

シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン

令和3年12月

シールドトンネル施工技術検討会

はじめに

シールド工法は、適切に加圧された泥水あるいは泥土等で掘削面（切羽）の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながら、シールドを掘進させ、セグメントを組立てて地山を保持し、トンネルを構築する工法である。一般的には、非常に軟弱な沖積層から洪積層や新第三紀の軟岩までの地盤に適用される。地質の変化への対応は比較的容易であり、硬岩に適用された事例もある。主に都市内の下水道、道路、地下鉄等の工事に多く採用され、近年は、大土被り大断面の施工事例も多く見られる。

シールド工法は、多数の施工実績があり、地盤に応じて適切な形式で適切な施工を行えば安全に工事を遂行できる工法である。しかし、令和2年に鉄道事業及び道路事業において、シールドトンネル工事で、地表面に影響を与える事故が発生した。それぞれ原因究明が行われた中で、施工に課題があり、再発防止対策が取りまとめられるなど施工の高度化を図る必要があることが指摘されており、今後もシールド工法を幅広く活用していくにあたって、シールドトンネル工事の更なる安全性の向上と周辺地域の安心の確保が必要である。このため、本検討会において、シールドトンネル構築のための調査・設計・施工において考慮すべき事項をまとめたガイドラインを策定することとした。

具体的には、本検討会において、近年のシールドトンネル工事における事故等とその対策等についてヒアリングを行うとともに、シールドトンネル工事に関する建設会社へのアンケート調査を行い、事故の事例だけでなくトラブルとその対策や施工における工夫について事例の収集・確認を行った。その内容を基に、本検討会では、平成24年2月に発生した岡山県倉敷市におけるシールドトンネル工事の事故を受けて、再発防止を図るためにシールドトンネルの調査・設計・施工に関する技術的な検討を行いとりまとめられた「シールドトンネル施工技術安全向上協議会報告書（H26.3）」に記載された提言を踏まえつつ、シールドトンネル工事の安全性の向上と周辺地域の安心の確保のために考慮すべき事項について、最新の技術的知見を総括し、「シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン」をとりまとめたものである。

シールドトンネル構築のための調査・設計・施工の一連の流れの中で、まずは、調査段階において施工に伴って発生するリスクとその対応を体系的に整理して設計に引き継ぎ、設計段階において必要な配慮を施して施工に引き継いで、施工の準備を整えるとの考え方が必要である。また、施工段階においては、リスクを考慮した施工計画を立てることに加え、異常の兆候を早期に把握し、重大なトラブルや事故の回避に努めるとともに、想定される異常やトラブルについて、あらかじめ対応の考え方を整理した上で事象に対応することが必要である。これらを基本としつつ、想定外の異常やトラブルについても発生するおそれがあることを念頭に置き、実際に発生した場合には、関係者が連携して臨機に対応するとの考え方が必要である。これらの考え方を基本として、本ガイドラインでは、シールドトンネル構築のために調査・設計・施工において考慮すべき事項をとりまとめている。

本ガイドラインに指摘する内容については、今後のシールドトンネル工事の安全性の向上と周辺地域の安心の確保に向けて、各学協会、事業者等が定めるシールドトンネル構築のための調査・設計・施工に関わる基準類において、その改訂等に合わせて反映されるよう強く望むものである。なお、シールドトンネル工事の実施に伴う当該工法に関する技術的知見の蓄積は、今回策定したガイドラインで完結するものではなく、今後、新たな事象や課題等が確認されれば、そこから得られる技術的知見を基に、将来的にガイドラインの充実を図っていくことが必要である。

シールドトンネル施工技術検討会

目次

1. 総則	1
1-1 目的	1
1-2 適用範囲	2
1-3 用語の定義	2
1-4 リスクの想定とその対応の考え方	3
2. 調査	5
2-1 地質調査	5
2-2 支障物の調査	8
3. 設計	9
3-1 覆工の設計	9
3-1-1 セグメントの形状寸法	9
(1) セグメントの形状・寸法	9
(2) セグメントの分割	9
(3) Kセグメント	10
(4) Kセグメントの挿入代	11
3-1-2 セグメントの構造等	11
(1) セグメントの本体と継手	11
(2) RCセグメントの鉄筋量	12
(3) RCセグメントのシール溝	12
(4) シールドジャッキ偏心量の影響	12
(5) シールドの施工計画を考慮したセグメントの設計	12
(6) 急曲線施工に対する対策	13
3-2 シールドの設計	14
3-2-1 シールド形式の選定	14
3-2-2 テールシール	15
3-2-3 スクリューコンベヤー	15
3-2-4 形状保持装置	16
3-2-5 電気設備、油圧設備	16
3-2-6 シールドジャッキ	16

4. 施工	17
4-1 泥水・添加材の調整と管理	17
4-2 切羽圧力の管理	19
4-3 排土量管理	21
4-4 裏込め注入工	24
4-5 線形管理	25
4-6 シールドの姿勢制御	25
4-7 シールドトンネルの浮上り	26
4-8 突合せ継手の使用	26
4-9 セグメントの組立とシールドジャッキ操作	27
4-10 テールグリスの管理	27
4-11 掘進停止時の対策	28
4-12 異常の兆候の早期感知と迅速な対応	30
4-13 シールドトンネル内の作業従事者の避難	31
5. 周辺の生活環境への配慮	32
5-1 周辺の生活環境への影響のモニタリング	32
5-2 騒音・振動対策	32
5-3 情報提供	33
5-4 トラブル時の住民等への対応	33
6. その他の配慮事項	34
6-1 記録及びその活用	34
6-2 新技術の活用	34
参考資料	
I 掘進時の管理フローと想定されるリスクの例	36
II 掘削土量の計算例	38
【付録①】 シールドトンネル施工技術検討会の概要	付1-1
・ 検討会規約、委員名簿	付1-1
・ 検討会の開催経過	付1-2
【付録②】 シールドトンネル工事に関する事例集	付2-1
・ アンケート調査結果（トラブルとその対策事例）	付2-9
・ アンケート調査結果（工夫事例）	付2-16
・ 検討会でのヒアリング結果	付2-28
・ 建設会社からの提出資料（トラブルとその対策事例）	付2-51

1. 総則

1-1 目的

このガイドラインは、様々な事業分野のシールドトンネル工事において実際に発生したトラブル・事故とその対策から得られたシールドトンネル構築のための調査・設計・施工に関する技術的知見をまとめ、今後も幅広く活用されることが期待されるシールドトンネル工事の更なる安全性の向上と周辺地域の安心の確保を目的としてとりまとめたものである。

【解説】

シールド工法は、多数の施工実績があり、地盤に応じて適切な形式で適切な施工を行えば安全に工事を遂行できる工法である。しかし、令和2年に鉄道事業及び道路事業において、シールドトンネル工事で、地表面に影響を与える事故が発生した。それぞれ原因究明が行われた中で、施工に課題があり、再発防止対策が取りまとめられるなど、施工の高度化を図る必要があることが指摘されており、今後もシールド工法を幅広く活用していくにあたって、シールドトンネル工事の更なる安全性の向上と周辺地域の安心の確保が必要である。このため、本検討会においてシールドトンネル構築のための調査・設計・施工において考慮すべき事項をまとめたガイドラインを策定することとした。

本ガイドラインは、「1. 総則」、「2. 調査」、「3. 設計」、「4. 施工」、「5. 周辺的生活環境への配慮」、「6. その他の配慮事項」から構成されている。本検討会で実施したヒアリング及びアンケート調査で得られたトラブルとその対策や工夫事例について、本文内で紹介するとともに、事例の詳細を巻末【付録②】「シールドトンネル工事に関する事例集」に掲載することとした。

安全・安心にシールドトンネル工事を進めるためには、各事業の発注者、調査実施者、設計者及び施工者がこのガイドラインを踏まえ、適切な調査のもと、現場条件に応じたリスクを的確に把握し、安全性を有する設計を実施するとともに、リスクに対して適切な対応が可能となるよう施工計画をあらかじめ定めて施工管理を行うなど、施工時の対応を確実に実施することが必要である。

1-2 適用範囲

本ガイドラインは、国土交通省の所管する事業分野におけるシールドトンネル工事に適用されることを想定し、とりまとめたものである。本ガイドラインは、原則として円形断面を有する密閉型シールドトンネルを対象とする。

【解説】

本ガイドラインは、国土交通省の所管する事業分野におけるシールドトンネル工事に適用されることを想定し、とりまとめたものである。しかしながら、国土交通省所管外の事業分野で進められるシールドトンネル工事においても参考になるものと考えている。

本ガイドラインは、原則として円形断面を有する密閉型シールドトンネルを対象としている。なお、適用性を検討の上、円形以外にも準用することができるものと考えている。

本ガイドラインは、トラブル及び事故とその対策の事例や施工における工夫についての事例を基に、シールドトンネル工事の安全性の向上と周辺地域の安心の確保のために考慮すべき事項をとりまとめたものであるが、シールドトンネル構築のための調査・設計・施工の全ての事項を網羅しているものではないため、ガイドラインに記載のない事項は「土木学会 トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説」(以下、示方書という)等の技術図書を参照されたい。

1-3 用語の定義

リスク……シールドトンネル工事に係るリスクには、地質・地盤に関わる不確実性以外にも、計画や想定と実際の施工との乖離等によって生じる様々な影響があると考えられる。

このガイドラインで扱うリスクは、地盤沈下、振動・騒音の伝播、作業の安全性の低下等、周辺環境への影響を含め、シールドトンネル工事の施工により生じる安全・安心に係るリスクとする。

異常の兆候……単発的に施工管理項目の計測値が管理基準値を逸脱するなど、平常時とは状況が異なる可能性が疑われる事象

異常……計測値の逸脱が継続するなどの平常時とは異なる状況にあることが明らかな事象

トラブル……排泥管や排土管が閉塞するなど、異常の継続や複数の異常の発生により、通常の掘進を続けられない状態

重大なトラブル……小規模な出水や度重なるカッターの回転不能等、トラブルのうち作業従事者の安全性や周辺環境への影響につながる可能性のあるトラブル

事故・大きな被害……出水や空洞、陥没等の掘進により作業従事者の安全性や周辺環境への影響が生じている事象

【解説】

シールド工法に関する用語は、示方書等の技術図書を参照されたい。

1-4 リスクの想定とその対応の考え方

現場の条件について調査等により十分に把握した上で、シールドトンネルの施工により生じるおそれのあるリスクとその対応を体系的に整理し、設計での配慮を行うとともに、事故が発生した場合の被害の状況を想定し、施工時にトラブルが発生した場合の対応をあらかじめ定めること。想定外の事象が発生した場合は、関係者が連携して臨機に対応すること。

施工時には事前に定めたリスクへの対応に従って確実に施工管理等を行うこと。特に、重大なトラブルや事故が発生した場合には、直ちにシールドを停止し、応急対策を実施すること。その後、必要に応じて有識者に意見を求め、追加の調査を実施し、発生要因を明らかにするとともに、それを踏まえた対策を講じること。

【解説】

シールド工法により構築される地中のトンネルは、施工の影響を受ける構造物であり、地山内で安定するまでの間に受ける様々な影響を考慮して設計することが必要である。しかし、地盤の状況は完全に把握できるものではなく、また、予期せぬ地中支障物によるシールドの破損等、シールドトンネルの施工中に設計時の想定と異なる事象が発生する可能性を完全に排除できるわけではない。このため、シールドトンネル工事を安全に周辺環境への影響を最小化して行うためには、本ガイドラインで記載する調査・設計・施工の一連の流れの中で、発注者が中心となり、調査段階において施工に伴い発生するおそれのあるリスクとその対応を体系的に整理して設計に引き継ぎ、設計段階において必要な配慮を施して施工に引き継いで、施工の準備を整えるとの考え方が必要である。また、施工段階においては、リスクを考慮した施工計画を立てることに加え、異常の兆候を早期に把握し、重大なトラブルや事故の回避に努めるとともに、想定される異常やトラブルについて、あらかじめ対応の考え方を整理した上で事象に対応することが必要である。これらを基本としつつ、想定外の異常やトラブルについても発生するおそれがあることを念頭に置き、実際に発生した場合には、関係者が連携して臨機に対応するとの考え方が必要である。さらに、発注者及び施工者は、地質等の施工条件の変化に応じて、計画 (Plan)、実行 (Do)、評価 (Check)、改善 (Action) のPDCAサイクルにより、シールドトンネル工事が安全・安心な施工となるよう、施工計画や施工管理 (計画と実行) の検証 (評価) 及び見直し (改善) を逐次行うとの考え方が必要である。

シールドトンネル工事における事故・大きな被害の影響は、シールドトンネルを施工する現場の条件によって大きく異なるが、特に、海底下、河川下、湖沼下あるいは住宅地等の市街化された地域で施工するシールドトンネルで重大なトラブルが発生した場合には、出水、陥没等が発生し、その影響が大きくなるおそれがある。

こうした事故・大きな被害は、突然発生するわけではなく、施工管理の中で地盤性状の把握や泥水あるいは掘削泥土と切羽圧力の管理等による切羽安定の確認、掘削土の過剰取込みの監視、過剰取込みによる地盤内の隙間形成の可能性の認識、地表面の監視といった異常の兆候を複数の観点から把握するよう努めていたとしても、様々な観点で異常の兆候を捉えきれない、または異常であると判断できないことにより、必要な対策を講じないままに施工が進められ、異常、トラブル、さらに重大なトラブルへと進展することにより発生するものと考えられる。

このため、施工にあたっては、掘進が順調で周辺環境への影響がないと予断することなく、注意を怠らず、関係する全ての施工管理項目の慎重な監視に努めることが必要である。一つの項目だけでも異常の兆候及び異常を早期に感知することができれば、直ちに必要な対策を講じ

ることにより、シールドトンネル工事による事故・大きな被害を防ぐことにつながる。このため、前述の考え方を基本として、本ガイドラインの「2. 調査」「3. 設計」「4. 施工」に記載するシールドトンネル構築のための調査・設計・施工を実施することが必要である。加えて、シールドトンネル工事の事故・大きな被害が発生した場合、関連する施工中の事業を含め、より安全で周辺環境への影響を最小化する施工を最優先とし、実際に発生したトラブル・事故とその対策を踏まえ、必要に応じて設計・施工の見直しを実施することが重要である。

特に、施工においては、各種施工管理項目に管理基準値を設けて監視するなど、異常の兆候の把握に努めるとともに、事故が発生した場合の被害の状況も想定し、異常の兆候及び異常そのものや、複数の異常の発生や異常の継続によりもたらされるトラブルに対し、取るべき対応をあらかじめ定めて施工計画や施工管理に反映することが必要である。例えば、掘削時の異常の兆候を確実に検知する仕組みの導入や、シールドの停止を判断する基準や停止後の対応方針の作成等が挙げられる。

施工管理の中で異常の兆候及び異常そのものの把握と対応に努めた上で、それでもなお、周辺環境に影響を及ぼすおそれのある重大なトラブルが発生した場合には、直ちにシールドを停止して応急対策を実施することが必要である。その後、各種施工管理データの検証を行うとともに、必要に応じて有識者に意見を求め、追加の調査を実施し、発生要因について明らかにしつつ、それを踏まえて、変状への対処と、その後の掘削における重大なトラブルや事故を防ぐための対策を実施していくことが必要である。

なお、想定以上の沈下や陥没等の重大なトラブルや事故が発生した事例を踏まえれば、掘進が地盤の変状を発生させる可能性があることを常に意識しつつ、実際の施工にあたっては各施工段階において異常の兆候を見逃さないようにする施工計画、施工管理を立案・実行することが必要である。具体的に配慮すべき事項については、「4. 施工」に記載するが、シールド形式、シールドの断面形状及び寸法、施工延長、地盤の性質、トンネルの土被りや地表の状況等を踏まえ、工事ごと、施工段階ごとに想定されるリスクとその対応を整理した上で適切な施工計画や施工管理を立案・実行することが必要である。

また、本ガイドラインに示す各項目の実施主体については、事業ごとに調査・設計・施工の各段階で対応が必要な項目を発注者が中心となり整理した上で、役割分担について抜け落ち等がないように発注者、調査実施者、設計者及び施工者が連携・調整し、対応が必要な項目について各段階で引き継ぎながら共通認識を持つことが重要である。なお、発注者、設計者及び施工者のそれぞれの役割については「シールドトンネル工事に係る安全対策ガイドライン（平成29年3月 厚生労働省労働基準局）」が参考になる。

リスクを想定し、対応するにあたっては、発注者、調査実施者、設計者、施工者が情報を共有し、必要に応じて有識者の支援も得て、関係者がコミュニケーションを図りながら各段階で想定されるリスクとその対応を引き継ぎ連携して対応することが必要であり、「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン（令和2年3月）」が参考になる。また、想定すべきリスクの内容については、示方書（P14 解説表 1.3.1）に記載のある「計画で考慮するリスクの例」や本ガイドライン（P36）に示す「参考資料Ⅰ 掘進時の管理フローと想定されるリスクの例」が参考になる。

2. 調査

2-1 地質調査

シールドトンネル工事の地質調査は、掘進対象地盤の地質状況及びその変化を把握するため、地形・地歴等を考慮した上で適切な計画のもとにボーリング調査等を実施すること。また、地下水の状況及びその変化、可燃性ガスの状況等の必要な調査を実施すること。注意すべき地質の分布範囲・性状等が不確実なことによる地質リスクに関する情報は、設計及び施工に確実に引き継ぐこと。

海、河川、湖沼を小さい土被りで横断して掘進するシールドトンネルを計画する場合は、海底、河床、湖沼底の探査等を十分に実施すること。

【解説】

(地質調査全般)

地質調査は、シールドトンネル工事の設計全般及び施工計画、施工管理に大きく影響を及ぼすため、現地の条件を考慮しながら資料調査から現地調査まで系統的かつ十分に行うことが必要である。特に、周囲の地形変化が激しい地域や旧河道も含めた河道等では、地質等が急激に変化することが多く、施工の難易度が高い場合があるため、過去の航空写真や古地図等による地表部の情報のほか、地盤データベース(「KuniJiban」等)による既往の地盤調査の情報を含む資料の調査や、現地踏査等を通じて地形・地歴等を十分に調査し、その結果を考慮した上でその後の調査計画を定め、適切にボーリング調査や物理探査等の現地調査を実施することが必要である。

既存の調査等において、地盤の構成・性状を十分に確認することができない場合は、地形・地歴等から推定される地質の空間的変化の可能性や、シールドトンネルの施工の際に想定される切羽の不安定化、その他のトラブル・事故と地盤性状との関係を考慮した上で、ボーリング調査や物理探査等を追加することによつて的確に地質の状態を把握することが必要である。また、シールドトンネルの設計・施工で重要となる設計水圧は正確に把握する必要があるため、被圧水の有無を含め、年間の水位変化等、時間的な変化も調査することが重要である。さらに、地盤の特性はN値を用いておおよその推定を行うことが一般的であるが、礫分の多い地盤等では実質的な地盤の剛性や強度以上にN値が高く測定されることがあるため、地盤の安定性評価にあたっては、N値だけでなく粒度分布等の各種情報を踏まえ判断するなど留意が必要である。

カッタービットや泥水式シールドにおける排泥管・礫処理装置、泥土圧シールドにおけるスクリーコンベヤー等の設計は、粒度分布や礫の形状、寸法及び硬さ、透水係数等の調査を踏まえて行うことが必要である。実際の施工では、巨礫による排泥管・スクリーコンベヤーの閉塞のほか、細粒分が少なく均等係数が小さい未固結のあるいは固結度が低い砂質土層等におけるトンネル切羽の不安定化が課題となる場合がある。このため、調査結果を活用して、礫が排出可能か、切羽の安定が保てるか等、地盤条件に対応して掘進することのできるシールドの設計を行うことが必要である。特に、よく締まった砂礫地盤については、地質調査の段階ではN値が大きく、事前調査の結果として良好な地盤と評価されたとしても、実際に地下水下方で掘進する際には粘着力が小さく、一旦応力が解放され緩められると安定性が悪くなる場合があるため、切羽の安定性評価では注意が必要である。

泥水式シールドでは、泥膜の形成、比重や粘性等の泥水品質、泥土圧シールドではチャンバ

一内土砂の塑性流動性や止水性の確保が重要である。事前の調査により、これらの確保が困難な地質の存在が想定される場合、

- ・腐植土や非常に軟らかい粘性土での想定以上の地盤変位
- ・細粒分が少ない未固結の、あるいは固結度が低い砂礫地盤での切羽の不安定化
- ・泥水式シールドにおける透水性の高い地盤や巨礫含有地盤での泥水の逸水、泥水密度計測の誤差
- ・泥土圧シールドにおける高水圧地盤でのスクリーコンベヤーの止水性の低下、間隙率が大きい地盤での気泡材等の逸失、材料分離により生じる泥土体積計測（密度計測）の誤差等が問題となることが多いため、該当する地質の特性と分布等の把握に努めることが必要である。ただし、多くの場合、十分な調査を行っても注意すべき地質の特性や分布範囲等に不確実な点が残ることから、発注者及び調査実施者はこうした地質上の不確実性に起因するリスクに関しても調査の中で整理・共有した上で、確実に設計及び施工に引き継ぎ、設計者及び施工者においても、こうしたリスクの有無を確実に確認した上で、設計・施工を進めることが必要である。その他、硬質層と軟質層の互層、既存の空洞が存在する場合等においても施工時にトラブルが生じる例があるため、同様に注意して調査を行うことが重要である。

（水底探査）

海域等の水底においてシールドトンネルを施工する場合、水底の地盤状況を把握することが重要である。海底、河床、湖沼底等は、水底の状況に経時変化が生じやすく、かつ、調査が困難であることもあり、その情報を正確に把握し難い場合がある。しかし、シールドトンネルの線形計画、覆工計画及び施工計画等において、重要となる土被り設定には海底、河床、湖沼底等の情報は欠くことができない。このため、海、河川、湖沼等を横断して掘進するシールドトンネルの調査・計画・設計にあたっては、当該地域の堆積環境を念頭に置いて、海底、河床、湖沼底等の探査を十分に実施し、地形、地質、堆積年代と変化を十分把握することが必要である。また、将来の浚渫の可能性についても調査する必要がある。ただし、既往の調査結果、過去の施工例等を調査し、十分な土被りが確保できると判断される場合は探査を省略してもよい。

【参考】想定外の地質によるトラブルとその対策の事例

■泥水式シールド：

- ・事前の地質調査で想定していた以上の巨礫等が掘削地盤に存在したことにより排泥管が閉塞した。これに対し、薬液注入による止水、シールドの一部設備の解体による礫の除去やカッターヘッドの補修、計測管理と切羽安定管理の強化により対応した。

参照：【付録②】2-1（事例1-2、事例1-5、事例1-11、事例1-12、事例1-14、事例1-15）

- ・排泥管閉塞後の掘進・停止の繰返しや閉塞物除去作業時に、シールド上部の砂質土層が、泥水に長時間さらされたことや閉塞に伴う圧力変動により不安定化し、天端部より砂質土層が流動的に切羽内に流入し、陥没事象が発生した。なお、当該地盤は通常N値 50 以上の安定した層であるが砂質土層の拘束圧が解放されて地下水の浸透力を受けると流動性が高くなる地盤

であり、これに対して掘削土の状態に応じた泥水密度の管理が不十分であった。また、当初の掘削土量管理手法では過剰な土砂の取込みを認知できなかった。時系列データを分析し、掘削土の全積算乾砂量と計画掘削土の乾砂量とをリング毎に比較することにより乾砂量の取込み過多の有無を推定できることを確認した。再発防止対策として、各リングにおける全工程でのリアルタイムでかつ連続する各リングでの土砂の過剰な取込みの有無を監視することなどの対策により掘進を完了した。

参照：【付録②】 3（ヒアリング結果①）

相鉄・東急直通線新横浜トンネル工事現場付近での道路陥没について
（（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構）

■ 泥土圧シールド：

- ・ 事前の地質調査で想定していた以上の巨礫等が掘削地盤に存在したことにより、スクリーコンベヤーと流体圧送管が閉塞した。これに対し、土砂搬出方式の変更や掘進管理の強化等により対応した。

参照：【付録②】 2-1（事例2-5、事例2-16）

- ・ 事前のボーリング調査では風化花崗岩を硬質な土砂相当と評価し、掘進していたが、カッタートルクの増大や速度低下が生じ、ビットが早期に摩耗した。これに対し、元々実施予定のなかったビット交換を行う計画に変更して対応した。ビット交換時に実施した原位置試験では事前のボーリング調査結果を大きく上回る地盤の強度が確認された。

参照：【付録②】 2-1（事例 2-14）、3（ヒアリング結果⑤）

- ・ 細粒分が少なく均等係数が小さく、礫が卓越して介在する砂質地盤で夜間休止時に掘削土の塑性流動性・止水性が低下した。夜間停止後の再開時にカッター回転不能となる閉塞が発生し、その閉塞の解除のために行った作業に起因して陥没事象が発生した。今後の対策として、土質調査結果や夜間休止時間を踏まえた気泡材等の添加材の配合試験の追加、チャンバー内圧力の値と勾配等のリアルタイム監視、掘削土量の適切な監視等の施工管理の強化を行うこととしている。

参照：【付録②】 3（ヒアリング結果②③）

東京外かく環状道路工事現場での地表面陥没事故について
東京外かく環状道路 具体的な再発防止対策の検討状況
東日本高速道路（株）

■ 参考となる工夫事例や新技術（参照：【付録②】 2-2）

1）調査・探査・測量

- ・ 三次元CIM等による地質や近接構造物のリアルタイム可視化
（B社⑥、G社⑥、S社⑥）

2-2 支障物の調査

シールドトンネルの掘削断面において支障となる諸物件を十分に調査した上で、必要な対策を講じること。

【解説】

掘進中に想定しない杭や土留め壁等の支障物に遭遇した場合には、一時的に掘進不能になるほか、掘削に伴う地盤の緩み等により近接構造物に影響を及ぼし、対応困難な変状が生じることなどが想定されることから、ルート選定に先立ち、シールドトンネルの掘削断面において支障となる諸物件について、入念な事前の調査が必要である。

その結果を踏まえ、支障物を極力回避するとともに、どうしても回避できない場合には支障物をシールド施工の前に除去することが望ましい。また、周辺地盤への影響を抑えられる場合には、支障物をシールドにより直接切削することも可能である。

支障物等は、各管理者の台帳での調査が一般的であるが、施工誤差等が台帳に反映されていないケースもあるため、支障物の存在が疑われる場合等には、必要に応じて物理探査や試掘等によって現地で実際の位置、規模、深さ等を確認することが有効である。

工事中に一時的に設置され、工事完了後に残置された仮設材については完成後の図面等に残っていないことが多い。これらの仮設材が原因となり工事が大きく遅延する例もあるため、特に規模の大きな土木構造物等が掘進ルート近傍に存在する場合、対象構造物の施工方法を考慮して仮設材が存在するかどうかを可能な範囲で想定して、事前の支障物撤去工事の際やシールドトンネルの施工時のリスクへの対応を整理する際に留意することが望ましい。

過去の調査ボーリング跡、古井戸や仮設工事跡等は、地盤が著しく乱れていることや、空気や水の通り道となることなどがあるが、一般的には調査により全てを把握できない場合も多く、必要に応じて土地の管理者等から事情を聞いておくことが望ましい。

支障物の調査において、図面等に記録が残されていない地中の支障物の調査で試掘が不可能な場合、支障物の確認に弾性波や地中レーダー、磁気等による物理探査が行われることがある。今後、シールドトンネルの施工時も含め、地盤内の空隙や支障物等の地盤状況を把握可能とする調査や切羽前方探査等の手法の技術開発も望まれる。

【参考】支障物によるトラブルとその対策の事例

■泥水式シールド：

- ・事前調査で予期できなかった残置仮設材の出現により排泥管が閉塞し、シールドの停止に至った。これに対し、予備排泥管や送排泥バイパスバルブの開放操作、圧力変動監視による閉塞物の早期回収、シールド停止時に土量等データを時系列で管理等により対応した。

参照：【付録②】2-1（事例1-6、事例1-7（ヒアリング結果⑤））

■泥土圧シールド：

- ・事前調査で予期できなかった残置仮設材の出現により接触や排土悪化、泥土圧の変動等のトラブルが発生した。これに対し、残置物の切削等により対応した。

参照：【付録②】2-1（事例2-10、事例2-11、事例2-12、事例2-13）

3. 設計

3-1 覆工の設計

3-1-1 セグメントの形状寸法

(1) セグメントの形状・寸法

セグメントの形状・寸法の決定にあたっては、構造計算のほか、類似工事等の実績も参考に検討すること。

【解説】

セグメントの形状・寸法は、一般に構造設計等で計画するが、施工時荷重の大きさと作用状態、発生応力、施工誤差等に設計では予測できない不明確な点もあることから、類似工事のセグメントの厚さと外径の比率、セグメント幅と厚さの比等の実績も勘案して検討することが必要である。ただし、実績の下限値付近では、事故やセグメントの損傷を生じた事例があり、そのリスクを評価したセグメント構造の決定や施工上の対策等を行うことが必要である。また、継手の種類によっては、継手に求められる引張強度やせん断強度を確保するために、一定以上のセグメントの厚さが必要になることから、セグメント厚さの検討にあたっては継手の構造や配置を考慮して決定することが重要である。

(2) セグメントの分割

セグメントの分割は、リングとしての構造的な安定性、製作性、施工性のほかに、K セグメントの安定性に配慮して決定すること。

【解説】

セグメントの分割数が少ない場合は、1ピースの弧長と重量が大きくなるため、運搬性やトンネル坑内等での取扱いやすさが低下することがある反面、型枠や継手のコストが軽減できることや組立回数の低減によって組立速度が向上することが期待できるため、運搬性や取扱いに支障がなければ分割数を少なくする傾向にある。また、K セグメントは分割形式を等分割にしてその中心角を大きくすることなどによって、拔出しに対する安定性が高まると考えられるが、Kセグメントの重量が増えるとともに、等分割のKセグメントは挿入時にオペレータが両側のB-K間のセグメント継手の離隔を同時に見られず、B・Kセグメントの隅角部の欠け等の不具合が出ることもあるため、施工性にも配慮して分割形式を決定することが必要である。

セグメントの分割形式の選定にあたっては、経済性や組立時間の短縮だけでなくセグメント組立のためにジャッキを引抜いたときの影響や、Kセグメントの安定性、組立時のセグメントの損傷防止についても十分配慮することが重要である。

(3) Kセグメント

Kセグメントの型式、形状・寸法は、漏水等の原因となるリング継手の目開きを生じさせないように配慮するとともに、Kセグメントの抜出しの可能性を照査すること。また、必要に応じてKセグメントの滑動を防止する対策を講じること。

【解説】

Kセグメントは、最終的にリングを閉合して完成させるセグメントである。すなわち、セグメントの組立誤差が累積された部分に挿入するものであり、最も組立に注意が必要な部分である。このため、Kセグメントの型式、形状（挿入角度、継手角度）、寸法は、完成時はもちろんのこと、施工性についても十分配慮して決定することが必要である。

軸方向挿入型Kセグメントでは、挿入角度を大きくすると施工上は有利なことが多いが、継手面がトンネル軸と斜交するため、継手面の力の伝達がより複雑となるので適切な角度とすることが必要である。軸方向挿入型のKセグメントが抜出そうとする力は、セグメントのリング方向の軸圧縮力によって生じ、挿入角度が大きくなると大きくなる。さらにシールドジャッキの引抜き力や施工時荷重もKセグメントの抜出そうとする力を助長する可能性があることに留意することが必要である。セグメントを組立てるため、Kセグメントを押さえているジャッキを抜いた場合、この力は、KセグメントとBセグメントとの間の摩擦、リング継手、セグメント継手の抵抗によって保持される。ボルト形式のセグメント継手が用いられている場合は、ボルトのせん断力によって抜出し力がKセグメントを保持する力（保持力）を超えることは少ないと考えられる。しかしながら、近年、多く用いられるようになってきているワンパス式の継手では、セグメント継手のせん断抵抗が期待できる場合を除いて、KセグメントとBセグメントとの摩擦、リング継手の強度で抜出し力に抵抗する必要がある。KセグメントとBセグメントとの摩擦力は摩擦係数に依存するが、要素実験の結果、条件によって摩擦係数が0.1を下回ることが明らかとなった。Kセグメントの抜出しは、漏水の原因になるとともに、状況によっては、重大なトラブルや事故につながるおそれがあるので、Kセグメントの抜出しについて十分な照査を行うことが必要である。抜出しの検討にあたっては、Kセグメント挿入時におけるシールド材への滑剤の塗布等の影響についても考慮することが必要である。

照査の結果、抜出し力が保持する力を上回る場合は、施工時に仮の保持力を付加するなど適切な対策を講じる必要がある。保持力を付加する方法としては把持金具を用いて、隣接する既設のセグメントにKセグメントを固定する方法等が用いられている。

また、半径方向挿入型Kセグメントでは、半径方向への抜出し力に対して、セグメント継手やリング継手のせん断強度を十分に確保するなどの摩擦に頼らない構造上の防止対策を講じることが必要である。

【参考】シールドジャッキ引抜き時のトラブルとその対策の事例

■泥水式シールド：

- ・複合曲線区間を施工中にテールクリアランスが不足し、シールドとセグメントの競りが生じていた。この状況で、シールドジャッキを引抜いた時にKセグメントが一部抜出した。これに対し、PC鋼棒設置による抜出し防止、テールクリアランスの監視強化等により対応した。

参照：【付録②】4（事例4-1）

(4) Kセグメントの挿入代

軸方向挿入型Kセグメントを使用する場合のKセグメント挿入代（セットバック量）は、施工性が確保できる長さとなるよう配慮すること。

【解説】

軸方向挿入型Kセグメントは、トンネル軸方向にテーパーをつけてトンネル縦断方向の切羽側から挿入する構造であるため、テール内でのスペース確保が必要である。

シールドテールでのKセグメントの挿入代を短くするとセグメント組立時におけるセグメントの損傷、組立精度の低下等、覆工の品質に支障をあたえるおそれがある。さらに、継手の挿入角度を大きくすることや継手角度を設ける必要が生じ、Kセグメントの安定性を低下させる要因となる。このため、適切な施工性とKセグメントの安定性が確保できる挿入代となるよう十分配慮する必要がある。

3-1-2 セグメントの構造等

(1) セグメントの本体と継手

セグメントの本体と継手は、完成時の安全性の確認はもとより、施工状況を考慮した設計を行い、万一の場合にも重大なトラブルや事故につながらないように安全性の確保に配慮すること。

【解説】

シールドトンネルのセグメントは、水圧、土圧等のトンネル完成時に作用する荷重に抵抗する主体構造物であると同時に、施工時にはシールド掘進時のジャッキ推力、シールドテール内から地山側へ出る際のテールシールやテールグリス圧による拘束圧、裏込め注入圧のほか、既に組立てたセグメントリングの組立精度や変形状況によって生じる外力等の施工時荷重にも抵抗する構造物である。

セグメントの設計にあたっては、対象トンネルの施工条件を十分考慮した上で、地盤条件のほかに、トンネルがおかれている諸条件を考慮し、完成時はもちろん施工中における安全性と機能が確保されるように配慮する必要がある。このため、セグメントの設計は、施工時荷重のほか、裏込めの注入時期や注入位置等を含めて、施工時の状況を十分に考慮して行うことが必要である。

特に、締結力がない突合せ継手等のセグメント継手を採用した場合は、リング継手の強度等構造条件や地盤条件、裏込め注入の状況等施工条件によっては、構造耐力が著しく低下し、急激な崩壊を招くおそれがある。したがって、セグメント継手の選定にあたっては、現場の状況、施工条件等を的確に反映させてリスクを評価し、適切な継手構造を採用する必要がある。

リング継手は、セグメント継手と同様に、種々の施工時荷重に配慮した上で、継手の構造形式や強度を決定することが重要である。特に、リング継手の引抜き耐力はシールドの曲線施工や蛇行修正時を想定し、トンネル軸方向の引張力と断面方向のせん断力とが複合して作用することに配慮した設計を行う必要がある。また、リング継手の破壊が、トンネル構造としての脆性的な破壊につながらないようにすることが必要である。

(2) RC セグメントの鉄筋量

RC セグメントの鉄筋量は、適用する設計基準で定められた照査や検討のほか、セグメントの破壊形態や類似工事等のセグメントの設計実績も参考にして検討すること。

【解説】

RC セグメントの鉄筋量は、一般にトンネル完成時における作用荷重に対する構造設計等で求めるが、施工時の影響も考慮する必要がある。しかし、施工時の影響は施工時荷重の大きさと作用状態、施工誤差等に影響され、設計では予測できない不明確な点もある。このため、RC セグメントの鉄筋量及び構造細目の決定にあたっては、適用する基準で定められた設計荷重に対する制限値の照査や構造細目を満足するだけでなく、単純曲げの破壊形態が鉄筋の降伏よりもコンクリートの圧縮破壊が先行して発生する鉄筋量とならないことや、曲げひび割れ発生時に中立軸が極端に上がり背面コンクリートが急激に圧縮破壊する鉄筋量にならないことを確認するとともに、類似工事等のセグメントの最小鉄筋量、最大鉄筋量、主鉄筋最小径、鉄筋間隔等の実績も勘案して決定することが重要である。

(3) RC セグメントのシール溝

RC セグメントのシール溝は、適切な位置、寸法・形状とすること。

【解説】

RC セグメントのシール溝は、シール材の接面応力により、セグメント端部に欠けやひび割れが生じるおそれがある。特に、水膨張性シール材を採用する場合には、セグメント組立後の膨張圧の影響等によりセグメント端部に損傷を与えるおそれがある。

このため、シール溝の位置や寸法・形状及びシール材の形状・種類を検討し、セグメントが損傷せず、十分な止水効果が得られる仕様にする必要がある。

(4) シールドジャッキ偏心量の影響

セグメントの設計にあたっては、テールクリアランスの影響を考慮してシールドジャッキ偏心量の影響に対する安全性の検討を行うこと。

【解説】

セグメントの設計にあたっては、シールドテール内でのセグメントリングの偏りを考慮し、シールドジャッキの偏心量にテールクリアランス分の誤差を加味して、RC セグメントでのひび割れの発生、鋼製セグメントにおけるトンネル軸方向の座屈に対する安定を検討することが必要である。特に、セグメントの厚さが薄い場合には注意が必要である。また、セグメント幅が広い場合には、セグメント厚さが薄いことの影響がより顕著となることが考えられるため十分注意して設計することが必要である。

(5) シールドトンネルの施工計画を考慮したセグメントの設計

セグメントの設計にあたっては、シールドトンネルの施工計画を考慮して設計条件や照査項目を定めること。

【解説】

セグメントは施工中にジャッキ推力や裏込め注入圧等の荷重を受けるとともに、完成後の土圧、水圧等の永久荷重に抵抗するトンネルの主体となる構造物である。このため、施工時にセ

グメントに損傷を与えると長期的に主体構造物に求められる機能や性能の低下を招く要因となるおそれがある。また、シールドトンネルの施工においては変化する地質条件に適宜対応しながら、大きな土水圧、切削抵抗に対抗するためのジャッキ推力を取扱う必要がある。ジャッキ推力のセグメントに与える影響は大きく、シールドの推進にあたっては、シールドとセグメントの位置を適正な範囲に保つ必要がある。しかし、地盤状況の変化、シールド推進の制御方法等の影響を受けて適正範囲を超えることが少なからず生じる。また、裏込め注入の実施時期を状況によって遅延せざるを得ない場合が生じることもある。このため、シールドトンネルの施工時の地盤条件や施工の計画、施工時の状況を反映させたセグメントの構造設計とすることが施工時における不具合を避け、セグメントの損傷を防止する上で、また、重大な事故を防ぐために重要である。

一方、工事实施にあたって施工計画を立てる場合は、設計条件に適合した計画にすることが必要である。このためには、下記に配慮することが重要である。

- ① 施工計画を立案する際、設計結果を反映した施工計画が行えるよう、想定した施工条件を明示すること。
- ② 施工時には、セグメント設計時に想定した施工条件を反映した施工計画を立案するとともに、施工上の留意点を周知すること。
- ③ セグメントの構造設計条件が、施工計画において設計時に想定した施工条件と異なる場合には、施工計画に合わせて適切に構造設計を見直すこと。
- ④ 施工中に不具合や施工計画と異なる状況が生じた場合は、原因の究明と設計に及ぼす影響を検討すること。

(6) 急曲線施工に対する対策

急曲線施工ではセグメントに局所的な施工時荷重が作用することがある。このため、セグメント本体や継手の損傷を防止するため、十分な対策を講じること。

【解説】

急曲線施工におけるセグメントには、シールドジャッキの片押しや場合によってシールドテールでの競り等により、セグメントリングに大きな偏圧が作用するなど、局所的な施工時荷重が一時的に作用することがある。特に、シールドテールとの競りやテールブラシへの裏込め注入材の浸入、固結によって、局所的な荷重や過度なセグメントの拘束力が発生する場合は、セグメント本体や継手部に損傷が生じている施工事例が多い。このため、急曲線部では以下に留意することが必要である。

- ① セグメントは急曲線区間だけでなくその前後の区間においても大きな施工時荷重を受けることがあるため、急曲線区間を含む前後の一定区間においても適切なセグメントの構造、形式、幅・厚さ等の形状、及び継手構造とする。
- ② 急曲線施工にあたって、シールドは高い操作性及び適切なテールクリアランスを確保し、シールド掘進時のシールドジャッキによるセグメントへの偏圧を防止するため、中折れ装置の採用とともにシールドジャッキのシリンダーの小型化や配置についても検討する。
- ③ 急曲線区間はシールドとセグメントリングとのずれやセグメントリングの変形、競りにより、テールブラシ内に裏込め注入材が浸入して固結しないように対策を検討する。
- ④ 急曲線区間で外径を縮小した鋼製セグメントを用いる場合は、テールシールド内へ裏込め注

入材が浸入しやすくなり、テール内で固結した裏込め注入材により急曲線区間通過後のRCセグメントに対して局所的な施工時荷重が作用することによって損傷が生じることが考えられるため、その対策を十分に検討する。

3-2 シールドの設計

3-2-1 シールド形式の選定

シールド形式を選定する際には、安全性の確保と周辺環境への影響の最小化を最優先とし、切羽の安定を保つことができるよう、掘削地盤への適応性を十分に検討すること。それに加え、断面形状及び寸法、施工延長、トンネルの土被りや地表の状況、工事用地等の諸条件を考慮し、経済的に施工できることも含め、総合的な観点でシールド形式を選定し、それに応じた設計を行うこと。

【解説】

シールド形式の選定にあたって最も重要な観点は安全にかつ周辺環境への影響を最小化して掘進できることであり、シールドトンネルを構築する全延長において、掘削地盤の地質や地下水の条件に適合し、切羽の安定を図ることができる形式を選定することが必要である。それに加えて、断面形状及び寸法、施工延長、トンネルの土被りや地表の状況、工事用地、立坑周辺環境、掘削土の処分や利活用等を考慮し、経済性等も十分に検討した上で、総合的な観点で最適な形式を選定することが必要である。シールド形式の選定を誤ると、切羽圧力保持や土砂排出等に支障が生じ、多大な補助工法が必要となったり、掘進不能となる重大なトラブルが発生したりするほか、場合によっては事故につながるおそれがある。

泥水式シールドや泥土圧シールドといった密閉型シールドでは、切羽は隔壁で仕切られており直接目視できず、計器による値から間接的に切羽の状態の把握を行うこととなる。このため、泥水式シールドにおける泥膜形成・泥水品質確保と適切な泥水圧管理や、泥土圧シールドにおけるチャンパー内土砂の塑性流動性・止水性の確保と適切な泥土圧管理、各形式の排土機構等切羽の安定を確保するための方策と地盤との適合性を十分考慮して、適切な形式を選定することが必要である。

シールドトンネルを構築する全延長で遭遇する地盤条件やシールドトンネルの線形は、一般に多岐に渡っている。また、シールドは、掘削機構、切羽安定機構、推進機構、セグメント組立機構、排土機構から構成される複雑な構造である。シールドは、調査結果に基づいて想定される条件に対して、各機構が総合的に機能し、安全な掘進及びトンネル構築ができるよう、十分な剛性や強度、安全性や施工性、耐久性を有するように設計することが必要である。また、各機構が総合的に機能を発揮するよう適切に管理するため、シールドには十分な計器を装備しておくことが必要である。さらに、異常やトラブル発生時の備えや周辺環境への影響の低減について、設計時における配慮により対応することが合理的となる場合もあるため、リスクとその対応の整理の結果を踏まえ、設計の段階でできるだけ検討することが望ましい。シールドの断面形状及び寸法等により装備可能な設備が限定される可能性があることに留意した上で、シールドに求められる機能を発揮できるよう設計を行うことが必要である。

なお、シールドトンネル工事で事故が発生した場合、関連する施工中の事業を含め、より安全かつ周辺環境への影響を最小化する施工を最優先とし、実際に発生したトラブル・事故とその対策を踏まえ、必要に応じて設計の見直しを実施することが重要である。

3-2-2 テールシール

テールシールは、シールドトンネル通過地盤の土質条件や地下水位、間隙水圧等を総合的に検討し、十分な止水性が確保できるよう配慮すること。また、テール部のセグメントかかり代の設定にあたっては、地盤条件、セグメント幅、テールシールの取付け長さ、施工性及び実績等を総合的に勘案して検討すること。

【解説】

テールシールは、シールドトンネルの施工期間にわたって地下水等のトンネル内への流入を防止するための性能を有し続けることが必要である。このため、テールシールは、シールドトンネルの規模、延長、土被り、土質条件、地下水位、間隙水圧、シールドトンネルの線形等を考慮して設計し、特に河川、海底横断の場合は十分な止水性が確保できる構造、機構、シール段数とすることが必要である。また、テールシールそのものの耐久性を考慮するとともに、テールシールの性能低下を防ぐために、適切なテールグリス材の選定とテールグリス圧の確保方法（給脂方法、管理方法等）についても検討することが必要である。

セグメントはテールを抜ける過程において、テール内部に位置するセグメントにはテールシールとテールグリスを介して荷重が作用し、テールから抜出したセグメントには裏込め注入圧、水圧等が複雑に作用する。これらの荷重が作用する状況によっては、トンネル全体の構造安定性に影響を与えることがある。このため、テール内のセグメントのかかり代の設定はセグメント設計における施工時荷重の考え方と整合を図り、セグメントに対して過大な荷重が作用することのないように、セグメントの幅とテールスキンプレート長、テールシールの取付け長さ（シール段数）等のバランスに配慮するとともに、施工性及び実績を総合的に勘案して設計することが必要である。

また、セグメントの注入孔から注入を行う場合は、テールシールとセグメント裏込め注入孔との位置関係を考慮し、テール部セグメントのかかり代をテール部まで確実に裏込め注入が行えるように設計することが必要である。

3-2-3 スクリューコンベヤー

スクリューコンベヤーからの噴発防止対策について十分検討すること。

【解説】

泥土圧シールドの排土機構であるスクリューコンベヤーは、地下水がシールド内へ噴発しないようにチャンバー内の土圧を保持するための重要な設備である。

このため、地下水圧、掘削地盤の透水性、土質性状等に基づき二次スクリューコンベヤーの必要性等も考慮し適切なスクリューコンベヤーを選定する。また、止水性等の圧力保持能力の確保に課題が残る地盤条件や、トンネルがおかれている諸条件によっては、排土口への緊急遮断装置等の緊急時対策や掘進中の停電時に備えた噴発防止対策を検討することが必要である。

3-2-4 形状保持装置

形状保持装置の検討にあたっては、覆工の規模だけでなく、セグメント継手の締結力の有無等に配慮すること。

【解説】

形状保持装置の検討にあたっては、セグメント継手に締結力を持たない自立性の低いセグメントを使用する場合には、シールドトンネルの規模、地盤条件、施工方法等に配慮して、その設置の要否の判定を慎重に行うことが必要である。

セグメントは正確に組立てなければ、次のセグメントの組立が困難になるばかりか、テールを抜出した後に地盤によってはリングの変形を助長するおそれもある。また、セグメントはそれ自体の自重により垂れや変形が発生する場合もある。この傾向は特にセグメント継手に締結力を有さない場合に顕著となる。

新規に組立てるセグメントリングは、既設のセグメントリングに倣って組まれるため、既設のセグメントリングの組立精度の影響を受ける。一方、既設のセグメントは、新規のセグメントの組立のためにシールドジャッキを解放することによって変形することがある。このため、裏込め注入によりセグメントの形状が固定されるまで、形状保持装置を設け組立精度を確保することが有効である。なお、中小口径シールド等、形状保持装置の設置が困難な場合は、セグメント押上げ装置、テール内形状保持システム、エアバッグ等を設置することが有効である。

3-2-5 電気設備、油圧設備

シールドトンネル内の電気設備、油圧設備は、緊急時にも問題が生じないように計画すること。

【解説】

出水やセグメントの大規模な損傷等の緊急事態が生じた場合にも、電気設備、油圧設備は正常に機能することが求められる。しかし、緊急事態においてはその影響を受けることが避けられない場合もある。したがって、通信機能、制御機能の途絶やジャッキ推力の低下等の緊急事態の対応に大きな影響を与える設備については、バックアップ機能や油圧回路の独立性を高めるなど影響を最低限に留めるようにすることが必要である。

3-2-6 シールドジャッキ

シールドジャッキとスプレッダーの偏心量によるジャッキロッドの変形に対する安全性を確認すること。

【解説】

一般的に、セグメントへの偏心作用荷重を小さくするため、スプレッダー中心とジャッキの中心を偏心させ、セグメント中心にスプレッダーをあわせる場合が多い。この時、ジャッキロッドには、その偏心分の曲げ荷重が作用して変形しやすくなるため、シールドジャッキとスプレッダーの偏心量によるジャッキロッドの変形に対する安全性を確認することが必要である。

特に、セグメント幅が広い場合にはジャッキロッドもそれに伴って長くなり、また、セグメント厚さが薄い場合にはジャッキのロッドを細くすることがあることから、ジャッキロッドの変形に対して十分に注意することが必要である。

4. 施工

4-1 泥水・添加材の調整と管理

泥水式シールドでは泥水の適切な品質、泥土圧シールドではチャンバー内土砂の適切な状態が、切羽を安定させるための前提となることから、地盤の状況に応じ、泥水式シールドでは泥水の比重及び粘性等について所定の品質を確保すること、また、泥土圧シールドでは適切な添加材を混合攪拌して所定の塑性流動性と止水性を満足するようにすること。

【解説】

泥水式シールドでは、適切な泥水圧の作用により切羽を保持するため、比重や粘性等の泥水品質を確保して十分な不透水性の泥膜の形成に努めることが必要である。このため、掘削から泥水処理までが以下のように運用される中で、泥水の比重と粘性、降伏値、濾過特性といった品質が確保された泥水をチャンバー内に供給し続けることが必要である。

(泥水式シールドにおける泥水の循環利用の運用)

- ・掘削にあたり、泥水を地上設備から配管を通じてシールド前面まで送泥
- ・泥水と掘削土を一体でシールド内に取込み、配管を通じて流体として輸送し、地上処理設備において分離
- ・掘削土が分離された循環泥水に、地盤条件に応じて水、粘土、ベントナイト、増粘材等を加えて再び加圧循環

この際、再利用される泥水の品質が重要であり、密度計等の各種計器での数値による管理のみでなく、事前に試験により基本特性を把握した上で、泥水を地盤の性状に合わせ調整することが必要である。なお、掘進に伴って循環する泥水の品質は変化していくことから、掘進中においても泥水品質の変化を試験により把握し調整していくことが必要である。

泥土圧シールドでは、チャンバー内を泥土化した掘削土で充満させ、切羽において圧力を保持し安定性を維持するように、掘削土の塑性流動性と止水性を確保することや、チャンバー内やカッターヘッドへの付着を防止することが重要である。このためには、地質や地下水の状況に応じた鉱物系、界面活性剤系、高吸水性樹脂系、水溶性高分子系等の適切な添加材やそれらを組み合わせたものをチャンバー内土砂に混合攪拌して所定の性状を満足するよう、掘削中も含めて、調整・管理を行うことが必要である。この際、土質試験結果等を踏まえた添加材の選定や、事前配合試験等により添加材の配合及び量の設定を行い、地盤に適した添加材であるかを確認することが必要である。なお、立坑等の現地発生土による事前配合試験が望ましいが、立坑間等の現地発生土の採取が困難な場合は、近傍のボーリング調査結果を基に調整した模擬土を活用し、事前配合試験を実施することが有効である。

シールド掘進中には、泥水式シールドでは泥水の比重と粘性等の泥水品質について、泥土圧シールドではチャンバー内の圧力と排土の手触・目視、スランプ試験、粒度分布試験等により確認される排土の性状について監視を行うことが必要である。また、掘進中の排土の確認において、地質が変化した場合等、掘削土の所定の性状の確保が不十分であると判断された場合には、安全で周辺環境への影響を最小化する施工を最優先として、掘削土の処分や利活用の変更も含め、掘削する地盤の性状に合わせた泥水・添加材の調整を改めて検討・実施するなど適切な対応が必要である。

【参考】泥水の品質及び泥土圧の添加材によるトラブルとその対策の事例

■泥水式シールド：

- ・十分な泥膜を形成するための泥水の品質が確保できず泥水が地上部に流出した。これに対し、泥水品質の改良や地表面計測の強化等により対応した。
参照：【付録②】2-1（事例1-1、事例1-3（ヒアリング結果⑤））

■泥土圧シールド：（再掲）

- ・細粒分が少なく均等係数が小さく、礫が卓越して介在する砂質地盤で夜間休止時に掘削土の塑性流動性・止水性が低下した。夜間停止後の再開時にカッター回転不能となる閉塞が発生し、その閉塞の解除のために行った作業に起因して陥没事象が発生した。今後の対策として、土質調査結果や夜間休止時間を踏まえた気泡材等の添加材の配合試験の追加、チャンバー内圧力の値と勾配等のリアルタイム監視、掘削土量の適切な監視等の施工管理の強化を行うこととしている。
参照：【付録②】3（ヒアリング結果②③）

■参考となる工夫事例や新技術（参照：【付録②】2-2）

1）調査、試験

- ・同種地盤における施工実績の調査、確認（B社②）
- ・ボーリング採取土による添加材の配合・試験練り
（B社②、H社②、O社②、R社②、S社②）
- ・掘削土を用いた添加材の配合・試験練り（C社②、D社②）
- ・立坑掘削土による添加材の配合・試験練り（B社②、J社②、L社②、T社②）
- ・加圧下での気泡配合試験の実施（S社②）

2）添加材選定

- ・機能の異なる複数種類の添加材の使い分け（B社②）
- ・粘性の高い硬質粘性土に粘性低下材の使用（L社②）
- ・排土性状確認について日々の現地確認に加えWEBカメラを用いて中央制御室で常時監視（R社②）
- ・大断面シールドにおける周辺環境への影響が懸念されるケースでは、ベントナイト加泥材を供給（I社①）
- ・材料分離等が発生しにくい高性能な添加材開発（I社⑥、U社⑥）

3）泥水や添加材の変更への備え

- ・余剰泥水槽に高濃度泥水をストック（K社①）
- ・添加材の配合を即座に変更できるよう、添加材設備を坑内後続台車に設置（T社②）

4）施工管理

- ・泥水の比重管理において自動計測と人による計測を実施（N社①、O社①）
- ・排土の比重や含水比も定期的に測定（Q社③）

4-2 切羽圧力の管理

切羽圧力は切羽の安定が保たれるように管理し、切羽圧力等に急激な変動があった場合は、直ちにその原因を究明し、適切に対応すること。

【解説】

シールド工法は、土砂の取込み過多やシールド前面の圧力変化によって切羽のバランスを失うと、切羽近傍の地盤の緩み等が生じ、地表面沈下や隆起等の地盤変位を引き起こすおそれがあるため、切羽圧力の管理は適切に行うことが必要である。切羽における掘削土の状態を直接見ることのできない密閉型シールドでは、切羽圧力、排土量、シールドの機械負荷（シールドジャッキ推力、カッタートルク等）を計測することで、施工中の切羽の状態を間接的に確認している。特に、切羽圧力に想定や意図をしない大きな変化が確認された場合は、シールドトンネルの施工になんらかの異常があった可能性を示すものと考えられることができる。このため、切羽圧力の常時計測管理を行い、想定や意図をしない大きな変化があった場合は、重大なトラブル・事故につながらないように、ただちに原因を究明し、適切な対応を迅速に行うことが必要である。

切羽の安定を保つために、泥水式シールドでは泥水圧、泥土圧シールドではチャンバー内圧力を管理するが、管理には主働土圧や静止土圧、あるいは緩み土圧を用いる方法等があり、各シールドで変動も考慮した上で上下限圧力を管理基準値として設定し、圧力がその管理基準値内に収まっているかどうかを管理することが一般的である。この際、設定した上下限圧力は地盤状況や掘進中の地盤変位計測値、施工状況等を考慮して適切に見直すことが必要である。特に、切羽圧力の下限の管理基準値については、安定したシールド停止状態の圧力を下回らないように設定することが必要である。

また、切羽圧力の管理だけではなく、カッタートルク等のシールドの機械負荷や、泥水式シールドでは泥水品質について、泥土圧シールドでは排土の性状について、併せて監視を行うなどにより、総合的に管理することが重要である。例えばカッタートルクやジャッキ推力の監視は、想定外の礫質土の出現や想定外のシールドの締付けといった異常の兆候を捉えるために重要な管理項目であり、切羽圧力の管理とあわせて地質の変化等を確認するために有効である。

掘削断面が大きくなれば、切羽安定の難易度は上がる傾向にある。特に、大断面のシールドでは、断面内において、上下の圧力差が大きくなり、また、地質構成が複雑となる可能性が高いため、チャンバー内圧力の鉛直方向の勾配や直線性にも留意することが必要である。

泥土圧シールドで地盤の緩みを防ぐためには、切羽面上端付近でチャンバー内が塑性流動性と止水性が確保された掘削土で満たされ、切羽面の上端部を含む全面に亘って適切な圧力を保つことが必要である。また、このような圧力の状態を継続的に確認することが望ましい。確認方法の一つとして、可能な限りチャンバー上端近くでの土圧の測定・管理が有効と考えられ、これを可能とする新技術の開発が望まれる。

【参考】切羽の不安定化によるトラブルとその対策の事例

■泥水式シールド：

- ・土被りの変化を契機とし泥水が流出した。これに対し、泥水品質の改良や計測強化により対応した。

参照：【付録②】 2-1（事例 1-4）

■泥土圧シールド：

- ・過大であったジャッキ推力とカッタートルクに対し、切羽圧力を低減・正常化し、切羽安定化を図り地表面に影響を与えることなく掘進を完了した。

参照：【付録②】 2-1（事例 2-1）

■参考となる工夫事例や新技術（参照：【付録②】 2-2）

1）装備・事前対応

- ・攪拌固定翼に添加材注入孔を装備（B社①）
- ・地層に傾斜がある時は追加ボーリングを実施（I社①）
- ・掘進初期段階や近接施工前に、地中変位計を設置してトライアル施工を行い管理土圧の妥当性を検証（C社①）

2）施工管理

- ・土圧計の数を増やしてチャンバー内の切羽圧力分布や変動を可視化（G社①）
- ・チャンバー内の掘削土の塑性流動性と止水性、切羽管理の可視化（B社⑥、G社⑥、S社⑥、X社⑥）
- ・泥水の比重管理において自動計測と人による計測を実施（N社①、O社①）

3）大断面对応

- ・中央部にアジテーターを装備（B社①）
- ・切羽の圧力計を標準より増設（D社①）
- ・周辺環境への影響が懸念されるケースでは、ベントナイト加泥材を供給（I社①）

4）緊急時準備

- ・シールドの停電による噴発に対して、排土口閉鎖のためのアキュムレーターの装備（J社①）
- ・不測の事態（コンピューターエラー等）に備え緊急圧抜き弁を設置（N社①）

4-3 排土量管理

掘削土の過剰な取込みは、周辺地盤を緩めてシールドの掘進制御を困難にすることや地表面沈下等の周辺環境への影響につながるおそれがある。一方、取込み不足はジャッキ推力が上昇してセグメントに作用する施工時荷重が増大することや地盤隆起等の周辺環境への影響につながるおそれがある。このため、掘進時の土砂の取込み量の管理を適切に行い、過剰な取込みや取込み不足を防止すること。排土量管理においては、精度の維持・向上に取組み、異常の兆候等の早期把握に努めること。

排土量管理に関する用語は、以下のとおりであり、単に排土量管理という場合には、排土及び掘削土の土量管理を指す。

排土……チャンバーからシールド内に排出した土

掘削土……シールド掘進時に掘削した土

掘削土の過剰な取込み……シールド掘進時に事前に設定した以上の土をチャンバー内に取込むこと

【解説】

排土量管理はシールド形式やチャンバーからシールド内への排出とその後の運搬方法によって適用可能な手法が異なるため、それぞれの施工設備に応じて適切に実施する必要がある。

掘削土の過剰な取込みが発生した場合は、シールドの切羽周辺の地盤を緩め、地表面沈下等の周辺環境への影響やシールドの姿勢制御が困難になることが懸念される。一方、取込み不足が発生した場合には、ジャッキ推力が上昇しセグメントに作用する施工時荷重が増大し、地表面隆起等の周辺環境への影響やセグメントの損傷要因となることが懸念される。

泥水式シールドでは、送排泥管に設置した流量計と密度計の計測値を基に偏差流量と掘削乾砂量により掘削土量を確認することが一般的である。また、泥土圧シールドでは、掘削土運搬車質量や、ベルトコンベヤーに設置したベルトスケール質量、スクリーコンベヤーの回転数によって排土量を計測・算定する方法がとられることが多い。過剰な取込みや取込み不足を防止するため、これらのような従来の排土量に関する計測値を注意深く監視しつつ、掘削土の取込み量の算定を適切に行い確認する等、排土量管理の精度の維持・向上と異常の兆候等の早期把握に努めることが必要である。この際、排土量管理における掘削土量の管理は、間接的な計測・算定によって行われていることから、切羽圧力、カッタートルクやジャッキ推力等の計測値や、地盤変位の計測値等を逐次把握し総合的に監視することが重要である。排土量管理は、実際に計測した質量を対象に行うことが多いが、直接的に地盤に影響を及ぼすのは、掘削土の過剰な取込みにより発生する切羽周辺地盤の緩みや、取込み不足による過剰な掘削土の存在によって発生する切羽周辺地盤へのシールドによる過剰な押込みといった体積であることを意識しつつ、排土量と掘削土量の違いにも留意して、排土量や掘削土量の計測・算定を行い、管理することが必要である。

泥水式シールドでは、良質な泥水品質と泥膜形成がある場合、泥土圧シールドでは、チャンバー内の掘削土の塑性流動性・止水性が適切に管理されている場合、一定の精度を確保した排土量管理が可能となり、安定した掘削が行われていると考えられる。実際の施工では、泥水式シールドでの泥水品質・泥膜形成状況、泥土圧シールドでの塑性流動性・止水性は、地盤条件の変化に伴って変わるため、地盤条件等に応じて排土量管理における各種算定の精度の維持・向上が必要である。具体的には、掘削土量の算定と管理では、各種物理量の測定・推定誤差や、

地盤条件の変化による比重・単位体積質量（密度）等の変化があることを踏まえた上で、ボーリング調査の結果や掘削土の各種試験結果等に基づく補完を行い、直前の区間の掘進における計測値の平均からの変化を確認するだけでなく、例えば、地山掘削土量と設計地山掘削土量の比率（排土率）をリング毎に確認するなど、排土量管理の精度の維持・向上と異常の兆候等の早期把握に努めることが必要である。また、排土量管理において異常の兆候や異常そのものに気づいた時、排土量の把握方法によっては、その異常の要因となる切羽地盤付近の事象は、切羽位置から数リング手前で発生している可能性があることに留意し、必要な範囲で調査・対策を実施することが必要である。

シールド径に応じた管理基準値の設定については事前に十分に検討するとともに、管理基準値を超過した場合の対応（泥水圧・チャンバー内圧力の再設定、泥水・添加材の調整、裏込めの追加注入等）についてもあらかじめ定めておくことが必要である。

泥土圧シールドでは、添加材が地山に漏れ出し、掘削土とともに全量回収されない場合がある。この場合、掘削土量（体積）を添加材が全量回収されると仮定して算定すると実際の掘削土量（体積）との間の乖離が大きくなることになるため、注意が必要である。

大断面のシールドにおいては、掘進による掘削土量が多いことから、管理基準値の設定や対応について慎重に検討することが必要である。

掘進停止及び再開時には、継続的な掘進時よりも慎重に排土量を管理することが必要であり、具体的に配慮すべき事項については、「4-1-1 掘進停止時の対応」に記載する。

【参考】掘削土の過剰取込みによるトラブルとその対策の事例

■ 泥水式シールド：（再掲）

- ・排泥管閉塞後の掘進・停止の繰返しや閉塞物除去作業時に、シールド上部の砂質土層が、泥水に長時間さらされたことや閉塞に伴う圧力変動により不安定化し、天端部より砂質土層が流動的に切羽内に流入し、陥没事象が発生した。なお、当該地盤は通常N値 50 以上の安定した層であるが砂質土層の拘束圧が解放されて地下水の浸透力を受けると流動性が高くなる地盤であり、これに対して掘削土の状態に応じた泥水密度の管理が不十分であった。また、当初の掘削土量管理手法では過剰な土砂の取込みを認知できなかった。時系列データを分析し、掘削土の全積算乾砂量と計画掘削土の乾砂量とをリング毎に比較することにより乾砂量の取込み過多の有無を推定できることを確認した。再発防止対策として、各リングにおける全工程でのリアルタイムでかつ連続する各リングでの土砂の過剰な取込みの有無を監視することなどの対策により掘進を完了した。

参照：【付録②】 3（ヒアリング結果①）

参考資料Ⅱ 掘削土量の計算例（1）泥水式シールド

（本ガイドライン 38 ページ）

■ 泥土圧シールド：

・細粒分の含有率が低く透水性が高い砂礫地盤において掘削土の取込み過多が生じた。これに対し、排土量管理をより厳しく行うことにより地表への影響を未然に防止し掘進を完了した。

参照：【付録②】 2-1（事例 2-6（ヒアリング結果⑥））

・細粒分が少なく均等係数が小さく、礫が卓越して介在する砂質地盤で夜間休止時に掘削土の塑性流動性・止水性が低下した。夜間停止後の再開時にカッター回転不能となる閉塞が発生し、その閉塞の解除のために行った作業に起因して陥没事象が発生した。地表部での陥没の発生を受け、今後の対策として、算定した掘削土量の管理基準値をより厳しく設定することとしている。

また、仮定を置きつつも、計測あるいは推定した地山密度、チャンバー内の土圧分布から推定される排土の密度と計測される排土の質量等を用いて、添加材未回収分を考慮して過剰取込み土量を算定し、排土率をリング毎に評価できるかどうか、検証を行っている。

参照：【付録②】 3（ヒアリング結果②③）

参考資料Ⅱ 掘削土量の計算例（2） 泥土圧シールド
（本ガイドライン 38 ページ）

■ 参考となる工夫事例や新技術（参照：【付録②】 2-2）

1) リアルタイムでの排土量と掘削土量の管理

- ・泥土圧シールドで排土質量をベルトスケール、排土体積をレーザースキャナーで計測（C社③、G社③、J社③、S社③、U社③、X社③）
- ・泥水式シールドで配管密度計（ γ 線）と配管流量計を用いて乾砂質量をリアルタイムで計算（D社③）
- ・泥水式シールドで、流体データ（密度、流量）及び掘削地盤の土粒子真比重、含水比により排土量を常時演算（H社③）

2) 精度向上

- ・機械誤差をなくすため計測機を複数台設置（N社③）
- ・システム自動判別で特異値の有無を管理。土砂ピット容量変化は人により計測し、システムとの整合を図る（O社③）
- ・2種類以上の排土量管理方法を用いる（P社③）

3) 性状確認、切羽安定

- ・排土の比重や含水比も定期的に測定（Q社③）
- ・地山探査装置により取込み過多による地山崩壊の有無を探査（H社③）

4-4 裏込め注入工

裏込め注入はセグメントが早期に安定するように、テールボイドへの確実な充填をすみやかに実施すること。また、裏込め注入工の施工管理は、注入圧と注入量で行うこと。

注入量が想定値を大幅に上回った場合、地山の部分的な崩落や空洞形成等も想定されるため、適切な調査を行い、充填等の対応を行うこと。

【解説】

裏込め注入工は、セグメントを固定し、地山の緩みと沈下を防ぐとともに、セグメントからの漏水防止、セグメントリングの早期安定やトンネルの蛇行防止等を図るために、すみやかに行うことが必要である。

裏込め注入はシールドの掘進と合わせて実施する同時注入、または、掘進後すみやかに実施する即時注入を採用することが一般的である。セグメントの設計においては、裏込め注入材がテールボイドに速やかに充填され、セグメントを早期に安定させることを前提としている。このため、実施工においては設計の前提条件を踏まえテールボイドへの確実な充填を早期に実施することが求められる。

一般に裏込め注入工の施工管理方法は、注入圧管理によるものと注入量管理によるものがあるが、どちらか一方だけでは正確な充填状況を確認することが難しい。このため、両方法を併用することで総合的に管理することが望ましく、実施工においては初期段階に注入量、注入圧の設定値を試行し、地盤条件や土被りとの適合性、施工管理から得られる排土量の計測値を勘案し、注入効果及び地上、近接構造物等への影響を確認の上、裏込め注入工の管理基準値を決定する必要がある。また、排土量の計測値の変化、地盤条件や土被りの変化、余掘りの状況等を考慮して、一定の区間ごとに確実に充填されていることを施工管理データ等で確認し、その結果を施工に反映させることが望ましく、注入量、注入圧が施工前の想定や前区間と大きく異なる場合は、直ちに原因を究明し、必要な対策を検討・実施することが重要である。

特に、注入量が想定値を大幅に上回った場合、その注入箇所付近の掘削時に、地山の部分的な崩落や空洞等が発生していたことが懸念される。このため、当該箇所での地山探査結果や掘削土量と排土率による掘削土の過剰取込みの確認等、計測値の再確認等を行い、もし部分的な崩落や空洞が懸念されるのであれば、必要に応じてセグメントからの追加注入等の対応が必要である。

また、シールドトンネルの急曲線区間は、シールドの掘進姿勢から掘削断面の拡大が生じやすいため、慎重な裏込め注入量管理を行うことが必要である。

【参考】裏込め注入工における参考となる工夫事例

- 1) 電磁波レーダー地山探査装置による切羽安定（崩壊探査）
 - ・電磁波レーダーでシールド外周部の余掘・空洞の大きさを測定し、裏込め注入管理に反映

参照：【付録②】3（ヒアリング結果⑦）

4-5 線形管理

線形管理は、要求される線形の誤差の範囲に収まるよう的確に実施する必要があるとともに、線形管理に問題が生じた場合は、急激なシールドの姿勢の変化や過大な余掘りを避け、計画的かつ緩やかに蛇行修正を行うこと。

【解説】

シールドの線形管理は、シールドトンネルの使用目的や用地条件等によって求められる精度が異なることが一般的である。一方、シールドは極めて大きな質量を持つ機械であり、地盤条件の変化やシールドの‘くせ’等によって、計画通りのシールドトンネルの線形からずれることがあり、適宜、蛇行修正を行うこととなる。

このとき、急激な蛇行修正を行うと、過大な余掘りやシールドジャッキの片押しを行うことによって、セグメントに損傷を与える原因となる。さらに、シールドのテールとセグメントとのクリアランス（テールクリアランス）が不足し、セグメントリングに偏荷重が作用することも考えられる。

また、急曲線施工においては、シールドが計画線形に沿って円滑に掘進することができるようにコピーカッター等を用いて適切な余掘りを行うことが重要である。余掘りが過大な場合には周辺地盤に変状を生じさせる原因となり、過小な場合にはシールドの姿勢制御が困難になることやジャッキ推力が増大することなどによってセグメントに損傷を与える原因となる。

近年、硬質地盤での工事が増加しているが、硬質地盤ではあらかじめシールドが通過する形状に合わせて、コピーカッター等を用いて地盤を掘削しておく必要がある。線形形状と掘削軌跡を3次元で把握し、精度の高いシールドの推進を行うことが必要である。このためには、可視化やシールド推進の自動化等のより高度な手法が必要である。また、シールドの高速化が進んでいるが、高速化されたシールドでは、より速やかな対応が必要であり、各種の機械データを含めて迅速に総合的な判断、運用ができるシステムを構築することが望ましい。

4-6 シールドの姿勢制御

セグメントの線形とシールドの姿勢を常に監視し、セグメントとシールドのテールとの間に適切なクリアランスが確保できるように管理すること。

【解説】

シールドの姿勢とセグメントの線形のずれにより、テールクリアランスが均等でなくなりテールクリアランスに大小が発生する。テールクリアランスが極端に小さくなった側では、テール部でセグメントとの競りが生じ、セグメントリングに偏荷重が作用することとなる。この偏荷重は、一般的にセグメントの設計においては考慮されていない荷重であるため、セグメントリングに過大な影響を与えないように施工管理することが必要である。

テール部に偏荷重が発生したことを想定した三次元の構造解析では、Kセグメント周辺に大きな断面力が発生し、セグメントリングが不安定になる可能性が確認されている。このことから、セグメントリングに過大な偏荷重が作用しないようにシールドの姿勢を制御し、適切なテールクリアランスを確保できるように管理する必要がある。

一方、掘削土の過剰な取込み等によって周辺地盤を大きく乱した場合には、シールド周辺の地盤が不安定となり、シールドの姿勢制御に大きな影響を与えることが予想される。このような姿勢の変化に対して、シールドジャッキの操作（下方のジャッキを偏って使用することによ

ってノーズアップを図る) によって姿勢を修正しようとした場合、トンネル下部のセグメントに、シールドジャッキの片押し推力が作用するとともに、トンネル上部のテールクリアランスが急激に減少して偏荷重が発生するおそれがある。したがって、このような事態が生じた場合には、急激な姿勢の修正を行わずに、掘進線形に合わせてセグメントリングを組立てながら徐々にシールドの姿勢と線形を修正することが必要である。その際、周辺地盤の乱れを最小限に低減するため、切羽圧力や排土量等の管理を適切に行うことが重要である。

シールドの姿勢の管理に用いるピッチング計やローリング計等の計測機器の値は、誤差を含むことがあるため、データのキャリブレーションを行いその精度を維持する必要がある。このため、測量と計測機器のデータの差に留意することが必要である。

4-7 シールドトンネルの浮上り

施工時においては、テールボイド内におけるセグメントリングの浮上りに対して、セグメントの継手や裏込め注入方法を適切に選定し、施工時の安全性を確保するとともに、シールドトンネルの浮上りについての確認を常に怠らないこと。

【解説】

施工時に裏込めの注入時期が遅れると、テール脱出後のセグメントリングがテールボイド内で浮上り、セグメント本体及び継手部に過大な力が作用する可能性がある。このため、シールドの掘進と同時あるいは直後の裏込め注入の実施に努めるとともに、テールクリアランスの計測や坑内測量の結果等からシールドトンネルの浮上りが生じていないかを確認し、浮上りによるリング間のずれ等のシールドトンネルの安全性に関わる問題が生じないように留意することが重要である。

施工設備等の関係で早期の裏込め注入ができない場合には前述した現象を十分に考慮した上で、セグメント本体及び継手構造の設計を行う必要がある。

4-8 突合せ継手の使用

セグメントに締結力のない継手を採用する場合は、形状の保持に努め、特に漏水等の原因となるリング継手の目開きや目違いが生じないように配慮すること。

【解説】

セグメントの組立に際しては目開きや目違いを原因とした漏水が発生しないように努めることが重要である。

特に、セグメントに締結力のない継手を採用する場合は、形状の保持に努めて漏水等の原因となる有害な目開きや目違いが生じないように配慮することが重要である。また、Kセグメントの挿入時に滑剤を使用する場合は、セグメント継手面の摩擦力が低下し、セグメントの拔出しに対する抵抗力が低下することに注意する必要がある。セグメント継手面の摩擦係数については、シールド材の貼付、滑剤の塗布等、実際の施工に応じた状態での既往の試験結果に基づいて設定するか、実際の施工に応じた状態での摩擦試験を行い、セグメントの拔出しに対する安全性の確認をすることが重要である。

4-9 セグメントの組立とシールドジャッキ操作

セグメントの組立は、“たれ”ができるだけ生じないようにすること。Kセグメントを押さえていたジャッキの引抜き操作は特に慎重に行うこと。また、セグメント組立時のシールドジャッキの解放パターンは組立中のセグメントリングの安定性を十分検討した上で選定すること。

【解説】

セグメントに“たれ”等の施工誤差による変形を要因とした損傷が生じないように、組立には高精度で慎重な作業が要求される。セグメント組立時には、組立部分のシールドジャッキが解放されるため、そのたびに偏荷重が作用することに留意することが必要である。また、シールド掘進とセグメント組立を同時に行う同時掘進施工の場合、有効なジャッキ本数が少ない状態で掘進の方向制御を行うため、ジャッキ推力が偏ってセグメントに作用する場合もあることから注意が必要である。

特に、Kセグメントに隣接するBセグメントは寸法も大きく、リング上部にあるため、“たれ”を生じやすいので注意が必要である。Kセグメントの挿入時にBセグメントを拘束しているジャッキを解放する場合は、ジャッキの解放の影響を検討し、慎重な作業に努める必要がある。

セグメントの組立効率を向上させる目的で、セグメントを軸方向に固定しているシールドジャッキの解放範囲を必要以上に大きくすると、シールドの後退やリング継手の目開き、セグメントの“たれ”が生じるおそれがあるほかシールドの姿勢が大きく変化する可能性があり、注意が必要である。

【参考】シールドジャッキ引抜き時のトラブルとその対策の事例

■ 泥水式シールド：(再掲)

- ・ 複合曲線区間を施工中にテールクリアランスが不足し、シールドとセグメントの競りが生じていた。この状況で、シールドジャッキを引抜いた時にKセグメントが一部拔出した。これに対し、PC鋼棒設置による拔出し防止、テールクリアランスの監視強化等により対応した。

参照：【付録②】4（事例4-1）

4-10 テールグリスの管理

テールからの漏水や裏込め注入材の浸入を防止するため、テールグリスは、適切な材料を使用して、掘進前にテールブラシに確実に充填するとともに、掘進中はその量と圧力を適切に管理すること。

【解説】

テールシールの止水性を確保するためには、適切なテールグリス材を使用し、掘進前に十分な量を確実にテールブラシに練り込むように充填するとともに、掘進中はテールグリスをテールシール内に封入し、その圧力を適切に管理することによって地下水や裏込め注入材の浸入を防止することが重要である。このとき、テールグリスの圧力は地下水圧や裏込め注入圧より高く保たれることが必要である。このため、確実に圧力が保持できる自動給脂装置等を設け、テールグリス圧力を常時監視することが必要である。また、小断面シールド等自動給脂装置の設置が難しい場合においても、セグメントのグラウトホールから断続的かつ確実にテールグリスを補充し、入念な管理を行うことが必要である。

また、テールグリスの材質によっては裏込め注入材と反応して硬化する性質をもつものもあることから、テールグリスの材料選定にあたっては、裏込め注入材と混合した場合の反応を確認する必要がある。

急曲線区間の施工においては、テールボイドの偏りが生じやすいため、テールブラシの反返りに注意し、テールグリスの供給が均一になるよう管理することが必要である。

【参考】急曲線区間施工時のトラブルとその対策の事例

■泥水式シールド：

- ・急曲線区間施工時に、テールブラシの反返りや、テールグリス圧の不均等によるテールシールド内への裏込め材の浸入が生じた。これに対し、セグメントの一部解体によるテールブラシの交換、圧力計やグリスポンプの追加によるテールグリス圧の不均等の解消により対応した。

参照：【付録②】4（事例4-2、事例4-3）

4-1-1 掘進停止時の対応

切羽の不安定化のおそれがある長時間の掘進停止は、セグメント組立、休工、段取り替え、夜間の掘進制限等やむを得ない場合を除きこれを極力回避すること。また、停止する場合には、掘進再開時も含め、切羽の安定を図ること。

【解説】

シールドの掘進においては、セグメント組立、休工、段取り替え、夜間の掘進制限等、停止せざるを得ない場面もある。シールドの掘進停止は、泥水の地山への浸透による泥水圧の低下やチャンバー内での土砂沈降による圧力不均等の発生等による切羽面の不安定化につながるおそれがあり、これらにより発進困難等を伴う懸念がある。これらは長時間の停止となればより顕著となる。したがって、やむを得ない場合を除き、通常時の施工において切羽の不安定化のおそれがある長時間の停止はできる限り回避することが必要である。

長時間の停止が回避できない場合は切羽の安定を図る対策が必要であり、泥水式シールドでは、送排泥弁の閉鎖とコントロールバルブの制御により切羽圧力を保持することが必要である。場合によっては良質な泥水の循環を継続し切羽圧力を監視・制御することが有効である。

泥土圧シールドでは、あらかじめ停止期間を想定した添加材試験を行うことなどにより、適切な添加材を選定するとともに、切羽圧力を監視・制御することで切羽の安定を確保することが必要である。泥土圧シールドでのチャンバー内土砂の分離を防ぐためには、切羽圧力等を確認しながらチャンバー内の土砂を適宜攪拌することが有効な場合がある。なお、掘進停止時の泥水の循環やチャンバー内土砂の攪拌は、周辺地盤を緩めるおそれがあるため、その必要性の検討も含め、慎重に行うことが必要である。

重大なトラブルや事故発生時にはシールドを長時間停止せざるを得ない。この場合、地山によるシールドの締付けを防止するため、シールド周囲に滑材等を注入することが望ましい。また、停止位置等について配慮が必要であり、安定性が乏しい地盤や重い構造物の直下、固着が起りやすい改良地盤中等での停止を極力避け、より安全性が高い位置まで掘進し、停止することが望ましい。この場合であっても、最優先にすべきは安全と周辺環境への影響であり、安全と周辺環境への影響が想定される場合には直ちに掘進を停止して応急対策を実施することが

必要である。なお、ビット交換やシールドの補強等のためにあらかじめ計画した改良地盤等での停止については、所定の手順に沿って停止することが考えられる。

特に、やむを得ず、掘進停止時に排土を行わざるを得ない場合は、排土により切羽周辺の地盤を緩め、場合によっては陥没等の原因となることから、その必要性や手順の妥当性を十分に検討するとともに、停止時においても排土量を管理することが必要である。

掘進再開時には、継続的な掘進時よりも慎重に排土量管理を行うとともに、停止が長時間に及ぶ場合は機械設備の点検や作動確認、必要に応じて試運転を行うことが必要である。

【参考】掘進停止再開時におけるトラブルとその対策の事例

■泥水式シールド：(再掲)

- ・排泥管閉塞後の掘進・停止の繰返しや閉塞物除去作業時に、シールド上部の砂質土層が、泥水に長時間さらされたことや閉塞に伴う圧力変動により不安定化し、天端部より砂質土層が流動的に切羽内に流入し、陥没事象が発生した。なお、当該地盤は通常N値 50 以上の安定した層であるが砂質土層の拘束圧が解放されて地下水の浸透力を受けると流動性が高くなる地盤であり、これに対して掘削土の状態に応じた泥水密度の管理が不十分であった。また、当初の掘削土量管理手法では過剰な土砂の取込みを認知できなかった。時系列データを分析し、掘削土の全積算乾砂量と計画掘削土の乾砂量とをリング毎に比較することにより乾砂量の取込み過多の有無を推定できることを確認した。再発防止対策として、各リングにおける全工程でのリアルタイムでかつ連続する各リングでの土砂の過剰な取込みの有無を監視することなどの対策により掘進を完了した。

参照：【付録②】3 (ヒアリング結果①)

■泥土圧シールド：(再掲)

- ・細粒分が少なく均等係数が小さく、礫が卓越して介在する砂質地盤で夜間休止時に掘削土の塑性流動性・止水性が低下した。夜間停止後の再開時にカッター回転不能となる閉塞が発生し、その閉塞の解除のために行った作業に起因して陥没事象が発生した。今後の対策として、土質調査結果や夜間休止時間を踏まえた気泡材等の添加材の配合試験の追加、チャンバー内圧力勾配等のリアルタイム監視、掘削土量の適切な監視等の施工管理の強化を行うこととしている。

参照：【付録②】3 (ヒアリング結果②③)

■参考となる工夫事例や新技術 (参照：【付録②】2-2)

1) 事前対応

- ・シールド設計段階での回転抵抗低減 (I社④)
- ・掘進停止時は事前に地盤改良 (U社④)

2) 停止時の保全対応

- ・掘進停止中、添加材を注入した上で定期的にカッターを回転させてチャンバー内の掘削土を攪拌し、分離、沈降を防止
(B社④、C社④、N社④、O社④、T社④、V社④、X社④)
- ・泥土：長期間の掘進停止中は、チャンバー内土砂を超粘性可塑状充填材に置き換え、分離、沈降を防止 (B社④、D社④、Q社④、S社④)
- ・泥水：別系統の送泥ラインを開放し、切羽圧力を自動的に保持 (B社④)
- ・泥水：地盤により事前に比重や粘性を高めた高濃度泥水を送泥
(B社④、G社④、I社④、Q社④、R社④、X社④)
- ・切羽圧力を保持するためにジャッキを張り直す (F社④)
- ・シールドの締付け防止対策として、高分子材等をシールド外周に注入
(I社④、S社④、U社④、V社④)
- ・微小な保全掘進 (K社④、Z社④)

3) 掘進再開時対応

- ・掘進再開時には、安定した掘削状態となるまで、掘進速度を上げ過ぎず、低負荷の掘進となるように管理 (H社④、L社④、P社④)

4-12 異常の兆候の早期感知と迅速な対応

シールドの掘進は、地盤の条件、トンネルの断面の大きさ等を考慮し、地盤の安定が確実に保たれるように管理すること。

その際、泥水式シールドでの泥水品質や泥水圧、泥土圧シールドのチャンバー内の土砂の塑性流動性・止水性と圧力を適切に管理し、排土量と掘削土量をできるだけ正確に計測・分析し、カッタートルクやジャッキ推力等を把握して、地盤を緩めることがないように施工管理を行うこと。

複数の項目を総合的に計測・分析し、異常の兆候の早期感知に努め、確認された場合には、速やかに関係者間で共有しその解消に努めるとともに、兆候が継続する場合には、その要因を明らかにした上で対策を検討し講じること。なお、異常やトラブルの際は言うまでもなく、兆候を確認した際にも、情報共有等の対応をあらかじめルール化して関係者間で共有しておくこと。

重大なトラブルが発生した場合に、直ちにシールドを停止し応急対策を実施すること。その上で、必要に応じて有識者に意見を求め、追加の調査を実施し、発生要因を明らかにするとともに、それを踏まえた対策を講じること。

【解説】

地盤の状況は完全に把握できるものではなく、予期せぬ地中支障物によるシールドの破損等、シールドトンネルの施工中に当初の想定と異なる事象が発生する可能性を完全に排除できるわけではない。このため、施工においては、リスクを考慮した施工計画を立てることに加え、異常の兆候を早期に把握し、重大なトラブルや事故の回避に努めるとともに、想定される異常やトラブルについて、あらかじめ対応の考え方を整理した上で事象に対応することが必要である。これらを基本としつつ、想定外の異常やトラブルについても発生するおそれがあることを念頭に置き、実際に発生した場合には、関係者が連携して臨機に対応するとの考え方が必要である。

シールドの掘進管理は、泥水式シールドや泥土圧シールドの原理を十分に理解した上で、シールドの挙動や覆工の出来形、切羽圧力、排土量と掘削土量、シールドの負荷（カッタートルクやジャッキ推力等）、裏込め注入量、注入圧等の複数の項目において管理基準値を設け、常に監視することなども含め、総合的に計測・分析し、計測値等の傾向を確認しながら適切に施工管理を行うことが必要である。

通常と異なる事象につながる可能性のある異常の兆候の早期感知に努めるため、施工中に得られた計測値等を監視する中で、地盤性状の変化や切羽圧力の変動、カッタートルクやジャッキ推力等シールドの機械負荷の増減、掘削土の取込量の管理基準値逸脱、裏込め注入量の増、地盤変位等の兆候が確認された場合には、速やかに発注者、施工者間で情報共有し、兆候の解消に努めることが必要である。また、兆候が継続する場合には、その要因を明らかにした上で、対策を検討し、講じることが必要である。なお、異常やトラブルの際については言うまでもなく、兆候を確認した際の情報共有等の対応をあらかじめルール化して発注者、施工者間で共有しておくことが重要である。

想定以上の沈下や陥没等の変状をもたらした事例の発生状況を踏まえれば、シールドの掘進が地盤の変状を発生させる可能性があることを常に意識しつつ、実際の施工において異常の兆候の把握と対策に努めることが必要である。

泥水式シールドにおける排泥管や泥土圧シールドにおけるスクリーコンベヤーの閉塞、度重なるカッターの回転不能等の重大なトラブルが発生し、作業従事者の安全性や周辺環境への影響が懸念される場合には、直ちにシールドを停止して応急対策を実施した後、各種施工管理データの検証を行うとともに、必要に応じて有識者に意見を求め、追加の調査を行うことにより、発生要因を明らかにし、それを踏まえて、変状への対処とその後の掘削における周辺環境に影響を与えない対策とを定めて実施していくことが重要である。

事故が発生した後、別の工事も含めて、その付近でシールドを掘進する場合は、同様の事故を引き起こさないよう、追加の調査や監視により体制及び対策を強化するなど細心の注意を払い進めることが必要である。

4-13 シールドトンネル内の作業従事者の避難

出水等の事故が発生した場合におけるシールドトンネル内の作業従事者の避難基準を定め、遅滞なく適切な避難が行えるようにすること。

【解説】

広範囲の地盤を対象とするシールドトンネル工事では、調査や条件の把握に限界があり、不測の事態が生じることを避けられない場合がある。異常、トラブル、重大なトラブルや事故が生じた場合、修復、復旧に努める必要があるが、場合によっては、避難の機会を失うことになる可能性がある。したがって、あらかじめ避難すべき状況を定め、迅速な避難ができるように計画しておく必要がある。

5. 周辺の生活環境への配慮

5-1 周辺の生活環境への影響のモニタリング

住宅地等市街化された地域におけるシールドトンネルの施工にあたっては、施工の安全性確保、周辺の生活環境への影響の低減だけではなく、地域の安心を確保するために、地盤変位量、地下水位、騒音・振動等について定期的にモニタリングを行うこと。

【解説】

施工時の安全対策として施工状況等の監視を確実に行うとともに、住宅地等の市街化された地域におけるシールドトンネルの施工にあたっては、地盤変位量（主に地表面の沈下量や沈下勾配）や地下水位等の工事箇所周辺の影響についてモニタリングを定期的に行うことが必要であり、シールドトンネル工事が要因か否か確認できるよう掘進前の段階からモニタリングすることが重要である。

また、地盤変位量については、シールドトンネルの規模等を考慮して平面的にモニタリングすることが必要である。

さらに、騒音・振動の影響の懸念がある住宅地等の市街化された地域におけるシールドトンネル工事の施工にあたっては、騒音・振動の影響についてのモニタリングを定期的に行うことが必要である。

なお、モニタリングについては、切羽圧力、排土量や掘削土量、カッタートルクやジャッキ推力等の計測値と合わせて総合的に計測・分析し、計測値の傾向を確認しながら、「4. 施工」の記載内容を踏まえ、適切に施工管理を行うことが必要である。

5-2 騒音・振動対策

住宅地等の市街化された地域におけるシールドトンネルの施工にあたっては、施工に起因する騒音・振動の低減に努めること。

【解説】

シールドトンネルの施工時に発生する騒音・振動は、主に立坑周辺が発生源とされているが、シールド掘進時にも、シールドが前進する際のスキンプレートと周辺土砂の摩擦に起因するものや、カッターヘッドで地山を削り取る際のもの、坑内運搬車の走行時に建設中の不陸等に起因するもの等がある。これらの騒音・振動は、地中を伝播する間に一定程度減衰するが、地盤状況によっては減衰が小さく、住民等が不快に感じる場合がある。また、掘進時の騒音・振動が建築物の基礎を通じて伝播するなど、局所的な条件により伝わり方が異なる可能性がある。

騒音・振動の低減に対する効果が確実に認められる手法は確立されていないが、状況に応じて、スキンプレートと地山との間への滑剤の充填のほか、掘進速度の調整や、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の抑制を行うこと等により、極力、騒音・振動の低減に努めることが望ましい。

騒音・振動は、感じ方の個人差が大きく、計測値が環境基準を満たしていても人によっては感知し、不快に感じる場合もあるため、計測による管理に加え、住民等への情報提供等現場ごとの丁寧な対応が重要である。また、騒音・振動の低減対策と併せ、住宅地の周辺で工事を行うなど住民の日常生活等への影響が大きいと想定される場合には、影響範囲内の住民と相談し、対応を行うことが有効な場合がある。

【参考】騒音・振動トラブルとその対策の事例

- ・騒音・振動に関する住民からの問い合わせがあり、掘進速度の低下により対応した。 参照：【付録②】2-1（事例2-22）

■参考となる工夫事例や新技術（参照：【付録②】2-2）

1) 夜間停止や制限

- ・夜間の掘進を制限（B社⑤、E社⑤、G社⑤、R社⑤）
- ・夜間の坑内運搬の制限、夜間の材料搬入停止、坑内運搬における緩衝材の設置（B社⑤、S社⑤、T社⑤、U社⑤、Z社⑤）

2) 掘進速度等の調整

- ・カッター回転速度、掘進速度の低下（I社⑤、P社⑤、S社⑤）

3) シールド胴体部締付けの対策等

- ・シールド周辺に縁切りの可塑状充填材等の注入（D社⑤、H社⑤、I社⑤、L社⑤、S社⑤、U社⑤、X社⑤）
- ・蛇行修正の最小化による競りの抑制（I社⑤）

5-3 情報提供

地域の安心を確保するために、シールドトンネル工事の掘進状況と併せ、住民等への適切な情報提供を行っていくことが望ましい。

【解説】

住宅地等市街化された地域の地下におけるシールドトンネル工事の施工にあたっては、地域の安心を確保するために、地盤変位、地下水位変動、騒音・振動等について定期的にモニタリングを行い、それらの情報とシールドの現在地等シールドトンネル工事の掘進状況に関する情報とを併せ、無用な不安を与えないよう配慮しつつ、住民等へ適切に提供していくことが望ましい。

なお、地盤内で施工されるシールドトンネル工事では、調査や条件の把握に最大限努める必要があるが限界はあり、不測の事態が生じる可能性を完全に排除できない場合がある。このため、住宅地等の市街化された地域における大断面のシールドトンネル工事では、事故発生時の速やかな周知や住民等の避難について、自治体や警察、消防等の関係機関と事前に相談しておくことが望ましい。

5-4 トラブル時の住民等への対応

重大なトラブルや事故が発生し、住民等への影響が懸念される場合、必要な措置を行い、影響を最小限とするよう努めること。

【解説】

重大なトラブルや事故が発生し、住民等への影響が懸念される場合、必要に応じて応急的な措置により安全を確保した上で、影響の有無を確認することが必要である。影響が確認された場合には、影響範囲を確定するための各種調査、住民への説明、影響に対する補償に関する相談窓口の設置等、住民等の安心確保に取組み、影響を最小化するよう努めることが重要である。

6. その他の配慮事項

6-1 記録及びその活用

調査・設計・施工において得られる各種データは、今後のシールドトンネルの調査・設計・施工のみでなく、供用後のシールドトンネルの維持管理においても重要であるため、とりまとめ・保管の上、維持管理主体も含め、いつでも活用できるようにしておくこと。

【解説】

シールドトンネル工事に起因する地盤や構造物の変状は、切羽通過時だけではなく、切羽通過後に時間が経過して発生する場合や供用後に顕在化する場合がある。そうした場合の要因調査において、調査・設計・施工時に得られる各種データは、貴重な情報資源である。それらのデータは、今後のシールドトンネルの調査・設計・施工のみでなく、供用後のシールドトンネルの維持管理においても重要であるため、とりまとめ・保管の上、維持管理主体も含め、必要な情報共有を行い、いつでも活用できるようにしておくことが望ましい。

6-2 新技術の活用

シールドトンネル工事の更なる安全性の向上と周辺地域の安心の確保のため、また、今後のシールド技術の発展に寄与するため、新技術の開発・活用が重要である。

【解説】

シールドトンネル工事の更なる安全性の向上と周辺地域の安心の確保のため、また、今後のシールド技術の発展に寄与するため、新技術の開発・活用が重要であり、新技術の開発・活用においては、コスト縮減に偏重することなく、安全性や品質の向上に十分留意することが望ましい。

新技術は、必ずしもその確実性が十分に裏付けられていないものも少なくないため、その技術を過信することなく、従来技術により得られる結果との比較による妥当性の検証や、経験に裏付けられた工学的判断による確認も重要である。その信頼性向上のためには、不断の努力が必要である。

【参考】シールドトンネル工事の更なる安全性の向上と周辺地域の安心の確保に資する新技術（参照：【付録②】2-2）

1) 調査・探査・測量

- ・三次元CIM等による地質や近接構造物のリアルタイム可視化
(B社⑥、G社⑥、S社⑥)
- ・超音波式・電磁波レーダー・貫入式等の地山崩壊探査装置による切羽での地盤の緩みの検知 (I社⑥、X社⑥)
- ・カッタービット振動計内蔵支障物判定システム (I社⑥)
- ・地盤内の支障物・空洞や地質の急変に対する切羽からの前方探査 (Q社⑥)

2) 施工安全性向上

- ・チャンバー内塑性流動性と止水性、切羽管理の可視化
(B社⑥、G社⑥、S社⑥、X社⑥)
- ・材料分離等が発生しにくい高性能な添加材開発 (I社⑥、U社⑥)

- ・機械式ビット交換（I社⑥、S社⑥）
 - ・ICT監視・管理（K社⑥、O社⑥、S社⑥）
- 3）周辺の生活環境対策
- ・シールド掘進位置の地上リアルタイム確認システム（D社⑥）
 - ・リアルタイム路面沈下管理（Y社⑥）
 - ・電磁波地中レーダーによる路面下空洞調査（O社⑥）

【本ガイドラインの策定にあたり参考とした図書】

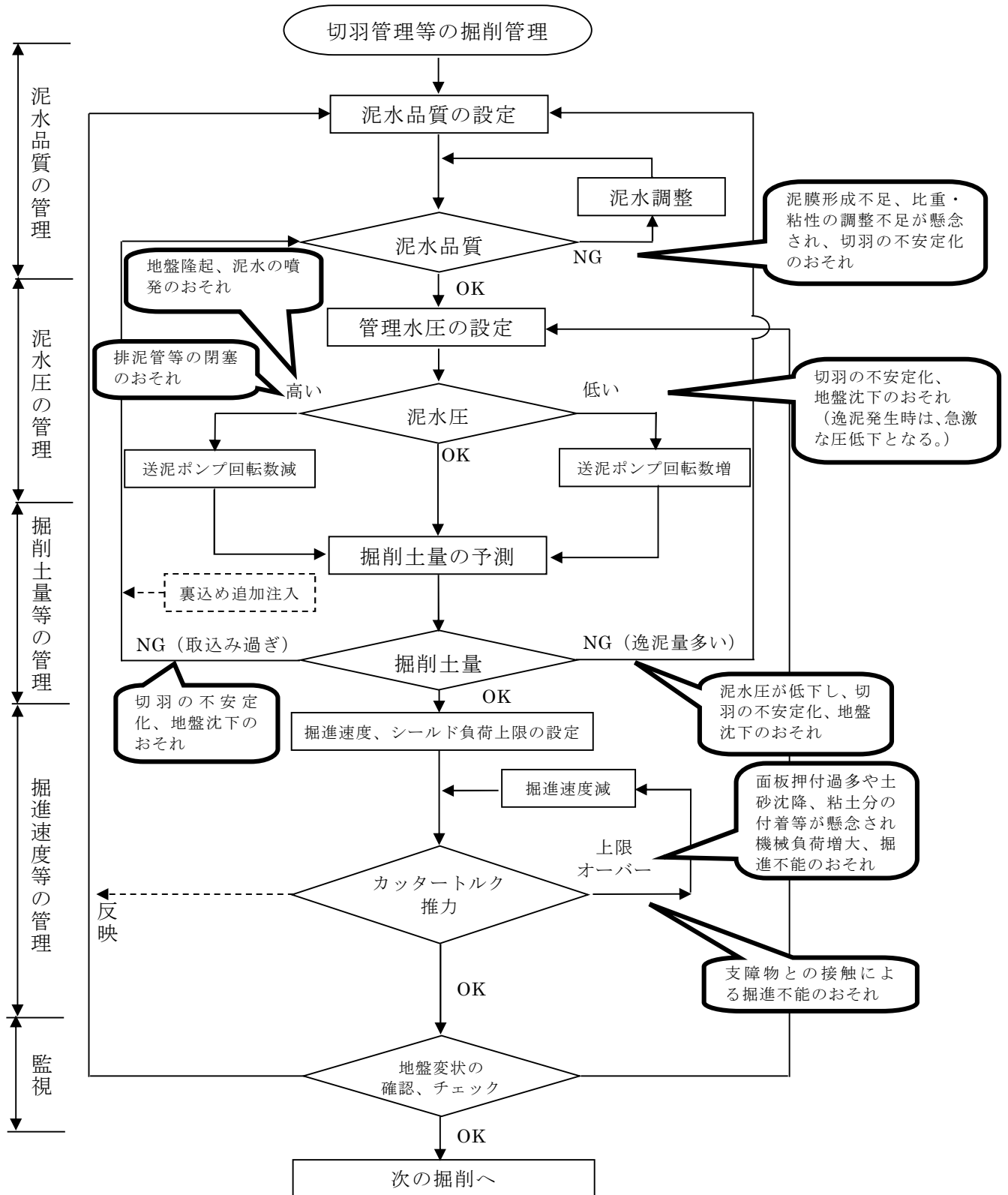
トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説 土木学会（2016年制定）

地盤工学・実務シリーズ 29「シールド工法」公益社団法人地盤工学会（平成24年2月発行）

I 掘進時の管理フローと想定されるリスク

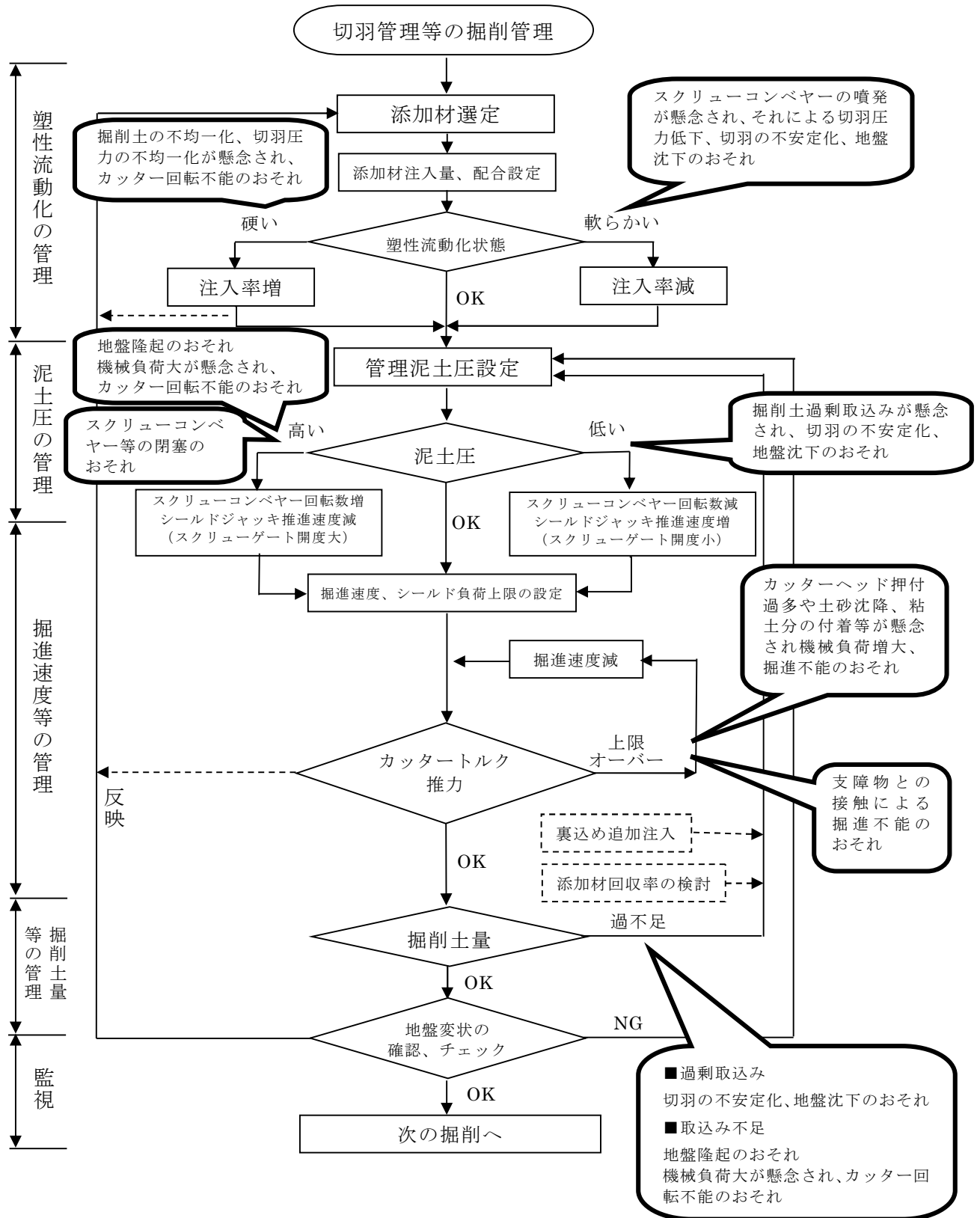
泥水式シールド、泥土圧シールドそれぞれにおいて、掘進時の施工管理の各段階で想定されるリスクの例について、既存の管理フロー上に記載した*。

(1) 泥水式シールド



*示方書 P209「解説 図 4.3.5 泥水式シールドの切羽管理フロー例」を一部加工し、各段階で想定されるリスクを追記

(2) 泥土圧シールド



※示方書 P205「解説 図 4.3.3 土圧式シールドの切羽安定管理フロー例」を一部加工し、各段階で想定されるリスクを追記

II 掘削土量の計算例

(1) 泥水式シールド

以下に示す乾砂量（掘削土の内部での土粒子の体積）の計算式を基本にして算定した掘削土の全積算乾砂量（計測による乾砂量）と計画掘削土の乾砂量（計算乾砂量）とを比較し、監視することにより、陥没等につながる掘削土の過剰取込みや取込み不足の兆候を早期に感知できる可能性がある。

[泥水式シールドの乾砂量の計算] 地盤工学会：地盤工学実務シリーズ29シールド工法 (H24.2) pp.174より

計算乾砂量は、 $V=100Q/(G_s w+100)$

ここで、 Q ：計算掘削体積、 G_s ：土粒子の真比重、 w ：地山の含水比（%）

計測による乾砂量は、 $V_3=V_2-V_1=\{(G_2-1)Q_2-(G_1-1)Q_1\}/(G_s-1)$

ここで、 V_1 ：送泥乾砂量、 V_2 ：排泥乾砂量、 V_3 ：掘削乾砂量、 G_1 ：送泥水比重、 G_2 ：排泥水比重、 Q_1 ：送泥流量、 Q_2 ：排泥流量

V と V_3 の対比により逸泥状態（ $V>V_3$ ）、余掘り状態（ $V<V_3$ ）かの判定を行う。

※上記の V_3 に「逸脱した泥水に含まれる土砂量（体積）」を加えることによって、 V_3-V は過剰掘削土の乾砂量（体積）となる。しかし、 V_3-V を過剰掘削土の乾砂量とした時の誤差は、通常は無視できる。

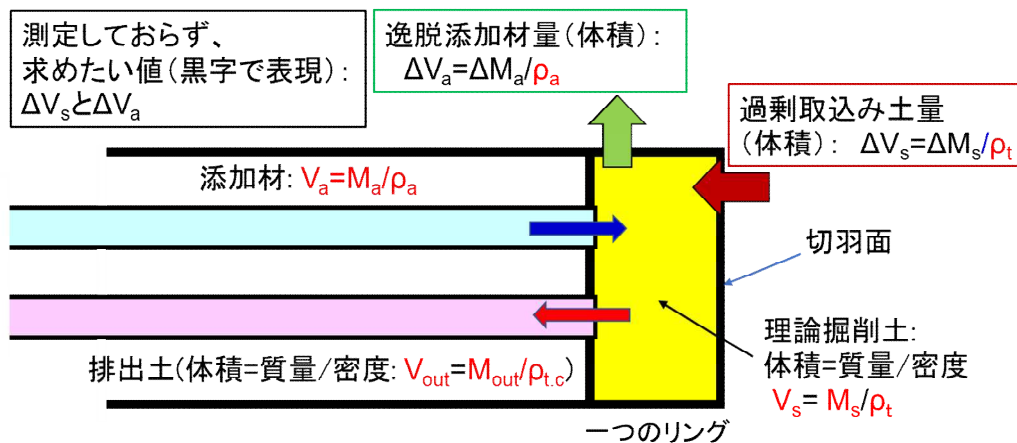
(2) 泥土圧シールド

以下に示す計算式で、添加材の未回収量を考慮して算定した過剰取込み土量を用いて排土率を算定し、その値を監視することにより、陥没等につながる掘削土の過剰取込みの兆候を早期に感知できる可能性がある。

[泥土圧シールドでの逸脱添加材量と過剰取込み土量の計算式（龍岡委員長提案）]

測定値、既知量(赤字で表現)

- V_a, M_a : 添加材の体積と質量
- ρ_a : 添加材の密度
- V_s, M_s : 1リング内の掘削土の体積と質量
- ρ_t : 地山密度(地質調査、現地通常掘進時データの解析等による)
- M_{out} : 排出土の質量
- $\rho_{t,c}$: チャンバー内の泥土の密度(チャンバー内土圧分布等から求めた値。排土の密度はこの値と同じであると仮定。)



二つの基礎式:

$$\text{質量バランス: } M_{out} = M_s + \Delta M_s + M_a - \Delta M_a \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{体積バランス: } V_{out} &= V_s + \Delta V_s + V_a - \Delta V_a \\ \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} &= \frac{M_s + \Delta M_s}{\rho_t} + \frac{M_a - \Delta M_a}{\rho_a} \\ \frac{\rho_a}{\rho_{t.c}} M_{out} &= \frac{\rho_a}{\rho_t} (M_s + \Delta M_s) + M_a - \Delta M_a \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)と式(2)から $(M_a - \Delta M_a)$ を消去すると、式(3)を得る:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{t.c}}\right) M_{out} &= \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_t}\right) (M_s + \Delta M_s) \\ (\rho_{t.c} - \rho_a) \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} &= (\rho_t - \rho_a) \frac{(M_s + \Delta M_s)}{\rho_t} = (\rho_t - \rho_a) (V_s + \Delta V_s) \end{aligned}$$

$$\text{整理して: } \Delta V_s = \frac{\rho_{t.c} - \rho_a}{\rho_t - \rho_a} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} - V_s \quad (3)$$

ΔV_a は、式(2)から得られる式(4)に式(3)で得られる ΔV_s を代入して、得られる。

$$\Delta V_a = \Delta V_s - \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} + (V_s + V_a) \quad (4)$$

すなわち、 ΔV_a は式(5)で得られる。

$$\Delta V_a = \left[\frac{\rho_{t.c} - \rho_a}{\rho_t - \rho_a} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} - V_s \right] - \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} + (V_s + V_a) = V_a - \frac{\rho_t - \rho_{t.c}}{\rho_t - \rho_a} \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} \quad (5)$$

排土体積率VRは、式(3)による ΔV_s 、あるいは式(5)による ΔV_a を式(6)に代入することによって得られる。

$$VR = \frac{V_s + \Delta V_s}{V_s} = \frac{\frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} - (V_a - \Delta V_a)}{V_s} \quad (6)$$

(参考) $\Delta M_a = 0$ を仮定した場合の ΔV_s とVRは、それぞれ、式(1)を参照して導くことができる式(7)と式(8)によって求まる:

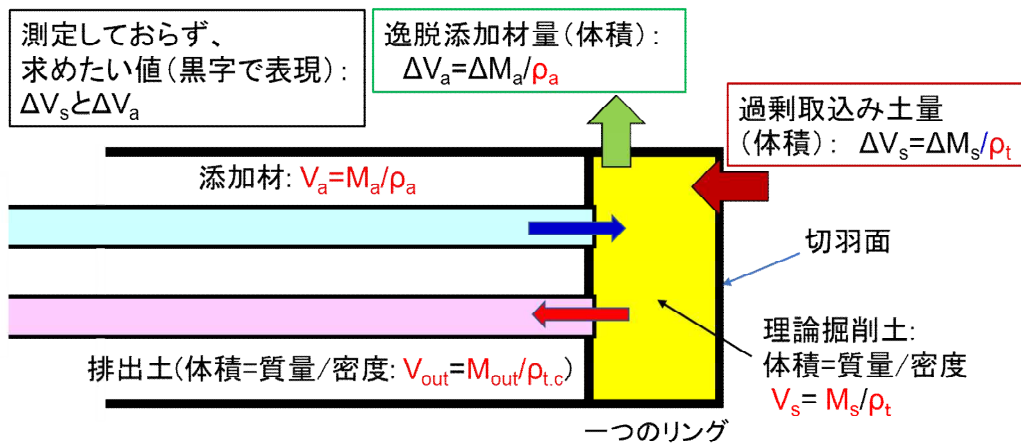
$$\Delta V_s = \frac{M_{out} - M_s - M_a}{\rho_t} \quad (7)$$

$$VR = \frac{V_s + \Delta V_s}{V_s} = \frac{\frac{M_{out} - M_a}{\rho_t}}{V_s} \quad (8)$$

[泥土圧シールドでの逸脱添加材量と過剰取込み土量の計算例（事務局作成）]

第2回検討会（令和3年10月25日）ヒアリング資料「東京外かく環状道路 具体的な再発防止対策の検討状況（東日本高速道路(株)）」に、龍岡委員長監修の下、事務局で解説を加えた。

測定値、既知量(赤字で表現)	
V_a, M_a	: 添加材の体積と質量
ρ_a	: 添加材の密度
V_s, M_s	: 1リング内の掘削土の体積と質量
ρ_t	: 地山密度(地質調査、現地通常掘進時データの解析等による)
M_{out}	: 排出土の質量
$\rho_{t,c}$: チャンバー内の泥土の密度(チャンバー内土圧分布等から求めた値。排土の密度はこの値と同じであると仮定。)



添加材の逸脱を考慮した式:

$$\text{過剰掘削土体積: } \Delta V_s = \frac{\rho_{t,c} - \rho_a}{\rho_t - \rho_a} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_{t,c}} - V_s \quad (1)$$

$$\text{未回収添加材体積: } \Delta V_a = \Delta V_s - \frac{M_{out}}{\rho_{t,c}} + (V_s + V_a) \quad (2)$$

$$\text{掘削土体積: } V_s + \Delta V_s = \frac{M_{out}}{\rho_{t,c}} - (V_a - \Delta V_a) \quad (3)$$

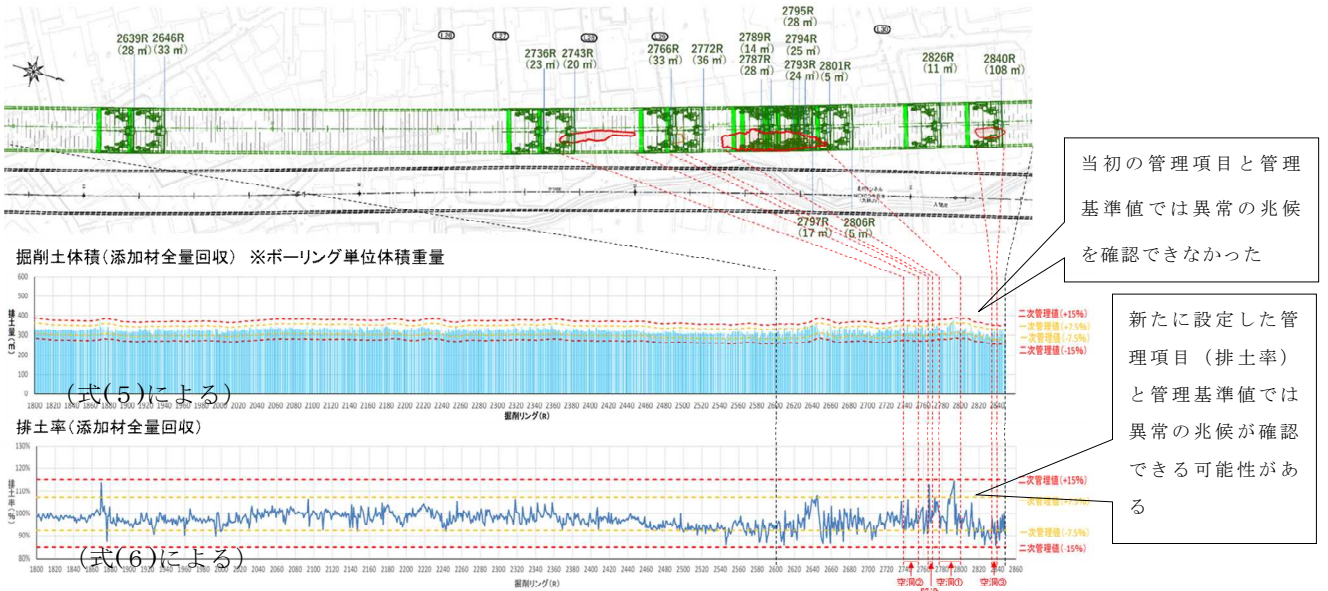
$$\text{排土率: } VR = \frac{V_s + \Delta V_s}{V_s} = \frac{\frac{M_{out}}{\rho_{t,c}} - (V_a - \Delta V_a)}{V_s} \quad (4)$$

$$\text{掘削土体積: } V_s + \Delta V_s = \frac{M_{out} - M_a}{\rho_t} \quad (5)$$

$$\text{排土率: } VR = \frac{V_s + \Delta V_s}{V_s} = \frac{\frac{M_{out} - M_a}{\rho_t}}{V_s} \quad (6)$$

- ・ 添加材全量回収を仮定して算定した掘削土体積（式(5)による）と排土率（式(6)による）の値は、新たに設定した管理基準値（±7.5%）を超過することが確認された。

掘削土体積:
$$V_s + \Delta V_s = \frac{M_{out} - M_a}{\rho_t} \quad (5)$$
 排土率:
$$VR = \frac{V_s + \Delta V_s}{V_s} = \frac{\rho_t}{V_s} \frac{M_{out} - M_a}{V_s} \quad (6)$$



- ・ チャンバー内圧力勾配より推定したチャンバー内土砂密度を用い、添加材未回収分を考慮した掘削土体積（式(3)による）を確認したところ、排土率（式(4)による）は陥没・空洞箇所で大くなった。

掘削土体積:
$$V_s + \Delta V_s = \frac{M_{out}}{\rho_{t,c}} - (V_a - \Delta V_a) \quad (3)$$
 排土率:
$$VR = \frac{V_s + \Delta V_s}{V_s} = \frac{\rho_{t,c}}{V_s} \frac{M_{out}}{V_s} - \frac{(V_a - \Delta V_a)}{V_s} \quad (4)$$

