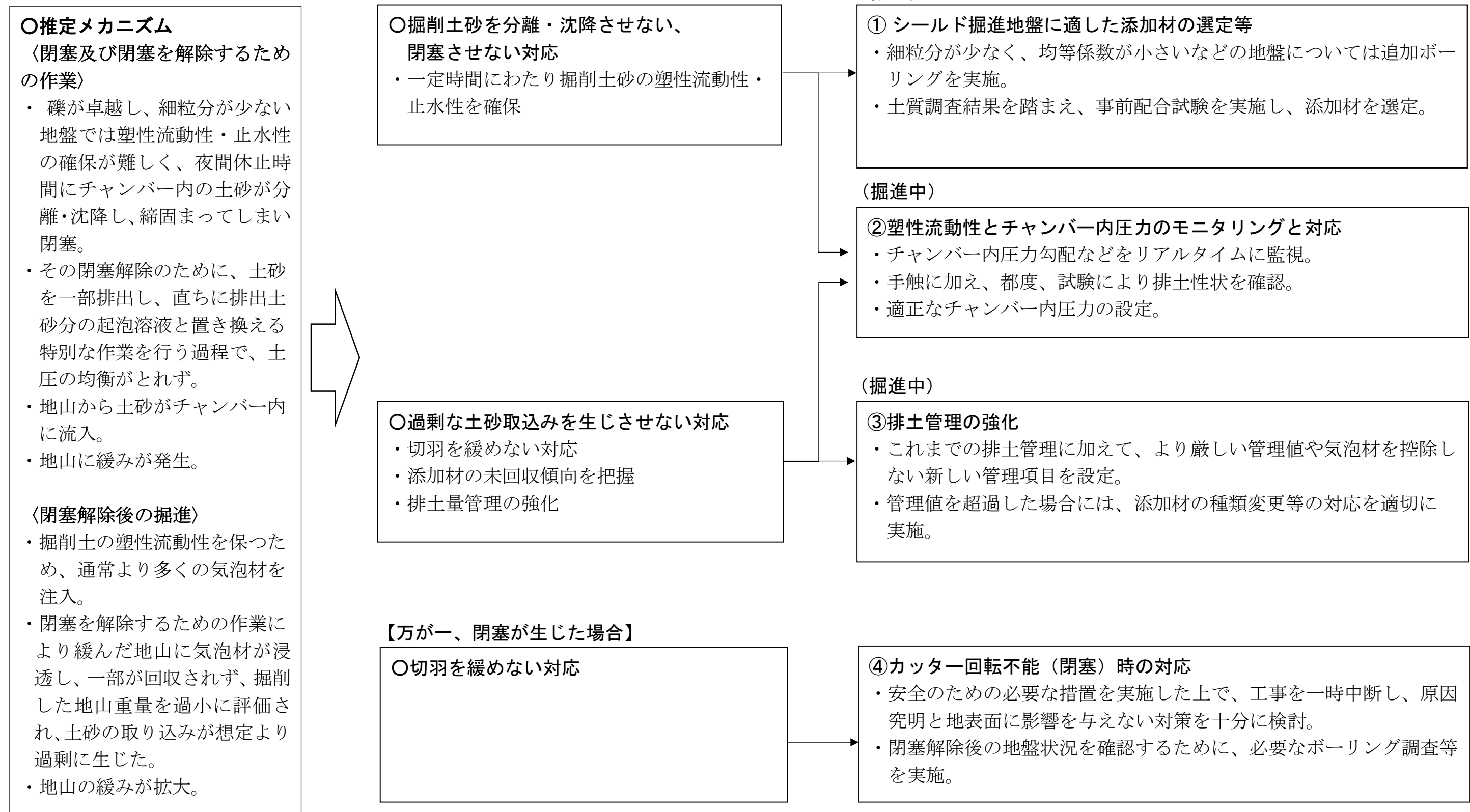


8. 再発防止対策について

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

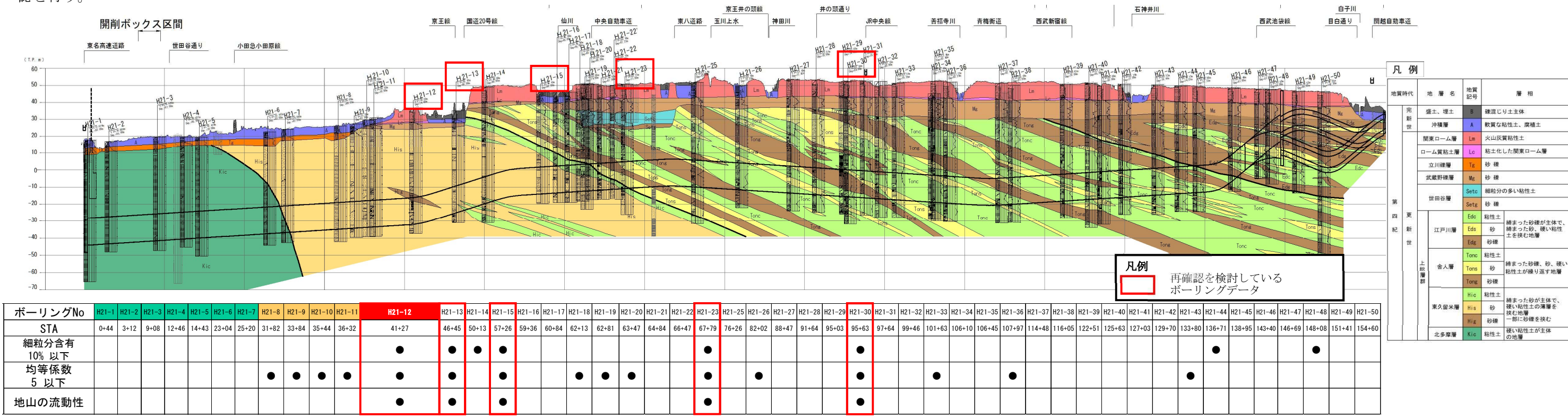


① -1 シールド掘進地盤の再確認

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。

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

② 塑性流動性のモニタリングと対応

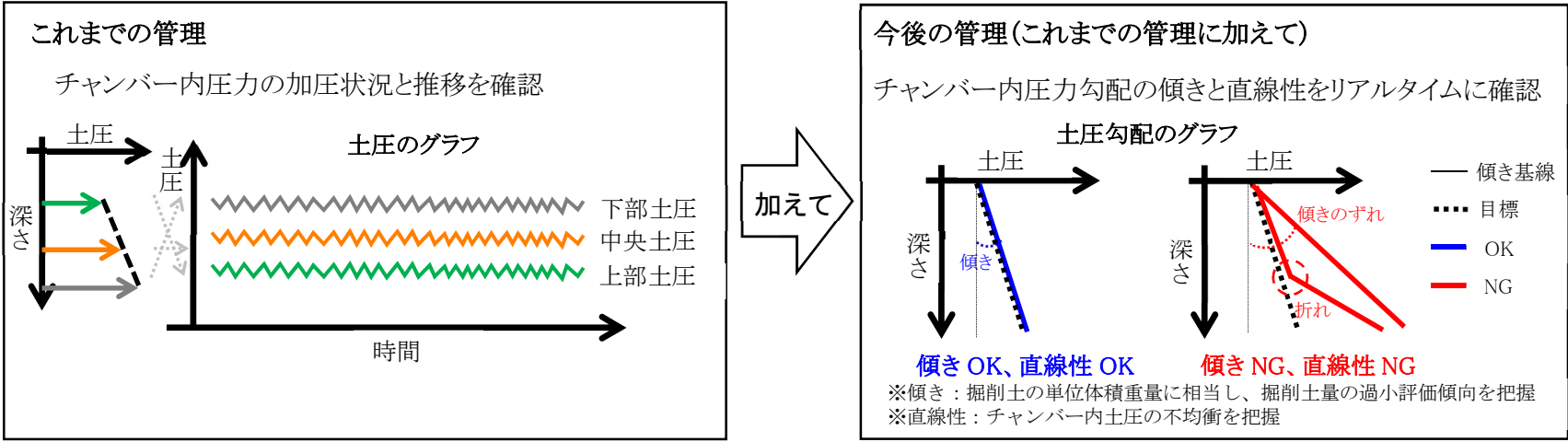
- ・これまでの塑性流動性の確認項目に加え、新たにチャンバー内の圧力勾配、ミニスランプ、粒度分布での確認を行うこととする。
- ・塑性流動性のモニタリングをしながら、添加材注入量や添加材の種類を適切に調整し、塑性流動性・止水性の確保を行う。なお、塑性流動性の確保が困難となる兆候が確認された場合は原因の解明と対策を検討する。

表 8-1 掘進データからの塑性流動性確認方法

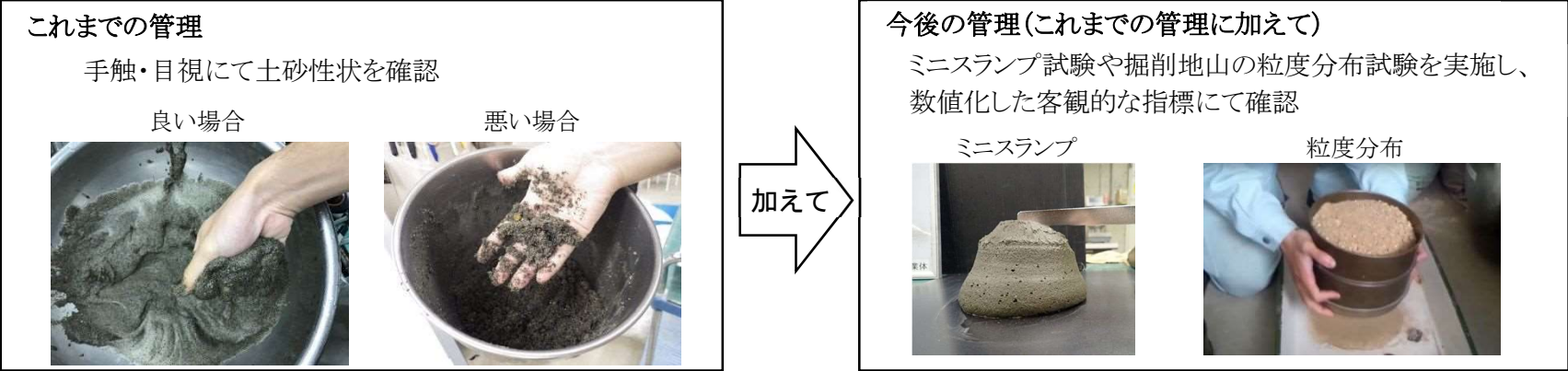
管理項目	管理内容	管理値・確認内容	対応	備考
カッタートルク	カッターヘッドを回転させるために必要なトルク値であり、地盤状況ごとの想定トルク値および装備能力に対して計測トルクの割合と計測トルクの変動についても確認を行う（確認頻度_リアルタイム）	管理値：装備トルク 80%以下	・掘進速度の低減（カッタートルク対応） ・チャンバー内圧力設定の見直し ・添加材注入量の増加 ・ベントナイト溶液を含めた添加材の種類変更 ・夜間等掘進休止時において、チャンバー内土砂の分離を防ぐため、定期的にチャンバー内土砂の攪拌を実施	
チャンバー内圧力勾配	チャンバー内圧力勾配の変化を確認する（確認頻度_リアルタイム、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

*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

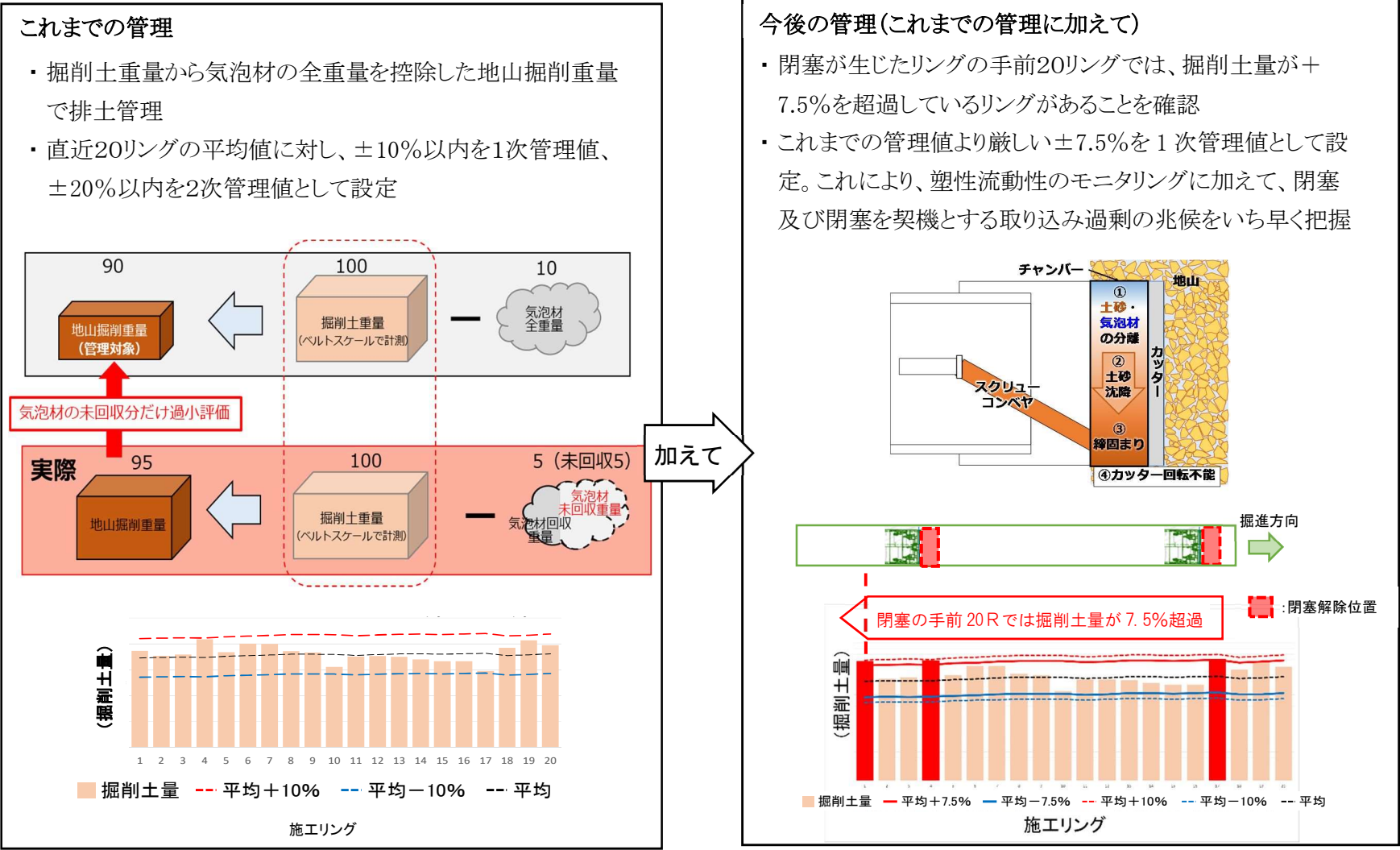


表 8-3 掘削土量の管理値を超過した際の対応

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)

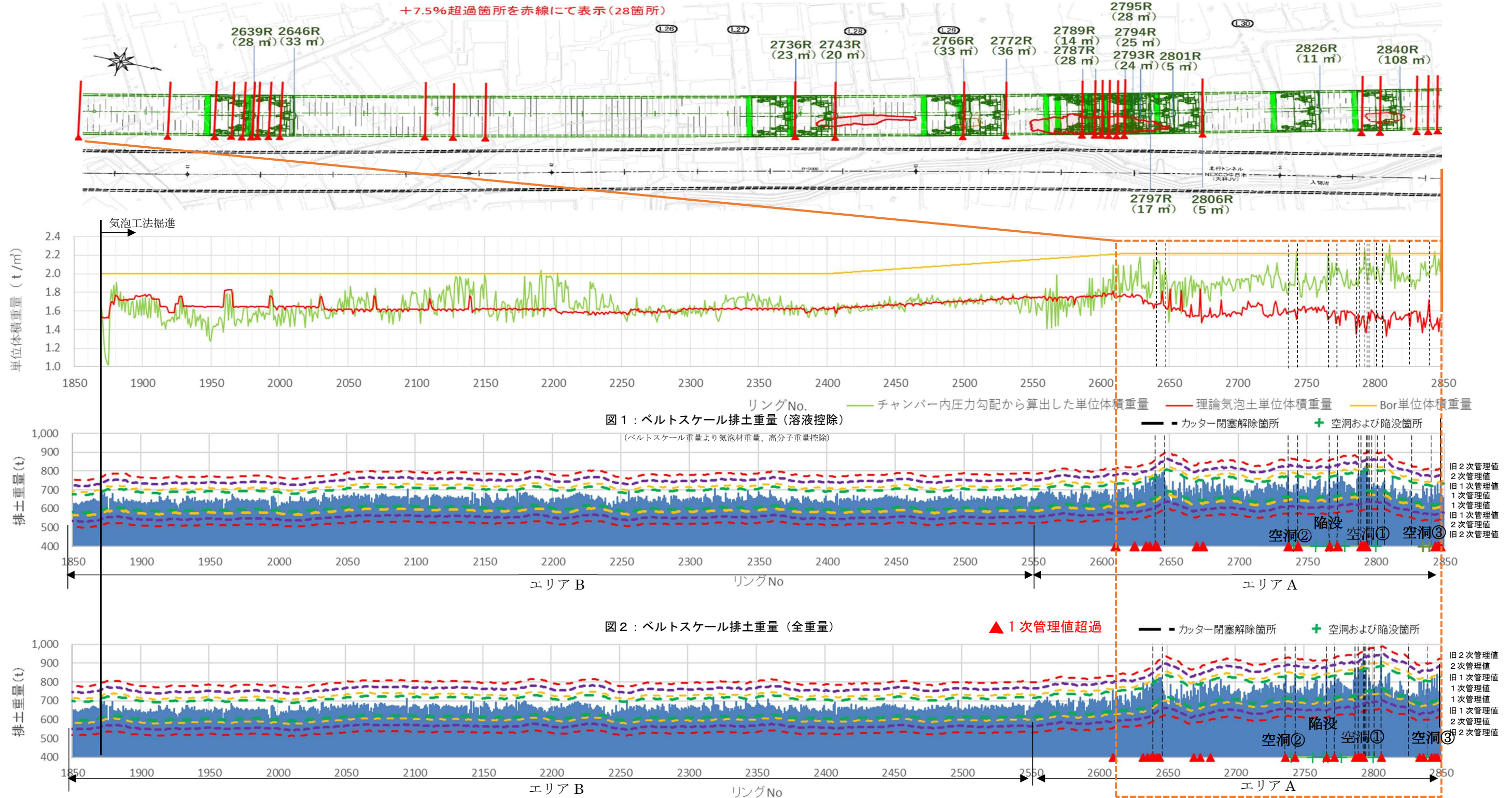
*赤字は追加および変更項目

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。



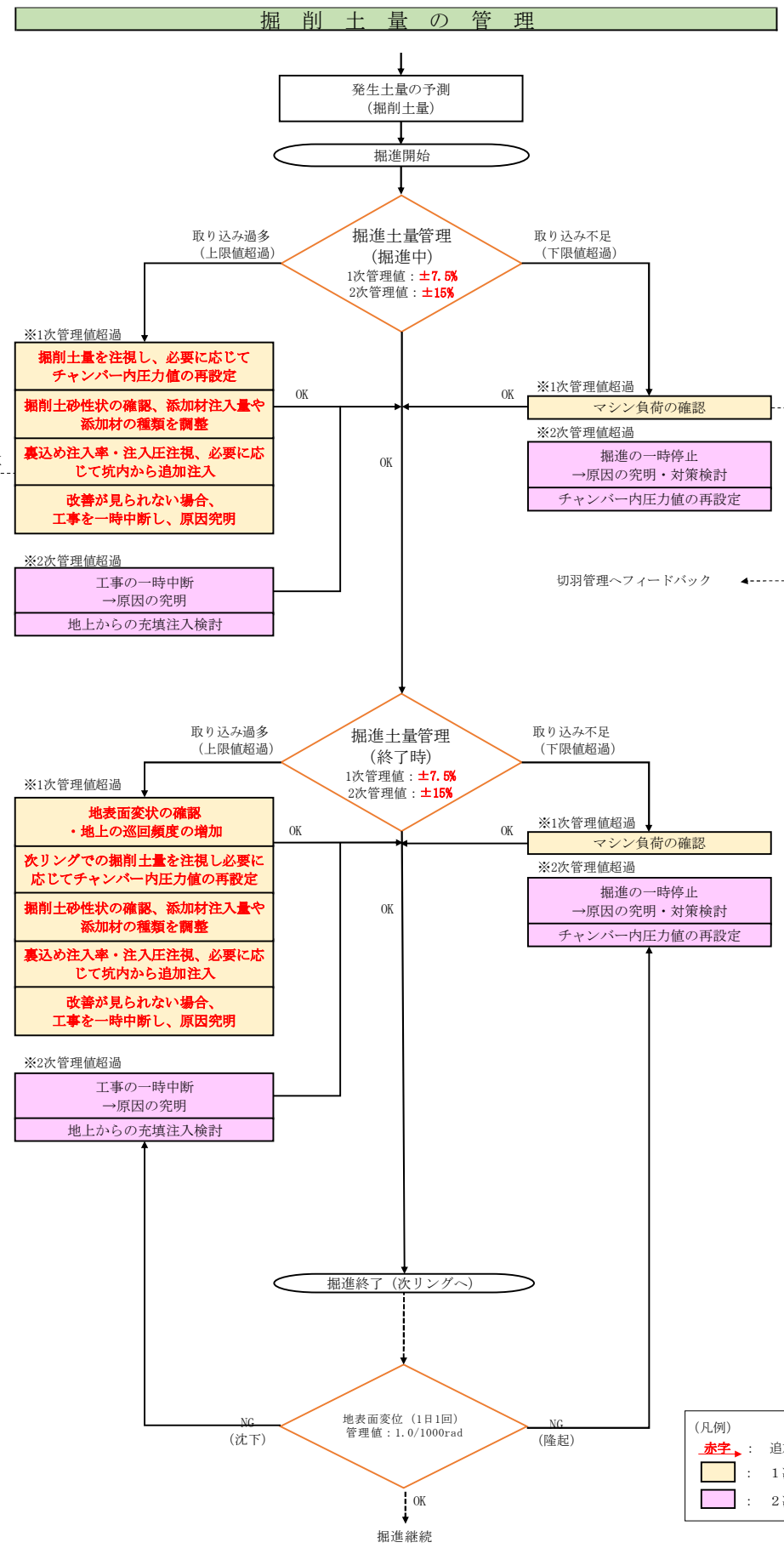
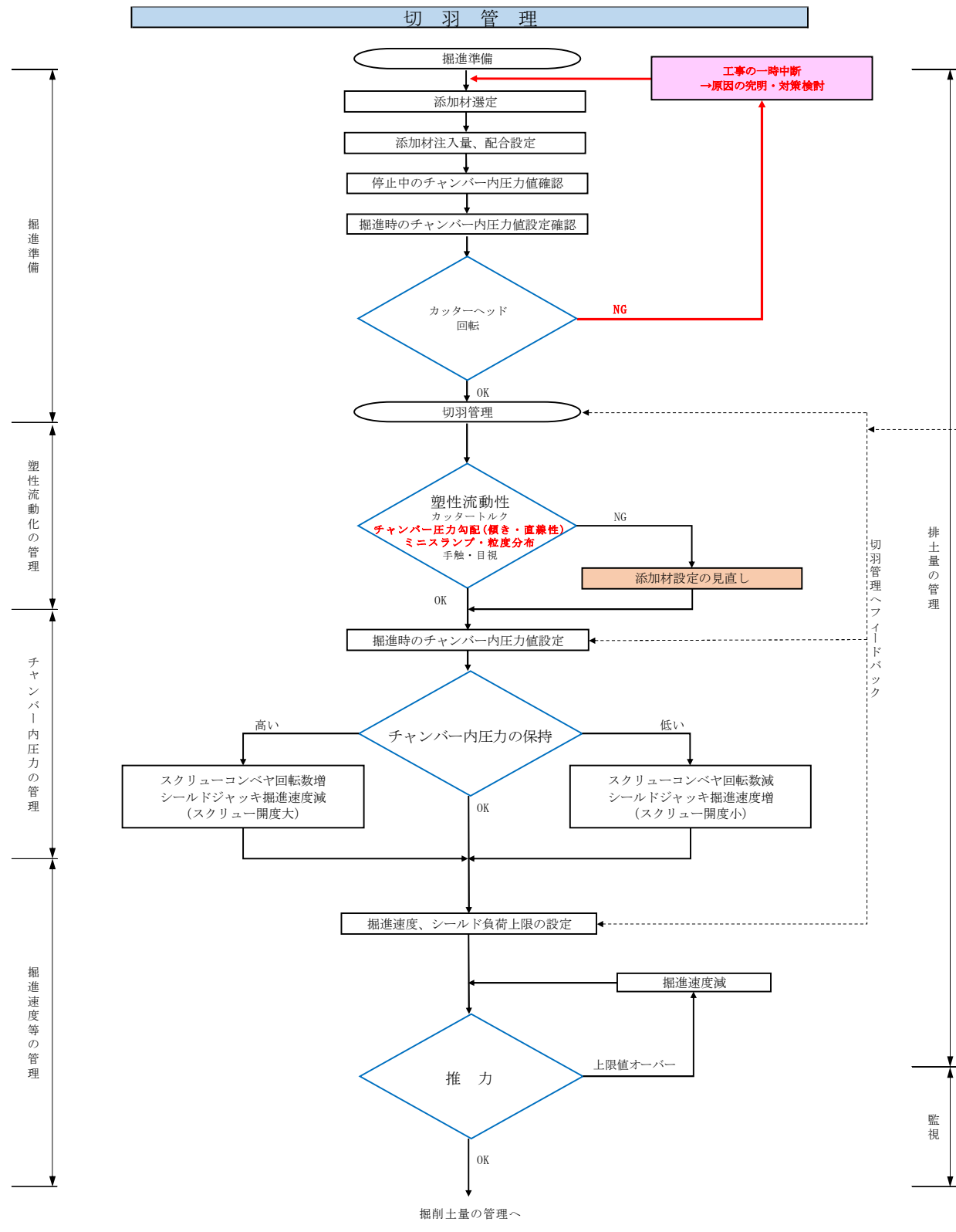
④ カッター回転不能(閉塞)時の対応

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。

8.2 管理のフロー

①掘進管理のフロー

今後の掘進における管理フロー（切羽の安定管理、掘削土量）を別図に示す。



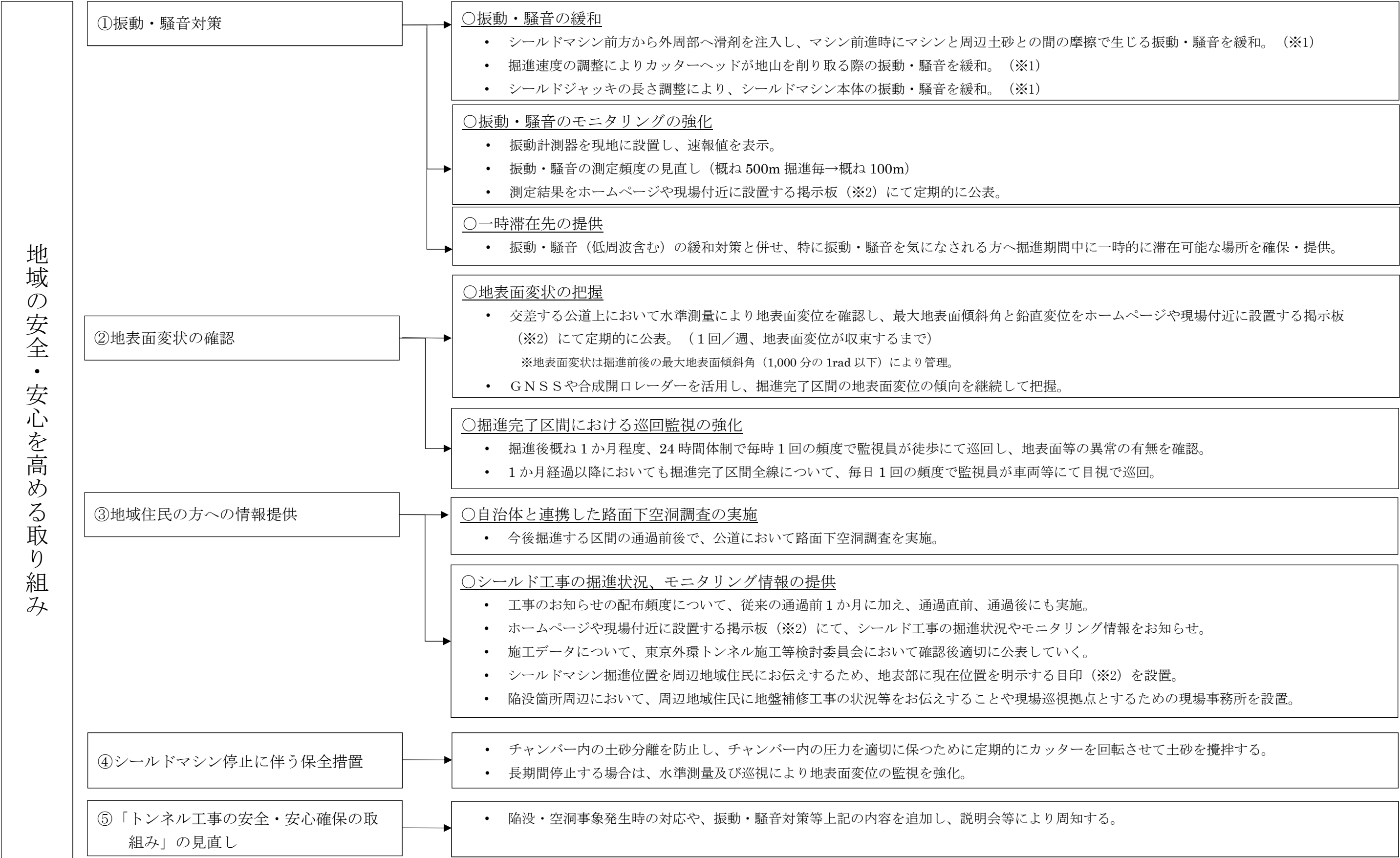
8.3 掘進管理項目および掘進管理基準の新旧対比表

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

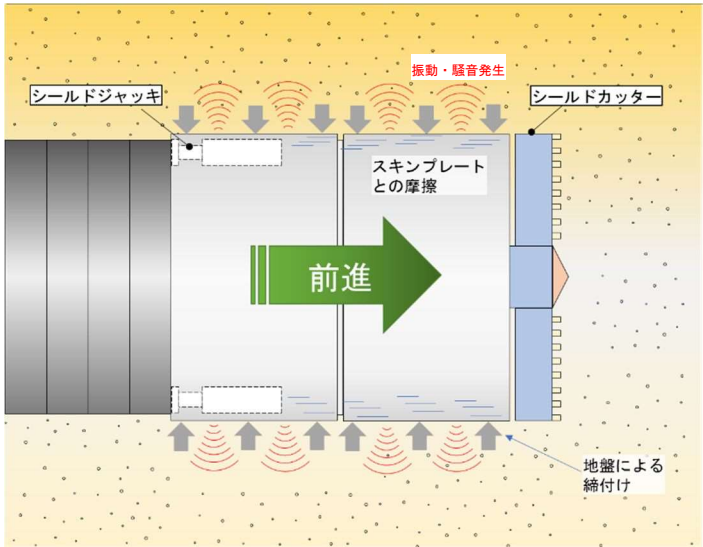
① 振動・騒音対策

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。

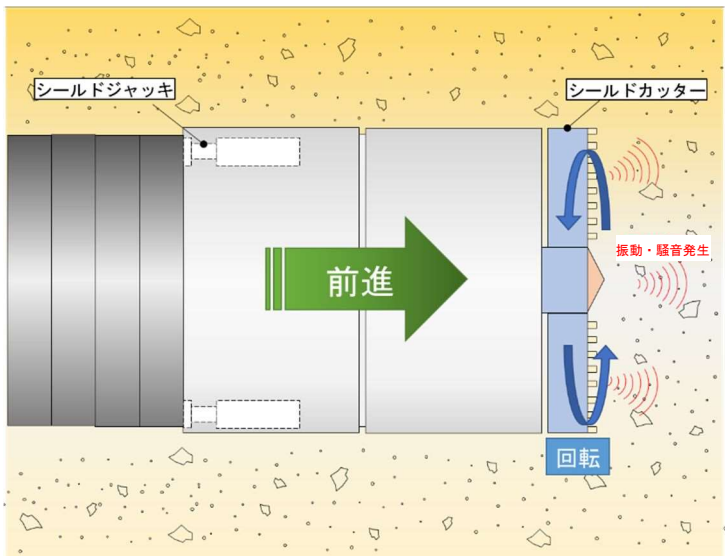
※（東京都 都民の健康と安全を確保する環境に関する条例）
第136条_日常等生活等に適用する規制基準[振動] （第1種低層住居専用地域の夜間19時～8時）

＜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

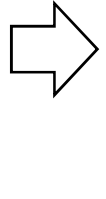
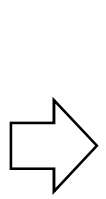
- ・ 掘進速度の調整によりカッターヘッドが土砂礫を削り取る際の振動・騒音を緩和。（状況に応じて実施）

◆ 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)