

博 士 論 文

シールド工法の掘進管理技術の高度化による
トンネル施工の合理化に関する研究

令和 6 年 3 月

安井 克豊

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

要 旨

軟弱な沖積地盤など都市部における施工条件の厳しいトンネル工事においては、非開削であり、切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながらトンネルを構築するシールド工法が多用されている。近年、シールドトンネル工事において、道路陥没や泥土等の地表面流出等のトラブルが頻発しており、シールド工法に対する安全性が懸念されている。シールド工法によるトンネル施工は、現在でも担当技術者が経験的に用いている「経験知」に大きく依存しており、少子高齢化に伴う熟練技能労働者の大量離職による「経験知」の減少に加えて、シールドトンネル工事の難工事化に伴う未経験工事の増加等が今後も予想されることから、前述のようなトラブルが今後も頻発するものと懸念される。本研究では、熟練工の「経験知」、最先端技術、および人工知能を融合させることによってシールド工法における掘削管理方法を高度化し、トンネル施工技術に対する「経験知」を可視化して、生産性向上、安全性向上等によるトンネル施工の合理化を図ることが急務であると考え、以下に示す6つの技術課題に対する研究開発を行った。

(1) 気泡シールド工法における掘削土の水生環境負荷の低減

泥水・泥土性状管理の高度化に関して、添加材の選定の高度化を目的に、水生環境負荷が小さく、施工性・経済性に優れた特殊起泡剤を選別し、陰イオン系界面活性剤に適量の非イオン系界面活性剤を添加した特殊起泡剤を研究開発した。シールド工事に適用した結果、気泡シールド工法における掘削土の水生環境負荷を1/25に低減できることを確認した。

(2) 泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性評価の可視化

泥土の性状管理の高度化を目的として、カッターチャンバー内全体の泥土の塑性流動性をリアルタイムに可視化できる評価手法を提案した。提案した手法は、シールド機に設置した土圧計の圧力変動値から算出した標準偏差を用いてチャンバー内泥土の塑性流動性を評価および可視化する方法である。大口径シールド工事に適用の際には、土圧計の設置条件に起因する土圧変動の相違を考慮することが困難であることを指摘し、粒子法（Moving Particle Simulation method；MPS）によるチャンバー内泥土の流動予測解析を実施して得られた最大土圧変動幅とシールド掘進時の土圧変動との比率である塑性流動性指数を用いることで、問題解決への期待が示唆された。

(3) 泥水式シールド工法における特殊条件下での切羽圧力管理手法

泥水式シールド工法における切羽圧力管理の高度化を目的として、トライアル施工に基づく適切な掘進管理値の設定手法を提案した。さらに、シールド掘進に伴う近接構造物の変状予測において、応力解放率 α に着目し、トライアル施工における地盤変状計測値を用いた逆解析により応力解放率 α を設定し、変状予測精度を向上させる解析手法を提案した。

(4) シールド運転管理の省力化

シールド機運転管理の高度化を目的としたシールド工事における掘進計画の立案およびシールドの操作指示の支援ツールとして、人工知能（Artificial Intelligence；AI）を用いたシールドAIシステムを開発した。シールドAIシステムは、掘進計画を支援する「施工計画支援AI」およびシ

ールドの操作を支援する「掘進操作支援 AI」の 2 つにより構成され、これらをシールドトンネル施工に実装し、線形管理方法の省力化に対する AI システムの有効性を検証した。

(5) 立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測手法

地盤変状計測管理の高度化を目的とした新しい地盤変状計測方法の実用化提案として、立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状をリアルタイムかつ非破壊状態で遠隔計測するために、地上設置型合成開口レーダー（Ground Based-Synthetic Aperture Radar；GB-SAR）を用いた方法を提案した。GB-SAR 法を用いて、地盤変状計測精度の確認試験およびシールド掘進に伴う地盤変状をリアルタイムで遠隔計測を実施した結果、GB-SAR 法は計測箇所に特別なターゲットなどの設置が不要であり、面的な変位分布を水準測量と同等の計測精度で連続計測が可能であるため、立入制限など実務上の制約が多いシールド施工現場においては非常に有用な地盤変状計測方法であることを確認した。

(6) 埋め立て地盤における泥水式シールド工法による掘進時の地盤変状リスクの低減

地盤変状リスク対応の高度化を目的として、泥水式シールド工法によるトンネル工事における埋め立て地盤特有のリスク対策とトラブル事例について論述した。埋め立て地盤において想定される代表的な 4 種類の地盤変状リスクおよびシールド掘進不能リスクを特定し、適切な事前対策を講じることで、重要構造物の変状を最小限に抑制した。

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 本研究の目的と意義	6
1.2.1 泥水・泥土性状管理の高度化	8
1.2.2 切羽圧力管理の高度化	9
1.2.3 シールド機運転管理の高度化	9
1.2.4 地盤変状計測管理の高度化	9
1.3 本論文の構成	10
参考文献	13
第 2 章 泥水・泥土性状管理の高度化	14
2.1 概説	14
2.2 気泡シールド工法における水生環境に配慮した特殊起泡剤の開発	16
2.2.1 特殊起泡剤自体の水生環境負荷の低減	16
2.2.2 使用量の低減	17
2.2.3 現場への適用事例	20
2.3 泥土圧シールド工法におけるチャンバー内泥土の塑性流動性評価手法の提案	22
2.3.1 MPS 法による泥土の流動解析の適用性の検討	25
2.3.2 大口径泥土圧シールドに対応した塑性流動状態の評価方法	32
2.4 まとめ	35
参考文献	37
第 3 章 切羽圧力管理の高度化	39
3.1 概説	39
3.2 トライアル施工の概要	40
3.2.1 トライアル施工の区間設定	40
3.2.2 計測項目	41
3.2.3 掘進管理値の初期値の設定	41
3.2.4 計測値の掘進管理値へのフィードバック方法	43
3.3 トライアル施工による地盤変状計測結果の掘進管理値へのフィードバック	44
3.3.1 地盤変状計測結果に応じた掘進管理項目へのフィードバック結果	44
3.4 シールド掘進に伴う近接構造物の変状予測解析の精度向上手法の提案	53
3.4.1 2次元弾性 FEM 解析モデルの構築	53
3.4.2 シールド通過に伴う地盤変状の予測	57

3.4.3 応力解放率の設定	63
3.4.4 設定した応力解放率の妥当性の検証	63
3.5 まとめ	66
参考文献	67
第4章 シールド機運転管理の高度化	68
4.1 概説	68
4.2 シールドAIを実装したシールド工事の概要	68
4.3 シールドAIの概要	70
4.3.1 施工計画支援AI	70
4.3.2 掘進操作支援AI	71
4.4 シールドAIの実装による有用性の検証	74
4.4.1 施工計画支援AIの検証	74
4.4.2 掘進操作支援AIの検証	75
4.5 まとめ	78
参考文献	79
第5章 地盤変状計測管理の高度化	80
5.1 概説	80
5.2 立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測手法	81
5.2.1 空港敷地内でのシールド工事におけるGB-SARを用いた地盤変状計測方法	81
5.2.2 GB-SARによる変位計測精度の検証	86
5.2.3 空港敷地内でのシールド掘進時におけるGB-SARによるリアルタイム計測事例	93
5.3 埋め立て地盤における泥水式シールド工法による地盤変状リスクの低減	98
5.3.1 シールド工事概要	98
5.3.2 想定される地盤変状等のリスクおよび事前対策	100
5.3.3 支障物による掘進トラブルへの対応	108
5.4 まとめ	121
参考文献	123
第6章 結論	124
6.1 結論	125
6.2 今後の展望	126
参考文献	128
謝辞	129

第 1 章 序論

1.1 緒言

都市部でのトンネル工法の選定にあたっては，用地確保の問題や交通渋滞などの面から，開削工法の選定が難しい場合が多い．また，非常に軟弱な沖積層から洪積層における掘削施工となる場合が多いため，トンネル周辺地山の支保機能を有効に活用する山岳工法の採用は難しい．そのため，地盤変状の発生しやすい軟弱な沖積地盤など都市部における施工条件の厳しいトンネル工事においては，非開削であり，切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながらトンネルを構築するシールド工法が多用されている．

シールド工法は，1818 年にフランスの技師マーク・ブルネルにより考案された．ブルネルは，木造船でフナクイムシが木を食べながら穴を掘り，穴がつぶれないように体内の分泌液を出し，石灰質の白い殻をつくり内壁を固める様子から，その生態をヒントにシールド工法を発明したり．1825 年，イギリス・ロンドンのテムズ川を横断する水底トンネルで初めて使用された．また，日本においては，1917 年に東日本旅客鉄道の羽越本線折渡トンネルの一部の区間で始めて使用され，1936 年には本州と九州をつなぐ関門海底トンネル工事の一部区間で採用された．シールド工法が，わが国の都市トンネルの施工法として最初に導入されたのは昭和 30 年代である．それ以来，さまざまな技術開発が行われ，現在では，わが国の都市トンネルの主要な工法として位置づけられている．

シールド技術の主な変遷は，昭和 40 年代までは圧気併用の手掘り式シールドが多く占めていたが，その後，省力化や安全確保などの面から切羽の安定性の向上が期待できる泥水式シールド，土圧式シールドなどの密閉型シールドの技術が開発されたり．その結果，昭和 50 年代には手掘り式シールドが減少し，泥水式シールド，土圧式シールドなどの密閉型シールドが主流を占めるようになり，現在に至っている．図-1.1 に主なシールド工法の分類を，図-1.2 に 2013～2022 年度のシールド機種別工事件数²⁾を示す．図-1.2 に示すとおり，泥水式

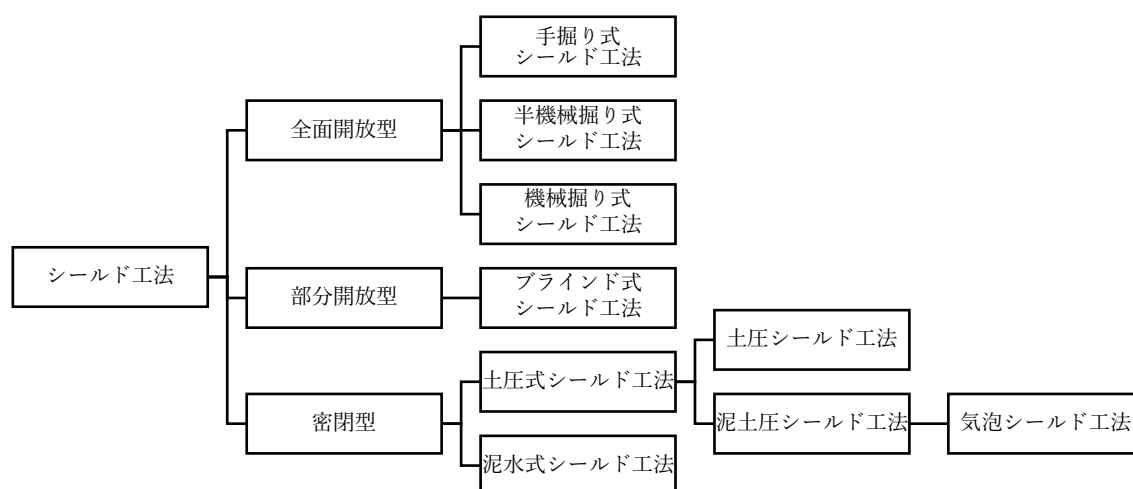


図-1.1 主なシールド工法の分類

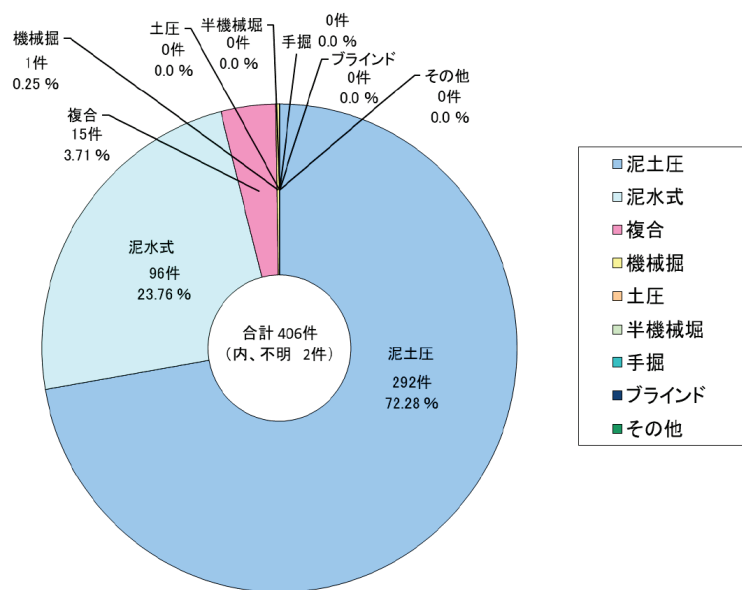


図-1.2 シールド工法別工事件数（2013～2022 年度）²⁾

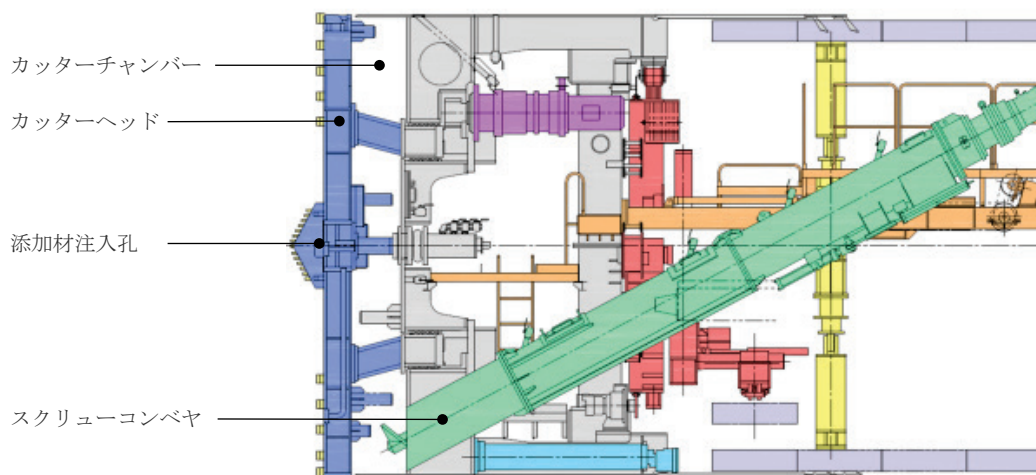


図-1.3 泥土圧シールドの構造例

および泥土圧を合わせると 95%以上を占めるため、本研究では、密閉型シールド工法を対象としている。

図-1.1 に示したように、密閉型シールド工法において、土圧式シールド工法は、カッターチャンバー内への添加材を注入の有無によって土圧シールド工法と泥土圧シールド工法に分類される。図-1.3 に泥土圧シールドの構造例を示す。泥土圧シールド工法は、カッターヘッドの前面で掘削土に添加材を加えて攪拌・混練して泥土化し、それをカッターチャンバー内に充填させて加圧し、その圧力により切羽を安定させて掘進する。泥土圧シールド工法のうち、添加材に気泡を用いる工法が気泡シールド工法である。気泡シールド工法の特徴は、注入される微細なセービングクリーム状の気泡が、掘削土の流動性と止水性を向上させ、か

つ、チャンバー内での掘削土の付着を防止できる点にあり、切羽の安定を保持しつつ、スムーズな掘進が可能になる。さらには、排出土中の気泡は大気圧に解放されると自然消泡するため、排出土が気泡注入前の性状に戻り、後処理が容易である³⁾。

泥水式シールド工法は、チャンバー内に泥水を送り、切羽に作用する土水圧よりやや高めの泥水圧をかけて切羽の安定を図るもので、泥水の浸透による安定効果もあり、水圧の高い場所での施工に適している。排泥は、配管による流体輸送であり、切羽から地上までの配管によって完全に密閉されているため、安全性が高く、坑内環境も良好である。また、流体輸送設備は掘進状況に応じて切羽水圧を制御できる機能を有しているため、切羽の安定を図り、周辺地盤への影響を少なくすることが可能である⁴⁾。

シールド工法における最も重要な課題は、施工に伴う地盤変状を最小限に抑制することである。そのため、シールド機直上付近の地表面の変状を監視し、その変状に応じて切羽圧力等の掘進管理項目を適切に制御することで、地盤変状の抑制を図っている。図-1.4に泥土圧シールド工法における代表的な掘削管理フローの例⁵⁾を示す。近年、写真-1.1～1.3に示すようなシールドトンネル工事における道路陥没や泥土等の地表面流出等のトラブルが頻発しており、シールド工法に対する安全性が懸念されている。



写真-1.1 道路陥没状況(1)⁶⁾



写真-1.2 泥土等地表面流出状況⁷⁾



写真-1.3 道路陥没状況(2)⁸⁾

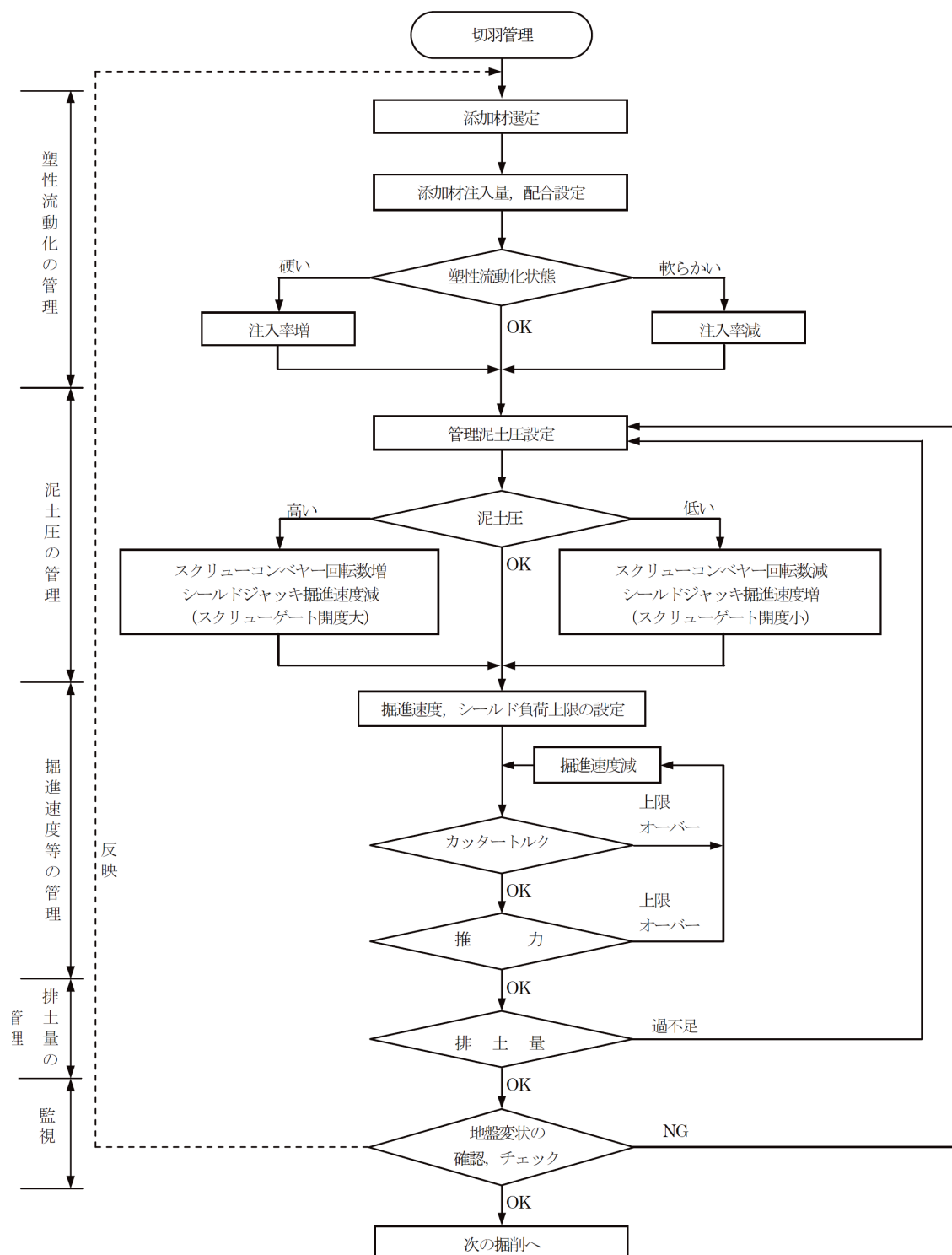


図-1.4 土圧式シールド工法の掘削管理フロー例⁴⁾

図-1.5 にシールド工法によるトンネル施工の現状のイメージ図を示す。シールドトンネル工事においてトラブルが頻発する要因に、山岳トンネル工法のように切羽を直接目視で観察して地層分布を把握することが困難な点が挙げられる。このため、写真-1.1 に示すような細粒分が少なく均等係数が小さい自立性の乏しい地盤においてチャンバー内の土砂が分離・沈降し、締め固まってしまうことで掘進再開時に閉塞が生じ、その解除のために土圧の不均衡が生じて地山からの土砂がチャンバー内に流入して発生した道路陥没⁹⁾や、写真-1.2 に示すような泥土等の地上漏出および河川への流入、さらに写真-1.3 に示すような流動化しやすい砂質土層に対して、泥水密度が不十分な状態で掘削停止中または低速掘進時にシールドマシン上部の砂質土層が泥水に長時間さらされるとともに閉塞に伴う圧力変動を受けることにより不安定化し、天端部より砂質土層が流動的に切羽内に流入して道路陥没が発生する¹⁰⁾。したがってこれらのトラブル発生を抑制するためには、シールド機本体やその他の設備に様々な計測機器を配置するとともに、地盤変状計測を実施して施工情報を入手する必要がある。また、得られた施工情報に基づいて、掘削状況や地盤変状の要因を分析かつ推察し、次の掘削計画に反映させることでトンネル施工を進めている。このように、シールド工法によるトンネル施工は、現在でも担当技術者が経験的に用いている「経験知」に大きく依存していることが分かる。近年の少子高齢化に伴う熟練技能労働者の大量離職による「経験知」の減少に加えて、シールドトンネル工事の大断面化、長距離化、大深度化等による難工事化に伴う未経験工事の増加等が引き続き、想定されることから、前述のようなトラブルが今後も頻発するものと懸念される。

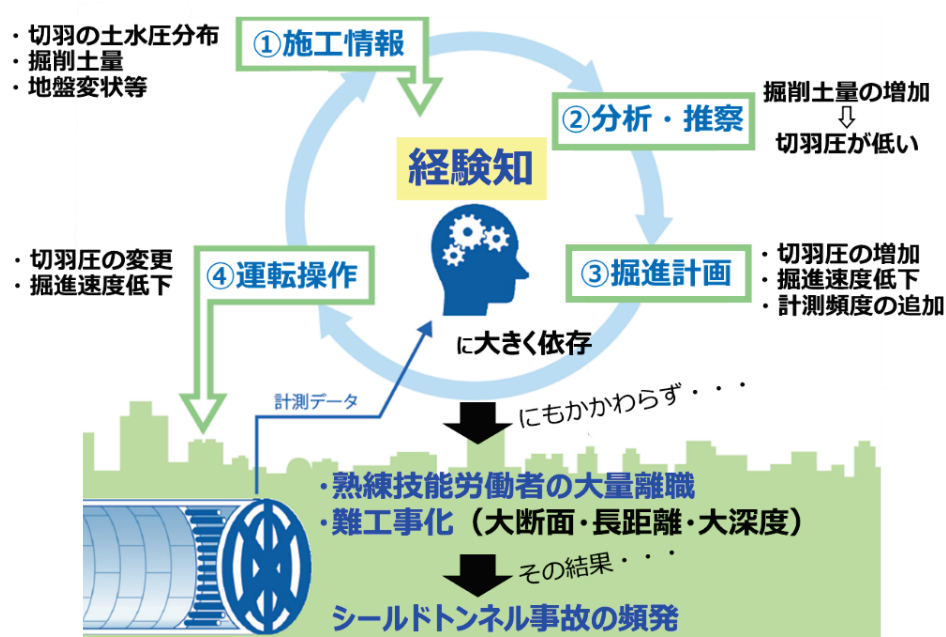


図-1.5 シールド工法によるトンネル施工の現状

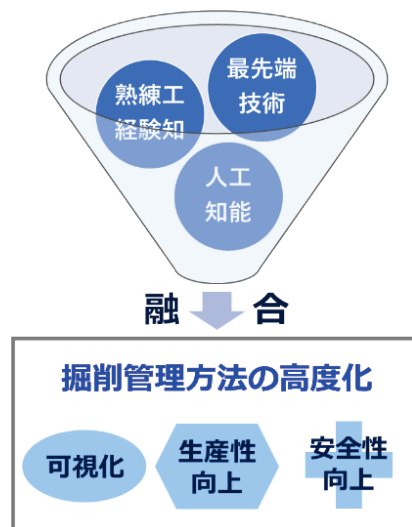


図-1.6 シールド工法によるトンネル施工の課題

このようなシールド工法によるトンネル施工の現状を鑑みて、国土交通省では、シールドトンネル構築のための調査・設計・施工に関する最新の技術的知見をまとめて、令和3年12月に「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」を策定した¹¹⁾。本ガイドラインは、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おり、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から、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・確認が行われている。これらの結果を踏まえ、重大なトラブルや事故の回避のためには、想定しうるリスクに対して適切な調査・設計・施工を行うことはもとより、施工の高度化が重要であることを指摘している。したがって、図-1.6に示すように、熟練工の「経験知」、最先端技術、および人工知能を融合させることによってシールド工法における掘削管理方法を高度化し、トンネル施工技术に対する「経験知」を可視化して、生産性向上、安全性向上等によるトンネル施工の合理化を図ることが急務であると考ええる。

1.2 本研究の目的と意義

本研究では、シールド工法における掘削管理方法の高度化によるトンネル施工の合理化を図るために、以下に示す6つの技術課題に対する研究開発を目的とした。

- ① 気泡シールド工法における掘削土の水生環境負荷の低減
- ② 泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性評価の可視化
- ③ 泥水式シールド工法における特殊条件下での切羽圧力管理手法の確立
- ④ シールド運転管理の省力化

⑤ 立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測手法の確立

⑥ 埋め立て地盤における泥水式シールド工法による掘進時の地盤変状リスクの低減

ここで、これらの研究課題①から⑥とシールド工法の掘削管理方法との関連は、図-1.3 に示した土圧式シールド工法の掘削管理フロー例に基づいて、図-1.6 のように整理する。以下に、これらの技術課題に対する研究開発の意義を概説する。

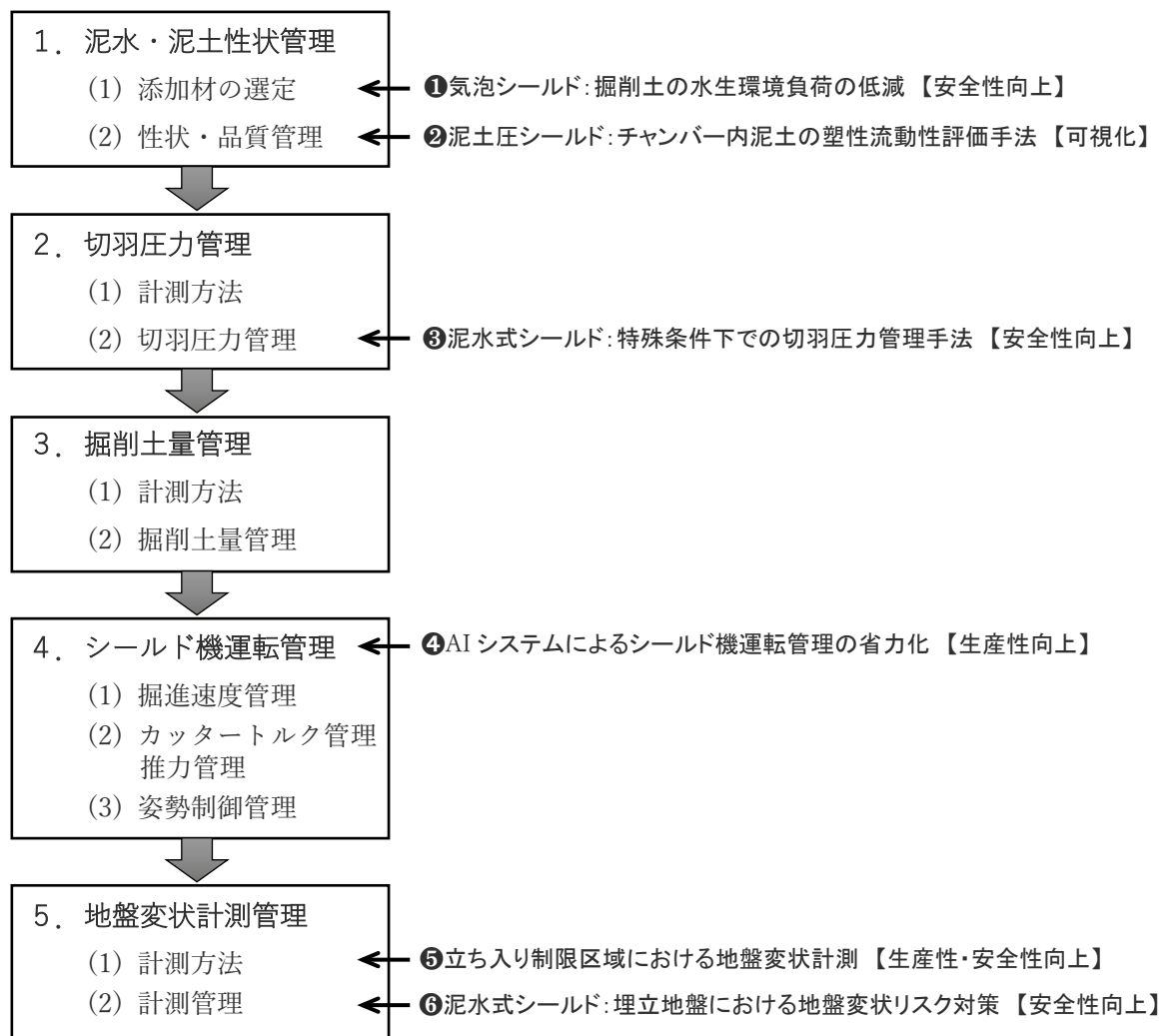


図-1.6 シールド工法の掘削管理方法に対する本研究における研究課題の関連

1.2.1 泥水・泥土性状管理の高度化

(1) 気泡シールド工法における掘削土の水生環境負荷の低減（研究課題①）

泥土圧シールド工法の一つである気泡シールド工法は、切羽あるいはチャンバー内に特殊起泡材でつくられた気泡を注入しながら掘進する工法である。注入される微細なシェービングクリーム状の気泡が掘削土の流動性と止水性を向上させるとともに、チャンバー内での掘削土の付着が防止できるため、切羽の安定を保持しつつ、スムーズな掘進を図ることが可能である。排出土中の気泡は、条件によっては自然消泡することが期待されるため、排出土が気泡注入前の状態に戻り、後処理が容易である³⁾。このように優れた特徴を持つ気泡シールド工法は、近年の大断面シールドにおいて多数の実績を有している。

近年、都市部のシールドトンネル工事においては、掘削土を海面の埋め立てに利用するケースが増加し、気泡シールド工法で施工した際の掘削土に含まれる特殊起泡剤による水生生物への影響が懸念されている。例えば、首都圏におけるシールドトンネル工事では、建設発生土の受入先において「掘削土中の特殊起泡剤の濃度」が規制されるようになり、掘削土を即日で搬出した場合には従来の特殊起泡剤では受入基準を満足することができなくなった¹²⁾。このため、掘削土は3日間仮置きするなどして、土中の微生物に特殊起泡剤を生分解させ、受入基準を満足することを確認した後に搬出しており、非常に広大な仮置き用地を必要とするとともに、工費や工期に大きな影響を及ぼしている。ところが、これまでに水生環境に配慮した特殊起泡剤は開発されていない。そこで、泥土圧シールド工法の水生環境負荷の低減を目的として、水生環境に配慮した特殊起泡剤を開発する。

(2) 泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性評価手法（研究課題②）

従来のカッターチャンバー内泥土の塑性流動性の管理方法としては、スクリューコンベヤーから排出された掘削土砂のスランプ試験等により把握する方法や、スクリューコンベヤーの回転数から得られる計算排土量と掘進速度から得られる計算排土量の比較により推定する方法、あるいは、塑性流動の状態に影響を受けるカッター、スクリューコンベヤーのトルク値等、機械負荷の経時的変化により推定する方法が挙げられる⁵⁾。しかし、大口径シールドにおいては、掘削された土がスクリューコンベヤーから排出されるまでに時間を要することから、排出された泥土の性状を確認する方法のみでは、カッターチャンバー内全体の泥土の性状をリアルタイムに確認することが困難であった。

近年では、カッターチャンバー内に設置した回転体のトルクを計測する方法¹³⁾や、ロットの曲げを計測する方法¹⁴⁾、あるいは隔壁部に作用するせん断力からリアルタイムに塑性流動性を評価する方法¹⁵⁾が提案されている。これらの方法は、いずれも塑性流動性を評価するために特別な装置を設置する必要があるため、そのための費用が発生することや、特殊な装置のため故障リスクが高いこと等が問題であった。そこで、一般に、シールド工事で計測される土圧データを用いた塑性流動性評価手法を開発するとともに、攪拌条件が異なる位置

に土圧計が設置された場合においても塑性流動性を適切に評価できるシステムを構築する。

1.2.2 切羽圧力管理の高度化

(1) 特殊条件下における適切な泥水式シールド工法の掘進管理手法（研究課題③）

泥水式シールド工法における切羽安定機構には、切羽安定に最も有効な泥水の物性（比重、ろ過特性、粘性、砂分含有率等）の調整と切羽の土圧および水圧に対抗した切羽圧力の調整保持機能が必要不可欠である¹⁷⁾。また、一般に、切羽圧力や裏込め注入等の掘進管理値は、種々の施工条件（例えば、土質・地下水状態、土被り、掘削外径等）に対する過去の施工実績を参考にして設定されているが、特殊な施工条件下では、過去の施工実績を参照できないことから、事前に適切な掘進管理値を設定することは困難である。そこで、特殊条件下においても適切な掘進管理を実現することを目的として、泥水式シールド工法で構築されるトンネル工事において、掘進の初期段階に地盤変状を計測しながら掘進管理値の妥当性を検証・改善する方法を提案する。

1.2.3 シールド機運転管理の高度化

(1) 人工知能を用いたシールド線形管理方法の省力化（研究課題④）

シールド工事では、一般に昼夜交替で作業が行われており、短い交替時間の中でシールドの位置やセグメントの出来形等の測量を行い、その結果に基づいて次の掘進計画を行っている。掘進計画では、掘進予定分のリングを対象にシールドの操作方法やセグメントの組立方法等が示された掘進指示書を作成する。そして、熟練のオペレーターが掘進指示書とシールドの状態が示されたモニターの情報を見ながらシールドの操作を行っている。ここで、近年の少子高齢化に伴う熟練技能労働者の大量離職が予想される中で、最先端技術と定量化した熟練工の経験値の融合による生産性向上が求められている。そこで、シールド掘進管理の省力化を目的として、シールド工事における掘進計画の立案およびシールドの操作指示を支援する AI システム（Artificial Intelligence, 人工知能）を実際のシールドトンネルの掘進管理に実装し、その有効性を検証する。

1.2.4 地盤変状計測管理の高度化

(1) 立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測手法（研究課題⑤）

シールド工法における最も重要な課題は、掘進による近接構造物や埋設物に対する環境影響を最小限に抑制することである。特に、シールド通過前から通過後において、シールド周辺地盤の応力解放や付加的な圧力の作用やシールドのスキンプレートと周辺地盤との摩擦、そして、テールボイドの充填量不足などの影響によって経時的に発生する地盤の隆起や沈下現象などの地盤変状の把握は非常に重要である。そのため、シールド掘進の進捗に合わせて、シールド直上付近の地表面の変状を水準測量等で計測し、その変状に応じて切羽圧力や裏込め注入等を制御することで、地盤変状の抑制を図っている。

重要な社会基盤施設内においてシールド工事を実施する場合には、計測作業のための立ち入りが制限され、計測機器も常設できない場合が多いため、水準測量の実施や測量機器を用いた自動計測は困難となる。このようなシールド工事においては、計測対象地点に直接機器を設置することなく、広範囲を短時間で計測できる遠隔計測の応用が期待されている。そこで、立ち入りが制限される用地内における地盤変状計測手法の確立を目的として、地上設置型合成開口レーダーを用いた遠隔計測方法の有用性を検証する。

(2) 埋め立て地盤における泥水式シールド工法による掘進時の地盤変状リスクの低減（研究課題⑥）

都市化の進んだ地域では、増え続ける人口や産業を支えるために湾岸部を埋め立てて都市域の拡大を図ってきた。一般に、このような埋め立て地は、軟弱な海底地盤上に造成されるため、粘土地盤の過剰な沈下・変形を抑制するために圧密促進工法などによる軟弱地盤対策が実施されており、プラスチックドレーン材や袋詰サンドドレーン材の網袋のような人工物が埋設されている場合がある。さらに、埋め立て材として浚渫土などの建設発生土が使用される場合が多いため、地質が不均質となる。このような埋め立て地において、泥水式シールド工法でトンネルを構築する場合には、人工物の流体輸送設備の閉塞による切羽水圧の急激な変動や、切羽に作用する土水圧の急激な変化等による地盤変状リスクが懸念される。このため、東京国際空港内での埋め立て地盤において泥水式シールド工法による掘進時に遭遇した地盤変状リスクに対して、策定した対策工法について論述する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図-1.7 に示す。本論文は、この章を含めて 6 章より構成されており、以下に各章の概要を説明する。

第 1 章の序論では、本研究の背景および目的、工学的意義を示した。

第 2 章では、泥水・泥土性状管理の高度化を目的として、①気泡シールド工法における掘削土の水生環境負荷の低減、②泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性評価手法について述べる。

①については、近年、都市部のシールドトンネル工事において、掘削土を海面の埋め立てに利用するケースが増えてきており、気泡シールド工法で施工した際の掘削土に含まれる特殊起泡剤による水生生物への影響が懸念されている。そこで、水生環境負荷が小さく、施工性および経済性に優れた特殊起泡剤を選別し、陰イオン系界面活性剤に適量の非イオン系界面活性剤を添加することで気泡の安定性が向上する効果を利用した特殊起泡剤を開発した。開発した特殊起泡剤は、従来の気泡シールド工法の施工設備をそのまま利用できる高い汎用性を有しており、従来の特殊起泡剤に比較して、水生環境負荷が 1/5 未満に低減し、1/5 未満の使用量でも同等の気泡安定性が得られる。開発した特殊起泡剤を土質条件の大き

く異なるシールドトンネル工事現場に適用し、水生環境負荷が従来の特殊起泡剤に比較して 1/25 に低減したことを確認する。

②については、従来の泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性の管理方法では、スクリーコンベヤから排出された泥土を目視や触診といった経験的に判断しているため、泥土の性状をリアルタイムに確認することが困難であった。そこで、シールド隔壁部で計測した土圧データを用いた塑性流動性の管理手法を開発し、カッターチャンバー内の複雑な挙動を再現するための手法として、粒子法的一种である MPS (Moving Particle Simulation method) 法による流動解析技術の有用性を実験的に検討した。また、MPS 法を用いたカッターチャンバー内泥土攪拌シミュレーションの適用性を示すとともに、MPS 法による事前解析により、攪拌条件が異なる位置に土圧計が設置された場合においてもカッターチャンバー内泥土の塑性流動性を適切に評価できるシステムを開発する。

第 3 章では、切羽圧力管理の高度化を目的として、泥水式シールド工法における適切な掘進管理値の設定手法を提案した。一般に、泥水式シールド工法の掘進管理値は、種々の施工条件に対する過去の施工実績などを参考にして設定される場合が多いが、特殊な施工条件下では過去の施工実績が参照できない。そこで、特殊な施工条件下（大断面、小土被り等）における泥水式シールド工法による掘進の初期段階において、切羽水圧および裏込め注入方法を変化させたトライアル施工を実施し、トライアル施工に基づく適切な掘進管理値の設定手法およびシールド掘進に伴う近接構造物の変状予測の精度を向上させる解析手法を提案する。

第 4 章では、シールド機運転管理の高度化を目的として、シールド工事における掘進計画の立案およびシールドの操作指示を支援するツールとして人工知能 (Artificial Intelligence ; AI) に着目し、掘進計画を支援する「施工計画支援 AI」システムおよびシールドの操作を支援する「掘進操作支援 AI」システムの開発について述べた。これらの AI 技術を活用したシールド掘進管理システムでは、定量化した熟練工の経験値が融合され、シールド工事の安全性と生産性の向上への貢献が期待される。これらのシールド AI システムを実際のシールドトンネル施工に実装し、その有効性を検証する。

第 5 章では、地盤変状計測管理の高度化を目的として、①立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測手法の確立、②埋め立て地盤における泥水式シールド工法による掘進時の地盤変状リスクの低減について述べた。①については、シールド掘進に伴って発生する地盤変状を地上設置型合成開口レーダー (GB-SAR ; Ground Based Synthetic Aperture Radar) を用いてリアルタイムかつ非破壊状態で遠隔計測する方法を提案した。GB-SAR では数百メートル以上の遠方から計測対象地盤にレーダー波を照射して面的な変位分布を計測する方法であり、計測箇所にターゲットなどの設置が不要であるため、施工敷地内への立入制限の

ある施工条件下においても、地盤変状の連続計測が可能である。本法の有用性は、地盤変状の計測に制約条件の多い空港施設の直下を通過するシールド工事にて得られた実測値を用いて検証し、GB-SARによる地盤変状計測における留意点についての知見を示した。

②については、埋め立て地盤における泥水式シールド工法による掘進時の地盤変状リスク対策について述べた。一般に、埋め立て地盤の土質状態は極めて不均質であり、埋め立ての施工中やその後の地盤改良時において人工物が残置される場合が多い。このような埋め立て地盤特有の不均質性や人工物の存在によって、掘進中の切羽に作用する土水圧の急激な変化に起因する地盤変状の発生や、掘進不能などのリスクが懸念される。本章では、東京国際空港内での埋め立て地盤において泥水式シールド工法による掘進時に遭遇した地盤変状リスクに対して、策定した対策工法について論述する。

第6章は、本研究で得られた知見をまとめた結論であり、今後の課題についても論述する。

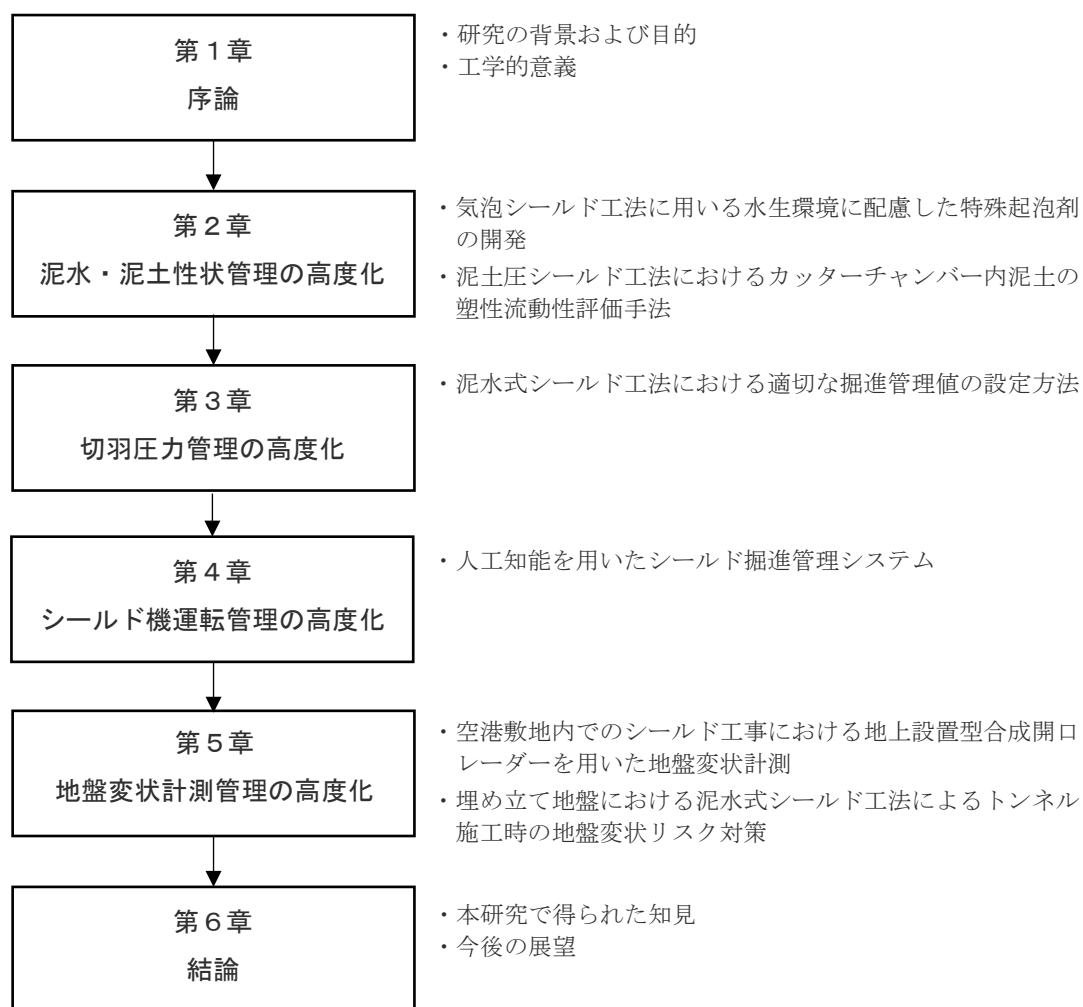


図-1.7 本論文の構成

参考文献：

- 1) 国土交通省：シールド工事における技術基準，技術開発経緯（資料-2），
<http://www.mlit.go.jp/tec/sekisan/sekou/pdf/240427kyougikai06.pdf> (閲覧日：2024.1.7).
- 2) シールド工法技術協会：シールド工事実績グラフ，https://shield-method.gr.jp/wp/wp-content/uploads/achievements2023_graph.pdf (閲覧日：2024.1.7).
- 3) シールド工法技術協会：気泡シールド工法技術資料，pp.1-3, 2020.
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，p. 157, 2017.
- 5) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，pp. 216-220, 2017.
- 6) 東日本高速道路株式会社関東支社：NEWS RELEASE「東京外かく環状道路（関越～東名）工事現場付近での地表面陥没について【第一報】」，2020.
- 7) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：報道発表資料「北海道新幹線，札幌トンネル（札幌）工区 シールドトンネル工事における泥土等の地表面への漏出について」，2022.
- 8) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社：神奈川東部方面線新横浜トンネルに係る地盤変状検討委員会 報告書，2020.
- 9) 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：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 陥没・空洞の推定メカニズム，2021.
- 10) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社：神奈川東部方面線新横浜トンネルに係る地盤変状検討委員会 報告書，2020.
- 11) 国土交通省 シールドトンネル施工技術検討会：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，pp.1-41, 2021.
- 12) 日経コンストラクション：特別リポート「世界屈指のシールド」2011年6月号，p.61, 2011.
- 13) 土橋 浩，松田 満，松原健太，山本 彰，近藤由也，日野義嗣，今田徹：泥土圧シールドにおけるチャンバー内の土砂流動管理技術の開発，土木学会論文集 F，Vol.66，No.2，pp.289-300，2010.
- 14) 株式会社フジタ：「チャンバー内見える化技術」でシールド掘進管理を高度化～曲げセンサーと色相彩度で土砂の流動状態を可視化～，
https://www.fujita.co.jp/information/2016/post_347.html (閲覧日：2017.6.1).
- 15) 粥川幸司，新原圭祐，名倉 浩，越田 健：泥土圧シールド実機を用いた掘進実験によるチャンバー内掘削土の塑性流動判定，第26回トンネル工学研究発表会，報告II-3，2016.

第2章 泥水・泥土性状管理の高度化

2.1 概説

泥水式シールド工法および泥土圧シールド工法における泥水・泥土性状の管理では、①添加材の選定、および②泥水・泥土の性状管理の2項目が重要となる。泥土圧シールド工法では、図-1.3に示したように、カッターヘッドの前面で掘削土に添加材を加えて攪拌・混練して泥土化する。それをカッターチャンバー内に充満させて加圧して、その圧力により切羽を安定させて掘進する。つまり、地山を掘削して、その掘削土で切羽の安定を図りながら同時に掘削土砂を排出する必要があるため、掘削土による切羽の安定と掘削土の搬出という、相反する2つの作用が同時に行われなければならない。

掘削土を連続的に移動させてスクリーコンベヤから排出するためには、加圧された掘削土が自由に変形・移動できる性質、すなわち塑性流動性を有することが重要である。掘削土に添加材を過剰に加えた場合には、掘削土の流動性が高くなり、スクリーコンベヤの圧力保持機能が低下するため、カッターチャンバー内の圧力を維持できず、切羽の安定性の確保が困難になる。このような理由から、カッターチャンバー内における泥土性状管理は非常に重要である。

泥土圧シールド工法のうち、添加材に気泡を用いる工法が気泡シールド工法であり、図-2.1に示すクリーム状の気泡を切羽やチャンバー内に注入しながらシールドを掘進する。気泡の注入効果により、掘削土の流動性と止水性が向上するとともに、チャンバー内における掘削土の付着を防止できるため、切羽を安定させながらスムーズな掘進が実現できる。また、スクリーコンベヤから排出された掘削土は、大気圧下に開放されるために気泡が消泡し、地山の土砂の性状に近い状態に復元するため、掘削土の運搬や処理が容易になる。このように優れた特徴を持つ気泡シールド工法は、既に基本特許の有効期限が切れており、使用上の制約が無くなったことから、数多くのシールドトンネル工事で採用されている。特に、シールド機の外径が10mを超える大断面シールドトンネル工事では、図-2.2に示すとおり、平成22年度までの3年間の採用割合が60%を超えており、気泡シールド工法は大断面シールドトンネル工事におけるシールド工法の主流となっている。

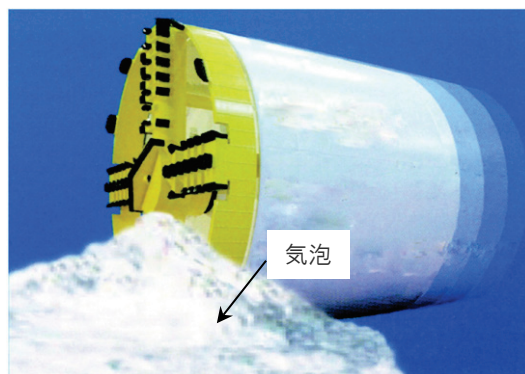


図-2.1 気泡シールド工法のイメージ

平成 22 年度までの全工事

平成 19～22 年度までの 3 年間

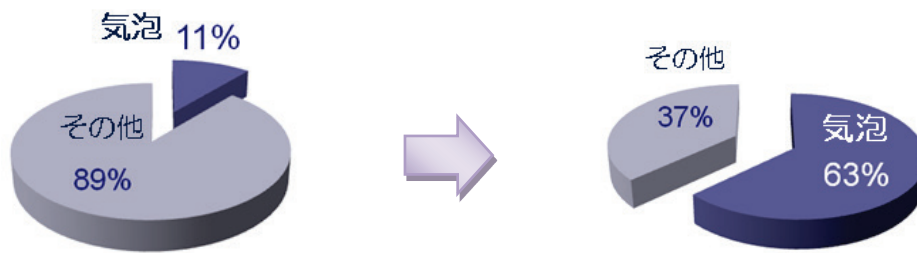


図-2.2 シールド工法の採用割合（平成 19～22 年度）

しかし、近年、地球環境に対する関心が高まり、化学物質に対する監視が厳しくなっている。一方で都市部のシールドトンネル工事においては、掘削土を海面の埋め立てに利用するケースが増えてきており、気泡シールド工法で施工した際の掘削土に含まれる特殊起泡剤による水生生物への影響が懸念されている。例えば、首都圏におけるシールドトンネル工事では、建設発生土の受入先において「掘削土中の特殊起泡剤の濃度」が規制されるようになり、掘削土を即日で搬出した場合には従来の特殊起泡剤では受入基準を満足することができなくなった。このため、掘削土は3日間仮置きするなどして、土中の微生物に特殊起泡剤を生分解させ、受入基準を満足することを確認した後に搬出しており、非常に広大な仮置き用地を必要とするとともに、工費や工期に大きな影響を及ぼしている²⁾。このような背景により、水生環境にやさしい特殊起泡剤の開発が急務となっている³⁾。

また、従来のチャンバー内泥土の塑性流動性の管理方法では、スクリーコンベヤから排出された泥土を目視や触診といった経験的な判断や、スランプ試験、ベーンせん断試験等により定量的に管理する方法を用いてきた。しかし、大口径シールドにおいては、掘削された土がスクリーコンベヤから排出されるまでに時間を要することから、排出された泥土の性状を確認するだけでは、リアルタイムにチャンバー内全体の泥土の性状を確認することが困難であった。近年では、チャンバー内に設置した回転体のトルクを計測する方法⁴⁾や、ロッドの曲げを計測する方法⁵⁾、あるいは隔壁部に作用するせん断力からリアルタイムに塑性流動性を評価する方法⁶⁾が提案されている。これらの方法は、いずれも塑性流動性を評価するために特別な装置を設置する必要があり、その費用が発生することや、特殊な装置のため故障するリスクが高いこと等が問題であった。

そこで、本章では、カッターチャンバー内泥土の性状管理に関して、以下の2項目について論述する。

- ① 添加材の選定の高度化として、気泡シールド工法における水生環境に配慮した特殊起泡剤を新たに開発し、従来の添加剤からの利点についてまとめる。
- ② 泥土の性状管理の高度化として、カッターチャンバー内全体の泥土の塑性流動性をリアルタイムに可視化できる評価手法を提案する。

2.2 気泡シールド工法における水生環境に配慮した特殊起泡剤の開発

本研究で開発した特殊起泡剤（以下、開発剤と称す）は、図-2.3 に示す設計思想により、以下の特徴を有している。

- ① 特殊起泡剤自体の水生環境負荷は従来のもの（以下、従来剤と称す）の 1/5 である
- ② 特殊起泡剤の使用量は従来剤の 1/5 である
- ③ 気泡シールド工法の水生環境負荷は従来剤の 1/25 である
- ④ 生分解性に優れ、環境中に蓄積されない
- ⑤ 汎用性に優れ、従来の気泡シールド工法の設備で使用可能である

以下、それぞれの特徴について詳述する。



図-2.3 開発剤の特徴

2.2.1 特殊起泡剤自体の水生環境負荷の低減

気泡の原料である特殊起泡剤の化学成分を見直し、水生環境負荷が小さく、施工性・経済性に優れたものを選別して配合した。水生環境負荷の評価には、化学品の危険有害性の国際的な分類基準と表示方法を定める GHS（Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals）の基準を採用した。この基準では、化学品による水生生物への影響を「急性水生毒性」と称し、水系食物連鎖における高次消費者である魚類（ヒメダカ等）を対象として、化学物質に 96 時間暴露した際に魚類の半数（50%）が死亡する際の化学物質の濃度“96 時間 LC₅₀（mg/L）”で評価する。96 時間 LC₅₀ の値が大きいほど水生環境負荷が小さいことを意味する。

公的機関である（財）日本食品分析センターによる評価結果では、従来剤（製品名 OK-1）の 96 時間 LC₅₀ が 43 mg/L であるのに対し、開発剤は 240 mg/L であり、水生環境負荷が従来剤の 5 分の 1 未満（ $240/43 \div 5.6$ ）になることを確認した。GHS では急性水生毒性の評価区分を表-2.1 のように設定しており、従来剤が「区分 3（水生生物に有害）」に属するのに対し、この区分を大幅に下回る「区分外」の評価であり、このことから開発剤が水生環境にやさしいことがわかる。

表-2.1 GHS による急性水生毒性の評価区分

評価区分	表示	注意喚起語	96 時間 LC ₅₀	備考
区分 1		水生生物に 非常に強い 毒性	1mg/L 以下	
区分 2	—	水生生物に 毒性	1～10mg/L	
区分 3	—	水生生物に 有害	10～100mg/L	従来剤 (43mg/L)
区分外	—	—	100mg/L 以上	開発剤(240mg/L)

2.2.2 使用量の低減

(1) 気泡の安定性向上のための方策

陰イオン系界面活性剤に適量の非イオン系界面活性剤を添加することで気泡の安定性が向上する効果（界面活性剤の併用効果）を利用し、少ない使用量で従来剤と同等の気泡の安定性を確保できるようにした。併用効果による気泡の安定性向上の概要を図-2.4 に示す。気泡の安定性を評価するために、破膜試験を実施した。破膜試験は、写真-2.1 に示す器具を用いて、図-2.5 に示す手順でフレームに形成された気泡膜が破れるまでの時間（破膜時間）を計測するもので、破膜時間が長いほど気泡の安定性が高いことを意味する。

陰イオン系界面活性剤を主剤とし、非イオン系界面活性剤の添加率を変化させて破膜試験を実施したところ、図-2.6 に示す結果となった。非イオン系界面活性剤の添加率が 3% のときに併用効果が最も大きく（破膜時間 138 分）なり、この添加率を採用した。また、従来剤の破膜時間が 27 分であることから、開発剤が従来剤の 5 倍以上（ $138/27 \div 5.1$ ）の優れた気泡の安定性を有することを確認した。

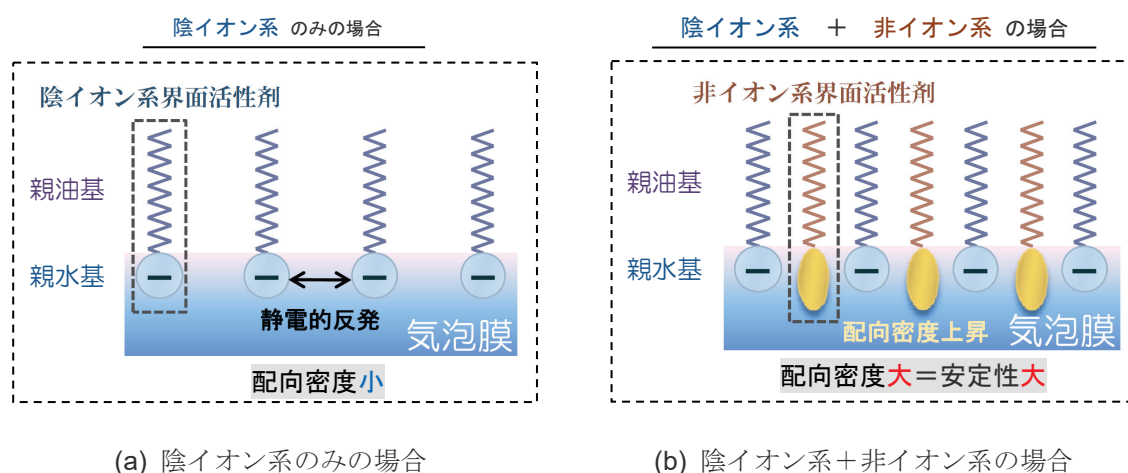


図-2.4 界面活性剤の併用効果による気泡の安定性向上

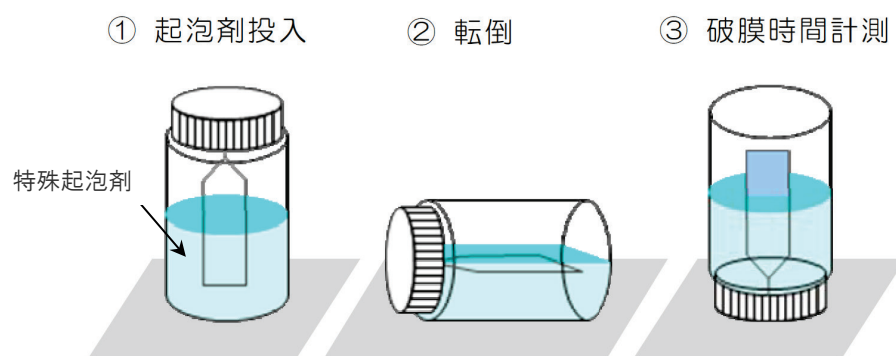


図-2.5 破膜時間計測手順

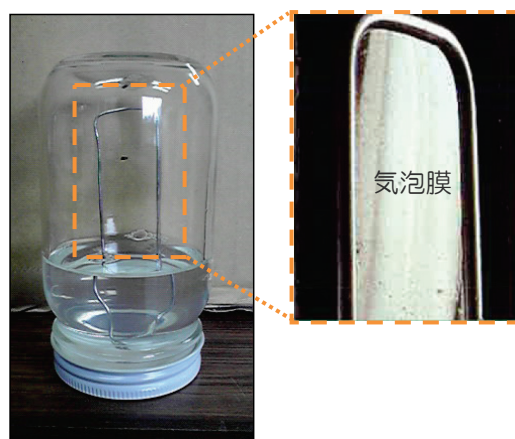


写真-2.1 破膜試験器具

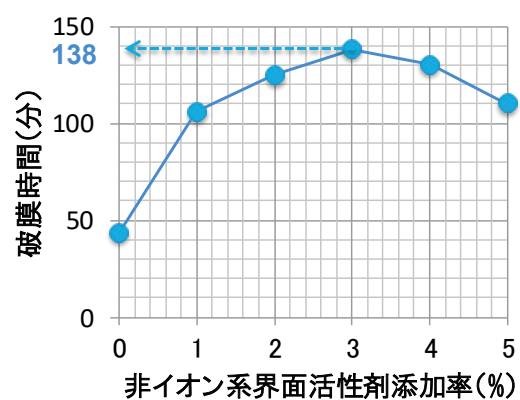


図-2.6 破膜試験結果

(2) 室内試験による気泡シールド工法への適用性の検証

気泡シールド工法への適用性を検証するために、掘削土の性状管理方法として一般に用いられる気泡混合土のスランプ試験およびコーン貫入試験を実施した。試験結果を表-2.2に、試験状況を写真-2.2, 2.3に示す。開発剤は従来剤と比較して5分の1の濃度（使用量）で同等の性状，すなわち施工性が得られることを確認した。

表-2.2 開発剤の施工性確認試験結果

	試料	注入率 (%)	発泡倍率 (倍)	濃度 (%)	スランプ (cm)	コーン指数 (kN/m ²)
開発剤	5号珪砂 (含水比 15.0%)	10	8	0.6	13.0	19.5
従来剤				3.0	13.0	13.2



(a) 従来剤



(b) 開発剤

写真-2.2 スランプ試験結果



(a) 従来剤



(b) 開発剤

写真-2.3 スランプ試験結果

(3) 気泡シールド工事の水生環境負荷の低減

以上より、開発剤を使用すると、特殊起泡剤自体の水生環境負荷が従来剤の 5 分の 1 であり、使用量が従来剤の 5 分の 1 であることから、トータルで気泡シールド工事の水生環境負荷が従来剤の 25 分の 1 となることを確認した。

(4) 生分解性

生分解性とは、自然界の微生物の働きにより有機物が水、酸素、炭酸ガス等に分解され自然に戻る性質を指す。すなわち、生分解性の悪い物質は環境中に蓄積されやすくなることから、生分解性は環境への影響を評価するための重要な指標の 1 つである。公的機関である（財）日本食品分析センターにおいて溶存有機体炭素量の測定試験法（DOC 法）による生分解度試験を実施した結果、開発剤の 14 日後の生分解度は 85%であることがわかった。一般に、28 日後の生分解度が 70%以上であれば生分解性が良好な物質と言える⁷⁾ことから、開発剤が優れた生分解性を有し、環境中に蓄積されにくいことを確認した。

(5) 汎用性

開発剤は、従来剤の施工設備をそのまま利用できることや、従来剤と同様に、掘削対象土の粒度分布に応じて使用配合（A～C タイプ）や気泡混合率を設定⁸⁾できることから、現場への導入が容易であると言える。また、使用量を従来剤よりも大幅に低減できることから工費の削減効果も期待できる。このように、開発剤は優れた汎用性を有することを確認した。

2.2.3 現場への適用事例

(1) 洪積粘性土地盤への適用

掘削土がシールド機のチャンバー内に付着しやすい洪積粘性土層の施工に適用した事例について述べる。工事概要を表-2.3 に、施工状況を写真-2.4～2.7 に示す。写真-2.4 に示すように、チャンバー内における掘削土の付着を防止してスムーズな排土を実現した。また、写真-2.7 に示すように、消泡後の掘削土は地山の土砂の性状に近い状態に復元しており、開発した特殊起泡剤の気泡シールド工法への優れた適用性を確認した。

表-2.3 工事概要

発注者	大阪広域水道企業団
工事名称	配水管布設工事（バイパス・堺市）3 工区その 2
工事場所	大阪府堺市西区石津西町～堺市堺区大浜西町
工事概要	工業用水バイパス配水管（ダクタイル鋳鉄管 φ1,350mm） 気泡シールド工法：掘削外径 φ2,422mm，掘進延長 2,367m
施工実績	対象土質：洪積粘性土 施工延長：2,367m 気泡使用タイプ：A タイプ 施工時期：平成 22 年 11 月～平成 23 年 9 月



写真-2.4 排土状況（切羽）



写真-2.5 気泡注入設備（坑内）



写真-2.6 排土状況（地上土砂ピット）



写真-2.7 消泡後の掘削土

(2) 沖積砂質・礫質土層への適用

地下水位が高い沖積砂質・礫質土層に適用した事例について述べる。工事概要を表-4 に示す。沖積砂質土・礫質土を小土被り（4.7～7.5 m）で掘進するため、地盤変状の抑制が求められた。掘削に先立ち、立坑の掘削土砂を用いて気泡混合土の性状確認試験を実施し、Bタイプの配合を採用することとした。ここで、Bタイプの配合とは、特殊起泡剤に気泡の安定強化を目的とした起泡添加剤（パルプを主原料として得られるセルロース系の水溶性高分子剤）を加えたものである。写真-2.8, 2.9に施工状況を示す。掘進中におけるカッタートルクは小さい値で安定し、気泡のベアリング効果による掘削土の流動性を確認できた。また、写真-2.9に示すように、スクリーコンベアからの噴発は見られず、気泡による止水効果も確認できた。このように、小土被りの沖積砂質・礫質土層においても切羽を安定させながらスムーズな掘進を実現し、地盤変状を抑制することができた。

表-2.4 工事概要

発注者	神奈川県平塚市
工事名称	松風町・久領堤貯留管築造工事その1
工事場所	神奈川県平塚市松風町，久領堤，夕陽ヶ丘地内
工事概要	下水貯留管 気泡シールド工法：掘削外径 $\phi 3,290\text{mm}$ ，掘進延長 1,754m
施工実績	対象土質：沖積砂質土，沖積礫質土 施工延長：1,754m 気泡使用タイプ：B タイプ 施工時期：平成 23 年 11 月～平成 24 年 7 月



写真-2.8 気泡注入設備（坑内）



写真-2.9 排土状況（坑内）

2.3 泥土圧シールド工法におけるチャンバー内泥土の塑性流動性評価手法の提案

本節では，MPS 法を用いたチャンバー内泥土攪拌シミュレーションの適用性を示すとともに，MPS 法による事前解析により，攪拌条件が異なる位置に土圧計が設置された場合においても塑性流動性を適切に評価できるシステムについて述べる．

(1) 塑性流動性評価方法

一般に，泥土圧シールド工事では，チャンバー内に土圧計を設置し，切羽土圧を管理している（図-2.7 参照）．過去の経験から，カッターヘッドの回転に伴い攪拌翼が土圧計に接近・通過すると，土圧の値が変動することが知られていた．そこで，攪拌翼接近に伴う土圧変動成分を抽出し，その大小に応じた塑性流動性の間接的な評価方法を考案した⁹⁾．計測された土圧データには，図-2.8 に示すように，シールドのジャッキ推力や，スクリーコンベヤからの排土など，チャンバー内全体で起こる圧力変動と攪拌翼が土圧計近傍を通過する際の局所的な圧力変動が含まれている．そこで，複数ある土圧計の計測データの平均値を算出し，それぞれの土圧データから差し引くことで，局所的な変動だけを抽出することを試みた．以降，この計算された土圧を平均値からのずれと定義し，偏差土圧と記す．

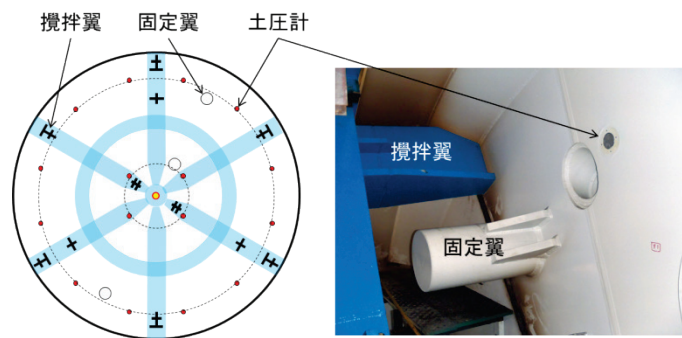


図-2.7 泥土圧シールドにおける土圧計の設置例

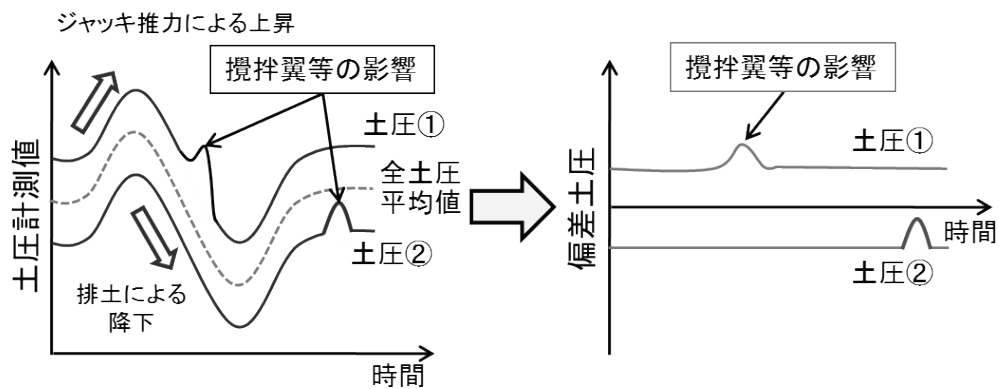


図-2.8 土圧データと偏差土圧の概念図

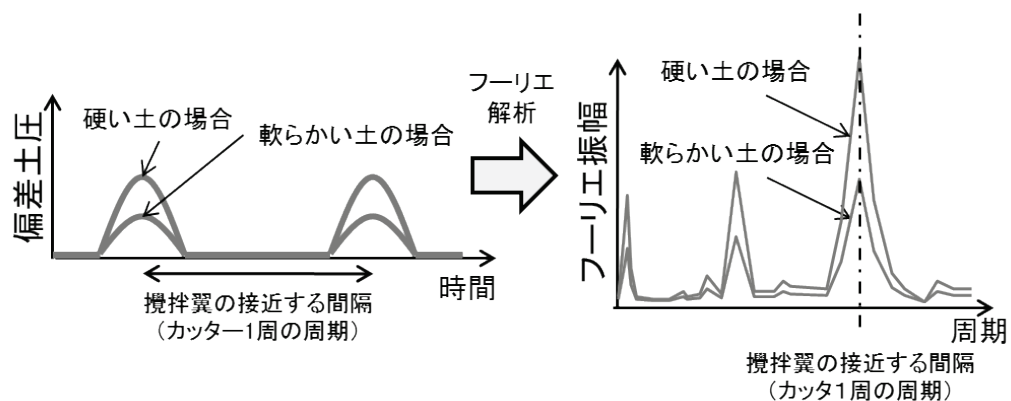


図-2.9 フーリエ解析の概念図

偏差土圧の変動の大小を簡易に判定する方法として、ある時間範囲の偏差土圧データを用いて標準偏差を算定した。標準偏差が小さければ変動が小さく、攪拌翼通過時の泥土の抵抗が小さく軟らかい土であると判定し、標準偏差が大きければ変動が大きく、硬い土である

と判定できる⁹⁾。図-2.8に示すように、偏差土圧には、攪拌翼やカッタースポークが接近することによる周期的な変動（波）が含まれている。ある時間範囲の偏差土圧データを用いてフーリエ解析を行い、攪拌翼が接近する周期付近の波の振幅（以下、フーリエ振幅と記す）が算定され、その大小により掘削土の塑性流動性を評価する。

(2) 可視化方法¹⁰⁾

チャンバー内全体の泥土の塑性流動性を面的に評価・可視化するために、離散的に得られているデータから領域全体を推定できるクリギングによる補完方法を用いる¹¹⁾。図-2.10に示すように、任意の設置点Pに対する各土圧計の重み係数 α_i ($\sum \alpha_i = 1$)をクリギングにより求め、各土圧計における塑性流動性の評価値 V_i （標準偏差、フーリエ振幅等）に α_i を乗じ、その総和 $V_p (= \sum (\alpha_i \times V_i))$ を算出する。なお、通常型クリギングを用い、自己相関距離を設定する際には、共分散関数として指数関数モデルを採用している。

図-2.11に本システムの画面表示例を示す。土圧値のほか、標準偏差とフーリエ振幅のいずれかを選択して表示可能である。描画点は実際のチャンバーの寸法に対し100mm間隔でプロットし、0.5～0.7秒ごとに更新する。塑性流動性の評価値は、青色（土圧変動が小さく、流動性が大きい）～白色（適切）～赤色（土圧変動が大きく、流動性が小さい）のグラデーション表示により可視化する。

(3) 課題および解析ニーズ

大口径の泥土圧シールド工事に適用する際には、土圧計をチャンバー全体に均等に配置する必要が生じるが、設置位置によって攪拌翼との離隔や通過速度が異なることから、これらを考慮した評価方法が必要となる。そこで、塑性流動状態を変えた土砂試料を用いた室内実験において、攪拌条件を変化させた場合の土圧変動の違いを観察し、攪拌条件を考慮した評価方法を開発した^{12),13)}。本評価方法を実機相当のフィールドに適用した場合の妥当性を検証するために、流動解析を実施した。

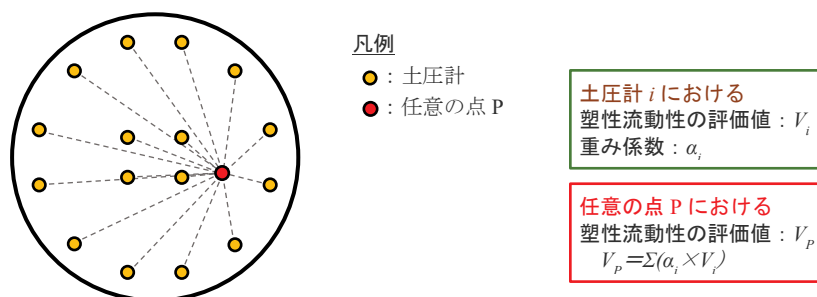


図-2.10 クリギングによる推定方法の概念図

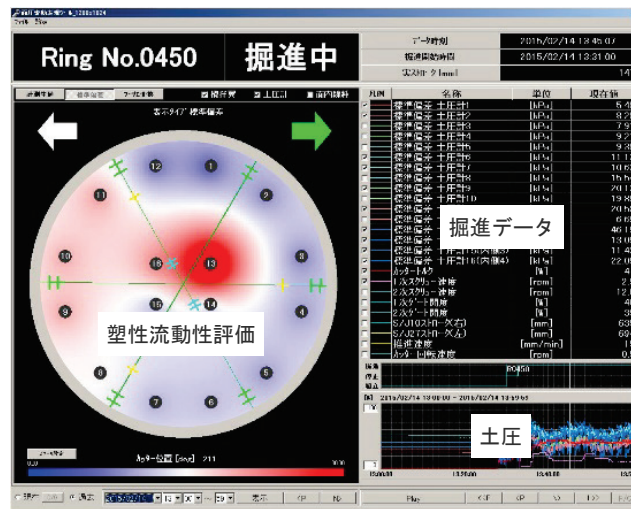


図-2.11 塑性流動性可視化システムの画面表示例

2.3.1 MPS 法による泥土の流動解析の適用性の検討

(1) 土砂攪拌実験の再現¹⁴⁾

従来、泥土圧シールドのチャンバー内泥土の塑性流動性状態の数値解析には、有限体積法 (FVM) や個別要素法 (DEM) が試みられてきた¹⁵⁾。DEM は、泥土を土粒子 (要素) の集合体としてモデル化する不連続体の解析手法である。本研究では、粒子法による解析手法に着目した。粒子法は、流体を粒子に分割して解析する手法で、圧縮性流体を扱う SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法および非圧縮性流体を扱う MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法に大別される。本解析では非圧縮性の土砂を扱うことから MPS 法による解析手法 (以下、MPS 解析と記す) を適用した。MPS 解析は、土木工学分野においてもコンクリートの充填性解析に対しての適用が進んでおり¹⁶⁾、泥土を流体としてモデル化する MPS 法が適していると考えた。泥土圧シールドのチャンバー内攪拌解析に適用された事例は見当たらないため、様々な塑性流動状態の泥土を攪拌した実験の再現を MPS 解析により行い、チャンバー内泥土の攪拌シミュレーションへの MPS 解析の適用性を検討した。

a) 解析モデルと解析条件

MPS 解析には市販のソフトウェア “Particleworks®”¹⁷⁾ を用いた。図-2.12 に実験で使用した攪拌装置を再現した解析モデルを示す。土槽の内径は 660 mm、高さは 250 mm で、土槽中央部には回転体があり、半径 200 mm の位置に攪拌棒が設置され、攪拌棒直下とそれを中心に半径方向に 50 mm ずつ離して計 4 つの土圧計を設置している。

表-2.5 に解析ケースと地盤パラメータを表-2.6 に解析条件を示す。泥土のパラメータは、フレッシュコンクリートの流動特性の評価に用いられるツーポイント試験¹⁴⁾により測定し、ビンガム流体としてモデル化して降伏値と塑性粘度を決定した。ビンガム流体には流動時には粘塑性流体、不動時は高粘性流体として扱う bi-viscosity モデルを採用した。土槽と回転

アームと攪拌棒はポリゴン壁でモデル化し、回転アームの回転軸に回転速度を設定した。なお、実験では、攪拌棒の離隔や回転速度を数種類変化させて実施しているが、解析では、離隔を20 mm（固定）、回転速度を4 rpmおよび8 rpmと設定した。

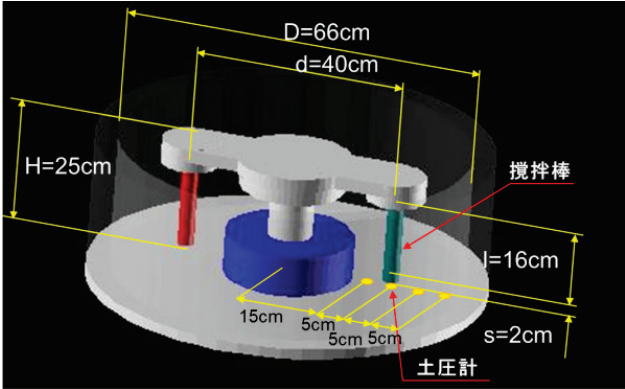


図-2.12 解析モデル

表-2.5 解析ケース

CASE	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa・s)	対応する 実験ケース
A-s20	500	5	S20
B-c30	1000	10	C30
C-c15	1500	15	C15

表-2.6 解析ケース

計算方法	陰解法
流体モデル	ビンガム流体
構造モデル	ポリゴン壁 (固定, 移動)
粒子サイズ r (mm)	10
粒子数 n (個)	71,894
時間刻み Δt (秒)	0.0005
再現時間 t (秒)	60 (一部 30)
重力加速度 g (m/s ²)	9.8
密度 ρ (kg/m ³)	2,000
降伏値 τ (Pa)	500～1,500
塑性粘度 η (Pa・s)	5～15
降伏点パラメータ p_τ	0.0001
攪拌棒回転速度 (rpm)	4～8

b) 解析結果

図-2.13に解析と実験の土圧変動の比較を示す。攪拌棒の回転速度が8 rpmの場合については、ケースC-c15のみ示しており、ケースA-s20とケースB-c30については割愛した。また、攪拌棒の回転速度が4 rpm、土圧計-2のケースについては、解析結果も実験と同じ0.1秒ごとにプロットし、ソフトウェアの制約から30秒間で解析を中断した。いずれのケースも土圧変動が概ね一致しており、0.1秒ごとにプロットすることにより、細かな土圧変動も再現できることが確認できた。図-2.14にMPS解析による圧力分布の解析結果を示す。攪拌棒周辺だけでなく、土槽の底面や側面にも圧力が広がる攪拌時の挙動が確認できた。

以上、実験での攪拌条件と泥土の粘性特性を入力値とした再現解析を実施し、土槽の底面に作用する土圧変動を実験値と比較したところ、ほぼ再現できていることを確認した。また、MPS解析により圧力分布を三次元的に可視化することで、圧力が攪拌棒周辺だけでなく、土槽の底面や側面にも広がるといった攪拌時の挙動を表現できる。

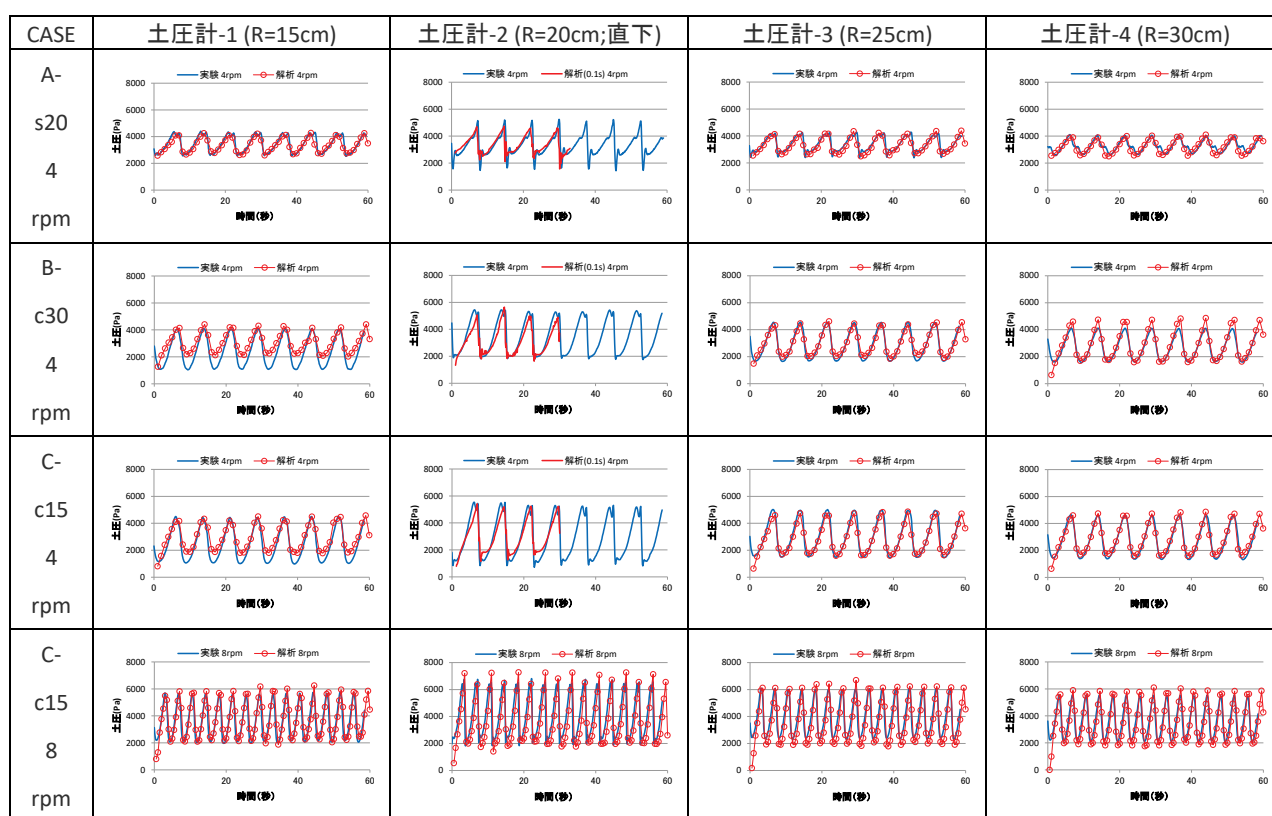


図-2.13 解析結果と実験結果の比較

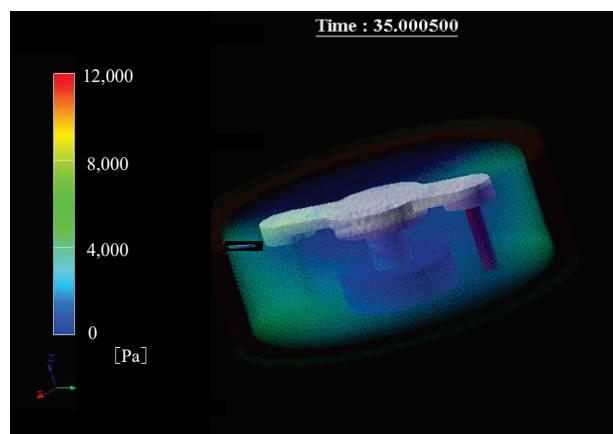


図-2.14 圧力分布状況（ケース B-c30, 4rpm, 35 秒後）



図-2.15 チャンバー模型

表-2.7 レイノルズの相似則に基づく実験条件

		実機	模型
密度	ρ (kg/m ³)	2000	1000
回転速度	N (rps)	8.33×10^{-3}	8.33×10^{-3}
直径	D (m)	16	1.6
粘性係数	μ (Pa · s)	μ	$\mu/200$

(2) チャンバー模型実験の再現^{18), 19)}

チャンバー内の複雑な攪拌状態を再現した模型実験を実施し、実験で計測された土圧変動と MPS 法による数値解析の結果を比較して、MPS 法のチャンバー内攪拌シミュレーションへの適用性を検討した。

a) 実験概要

チャンバー模型装置を図-2.15に示す。この装置は、実際の工事で使用する泥土圧シールドのチャンバーを約10分の1に縮小して再現したものである。また、レイノルズの相似則を満足させるために表-2.7のように各種パラメータを調整した。なお、攪拌槽のレイノルズ数は、次の式で示される²⁰⁾。

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (2.1)$$

ここに、 ρ :流体の密度(kg/m³), N :回転速度(rps), D :直径(m), μ :流体の粘度(Pa・s)

模擬泥土には、観察がしやすく、粘性の調整が容易な高吸水性樹脂（SAP）水溶液を用いた。表-2.8 に模擬泥土の配合と粘性測定試験結果を示す。粘性は、高性能レオメーター（Anton Parr 社製 MCR301）により計測した。この試験で得られた粘性定数については、後述する解析パラメータに反映させる。また、カッターは反時計回りに 0.5 rpm (8.33×10⁻³ rps), アジテータは時計回りに 4 rpm で回転させた。隔壁に設置した 12 個の圧力計により 0.1 秒間隔で圧力変動を測定した。なお、アジテータは、カッター中心部の流速が小さくなりやすい部分を強制的に攪拌する機能を有している。

表-2.8 模擬泥土の配合と粘性測定試験結果

CASE	配合		模擬泥土		実機
	SAP (g)	水 (g)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa・s)	
AQ04	4	1000	40	0.587	117
AQ06	6	1000	70	2.133	427

b) 解析モデルと解析条件

図-2.16に解析用形状モデル（ポリゴン壁）を示す。内部が見えるように隔壁部のモデルを消去している。表-2.9に解析条件を示す。なお、粒子サイズはチャンバー模型実験と同様に1cmとした際に解析時間が非常に長くなったため、解析結果に有意な差が見られなかった2cmに変更した。粘性測定試験においてせん断速度を1～100 (1/s) の範囲に設定して計測した結果を用いた際には、低せん断速度領域や高せん断領域を無視し、ビンガム流体と仮定して粘性定数を決定した。このような条件で数値解析を実施したところ、ビンガム流体とみなせるケースAQ04では実験と解析で圧力変動は概ね一致していたが、高粘性流体のケースAQ06では実験結果の半分ほどの圧力変動となり、数値解析の再現性に課題があった⁸⁾。そこで、低せん断速度領域の粘性も評価できるようにせん断速度の範囲を0.1～100 (1/s) として再計測を実施した。図-2.17, 2.18に模擬泥土の粘性試験結果を示す。図-2.18より、ケースAQ06は低せん断速度領域で塑性粘度が大きくなる流体であり、このような特徴を再現できる粘性モデルを採用する必要がある。

以上により、粘性モデルとして従来のビンガム流体に加え、パワーローモデルを採用することにし、AQ06の実験結果を対象として以下の3ケースについて検討した。

① CASE1：ビンガム流体

ビンガム流体は図-2.17 に示すようにせん断速度とせん断応力の関係により、せん断速度1～40(1/s)の範囲のデータを用いて、次式に近似して定義した。

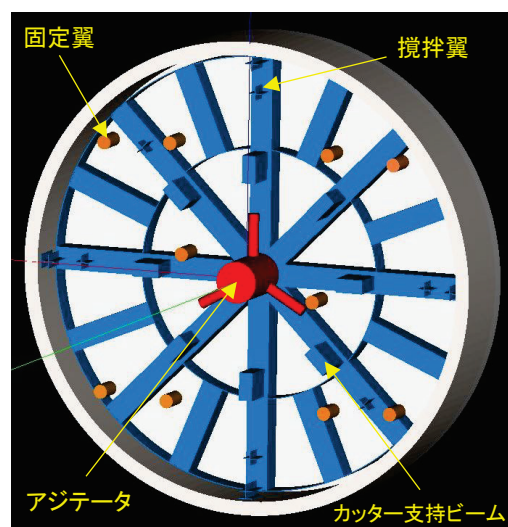


図-2.16 解析用形状モデル（ポリゴン壁）

表-2.9 解析条件

計算方法	陰解法
陰解法パラメータ β	1.0
陰解法パラメータ γ	1.0
構造モデル	ポリゴン壁
粒子サイズ r (mm)	20
粒子数 n (個)	58,483
密度 ρ (kg/m ³)	1000
重力加速度 g (m/s ²)	9.8
時間刻み Δt (秒)	0.001

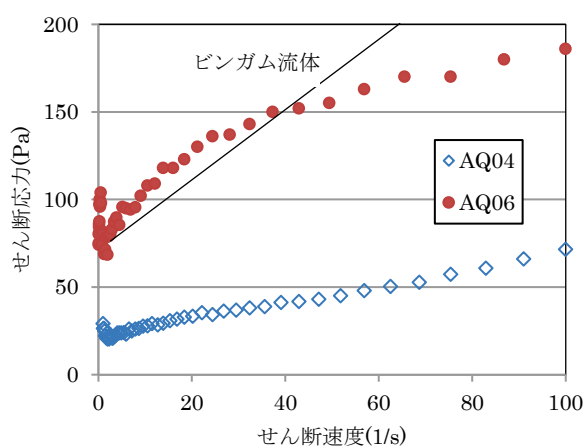


図-2.17 模擬泥土のせん断速度とせん断応力の関係

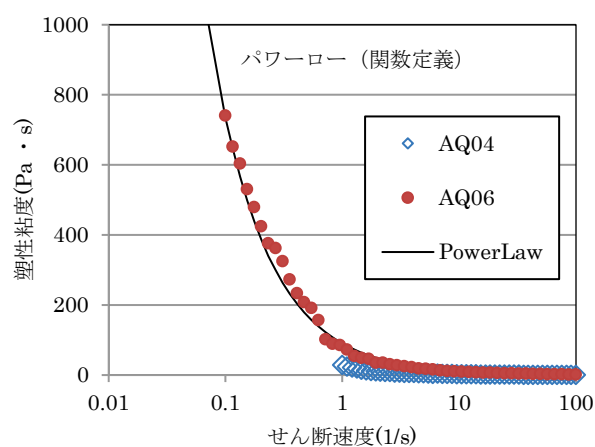


図-2.18 模擬泥土のせん断速度と塑性粘土の関係

$$\tau = 2.0\dot{\gamma} + 70 \quad (2.2)$$

ここで、 τ はせん断応力(Pa)， $\dot{\gamma}$ はせん断速度(1/s)

② CASE2：パワーローモデル1

パワーローモデルは図-2.18 に示すように，せん断速度と塑性粘度の関係で定義するものであり，次式で近似して定義した．

$$\eta = 90.19\dot{\gamma}^{-0.911} \quad (2.3)$$

ここで、 η は塑性粘度(Pa・s)， $\dot{\gamma}$ はせん断速度(1/s)

③ CASE3：パワーローモデル2

後述するように CASE2 では圧力変動を再現することができなかった．原因として，粘性測定試験において模擬泥土の粘性定数が適切に評価できていない可能性があった．そこで，ソフトウェアに搭載されている動粘性係数を一律付加する機能を用いて簡易にパラメータスタディを行った．具体的には，動粘性係数($\nu=\eta/\rho$)に 0.25, 0.5, 1.0, 10.0 を付加して試算した．参考までに，模擬泥土の密度 ρ は 1000 kg/m^3 であるため，式(3.3)にそれぞれ 250, 500, 1000, 10,000(Pa・s)を一律に増加させたことになる．試算の結果，実験結果と最も整合した+10.0 のケースを示す．

c) 解析結果

図-2.19 に CASE1～3 の粘性モデルで計算した結果を示す．なお，流速分布とせん断速度分布の図では，チャンバー奥側の粒子の色も見えるように 2 割程度透過して表示している．泥土の流速分布については，CASE1 は全体的に平均化された流速分布になっているのに対し，CASE2,3 はカッター外周部の流速がほぼカッター最外周の速度 0.042 m/s に近く，中央に近づくにつれて流速が小さくなっており，実験で目視観察された泥土の流動状況に近い結果となった．模型実験では，せん断速度分布を観察することができていないため粘性モデルの評価はできないが，いずれの粘性モデルで計算してもアジテータや攪拌翼付近以外ではせん断速度が 1 よりも小さく，そのせん断速度領域での粘性評価が重要であることが再認識できた．したがって，チャンバー内の土砂流動解析では低せん断速度領域での挙動を考慮できるパワーローモデルを適用すべきである．なお，CASE3 については圧力変動を実験結果と合せることを目的としてパラメータスタディを実施したものであり，粘性測定方法を含めて今後検討が必要である．

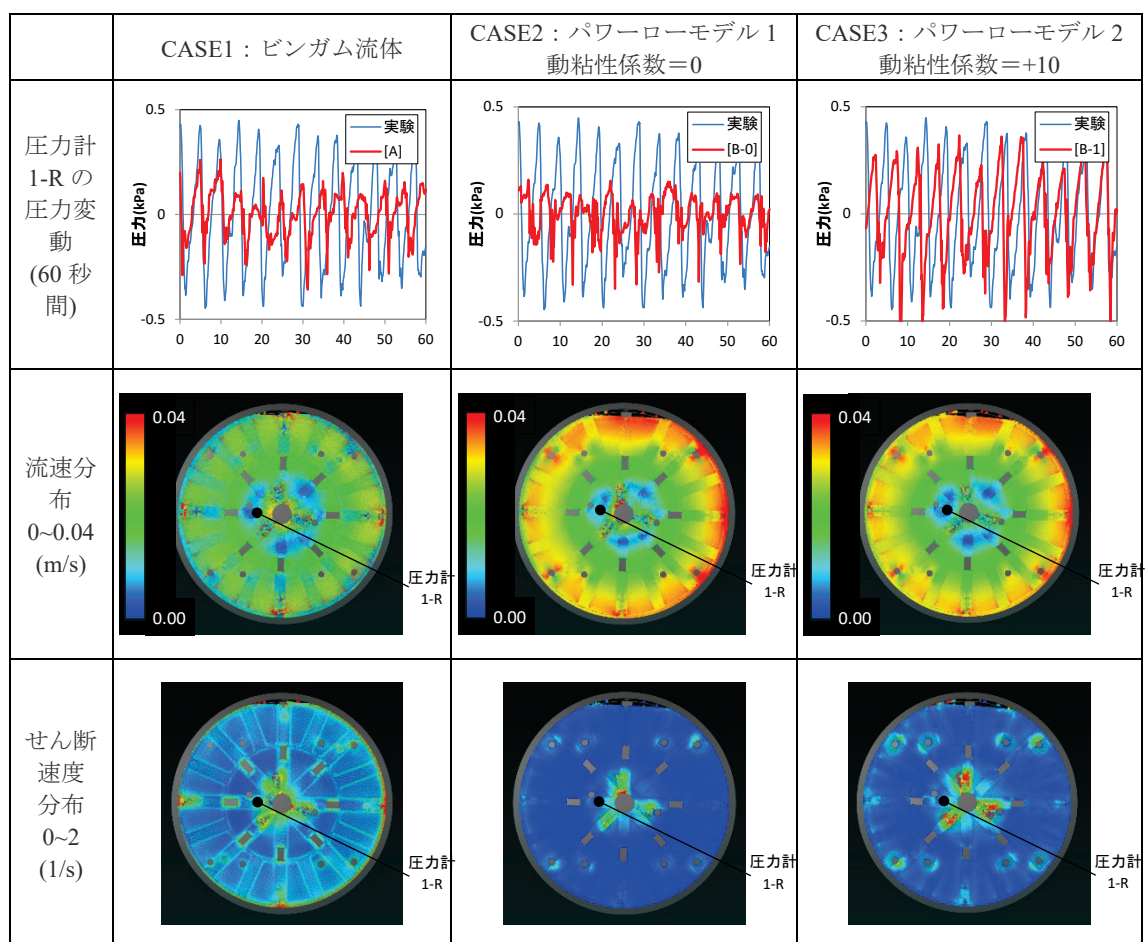


図-2.19 粘性モデルの違いによる解析結果の比較

2.3.2 大口径泥土圧シールドに対応した塑性流動状態の評価方法

塑性流動性可視化システムを大口径シールド工事に適用する際には、塑性流動性の評価精度を確保するために掘削断面全体にある程度均等に土圧計を配置する必要がある。カッターの回転・攪拌に伴う土圧の変動幅は、同じ塑性流動状態の泥土であっても土圧計の設置条件（攪拌翼との離隔、攪拌翼の通過速度等）によって異なるため、施工前に MPS 解析を実施し、土圧計の設置条件に対応した土圧の変動幅を予測して管理値を設定し、施工中の値と比較する方法を提案する。図-2.20 に改良した塑性流動性可視化システムのフローを示し、以下に、大口径シールド工事への適用事例を示す。

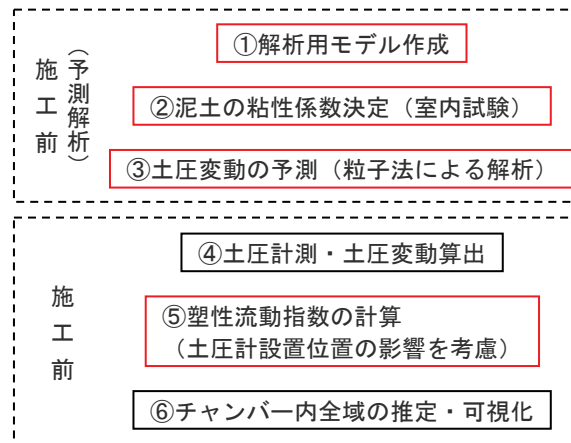


図-2.20 改良版システムのフロー（赤枠部分が改良点）

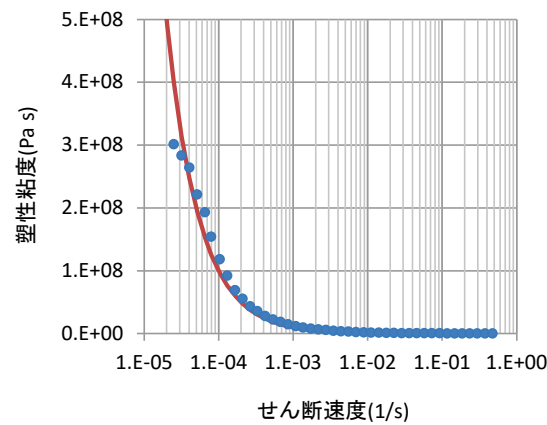


図-2.21 現場で採取した粘性土を圧密した試料のせん断速度と塑性粘土の関係

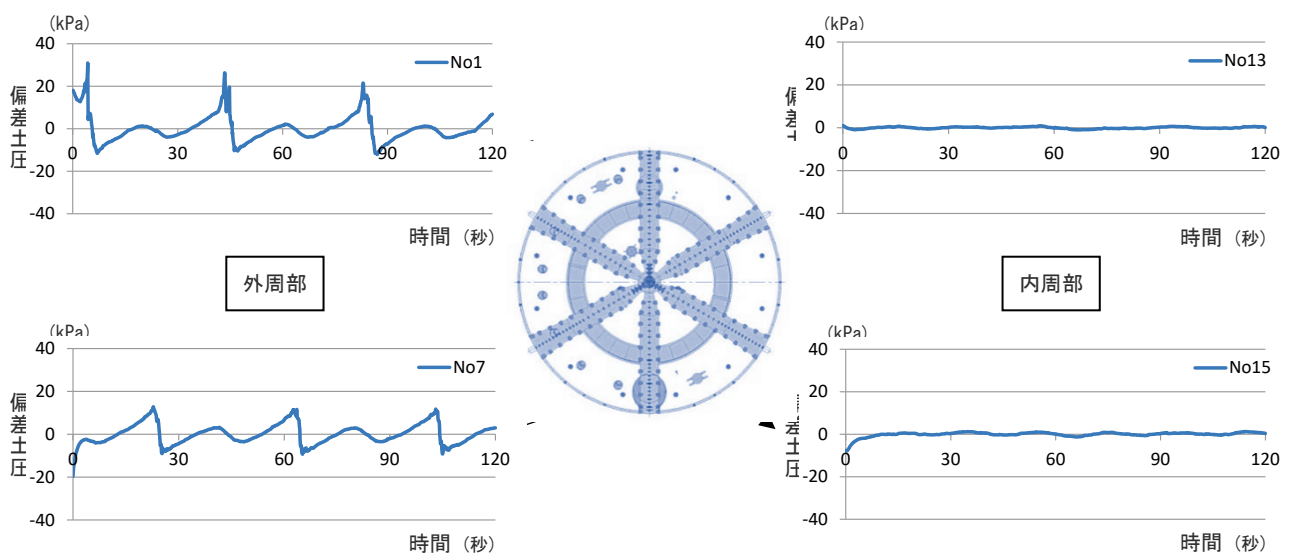


図-2.22 粒子法による偏差土圧の予測値

(1) 事前の予測解析

粘性測定試験を実施し、粘性モデル（パワーローモデル）およびパラメータを設定する。

図-2.21に適用工事で採取した粘性土を切羽土圧相当（314 kPa）で圧密した泥土のせん断速度と塑性粘度の関係を示す。粒子法による数値解析を実施し、チャンバー内に設置した各土圧計の土圧変動を予測する。図-2.22に予測した土圧変動から算出した偏差土圧を示す。チャンバーの外周部と内周部では同じ粘性パラメータでも土圧変動の大きさが異なることが分かる。

現地で採取した掘削対象地盤の試料は、添加材を加えていない土砂の性状であり、施工中に想定される最も流動性の低い性状である。そのため、この試料の粘性モデルを用いて粒子法による数値解析を実施すれば、各土圧計において想定される最大の土圧変動幅が得られる。そこで、土圧計ごとに1分間のデータから標準偏差を求め、これを施工管理上の最大土圧変動幅 σ_{imax} と設定する（図-2.23参照）。

(2) 施工時の評価方法と検証

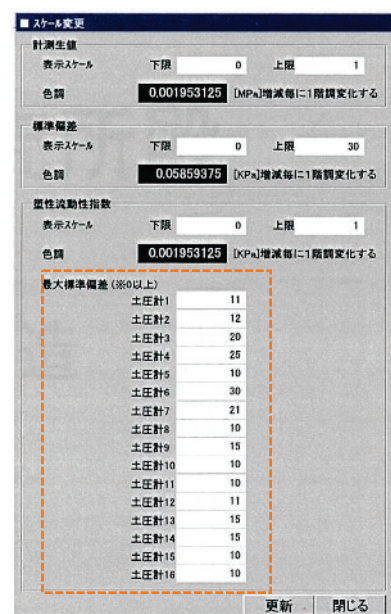
従来のシステムと同様に土圧計ごとに直近1分間の標準偏差 σ_i を算出し、次式により塑性流動指数を定義することにより、土圧計の設置条件による土圧変動への影響を考慮する。

$$MF_i = \sigma_i / \sigma_{imax} \quad (3.4)$$

ここで、 MF_i は塑性流動性指数(%), σ_i は土圧の標準偏差(kPa), σ_{imax} は最大土圧変動幅(kPa)である。



MF_i を表示



σ_{imax} の設定画面

図-2.23 可視化画面（改良版）

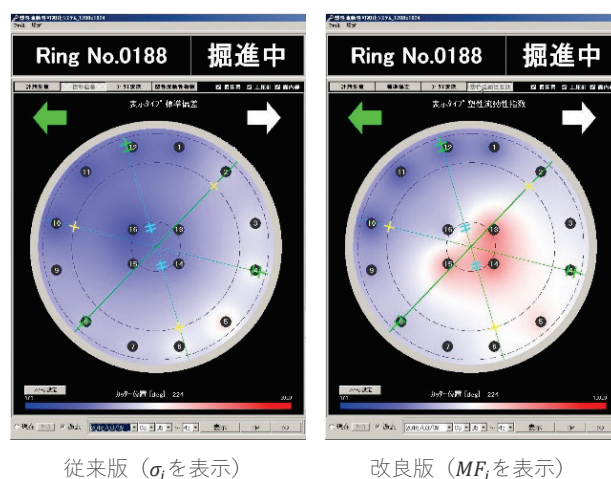


図-2.24 画面表示例の比較

直近 1 分間の塑性流動指数を土圧計ごとに逐次算定しながらチャンバー内全体の塑性流動指数を算出し、図-2.23 のように泥土の塑性流動性を可視化する（青色；流動性が小さい，白色；適切，赤色；流動性が大きい）。

図-2.24 に適用現場で既に掘進を完了しているシールド工事の土圧変動データについて，従来版で標準偏差を表示した結果と改良版で塑性流動指数を表示した結果を示す．従来システムでは土圧計の設置条件ごとに異なる土圧変動の考慮や塑性流動性の定量的な評価が困難であったが，粒子法による数値解析と組み合わせることにより，それらの問題が解決できると期待される。

2.4 まとめ

本章では，泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土性状管理の高度化に関して，まず，添加材の選定の高度化を目的に，気泡シールド工法における水生環境に配慮した特殊起泡剤を開発した．以下に，得られた知見を列挙する．

- (1) 化学品の危険有害性の国際的な分類基準と表示方法を定める GHS の基準を採用し，水生環境負荷が小さく，施工性・経済性に優れた特殊起泡剤を選別した．公的機関による評価結果では，従来剤の 96 時間 LC_{50} が 43 mg/L であるのに対し，本研究で開発した特殊起泡剤は 240 mg/L であり，水生環境負荷が従来剤の 5 分の 1 未満 ($240/43 \div 5.6$) になることを確認した．
- (2) 使用量の低減を目的として，陰イオン系界面活性剤に適量の非イオン系界面活性剤を添加することで気泡の安定性が向上する効果（界面活性剤の併用効果）を利用した．気泡膜の破膜時間による気泡の安定性評価試験を実施したところ，従来剤の破膜時間 27 分に対し，開発剤は 138 分であり，気泡の安定性が従来のももの 5 分の 1 未満 ($138/27 \div 5.1$) になることを確認した．また，室内試験において，泥土の性状管理方法として一般

的に用いられるスランプ試験およびコーン貫入試験を実施したところ、従来剤の 5 分の 1 の濃度（使用量）で、同等の性状が得られることを確認した。

- (3) 以上の結果、気泡シールド工法によるトンネル工事において、本研究で開発した特殊起泡剤を使用すると、水生環境負荷を従来のももの 25 分の 1 に低減できることを確認した。
- (4) 公的機関において、環境中への蓄積されにくさを表す生分解性を評価した結果、開発剤の 14 日後の DOC 法による生分解度は 85%であった。一般に、28 日後の生分解度が 70% 以上であれば生分解性が良好と言えることから、開発剤が優れた生分解性を有し、環境中に蓄積されにくいことを確認した。
- (5) 土質条件の大きく異なる 2 つの気泡シールド工法によるシールドトンネル工事現場に適用し、従来の気泡シールド工法の施工設備をそのまま利用できる高い汎用性を有していることを確認した。

次に、泥土の性状管理の高度化を目的に、カッターチャンバー内全体の泥土の塑性流動性をリアルタイムに可視化できる評価手法を提案した。以下に、得られた知見を列挙する。

- (1) 泥土圧シールドに設置した土圧計の圧力変動値から算出した標準偏差を用いてチャンバー内泥土の塑性流動性を評価および可視化する方法は、大口径シールド工事においても適用可能である。
- (2) 大口径シールド工事に塑性流動性可視化システムを適用する際には、土圧計を掘削断面全体に均等に配置する必要があるが、従来の塑性流動性の評価方法では、土圧計の設置条件に起因する土圧変動の相違を考慮することが困難であることを指摘した。
- (3) 土圧変動は、土圧計と攪拌翼との離隔等によって異なることを実験的に確認しており、それらを再現できる MPS 法は有用である。実際の泥土を用いた攪拌実験やチャンバーの模型実験によって、泥土や実験用粘性流体を適切にモデル化すれば、MPS 法を用いてチャンバー内泥土の土圧変動を再現できる。
- (4) 実際の大口徑泥土圧シールド工事で得られた泥土から粘性パラメータを決定し、MPS 法によって各土圧計の土圧を求めたところ、チャンバー外周部と内周部では土圧変動が異なることを確認した。
- (5) MPS 法による予測解析を実施して得られた最大土圧変動幅とシールド掘進時の土圧変動との比率を塑性流動性指数として定義し、土圧計の設置条件を考慮した泥土の塑性流動性の評価方法を提案した。

今後の課題として、改良された塑性流動性評価システムを実際のシールド工事に適用し、予測解析に用いる泥土の粘性パラメータの設定方法と塑性流動性を評価した結果の妥当性の検証が必要である。

参考文献：

- 1) 小山幸則, 加島 豊, 須賀 武, 高田正治, 木村宏: 土圧式シールド工法その理論と応用, p.30, 2009.
- 2) 特別リポート「世界屈指のシールド」, 日経コンストラクション, 2011.6.13 号, p.61.
- 3) 安井克豊, 迫野 涼, 渡邊洋輔: 水生環境負荷を 1/25 に低減した特殊起泡剤「エコムース」の開発, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, VI-020, 2011.
- 4) 土橋 浩, 松田 満, 松原健太, 山本 彰, 近藤由也, 日野義嗣, 今田徹: 泥土圧シールドにおけるチャンバー内の土砂流動管理技術の開発, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.2, pp.289-300, 2010.
- 5) 株式会社フジタ ホームページ「チャンバー内見える化技術」でシールド掘進管理を高度化～曲げセンサーと色相彩度で土砂の流動状態を可視化～: http://www.fujita.co.jp/information/2016/post_347.html (閲覧日: 2017.6)
- 6) 粥川幸司, 新原圭祐, 名倉 浩, 越田 健: 泥土圧シールド実機を用いた掘進実験によるチャンバー内掘削土の塑性流動判定, 第 26 回トンネル工学研究発表会, 報告 II-3, 2016.
- 7) 一般財団法人日本食品分析センター: 生分解度試験, <https://www.jfirl.or.jp/storage/file/779.pdf> (閲覧日: 2011.7.1).
- 8) シールド工法技術協会: 気泡シールド工法技術資料, 2011.
- 9) 渡邊洋輔, 杉山博一, 島 厚夫, 安井克豊, 小瀧伸也: チャンバー内土圧計測から掘削土の塑性流動性を評価する方法の検討 (その 3), 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, VI-146, 2012.
- 10) 杉山博一, 磯部 哲, 塩出健二, 藤井暁也, 副島直史: チャンバー内塑性流動性可視化システムの大断面シールド工事への適用と考察, トンネル工学報告集, 第 25 巻, II-6, 2015.
- 11) 村上大輔, 堤 盛人: GIS—理論と応用, Vol.19, No.2, pp.59-69, 2011.
- 12) 中谷篤史, 杉山博一, 原 忠, 前田俊宏, 佐々木博昭, 塚田裕史: 攪拌条件を考慮したチャンバー内塑性流動性評価方法 (その 1) 様々な攪拌条件と土圧変動との関係について, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, VI-060, 2015.
- 13) 杉山博一, 岩井俊之, 原 忠, 前田俊宏, 佐々木博昭, 塚田裕史: 攪拌条件を考慮したチャンバー内塑性流動性評価方法 (その 2) 実機での評価方法に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, VI-061, 2015.
- 14) 高梨和光, 小瀧伸也, 杉山博一, 原 忠, 前田俊宏, 佐々木博昭, 塚田裕史: チャンバー内攪拌シミュレーションへの MPS 解析の適用性, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, VI-062, 2015.
- 15) たとえば, 佐々木加津也, 清水賀之: 個別要素法による大断面土圧シールドチャンバー内土砂挙動解析, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, III-B88, 1997.

- 16) たとえば, 浦野真次, 根本浩史, 山田義智, 崎原康平: 締固めを行うコンクリートの充填性評価への流動解析手法の適用に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, pp.179-190, 2017.
- 17) プロメテック・ソフトウェア株式会社 ホームページ: <http://www.prometech.co.jp/>
(閲覧日: 2017.6.1)
- 18) 杉山博一, 岩井俊之, 高梨和光, 安井克豊: チャンバー内攪拌シミュレーションへの MPS 解析の適用性 (その 2), 土木学会第 71 回年次学術講演会, III-438, 2016.
- 19) 河井 徹, 橋田 浩: 高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.125-130, 1994.
- 20) 杉山博一, 岩井俊之, 高梨和光, 安井克豊: 土圧式シールドにおける添加材の注入・拡散状況の予測方法の研究, トンネル工学報告集, 第 26 巻, II-1, 2016.

第3章 切羽圧力管理の高度化

3.1 概説

泥水式シールド工法における掘進に伴う地盤変状は、適切な施工方法の選択と施工管理によって最小限に抑えられる。地盤変状の主な原因として、①切羽に作用する土水圧の不均衡、および②テールボイドへの裏込め注入の過不足が挙げられる。このうち、①は切羽に作用する土圧や水圧と切羽圧力（泥水式シールド工法における切羽水圧）に不均衡が生じた場合に切羽が平衡状態を失うことで発生する地盤変状であり、切羽圧力を適切に設定することで抑制することが可能となる。一方、②は、テールボイド（掘削された地山とセグメント外面の空隙）に充填する裏込め注入材の過不足により生じる地盤変状であり、裏込め注入率（テールボイドの体積に対する裏込め材の充填量の百分率）を適切に設定することで抑制できる。このように、泥水式シールド工法においては、切羽圧力等の掘進管理項目の値（以下、掘進管理値と称す）を適切に設定することが重要である。

一般に、泥水式シールド工法における切羽圧力の掘進管理値は、種々の施工条件（例えば、土質・地下水状態、土被り、掘削外径等）が類似した施工実績を参考にして設定される場合が多い。しかしながら、特殊な施工条件下では、土質・地下水状態や掘進条件などが類似した施工実績の存在は極めて少ないため、切羽圧力の掘進管理値の設定が困難になる場合が多い。そこで、特殊な施工条件下での泥水式シールド施工においては、シールド掘進時の初期段階において、観測された地盤変状に基づいて掘進管理値の妥当性を検証するトライアル施工方法の適用が有用である。ここで、トライアル施工とは、地盤変状の計測結果を掘進管理値にフィードバックする方法と定義され、ある特定のシールド施工区間において、事前に設定した掘進管理値でシールド施工を実施し、その際に計測された地盤変状や地中変位を用いて掘進管理値の妥当性を検証する施工方法である。トライアル施工において、シールド掘進に伴う地盤変状の影響を精度良く評価することは、対策工の必要性や具体的な対策方法の検討、そして計測管理計画策定の前提となるものであり、極めて重要である¹⁾。

本章では、切羽圧力管理の高度化を目的として、特殊な施工条件下として、大断面、小土被り、埋め立て地盤等において施工される泥水式シールド工法によるトンネル工事に対して、トライアル施工に基づいた適切な切羽圧力等の掘進管理値の設定手法を提案する。トライアル施工においては、地盤変状予測解析におけるシールドと地盤との境界条件を表す応力解放率 α に着目し、事前に実施したトライアル施工区間における2次元弾性FEM解析による地盤変状予測値を計測された地盤変状値と比較することで、応力解放率 α の値を設定し、上記手法による掘進管理値でシールド掘進した場合の近接構造物の変状予測の精度を向上させる手法を検討する。

3.2 トライアル施工の概要

3.2.1 トライアル施工の区間設定

図-3.1～図-3.3 にトライアル施工の概要図を示す。トライアル施工の1区間長を10 mとし、6つの区間を設け、トライアル施工の総延長を60 mとした。各区間内においては、切羽水压や裏込め注入圧等の掘進管理値を固定し、各区間の両端部に配置した連続沈下計・層別沈下計で計測される地盤変状の観測結果に応じて次の区間の掘進管理値を変化させる。なお、1区間長を10 mとしたのは、シールド本体長さが約10 mであり、切羽水压作用位置と裏込め注入位置の離隔と同等の距離を確保すれば、両者の影響を区別できると判断した。

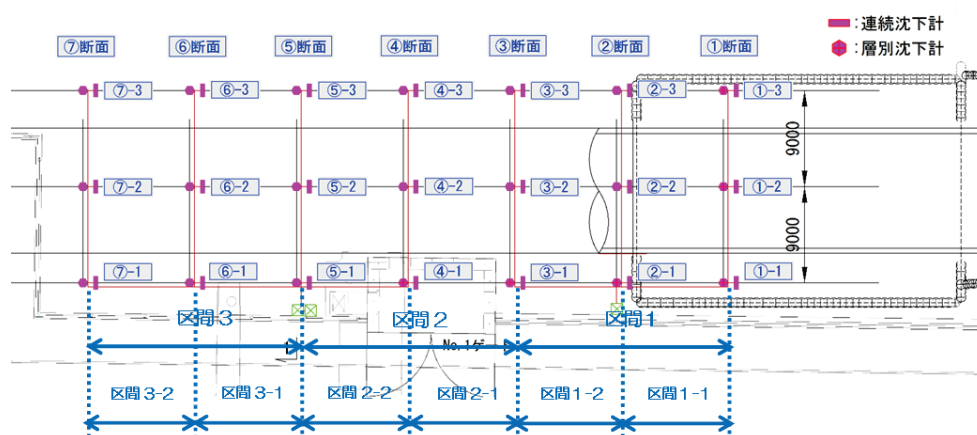


図-3.1 トライアル施工平面図

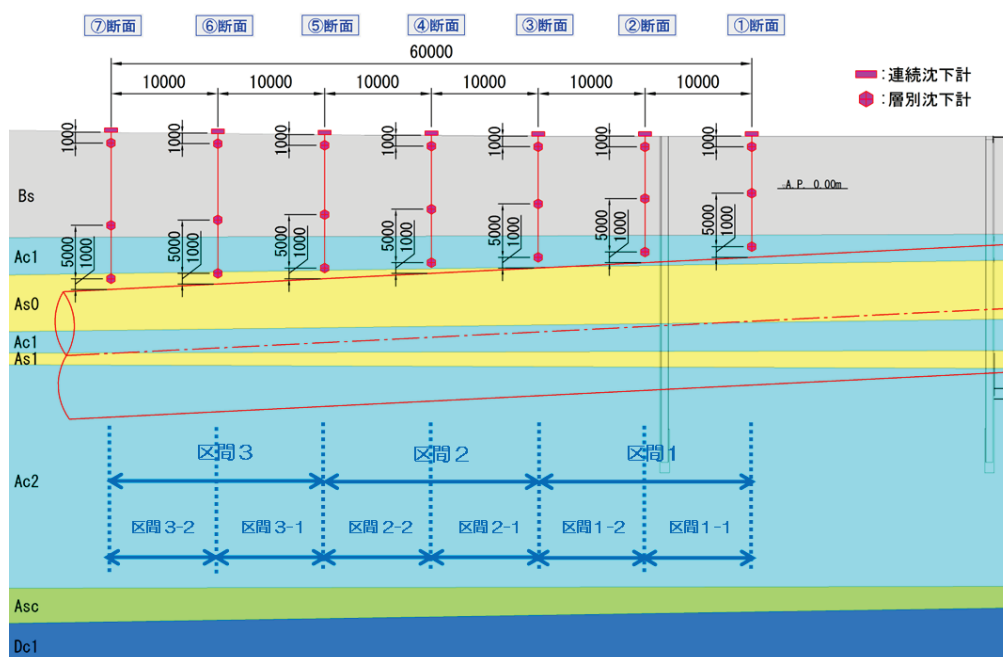


図-3.2 トライアル施工縦断図

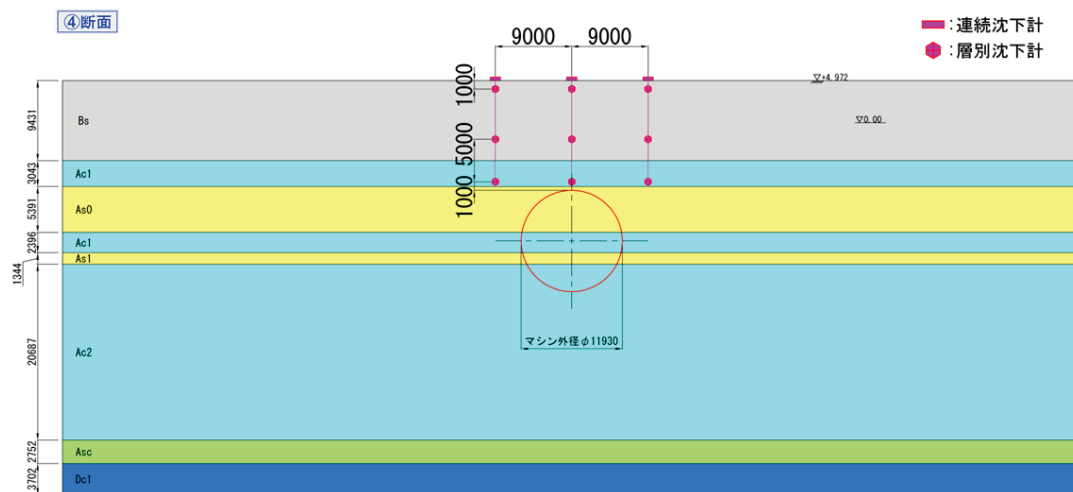


図-3.3 トライアル施工横断図（④断面）

3.2.2 計測項目

トライアル施工における計測内容およびその目的を表-3.1に示す。地表面の鉛直変位および地層毎の鉛直変位の計測には、それぞれ連続沈下計および層別沈下計を使用し、それらの計測地点は図-3.1～図-3.3中に図示した。

表-3.1 計測項目一覧

計測項目	計測器	記号	数量	目的
隆起・沈下 (地表面)	連続沈下計	■	21箇所	地表面の鉛直変位の把握 FEM 逆解析への展開
隆起・沈下 (地層毎)	層別沈下計	⬢	63箇所	地層毎の鉛直変位の把握 FEM 逆解析への展開

3.2.3 掘進管理値の初期値の設定

トライアル施工における掘進管理値の初期値は、同地質条件におけるシールド工事の施工実績²⁾を参考にして、表-3.2および図-3.4に示すように設定した。

1) 切羽水圧

同地質条件における施工実績では、静止土圧に水圧と変動圧を加えた値で施工し、一次管理値 10 mm に対し、最大沈下量 8 mm に抑制した²⁾。一方で、当該工事の発進立坑掘削時において、埋め立て工事中に残置されたと想定されるコンクリート塊や鋼材等が確認されたことから、残置物沿いに水みちが発生し、地上に泥水が噴出することが懸念された。そこで、上記施工実績よりも小さい値の主働土圧+水圧+変動圧 (0.02 MPa) を初期値に設定した。また、地盤の物性値は、既往の地質調査報告書³⁾の値を引用した。

2) 裏込め注入圧

一般に採用される切羽水圧に 0.02MPa を加えた圧力⁴⁾とした。

3) 裏込め注入率

施工実績では、注入率の目安をテールボイド量の 130～137%としていた。当該工事では、前述のとおり、裏込め注入圧を施工実績よりも小さい値に設定したため、注入率の目安を少し下げた 120%とした。

表-3.2 トライアル施工区間における掘進管理値

断面		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
切羽水圧	MPa	0.232	0.236	0.235	0.241	0.243	0.249	0.255
裏込め注入率	%	120	120	120	120	120	120	120
裏込め注入圧	MPa	0.252	0.256	0.255	0.261	0.263	0.269	0.275

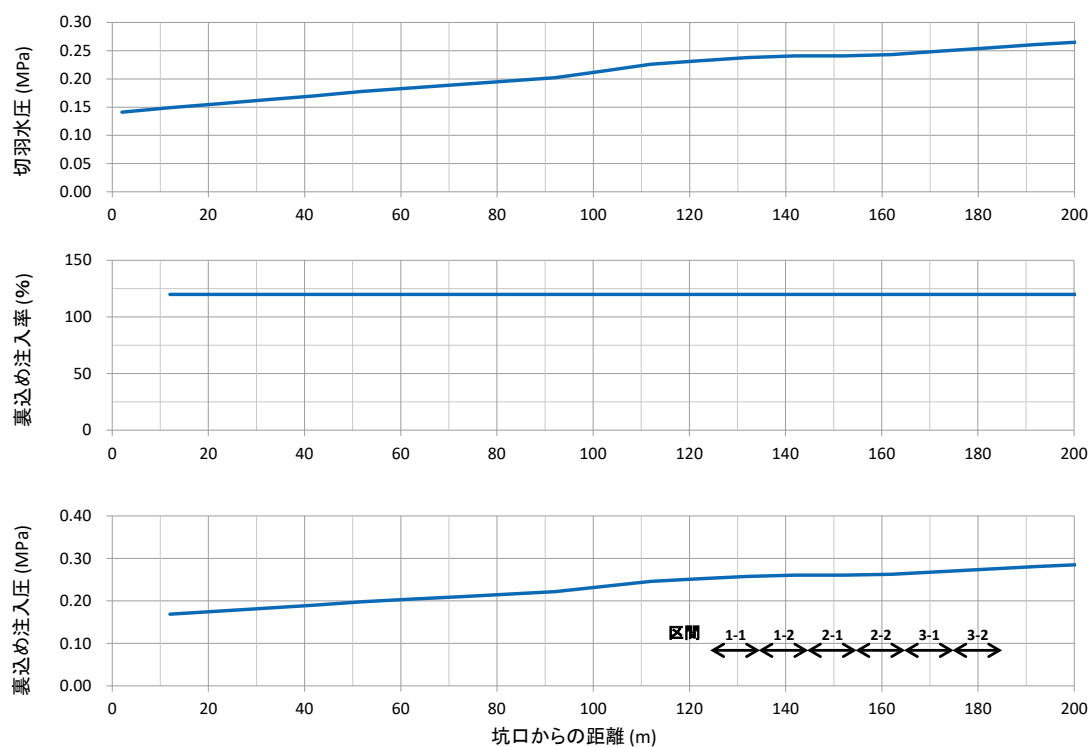


図-3.4 掘進距離と管理値の関係

3.2.4 計測値の掘進管理値へのフィードバック方法

対象とする掘進管理項目およびフィードバックする計測値を表-3.3、図-3.5に、計測結果の掘進管理項目へのフィードバックの具体的な方法を表-3.4に示す。切羽水圧は、圧力が作用するシールド機前方の地盤変状を、裏込め注入率は、注入位置付近のシールド機後方の地盤変状の値をフィードバックする。また、シールド機前方で隆起・沈下が見られた際には、切羽水圧を、シールド機後方で隆起・沈下が見られた際には裏込め注入率をそれぞれ減少・増加させる計画とし、次の区間で増減させる数値の目安の値を示した。なお、本手法は標準的な対応方法を示すものとして、施工状況に応じた変更は可能とした。

表-3.3 掘進管理項目とフィードバックする計測結果

掘進管理項目	フィードバックする計測結果
切羽水圧	前区間のシールド機前方の地盤変状
裏込め注入率	前区間のシールド機後方の地盤変状

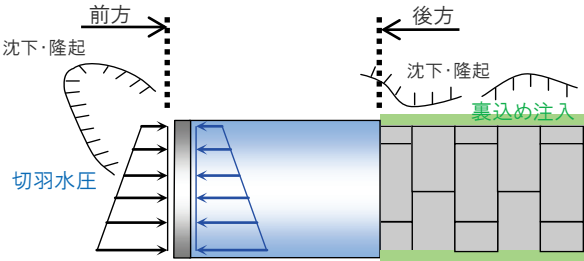


図-3.5 対象とする掘進管理項目とフィードバックする計測結果のイメージ

表-3.4 掘進管理項目へのフィードバック方法

地盤変状	発生箇所		シールド機前方		シールド機後方	
	状態		沈下	隆起	沈下	隆起
	主たる要因		切羽水圧不足	切羽水圧過大	テールボイド充填不足	テールボイド充填過多
フィードバック	掘進管理項目		切羽水圧		裏込め注入率	
	区間	1-1	主働土圧+水圧+0.02MPa		テールボイド量の120%	
		1-2	+0.02MPa	-0.02MPa	+10%	-10%
		2-1	1-1 沈下⇒1-2 沈下 +0.02MPa	1-1 隆起⇒1-2 隆起 -0.02MPa	1-1 沈下⇒1-2 沈下 +10%	1-1 隆起⇒1-2 隆起 -10%
			1-1 沈下⇒1-2 隆起 -0.01MPa	1-1 隆起⇒1-2 沈下 +0.01MPa	1-1 沈下⇒1-2 隆起 -5%	1-1 隆起⇒1-2 沈下 +5%
		2-2	1-1 沈下⇒1-2 沈下 ⇒2-1 沈下 +0.02MPa	1-1 隆起⇒1-2 隆起 ⇒2-1 隆起 -0.02MPa	1-1 沈下⇒1-2 沈下 ⇒2-1 沈下 +10%	1-1 隆起⇒1-2 隆起 ⇒2-1 隆起 -10%
			1-1 沈下⇒1-2 隆起 ⇒2-1 沈下 微調整	1-1 隆起⇒1-2 沈下 ⇒2-1 隆起 微調整	1-1 沈下⇒1-2 隆起 ⇒2-1 沈下 微調整	1-1 隆起⇒1-2 沈下 ⇒2-1 隆起 微調整
		3-1	1-1 沈下⇒1-2 沈下 ⇒2-1 沈下⇒2-2 沈下 +0.02MPa	1-1 隆起⇒1-2 隆起 ⇒2-1 隆起⇒2-2 隆起 -0.02MPa	1-1 沈下⇒1-2 沈下 ⇒2-1 沈下⇒2-2 沈下 +10%	1-1 隆起⇒1-2 隆起 ⇒2-1 隆起⇒2-2 隆起 -10%
		3-2	微調整		微調整	

3.3 トライアル施工による地盤変状計測結果の掘進管理値へのフィードバック

3.3.1 地盤変状計測結果に応じた掘進管理項目へのフィードバック結果

表-3.5 に地盤変状計測結果に応じた掘進管理項目へのフィードバック結果を示す。また、図-3.6～3.9 に区間 1-1～2-2 における掘進管理項目の値の施工実績と地盤変状計測結果をそれぞれ示す。以下に、各区間における切羽水圧および裏込め注入率の特徴について考察する。なお、区間 3-1 以降については、当該地盤を造成した際に残置されていた支障物によるシールド掘進トラブルにより、トライアル施工の実施が困難であったため空欄としている。また、区間 3-1 以降の⑤断面～⑦断面において計測された鉛直変位の計測値を、参考までに図-3.10～3.12 に示す。

表-3.5 掘進管理項目へのフィードバック結果

	シールド前方				シールド機後方			
	通過日	Ring No.	切羽水圧	地盤変状	通過日	Ring No.	裏込め注入	地盤変状
区間 1-1	1/22 ～ 1/23	82 ～ 88	初期値 主働土圧ベース	最大 2 mm沈下	1/24 ～ 2/8	89 ～ 94	100～120% (目標 120%)	最大 6 mm 沈下
区間 1-2	1/24 ～ 2/8	89 ～ 94	初期値 +0.02MPa 隆起傾向のため、 初期値に戻した	最大 6 mm隆起	2/8 ～ 2/9	95 ～ 100	100～120% (目標 120%)	最大 1 mm 隆起
区間 2-1	2/8 ～ 2/9	95 ～ 100	初期値	最大 2 mm沈下	2/9 ～ 2/11	101 ～ 107	100～110% (目標 110%)	±0 mm
区間 2-2	2/9 ～ 2/11	101 ～ 107	初期値 沈下傾向が止まったため初期値維持	最大 5 mm沈下	2/27 ～ 2/28	108 ～ 113		
区間 3-1	2/27 ～ 2/28	108 ～ 113			2/28 ～ 3/4	114 ～ 120		
区間 3-2	2/28 ～ 3/4	114 ～ 120			3/4 ～ 3/5	121 ～ 125		

(1) 切羽水圧

a) 区間 1-1 および区間 1-2

区間 1-1 において、初期値（主働土圧ベース）を用いて施工したところ、最大 2 mm の沈下が発生した。このため、表-3.4 に示した掘進管理項目へのフィードバック方法により、区間 1-2 では初期値+0.02 MPa で施工した。その結果、隆起傾向が止まらなかったため、すぐに初期値に戻した。その後、隆起傾向は止まったが、最大 6 mm の隆起が計測された。

b) 区間 2-1 および区間 2-2

区間 2-1 において、初期値を用いて掘進したところ、最大 2 mm 程度の沈下であったため、管理値の変更は不要と判断し、区間 2-2 においても初期値を用いて施工した。区間 2-2 では 5 mm の沈下が見られたものの、すぐに沈下傾向が止まったため、初期値を維持した。

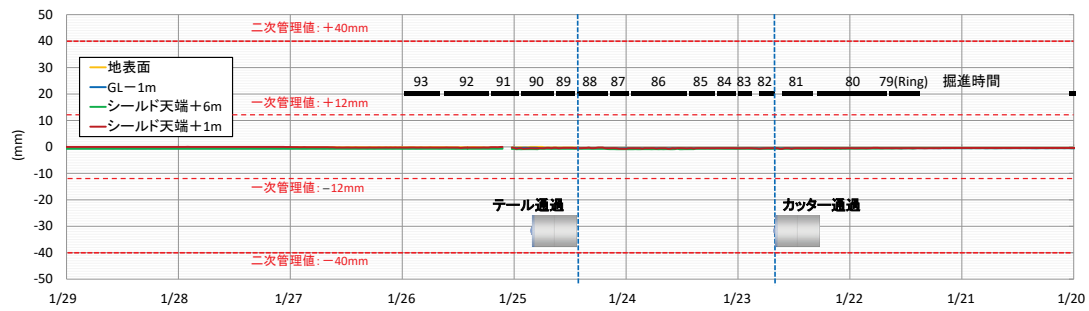
以上により、切羽水圧は初期値（主働土圧ベース）を用いて施工することが適切であると判断した。

(2) 裏込め注入率

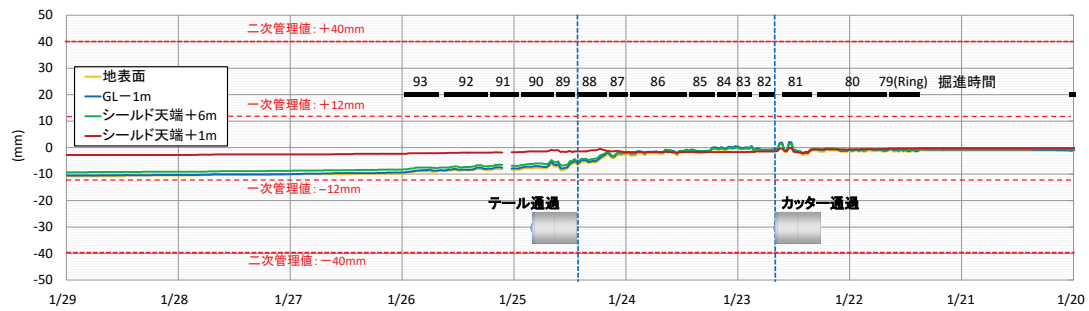
区間 1-1 において、初期値 120%を目標として施工したところ、実績では 105～130%程度となった。裏込め注入率が安定しなかった原因としては、当該掘削地盤を埋め立てた際に残置された支障物による流体ポンプの閉塞に伴い、シールド掘進の中断を繰り返したためである。つまり、シールド掘進を中断するたびに、数分間の裏込め注入管の洗浄が自動的に実施される設定となっており、シールドのオペレーターが洗浄の完了する前にシールド掘進を再開させてしまったために、シールド掘進と同時に裏込め注入ができない期間が断続的に発生し、注入率が低下したためである。なお、支障物による掘進の中断が頻繁に発生した場合においても、掘進速度等を調整して注入率が 100%を下回らないようにした。

注入率の目標 120%（実績値 105～130%）によるトライアル施工時の地盤変状は、区間 1-1 では最大 6 mm の沈下、区間 1-2 では最大 1 mm の隆起であり、その後の区間 2-1 において、注入率の目標 110%（実績値 100～110%）に下げたところ、地盤変状は±0mmであった。

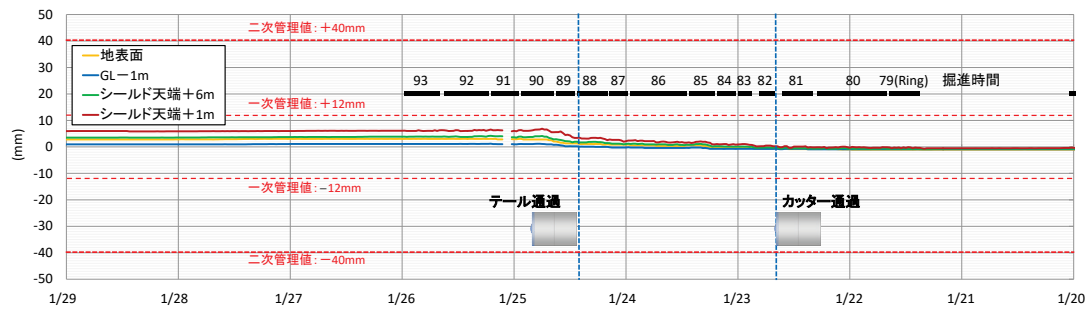
以上により、裏込め注入率は、100%以上は確保し、110%を目標として施工することが適切であると判断した。



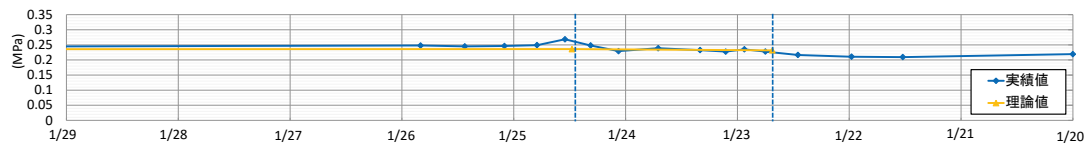
a) 鉛直変位①-3



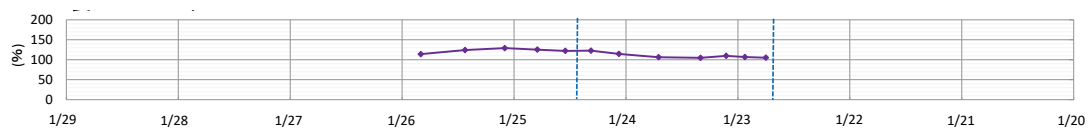
b) 鉛直変位①-2



c) 鉛直変位①-1

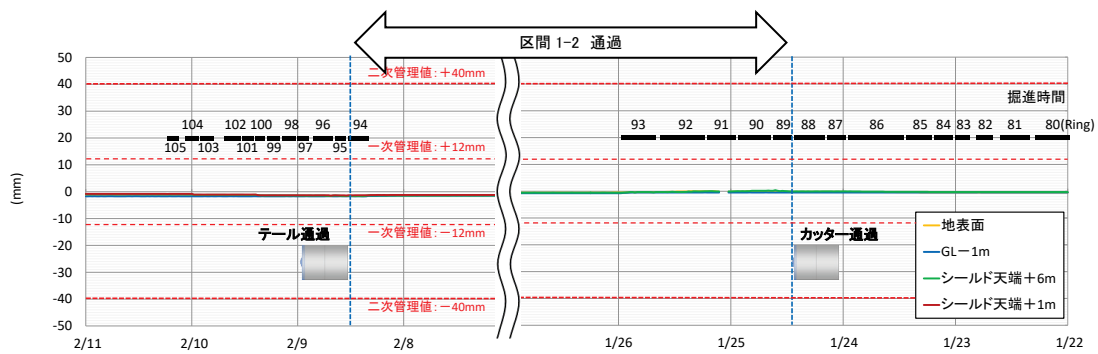


d) 切羽水圧

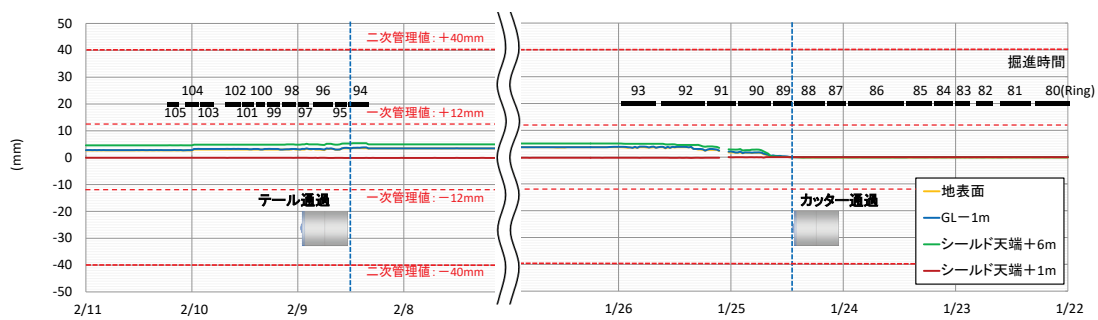


e) 裏込め注入率

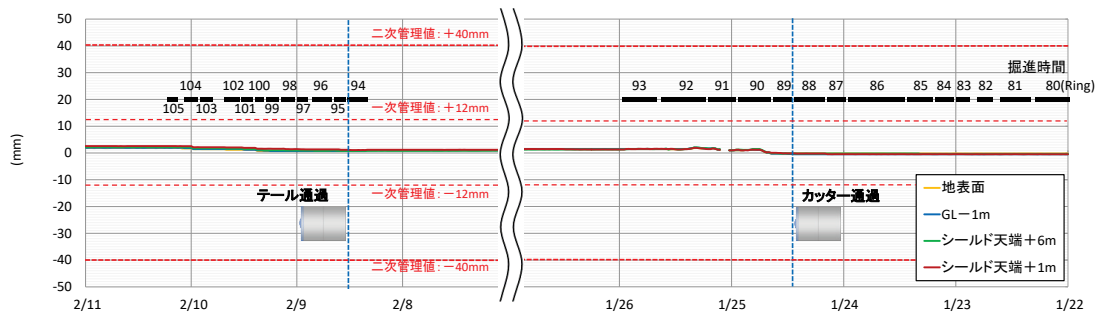
図-3.6 掘進管理項目の施工実績と地盤変状結果（区間1-1）



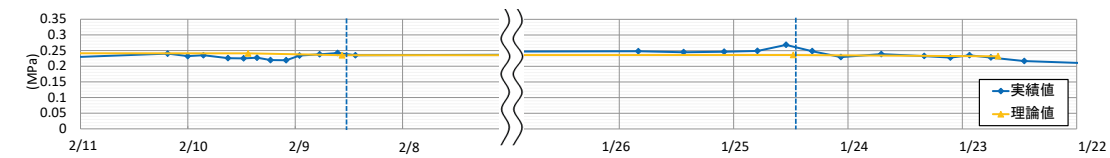
a) 鉛直変位②-3



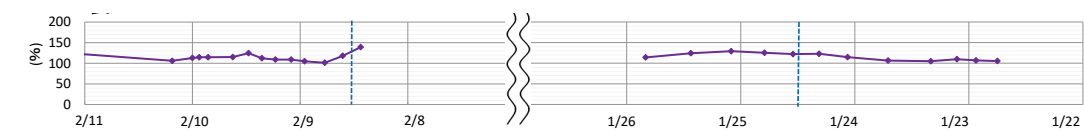
b) 鉛直変位②-2



c) 鉛直変位②-1

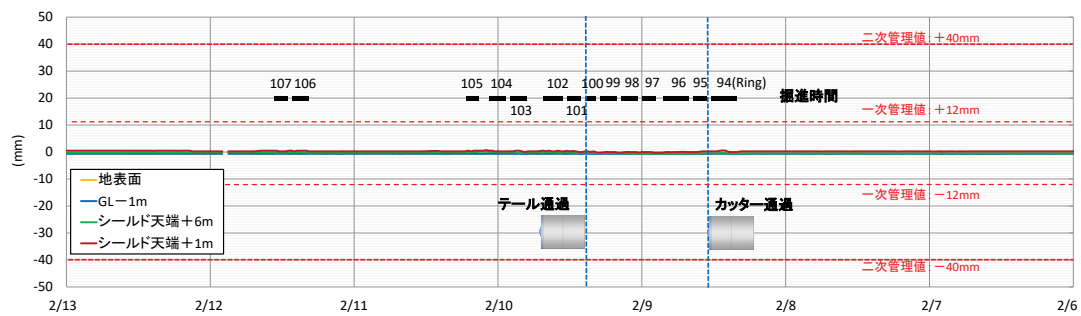


d) 切羽水圧

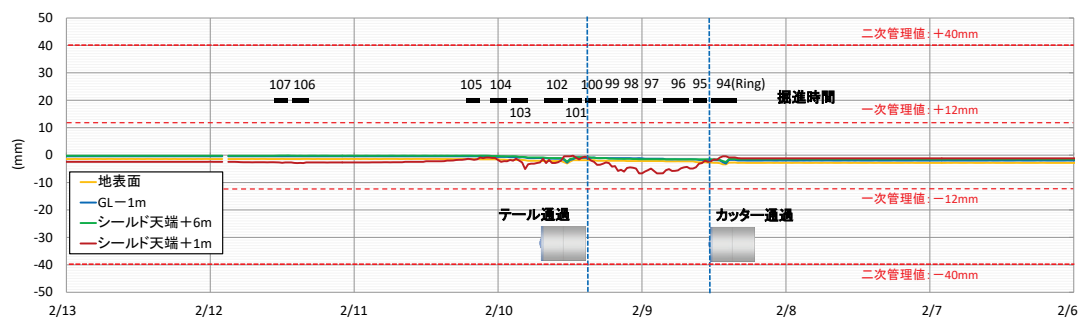


e) 裏込め注入率

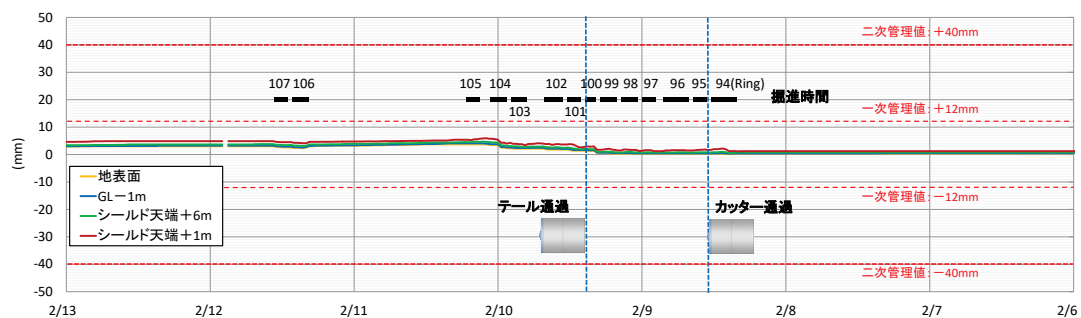
図-3.7 掘進管理項目の施工実績と地盤変状結果 (区間1-2)



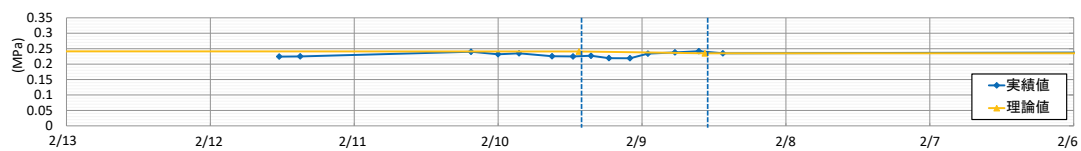
a) 鉛直変位③-3



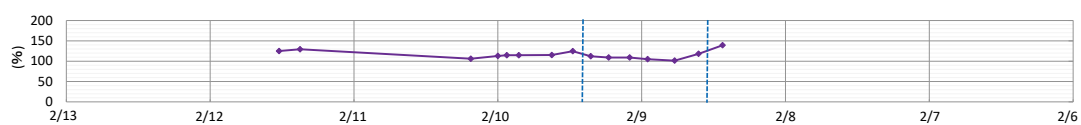
b) 鉛直変位③-2



c) 鉛直変位③-1

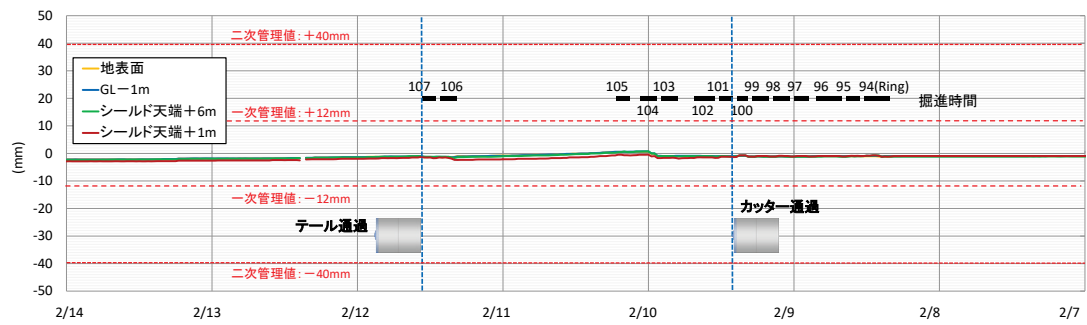


d) 切羽水圧

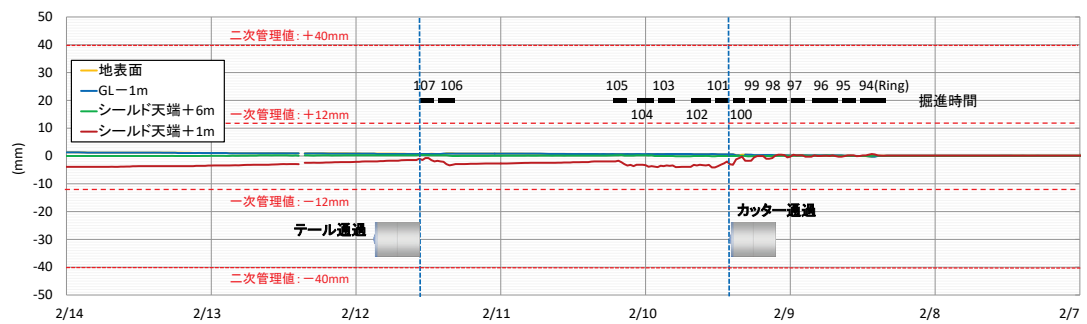


e) 裏込め注入率

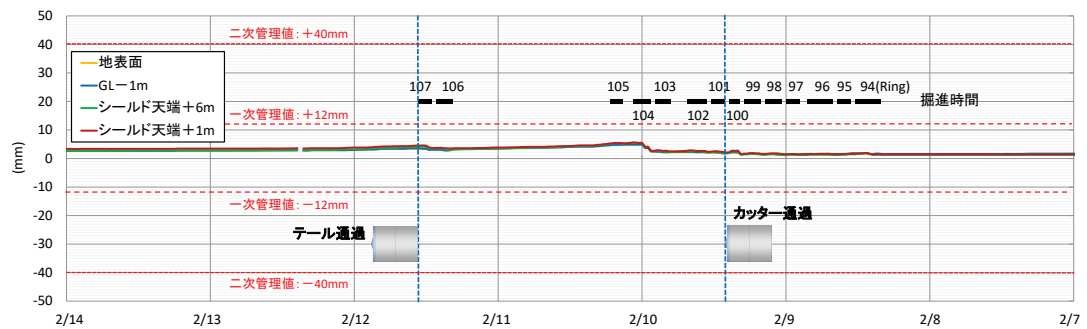
図-3.8 掘進管理項目の施工実績と地盤変状結果（区間2-1）



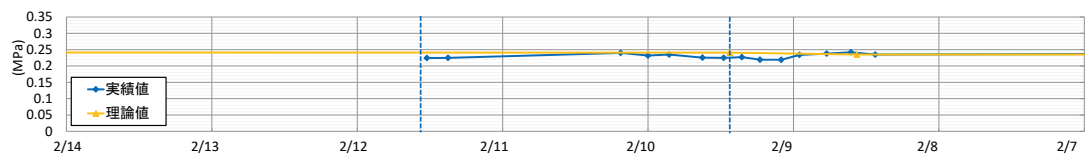
a) 鉛直変位④-3



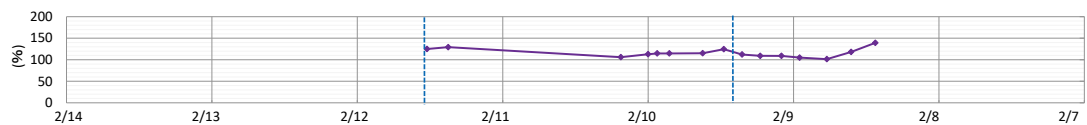
b) 鉛直変位④-2



c) 鉛直変位④-1



d) 切羽水圧



e) 裏込め注入率

図-3.9 掘進管理項目の施工実績と地盤変状結果（区間2-2）

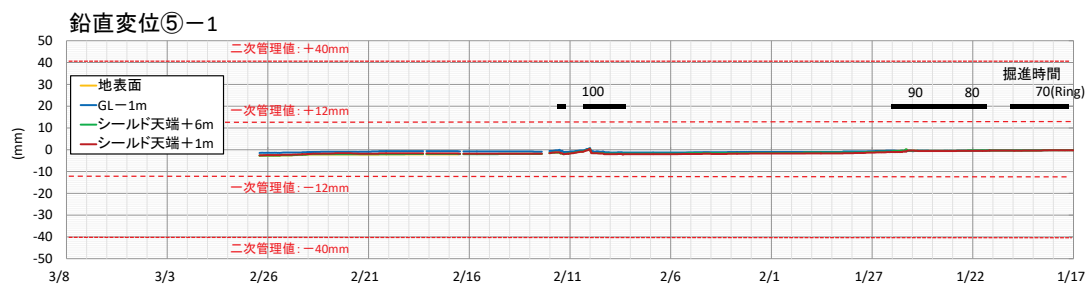
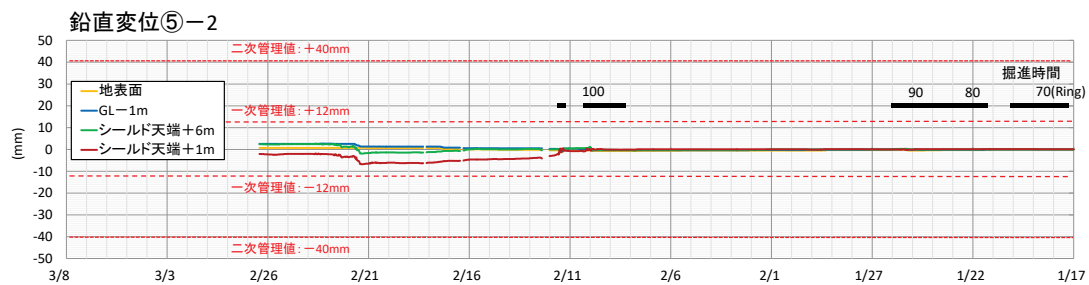
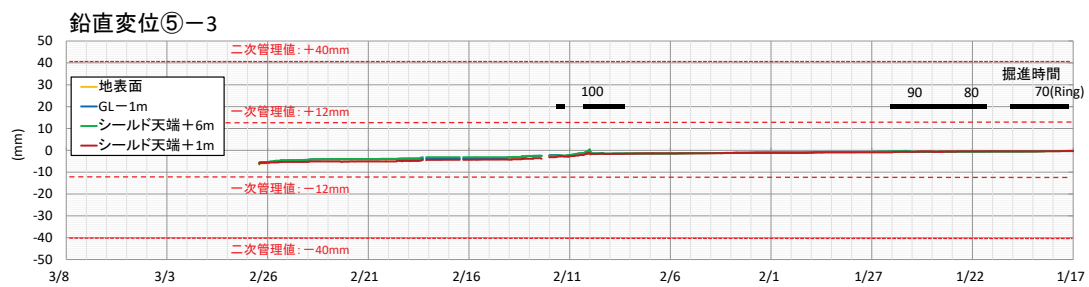
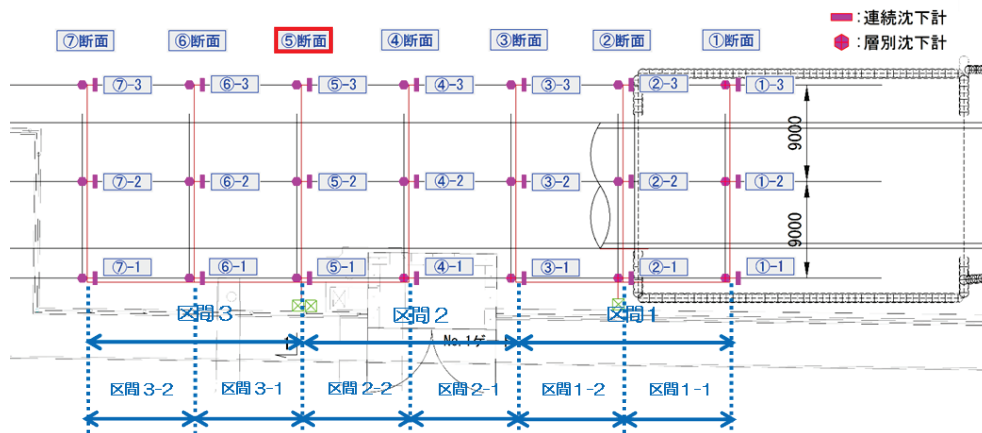


図-3.10 ⑤断面の鉛直変位計測結果

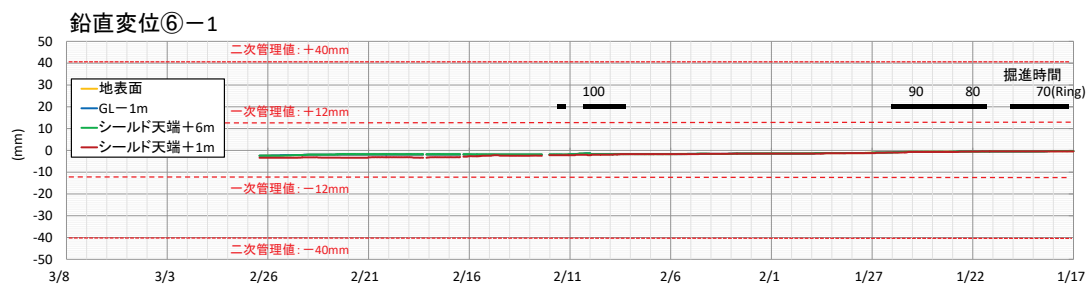
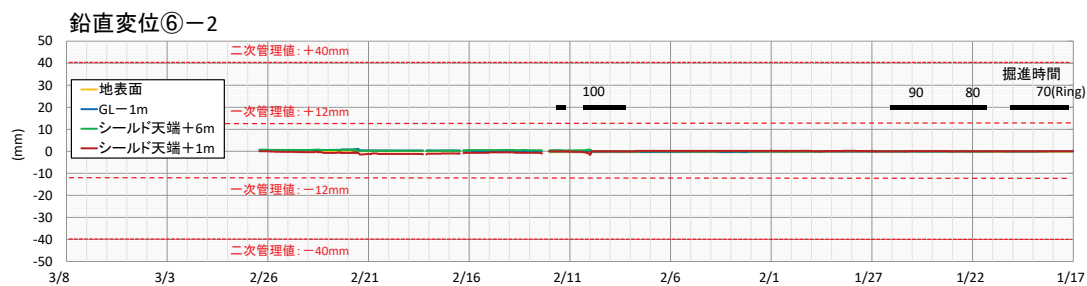
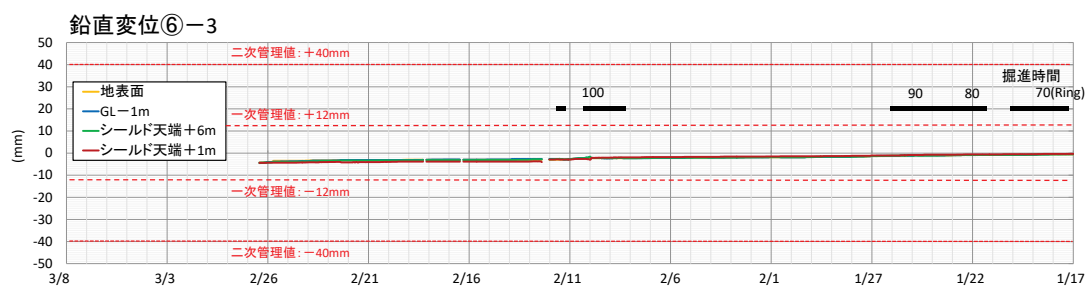
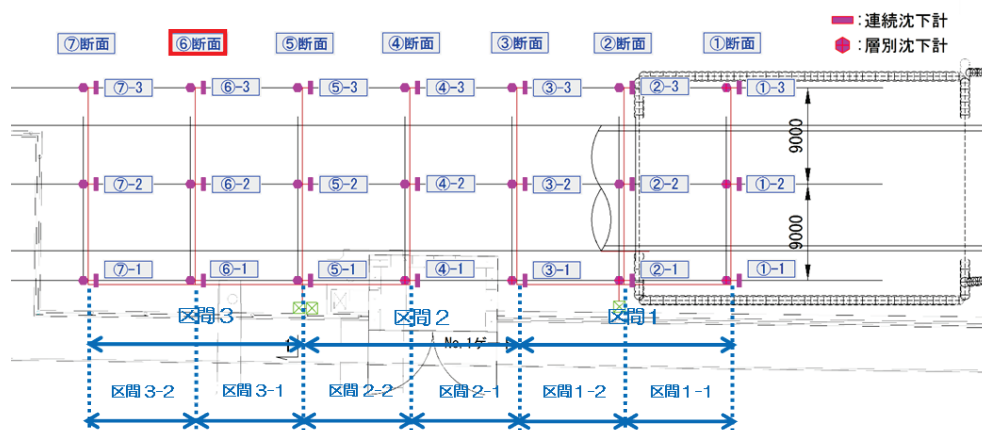


図-3.11 ⑥断面の鉛直変位計測結果

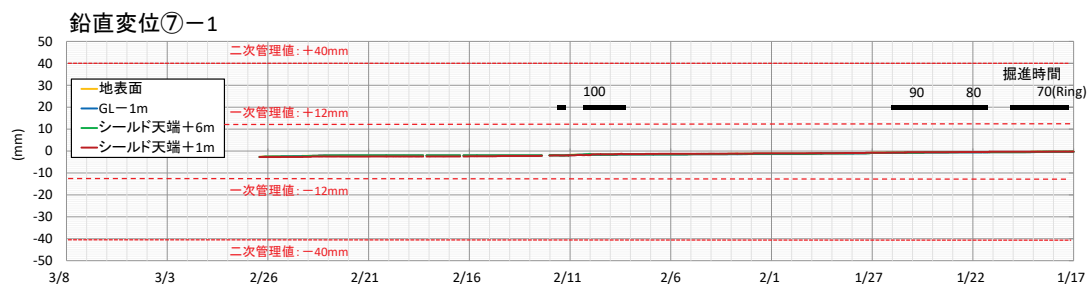
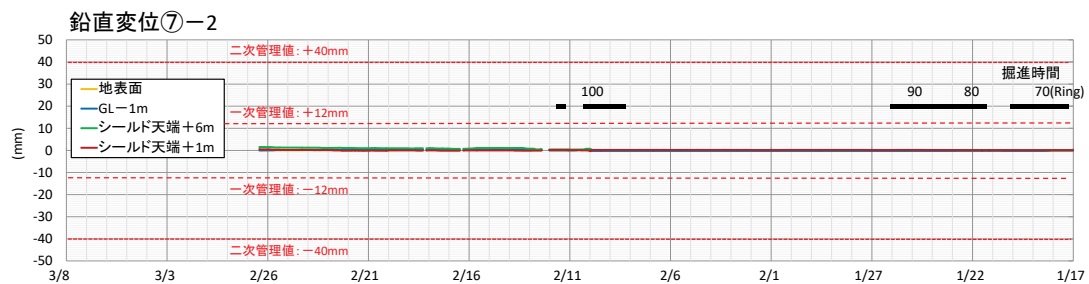
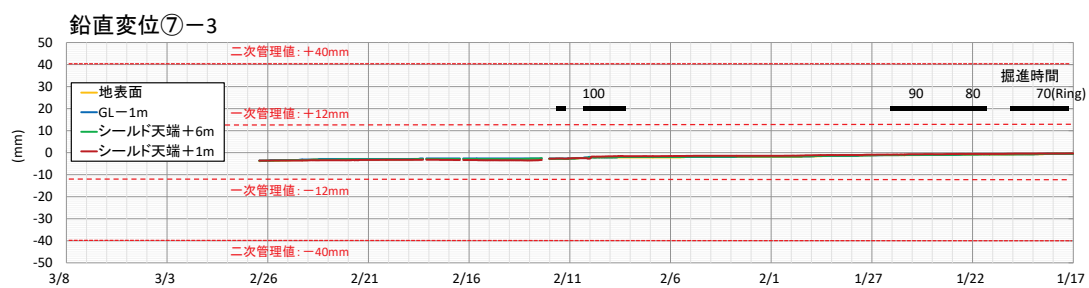
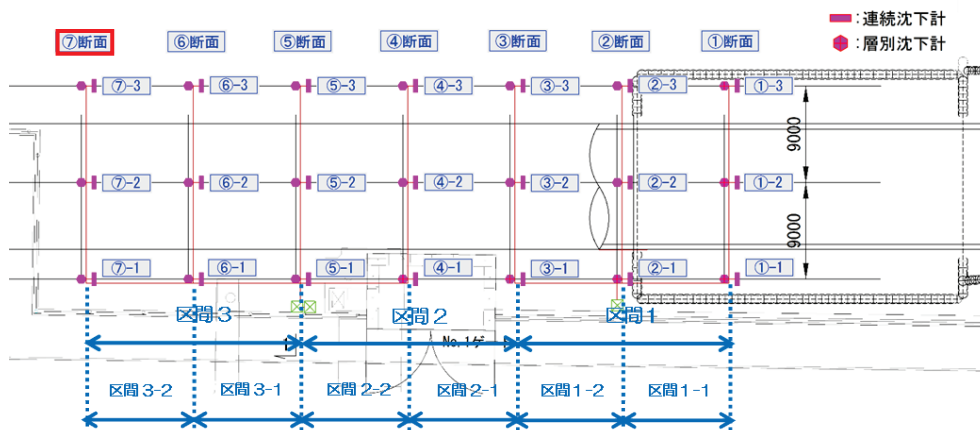


図-3.12 ⑦断面の鉛直変位計測結果

3.4 シールド掘進に伴う近接構造物の変状予測解析の精度向上手法の提案

地盤変状予測解析におけるシールドと地盤との境界条件を表す応力解放率 α に着目し、事前に実施したトライアル施工区間における 2 次元弾性 FEM 解析による地盤変状予測値と、計測された地盤変状値を比較することで、応力解放率 α の値を設定し、上記手法による掘進管理値で施工した場合の近接構造物の変状予測に関する解析精度向上手法を提案する。

シールド掘進に伴う地盤変状予測の手法には、シールド外径と土被りだけの幾何学的な形状寸法から算出する手法や、地盤条件も考慮する手法が提案されている⁵⁾。これらの予測手法は、地表変位の概略値を算出できるが、地盤条件等を考慮できないことや、任意の位置で、任意の方向への地盤変状を知ることができないことなどから、制約条件の多い現場において近接施工の影響検討に用いることは難しい。そのため、現在は、さまざまな現場の条件を考慮することができる有限要素法による解析（FEM 解析）が主流となっている。

FEM 解析でシールド掘進に伴う地盤変状を予測するためには、次に示す条件が満たされていることが必要となる¹⁾。

- ① 作用側であるシールド施工段階の各要素（掘削、推進、テールボイドの発生、裏込め注入等）が解析に組み込まれていること。
- ② シールドと地盤との境界面（掘削面、接触面）での地盤の動きが再現されていること。
- ③ 応答側の地盤変形の基本方程式、土の構成則およびそれらに必要な入力物性値が正確に決定されていること。

次項以降に、①～③の条件を満たすための解析条件を詳述する。なお、2 次元弾性 FEM 解析には、市販のソフトウェア SoilPlus⁶⁾を使用した。

3.4.1 2 次元弾性 FEM 解析モデルの構築

(1) 解析条件

2 次元弾性 FEM 解析は、図-3.1、3.2 に示す①、④、⑦断面において実施した。解析に用いた地盤の物性値は、「平成 27 年度東京国際空港 A 誘導路他 土質調査」³⁾より引用し、表-3.6 および表-3.7 に示す値を採用した。

表-3.6 解析に用いる地盤の物性値

地層	平均 N 値	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	変形係数※1 E_0 (kN/m ²)	ポアソン比※2 ν
Bs	8	18.0	—	34.0	22400	0.306
Ac1	4	16.5	28.0	13.0	10800	0.375
As0	7	17.5	—	36.0	19600	0.292
As1	9	17.5	—	31.0	25200	0.327
Ac2	3	15.0	41.0	12.0	28400	0.412
Asc	3	15.5	47.0	13.0	33600	0.437
Dc1	5	18.0	61.0	13.0	19600	0.375

※1 $E_0=2800N^{0.7}$ 、※2 $\nu=K_0/(1+K_0)$ ただし、 K_0 (砂質土): $K_0=1-\sin\phi$ 、 K_0 (粘性土): 表-3.7 参照

表-3.7 解析に用いる地盤の物性値⁸⁾

土 質		K_0 の値
砂 質 土		$1 - \sin \phi$
粘 性 土	$N \geq 8$	0.5
	$4 \leq N < 8$	0.6
	$2 \leq N < 4$	0.7
	$N < 2$	0.8

ここに、 ϕ ：砂の内部摩擦角、 N ： N 値(2) 応力解放率 α の設定

シールドによる地盤の掘削およびテールボイドの発生による沈下を再現するために用いられる応力解放率（掘削開放率） α は、次式で表される。

$$\alpha = \frac{P - P_L}{P} \times 100 = \left(1 - \frac{P_L}{P}\right) \quad (3.1)$$

ここで、 P ：全掘削相当外力、 P_L ：覆工が構築された段階で解放される掘削相当外力

当該工事のように、沖積軟弱粘性土層において、低土被り条件下で大断面の泥水式シールドを施工した事例は極めて少なく、過去の施工実績をもとに適切な応力解放率を設定することは困難である。そこで、表-3.8 に示すシールド掘進に伴う地盤変状 FEM 解析に用いる応力解放率の実績より、沖積粘性土を対象とした泥水式シールドにおける設定値 $\alpha=20 \sim 35\%$ ⁹⁾を参考値として、この値を包括する 4 ケース（10%、20%、30%、40%）の α 値を用いて、事前解析を実施した。

表-3.8 シールド掘進に伴う地盤変状 FEM 解析に用いる応力解放率の実績¹⁰⁾

トンネル概要								地質概要			影響評価				参考文献
種別	形状	トンネル状態	離隔 (m)	シールド形式 (泥水・泥土圧等)	シールド外径 (mm)	セグメント		地質時代	土質名	土被り (m)	解放率 (%)	沈下量 (mm)			
						外径 (m)	厚さ (mm)					幅 (mm)	解析値	実測値	
通信洞道	円形	単独		泥水	3,880	3.75	ST 150	900	洪積層	粘性土	35.8	20	3.9	2.2	6)
上水道	円形	単独		泥水		5.00			沖積層	粘性土	35.0	20	4.6		7)
排水溝	円形	併設	3.3	泥土圧	3,300	3.30	185	1000	沖積層	砂質土	7.8	先 40, 後 20	先 14, 後 6	先 14, 後 6	8)
地下鉄	円形	併設	5.6	泥水	6,650				洪積層	砂質土 粘性土	13.5	20	49.7	10	9)
地下河川	円形	単独		泥水	12,640	12.60	550	1200	洪積層	砂 礫 砂質土	27.0	15	5.36	3	10)
鉄道	円形	単独		泥水	10,000	9.8			洪積層	砂質土	9 ~ 10	30	15/21	10/24	11)
鉄道、共同溝	円形	3 併設	4.8	鉄道 泥水 / 共同溝 泥水、泥土	鉄道 7150 / 共同溝 7250 ~ 8010	7.0			沖積層 洪積層	粘性土 砂 礫	18.3	25	3	3	12)
地下鉄	円形	併設	2 ~ 3	A線 泥水 / B線 泥土	6,900	6.75	R C 380 D C 280	R C 1400 D C 1250	沖積層	粘性土	A線 17 ~ 36 B線 17 ~ 27	A線 35 / B線 40	縦列移行部 5 縦列部 3	縦列移行部 5 縦列部 4	13)
鉄道	円形	単独		泥水	10,200				沖積層	粘性土	19.33	35	15	7	14)
鉄道	円形	併設	0.4	泥水		8.1	300		洪積層	砂 礫 砂質土	22.45	35	9/7	0.2/3.9	15)
地下河川	円形	単独		泥水	12,640				洪積層	砂 礫 砂質土	20.5	15	13.1/0.3	0.5	16)
下水道	円形	単独		泥土圧		3.55			洪積層	砂 礫 砂質土	10.5	30	0.8	0.5	17)

※：表中の解放率は文献から引用したものであるが、設計に用いたものと逆解析によって求めたものを完全に分離できないため、ここでは両者を同一に扱っている。

(3) FEM 解析モデル

数値解析モデルの諸条件を以下に示す。

- ① 地層は成層とする。
- ② 掘削の応力解放による影響を評価するため、セグメントはモデル化しない。
- ③ 解析上のトンネル径は、シールド機の外径 $\phi 11.93 \text{ m}$ とする。
- ④ モデル領域⁹⁾
鉛直方向：トンネル下端から下方に $2D$ (D ：トンネル径) 程度
水平方向：地表面からトンネル下端までの深さの 4 倍以上
- ⑤ モデル境界の拘束条件
側部：水平方向固定
底部：水平方向固定・鉛直方向固定
- ⑥ 地表面に作用させる上載荷重を 10 kN/m^2 とする。

以上の条件で図-3.1, 3.2 に示した①, ④, ⑦断面の解析モデルを作成した。それぞれ図-3.13～3.15 に示す。また、2次元弾性 FEM 解析は、表-3.8 に示すように 2 ステップにより実施する。

表-3.8 解析ステップ

解析ステップ	内容
STEP-1	初期応力解析
STEP-2	シールド掘削（応力解放率 α ）

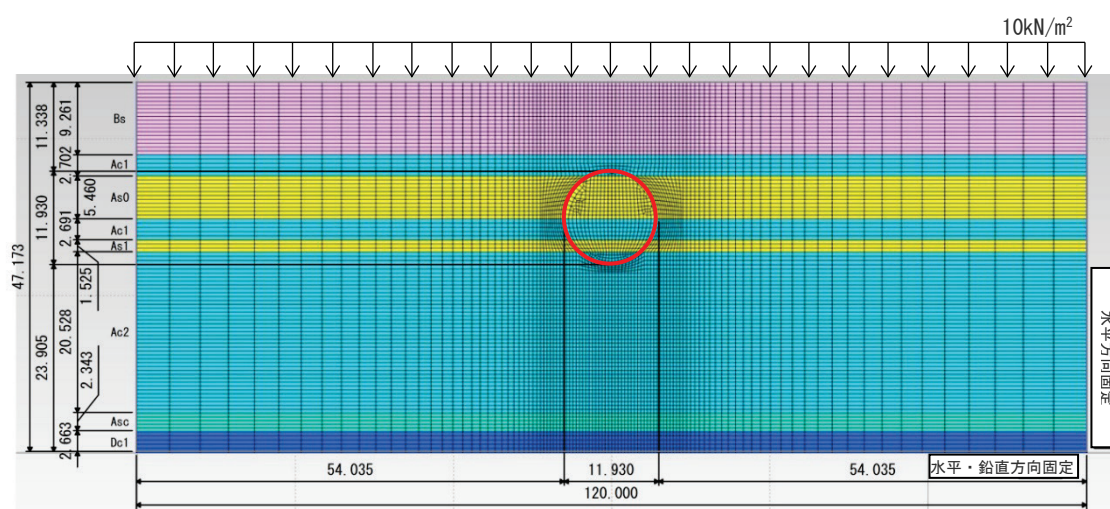


図-3.13 解析モデル図（①断面）

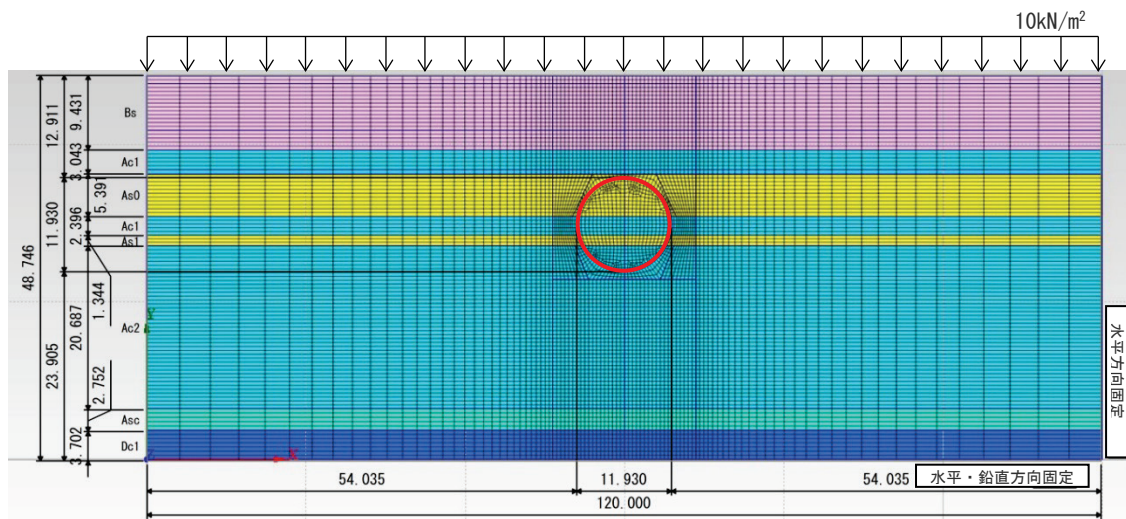


図-3.14 解析モデル図 (④断面)

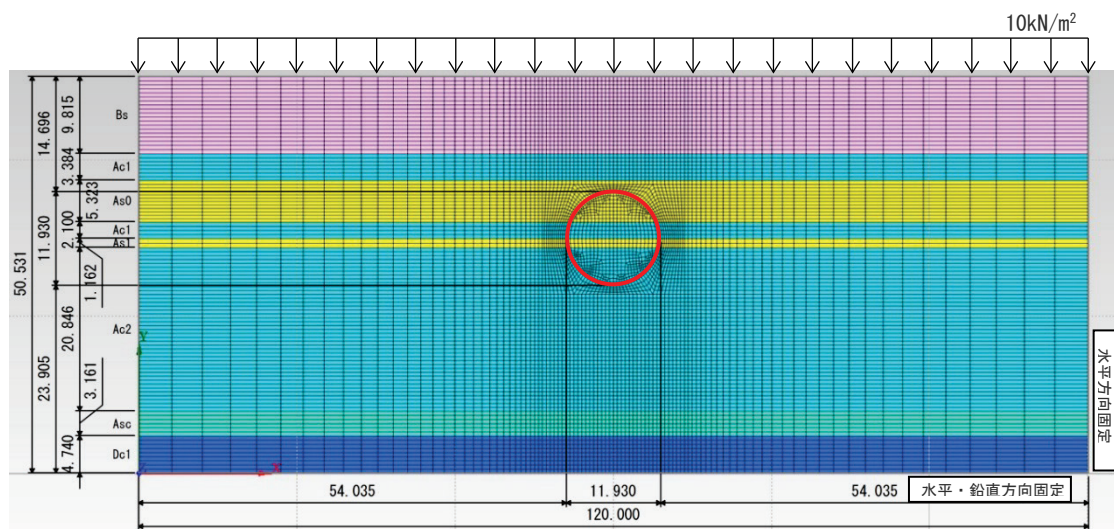


図-3.15 解析モデル図 (⑦断面)

3.4.2 シールド通過に伴う地盤変状の予測

シールド通過に伴う地盤変状の予測結果として、地表面高における鉛直変位（水平方向分布）および鉛直変位のコンターを解析断面ごとに整理し、以下に示す。

(1) ①断面

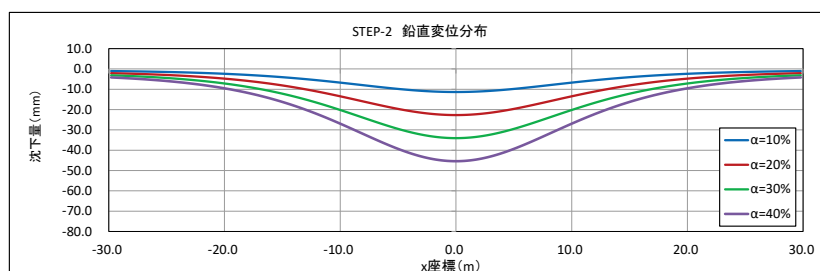


図-3.16 地表面高における鉛直変位（水平方向分布）

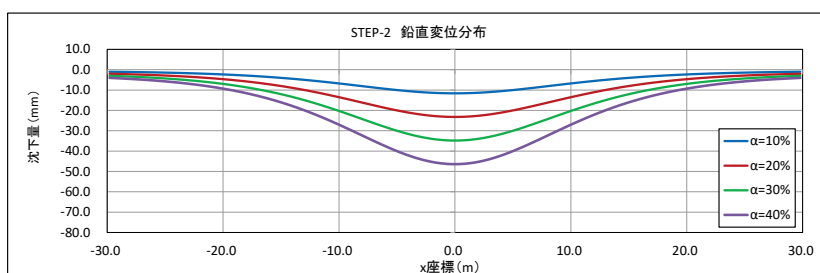


図-3.17 地表面高-1.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

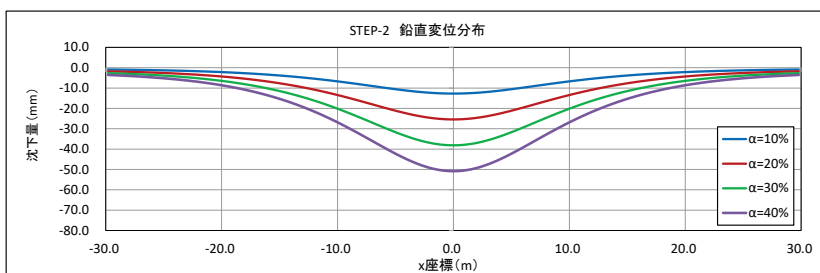


図-3.18 シールド天端高+6.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

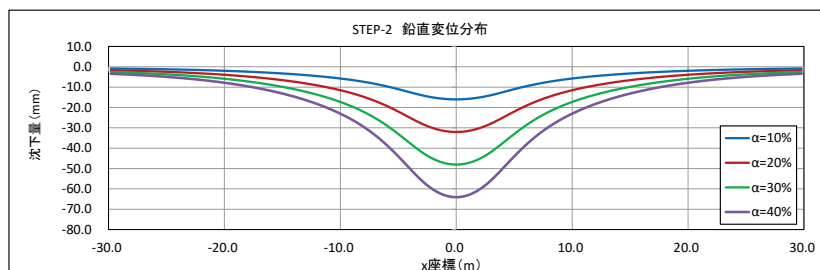


図-3.19 シールド天端高+1.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

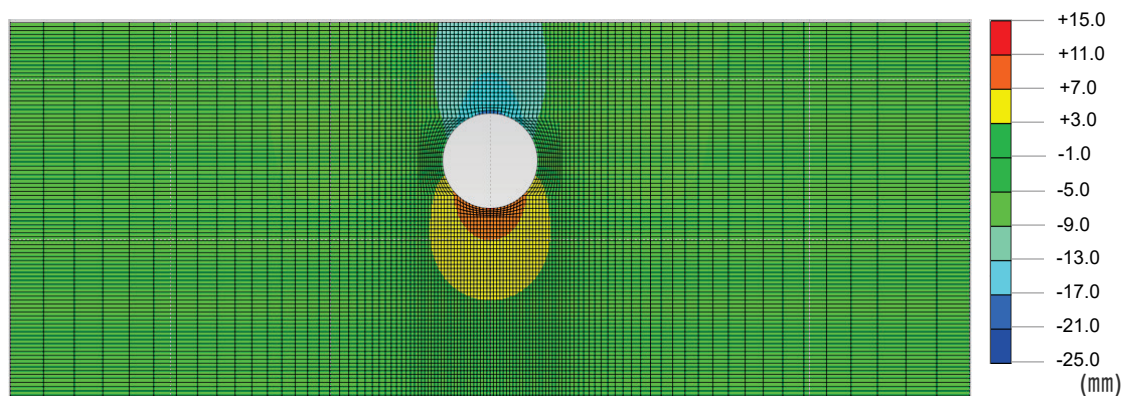


図-3.20 鉛直変位コンター図 ($\alpha=10\%$)

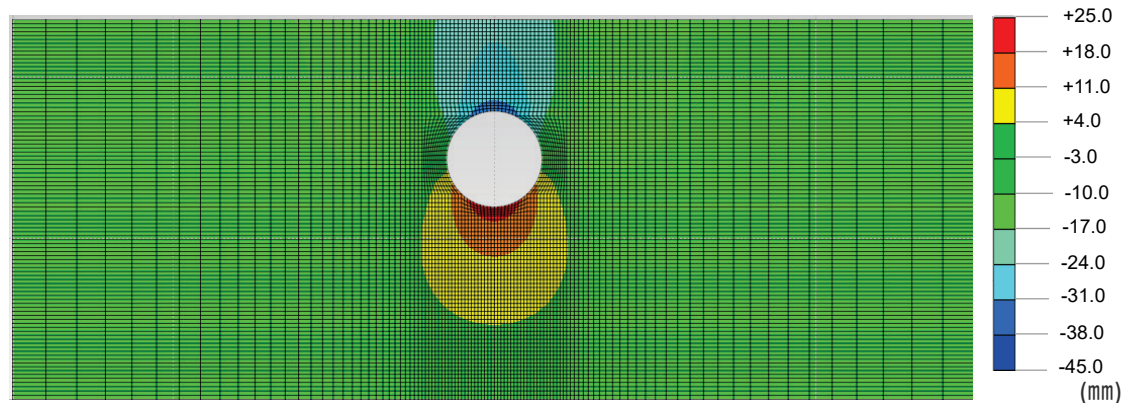


図-3.21 鉛直変位コンター図 ($\alpha=20\%$)

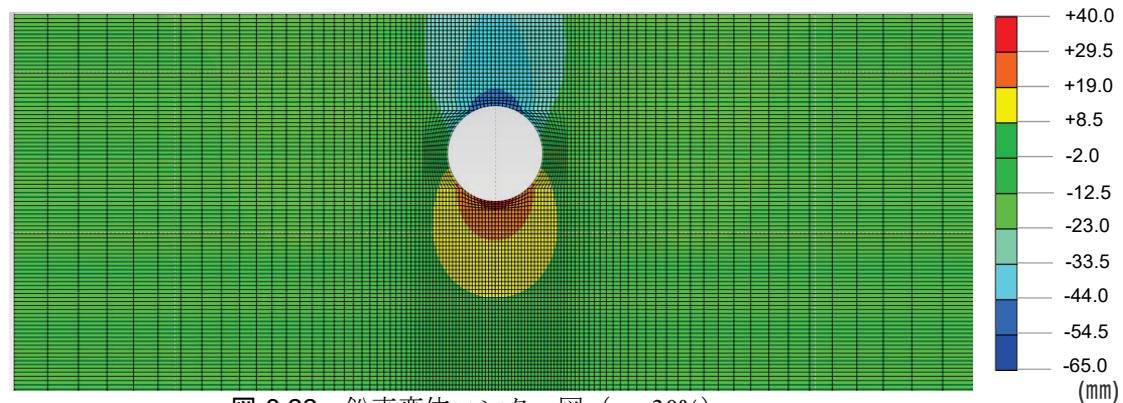


図-3.22 鉛直変位コンター図 ($\alpha=30\%$)

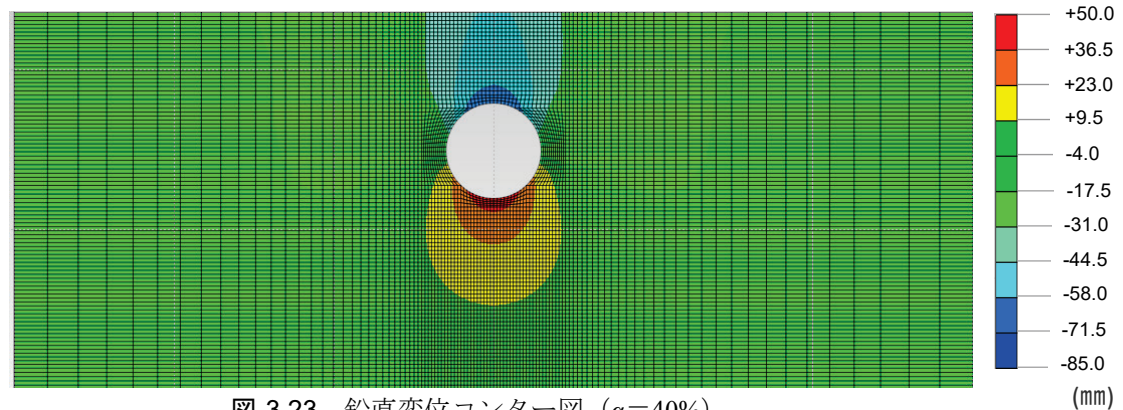


図-3.23 鉛直変位コンター図 ($\alpha=40\%$)

(2) ④断面

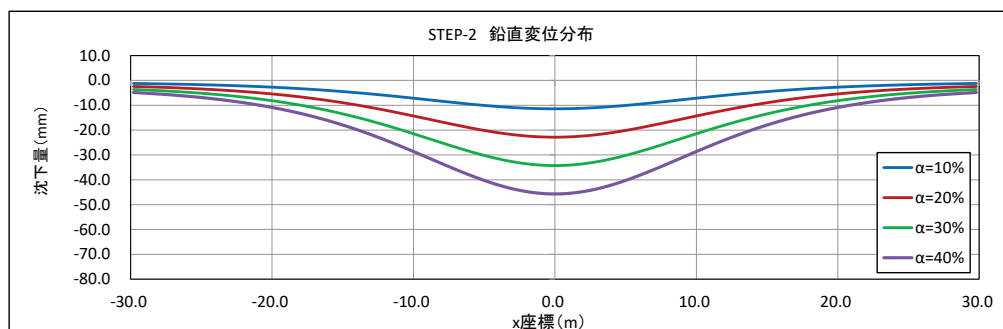


図-3.24 地表面高における鉛直変位（水平方向分布）

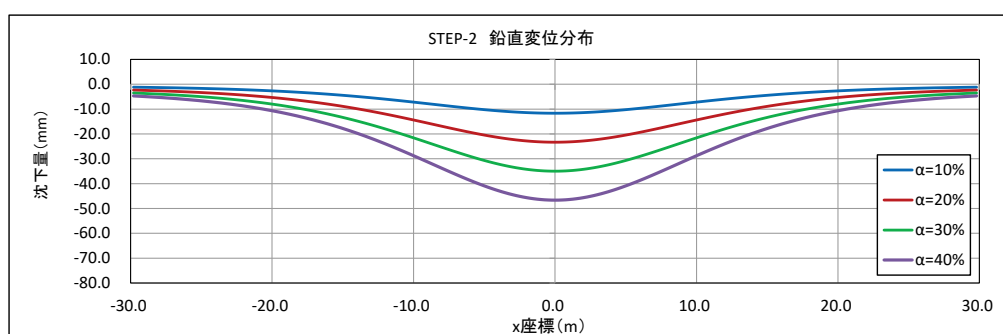


図-3.25 地表面高-1.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

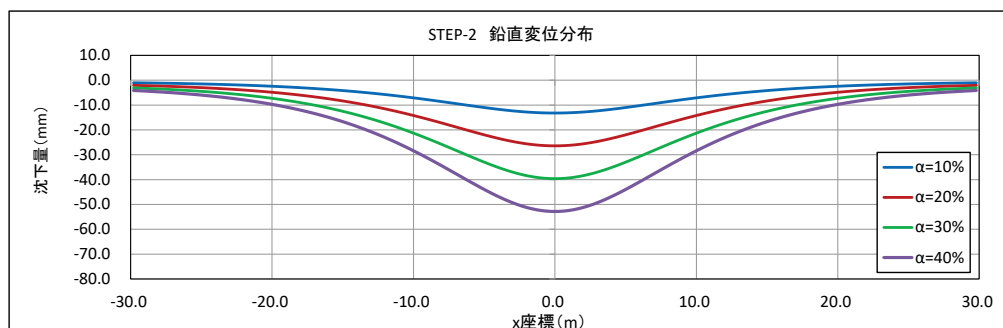


図-3.26 シールド天端高+6.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

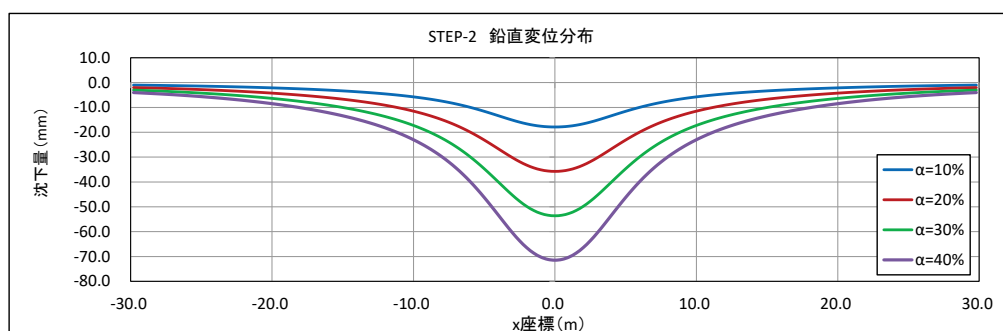


図-3.27 シールド天端高+1.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

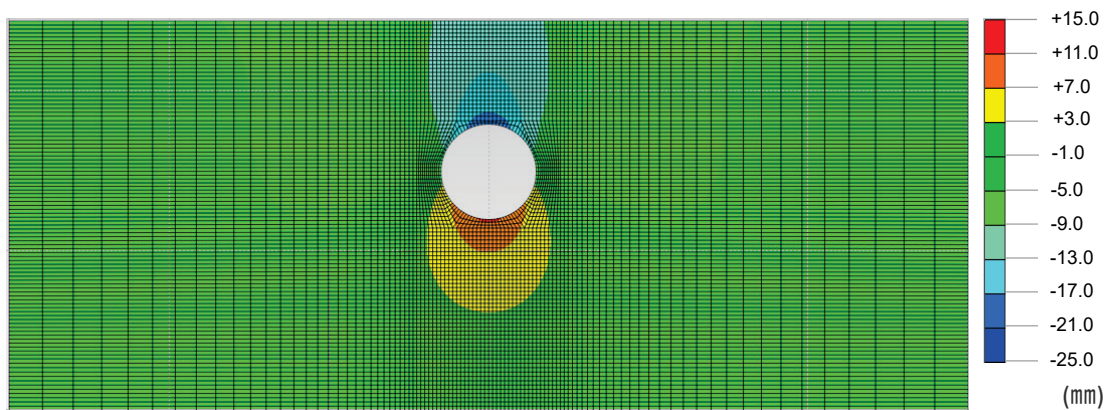


図-3.28 鉛直変位コンター図 ($\alpha=10\%$)

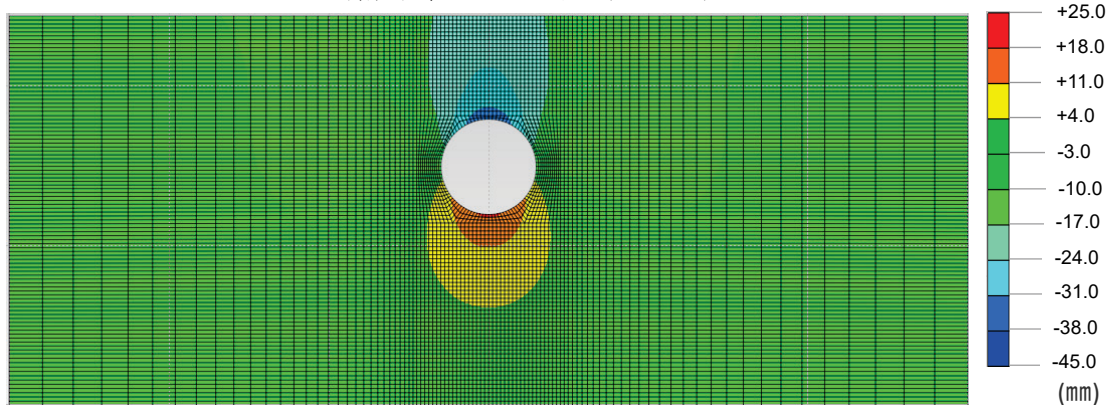


図-3.29 鉛直変位コンター図 ($\alpha=20\%$)

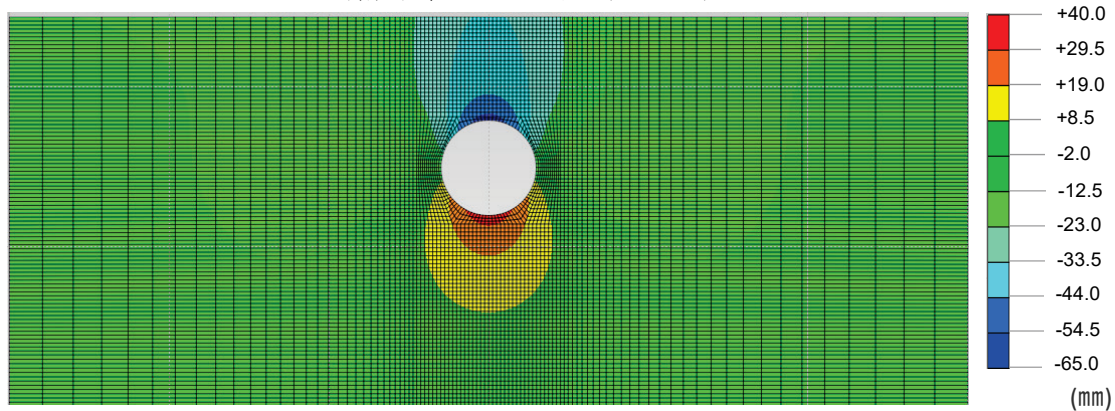


図-3.30 鉛直変位コンター図 ($\alpha=30\%$)

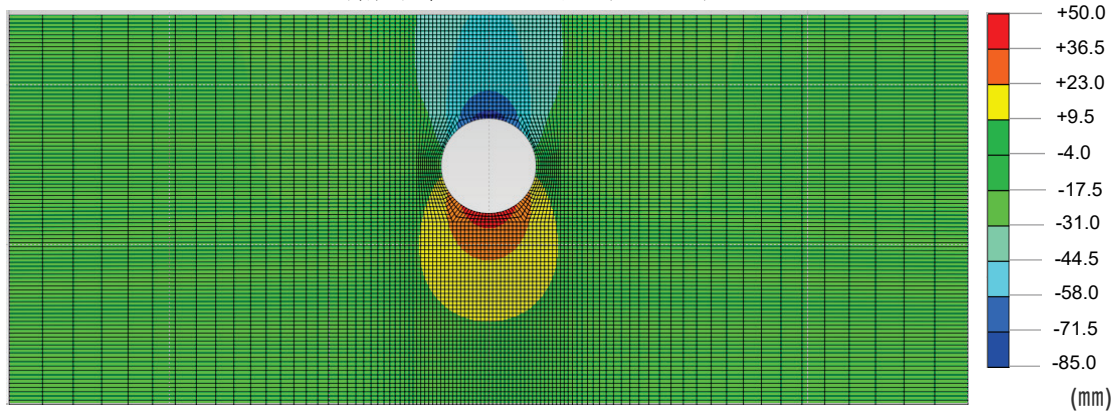


図-3.31 鉛直変位コンター図 ($\alpha=40\%$)

(3) ⑦断面

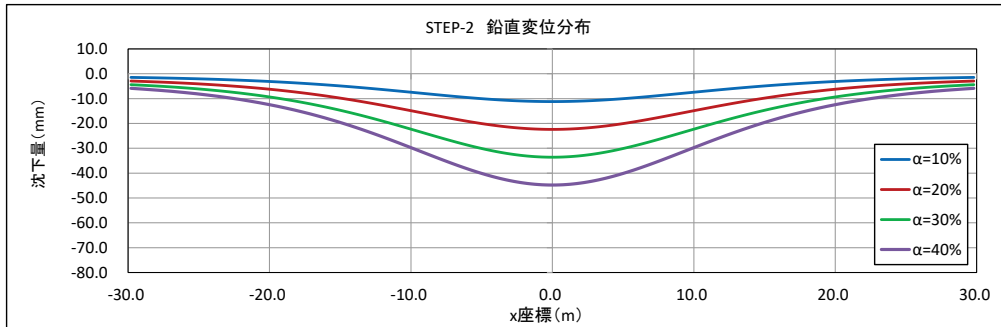


図-3.32 地表面高における鉛直変位（水平方向分布）

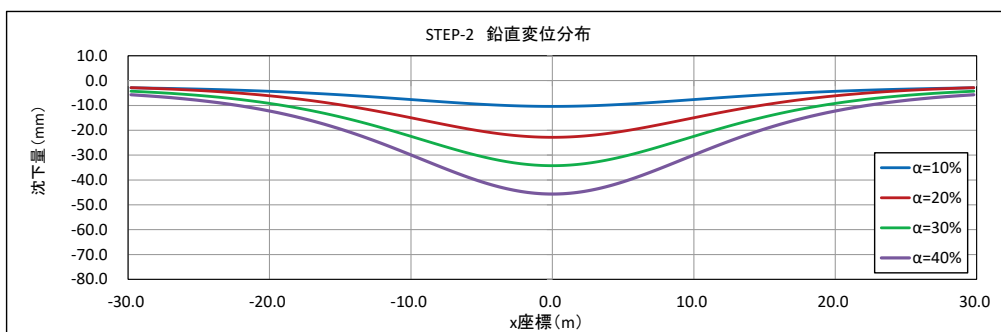


図-3.33 地表面高-1.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

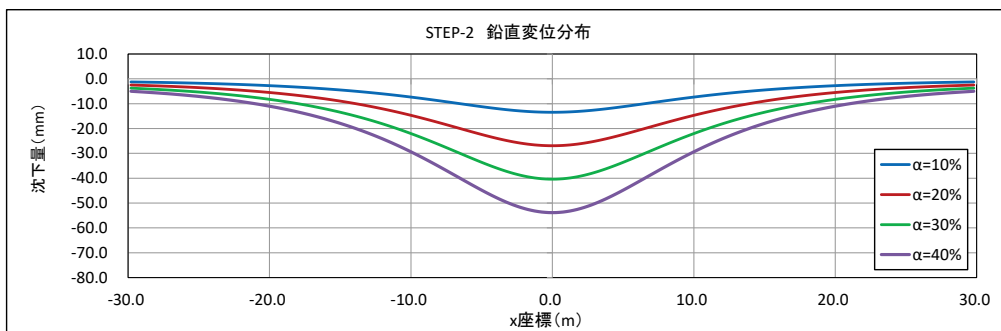


図-3.34 シールド天端高+6.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

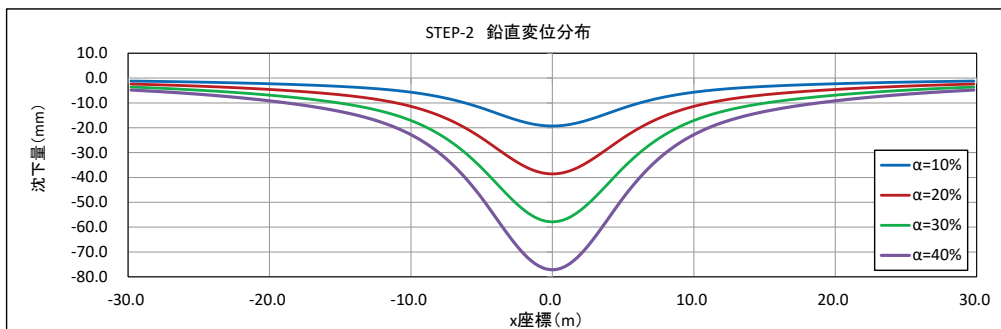


図-3.35 シールド天端高+1.0mにおける鉛直変位（水平方向分布）

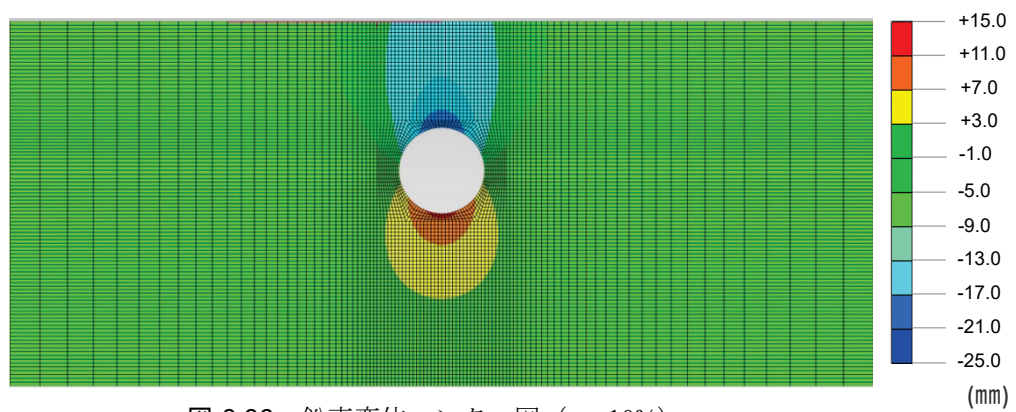


図-3.36 鉛直変位コンター図 ($\alpha=10\%$)

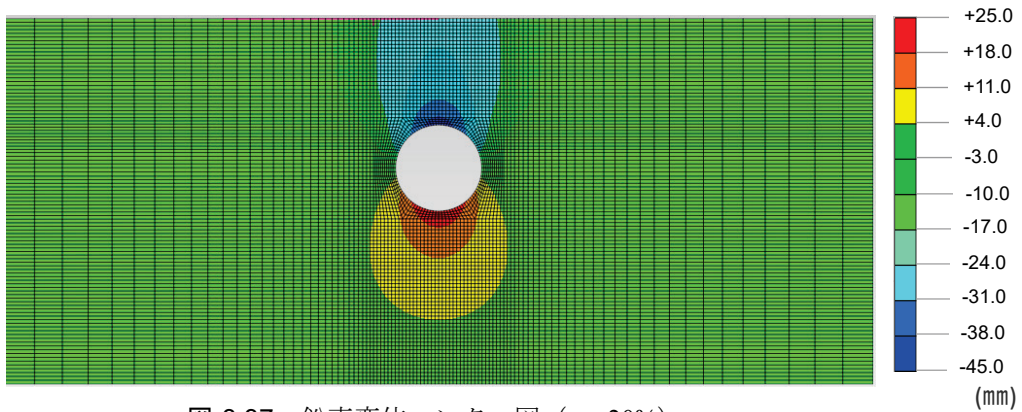


図-3.37 鉛直変位コンター図 ($\alpha=20\%$)

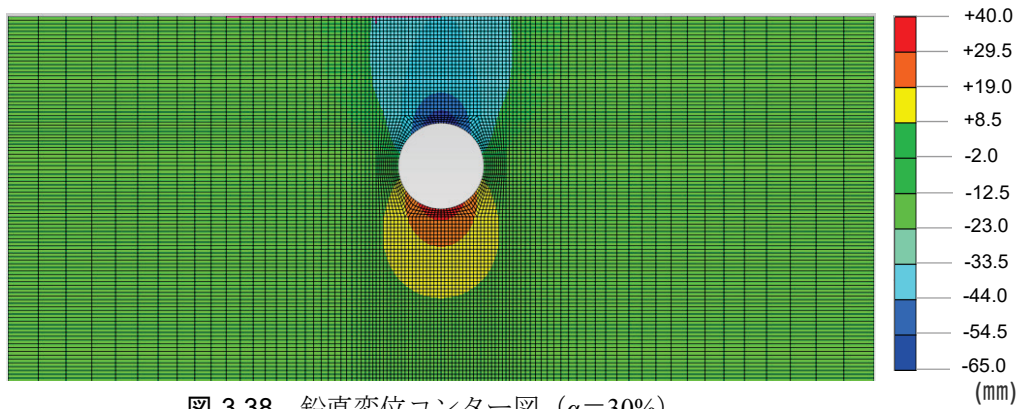


図-3.38 鉛直変位コンター図 ($\alpha=30\%$)

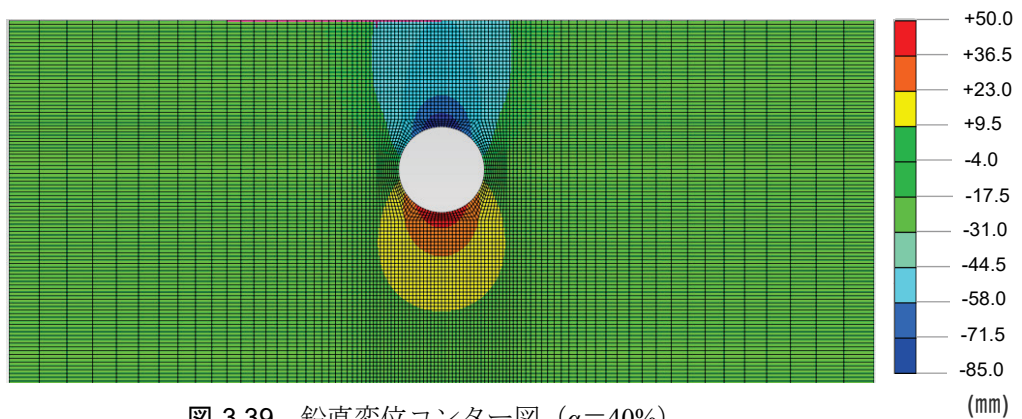


図-3.39 鉛直変位コンター図 ($\alpha=40\%$)

3.4.3 応力解放率の設定

解析結果の一覧を表-3.10に示す。なお、②、③、⑤、⑥断面の結果については、前述の①、④、⑦断面の解析結果から線形補完を行って値を記述した。図-3.6～3.12に示すとおり、実施工における①～⑦断面の沈下量は10 mm以下であり、表-3.10に示す解析結果と比較すると、応力解放率 $\alpha=10\%$ の解析結果が最も近い値を示している。したがって、当該工事における応力解放率 α は10%程度が適切である。

表-3.10 解析結果一覧

応力解放率 α	測点	沈下量(mm)																				
		断面																				
		①-1	①-2	①-3	②-1	②-2	②-3	③-1	③-2	③-3	④-1	④-2	④-3	⑤-1	⑤-2	⑤-3	⑥-1	⑥-2	⑥-3	⑦-1	⑦-2	⑦-3
10%	地表面	-7.4	-11.4	-7.4	-7.5	-11.4	-7.5	-7.6	-11.4	-7.6	-7.8	-11.4	-7.8	-7.8	-11.3	-7.8	-7.9	-11.3	-7.9	-8.0	-11.2	-8.0
	地表面-1.0m	-7.4	-11.6	-7.4	-7.5	-11.6	-7.5	-7.7	-11.6	-7.7	-7.8	-11.7	-7.8	-7.9	-11.6	-7.9	-8.0	-11.5	-8.0	-8.1	-11.4	-8.1
	シールド天端+6.0m	-7.4	-12.7	-7.4	-7.6	-12.9	-7.6	-7.7	-13.0	-7.7	-7.8	-13.2	-7.8	-7.9	-13.3	-7.9	-8.0	-13.4	-8.0	-8.1	-13.5	-8.1
	シールド天端+1.0m	-6.5	-16.0	-6.5	-6.5	-16.6	-6.5	-6.5	-17.3	-6.5	-6.5	-17.9	-6.5	-6.5	-18.3	-6.5	-6.5	-18.8	-6.5	-6.5	-19.3	-6.5
20%	地表面	-14.7	-22.7	-14.7	-15.0	-22.7	-15.0	-15.3	-22.8	-15.3	-15.5	-22.8	-15.5	-15.7	-22.7	-15.7	-15.8	-22.5	-15.8	-16.0	-22.4	-16.0
	地表面-1.0m	-14.8	-23.2	-14.8	-15.1	-23.2	-15.1	-15.4	-23.3	-15.4	-15.6	-23.3	-15.6	-15.8	-23.2	-15.8	-16.0	-23.0	-16.0	-16.1	-22.8	-16.1
	シールド天端+6.0m	-14.9	-25.4	-14.9	-15.2	-25.7	-15.2	-15.4	-26.1	-15.4	-15.7	-26.4	-15.7	-15.8	-26.6	-15.8	-16.0	-26.8	-16.0	-16.1	-26.9	-16.1
	シールド天端+1.0m	-13.0	-32.0	-13.0	-13.0	-33.3	-13.0	-13.0	-34.5	-13.0	-13.0	-35.7	-13.0	-13.0	-36.7	-13.0	-13.0	-37.6	-13.0	-13.0	-38.6	-13.0
30%	地表面	-22.1	-34.0	-22.1	-22.5	-34.1	-22.5	-22.9	-34.2	-22.9	-23.3	-34.3	-23.3	-23.5	-34.0	-23.5	-23.7	-33.8	-23.7	-24.0	-33.6	-24.0
	地表面-1.0m	-22.2	-34.8	-22.2	-22.6	-34.9	-22.6	-23.1	-34.9	-23.1	-23.5	-35.0	-23.5	-23.7	-34.7	-23.7	-23.9	-34.5	-23.9	-24.2	-34.2	-24.2
	シールド天端+6.0m	-22.3	-38.1	-22.3	-22.7	-38.6	-22.7	-23.1	-39.1	-23.1	-23.5	-39.6	-23.5	-23.7	-39.9	-23.7	-24.0	-40.1	-24.0	-24.2	-40.4	-24.2
	シールド天端+1.0m	-19.5	-48.0	-19.5	-19.5	-49.9	-19.5	-19.5	-51.8	-19.5	-19.6	-53.6	-19.6	-19.6	-55.0	-19.6	-19.6	-56.4	-19.6	-19.6	-57.9	-19.6
40%	地表面	-29.5	-45.4	-29.5	-30.0	-45.5	-30.0	-30.5	-45.6	-30.5	-31.0	-45.7	-31.0	-31.3	-45.4	-31.3	-31.6	-45.1	-31.6	-31.9	-44.8	-31.9
	地表面-1.0m	-29.7	-46.4	-29.7	-30.2	-46.5	-30.2	-30.7	-46.6	-30.7	-31.3	-46.6	-31.3	-31.6	-46.3	-31.6	-31.9	-46.0	-31.9	-32.2	-45.7	-32.2
	シールド天端+6.0m	-29.8	-50.8	-29.8	-30.3	-51.5	-30.3	-30.8	-52.2	-30.8	-31.4	-52.8	-31.4	-31.7	-53.2	-31.7	-32.0	-53.5	-32.0	-32.3	-53.8	-32.3
	シールド天端+1.0m	-26.0	-64.1	-26.0	-26.0	-66.5	-26.0	-26.1	-69.0	-26.1	-26.1	-71.5	-26.1	-26.1	-73.4	-26.1	-26.1	-75.2	-26.1	-26.1	-77.1	-26.1

3.4.4 設定した応力解放率の妥当性の検証

2次元弾性FEM解析により、シールド掘進に伴う近接構造物の変状予測を応力解放率10%で実施した結果とトライアル施工区間で設定した掘進管理値で実際にシールド掘進した場合の近接構造物の変状計測結果とを比較することで、本手法で設定した応力解放率の妥当性を検証する。

シールドトンネルと近接構造物（共同溝）の位置関係を示す平面図、縦断図をそれぞれ図-3.40～3.41に示す。また、トライアル施工区間における解析モデルと同様の条件で作成した解析モデル図を図-3.42に示す。なお、共同溝の変状は、共同溝躯体の剛性は評価せず、共同溝の下端深度における地盤変状を共同溝の変状量とする。

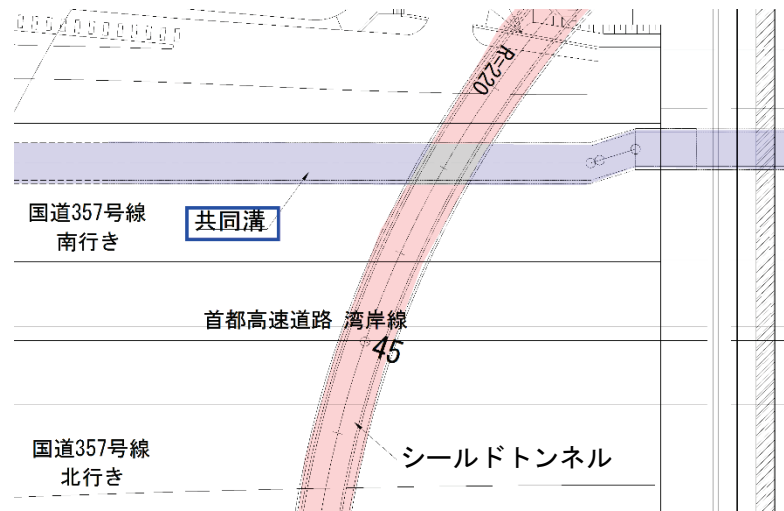


図-3.40 近接構造物との交差状況（平面図）

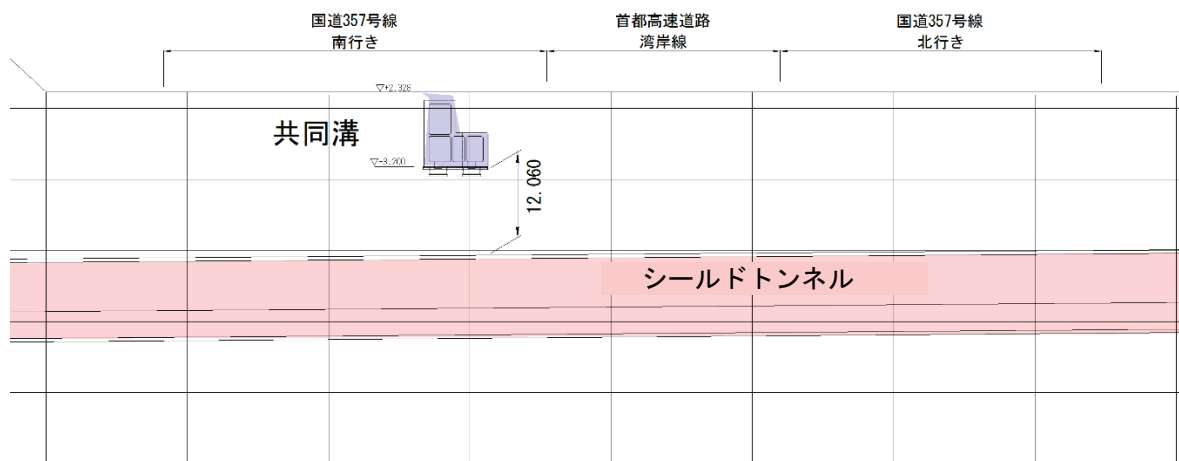


図-3.41 近接構造物との交差状況（縦断図）

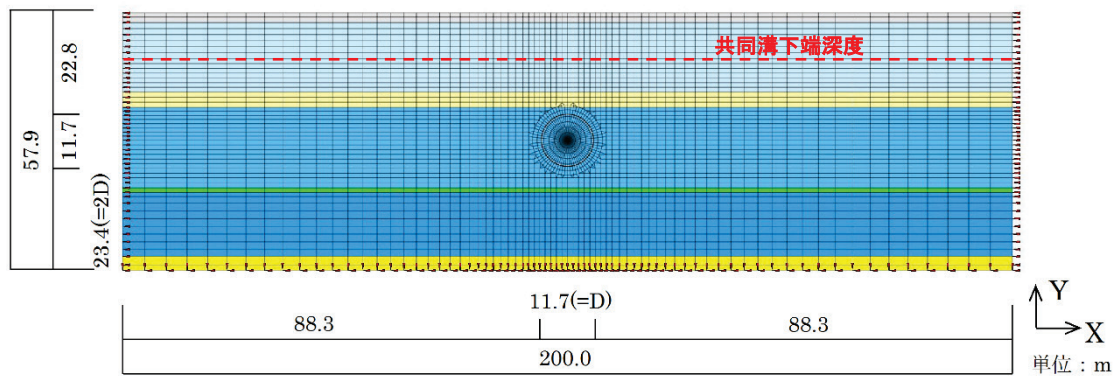


図-3.42 解析モデル図

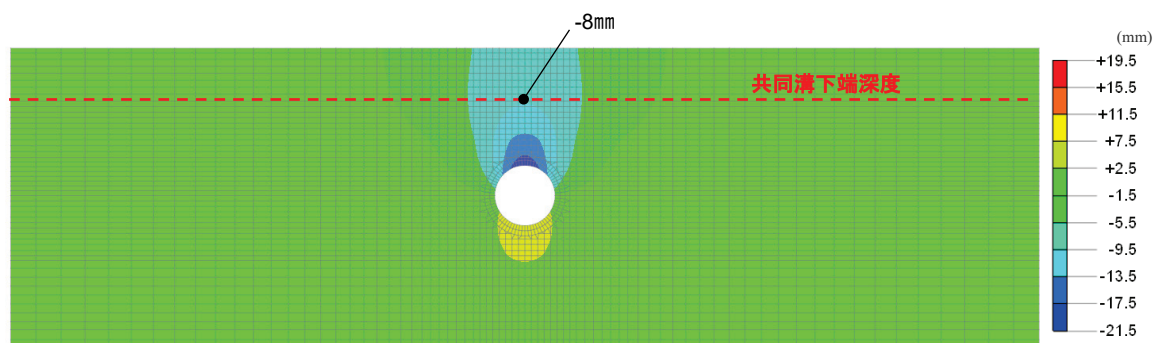


図-3.43 地盤変状予測解析結果

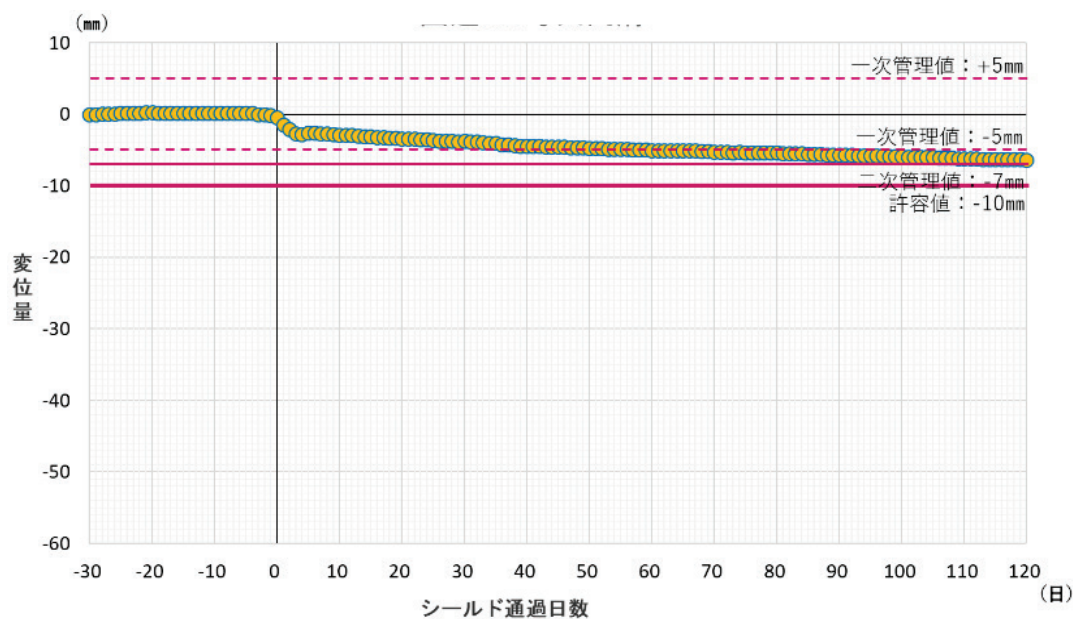


図-3.44 近接構造物（共同溝）変状計測結果¹¹⁾

応力解放率 10%での変状予測解析結果を図-3.43 に示す。解析の結果、共同溝下端深度における最大変状予測値が-8 mm となった。なお、トライアル施工前の共同溝管理者との事前協議においては、応力解放率 15%で検討しており、その際の変状予測値は-12 mm であった。

近接構造物（共同溝）の変状計測は、共同溝内の管理通路にトンネル水盛式沈下計を約 10 m 間隔に配置して計測した。トンネル直上の計測箇所におけるシールド通過に伴う変状計測結果を図-3.44 に示す。計測の結果、最大沈下量が 7.7 mm となった¹¹⁾。

近接構造物の変状予測解析において、応力解放率を 10%に設定した結果、近接構造物の変状予測値が-8 mm であった。また、実施工における近接構造物の変状計測結果が予測値と同等の-7.7 mm であった。以上より、トライアル施工区間における 2 次元弾性 FEM 解析による地盤変状予測値と、計測された地盤変状値との比較により設定する応力解放率 α の値を用いることで、近接構造物の変状予測の解析精度が向上することを確認した。

3.5 まとめ

本章では、泥水式シールド工法における切羽圧力管理の高度化を目的として、トライアル施工に基づく適切な掘進管理値の設定手法およびシールド掘進に伴う近接構造物の変状予測の精度を向上させる解析手法を提案した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 掘進管理値は、種々の施工条件に対する過去の施工実績を参考にして設定される場合が多いため、特殊な施工条件下では過去の施工実績が参照できないことを指摘した。解決方法として、シールド掘進の初期段階において、シールド通過に伴う地盤変状を計測するトライアル施工を実施して、適切な掘進管理値の設定を行う方法を提案した。
- (2) 実施したトライアル施工例によれば、掘進管理値のうち、切羽水圧に関しては、主働土圧＋水圧＋変動圧を採用することが適切であると判断された。また、裏込め注入率に関しては、100%以上を確保し、110%を目標注入量とすることが適切であると判断された。
- (3) トライアル施工の実施による掘進管理値の設定により、地盤変状を最小限に抑制することができたことから、特殊条件下（大断面、小土被り、埋め立て地盤等）において、トライアル施工による掘進管理値の設定手法の有用性が確認できた。
- (4) 近接構造物の変状予測に関する解析精度向上を目的として、シールドと地盤との境界条件を表す応力解放率 α に着目し、事前に実施したトライアル施工区間における 2 次元弾性 FEM 解析による地盤変状予測値と、計測された地盤変状値を比較することで、当該施工条件における応力解放率 α を 10% に設定した。
- (5) トライアル施工前の共同溝管理者との事前協議においては、応力解放率 15% で検討しており、その際の変状予測値は -12 mm であった。本手法で設定した応力解放率 10% を用いて近接構造物の変状予測解析を実施したところ、実施工におけるトンネル直上の最大変状量 -7.7 mm に対し、予測値が -8 mm と同等の結果となった。したがって、トライアル施工区間における 2 次元弾性 FEM 解析による地盤変状予測値と、計測された地盤変状値との比較により設定した応力解放率 α の値を用いることで、近接構造物の変状予測解析の精度が向上することを確認した。

参考文献：

- 1) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法，pp.234-238，2012.
- 2) 秋元恵一，谷田海孝男，三浦政美：1 日 270 便の滑走路直下をシールドで貫く 東京国際空港鉄道トンネル，トンネルと地下，vol.28，No.9，pp.755-763，1997.
- 3) 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所，川崎地質・中央開発・復建調査設計共同体：平成 27 年度東京国際空港 A 誘導路他土質調査報告書，2016.
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書 シールド工法編，p.225，2016.
- 5) Szecye, K. (島田隆夫訳)：トンネル工学，加島出版会，pp.650-660，1971.
- 6) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社：地盤・浸透・耐震統合解析システム SoilPlus，
<https://www.engineering-eye.com/SOILPLUS/>(閲覧日：2024.1.7)
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，p.188，2017.
- 8) 土木学会：トンネル標準示方書 開削工法編，p.34，2006.
- 9) 鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工マニュアル，pp.153-165，2007.
- 10) 日本道路協会：シールドトンネル設計施工指針，p.374，2009.
- 11) 鈴木 誠，田崎仁久，安井克豊，河内寛之，南 梨佳：近接重要構造物を横断する大断面泥水式シールドの施工報告，令和 2 年度土木学会全国大会（第 75 回年次学術講演会），2020.

第4章 シールド機運転管理の高度化

4.1 概説

一般に、シールド工事は昼夜交替で作業が行われており、短い交替時間の中でシールドの位置やセグメントの出来形等の測量を行い、その結果に基づいて次の掘進計画を行っている。掘進計画では、掘進予定分のリングを対象にシールドの操作方法やセグメントの組立方法等が示された掘進指示書を作成する。そして、熟練のオペレーターが掘進指示書とシールドの状態が示されたモニターの情報を見ながらシールドの操作を行っている。これらのシールド機運転管理は、熟練技能労働者の経験値に大きく依存して実施されている現状にあるが、近年の少子高齢化に伴う労働力の不足や働き方改革の推進、さらには熟練技能労働者の大量離職が予想される中で、最先端技術と定量化した熟練工の経験値の融合による生産性向上はシールド工事関係者から強く求められている課題である。

本研究では、このようなシールド施工における現状を鑑みて、シールド機運転管理の高度化を目的として、シールド工事における掘進計画の立案およびシールドの操作指示を支援するツールとして人工知能（Artificial Intelligence ; AI）を用いたシステム開発を行う。開発するシールド機運転管理システムは、掘進計画を支援するための「施工計画支援 AI」およびシールドの操作を支援するための「掘進操作支援 AI」2つのシステムで構成される。本文では、これらの2つのAIシステムを総称して、シールドAIと記す。なお、施工計画支援AIは、清水建設（株）が保有するシールド工事の経験と、名古屋工業大学大学院工学研究科・加藤昇平教授のAIアルゴリズムのノウハウを融合したAIシミュレーションプログラムとして構築した^{1),2)}。

シールドAIをシールドトンネル施工に実装し、線形管理方法の省力化に対するAIシステムの有効性を検証する。

4.2 シールドAIを実装したシールド工事の概要

シールドAIを実装したシールド工事の概要を表-4.1に、シールドトンネル施工の平面図、縦断図を図-4.1, 4.2にそれぞれ示す。図中には、「施工計画支援 AI」および「掘進操作支援 AI」システムの検証を行った施工区間を明記した。シールドトンネルは、空港施設の滑走路・誘導路・エプロンのほかに、首都高速道路や国道、共同溝および東京モノレール等に近接し、それらがトンネル線形のコントロールポイントとなっている。非常に複雑なトンネル線形であることから、線形精度の確保が工事の重要課題の1つであった³⁾。

表-4.1 工事概要

工 事 名	東京国際空港隣内トンネル他築造等工事
工 事 場 所	東京都大田区羽田空港内
工 期	平成28年6月7日～令和2年8月31日
発 注 者	国土交通省関東地方整備局
施 工 者	清水・五洋特定建設工事共同企業体
シールド工	泥水式シールド工法（φ11.93m、L=1853.6m）、 合成セグメント（外径11.7m、内径10.7m、直線部B=1.5m、曲線部B=1.2m）



図-4.1 シールドトンネル施工の平面図

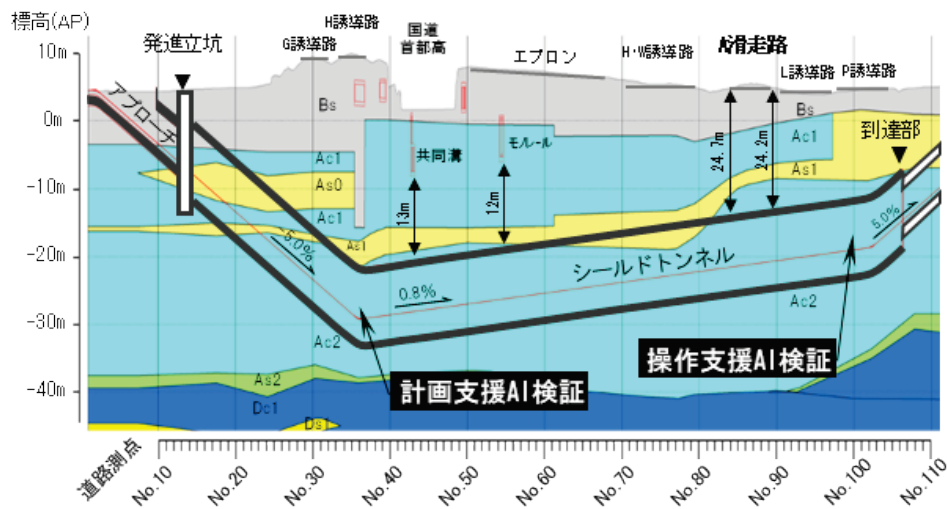


図-4.2 シールドトンネル施工の縦断面図

4.3 シールド AI の概要

4.3.1 施工計画支援 AI^{1),2)}

図-4.3 に施工計画支援 AI によるシールド工事の生産性向上のイメージを示す。シールドの操作では、中折れ機構と余掘り装置を併用しながらシールドジャッキの押し出し長を調節し、計画線形からの蛇行量を基準値内に収められるように管理する。また、主に直線部で使用する標準セグメントと曲線部で使用する異形セグメントを組み合わせることでトンネルを構築する。施工計画支援 AI は、上記のシールドの操作方法やセグメントの割り付け等の検討を支援するシステムであり、図-4.4 にその動作イメージを示す。セグメントの種類や在庫数、トンネル線形等の制約条件の中で、機械学習と遺伝的アルゴリズムを用いてシールドの操作方法やセグメントの割り付けの最適な組み合わせを探索させ、それらを掘進計画に活用することを目的として開発した。

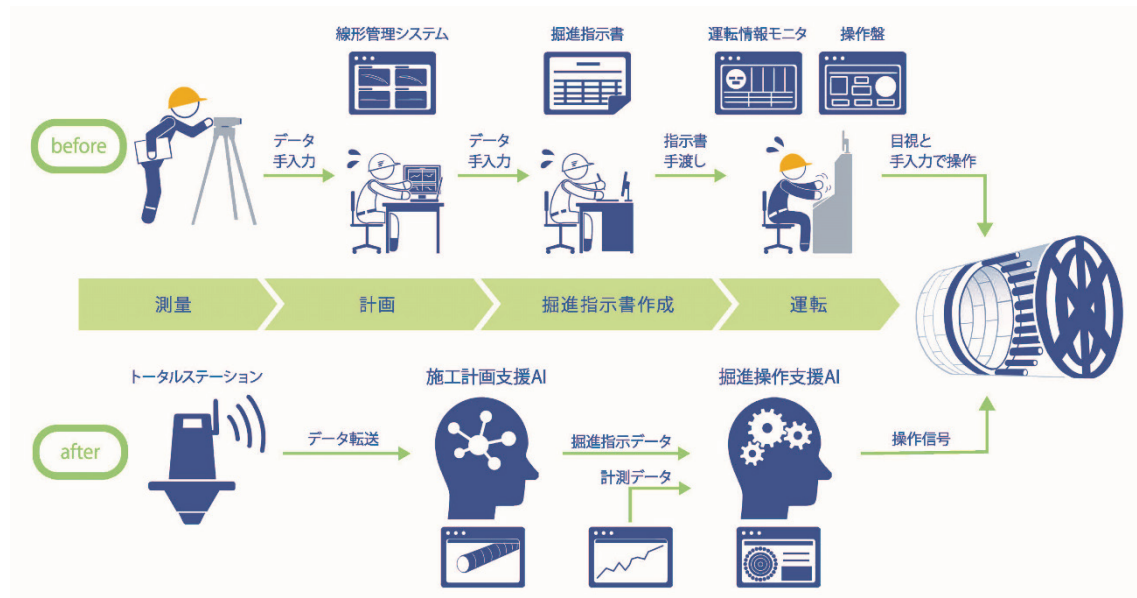


図-4.3 AI によるシールド工事の生産性向上のイメージ

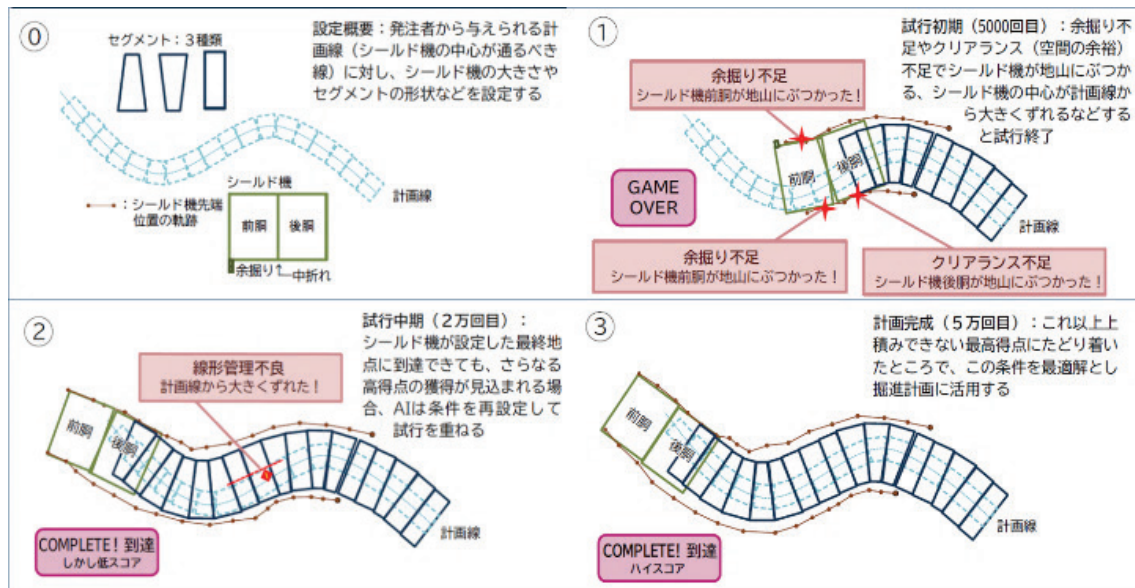


図-4.4 施工計画支援 AI のイメージ²⁾

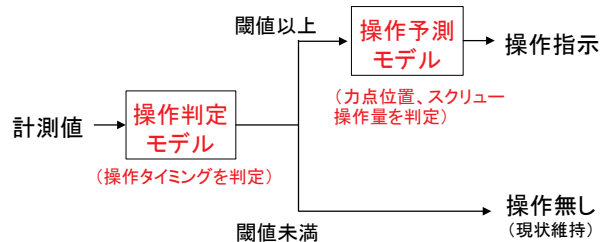


図-4.5 操作支援 AI モデルの構成

4.3.2 掘進操作支援 AI⁴⁾⁻⁶⁾

シールドのオペレーターは、シールドのピッチング値やローリング値に加え、ジャイロコンパス等から得られるシールドの姿勢・方向の情報や、カットトルクや総推力、ジャッキストローク値等、様々な情報を確認しながら、掘進指示書に基づきシールドを操作している。掘進操作支援 AI では、このような膨大な情報を瞬時に分析・判断し、指示書通りの掘進を実現するために、シールドの操作方法の最適解を提供するものである。

(1) 操作支援 AI モデル

施工時には、シールド機から得られるデータ情報(特徴量)は時々刻々と変化するため、それに伴い AI モデルの予測値も変動する。しかし、AI モデルの予測値に合わせて常に操作することは現実的ではない。そこで、図-4.5 に示すように、操作の必要性の有無を判定する「操作判定モデル」と、操作の設定値を判定する「操作予測モデル」の2種類で構成することとした。すなわち、時々刻々のデータで操作が必要な状態かどうかについても AI で判定し、操作が必要な状態であれば操作量を予測して指示するという方式とした。

a) 操作判定モデル

操作判定 AI モデルの学習方法について図-4.6 に示す。まず、①オペレーターが操作したときのレコードと操作しなかったレコードを区別する。基本的には操作しなかったときのレコード数が多いため、両者のバランスをとるため、②に示すようにデータの重みづけを行う。③操作判定値を目的変数とする教師あり学習によって操作判定モデルを作成する。④学習済みの操作判定モデルより出力された予測値から確率分布を求め、操作必要の有無を判定するための閾値を決定する。

b) 操作予測モデル

操作の設定値を予測するモデルは、その設定値を目的変数とする教師あり学習によって作成する。教師データは図-4.6 の④における TP と FN とする。すなわち、操作判定 AI モデルで判定された閾値以上のレコードを使って学習することでオペレーターが必要に応じて操作したときのレコードと、操作する必要があったにもかかわらず操作しなかったときのレコードを用いて学習することで操作変更が必要であると判定されたデータのみを用いることにより、常に操作しないことを推奨とする AI モデルになることを避けることが可能となる。

① 操作有無の判定

② データの重みづけ

操作無レコード			操作有レコード		
レコード番号	操作判定値	重み	レコード番号	操作判定値	重み
1	0	1	1	1	n_0/n_1
2	0	1	2	1	n_0/n_1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n_0	0	1	n_1	1	n_0/n_1

③ 操作判定モデルの作成



④ 閾値の決定

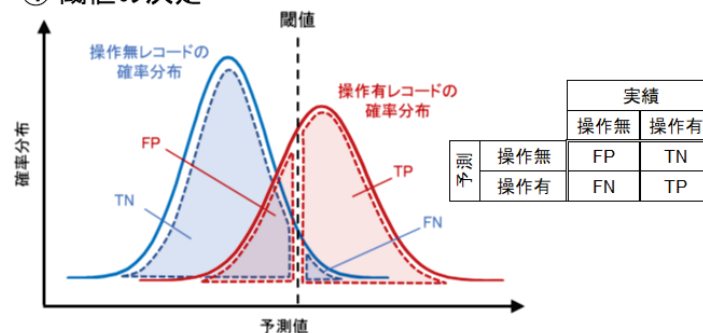


図-4.6 操作判定 AI モデルの学習

(2) ガイダンスシステムの開発

図-4.7 にガイダンスシステム全体のソフトウェアの構成とデータの流れを示す。また、図-4.8 にそのフローチャートを示す。ガイダンスシステムは以下の 5 つのソフトウェアより構成される。

①データ仲介ソフトはシールド機からデータを受け取り、記録するソフトウェアである。

②指示値入力ソフトは、掘進指示書の値を入力するソフトウェアである。後述する管理値及び限界値などもここで入力する。

③入力チェックソフトは、受け取ったデータをチェックするソフトウェアである。図-4.9 にその処理フローを示す。まず、特徴量となるデータを読み込み、データチェック部においてデータの欠損、あるいは計測器の測定範囲外となるようなデータがないかを確認する。そのような状態が継続する時間に応じて異常時、もしくは緊急時を判定し、エラーを表示してオペレーターに判断を仰ぐ。次の土圧・方向チェック部では、チャンバー内土圧が管理値、限界値を越えていないか、さらにシールド機の計画線形からのずれ量(水平偏差、鉛直偏差)や、指示した方位やピッチングとの偏差が管理値・限界値を超えていないかを確認する。管理値を超えた場合は異常時と判定し、限界値を超えた場合は緊急時と判定する。これらの判定機構は将来の自動運転を見据えて備えたものである。最後に、未学習チェック部において AI モデルの学習範囲内のデータであるかを確認する。これらの全てが正常であれば AI モデルにデータを渡して予測させる。

④AI モデルは、(1)で示したように操作の必要性を判定したうえで次の操作量を予測する。

⑤画面出力ソフトは、AI の予測結果などを表示するソフトウェアである。シールドジャッキの操作がしやすいようにジャッキパターン等を表示する機能も持っている。

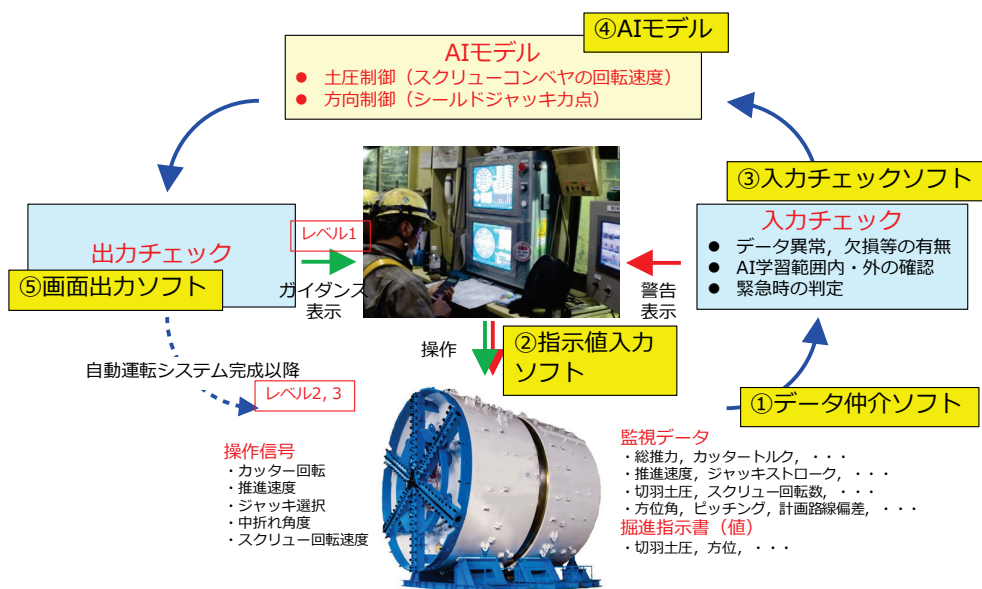


図-4.7 ガイダンスシステムのソフトウェア構成

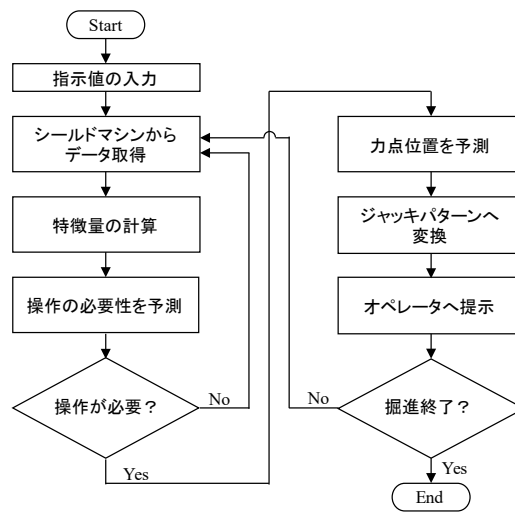


図-4.8 ガイダンスシステムのソフトウェア構成

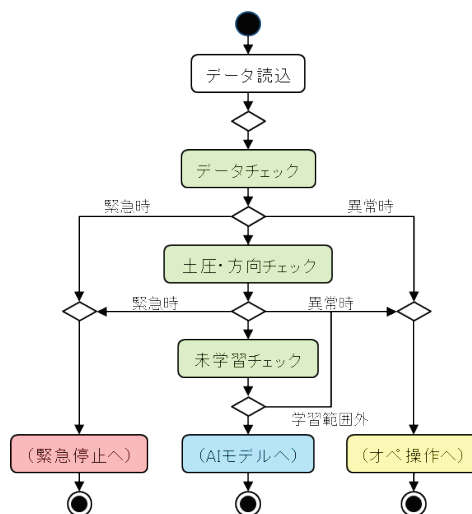


図-4.9 ガイダンスシステムのソフトウェア構成

4.4 シールド AI の実装による有用性の検証

4.4.1 施工計画支援 AI の検証¹⁾

施工計画支援 AI の検証は、図-4.1, 4.2 に示す区間延長 84 m (70 リング分)、平面曲線 $R=220\text{ m}$ 、縦断曲線半径 $R=530\text{ m}$ の三次元縦断曲線を含む区間で実施した。その結果、従来は約 1 週間の手作業を要するところを、汎用 PC を用いて約 15 分で計画を立案し、省力化を実現した。図-4.10 に施工計画支援 AI のモニター表示例を示す。施工計画支援 AI では、テールクリアランスやテールボイド量を制約条件としてセグメントの組立パターンやシールド操作方法等を検討しており、掘進中のテール部の競りや過度な余掘りを防止することができた。

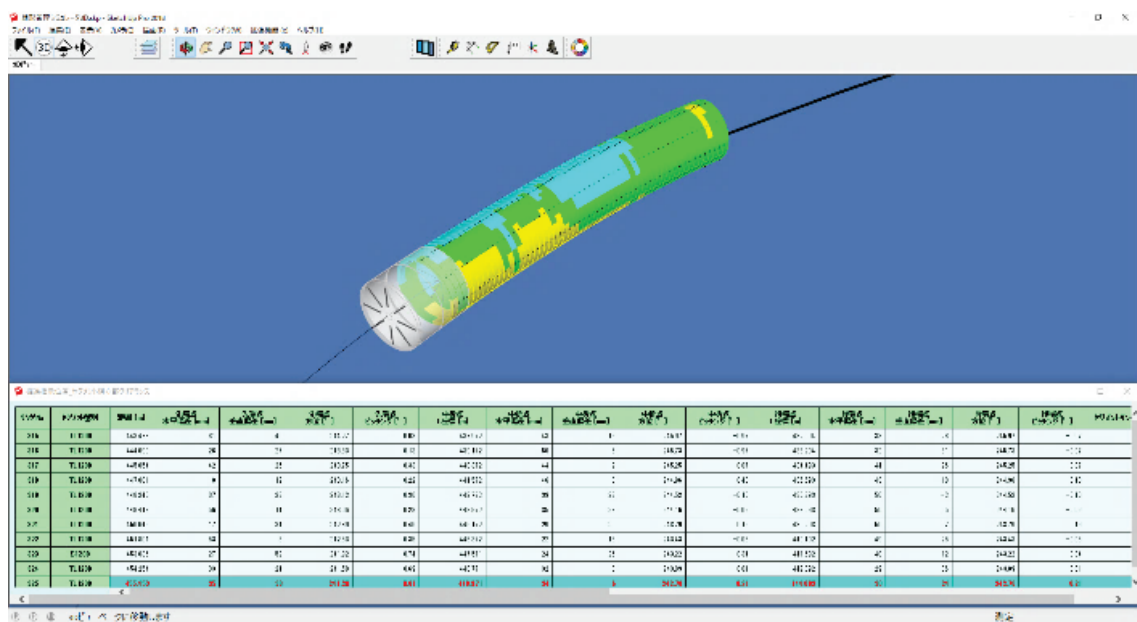


図-4.10 施工計画支援 AI のモニター表示例

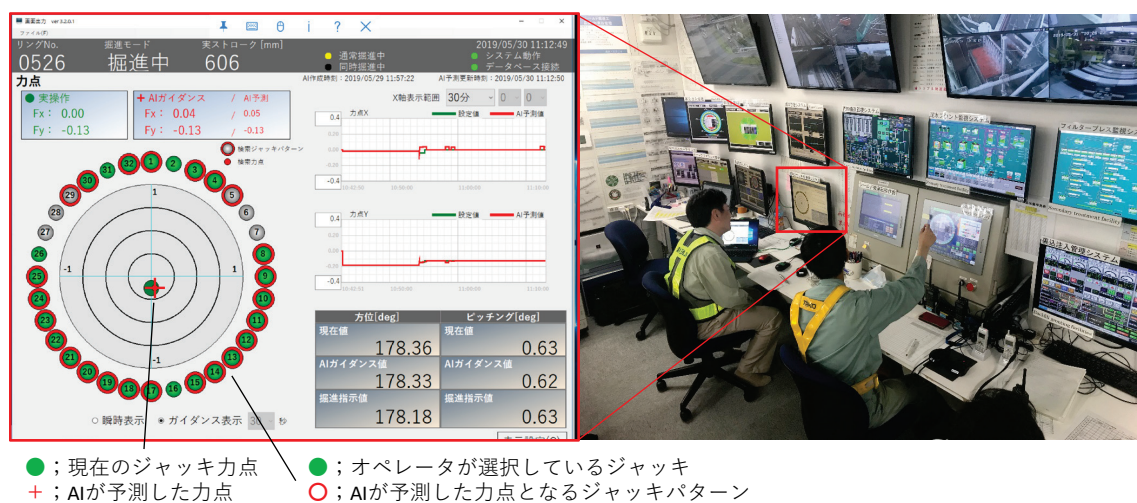


図-4.11 操作支援 AI によるガイダンス運転の実施状況

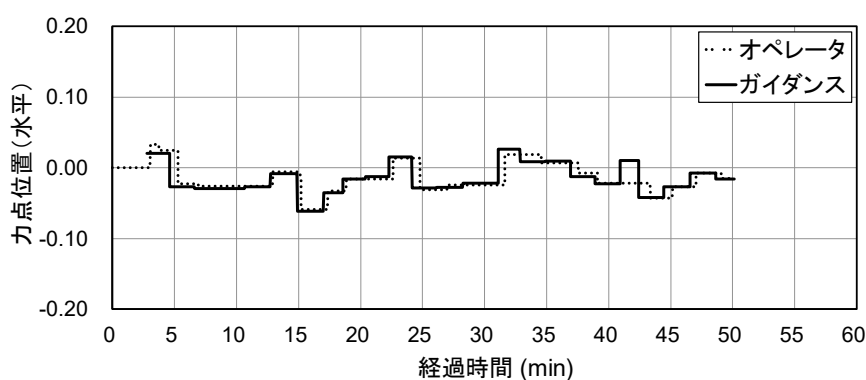
4.4.2 掘進操作支援 AI の検証⁷⁾

掘進操作支援 AI によるガイダンスシステムの検証は、計 3 か所、10 リングにわたって実施した。最初の 2 か所は左カーブ区間と直線区間で行ったが、ガイダンス運転の途中でオペレーターの判断で介入操作が行われたため、完全なガイダンス運転とはならなかった。3 か所目は図-4.1, 4.2 に示した位置であり、1 リング分の掘進をすべて AI のガイダンス通りに掘進することができた。なお、この地点は、上り勾配が 0.8% から 5% に変わりながら曲線半径 220 m の右方向にカーブする区間となっている。

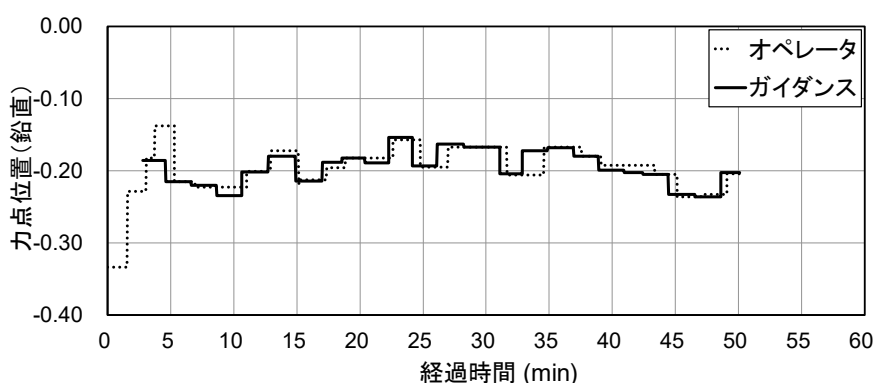
図-4.11 にガイダンス運転の実施状況を示す。オペレーターはガイダンス画面に表示され

たジャッキパターンに従って、使用するジャッキを選択（操作）している。

図-4.12 はガイダンス運転をした場合のシールドジャッキの力点位置の時間推移である。実線は AI が提示した力点を、点線はオペレーターが設定した力点を示している。なお、掘進開始時に AI からの出力が無いのは、特徴量の移動平均値を計算する際に、一定のデータが得られるまで待機する必要があるためである。図-4.13 にガイダンス運転の実施における線形管理項目の時間推移を示す。図中の実線は掘進開始時の各状態値と掘進指示値（最終値）を直線で結んだものであり、点線が観測値である。両者を比較して分かるように、左右ジャッキストローク差と方位角については、掘進終了時の指示値との差がそれぞれ+2 mm, -0.02 deg であり、ほぼ指示通りに掘進できたといえる。しかし、ピッチング角は指示値には近づいているが満足な結果にはならなかった。この要因として、今回検証を行った箇所は勾配が遷移している区間であり、学習データにはこのような区間を掘進したデータが少なく、AI が十分に学習できていなかったためと考える。しかし、いずれの管理項目も許容範囲に収まっており、本システムの適用性を確認することができた。

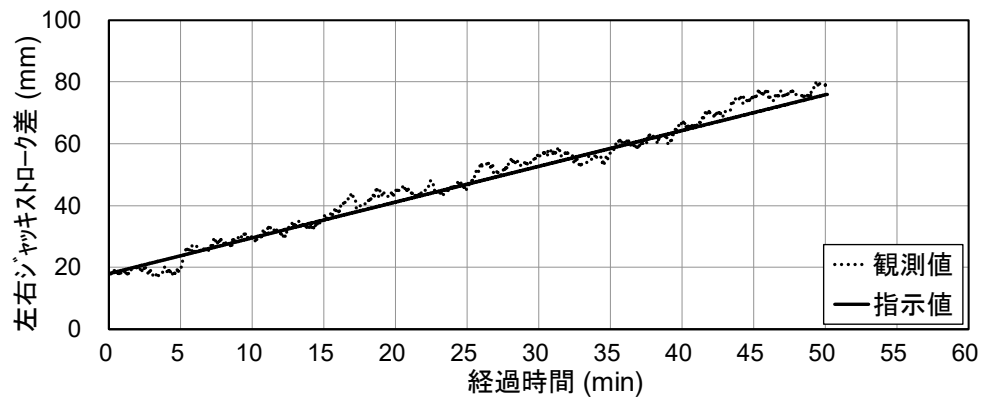


(a) 水平方向

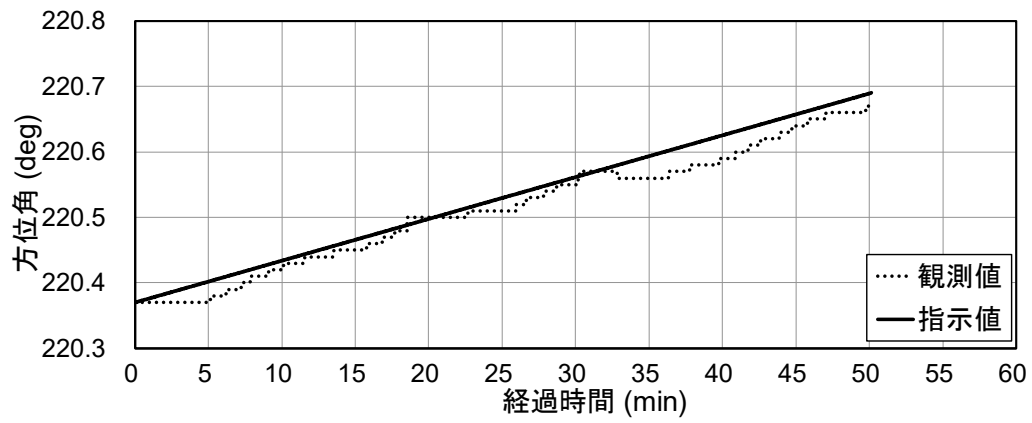


(b) 鉛直方向

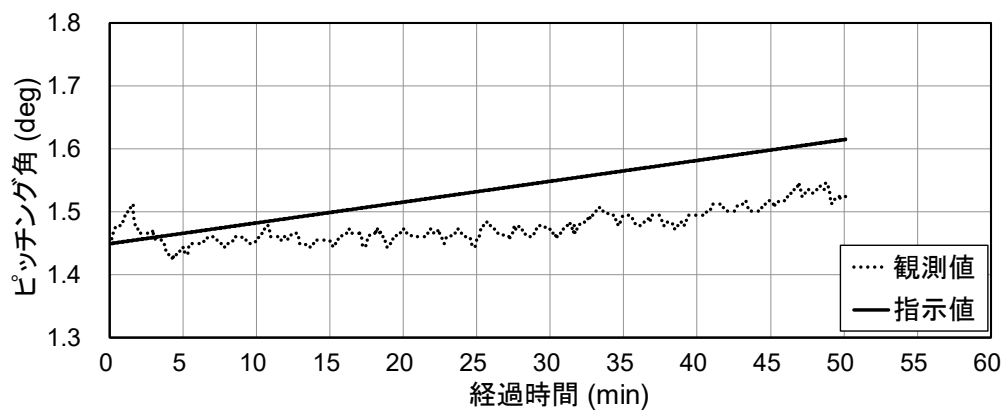
図-4.12 シールドジャッキ推力の力点の時間推移



(a) 左右ジャッキストローク差



(b) 方位角



(c) ピッチング角

図-4.13 線形管理項目の時間推移

4.5 まとめ

本章では、シールド機運転管理の高度化を目的として、シールド工事における掘進計画の立案およびシールドの操作指示を支援するツールとして人工知能 (Artificial Intelligence ; AI) を用いたシールド AI システムを開発した。シールド AI システムは、掘進計画を支援する「施工計画支援 AI」およびシールドの操作を支援する「掘進操作支援 AI」の2つにより構成され、これらをシールドトンネル施工に実装し、線形管理方法の省力化に対する AI システムの有効性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 施工計画支援 AI は、シールドの操作方法やセグメントの割り付け等の検討を支援するシステムである。セグメントの種類や在庫数、トンネル線形等の制約条件の中で、機械学習と遺伝的アルゴリズムを用いてシールドの操作方法やセグメントの割り付けの最適な組み合わせを探索させる機能を有しており、それらを掘進計画に活用することが可能である。
- (2) 施工計画支援 AI を実際のシールドトンネル施工に実装し、その有効性を検証した。区間延長 84 m (70 リング分)、平面曲線 $R=220\text{ m}$ 、縦断曲線半径 $R=530\text{ m}$ の三次元縦断曲線を含む区間で実施したところ、従来は約 1 週間の手作業を要するのに対し、約 15 分で施工計画の立案が可能であった。
- (3) 掘進操作支援 AI は、シールドの姿勢・方向の情報等の膨大な情報を瞬時に分析・判断し、指示書に示された掘進を実現するために、シールドの操作方法の最適解を提供するシステムである。本研究では、この掘進操作 AI にシールドを直接操作させるのではなく、ガイダンスシステムを介して、シールドオペレーターにジャッキパターン等の操作方法の選択肢をリアルタイムにガイダンス画面に表示して使用した。
- (4) 掘進操作 AI を実際のシールドトンネル施工に実装し、計 3 か所、10 リングにわたって掘進操作のガイダンスを実施して、その有効性を検証した。最初の 2 か所は左カーブ区間と直線区間で行ったが、ガイダンス運転の途中でオペレーターの判断で介入操作が行われたため、完全なガイダンス運転とはならなかった。3 か所目は上り勾配が 0.8% から 5% に変わりながら曲線半径 220 m の右方向にカーブする区間であり、1 リング分の掘進をすべて AI のガイダンス通りに掘進させた。その結果、左右ジャッキストローク差と方位角については、掘進終了時の指示値との差がそれぞれ +2 mm、-0.02 deg であり、ほぼ指示通りに掘進できた。一方で、ピッチング角は指示値には近づいているが、大きな誤差が生じた。この要因として、学習データには同様の線形条件のデータが少なく、AI が十分に学習できていなかったためと考えられた。しかし、いずれの管理項目も許容範囲に収まっており、本システムの有効性を確認することができた。

今後、施工計画支援 AI と「掘進操作支援 AI」の両 AI システムを統合し、さらには自動測量システムとデータを連動させることで、計画から施工までのシールド工事の完全自動運転の実施が可能になると考える。

参考文献：

- 1) 増田湖一，新宮康之，杉山博一，和田健介，安井克豊，加藤昇平，鈴木 誠，田崎仁久：AI によるシールド掘進合理化技術の開発状況報告，令和 2 年度土木学会全国大会（第 75 回年次学術講演会），VI-556, 2020.
- 2) 伊原滉也，加藤昇平，増田湖一，新宮康之：シールド工法における幾何シミュレーションを用いたセグメント割付の進化的最適化，人工知能学会全国大会論文集，205-GS-13-03, 2020.
- 3) 安井克豊：AI によるシールド工事の計画・施工の省力化，建設機械，2022 年 9 月号，2022.
- 4) 杉山博一，和田健介，中谷武彦，大木智明：人工知能によるシールド機操作に関する予備的検討，平成 29 年度土木学会全国大会（第 72 回年次学術講演会），VI-338, 2017.
- 5) 和田健介，杉山博一，野澤剛二郎，本多 眞，中谷武彦，大木智明：AI によるシールド機の自動方向制御，平成 30 年度土木学会全国大会（第 73 回年次学術講演会），VI-143, 2018.
- 6) 和田健介，杉山博一，野澤剛二郎，本多 眞：シールドマシンの操作特性を考慮した自動操縦 AI モデル，令和元年度土木学会全国大会（第 74 回年次学術講演会），VI-814, 2019.
- 7) 増田湖一，新宮康之，杉山博一，和田健介，安井克豊，加藤昇平，鈴木 誠，田崎仁久：AI によるシールド掘進合理化技術の開発状況報告，令和 2 年度土木学会全国大会（第 75 回年次学術講演会），VI-556, 2020.
- 8) 和田健介，杉山博一，野澤剛二郎，本多 眞，西田 充，鈴木 誠，田崎仁久：AI を用いたシールド機用ガイダンスシステムの実証実験，令和 2 年度土木学会全国大会（第 75 回年次学術講演会），VI-557, 2020.

第5章 地盤変状計測管理の高度化

5.1 概説

シールド工法における最も重要な課題は、掘進による近接構造物や埋設物に対する環境影響を最小限に抑制することである。特に、シールド通過前から通過後において、シールド周辺地盤の応力解放や付加的な圧力の作用やシールドのスキンプレートと周辺地盤との摩擦、そして、テールボイドの充填量不足などの影響によって経時的に発生する地盤の隆起や沈下現象などの地盤変状の把握は非常に重要である¹⁾。そのため、シールド掘進の進捗に合わせて、シールド直上付近の地表面の変状を水準測量等で計測し、その変状に応じて切羽圧力や裏込め注入等を制御することで、地盤変状の抑制を図っている。したがって、シールド掘進に伴う地盤変状の連続的かつリアルタイム計測方法の構築は、シールドトンネル施工上の重要な課題である。特に、重要な社会基盤施設内においてシールド工事を実施する場合には、計測作業のための立ち入りが制限され、計測機器も常設できない場合が多いため、水準測量の実施や測量機器を用いた自動計測は困難となる。

このようなシールド工事においては、計測対象地点に直接機器を設置することなく、広範囲を短時間で計測できる遠隔計測の応用が期待されている。本研究では、シールド工事における地盤変状の計測方法の高度化として、マイクロ波を利用したリモートセンシング技術あり、環境計測や社会インフラ計測に広く利用されている合成開口レーダー（SAR；Synthetic Aperture Radar）手法に着目し、地上設置型合成開口レーダー（Ground Based SAR、以下 GB-SAR と記す）を用いた遠隔計測方法の有用性を検討する。GB-SAR はレーダー装置を地表付近に固定して利用する合成開口レーダーシステムであり、その計測原理は衛星や航空機に搭載された SAR と同様であるが、定点観測が可能である特長を活用して、近年、防災や社会インフラモニタリングなどの分野における実用化が試みられている^{2),3)}。しかし、シールド掘進に伴う地盤変状の監視作業に GB-SAR を適用した事例は見られない。

そこで、地盤変状計測上の制約が大きい空港用地内の滑走路や誘導路などの重要構造物の直下を通過するシールド工事において、シールド掘進に伴う地盤変状の遠隔計測手法として GB-SAR を適用する。適用に際しては、まず、シールド掘進に先立って、空港敷地内にて GB-SAR による変位計測の精度確認試験を実施し、シールド掘進時においては、滑走路や誘導路が閉鎖される深夜の時間帯に実施した水準測量による地盤変状の計測値および GB-SAR による計測値との比較を行う。これらの計測事例に基づいて、空港敷地内でのシールド工事における地盤変状の遠隔計測管理方法としての GB-SAR の有用性および今後の課題について論述する。

一方、都市部での埋め立て地盤におけるトンネル工法の選定にあたっては、用地確保の問題や交通渋滞などの面から、開削工法の選定が難しい。また、非常に軟弱な沖積層から洪積層における掘削施工となるため、トンネル周辺地山の支保機能を有効に活用する山岳工法の

採用は困難である。したがって、非開削であり、切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながらトンネルを構築するシールド工法が多用されている。一般に、このような埋め立て地は、軟弱な海底地盤上に造成されるため、粘土地盤の過剰な沈下・変形を抑制するために圧密促進工法などによる軟弱地盤対策が実施されており、プラスチックドレーン材や袋詰サンドドレーン材の網袋のような人工物が埋設されている場合がある。また、埋め立て材として浚渫土などの建設発生土が使用される場合が多いため、埋め立て地の地盤は不均質となることや、埋め立て中に鋼矢板や鋼管杭等の人工物が残置される場合もある。

このような埋め立て地盤の特性によって、地盤の不均質性に起因する土水圧の急激な変化による地盤変状リスクや、残置人工物によるシールドの掘進不能などのリスクの発生が懸念される。これらのリスク低減方法を検討することは、埋め立て地盤における泥水式シールド工法を実施する場合の地盤変状管理において重要である。そこで、本研究では、泥水式シールド工法における代表的な地盤変状リスクおよびシールド機の掘進不能リスクを整理し、埋め立て地盤におけるシールドトンネル施工に適用した具体的なリスク対応ならびに低減対策について、その有効性を検証する。

以上より、本章では、地盤変状計測管理の高度化に関して、以下の2項目について論述する。

- ① 地盤変状の計測方法の高度化として、立ち入りが制限される施工用地内の地盤変状計測方法として、GB-SARを用いた遠隔計測手法を適用し、従来の水準測量と比較した場合の利点および課題について論述する。
- ② 地盤変状の発生に対するリスク対応の高度化として、泥水式シールド工法が埋め立て地盤において遭遇する地盤変状リスクおよびシールド機の掘進不能リスクを列挙し、それらのリスク低減対策について論述する。

5.2 立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測手法

5.2.1 空港敷地内でのシールド工事における GB-SAR を用いた地盤変状計測方法

(1) 空港敷地内での地盤変状計測における制約条件

空港敷地内におけるシールド工事では、地盤変状の計測のために滑走路や誘導路等の空港施設内へ立ち入ることは、夜間の限定された時間帯を除いては不可能である。そのため、従来の水準測量による地盤変状のリアルタイム計測は実施できない。また、その他の地盤変状の計測方法としては、舗装帯に埋設した計測機器で遠隔監視する方法や、遠隔地からレーザーなどで直接計測する方法が挙げられる。前者については、水平傾斜計や光ファイバーを舗装帯に埋設する方法等があるが、計測範囲が広いため、埋設する機器の量が膨大となり、空港施設管理者との協議や機器設置に長期間を要するためなどの課題がある。後者については、空港施設周辺の緑地帯にノンプリズムのトータルステーションを設置して計測する

方法等があるが、緑地帯に設置する機器の設置高さが 300 mm 以下という制約があるため、緑地帯より高い位置にある滑走路や誘導路表面の計測は困難である。また、立入制限区域の境界から水平距離が数百メートル以上となる計測地点もあることから、立入制限域外からのトータルステーションによる計測手法の採用も困難である。

それ以外の計測手法として、衛星に搭載された SAR による方法⁴⁾が提案されているが、現在の衛星の回帰日数（計測頻度）が 11 日周期程度であり、リアルタイム計測には適していない。また、航空機や管制塔に向けて光が照射される可能性のある測量方法は回避しなければならない。また、電磁波や無線機器の使用は、管制塔と航空機との通信を妨害する可能性があり、空港関係者への確認手続きに多くの時間を要するなど課題が多い。そこで、これらの制約条件を鑑みて、空港施設内でのシールド掘進時に発生する地盤変状の遠隔計測方法として、光波、音波、電波などを用いた計測方法に比較して安全性に優れたマイクロ波を利用したレーダー計測方法である GB-SAR を採用した。

(2) GB-SAR 装置の概要

GB-SAR は、地表に固定したレール上に送受信レーダーアンテナを移動させながら取得した計測値に対して合成開口レーダー信号処理を行うことで、2 次元 SAR 画像を得ることができる。定点における連続計測が可能であるため、繰り返し計測による SAR 干渉処理を行うことで高精度な面的観測が期待され、地表面などの反射体微小変位を検知できる利点を有している²⁾。さらに、繰り返し計測を行ったデータに対して干渉処理を行うことで、実用的には計測波長の 1/100 の精度で変位計測が実現できることが実証されている²⁾。GB-SAR の計測上での特徴は、以下のようにまとめられる。

- 1) 観測対象物にセンサなどの設置が不要である
- 2) 長距離及び広範囲での観測データの取得が可能である
- 3) 24時間の常時監視を短い時間間隔で実施可能である
- 4) 天候による影響を受けにくく、視界が悪い時にも使用可能である
- 5) 面的な変位分布を高精度で観測可能である

実務上の難点は、現在、市販されている GB-SAR 装置は 4 機種程度であり、いずれも海外製品³⁾であるため、装置のリース代や設置・撤去などに必要な費用は非常に高額であること、総務省への事前申請が必要であり、許可されるまで長期間を要することである。しかし、GB-SAR は今後、国内での使用実績の増加により、国内計測技術者の育成や計測費用の軽減が期待される計測技術である。多数の設置センサを必要とせず、非破壊かつ遠隔計測によって安全に常時広範囲での観測データの取得が可能である GB-SAR による計測手法は、空港敷地内のシールド工事における地盤変状の計測方法として、従来法には見られない大きな利点を有する。

(3) 使用した GB-SAR 装置の仕様

使用した GB-SAR 装置は IBIS-FL (Ingegneria Dei Sistemi, Italy) である。そのレーダーアンテナ周波数は 17.175 GHz、計測波長は約 17 mm であるため、変位計測の精度は、前述したように計測波長の 1/100 に相当する 0.17 mm となるが、これは理想的な計測条件下において期待

される精度であることに留意する必要がある。このレーダー波長は光波の波長に比べると非常に大きいため、光波を用いた観測方法に比べて空気中の粉塵等の影響を受けにくく、観測可能距離が50 mから4000 mと非常に長いことが特徴である。ただし、SAR衛星で用いられている波長（Lバンドでは150 mmから300 mm）に比べて小さいため、植生などで覆われた地表面の変状を捉えることは困難であり、気象の影響を受けることも指摘されている⁵⁾。

GB-SARを用いて地盤変位計測を行う際には、その計測精度を支配するレーダー波の照射角度が重要である。例えば、レーダー波の地表面への入射角が浅い（小さい）場合には、レーダー波の反射率が低く、信号対雑音比(S/N比)が悪くなるために、安定した計測が困難であることが知られている。そのため、レーダー波の照射度は大きく（垂直に近く）することが望ましく、GB-SAR装置は可能な限り地表面より高い位置に設置する必要がある。本研究で適用した工事では、GB-SAR装置によるレーダー波を、シールド掘進区間に照射できる空港敷地内の高い場所は極めて限定されていたため、図-5.1に示した高層建築物（ユーティリティセンタービル、地上高さ41 m）を選定し、その屋上に組み上げた鉄製フレーム上に写真-5.1のように設置した。GB-SAR装置は、送・受信アンテナ部を長さ2 mのレール上で移動させてレーダー波を送・受信した。また、GB-SAR装置の1走査に要する時間は110秒である。GB-SARの視野は約80度であるため、シールドトンネル施工全線を網羅するために、シールド掘進に合わせてGB-SAR装置の計測方向を回転させることで、図-5.1中に示したGB-SARの計測範囲1～3を設定した。ここで、計測範囲3では、水平計測距離が最長900 m程度の計測地点が存在しており、その場合のレーダー波の入射角は非常に小さくなるため、計測精度の事前検討が必要である。GB-SARによる対象計測地点における地盤変位は、図-5.2に示すようにレーダー波の照射方向（距離方向）のレンジ分解能 ΔR と直交する方向の方位分解能 ΔCR によって構成される地表面上の画素（ピクセル）毎に、次式によって測定される。

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (5.1)$$

$$\Delta CR = r \frac{\lambda}{2L} \quad (5.2)$$

ここで、 c : 光の速度、 B : 占有周波数帯域幅、 r : レーダーから計測地点までの水平距離、 λ : 波長、 L : GB-SAR装置を設置したレール長

計測対象への入射角 θ は式(5.3)より算出されるため、鉛直方向における変位計測精度 D_v は次式より求められる。

$$\theta = \arctan \left(\frac{H}{r} \right) \quad (5.3)$$

$$D_v = \frac{D_h}{\sin\theta} \quad (5.4)$$

ここで、 H ：GB-SAR 装置の設置高さ、 D_v ：垂直方向の変位計測精度、 D_h ：視線方向の変位計測精度

今回用いたGB-SAR装置は、 $B=200$ MHz、 $\lambda=17$ mm、 $L=2$ mであるため、式(5.1)により ΔR は0.75 mと算出される。そこで、地上高さ41 mに設置したGB-SAR装置からの水平距離が900 m先を計測する場合、 ΔCR は式(5.2)により3.83 mとなる。その際、計測対象への入射角 θ は式(5.3)より2.6度と算出されるため、視線方向の変位計測精度 D_h は前述したように波長の1/100の変化検知できると仮定すれば0.17 mmとなるため、地表面の鉛直方向の変位計測精度 D_v は式(5.4)より3.7 mmとなる。したがって、理論上では、シールド掘進時に発生する地盤変状（沈下または隆起）は、計測水平距離900 mにおいて3.7 mmの精度で観測できる。

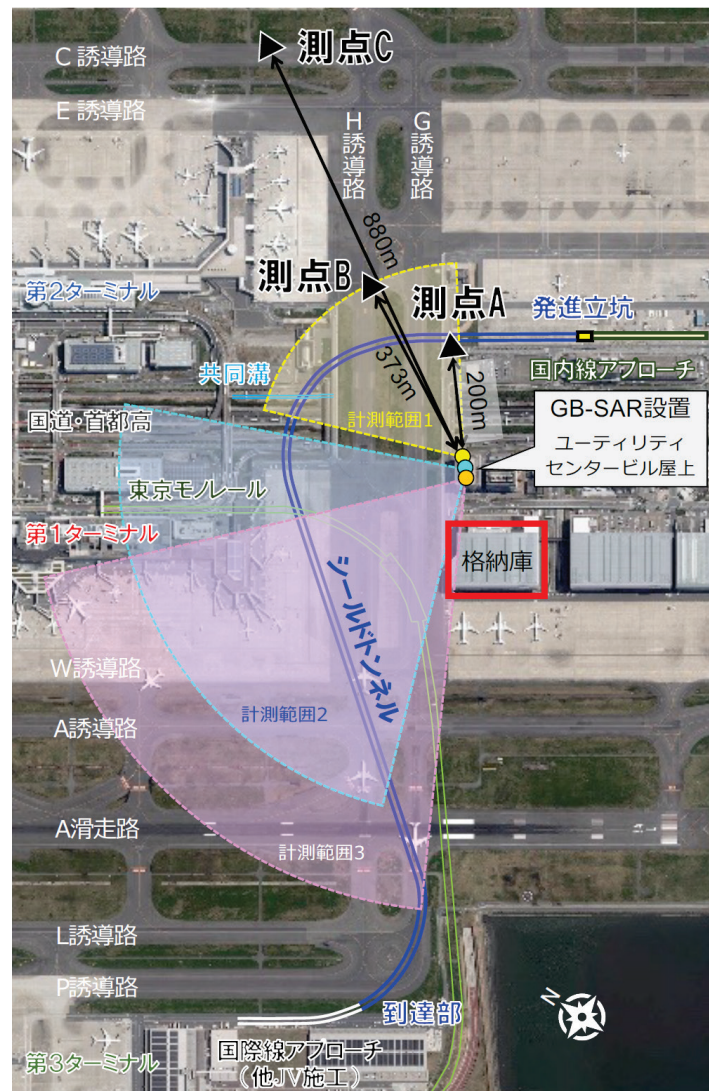


図-5.1 GB-SARの設置場所と計測範囲および測点の位置



写真-5.1 高層ビル屋上に設置したGB-SAR装置

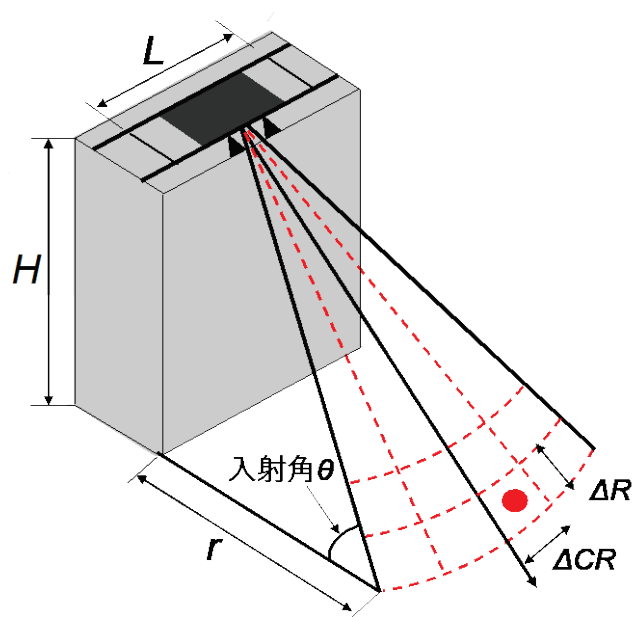


図-5.2 GB-SARによる地盤変状の計測分解能

5.2.2 GB-SAR による変位計測精度の検証

(1) 変位計測精度の確認試験の概要

シールド掘進に先立ち、空港敷地内に選定した 3 地点において、GB-SAR による水平および鉛直方向の変位計測精度を確認する試験を実施し、シールド掘進に伴う地盤変状の計測管理への GB-SAR の適用性を検討した。変位計測地点は、その周辺に遮蔽物が存在しないなど、比較的条件的の良い場所を選定し、空港内の制限区域外に測点 A を、制限区域内に測点 B と測点 C を設置した。GB-SAR 装置および測点 A～C の平面配置は図-5.1 中に示した。これらの測点における GB-SAR 装置までの水平測線距離、式(5.3)により計算されるレーダー波の入射角度、そして、式(5.4)により計算される鉛直方向の変位計測精度 D_v を表-5.1 に整理した。また、表中には、各測定において GB-SAR により地盤変状を測定できる地表面上の一面素分解能 ΔR および ΔCR も併記した。

表-5.1 GB-SAR による計測変位の確認試験における試験条件

測定点		水平測線 距離 r (m)	レーダー波 入射角度 θ (度)	変位計測精度(mm)		地表面上での分解能(m)	
番号	場所			水平方向 D_h	鉛直方向 D_v	レンジ分解能 ΔR	方位分解能 ΔCR
A	制限区域外	200	11.3		0.87		0.85
B	制限区域内	373	6.5	0.17	1.50	0.75	1.59
C		880	2.9		3.36		3.74

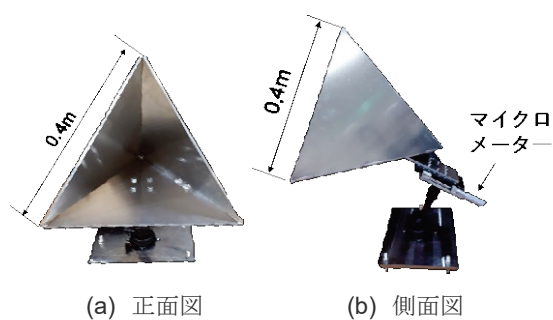


写真-5.2 コーナーリフレクター
(測点 A および測点 B)

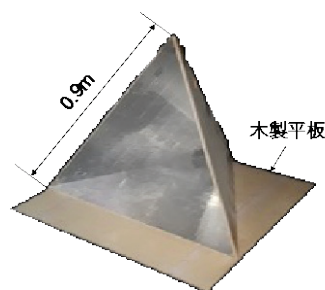


写真-5.3 コーナーリフレクター (測点 C)

(2) 水平方向変位計測試験

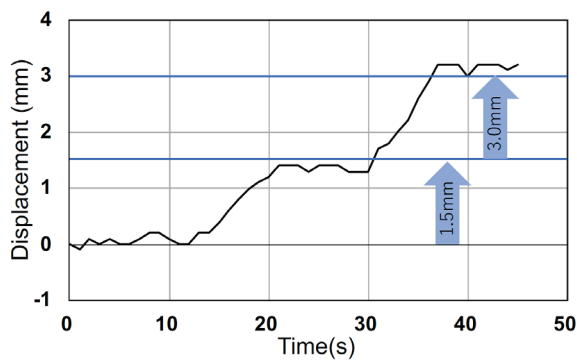
a) 試験方法

GB-SAR による計測可能な水平距離を確認することを目的として、反射強度の強い理想的な測定条件下において水平方向変位の計測試験を実施した。そのため、GB-SAR からのレーダー波を到来方向へ正確に反射させるための電波照射対象物として、直角二等辺三角形のアルミ板を3面につなぎ合わせたコーナーリフレクター（CR）を用いた。測点 A と測点 B では、写真-5.2 に示す 1 辺が 0.4 m の CR をマイクロメーターを介して脚の上に固定し、手動により移動距離を 0.1 mm の精度で調整できるように設置した。一方、測点 C では、GB-SAR 装置からの水平測線距離が長いので、写真-5.3 に示すように、木製平板の上に一边が 0.9 m の CR を置いて、手動により移動距離を 0.5 mm の精度で調整できるように設置した。

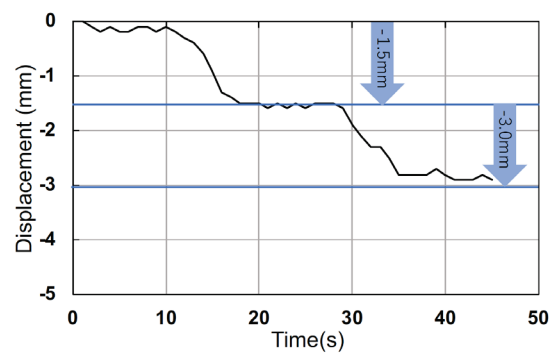
各測点において、概ね一定の時間内にこれらの CR を GB-SAR に対して前進または後退させる操作をそれぞれ 2 回ずつ連続的に行なって、GB-SAR からの測線距離を微小変化させ、その微小変化挙動を GB-SAR によって測定した。各測点において 1 回に移動させた CR の微小距離は、測点 A では、前進、後退時ともに 1.5 mm、測点 B では、前進時が 3 mm、後退時が 2 mm、そして、測点 C では、前進、後退時ともに 2.5 mm である。

b) 水平方向変位の計測精度

各測点において、GB-SAR によって計測された水平方向変位の変化を図-5.3～図-5.5 に示す。図中に矢印で示した数値は、CR を前進または後退させた際に GB-SAR による計測値から得られた移動量である。これらによれば、GB-SAR による計測値は CR の動きに追従し、それらの平均移動量は CR の前進および後退時ともに、測線長が 200 m（測点 A）では、CR の移動量に一致した計測値が得られ、測線長が 340 m（測点 B）および 880 m（測点 C）においても、その誤差は 0.1 mm 程度であった。これらは表-5.1 に示す水平方向の変位計測精度 0.17 mm と同程度であり、コーナーリフレクターを使用したレーダー波の反射強度が高い測定条件下においては、実用上十分な計測精度が得られることが確認された。したがって、式(5.4)に示した鉛直方向の計測精度を得るためには、レーダー波の反射強度および計測対象への入射角 θ が担保されることが重要である。

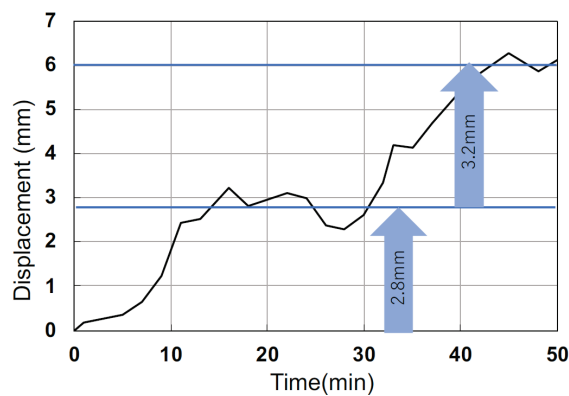


(a) CR を 1.5mm ずつ 2 回後退させた場合

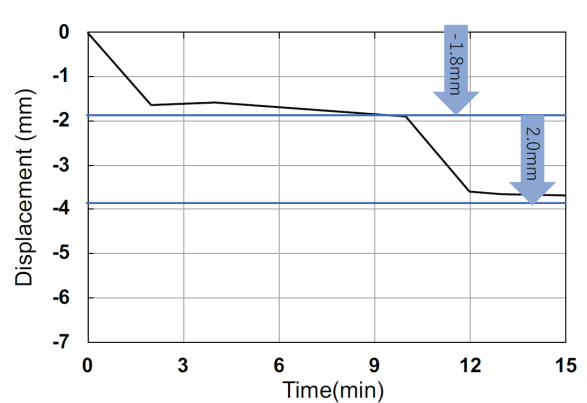


(b) CR を 1.5mm ずつ 2 回前進させた場合

図-5.3 GB-SAR による水平変位の計測 (測点 A)

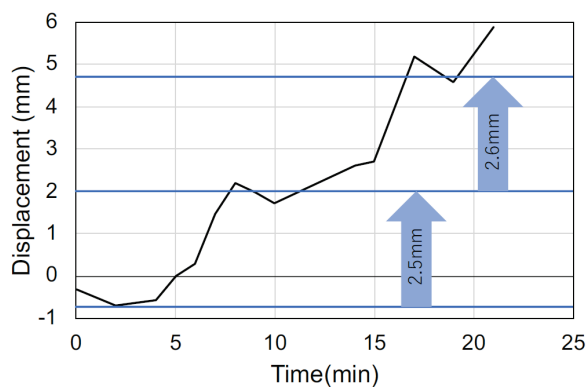


(a) CR を 3mm ずつ 2 回後退させた場合

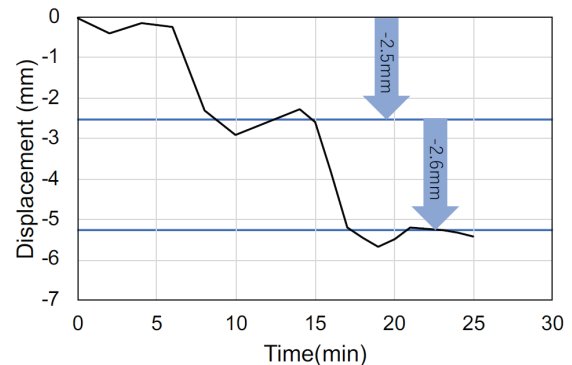


(b) CR を 1.5mm ずつ 2 回前進させた場合

図-5.4 GB-SAR による水平変位の計測 (測点 B)



(a) CR を 2.5mm ずつ 2 回後退させた場合



(b) CR を 2.5mm ずつ 2 回前進させた場合

図-5.5 GB-SAR による水平変位の計測 (測点 C)

(3) 鉛直変位計測試験

a) 試験方法

当該空港は軟弱地盤上に建設されているため、年間に 10 mm 程度の圧密沈下が確認されている⁹⁾。また、空港内の制限区域内に設定した測点 B と測点 C では、測点周辺での地盤改良工事や航空機の走行振動などの要因により、日常的な地盤変状が生じていると推察した。そこで、これらによって発生している地盤の鉛直変位を GB-SAR によって計測し、同時間帯に水準測量によって得られた鉛直変位と比較することで検証した。表-5.1 に示した GB-SAR による地表面上での計測分解能を確認するために、レンジ分解能 ΔR および方位分解能 ΔCR の範囲をそれぞれ包含する矩形平面領域の隅角部の 4 点と中央点の計 5 測量点において水準測量を実施し、それらの平均値との比較を行った。

実施した水準測量は、1～2 級水準点を既知点として、2 級レベル・標尺を使用した 2 級水準測量であり、国土地理院の定める水準測量の製品仕様書品質の要求及び評価^{注 4)}に準拠して実施した。GB-SAR との比較に用いた水準測量における平均観測距離は約 40 m であり、2 級水準測量における前回の観測高低差との較差の許容範囲（計測精度）は 1 mm 以内を確保した。矩形平面領域の大きさは、測点 B では、 ΔR 方向 1.8 m $\times$ ΔCR 方向 2.7 m、測点 C では、 ΔR 方向 1.0 m $\times$ ΔCR 方向 5.0 m である。

b) 鉛直変位の計測精度

測点 B において、GB-SAR による地表面変状の計測を 2019 年 2 月 14 日 12 時より 48 時間連続して実施し、計測開始時を初期値とした相対変化量の挙動と計測期間中に実施した水準測量との比較を図-5.6、および表-5.2 に示す。図中には、表-5.2 に示した GB-SAR による計測値を赤字で、水準測量による計測値を青字で示した。ここで、表-5.2 中に示した GB-SAR の計測値は水準測量を実施した計測日時と同時刻における計測値（瞬間値）である。なお、計測時刻の前後 5 分間を含めた GB-SAR による計測値のばらつきは最大で 0.1 mm 程度であったため、GB-SAR による計測値は水準測量との比較が可能であると判断した。

水準測量では、24 時間経過後の地表面変状は 1 mm の沈下が計測された。水準測量と同じ計測時刻間での GB-SAR によって計測された地表面変状は 2.4 mm の沈下であった。図-5.6 によれば、GB-SAR によって計測された鉛直変位には 0.5～1.0 mm 程度のばらつきが見られるものの、それらの計測値の平均値は比較的安定した値を示している。例えば、水準測量実施後、周辺の工事車両による影響がない 6 時から 12 時までの 6 時間においては、鉛直変位の相対変化量の平均値は、2 月 15 日が -2.5 mm、2 月 16 日が -3.4 mm であった。そのため、これらの計測時間帯前後での相対変化量の平均値の差は約 0.9 mm の沈下（=-3.4 mm - (-2.5 mm)）であり、水準測量による計測結果である 1.0 mm の沈下に近い値であると言える。

2 月 16 日 0 時～6 時の期間（図-5.6 中の着色部分）では、GB-SAR による鉛直変位の相対変化量は大きく変動しており、この 6 時間の計測時間帯の前後では、鉛直変位が 1 mm 程度、不連続に変化している。これらの原因としては、同時時間帯には当該計測範囲付近におい

て地盤改良工事が実施されており，その影響を受けて不連続な地盤変状が発生したものと推察される．さらに，測点 B の近傍に工事用車両が駐車されており，GB-SAR より照射されたレーダー波が工事用車両によって乱反射し，その反射波がノイズとして表れたためと推察される．なお，工事用車両が移動した 2 月 16 日 6 時以降に GB-SAR によって計測された相対変化量の平均値は，前述したように-3.4 mm であり，2 月 15 日 2 時からの相対変化量は 0.7 mm の沈下（=-3.4 mm - (-2.7 mm)）となる．これらより，GB-SAR による地表面変状の計測では，水準測量に近い値が得られた．

表-5.2 測定された地盤変状の比較（測点 B）

計測日時 (2019年)	GB-SAR			水準測量	
	相対変動量 (mm)	地盤変状 (mm)		計測地盤高 (A.P.m)	地盤変状 (mm)
		(2)-(1)	(3)-(1)		
(1) 2月15日 2時	-2.7	-	-	8.165	-
(2) 2月16日 2時	-5.1	-2.4	-	8.164	-1.0
(3) 2月16日12時	-3.4	-	-0.7	-	-

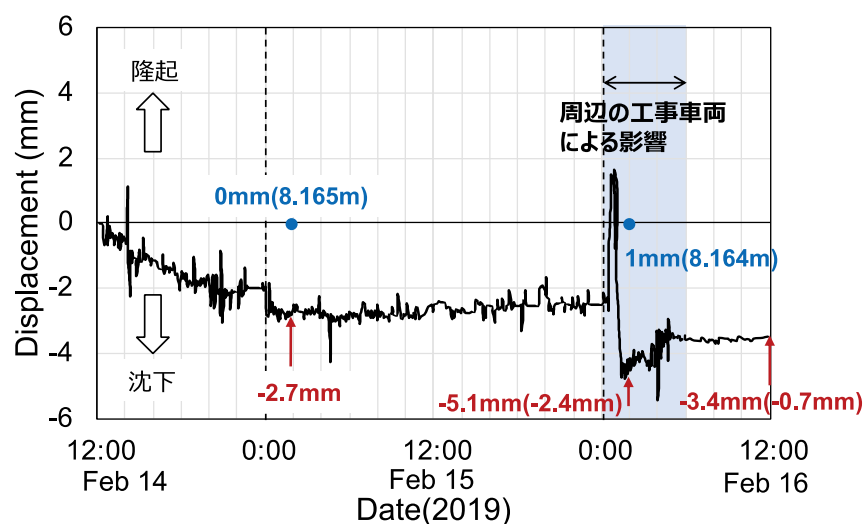


図-5.6 GB-SAR による鉛直変位の計測（測点 B）

測点 B において、降雨時に GB-SAR による地盤変状を計測した事例を図-5.7 に示す。降雨のあった時間帯には地盤変状の計測値に ± 10 mm 程度の変動が見られた。その原因としては、地表面の水溜まりにレーダー波が乱反射し、計測が不安定になったためと推察される。なお、本施工で用いた GB-SAR 装置には、気温、湿度、気圧、降雨量、および風速を計測する気象観測システムが装備されており、気温、湿度、および気圧が計測値に与える影響については、自動的に補正がなされている。しかし、降雨が計測値に与える影響については、その主要因が地表面の水溜まりなどにレーダー波が不規則に乱反射することによるものと考えられ、それらの補正は困難である。したがって、降雨量の計測値は、GB-SAR による計測値に乱れが発生した場合、その要因を考察するための気象情報として用いた。また、強風時に大きな地盤変状（8.5 mm 以上）が瞬間値として計測された場合には、強風による GB-SAR 計測器の振動が原因であると判断して欠測扱いとした。これらの計測事例によれば、降雨時や工事用車両などによりレーダー波の遮蔽される状況下での計測を回避すれば、水準測量と同等の計測精度が期待でき、水準測量の実施が困難な場合においても地盤変状の把握が連続して可能であるため、有用な計測方法である。

測点 C において、GB-SAR による地表面変状の計測を 2019 年 3 月 21 日 23 時より 99 時間連続して実施し、計測開始時を初期値として、その相対変化量の挙動を図-5.8 に示した。この期間中に実施した水準測量との比較を表-5.3 に示す。2 回の水準測量では、96 時間経過後の地表面変状としては 1.0 mm の隆起が計測された。これに対し、GB-SAR では、同時間帯での地表面変状は同様に 1 mm の隆起が測定された。これらより、本施工においては、GB-SAR による地表面変状の計測は、水準測量とほぼ同等の鉛直変位の計測が期待できる。

以上、GB-SAR による水平および鉛直方向の変位計測精度を確認する試験によれば、シーールドトンネル施工全線においても水準測量と同精度の計測が可能であり、シーールド掘進に伴う地盤変状の計測管理に GB-SAR を適用できる。

表-5.3 測定された地盤変状の比較（測点 C）

計測日時 (2019年)	GB-SAR		水準測量	
	相対変動量 (mm)	地盤変状 (mm)	計測地盤高 (A.P.m)	地盤変状 (mm)
		(2)-(1)		(2)-(1)
(1) 3月22日0時	0.0	-	6.413	-
(2) 3月26日0時	1.0	1.0	6.414	1.0

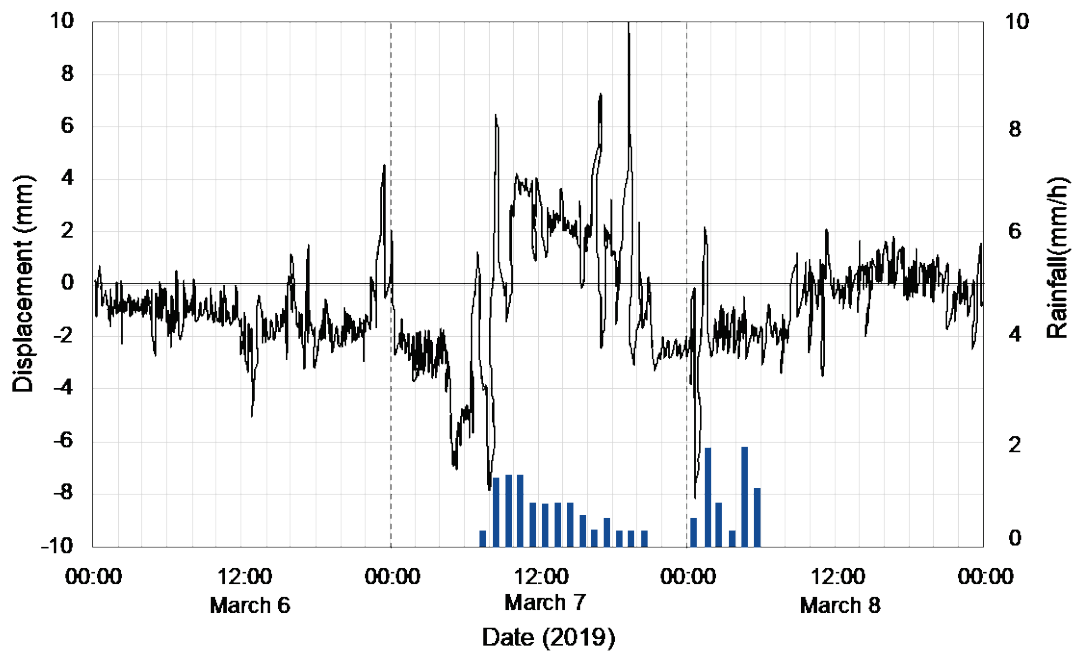


図-5.7 降雨時の GB-SAR による鉛直変位の計測（測点 B）

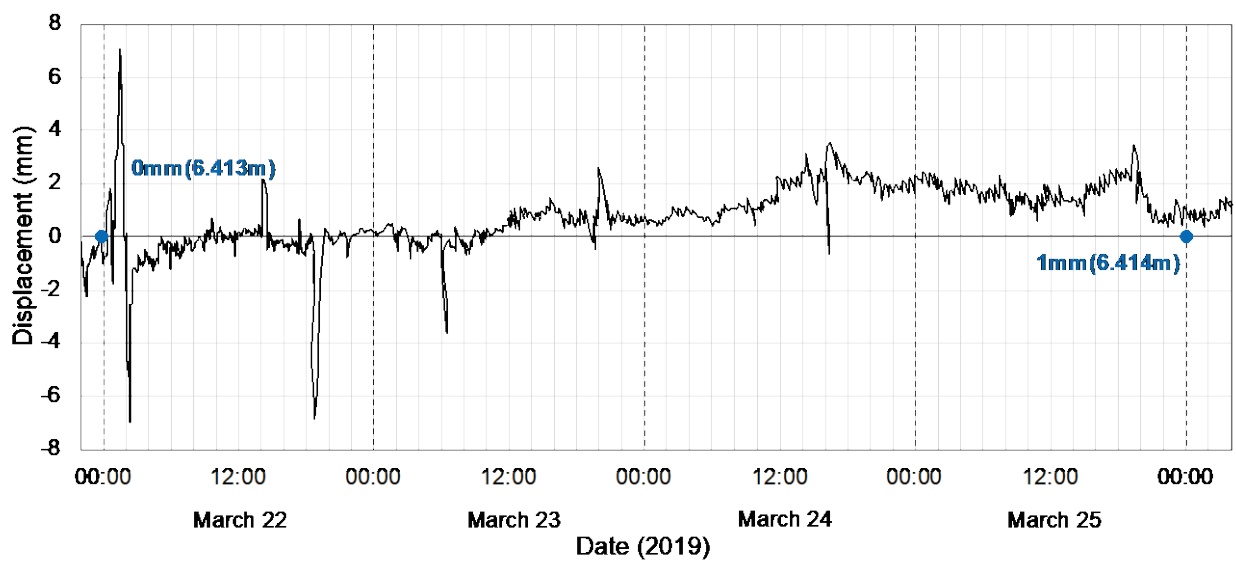


図-5.8 GB-SAR による鉛直変位の計測結果（測点 C）

5.2.3 空港敷地内でのシールド掘進時における地盤変状のGB-SARによるリアルタイム計測事例

(1) 計測概要

当該シールドトンネル全線区間のうち、図-5.1 に示した計測範囲 1～3 のそれぞれにおいて、GB-SAR 法による地盤変状計測を実施した。計測範囲 1 は G 誘導路および H 誘導路の周辺、計測範囲 2 は第 1 ターミナルの駐機場（エプロン）部の周辺、そして、計測範囲 3 は H 誘導路、G 誘導路、W 誘導路、A 誘導路および A 滑走路の周辺が主な計測対象である。これらの計測範囲において、空港内道路の中心に配置されている道路測点のうち、トンネル全長においてほぼ 20 m 間隔にて複数の測点をシールド路線上に選定した。選定された道路測点の番号と計測期間を表-5.4 に示す。これらの道路測点のうち、14 測点においてシールド掘進期間中に GB-SAR と水準測量とによる地盤変状の計測比較を実施した。GB-SAR は 110 秒に 1 回の計測を連続して実施し、水準測量は毎日深夜 0 時頃に 1 回実施した。

計測範囲 1～3 において GB-SAR 法と水準測量の比較を行った道路測点の位置を図-5.9 に示す。これらの道路測点は、GB-SAR 法と水準測量による地盤変状量の計測値が同様の傾向を示した測点と各道路測点の有する特徴に起因して異なる傾向を示した測点をそれぞれ選定した。計測された地盤変状量の比較を図-5.10～5.12 に示す。なお、GB-SAR による地盤変状の計測値は、水準測量の実施時刻に近い計測時刻での計測値とするために、各計測日において、0 時を過ぎて最初に計測された瞬間値をプロットした。これらの計測事例に基づいて、GB-SAR 法による地盤変状計測の精度や特性を考察する。

表-5.4 地盤変状の計測点として用いた道路測点

計測 範囲	道路測点 No.	計測期間（2019年）	
		開始	終了
1	27～45	3月27日	5月20日
2	49～81	5月24日	7月1日
3	56～95	7月4日	9月26日



(a) 計測範囲 1



(b) 計測範囲 2



(c) 計測範囲 3

図-5.9 GB-SAR 法と水準測量の比較を行った道路測点

(2) GB-SAR 法と水準測量による地盤変状計測の比較

a) 計測範囲 1

図-6.10 に道路測点 No.37 と No.38 での計測事例を示す。道路測点 No.37 は緑地帯内に設置し、その緑地帯に隣接する側道上に道路測点 No.38 を設置した。そのため、それらの地点標高の差は、道路測点 No.38 が道路測点 No.37 よりも 0.34 m 程度低い状況であった。道路測点 No.37 の位置する緑地帯では、GB-SAR による計測時には除草を実施し、植生の高さによる影響を低減させた。GB-SAR からの水平計測距離は道路測点 No.37 が 300 m、道路測点 No.38 が 305 m である。

図-5.10 によれば、道路測点 No.37 では、シールドマシンのカッターヘッドが通過した 4 月 14 日以後に、地盤が緩やかに沈下する傾向が GB-SAR 法および水準測量によって計測されている。GB-SAR 法の計測値には、ややばらつきが見られるものの、水準測量と同等の結果を示している。一方、道路測点 No.38 では、シールドマシンのカッターヘッドが通過した 4 月 16 日以後において、水準測量では地盤が緩やかに沈下する傾向が測定されているが、

GB-SAR 法ではこのような地盤沈下傾向を計測できておらず、水準測量との地盤変状の差は 20 mm 程度である。このように計測精度が低下した原因としては、道路測点 No.38 の地点標高が隣接する緑地帯（道路測点 No.37 を設置）よりも 0.34 m 程度低いために、GB-SAR から照射されたレーダー波がこの緑地帯の影響を受けたためであると推察される。

b) 計測範囲 2

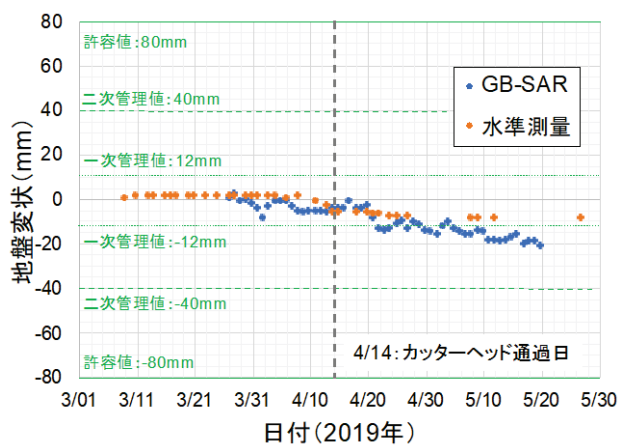
図-5.11 に道路測点 No.53 と No.57 での計測事例を示す。これらの道路測点は第 1 ターミナル駐機場に近く、GB-SAR からの水平計測距離は道路測点 No.53 が 322 m、道路測点 No.57 が 320 m である。図-5.11 によれば、道路測点 No.57 では、シールドマシンのカッターヘッドが通過した 6 月 20 日以後において、GB-SAR 法によって計測された地盤変状は水準測量とほぼ同等の挙動を示している。一方、道路測点 No.53 では、シールドマシンのカッターヘッドが通過した 6 月 12 日以後において水準測量によって計測された地盤の沈下傾向は、GB-SAR 法では計測できておらず、水準測量との地盤変状の差は 15 mm 程度である。

このようにシールド掘進時における地盤変状量の測定傾向が異なった要因としては、各道路測点と駐機する航空機とのそれぞれの位置関係や駐機頻度、地上支援車両の影響等の差異が考えられる。図-5.9(b)中に航空機の駐機スポット No.1～No.3 の位置を赤○で示した。第 1 ターミナルにおける駐機スポットの大きさは、No.2 と No.3 は同じであり、No.1 はやや小さい。道路測点 No.53 は駐機スポット No.1 と No.2 の両方に近接しており、道路測点 No.57 は駐機スポット No.3 に近接している。駐機された航空機までの水平距離は道路測点 No.53 では 5 m 程度であるのに対して、道路測点 No.57 では 25 m 程度であり、両者には 5 倍程度の差がある。これらのことから、道路測点 No.53 では、駐機された航空機やその地上支援車両によりレーダー波が反射する影響を道路測点 No.57 に比較して強く受けたと推察した。

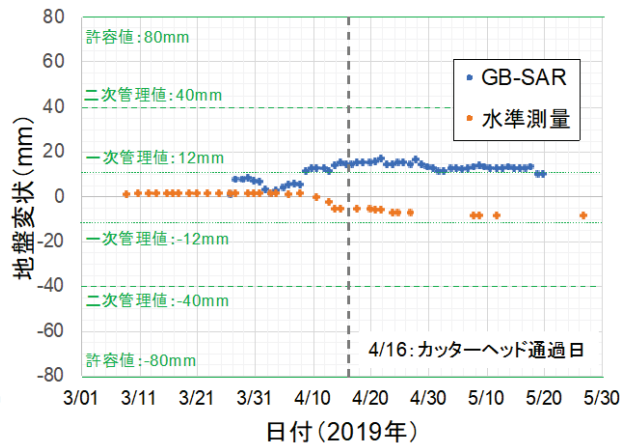
c) 計測範囲 3

図-5.12 に道路測点 No.66 と No.80 での計測事例を示す。GB-SAR からの水平計測距離は道路測点 No.66 が 356 m、道路測点 No.80 が 552 m である。道路測点 No.66 では、シールドマシンのカッターヘッドが通過した 8 月 12 日以後の地盤沈下傾向は、GB-SAR 法によって水準測量と同様に計測されている。一方、道路測点 No.80 では、シールドマシンのカッターヘッドが通過した 9 月 20 日以後に、GB-SAR 法では水準測量とは異なる地盤変状傾向が計測されている。

この原因としては、道路測点 No.80 ではレーダー波の反射強度が弱い状態であったことが要因であると推察される。これは水平計測距離の増加に伴ってレーダー波の入射角が低下することに加えて、計測範囲 3 では、図-5.1 に示すようにレーダー波が GB-SAR を設置した高層ビルの南西に隣接する航空機の格納庫（図-5.1 中に赤い矩形で表示）による乱反射の影響を受けており、計測範囲 3 の南部に位置している道路測点 No.80 に対するレーダー波の照射は、その影響を強く受けたと推察される。

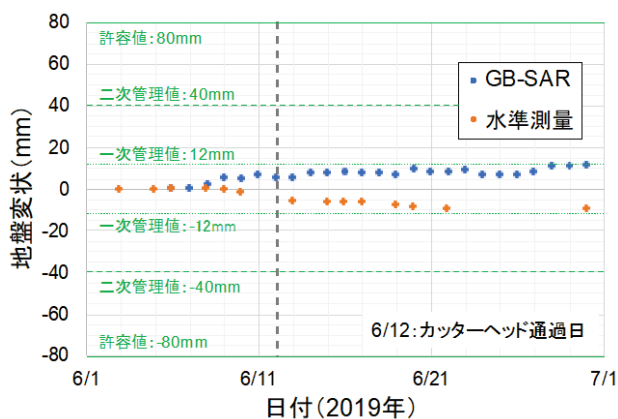


(a) 道路測点 No.37 (水平計測距離 300 m)

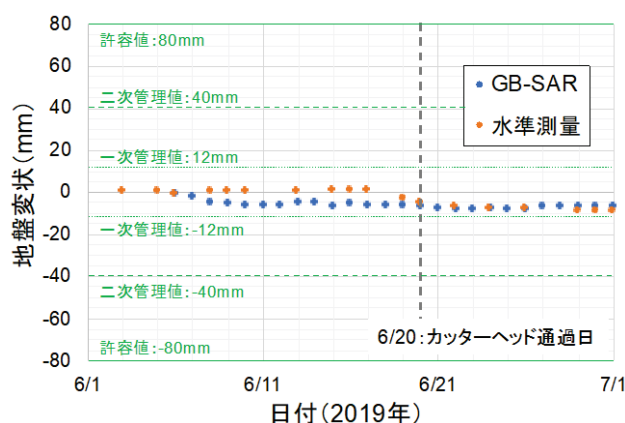


(b) 道路測点 No.38 (水平計測距離 305 m)

図-5.10 シールド掘進時における地盤変状量の測定事例 (計測範囲 1)

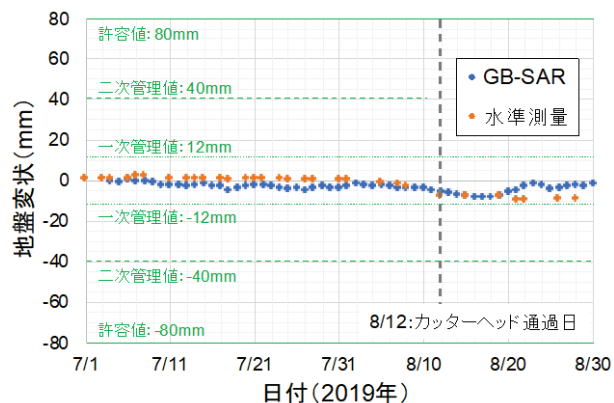


(a) 道路測点 No.53 (水平計測距離 322 m)

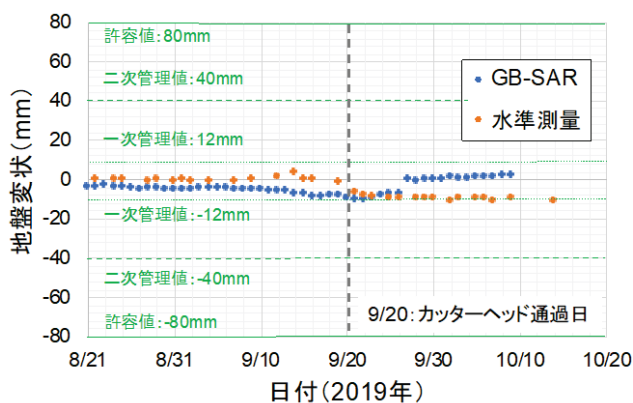


(b) 道路測点 No.57 (水平計測距離 320 m)

図-5.11 シールド掘進時における地盤変状量の測定事例 (計測範囲 2)



(a) 道路測点 No.66 (水平計測距離 356 m)



(b) 道路測点 No.80 (水平計測距離 552 m)

図-5.12 シールド掘進時における地盤変状量の測定事例 (計測範囲 3)

(3) GB-SAR 法を用いた地盤変状の計測管理

本工事において、シールドトンネル掘進時の滑走路や誘導路における地表面変状の一次管理値は $\pm 12 \text{ mm}$ 、二次管理値は $\pm 40 \text{ mm}$ であり、許容値は $\pm 80 \text{ mm}$ と設定された⁷⁾。そのため、GB-SAR を用いた地盤変状の計測管理に要求される鉛直変位の計測精度は 10 mm 程度である。前述した計測事例によれば、この測定精度が得られた水平計測距離は 350 m 程度であったため、それ以上の水平計測距離においては、GB-SAR は一次管理値以上の地盤変状（沈下または隆起）をリアルタイムで感知するための計測方法として用いた。その際、GB-SAR による計測値は、シールドマシンのカッターヘッドが当該箇所を通過した時点を中心値として用い、地盤変状の発生が確認された場合には、水準測量の計測値と比較しながら、地盤変状の計測管理を実施した。

GB-SAR 法による地盤変状計測では、水平計測距離の増加によって、レーダー波の入射角が小さくなる場合には、計測精度が低下するため、計測精度を担保できるレーダー波の入射角や可能水平計測距離を把握しておく必要がある。本施工では、水平計測距離 350 m におけるレーダー波の入射角は、式(3)より 6.7 度と算出されるため、入射角がこれ以上に大きくなるような計測地点では、図-5.10～5.12 に示すように、地盤変状を水準測量との計測値の差を $5 \sim 10 \text{ mm}$ 程度以下で計測し、地盤変状の傾向を把握できる。そのためにも、GB-SAR 機器を可能な限り高く設置するなど、レーダー波の入射角を大きくする工夫が望まれる。シールド掘進期間中に GB-SAR と水準測量とによる地盤変状の計測を実施した 14 の道路測点において、レーダー波の入射角が鉛直変位の計測精度に与える影響を考察するために、レーダー波の入射角と GB-SAR と水準測量による鉛直変位の差の関係の整理を試みたが、本施工では、レーダー波の入射角以外による水準測量との差異の発生要因（周辺の建物によるレーダー波の乱反射の影響など）を排除できる測点が限定されたため、明確な傾向を認めることは困難であった。

GB-SAR 法では、計測点の近傍に緑地帯、車両、構造物などのレーダー波の遮蔽物や降雨などによる水溜まりが存在する場合には、レーダー波の乱反射により計測が不安定になる。そのため、GB-SAR 機器の設置場所を工夫し、レーダー波の照射範囲を狭め、その照射方向を細かく変更するなどの方法により、測線上の遮蔽物を回避し、周辺からの反射波の影響を抑制する対策を行うことが望ましい。また、用いた GB-SAR 装置では、1 回の走査時間である 110 秒内にレーダー波長の 2 分 1 に相当する 8.5 mm 以上の急激な地盤変状が発生した場合には、その把握は不可能である。一般的に、シールド工事においてこのような地盤変状が生じることは考えにくいだが、本工事では、支障物撤去部を水みちとして泥水が瞬間的に噴出し、構造物を持ち上げてしまうような特殊な状況が発生した⁹⁾。そこで、このような予期せぬ急激な地盤変状リスクの検知や降雨などによる気象状態を把握するために、高感度望遠カメラなどにより計測地点の状況を常時モニタリングできる方法を援用することが望ましい⁸⁾。

5.3 埋め立て地盤における泥水式シールド工法による地盤変状リスクの低減

5.3.1 シールド工事概要

研究の対象となるシールド工事概要を表-5.5 に、シールドトンネル施工の平面図，縦断図を図-5.13, 5.14 にそれぞれ示す。シールドトンネルは，埋立地内の不均質で超軟弱な地盤において，供用中の空港施設の滑走路・誘導路・エプロンのほかに，首都高速道路や国道，共同溝および東京モノレール等に近接することから，これらの近接構造物への影響を最小限に抑えることが本工事の最重要課題の1つであった。

表-5.5 工事概要

工 事 名	東京国際空港隣内トンネル他築造等工事
工 事 場 所	東京都大田区羽田空港内
工 期	平成28年6月7日～令和2年8月31日
発 注 者	国土交通省関東地方整備局
施 工 者	清水・五洋特定建設工事共同企業体
シールド工	泥水式シールド工法（ $\phi 11.93\text{m}$ ， $L=1853.6\text{m}$ ）， 合成セグメント（外径 11.7m ，内径 10.7m ，直線部 $B=1.5\text{m}$ ，曲線部 $B=1.2\text{m}$ ）
内部構築工	プレキャストボックスカルバート据え付け工， 流動化処理土充填工
発 進 立 坑	地中連続壁工法， $L=28.7\text{m}$ ， $W=16.7\text{m}$ ， $H=18.5\text{m}$
ア プ ロ ーチ	函渠部 $L=63.0\text{m}$ （ $W=13.3\sim 13.7\text{m}$ ， $H=7.6\sim 8.0\text{m}$ ）， U型擁壁部 $L=156.5\text{m}$ （ $W=10.5\sim 12.9\text{m}$ ， $H=1.0\sim 12.9\text{m}$ ）
地 盤 改 良	流動化処理土置換工， 砂圧入式静的締固め工法
そ の 他	舗装工，排水工，標識工



図-5.13 シールドトンネル施工の平面図

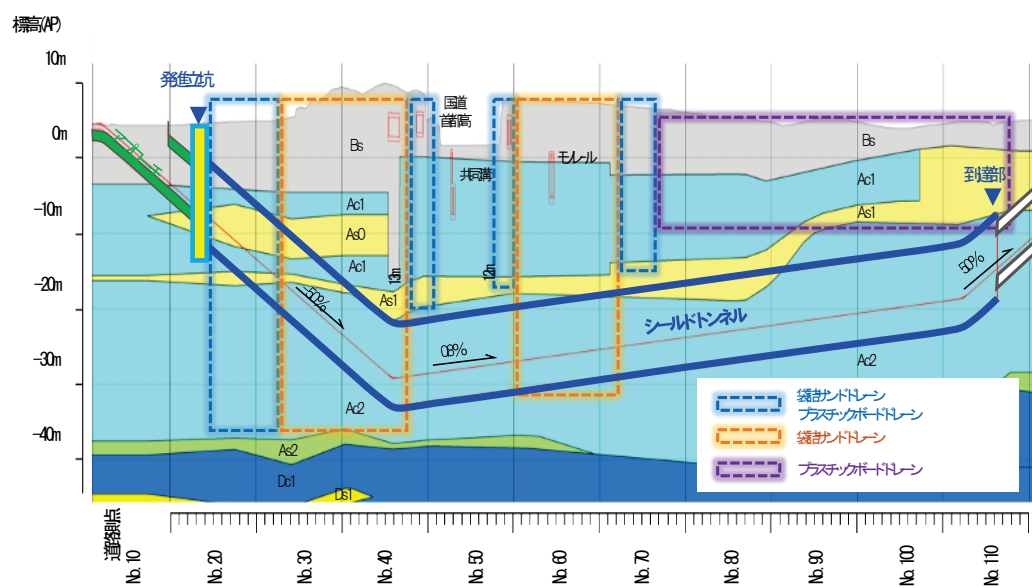


図-5.14 シールドトンネル施工の縦断図

5.3.2 想定される地盤変状等のリスクおよび事前対策

図-5.14 に示すように、トンネルが通過する地盤は沖積粘性土層（Ac2 層）を主体とする砂層との互層となっている。当該地域では、昭和 40 年代に上部砂層（As1 層）が浚渫床掘され、その上に東京湾の航路などを浚渫したヘドロ（Ac1 層）や建設発生土（Bs 層）によって埋め立てられた超軟弱地盤であり、各種の地盤改良が実施されている⁹⁾。このため、本工事で想定される地盤変状リスクは、地盤中に残置された人工物によるシールドの掘進不能などがあり、以下に、その代表的なものについて述べる。

(1) 地盤改良区間における地盤改良材の閉塞

掘削対象地盤には、図-5.14 に示すように袋詰サンドドレーン材やプラスチックドレーン材などの地盤改良材が存在している。一般的なシールドマシンにおけるカッタービットでは、地盤改良材の切断は困難と想定され、シールド掘進時には、シールド上部に存在する地盤改良材を引き込んで地山を乱し、大きな地盤変状が発生する恐れがある。また、地盤改良材がシールド内に取り込まれた際には、カッタースリットや排泥口で地盤改良材による目詰まりが発生し、切羽水圧の急激な変動による地盤変状や、チャンバー内閉塞による掘進不能が懸念される。そこで、以下に記す対策を実施し、地盤改良材の切断、取り込み、排出がスムーズに行われるように工夫した。

a) ブレードカッター・連続刃の装備

東京国際空港内で過去に施工されたシールド工事¹⁰⁾においては、地盤改良材の切断実績を有するブレードカッターおよび連続刃が採用されていた。ブレードカッターは、図-5.15、写真-5.4 に示すように、カッターの回転に伴い公転しブレードカッター薄刃）を高速で回転

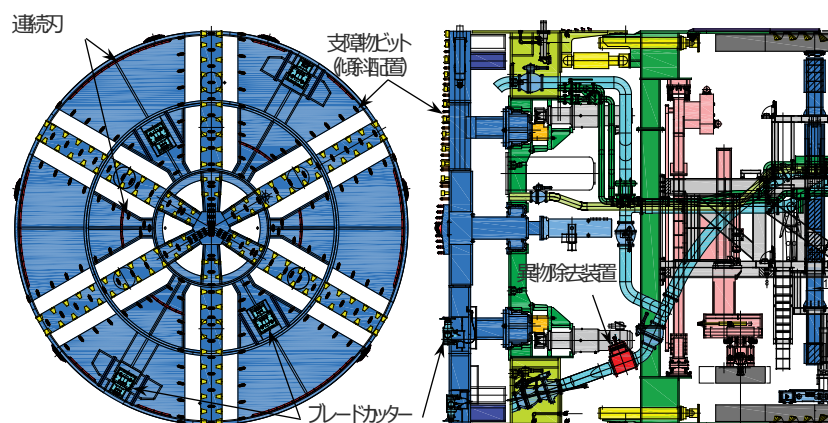


図-5.15 シールド正面図・側面図

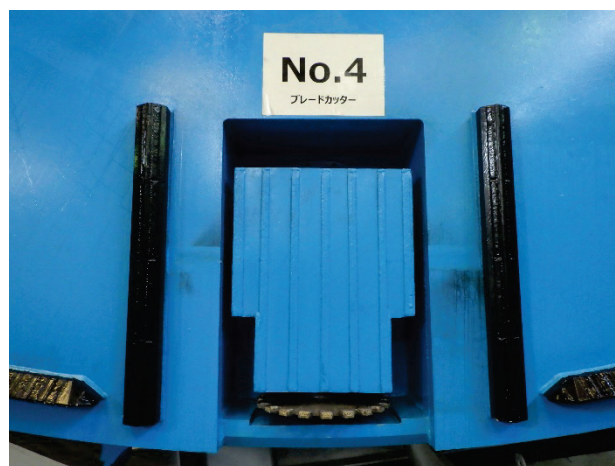


写真-5.4 ブレードカッター



写真-5.5 連続刃



写真-5.6 カッターヘッドの面取り



写真-5.7 支障物ビット



写真-5.8 切削・排出された支障物

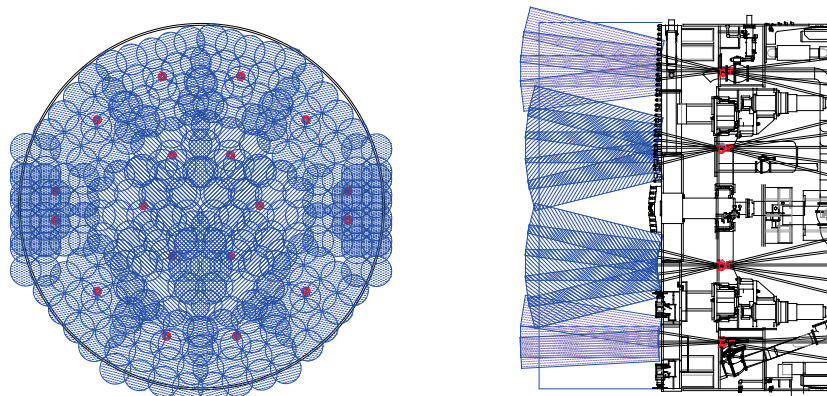


図-5.16 球面薬注装置による注入イメージ

させることによって地盤改良材を切断するものであり、カッターヘッドの外周・内周にそれぞれ2基ずつ装備された。連続刃は図-5.15、写真-5.5に示すように、先行ビットを連続配置したものであり、袋詰サンドドレーン材の網袋を鋸のように切断するために、最外周および内周にそれぞれ1列ずつ装備された。

b) カッターヘッド形状の面取り

カッターヘッドの形状は、写真-5.6に示すように、カッタースポークと攪拌翼を円筒状にするとともに、カッターヘッドのスリット部を面取りすることで、地盤改良材の絡まりの防止を図った。

c) 異物除去装置の装備

排泥口付近には、図-5.15に示すような異物除去装置を設置し、地盤改良材の先端アンカーなどの金属物を回収・除去できるようにした。

以上のシールドマシンの改良対策によって、地盤改良材の閉塞による地盤変状を防止することができた。

(2) 人工物（鋼管杭）による掘進不能

羽田空港内で過去に実施されたシールド工事では、事前に鋼管杭が残置されていることが判明していたため、鋼管杭を撤去した上でシールドを通過させていた¹¹⁾。当該工事においても、過去の施工記録などから埋め立て造成時に設置された鋼管杭が残置されている可能性が考えられた。そこで、鋼管杭が出現した場合に掘進不能となることを回避するために、以下に示す対策を実施し、シールドによる鋼管杭の切削を可能とした。

a) 支障物ビットの傾斜配置

写真-5.7に示す支障物ビット¹²⁾を装備した。支障物ビットの支障物の切削性やビットの耐久性については事前に室内試験で確認した。また、図-5.15に示すように、ビットの高さに傾斜を付けることで、ドリルのように穿孔して切削できるように工夫した。

b) カッター装備トルクの増強

支障物出現時には、切削抵抗が大きくなることが想定されるため、カッター装備トルクを増強することとした。泥水式シールドのうち、外径 10m 以上のトルク係数は実績の平均値 10 程度に対し、最大値 15 を採用した¹³⁾。

c) 球面薬注装置の装備

図-5.16 に示すように、隔壁に球面薬注装置（3 インチ，18 箇所）を装備することで、シールド内から切羽への薬液注入を実施して鋼管杭を固定し、切削性の向上を図った。

以上のシールドマシンの改良対策によって、写真-5.8 に示すように埋め立て時に設置され残置された中仕切柵の H 形鋼（H300）を切削・排出することができ、シールド掘進不能の事態に陥ることを回避できた。

(3) 泥水や裏込め注入材の地上への流出

掘削対象土層である Ac2 層は、高い泥水圧や裏込め注入圧によって地層内に割裂を生じ、泥水や裏込め注入材が地上に流出することが懸念された。また、空港内には層別沈下計などの地盤動態の観測孔が多数存在するため、シールドトンネル路線上に確認された場合には適切に処置する必要がある。そこで、以下に記す対策を実施し、泥水や裏込め注入材の地表面上への流出防止を図った。

a) 沖積粘性土地盤における割裂試験の実施

泥水圧による Ac2 層の割裂試験を実施し、切羽水圧および裏込め注入圧の上限値を設定した。割裂試験は、地盤に造成した素掘りの試験孔内に泥水を充填した状態で実施した。地上の圧力水槽に空気圧を作用させることで孔内泥水圧を 0.01MPa ずつ増加させ、流量計により割裂発生の有無を判定する。表-5.6 に割裂試験孔番号と試験深度を示す。図-5.17 に示すように、K-2 孔では、割裂試験を開始して 40 分後に泥水圧 0.45MPa で割裂した。また、K-1,3 孔では、それぞれ、泥水圧 0.45, 0.53MPa で割裂した。

ここで、小土かぶりにおける泥水による割裂圧 P_f は次式で表せる¹⁴⁾。

$$P_f = \sigma_3 + q_u = K_0 \cdot \gamma \cdot H + 2c \quad (5.5)$$

ここに、 σ_3 ：水平土圧 (kN/m²)， q_u ：一軸圧縮強さ (kN/m²)， K_0 ：静止土圧係数， γ ：単位体積重量 (kN/m³)， H ：土被り (m)， c ：粘着力 (kN/m²)

図-5.18 は、割裂試験結果と式(5.5)において静止土圧係数を 0.9 とした場合の泥水による割裂圧の算定結果を比較したものである。両者には相似関係が認められると判断し、式(5.1)を用いて泥水圧の上限値を設定した。

表-5.6 割裂試験孔深度

対象地盤	試験孔No.	素掘り孔の深度 (GL-m)
Ac2層	K-1	25.0 ~ 25.5m
	K-2	27.0 ~ 27.5m
	K-3	30.0 ~ 30.5m
Bs層	K-4	6.0 ~ 6.5m
	K-5	7.0 ~ 7.5m
	K-6	8.0 ~ 8.5m

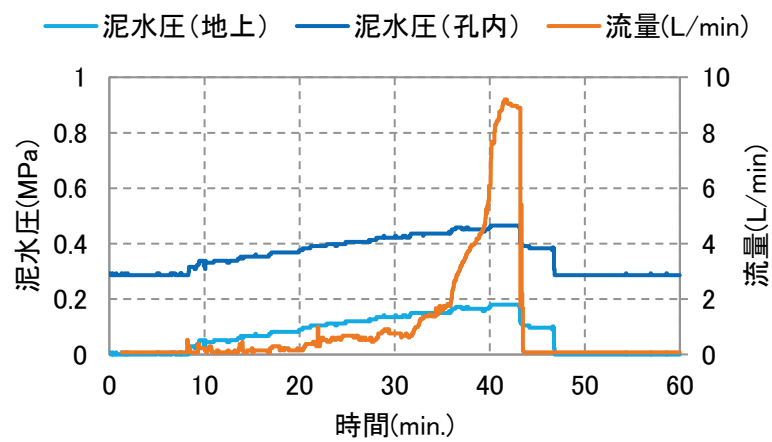


図-5.17 割裂試験結果 (K-2 孔)

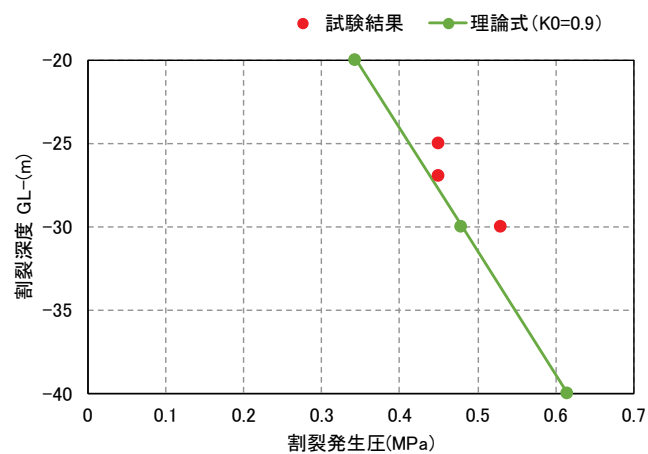


図-5.18 割裂圧算定結果

b) 高濃度泥水（PAA 泥水）の使用

高濃度泥水（以下、PAA 泥水と記す）は、ベントナイト含有の泥水に少量のポリアクリルアミド（PAA）を添加したもので、粘土粒子を適度に凝集させ、泥水の粘性を高める効果を有することが知られている¹⁵⁾。図-5.13, 5.14 に示す国道 357 号線下共同溝と東京モノレール直下を通過する際には、構造物との離隔が約 1.0D（D：シールド外径）と近接しているため、PAA 泥水を使用して泥水の粘性を高め、水みちの発生による泥水の噴発を防止した。

c) 観測孔の事前閉塞

シールド路線上に層別沈下計 2 箇所、地震計 1 箇所が近接していることが判明したため、写真-5.9 に示すように、事前に観測孔をモルタルなどで閉塞することで、泥水や裏込め注入材が地表面上への流出することを防止した。



写真-5.9 観測孔の閉塞

(4) 埋め立て地盤の不均質性による過大な地盤変状の発生

シールドトンネルが通過する地盤は、自然堆積地盤と比較して不均質であることや、現在でも毎年数センチの圧密沈下が進行していることから、切羽水圧による地山の保持が難しく、想定以上の地盤変状が発生することが懸念される。そこで、以下に記す対策を実施し、過大な地盤変状の防止を図ることとした。

a) トライアル施工による掘進管理値の設定

当該地盤における地盤変状を分析し、最適な施工方法を確立することを目的として、シールド掘進基地内においてシールド掘進に伴う地盤変状のトライアル施工を実施した。トライアル施工では、計測区間を 60m とし、10m 毎に切羽水圧、裏込め注入率を変化させたシールド掘進を実施した。計測された地盤沈下量と二次元弾性 FEM によって解析された地盤沈下量を比較することで、切羽水圧などの掘進方法の妥当性を検証した。本内容については、第 3 章で詳述する。

b) エアーチャンバーの装備

切羽前面の地盤は不均質であることや、地盤改良材による流体輸送設備の閉塞が想定さ

れることから，急激な切羽水圧の変動による地盤変状が懸念される．このため，二重チャンバー式切羽水圧制御システムを採用した．このシステムは，**図-5.19**に示すように，チャンバー内に圧縮空気を入れた隔壁を設けることで二重チャンバー構造とし，この圧縮空気をクッションとして，切羽水圧の圧力調整圧縮空気による圧力変動を抑制するシステムである．制御可能範囲は， $\pm 0.01 \sim \pm 0.1 \text{MPa}$ であり，切羽水圧の変動を抑制した施工が実施できた．

c) GB-SAR による空港内計測

前節で述べたとおり，GB-SAR による計測方法は，観測範囲内に立ち入る必要がないため，空港内での計測に適しているため導入した．

d) 監視カメラによる空港内監視

写真-5.10に示す高感度望遠カメラ（光学 60 倍）を事務所ビル屋上と A 滑走路付近に設置し，**写真-5.11**に示すように，シールドトンネル施工路線の直上近傍を 24 時間体制で監視した．監視カメラによる空港内監視によって，事前に把握できていなかった過去の調査ボーリング孔などからの泥水流出を速やかに発見でき，航空機の運航に支障をきたすことを防ぐことができた．

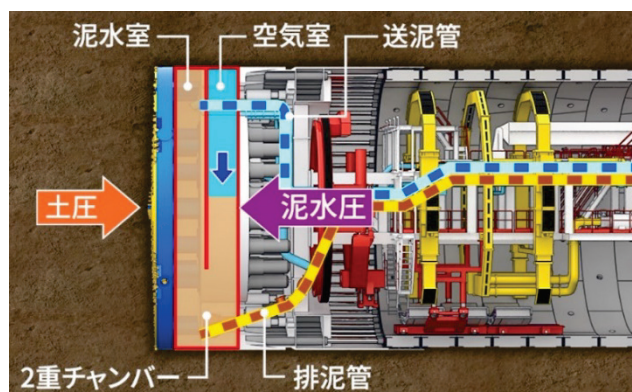


図-5.19 二重チャンバー式切羽水圧制御システム



写真-5.10 高感度望遠カメラ設置状況



写真-5.11 監視状況（中央制御室）

5.3.3 支障物による掘進トラブルへの対応

(1) 流体輸送設備の閉塞

写真-5.12 に示すように、シールドのカッターヘッドが発進防護を通過した直後の 10 リング掘進中において、巨礫やコンクリート塊、鉄片などの支障物による排泥ポンプの閉塞が確認された。その後も支障物による閉塞が頻発したため、以下に示す対策を実施した。

a) 礫取り箱の設置

写真-5.13 に示す「礫取り箱」を排泥ポンプの手前に配置し、支障物を特定の場所に集め、効率よく回収できるように工夫した。玉石やコンクリート塊が急増により、礫取り箱による平均回収数が 1 リングあたり 10 回程度となり、平均掘進時間が 1 リング 10 時間と進捗が低下した。このため、次の対策を実施した。

b) クラッシャーの設置

写真-5.14 に示す玉石やコンクリート塊を破碎できるロータリークラッシャーを導入した。その結果、礫取り箱による平均回収数が 1 リングあたり 1 回に改善された。しかしながら、それ以降もクラッシャーでは破碎できない鋼材やゴム、木材などによる閉塞が続き、日進量は 3 リング程度が限界であったため、さらなる対策を実施した。

c) 流体輸送設備の二系統化

初期掘進終了後の段取り替え中に流体設備を二系統化し、片方が閉塞した場合でも、もう一方を稼働させて掘進を継続できるようにした。なお、二系統化は閉塞する可能性の高いクラッシャーから P2 ポンプ間のみとした。その結果、平均日進量が 8 リング程度に改善した。



写真-5.12 排泥ポンプ閉塞状況



写真-5.13 礫取り箱設置状況



写真-5.14 ロータリークラッシャー設置状況

(2) シールドの損傷

63 リング掘進中にピッチング異常の警告灯が点灯したため、掘進を中断した。シールド内を調査したところ、マンロックの取り付け部から泥水が噴出し、ピッチング計が故障したためと判明した。泥水の噴出は止まっているものの、写真-5.15 に示すようにシールドの隔壁やマンロックの変形が確認されたため、以下に示す調査と対策を実施した。

a) シールド内部調査

シールド内部から損傷状況・原因を把握するための調査を実施した。主な調査内容は、①マンロック取り付け部の止水シールの健全性（目視、取付部のすき間の計測）、②隔壁およびマンロックの構造健全性（変形量の計測）、③軸シールの健全性（シールの成分検査）である。

調査内容①、②は、いずれも健全性が確保されておらず、交換や補修が必要と判断された。また、調査内容③については、異物混入は見られず、問題ないと判断した。

b) チャンバー内に立ち入るための補助工法

図-5.20, 5.21 に示すように、チャンバー内への切羽の土砂の崩落防止のために、回転式ケーシングドライバー工法（以下、CD 工法と記す）による掘削と流動化処理土による置換によって、防護壁を造成した。また、シールドの停止した場所が土留め壁に囲まれたエリア内であったため、ディープウェルで土留め壁内側の地下水位を低下させ、地下水および土砂の流入を防止することにした。本補助工法の採用により、事象発生からわずか1か月でチャンバー内に立ち入って対策をとることができた。

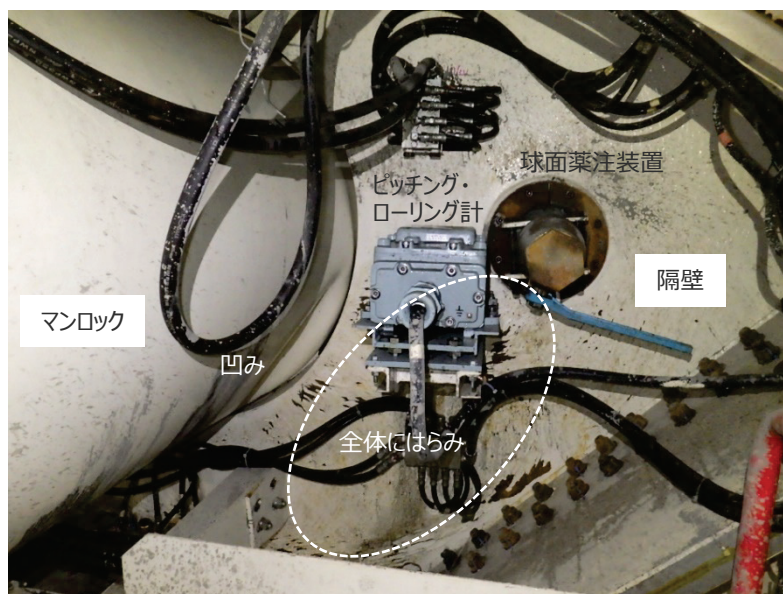


写真-5.15 隔壁・マンロック変形状況

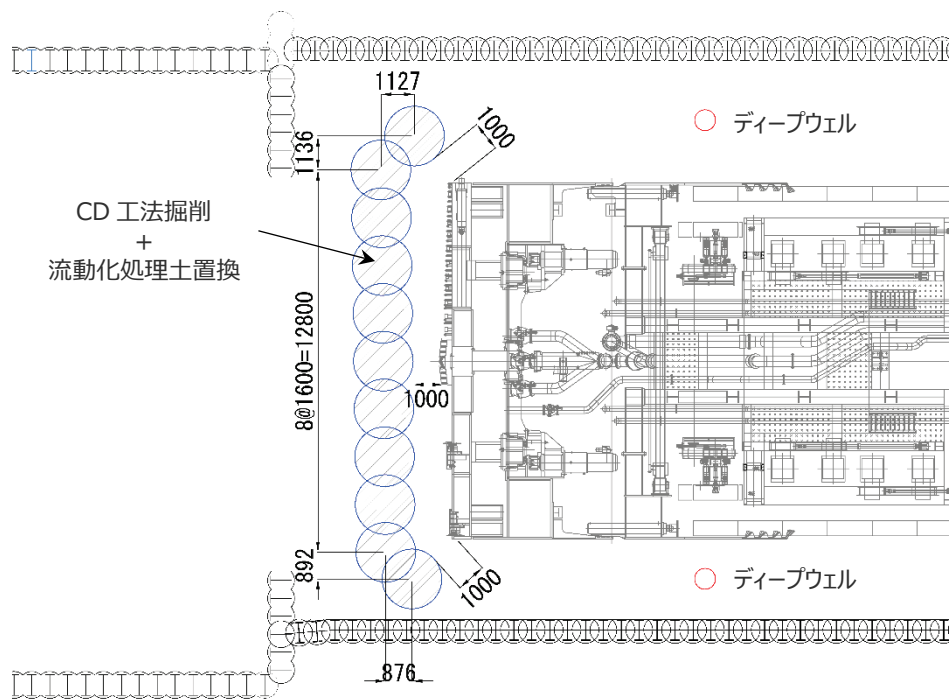


図-5.20 補助工法平面図

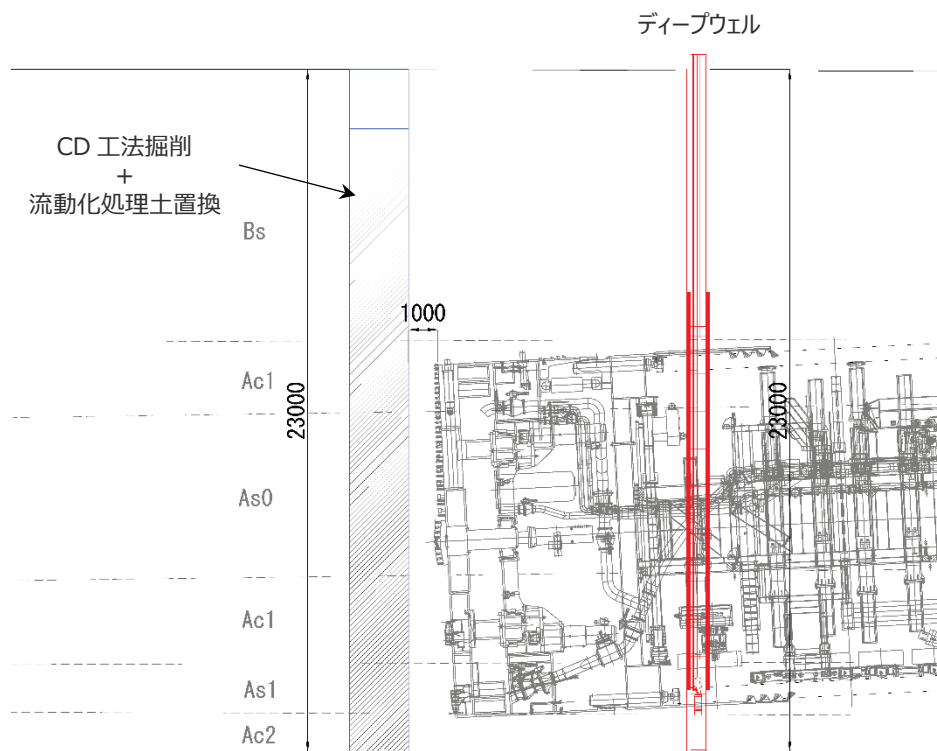


図-5.21 補助工法縦断図

c) チャンバー内土砂撤去・支障物調査

バキューム車による吸引でチャンバー内の土砂を排出し、カッタースリット部に横矢板を、チャンバー内に足場を設置しながら上方から下方に移動した。チャンバー内作業状況を写真-5.16 に示す。また、安全確保のために、2 箇所のマンホールから送気して換気風量を確保するとともに、監視員と監視カメラ、ガス検知器を配置して、24 時間体制で湧水量やガス濃度、作業状況などを把握した。チャンバー内作業の監視状況を写真-5.17 に示す。チャンバー内下端付近において支障物を調査したところ、写真-5.18, 5.19 に示すように鉄塊（最大 $700 \times 160 \times 120$ mm）や巨礫（最大 500 mm 角）など、多数の支障物が確認された。

d) チャンバー内調査

チャンバー内調査の結果、写真-5.20 に示すように最外周の攪拌翼が 6 本中 2 本脱落していることが判明した。これは、図-5.22 に示すように鉄塊が攪拌翼と隔壁もしくはスキンプレートとの間に噛み込み、カッタートルクが攪拌翼の先端付近に作用して、根元部から脱落し、その後、脱落した攪拌翼がカッターヘッド背面とマンロック取り付け部の間に噛み込み、カッタートルクによる押し付け力が作用して、隔壁とマンロックが変形したものと推測された。この他にも、支障物や攪拌翼がチャンバー内で攪拌され発生したと推察される打痕が多数確認された。



写真-5.16 チャンバー内作業状況

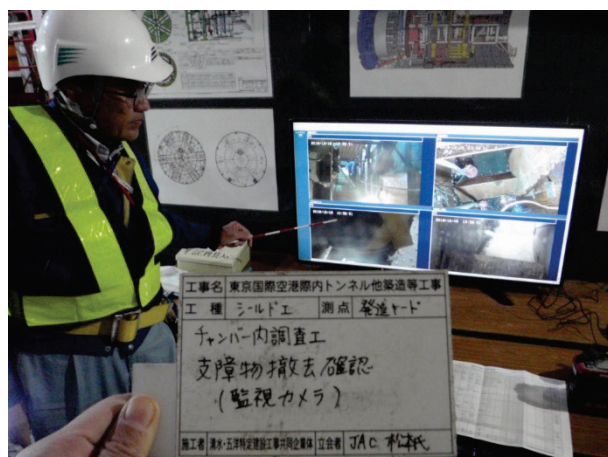


写真-5.17 チャンバー内監視状況

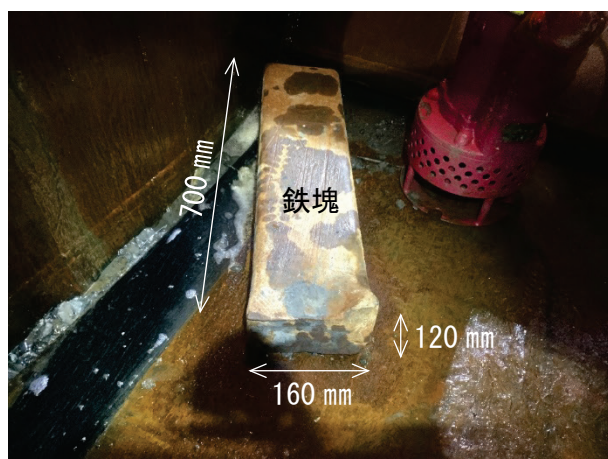


写真-5.18 支障物（故障原因物）



写真-5.19 回収された支障物の一部



写真-5.20 攪拌翼脱落状況

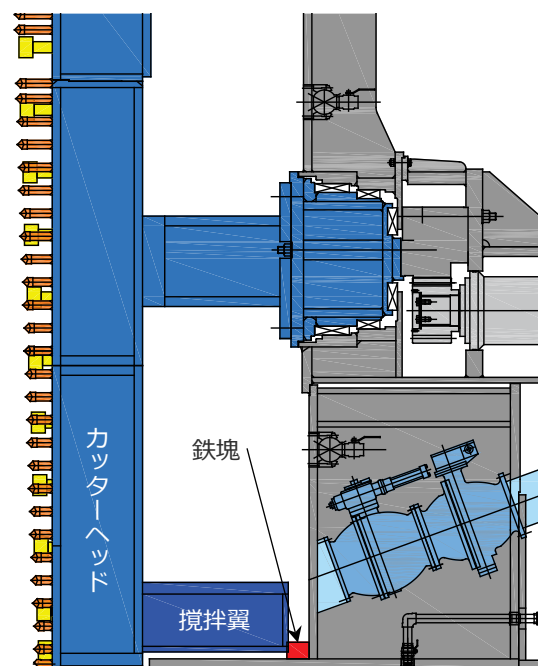


図-5.22 鉄塊の攪拌翼への噛み込みイメージ

e) シールド補修

前述したチャンバー内調査結果に基づいて、表-5.7 に示す補修計画を立案した。なお、今後も支障物による攪拌翼の脱落が懸念されるため、攪拌翼を短くし、支障物や脱落した攪拌翼が隔壁との間に噛み込みにくくした。また、マンロックの新規製作には3ヶ月以上を要することが判明したため、図-5.23 に示すように、速やかに手配可能なマンホールを取り付けておき、後日に必要になった際にマンロックを増設できる構造にした。

表-5.7 補修一覧

部 位	損傷状況	補修方法
隔壁	最大 60 mm変形	切断・新規部材取り付け
マンロック	変形、漏水	新規製作品に交換
マンホール	損傷なし	段差解消の蓋設置
球面薬注装置	打撃による破損	交換、止水カバー設置
エアーチャンバー接続口	変形、一部欠損	補強した部材に交換
送泥管排出口	損傷なし	損傷防止のため撤去
最外周攪拌翼	2 箇所脱落	脱落箇所は復旧しない 健全箇所は長さ短縮
ブレードカッター・カバー	打撃による凹み	鉄板溶接による補強

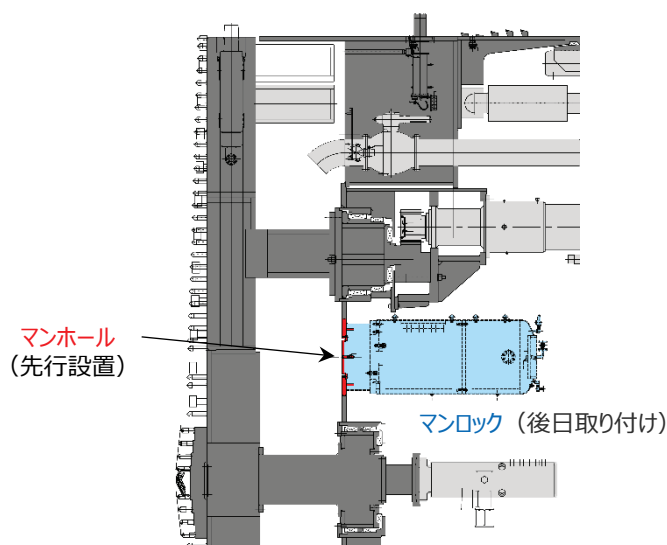


図-5.23 マンロック補修計画

f) ヤード内支障物調査

掘進停止期間中に、磁気探査による支障物探査を実施した。探査孔の配置を図-5.24, 5.25に示す。探査孔 M7 において、図-5.26 に示すように長周期の磁気異常が確認されたため、探査孔 M8～M16 を追加し、図-5.27 に示すように支障物の範囲を特定した。その箇所を CD 工法で掘削したところ、写真-5.21 に示す残置されたディープウェル（ $\phi 300$ mm, L=21 m）が回収された。

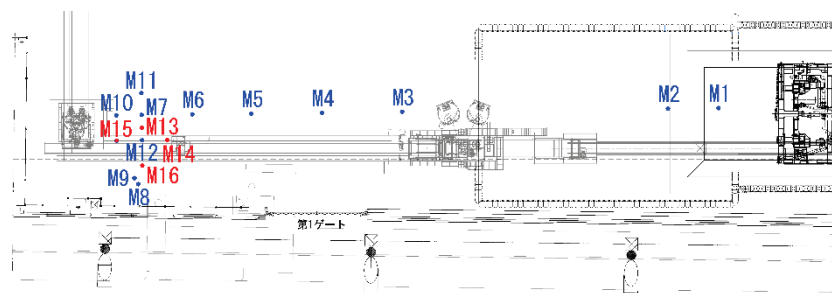


図-5.24 磁気探査孔配置図（平面図）

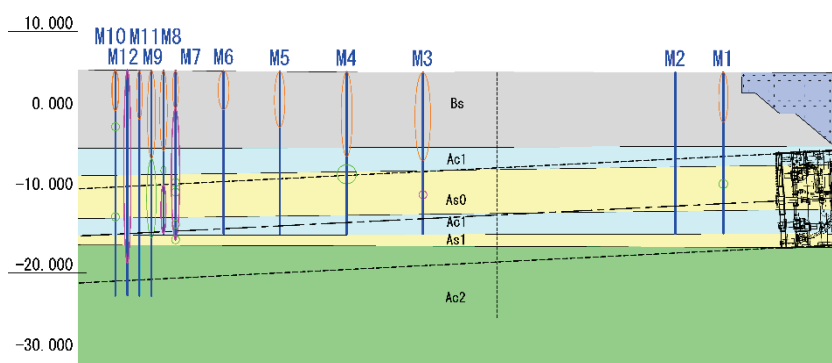


図-5.25 磁気探査孔配置図（縦断面図）

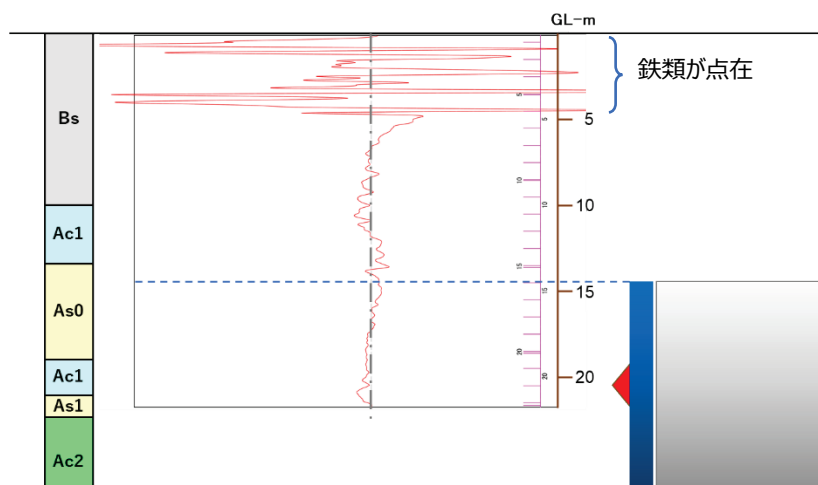


図-5.26 磁気検層波形（M7 孔）

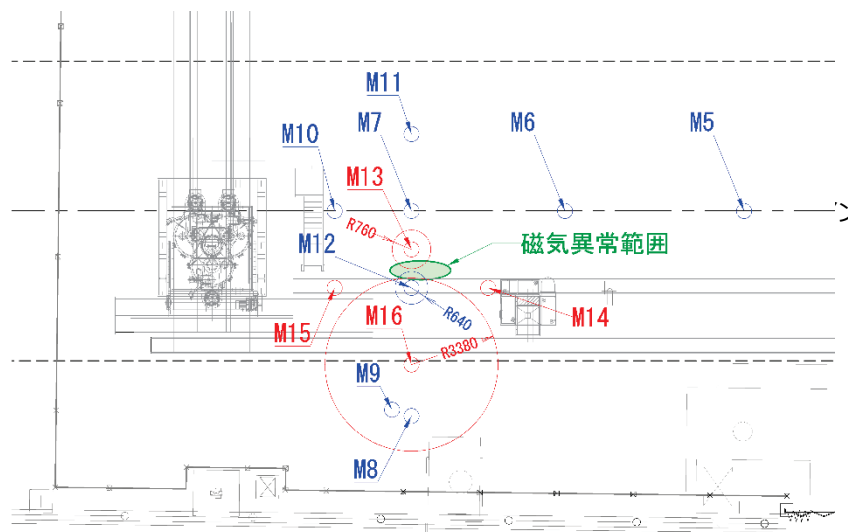


図-5.27 支障物想定範囲（磁気異常範囲）



写真-5.21 支障物撤去状況

(3) 機内排泥バルブの損傷

500 リング頃から鉄片などによる排泥口付近の閉塞が毎リング発生し、そのたびに流体の逆送運転を行って閉塞を解除し、掘進を再開していた。その後、表-5.8 に示すように閉塞回数が増加し、シールドの進捗も平均 8/日から 3 リング/日に大幅に低下した。また、支障物が排泥管油圧バルブの内面に何度も衝突したことによって、図-5.28 に示す排泥口付近の排泥管油圧バルブの開閉がスムーズに行えなくなり、698 リング掘進中に開閉操作ができなくなった。さらに、その約 3 m 後方に位置する排泥管油圧バルブ（MV2 バルブ）もスムーズに開閉できない状態になったため、このまま掘進を継続するのは危険と判断した。

表-5.8 流体輸送設備閉塞回数

RingNo.	平均閉塞回数 (回/リング)
500 ～ 549	1.0
550 ～ 599	2.9
600 ～ 649	2.8
650 ～ 689	2.7
690 ～ 699	14.6
700 ～ 709	19.3
710 ～ 718	23.1
排泥管補修	
719 ～ 750	0.6

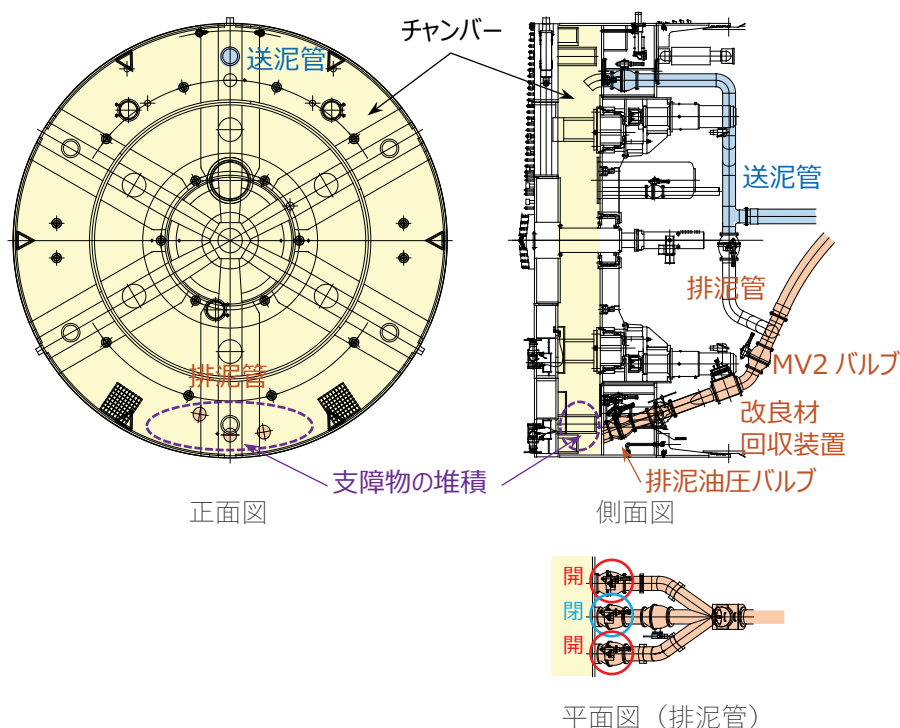


図-5.28 排泥管油圧バルブ（排泥口付近）

a) 液体窒素による止水凍結と排泥管内調査

排泥口からの泥水の流入を防止し，排泥管内の調査や排泥バルブの修理を行うために，過去にスクリーコンベヤにおける止水実績を有する液体窒素による排泥管の止水凍結を実施した⁸⁾．なお，凍結範囲の設定においては，排泥管内には土砂は含まれず水で満たされていると安全側の評価を行なって，表-5.7 に示すように必要凍着長を 700 mm と設定した．排泥管の凍結状況を写真-5.22 に示す．凍土造成が 2 日で完了したため，排泥管を外してみたところ，写真-5.23 に示すように排泥管が H 形鋼切断片などにより閉塞していた．

b) 排泥バルブおよび排泥管の補修・補強

図-5.29 に示すように，凍結維持運転を継続しながら MV2 バルブを交換するとともに，手動バルブを増設し，バルブ故障に備えた．また，排泥管内の流れがスムーズになるように，配管の曲がりを減らした．さらに，閉塞時の急激な配管内圧力上昇に備え，後続台車の曲がり管の接続部を写真-5.24 に示すように補強した．以上の補修・補強が完了したため，凍結運転を終了し，掘進を再開した．

表-5.9 凍着長の計算

項目		数値	単位	備考
安全率	F_s	2.0	—	
切羽水圧	P	0.45	MPa	
排泥管内径	d	0.316	m	350A
作用面積	A	0.078	m ²	$=\pi \cdot d^2/4$
周長	S	0.993	m	$=\pi \cdot d$
凍着強度 ⁹⁾	τ	0.20	MPa	-10℃、鉄
計算厚	t_l	0.36	m	$=F_s \cdot P \cdot A/(\tau_a \cdot S)$
最小厚	t_{min}	0.7	m	内径の 2 倍 (切り上げ)
凍土厚	t	0.7	m	



写真-5.22 排泥管（φ350mm）凍結状況



写真-5.23 排泥口付近閉塞状況

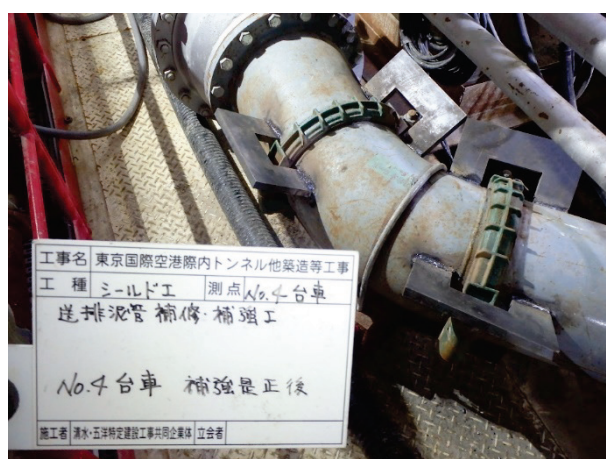


写真-5.24 配管補強状況（後続台車部）

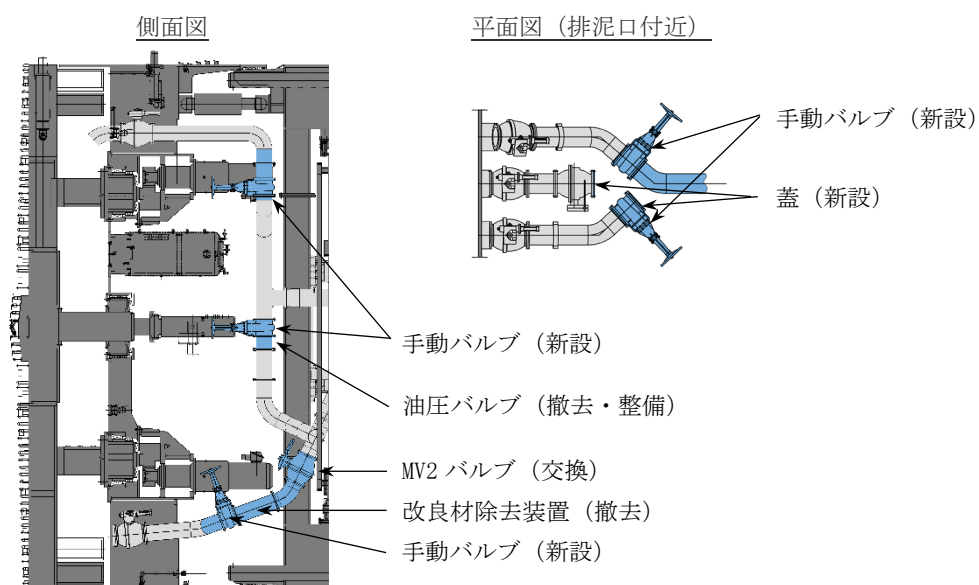


図-5.29 排泥管補修計画図

c) 流体の逆送運転

掘進再開後も支障物による排泥口の閉塞が続き、進捗速度が向上しなかったため、流体の逆送運転による掘進を試したところ、土砂だけでなく支障物も排出されたことから、残り延長約 880 m は逆送運転を基本として掘進を継続した。

5.4 まとめ

本章では、地盤変状計測管理の高度化に関して、まず、計測方法の高度化を目的に、立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測において、リアルタイムかつ非破壊状態で遠隔計測する方法として、GB-SAR を用いた方法を提案した。本法の有用性は空港施設の直下を通過したシールドトンネル施工事例によって検証した。以下に、得られた知見を列挙する。

- (1) シールドトンネルの施工に先立ち、空港敷地内に選定した水平測線距離の異なる 3 地点（水平測線距離 200 m, 373 m, および 880 m, レーダー波入射角 11.3 度, 6.5 度, および 2.9 度）において、GB-SAR による水平および鉛直方向の変位計測精度の確認試験を実施した。コーナーリフレクター（CR）を手動で微小移動させた際の水平変位に対しては、GB-SAR の計測値は CR の動きに追従し、平均変位は水平測線距離が 200 m では CR の移動量に一致し、340 m および 880 m の場合においても、その計測誤差は 0.1 mm 程度であった。また、水平測線距離が 340 m および 880 m の地点において、GB-SAR により、日常的に発生している地盤の鉛直変位を計測したところ、同時間帯に水準測量によって得られた鉛直変位とほぼ同等の変位が計測された。
- (2) シールドトンネル施工時には、施工の進捗に合わせて GB-SAR の計測方向を回転させることで、トンネル全線区間を網羅し、シールド掘進に伴う地盤変状をリアルタイムで遠隔計測を実施した。GB-SAR による計測値によれば、水平測線距離が 350 m 程度以内の計測地点においては、シールドマシンのカッターヘッドが通過以後に地盤が沈下する傾向が計測され、水準測量による計測値との差異は 5～10 mm 程度であった。
- (3) GB-SAR 法による地盤変状の計測精度は、水平計測距離の増加によるレーダー波の入射角が減少によって低下する。本施工においては、同一計測箇所における GB-SAR と水準測量との比較による計測精度の確認により、レーダー波の入射角度が 6.7 度程度（GB-SAR 機器設置高さが 41 m の場合に、計測水平距離は 350 m に相当）以上を確保した計測条件であれば、水準測量による計測値との差が 10 mm 程度で地盤変状の傾向を把握できることを確認した。
- (4) GB-SAR 法では、計測点の近傍に緑地帯、車両、構造物などのレーダー波の遮蔽物や降雨などによる水溜まりが存在する場合には、レーダー波の乱反射により計測が不安定になる。そのため、GB-SAR 機器の設置場所を工夫し、レーダー波の照射範囲を狭め、その照射方向を細かく変更するなどの方法により、測線上の遮蔽物を回避し、周辺からの反射波の影響を抑制する対策を行うことが望ましい。

- (5) 今回用いた GB-SAR 装置では、1 回の走査時間内にレーダー波長の 2 分 1 に相当する 8.5 mm 以上の急激な地盤変状が発生した場合には、地盤変状計測は困難である。そのため、予期せぬ地盤変状への対応や降雨などによる気象状態を検知するために、高感度カメラにより計測地点の状況を常時モニタリングする方法の援用が望ましい。

次に、地盤変状リスク対応の高度化として、泥水式シールド工法によるトンネル工事における埋め立て地盤特有のリスク対策とトラブル事例について論述した。以下に、本文で得られた知見を列挙する。

- (1) 地盤の経歴や過去の工事の情報を整理・分析し、埋め立て地盤において想定される地盤変状リスクおよびシールド掘進不能リスクについて、次の代表的な 4 つに特定した。
- ①地盤改良区間における地盤改良材の閉塞による地盤変状
 - ②人工物（鋼管杭）による掘進不能
 - ③泥水や裏込め注入材の地上への流出
 - ④埋め立て地盤の不均質性による過大な地盤変状の発生
- (2) 特定したリスクに対し、次の事前対策を講じた。①地盤改良区間における地盤改良材の閉塞リスクに対しては、地盤改良材の切断、取り込み、排出がスムーズに行われるようにシールド機を改造した。②人工物（鋼管杭）による掘進不能に対しては、シールド機による鋼管杭の切削が可能な仕様とした。③泥水や裏込め注入材の地上への流出に対しては、原位置で沖積粘性土層における割裂試験を実施し、切羽水圧および裏込め注入圧の上限値を設定した。また、高濃度泥水を使用して泥水の粘性を高めるとともに、トンネル直上付近に位置する使用されていない観測孔等を事前に閉塞することにより、地上への泥水や裏込め注入材の流出防止を図った。その結果、重要構造物の変状を最小限に抑制し、公共交通に影響を及ぼすことなく、無事にシールドを到達させた。
- (3) 支障物が想定以上に多数出現し、流体輸送設備の閉塞トラブルによる進捗の低下が見られたものの、クラッシャーの設置や流体輸送設備の二系統化により改善した。また、支障物によるシールドの損傷が発生したが、シールド内部調査による適切な施工計画および補助工法の実施によって、安全かつ迅速に補修することができた。

なお、現在、市販されている GB-SAR 装置は海外製の 4 機種程度³⁾であるため計測費用は高額であり、総務省の計測申請許可に長時間を要することなどが難点である。しかし、GB-SAR 法は計測箇所特別なターゲットなどの設置が不要であり、面的な変位分布を水準測量と同等の計測精度で連続計測する方法として、立入制限など実務上の制約が多いシールド施工現場においては非常に有用な地盤変状計測方法である。今後、国内での実施事例の増加により、計測費用の低減や実用化の推進が期待される。

また、本研究で得られた地盤変状リスクおよびシールド掘進不能リスクの具体的な低減方法に関する知見は、埋め立て地盤における泥水式シールド工法を実施する場合の地盤変状管理において有用であり、地盤変状管理の高度化に寄与することが期待される。

参考文献：

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，pp. 230-232, 2017.
- 2) 佐藤源之，鄒立龍，ジョバンニニコ，菊田和孝：GB-SAR（地表設置型合成開口レーダ）による変位・振動計測，電子情報通信学会論文誌 B，Vol. J102-B, No. 11, pp. 844-852, 2019.
- 3) 17GHz 帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討会：調査検討報告書，pp.8-14，2013.
- 4) 宮田岩往：トンネル工事における CIM/ICT の取組みー山岳トンネル CIM ソフトの開発，シールド工事における人工衛星データの活用ー，奥村組技術年報，No. 43, pp. 37-42, 2017.
- 5) 杉山光徳，峰松知裕：溶岩ドーム挙動観測について，平成 24 年度九州国土交通研究会，2012.
- 6) 鎌田高史：東京国際空港における新たなシールドトンネル事業ー国際線と国内線を結び日本各地と世界の交流を活性化ー，第 21 回空港技術報告会，pp.43-46，2020.
- 7) 安井克豊：供用中の滑走路直下を横断するシールド工事の計測管理ー東京国際空港際内トンネル他築造等工事ー，トンネルと地下，第 52 巻 5 号，pp. 424-431, 2021.
- 8) 安井克豊，神保誠二，鈴木 誠，田崎仁久：埋立地盤におけるシールド工事のリスク対策と支障物対応ー東京国際空港際内トンネルー，トンネルと地下，第 51 巻 7 号，pp. 15-26，2020.
- 9) 第一期土木関連工事完成を祝う会協賛会：東京国際空港沖合展開事業第一期工事建設記録，p.7，1988.
- 10) 秋元恵一他：1 日 270 便の滑走路直下をシールドで貫くー東京国際空港鉄道トンネルー，トンネルと地下，Vol.28，No.7，pp.43-51，1997.
- 11) 高木保：鉄道トンネルの設計と施工ー滑走路直下をシールドで貫くー，土木技術，Vol.53，No.10，pp.76-84，1998.
- 12) 大塚寿貴他：既設杭の掘削に向けた切削ビットの開発，土木学会第 70 回年次学術講演会，VI-057，2015.
- 13) 土木学会：トンネル標準示方書 [シールド工法] 同解説，p.173，2016.
- 14) 森麟他：シールドトンネルの裏込め注入圧および切羽泥水圧による粘性土地盤の割裂現象，トンネルと地下，Vol.22，No.1，pp.41-46，1991.
- 15) 杉山博一他：営団 11 号線扇橋シールドにおける礫対応泥水の検討，トンネル工学科研究論文・報告集，No.11，pp.279-284，2001.
- 16) 上本勝広他：液体窒素を用いたシールド掘進機スクリュウコンベヤの応急止水技術，土木学会第 61 回年次学術講演会，VI-103，2006.
- 17) 原文宏他：氷と諸材料間の凍着強度試験方法と凍着強度，海洋開発論文集，Vol.10，pp.253-258，1994.

第6章 結論

6.1 結論

本研究では、シールド工法における掘削管理方法の高度化によるトンネル施工の合理化を図るために、以下の6つの技術課題に対する技術開発を目的とした。

- ① 気泡シールド工法における掘削土の水生環境負荷の低減
- ② 泥土圧シールド工法におけるカッターチャンバー内泥土の塑性流動性評価の可視化
- ③ 泥水式シールド工法における特殊条件下での切羽圧力管理手法の確立
- ④ シールド運転管理の省力化
- ⑤ 立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測手法の確立
- ⑥ 埋め立て地盤における泥水式シールド工法による掘進時の地盤変状リスクの低減

以下、各章で得られた成果をまとめて総括を行い、本論文の結論とする。

第1章の序論では、本研究の背景として、近年の少子高齢化に伴う熟練技能労働者の大量離職による経験知の減少に加えて、シールドトンネル工事の大断面化、長距離化、大深度化等による難工事化に伴う未経験工事の増加等により、今後も道路陥没等のトラブルが頻発すると想定されることを指摘した。また、重大なトラブルや事故の回避のためには、想定するリスクに対して適切な調査・設計・施工を行うことはもとより、熟練工の「経験知」、最先端技術、および人工知能を融合させることによってシールド工法における掘削管理方法を高度化し、トンネル施工技術に対する「経験知」を可視化して、生産性向上、安全性向上等によるトンネル施工の合理化を図ることが求められている現状について論述した。また、本研究では、シールド工法における掘削管理方法の高度化によるトンネル施工の合理化を図るために、6つの技術課題に対する研究開発を目的としていることを述べるとともに、これらの技術課題とシールド工法の掘削管理方法との関連性を整理し、研究開発の意義を概説した。

第2章では、泥水・泥土性状管理の高度化に関して、まず、添加材の選定の高度化を目的に、気泡シールド工法における水生環境に配慮した特殊起泡剤を新たに開発した。開発した特殊起泡剤は水生環境負荷を従来品の25分の1に低減できること、優れた生分解性を有し、環境中に蓄積されにくいこと、さらには、従来の気泡シールド工法の施工設備をそのまま利用できる高い汎用性を有していることを論述した。また、泥土の性状管理の高度化を目的として、カッターチャンバー内全体の泥土の塑性流動性をリアルタイムに可視化できる評価手法を提案した。本評価手法は、シールド機に設置した土圧計の圧力変動値から算出した標準偏差を用いてチャンバー内泥土の塑性流動性を評価および可視化する方法であり、大口径シールド工事においても適用可能であり、適用の際には、土圧計の設置条件に起因する土

圧変動の相違を考慮することが困難であることを指摘した。また、MPS（Moving Particle Simulation）法によるチャンバー内泥土の流動予測解析を実施して得られた最大土圧変動幅とシールド掘進時の土圧変動との比率である塑性流動性指数として定義し、今後の実施工において、予測解析に用いる泥土の粘性パラメータの設定方法と、塑性流動性指数を用いた塑性流動性の評価結果の妥当性を検証することで、それらの問題解決への期待が示唆された。

第3章では、泥水式シールド工法における切羽圧力管理の高度化を目的として、トライアル施工に基づく適切な掘進管理値の設定手法および、シールド掘進に伴う近接構造物の変状予測の精度を向上させる解析手法を提案した。掘進管理値は、種々の施工条件に対する過去の施工実績を参考にして設定される場合が多いため、特殊な施工条件下では過去の施工実績が参照できないことを指摘した。解決方法として、シールド掘進の初期段階において、シールド通過に伴う地盤変状を計測するトライアル施工を実施して、適切な掘進管理値の設定を行う方法を提案し、その有用性を確認した。また、近接構造物の変状予測に関する解析精度向上を目的として、シールドと地盤との境界条件を表す応力解放率 α に着目し、トライアル施工区間における2次元弾性FEM解析による地盤変状予測値と、計測された地盤変状値との比較により設定する応力解放率 α の値を用いることで、近接構造物の変状予測の解析精度が向上することを確認した。

第4章では、シールド機運転管理の高度化を目的として、シールド工事における掘進計画の立案およびシールドの操作指示を支援するツールとして人工知能（Artificial Intelligence ; AI）を用いたシールドAIシステムを開発した。シールドAIシステムは、掘進計画を支援する「施工計画支援AI」およびシールドの操作を支援する「掘進操作支援AI」の2つにより構成され、これらをシールドトンネル施工に実装し、線形管理方法の省力化に対するAIシステムの有効性を検証した。「施工計画支援AI」は、シールドの操作方法やセグメントの割り付け等の検討を支援するシステムであり、セグメントの種類や在庫数、トンネル線形等の制約条件の中で、機械学習と遺伝的アルゴリズムを用いてシールドの操作方法やセグメントの割り付けの最適な組み合わせを探索させる機能を有している。

施工計画支援AIを実際のシールドトンネル施工に実装したところ、従来は約1週間の手作業を要するのに対し、約15分で施工計画の立案が可能であった。また、掘進操作支援AIは、シールドの姿勢・方向の情報等の膨大な情報を瞬時に分析・判断し、指示書に示された掘進を実現するために、シールドの操作方法の最適解を提供するシステムである。この掘進操作支援AIにシールドを直接操作させるのではなく、ガイダンスシステムを介して、シールドのオペレーターにジャッキパターン等の操作方法の選択肢をリアルタイムにガイダンス画面に表示して使用した。掘進操作支援AIを実際のシールドトンネル施工に実装し、計3か所、10リングにわたって掘進操作のガイダンスを実施した結果、AIが十分に学習でき

ていない線形条件に対しては、操作精度が低下することを確認した。

第5章では、地盤変状計測管理の高度化に関して、まず、計測方法の高度化を目的に、立ち入りが制限される施工用地内における地盤変状計測において、リアルタイムかつ非破壊状態で遠隔計測する方法として、GB-SAR（Ground Based-Synthetic Aperture Radar）を用いた方法を提案した。計測精度の確認試験およびシールド掘進に伴う地盤変状をリアルタイムで遠隔計測を実施した結果、GB-SAR法は計測箇所特別なターゲットなどの設置が不要であり、面的な変位分布を水準測量と同等の計測精度で連続計測する方法として、立入制限など実務上の制約が多いシールド施工現場においては非常に有用な地盤変状計測方法であることを確認した。また、GB-SAR法による地盤変状の計測精度は、水平計測距離の増加によるレーダー波の入射角の減少によって低下することや、計測点の近傍に緑地帯、車両、構造物などのレーダー波の遮蔽物や降雨などによる水溜まりが存在する場合には、レーダー波の乱反射により計測が不安定になることを指摘するとともに、今後、国内での実施事例の増加により、計測費用の低減や実用化の推進が期待されることが示唆された。

次に、地盤変状リスク対応の高度化として、泥水式シールド工法によるトンネル工事における埋め立て地盤特有のリスク対策とトラブル事例について論述した。地盤の経歴や過去の工事の情報を整理・分析し、埋め立て地盤において想定される地盤変状リスクおよびシールド掘進不能リスクについて、代表的な4つに特定した。また、特定したリスクに対し、適切な事前対策を講じることで、重要構造物の変状を最小限に抑制した。支障物が想定以上に多数出現し、流体輸送設備の閉塞トラブルによる進捗の低下が見られたものの、クラッシャーの設置や流体輸送設備の2系統化により改善した。また、支障物によるシールドの損傷が発生したが、シールド内部調査による適切な施工計画および補助工法の実施によって、安全かつ迅速に補修した。上記の地盤変状リスクおよびシールド掘進不能リスクの具体的な低減方法に関する知見は、埋め立て地盤における泥水式シールド工法を実施する場合の地盤変状管理において有用であり、地盤変状管理の高度化に寄与することへの期待が示唆された。

6.2 今後の展望

本研究では、シールド工法における掘削管理方法の高度化によるトンネル施工の合理化を図った。近年のシールドトンネル工事の大断面化、長距離化、大深度化等による難工事化においては、陥没事故に代表される周辺地盤への影響の防止など、シールドトンネル施工に対する安全性の担保が極めて重要であるが、2024年4月から建設業に適用される働き方改革関連法による時間外労働の上限規制^りや、建設業の少子高齢化に伴う人材不足により、現在、シールド工法の掘削管理技術の継承はままならない状況にある。このため、シールド工

法の掘削管理方法の高度化によるトンネル施工の合理化に対する取り組みは、今後、ますます重要になる。

また、シールド工法によるトンネル施工は、現在でも担当技術者が経験的に用いている「経験知」に大きく依存しており、シールドトンネル工事の施工現場は地下に位置するため、施工現場で生じている種々の事象は関係者以外が知ることは難しい。そのため、シールドトンネル工事の周辺地域住民の安全・安心を確保するためには、掘削管理技術の高度化のみならず、シールド工法によるトンネル施工により生じるリスクの情報を共有するとともに、掘削管理技術の可視化（見える化）を一層推進し、適切な情報公開の方法を検討していくことが重要である。

これらの課題を解決するためには、シールド工法の掘削管理における DX（デジタル・トランスフォーメーション）の推進が求められる。例えば、図-6.1 に示すような複数のシールド施工現場を遠隔操作・監視できる AI システムの構築は、生産性の向上のみならず、品質向上および安全性向上に対して極めて有用である。

今後もシールド工法の掘削管理技術の高度化、可視化による安全かつ合理的なシールドトンネル施工の具現化に向けた研究および技術開発のより一層の推進が望まれる。

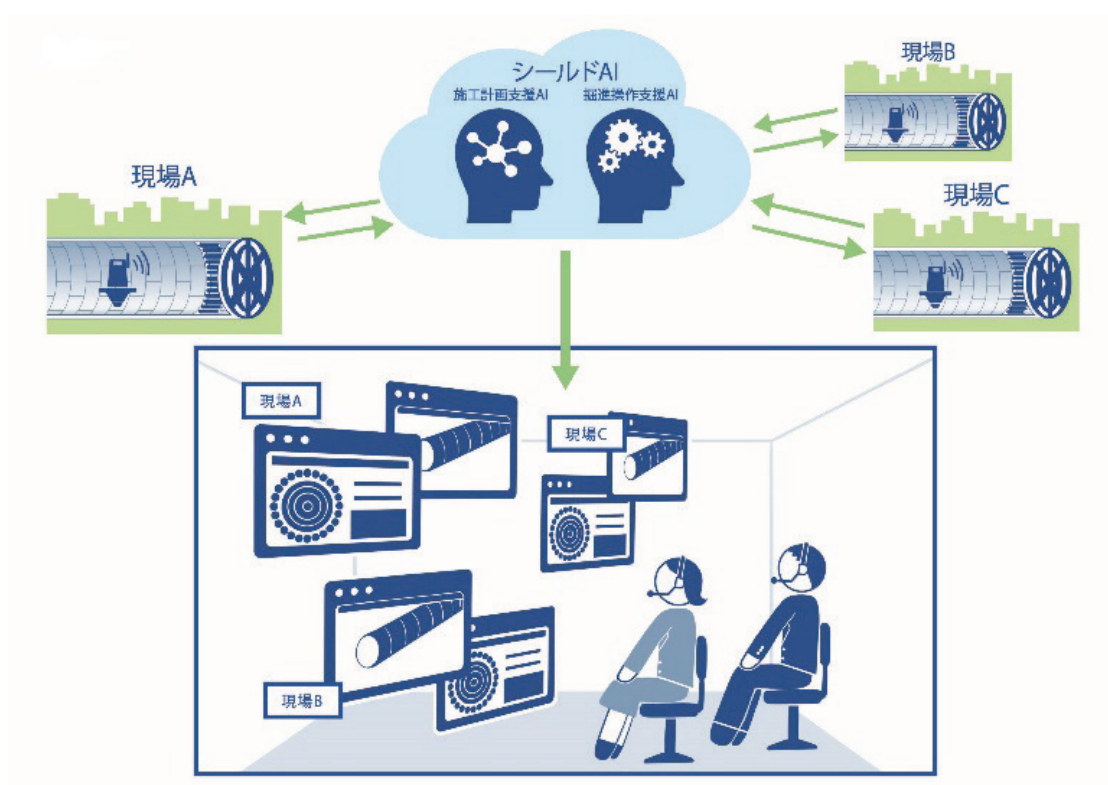


図-6.1 複数のシールド施工現場を遠隔操作・監視する AI システム

参考文献：

- 1) 厚生労働省・都道府県労働局・労働基準監督署：時間外労働の上限規制 わかりやすい解説，<https://www.mhlw.go.jp/content/001140962.pdf>（閲覧日：2024.3.1）．

謝辞

本論文は、岡山大学大学院環境生命科学研究科博士後期課程環境科学専攻在学中に携わったシールド工法によるトンネル施工における技術課題に対する研究開発を取りまとめたものであり、研究を推進するにあたり、非常に多くの方々にご指導とご助言、ご支援をいただきました。

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域の竹下祐二教授には、岡山大学工学部土木工学科入学時から現在に至るまで、約33年間にわたりご指導を賜りました。コロナ禍や単身赴任による生活環境の劇的な変化により、研究に対するモチベーションの維持に苦悩していた際には、優しくも、時に厳しく、粘り強くご指導いただきましたこと、感謝の念に堪えません。これまでのご恩に、僅かながらも報いたいとの一心で、本論文を書き上げました。これまでの研究を通じて多くのことを学ばせていただきましたこと、重ね重ね御礼申し上げます。

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域の諸泉利嗣教授には、恩師の教えを授けてくださり、研究における基本姿勢を学ばせていただきました。また、岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域の小松満教授には、ご多忙にもかかわらず、論述等に対するきめ細やかなご指導を賜るとともに、他者への気配りや諦めずにやり抜くことの重要性等を学ばせていただきました。

計測結果の整理には、岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科の岡本優大さん（現岡山市役所）に多大な尽力をいただきました。深く感謝の意を表します。

清水建設株式会社の河田孝志顧問には、本研究に取り組むきっかけを作っていただくとともに、多大なるご理解とご協力および叱咤激励を賜りました。清水建設株式会社技術研究所の杉山博一グループ長には、豊富な御経験を通じた知識を惜しげもなく御提供下さり、研究の理解を促して頂きました。清水建設株式会社広島支店営業部長の高橋啓介氏には、岡山大学大学院に学ぶ先輩として、多大なるご指導とご支援を賜りました。

東京国際空港際内トンネル他築造等工事に従事していた際には、当時の国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所第二建設管理官室の鈴木誠室長、澤田一洋室長、中村浩明室長、倉澤智之係長には、論文投稿のご理解と、叱咤激励を賜りました。また、当時の清水建設株式会社土木東京支店土木第一部際内トンネル作業所の神保誠二所長、古井正弘副所長には、研究に対する多大なるご理解とご協力を賜り、工事竣工後におきましても、多大なる

ご支援とともに叱咤激励を頂戴しました。

清水建設株式会社関西支店新名神枚方トンネル建設所の辻俊一統括所長，土谷史郎所長をはじめ，皆様には，多大なるご理解とご協力及び叱咤激励を賜りました。シールドグループの皆様には，日常の業務において，多忙にもかかわらず，いつも明るく元気に接していたき，毎日を楽しく過ごすことができたおかげで，研究に打ち込むことができました。

成田フットボールクラブの早乙女清和代表をはじめ，コーチの皆様には，単身赴任生活により，グラウンドから足が遠のくことが多くなったにもかかわらず，研究へのご理解とご支援を賜りました。選手たちの成長する姿に刺激を受けて，研究を継続することができました。

本論文を纏めるにあたり，皆様からは，ここに記述しきれないほどの多くのご指導やご支援を賜り，研究者としてだけでなく，人としての未熟さを痛感いたしました。今後も土木工学における研究や，建設事業を通じて，社会貢献するとともに，これまでお世話になった皆様へのご恩を少しでもお返しできるよう，精進してまいります。

最後に，単身赴任のため，一緒に過ごす時間が短くなったにもかかわらず，いつも学びの場へ気持ちよく送り出してくれた家族みんなに，心から感謝の意を表します。

これを新たな出発点として，研究に打ち込む所存です。これからも変わらぬ皆様のご指導ご鞭撻のほど，よろしくお願い申し上げます。

令和6年3月

安井 克豊