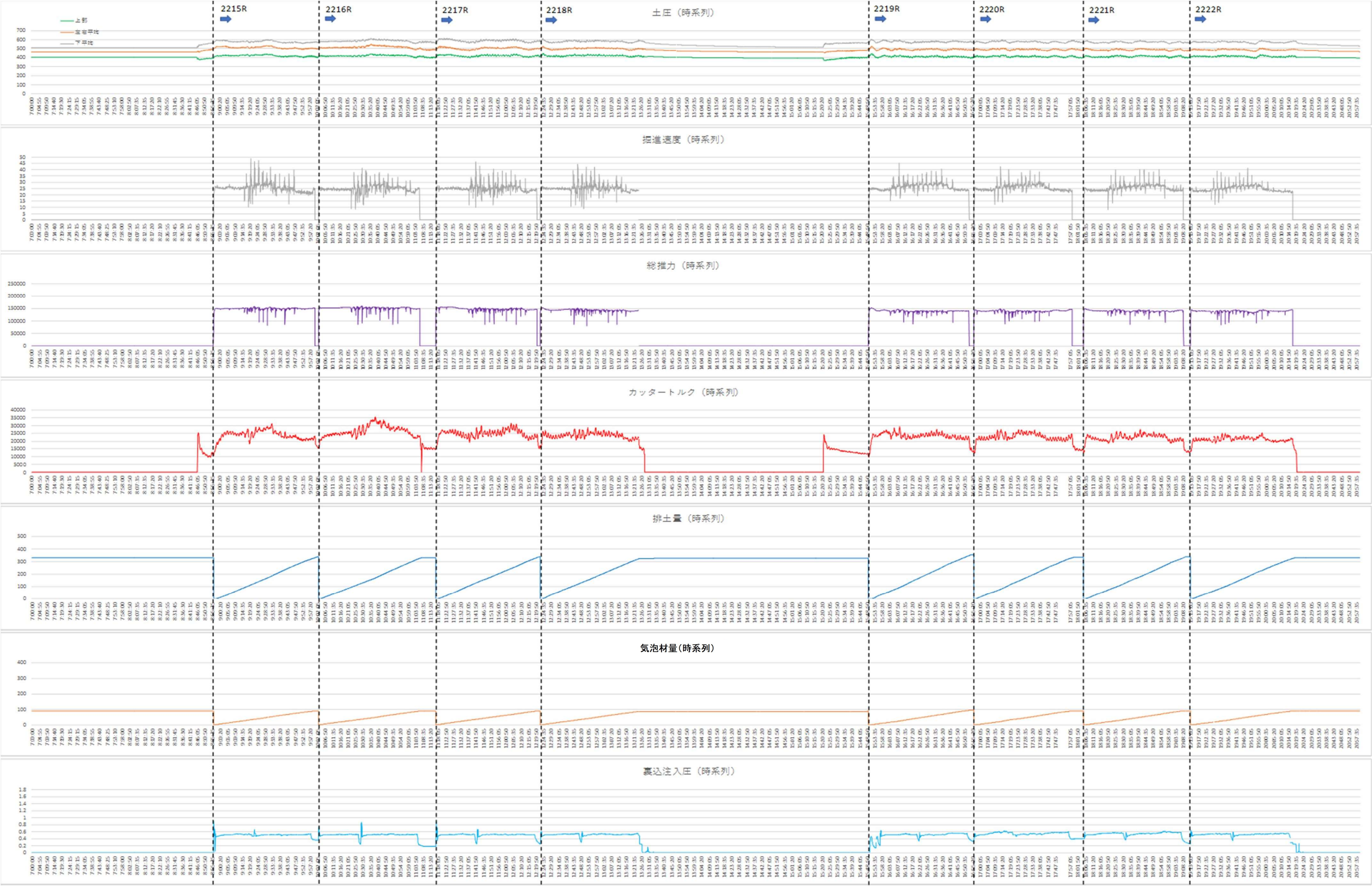
掘進推力
(kN)

カッタートルク
(kN・m)

排土量
(m³)

気泡材注入量
(m³)

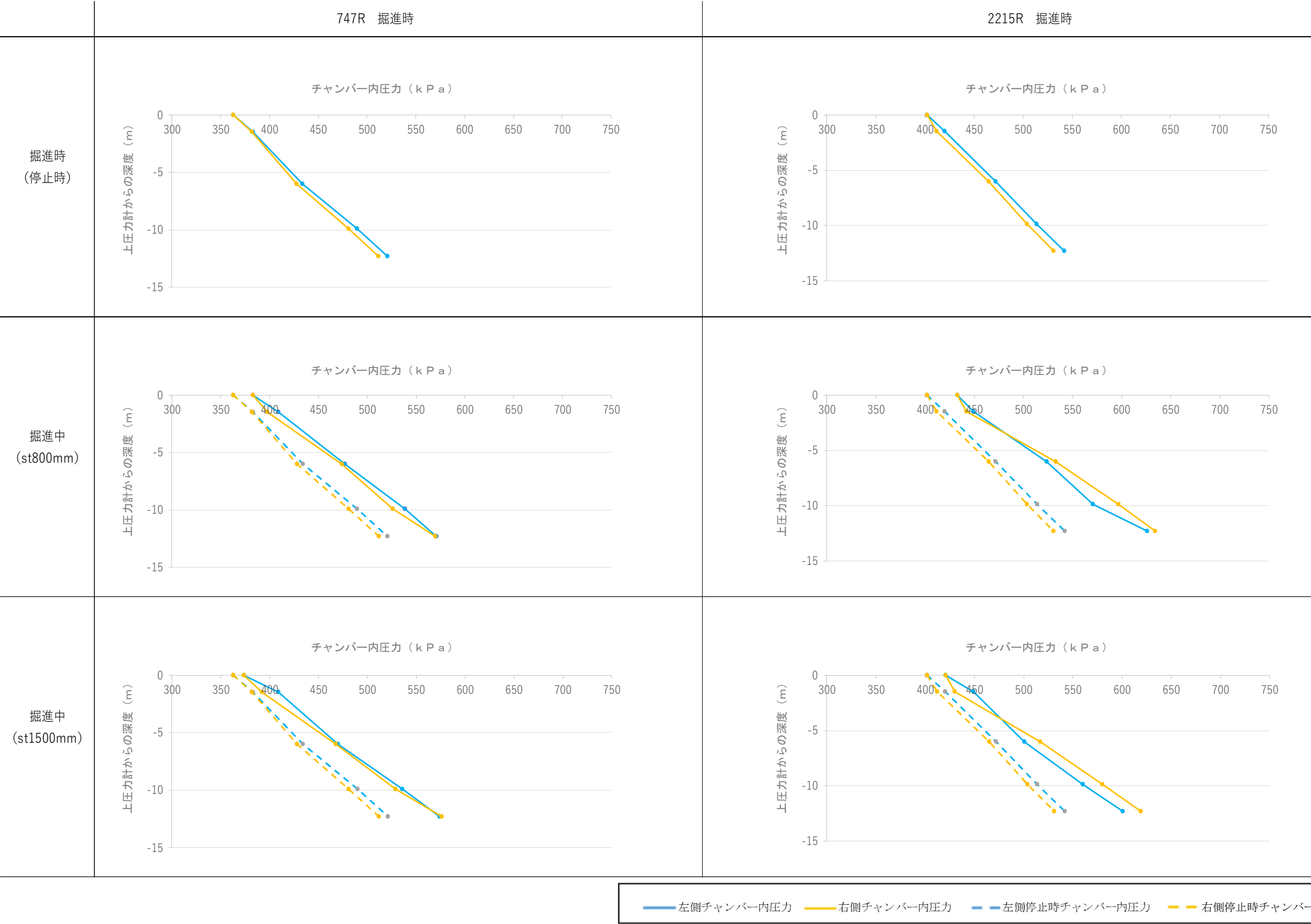
裏込注入圧
(MPa)



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。



1 2. 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。（1 ～ 3 1 頁）
- ・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。（1 8 ～ 2 3 頁）
- ・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。（1 3 頁）
- ・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。（1 ～ 3、1 0 ～ 1 4 頁）
- ・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可能性を確認した。（1 1 ～ 2 3 頁）
- ・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可能性が確認された。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る可能性を確認した。（2 4 ～ 2 5 頁）
- ・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。（2 6 ～ 2 8 頁）

（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。（3 1 頁）
- ・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。（3 1 頁）
- ・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。（3 1 ～ 3 4 頁）