

個人	団体	推薦	特別	名誉	学生	賛助	合計
748名	195名	214名	11名	3名	1名	204名	1,376名

委員会の開催状況(4月1日~30日)

【総務委員会】

□広報小委員会

会誌WG(4/2)(オンライン併用)

木村宏主査ほか13名, 5月号の会報と3か月計画を検討

会誌WG(4/28)(オンライン併用)

木村宏主査ほか10名, 6月号の会報と3か月計画を検討

【事業委員会】

■委員会(4/3)(オンライン併用)

入江健二委員長ほか16名, 令和8年度催物開催計画を検討

海外技術調査WG(4/28)(オンライン併用)

入江健二主査ほか8名, 調査団の目的と実施計画を検討

【国際委員会】

□ITA小委員会

小委員会・技術統括WG・ヤングメンバーWG合同会議(4/7)(オンライン併用)

砂金伸治委員長ほか35名, WTC2026対応を検討

□海外情報小委員会

海外ニュースWG(4/28)(オンライン併用)

篠原慶二委員ほか7名, 海外文献の査読と抄訳の選定

【技術委員会】

□技術変遷史編集小委員会

山岳工法編集WG(4/13)(オンライン併用)

小島芳之主査ほか13名, 課題と対応状況などを検討

シールド工法編集WG(4/21)(オンライン併用)

岩波基主査ほか14名, 課題と対応状況などを検討

□都市トンネル小委員会

改善WG(4/17)(オンライン併用)

河越勝主査ほか17名, トラブル事例集原稿案を検討

□安全環境小委員会

肌落ち災害防止対策WG(4/20)

(オンライン併用)

浅野健一郎主査ほか8名, 肌落ち災害アンケート結果の内容を検討

□山岳工法小委員会

支保WG(4/23)(オンライン併用)

佐原圭介主査ほか26名, 掘削・支保作業の生産性にかかわる問題点と課題を検討

【北海道新幹線トンネル施工技術委員会】

幹事会(4/14)(オンライン)

岸田潔幹事長ほか38名, 課題と対応状況などを検討

合計 12回開催 217名出席

国際会議の開催予定

第52回ITA総会およびWTC 2026

Connecting Communities through Underground Infrastructure

開催日	2026年5月15～21日
場所	モントリオール(カナダ)
主催者等	Tunnelling Association of Canada/ITA(国際トンネル協会) https://wtc2026.ca/

第53回ITA総会およびWTC 2027

Underground Creativity to Meet Societal Needs

開催日	2027年4月23～29日
場所	アントワープ(ベルギー)
主催者等	the Belgian tunnel Association/ITA(国際トンネル協会) https://wtc2027.com/

第54回ITA総会およびWTC 2028

Building Smarter Underground for a Sustainable Future

開催日	2028年4月21～26日
場所	シンガポール(シンガポール)
主催者等	Tunnelling and Underground Construction Society(Singapore)/ITA(国際トンネル協会)

問い合わせ先： 関 E-mail : noriko.seki@japan-tunnel.org TEL : 03-3524-1755

催物開催状況・予定

網掛け部は実施済(2025年度開催分)

	催物名	開催日	人数	場所	CPD
現場 研修会	新山科浄水場導水トンネル築造工事	2026. 2. 5	13	京 都	2.0
	国道41号門原1号トンネル工事	2026. 4.22	19	岐 阜	2.0
	水路トンネル 東村山導水管工事	2026. 5.28	15	東 京	2.0
施工体験 発表会	第98回施工体験発表会(山岳部門)「様々な課題にチャレンジした山岳トンネルの建設およびトンネルリニューアル工事」—創意工夫, 生産性・安全性向上, 働き方改革—	2026.10.15	150 (対面)	東 京	申請 予定
	第99回施工体験発表会(都市部門)「都市部でのトンネル・地下構造物を新設・改造」—AI, DXの活用, 環境配慮, 創意工夫—	2026.10.16	150 (対面)	東 京	申請 予定
講習会	第11回山岳トンネル維持管理業務講習会(基礎編)	2025.12.16	14 (対面) 37 (オンライン)	東 京	6.2
	第10回山岳トンネル維持管理業務講習会(実践編)	2026. 1.30	40 (対面) 100 (オンライン)	東 京	6.0
研修会	トンネル技術ステップアップ研修会(山岳部門)	2026. 6.24, 25	35	東 京	11.9
	トンネル技術ステップアップ研修会(シールド部門)	2026. 7. 1, 2	35	東 京	13.9

問い合わせ先 E-mail : event@japan-tunnel.org TEL : 03-3524-1755

小土かぶり・未固結砂質地山のトンネル施工における流砂現象防止対策の実施

—首都圏中央連絡自動車道 芝山トンネル—

(株)大林組東京本店圏央道芝山JV工事事務所工事長 鈴木 拓也

(株)大林組東京本店圏央道芝山JV工事事務所現場代理人 田代 雄二

東日本高速道路(株)関東支社千葉工事事務所工事長 河野 久雄

キーワード 流砂現象, 薬液注入試験施工, 特殊水ガラス系注入材, 最小拡幅工法, AGF-φ工法

1 はじめに

首都圏中央連絡自動車道芝山工事は圏央道事業の大栄～横芝間の約2.6km区間において土工, 地盤改良, 橋梁, ボックスカルバートなど, さまざまな工種を含む工事である。そのうち, 芝山トンネル(以下, 「本トンネル」)は未固結砂質土に延長616m, 掘削断面積約80m²のトンネルを新設する

表-1 工事概要

工事名	首都圏中央連絡自動車道芝山工事
工事場所	自)千葉県香取郡多古町水戸 至)千葉県山武郡芝山町殿部田
発注者	東日本高速道路(株)関東支社
施工者	大林組・岩田地崎建設特定建設工事共同企業体
工期	2021(令和3)年8月～2026(令和8)年9月
トンネル延長	L=616.0m
掘削断面積	82.9～84.9m ²
掘削方式	NATM機械掘削
掘削工法	補助ベンチ付き全断面工法



写真-1 沿線トンネルの地表陥没事例

ものである。表-1に工事概要を示す。千葉県内における沿線のトンネルでは, これまで流砂現象による切羽崩壊が頻繁に生じており, 地表陥没に至った事例も複数報告されていた(写真-1)。本トンネルは土かぶりが3～17m(平均10m)と小さく, トンネル直上に町道やゴルフ場が存在し, 地表陥没が起きた場合, 第三者に与える影響は大きく, 掘削時にいかに流砂現象を発生させないかが大きな課題であった。そこで本工事では, 各種の試験施工による対策工の検証を実施したうえで, 掘削に臨んだ。その結果, 地表構造物に影響を与えることなく, トンネル掘削を無事完了した。本稿ではこれらの対策と結果について述べる。

2 地形・地質概要

本トンネルの主な地質構成は, 新生代第四紀更新世に堆積した下総層群の砂質土層が主体である。また, 終点側坑口部およびトンネル中間部は, 軟弱な沖積層が堆積する小土かぶり区間となっている。図-1に本トンネルの地質縦断を示す。既往調査ではトンネル計画高に比べ地下水位が低いことから, 切羽は自立し, 各種の補助工法を組み合わせることでトンネル掘削が可能と考えられていた。しかしながら, 沿線のトンネルでは地下水で満たされていない不飽和状態の砂質土において流

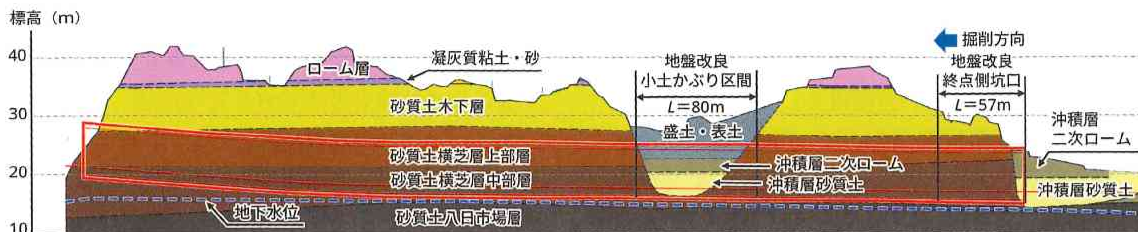


図-1 地質縦断

表-2 地山の物性と流動化の指標

分類	横芝層上部層	横芝層中部層	流動化の指標
位置	上半	下半	—
N 値	20~30	30~50	—
均等係数	2.1~3.0	2.4~3.0	4~5以下
細粒分含有率	9.3~15.1%	10.7~12.3%	10%以下
50%粒径	0.17~0.27mm	0.14~0.15mm	1.5mm以下
自然含水比	14.5~27.8%	13.7~21.3%	17%以下

砂現象が生じる、いわゆる「乾燥流砂」も発生していた。既往の研究報告¹⁾では、乾燥流砂は細粒分含有率や自然含水比と密接な関係があるとされ、本トンネルの砂質土の場合、自然含水比が17%を下回ると乾燥流砂の発生が懸念された。また、本トンネルの砂質土特性は土木学会などで示されるその他の流動化を示す指標²⁾に当てはまることから、流砂現象の発生が十分考えられた。表-2に本トンネルの地山物性と流動化を示す指標との対比を示す。

3 支保構造と補助工法

3-1 支保構造の概要

本トンネルは全線においてDⅢパターンが採用されている。図-2に本トンネルの代表的な支保パターンを示す。本トンネルは大半の区間において土地利用の直下を掘削することから、地表面沈下を最小限に抑える必要がある。したがって、掘削工法は補助ベンチ付き全断面工法

とし、吹付けインバートによる早期閉合が採用されている。インバート早期閉合は1回の施工延長を1mとし、上半切羽から7~8m後方で実施した。

3-2 補助工法の概要

本トンネルは土地利用の制約から、地上から実施する地盤改良は、終点側坑口部およびトンネル中間部に堆積する沖積層の範囲に限定し、それ以外の区間のトンネル安定対策は、主に坑内からの補助工法を採用する方針とされた。流砂現象を防ぐには天端部および切羽の安定対策が重要となることから補助工法は注入式長尺先受け工と注入式鏡補強工が組み合わせて採用されている。通常、長尺先受け工は長さ12.5mの鋼管を9m間隔で打設し、前シフトの鋼管と3m程度ラップさせることが標準的である。この場合、鋼管打設位置での前シフトの先受け長は3m程度となることから、先受け工の先から地山が流出することが考えられた。この事象は沿線のトンネルでも起きており、そ

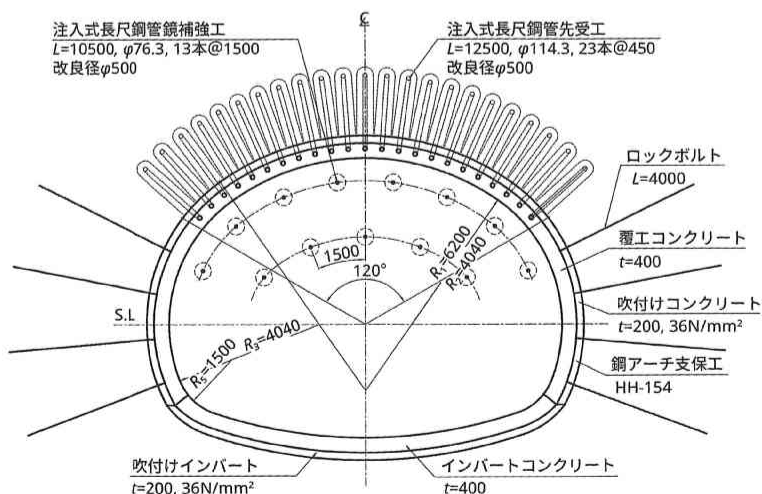


図-2 代表的な支保パターン

の後の対応として12.5mの鋼管を6m間隔で打設する「二重配置」の対策が取られていたことから、本トンネルも同様に二重配置として設計された。

3-3 注入式長尺先受け工の工法選定

注入式長尺先受け工の工法は、当初設計時に無拡幅方式が採用されていた。しかしながら、無拡幅方式の場合、鋼管の打設仰角が大きくなり、鋼管と掘削断面の間に注入改良がされない区間が形成され、その部分の砂地山が抜け落ちることが懸

念された。加えて、端末管を撤去する際に撤去時の地山のゆるみの発生や端末鋼管を撤去することによる先受け効果の低下が考えられた。また、長尺鋼管の打設は方向の制御が難しく、隣接する鋼管同士に想定以上の隙間が生じる可能性があった。上記の懸念から、トンネル掘削を開始する前に、外部有識者も含めた検討会を複数回開催した結果、無拡幅方式を最小拡幅方式(AGF-φ工法)へ変更した。



図-3 AGF-φ工法の概要



写真-2 ガイドパイプ付き鋼製支保工

本工法は穴開け加工した鋼製支保工に専用のガイドパイプを取り付け、そのガイドパイプ内から鋼管を打設する工法である。図-3にAGF-φ工法の概要、写真-2にガイドパイプ付き鋼製支保工を示す。これにより最小限の拡幅量で鋼管の打設が可能となり、打設仰角も限界まで小さくできる。

また、ガイドパイプを通した施工を行うことで高い精度で鋼管の打設も可能となり、鋼管同士の隙間も解消できる。当初設計の無拡幅式との比較を表-3に示す。

表-3 工法の比較

工法名	無拡幅方式	最小拡幅方式(AGF-φ工法)
概要	<p>打設角度8~10° 鋼管下の離隔大きい</p> <ul style="list-style-type: none"> 標準断面の鋼製支保工の内面側から鋼管を切羽前方地山に打設する。 掘削断面内にある端末管は撤去する。 	<p>打設角度6~8° 鋼管下の離隔小さい</p> <ul style="list-style-type: none"> あらかじめ断面を拡幅したあとにガイドパイプ付きの鋼製支保工から鋼管を切羽前方地山に打設する。 掘削断面内に鋼管が残らないため撤去不要である。
長所	<ul style="list-style-type: none"> 掘削断面を拡幅せずに鋼管の打設が可能である。 任意の位置から打設が可能であり、地山の急変時にも対応可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管と支保工の離隔が小さく鋼管下の抜け落ちを最小限とすることができる。 鋼管を介して支保工に確実に地山荷重を伝達できる。 ガイドパイプを通して鋼管を打設するため打設精度が高い。
短所	<ul style="list-style-type: none"> 打設仰角が大きいため、鋼管と支保工の離隔が徐々に大きくなり、鋼管下の地山が抜け落ちる可能性がある。 端末管を撤去することで地山のゆるみが発生させる可能性がある。また、撤去部は先受け効果が低い。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削土量、吹付けコンクリート量などが増加する。 あらかじめ定めた位置でしか打設が行えないため、地山急変時には別途対策が必要となる。

4 補助工法の注入材と試験施工

4-1 注入材の課題

有識者会議では注入材についても検討を行った。補助工法の注入における改良形態は大別すると図-4に示すように「浸透注入」と「割裂注入」に分けられる。砂質土において割裂形態となった場合、注入式長尺先受け工では天端部に連続した改良体を形成できず、改良欠損部から砂の抜け落ちが発生すると考えた。したがって、流砂現象を防ぐには浸透注入により改良体を形成し、改良体間の隙間を確実になくす必要があると考えた。本トンネルの先受け工の注入材には、砂質土において高い浸透改良効果が期待されるとして当初はシリカレジンが設計されていた。しかしながら、シリカレジン含むウレタン系注入材は、地山内の亀裂へ浸透・発泡し、岩片間の結合力を高めることが期待

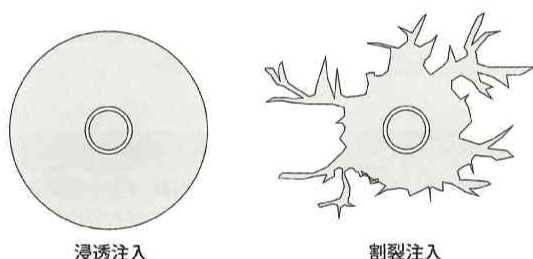


図-4 注入形態の概要

表-4 既往研究結果との比較

試料種類	8号珪砂	芝山トンネル土質試料	6号珪砂	4号珪砂
平均粒径(mm)	0.12	0.18	0.35	0.75
注入形態	割裂	割裂と想定される	割裂・浸透の中間	浸透

表-5 選定した注入材の物性

注 入 材	シリカレジン	シリカレジン (低粘度タイプ)	ウレタン (低粘度・高強度タイプ)	超微粒子セメント	特殊水ガラス系溶液型
液 粘 度(mPa·s)	110±40(25℃)	50±20(25℃)	55±30(25℃)	180	2~10(20℃)
発泡倍率(自由発泡)	6~10倍	2~8倍	3~9倍	—	—
一 軸 圧 縮 強 度 (N/mm ²)	3.0±0.5 (3倍発泡時)	1.0±0.4 (3倍発泡時)	7.0以上 (3倍発泡時)	8.0 (材齢28日)	1.0~1.5
そ の 他	設計注入材 (先受け工)	液粘度を低下させ、浸透性を向上させた材料		設計注入材 (鏡補強工)	液粘度がもっとも低く 砂地山の適用性が高い

された材料であり³⁾、本工事の砂地山において浸透改良を行えるかは不明確であった。また、既往の研究成果ではシリカレジンを6~8号珪砂に注入した場合、割裂注入形態を示すことが報告されていた⁴⁾。本トンネルの砂質土は表-4に示すとおり6~8号珪砂と同程度の粒度分布であることから、既往の研究と同じく割裂注入形態となることが想定された。以上の経緯から、試験施工により、本トンネルの砂質土に浸透する注入材を改めて選定した。

4-2 注入材の特徴

シリカレジンは2液を混合した直後、急激に粘性が増し、液粘度が1,000~4,000mPa·s程度まで上昇した後に発泡固結する性質を有している。しかしながら、粒径の細かい砂質土では液体の粘性が浸透を阻害すると考えた。そこでシリカレジンより液粘度が低く、発泡固結するまでの時間が遅い特徴をもつウレタン系材料を試験の注入材として選定した。また、液粘度のもっとも低い材料として水ガラス系溶液型も選定した。ただし、従来の水ガラス系材料では切羽を自立させるために必要なサンドゲル強度が得られないことから、従来品より強度発現性を3倍程度高めた特殊水ガラス系溶液型を選定した。加えて、注入式鏡補強工に当初より設計されていた超微粒子セメントについても試験した。

表-5に選定した注入材とその物性を示す。

4-3 試験施工の手順

試験は原位置の砂地山にて行った。手順は、まず $t=10\text{cm}$ のモルタル吹付けを法面部に施工した後、延長5.0mの鋼管を法面部から地山へ打設し、

そこから薬液を注入して、最後に掘り起こす順序とした。浸透性の高い材料を用いることから、鋼管口元から注入材がリークしないように鋼管の端末部にウレタン注入による $L=1.5m$ のバルクヘッドを構築し、残りの $3.5m$ を改良した(図-5)。注入量はジェオフロンテ研究会の積算資料⁵⁾に示される算出式を用いて目標改良径 $50cm$ に必要な量を算出した。また、注入量によって改良径や改良形態が変化するかを確認するため算出量の2倍量も合わせて試験した。その他、注入時の諸条件

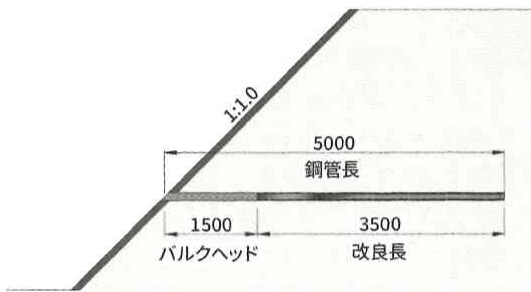


図-5 鋼管打設の概要

表-6 注入の管理方法

材 料	注入量		注入圧力	注入速度
	定量	2倍量	上限圧	
シリカレジン	39L	78L	初期圧 +2.5MPa	4L/分
シリカレジン (低粘度)				
ウレタン (低粘度・高強度)	292L	584L		15L/分
超微粒子セメント 特殊水ガラス系 溶液型				



写真-3 試験施工の状況

表-7 試験施工の結果

注 入 材	注入形態	注入時の状況	評 価
シリカレジン シリカレジン(低粘度タイプ) ウレタン(低粘度・高強度タイプ)	割裂脈を形成・浸透せず。 (定量・2倍量とも同じ結果)	圧力は初期圧から上昇なし。 リークの発生なし。 (定量・2倍量とも同じ結果)	ウレタン系材料はいずれも割裂注入となるため本トンネルの砂質土には不適と評価。
超微粒子セメント	ポアホール内の充填のみ。	注入後すぐに口元からリークが止まらず中断。	セメント粒子が浸透できる間隙がなく浸透不可のため本トンネルの砂質土には不適と評価。
【採用】 特殊水ガラス系溶液型	広く均一に地山に浸透。 平均径58cmの改良体形成。 サンドゲル強度：1.5N/mm ²	圧力は初期圧から上昇なし。 リークの発生なし。	注入形態・施工性ともに良好。 本トンネルの注入材として採用。



写真-4 改良体の形成状況

は実施工と同様とした。表-6に各注入材の注入量と管理方法を示し、施工状況を写真-3に示す。

4-4 試験施工の結果

試験施工の結果、3種類のウレタン系材料はすべて割裂注入形態となり板状の改良体が形成された。注入時にウレタン系注入材の薬液は地山内において数m先まで逸走し、隣接する鋼管内を閉塞してしまっただ。超微粒子セメントおよび特殊水ガラス系溶液型の試験は定量注入のみ行った。超微粒子セメントについてはリークを止めることができず、改良体は形成されなかった。特殊水ガラス系溶液型は浸透形態を示した。試験施工の結果を表-7および写真-4に示す。

以上の結果、注入式長尺先受け工、注入式長尺鏡補強工ともに「特殊水ガラス系溶液型」を採用した。実施工の注入式長尺先受け工の諸元は目標改良径を50cmとして注入量を設計し、鋼管先端部においても改良体がラップするように鋼管打設間隔を45cmとした。

5 実施工の状況

5-1 改良体の形成状況

以上の対策を講じた上でトンネル掘削に着手した。実施工では鏡補強工により形成された注入改良体が目視で確認できた。写真-5に改良体の形成状況を示す。改良径を実測した結果、概ね直径500mm程度であることも確認できた。天端部は目視確認することができないが注入式長尺先受け工により同様の改良体が形成されていると考えられ、これにより流砂現象が発生することなく掘削を進めることができた。

5-2 鋼管下の抜け落ちと補助工法のシフト長変更

しかしながら、AGF ϕ 工法の採用により打設仰角を最小限にしても鋼管下の抜け落ちが発生した。具体的な事象としては、砂地山へ吹付けコンクリートを行っている際に、付着した吹付けコンクリートが砂地山ごと落下することがたびたび続いた(写真-6)。抜け落ちは鋼管打設後5~6m掘進時点で発生していた。これは放射状に打設した先



写真-5 鏡補強工の改良体



写真-6 吹付けコンクリートの落下

受け工が5~6m掘進時点で支保工からわずかに離れるためである。対策として先受け工の鋼管打設後4m掘進した地点から先受け工下部へ注入式フォアポーリングを実施した。しかしながら効果が得られず、吹付けコンクリートの落下が続いた。そこで注入式長尺先受け工のシフト長の見直しを行った。その際、地表面沈下計測の結果をもとに検討を行った。地表面沈下は上半切羽底盤部から45°+ $\phi/2$ で表されるゆるみ領域線を地表面まで延長した交点辺りから発生していた。したがって、注入式長尺先受け工のシフト長を短くするにあたって、切羽前方45°+ $\phi/2$ のゆるみ影響線を越えるまで先受け長を確保することを方針とし、先受け長を検討した。表-8に示す検討の結果、注入式長尺先受け工のシフト長を4mへ変更し、鋼管の打設長は9.5mとした。尚、シフト長の変更を行って以降は抜け落ちの発生はなくなり、順調に掘削を進めることができた。

表-8 シフト長と先受け長の比較検討結果

	当初	変更案①	変更案②
概要図			
仕様	シフト長：6 m 先受け長：12.5 m 注入量：1,071 L/本	シフト長：4 m 先受け長：9.5 m 注入量：814 L/本	シフト長：4 m 先受け長：6.5 m 注入量：557 L/本
適用性	鋼管打設後、5～6 サイクル目の掘削時に鋼管下の抜け落ちが発生する。	抜け落ちを最小限にできる。適切な先受け長である。	抜け落ちを最小限にできる。先受け長が不足する。
判定	×	○	×

6 おわりに

注入式長尺先受け工の工法および注入材の変更により流砂現象の発生や大きな抜け落ちなどの事象は発生することなく無事に掘削を終えることができた。本トンネルは掘削開始前から複数回に渡り有識者などと検討会を実施し、対策工を検討してきた。結果、当初懸念された流砂現象による地表陥没や切羽崩壊を一度も生じさせず、各種保安物件に定めた地表面沈下量の許容値もすべて満足して掘削を終えることができた。最後に、関係者各位に多大なるご協力をいただいたことを心より感謝いたします。本稿が類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 蔵田忠廣・宮本武司：未固結砂層におけるトンネル切羽自立性の判定基準の提案，土木学会論文集第382号/Ⅲ-7，1987.6.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説，p.40，2016.
- 3) ジェオフロンテ研究会長尺ボルト分科会ウレタン開発WG：ウレタン系材料の種類と取扱い方法.
- 4) 鈴木雅行・鮫沢博・吉武勇・中川浩二：シリカレジ注入材の模擬地山における発泡圧と浸透性に関する基礎的研究，土木学会トンネル工学報告集，2002.12.
- 5) ジェオフロンテ研究会アンブレラ(積算)WG：注入式長尺先受け工法(AGF工法)「標準積算資料」第六版，p.36，2014.

都心部における超長距離・大深度シールド施工

—千代田幹線工事, 千代田幹線その2工事—

(株)奥村組東日本支社東京土木第1部石岡シールド工事所工事主任 柿 永 恭 佑
 (株)奥村組東日本支社東京土木第1部石岡シールド工事所所長 吉 田 英 典

キーワード シールド, 大深度, 超長距離, 都市部縦断

1 はじめに

千代田幹線は、千代田区飯田橋に位置する発進立坑を起点とし、低段幹線、飯田橋幹線、中段幹線、番町幹線、麻布幹線、高段幹線の6幹線を流入させ、港区港南にある芝浦水再生センターへ流下させることを目的としている(図-1)。

2 工事概要

2-1 工事内容

シールド計画諸元を以下に示す。

- 工 法：泥水式シールド工法
- 管 径：φ4,900mm
(仕上がり内径)
- セグメント：二次覆工一体型
(外径5,500mm)
- 土 か ぶり：48.0～59.0m
- 延 長：8.7km
- トンネル勾配：0.5‰下り勾配
- 曲 線 区 間：R 50～1,000m
(R 250m以下23か所)

2-2 土質条件

シールドが通過する路線の地盤は、洪積層(上総層)のN値50以上の硬質地盤であり、発進から固結シルトと細砂の互層で、その後シルト質の砂層となり、路線終盤は固結シルト層が主体となる。地下水位はGL-2.0m程度と高い位置に存在して

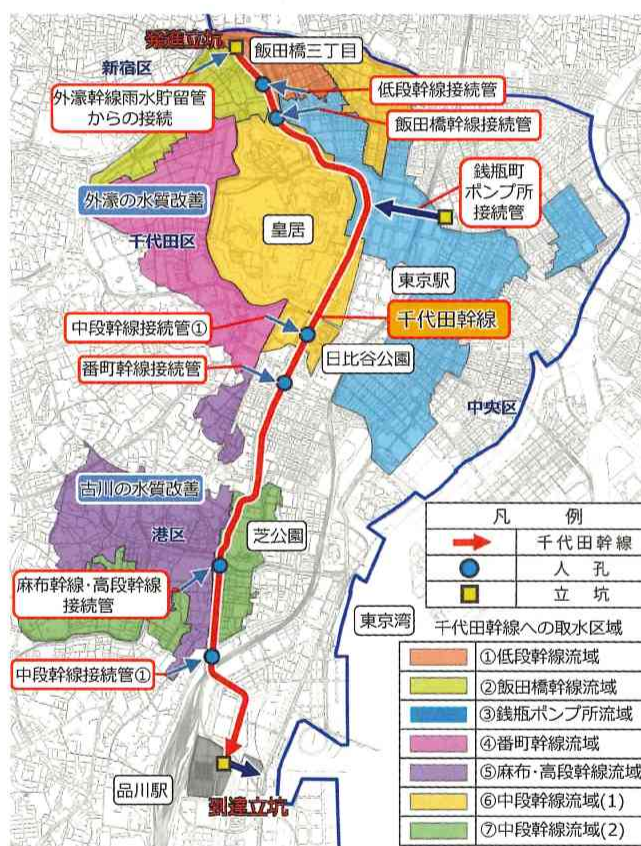
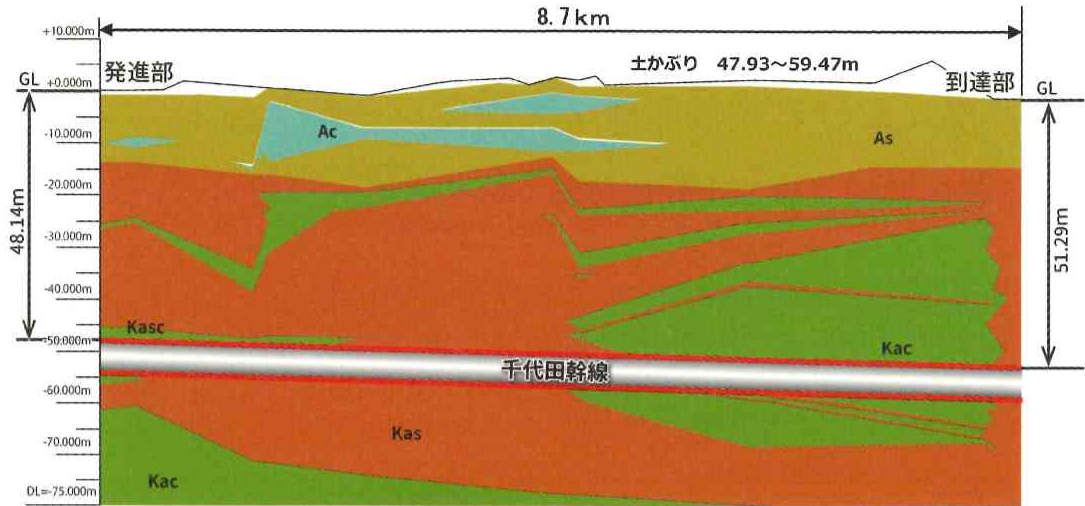


図-1 路線平面図

いる。土質断面図を図-2に示す。

3 施工上の課題

本工事における施工上の課題は、長距離施工・大深度・狭隘な発進ヤードであり、その内容については以下のとおりである。



		洪積層(互層)(Kase)	洪積砂質土・礫(Kas)		洪積粘性土・礫(Kac)
トンネル 通過土質	土質:	固結シルト・細砂層	砂質シルト・中粗砂層	砂質固結シルト・シルト質細砂	固結シルト
	N値:	50以上	50以上	50以上	50以上
	φ:	—	—	26.0 ~ 37.0°	—
	c:	638 ~ 805kN/m ²	638 ~ 805kN/m ²	638 ~ 805kN/m ²	638 ~ 805kN/m ²
	透水係数:	3.34 × 10 ⁻³	3.34 × 10 ⁻³	3.34 × 10 ⁻³	3.34 × 10 ⁻³
地下水状況		GL-0.50m	GL-3.25m	GL-2.45m	GL-3.70m
有害ガスなど		なし			

図-2 土質縦断面図

3-1 長距離施工(8.7km)

本工事は、泥水式シールドを採用し、1スパンの施工延長は約8.7kmと、国内最大級の長距離シールドである。このため長距離施工に対する以下の検討が必要である。

(1) シールドのカッタービット耐久性向上

長距離施工ではシールドの耐久性が求められ、とくにカッタービットの摩耗が増大すると掘進不能になるため、カッタービットの摩耗およびビット交換方法について対策が必要である。

(2) 長距離坑内資機材運搬の効率化

シールド工事では、日々の掘進・組立てのサイクルがクリティカルパスとなるため、約8.7kmの長距離施工における坑内の資機材運搬を滞りなく行えるよう計画する必要がある。

(3) トラブル発生時における対策

長距離施工では、とくに掘削地盤が硬質な砂質土層の場合、泥水処理設備や流体輸送設備の損耗が考えられるため、部品や配管の交換を計画的に

行うことで、安定した進捗を確保することができる。このため、流体輸送用設備の維持管理について対策が必要である。

3-2 大深度(高水圧)

シールド路線は、平均土かぶり50m、最大土かぶり58.6mの大深度であり、高水圧下での施工となるため、大深度(高水圧)に対する以下の検討が必要である。

(1) シールドの高水圧対策

シールドの高水圧対策として、カッターシール、中折れシール、テールブラシで地下水の流入を防止する必要がある。とくにテールブラシは、高水圧対策において重要な役割を果たすため、ブラシの段数や緊急時の対応について対策が必要である。

(2) セグメントの止水性向上

セグメント本体では、高い切羽水圧によるジャッキ推力などの施工時荷重の増大がセグメントの目違い目開きを誘発し止水性の低下を招くため、施工時荷重に対する止水性の確保が必要であ

る。また、高水圧に対するシール材についても止水性向上対策が必要である。
 (3) 大深度立坑における資機材投入などの作業の安全性確保

立坑で資機材を投入する際にクレーンを使用するが、大深度立坑であるため垂直搬送距離が長く、荷振れなどが生じて立坑壁面に荷が接触して落下するなどの危険が想定される。そのため、吊り荷下への人払いを確実に行う必要がある。

3-3 狭隘な発進基地ヤード

920m²の発進基地は、仕上がり内径φ4,900mmのシールド工事で、かつ泥水式シールドの施工ヤードとすると狭く、シールド設備の配置には省面積化の検討が必要である。

(1) 防音ハウス内階層構造の計画

2016年度トンネル標準示方書ではシールド外径5.0mの泥水式シールドの施工ヤードとしては、1,500m²必要とされているが、920m²の発進基地内に泥水処理設備、流体輸送設備を納めるため防音ハウス内を階層構造にする必要がある。

(2) 狭い立坑開口部を有効に利用

本工事の円形発進立坑は、半分が道路直下で半分が施工ヤード内に位置しており、かつ防音ハウス壁面が立坑開口部を横断しているため、開口部が小さく、それを配慮した揚重設備とする必要がある。

4 課題への対応策

4-1 長距離施工(8.7km)対策と結果

4-1-1 カッタビットの摩耗対策および機械式ビット交換の対策

(1) カッタビットの摩耗対策

本工事では、カッタビットの摩耗対策としてすぐれた耐摩耗性を有する高耐久性ビット「スタミナビット」(図-3)を採用した。超硬チップの材質として、抗折力が比較的高く耐摩耗性に優れたE5種か、硬度が比較的高く耐摩耗性に優れたE3種を用いるのが一般的であるが、本工事で用いる

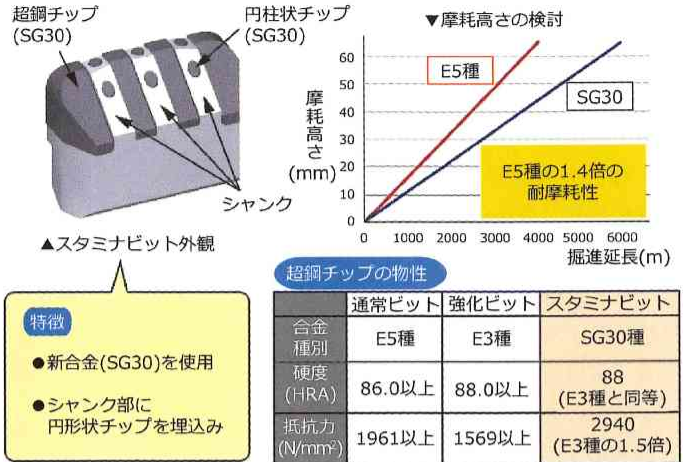


図-3 先行スタミナビット仕様

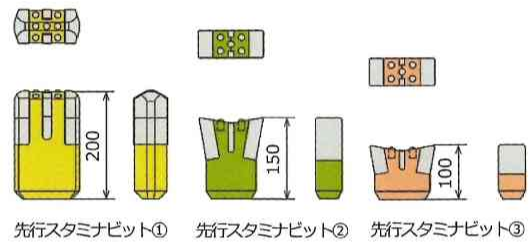


図-4 三段差先行スタミナビット

スタミナビットの材質はSG30であり、E3種と同程度の硬度持ちながらE5種の1.5倍に抗折力を高めている。

また、先行スタミナビットの高さを200mm、150mm、100mmと段差をつけることで、長距離施工での耐久性を確保した(図-4)。

(2) 機械式ビット交換「スライドカッタ工法」の採用

本工事は大深度で、地中ビット交換が困難な中口径シールドであることから、シールド前方にビットを押し出すことができる「スライドカッタ工法」を採用した。8.7kmの長距離施工においてビット摩耗の実績から摩耗量を想定し、機械式ビット交換を実施する計画とした(図-5)。スライドカッタ工法は、カッタスポークが二重構造で、固定構造とスライド可能なカッタスポークから構成される。

本工事では、先行スタミナビットが摩耗限界量の50mmに達したところで、先行ビットを装着し

ているカッタスポークを前進させる計画とした。先行ビットの摩耗計画より、6,612m位置での交換を計画した(図-6)。

(3) カッタビットの摩耗対策の結果

先行スタミナビット①H=200mmには、多段式摩耗検知装置を内蔵しており、カッタビットに内蔵した電極(導体)の配置されたセンサーが、ビットと同様に摩耗していくことで、電極(導体)抵抗差により計測することができる。

ビット摩耗進行状況は、掘進延長3,891mで、12mmを示しており、計画時想定摩耗量50mmに対し24%の小さい値となった。

全線8.7kmの掘進を終えて、機械式ビット交換

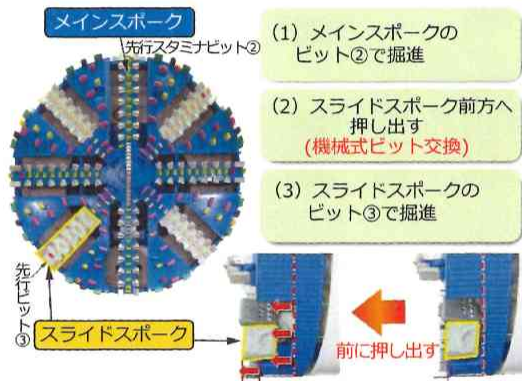


図-5 機械式ビット交換
「スライドカッター工法」の概要

のみで掘進を終え、掘進完了後に行った実測値は先行スタミナビット①で最大32mmの摩耗量(平均16mm)であった(図-7)。また、先行スタミナビット②H=150においては、最大で0.6mmの摩耗量(平均0.5mm)であった(図-8)。

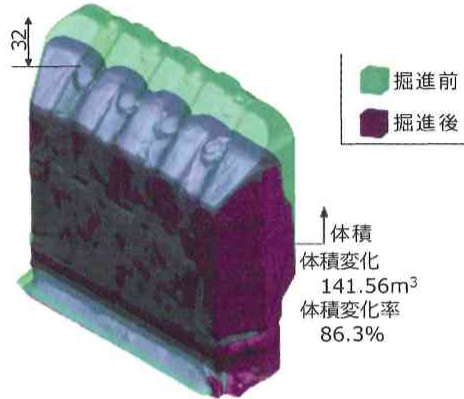


図-7 先行スタミナビット①摩耗状況(3D)

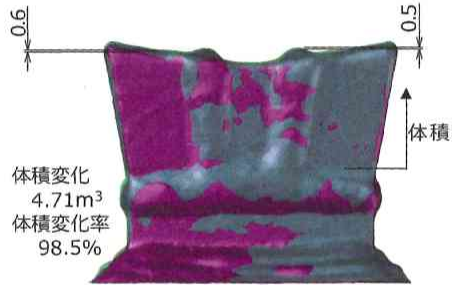


図-8 先行スタミナビット②摩耗状況(3D)

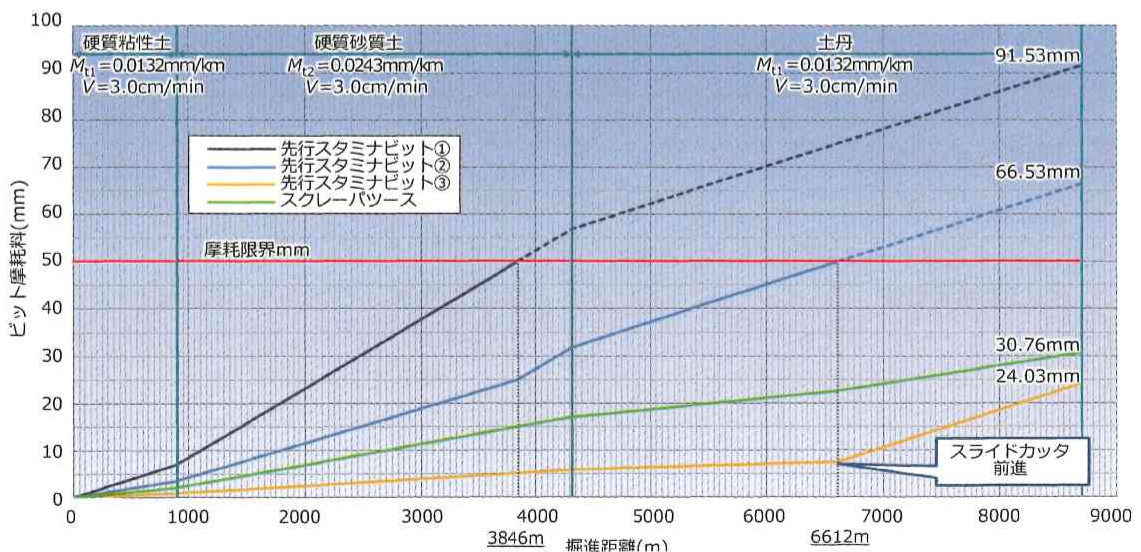


図-6 先行ビットの摩耗計画

当初想定ビット摩耗係数^{※1}0.0243mm/kmに対し、スタミナビットの摩耗係数は0.0044mm/kmとなった。カッタビットを多条配置としたことで、各ビットへの負荷が軽減され、摩耗を抑制できたと考えられる。

4-1-2 長距離資機材運搬の効率化

長距離施工におけるシールドの掘進組立サイクルに遅滞なく資機材運搬を行うため、消費電力の少ないデジタルサーボ式バッテリー蓄電車を採用した。長距離特有のヒューマンエラーを防止するため、坑内自動運行管理システムを採用した。

(1) デジタルサーボ式バッテリー蓄電車の採用

一般的に4kmを超える長距離施工では、抵抗式バッテリー蓄電車を用いた場合、蓄電が不足し、片番掘進作業中に蓄電池の交換作業が必要となるため作業効率が低下する。本工事では、電気消費量が小さいデジタルサーボ式バッテリー蓄電車(写真-1)を採用することで、1台あたり8.7kmを3往復することが可能であった。これにより、片番掘進作業終了後に蓄電池の交換をすることで、掘進作業に影響がなかった。また、離合部を2,100m地点、5,400m地点の2か所に設置した(図-9)。



写真-1 坑内自動運行状況

※1 摩耗係数(mm/km)：土質、チップ材質によって異なり、類似条件の実績を考慮して定めた摺動距離あたりの摩耗量

離合部設置ごとに蓄電車を1台ずつ増台し、施工サイクルの効率化を行った(図-10)。これにより、クリティカルパスとなる作業は掘進作業となっていることがわかる。

以上により、シールド到達まで片番掘進作業中の蓄電池交換作業は行わずに施工を行うことができた。

(2) 坑内自動運行管理システム

本工事は延長8.7kmの長距離であるため、運転手の集中力低下による操作ミスや運行速度オーバーなどの危険に対して、運転手なしの自動で運行管理を行うことで、安全性の向上と省力化を図った。

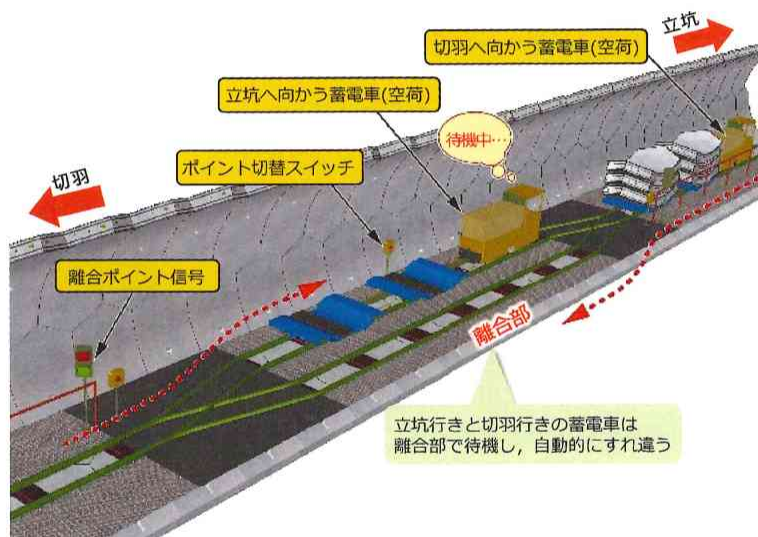


図-9 自動運行管理システムを採用した離合部

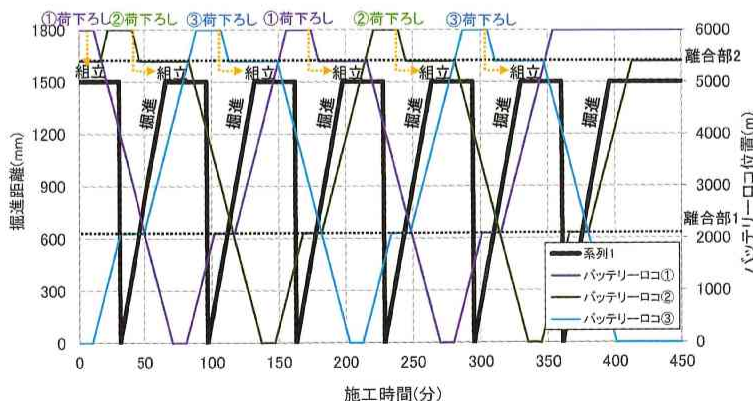


図-10 施工サイクル(6,000m掘進時)

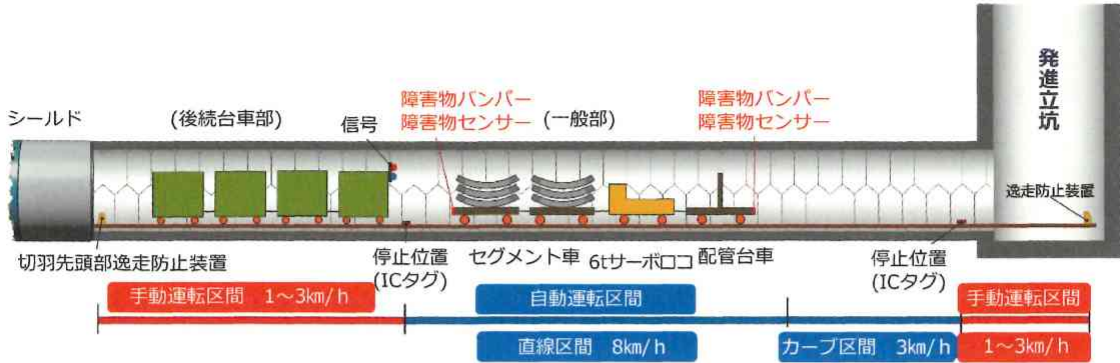


図-11 自動運行管理システム概要図

その結果、離合部のすれ違いや、速度規制を確実に制限することができ、中央管理室からの遠隔管理が可能である。自動運行管理システムでは、セグメント資機材を積んだ蓄電車は坑口で切羽行のボタンを押すと後続台車後方まで自動で走行し、停止する(図-11)。また離合部では、必ずすれ違い、直線区間と急曲線区間で制限スピードを守り走行できる。

4-1-3 不測のトラブル発生時における対策

泥水式シールドにおける長距離施工では、とくに砂質土層を掘進すると排泥管の摩耗が進行して、破断・破損が発生し、掘進が中断する恐れがあった。このため、超音波を用いて管材の厚みを測定できる超音波配管肉厚計を用いて、1回/週の定期点検で排泥管の摩耗状況を把握し、交換時期の予測を行い、掘進日以外にメンテナンス日を設定することで配管の交換整備を行った(写真-2)。

計画的に排泥配管を交換することで、突発的な配管の損耗を防止することができた。本工事では、排泥管の厚み5.8mmを使用しており、摩耗して2.0mm未満になると工程調整を行い、計画的に配管交換を行った。

4-2 大深度(高水圧)対策

4-2-1 テールブラシの段数と緊急時の対策

0.5MPaの高水圧下でのシールド工事では、テールブラシ4段配置となるケースが多く、加えて長距離施工という条件から、交換可能なテールブラシとする必要があった。テールブラシの段数を増やすと止水性は有利だが、その分シールド後胴が



写真-2 排泥配管肉厚計測状況

交換可能なテールブラシ

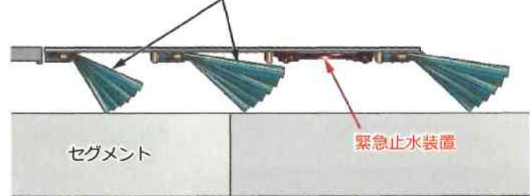


図-12 テールブラシ3段配置図

長くなり、曲線施工ではその長さが不利となる。このため、本工事では交換可能なテールブラシを3段配置とし、テール部の出水対策と交換時の止水対策に緊急止水装置を装備させ、高水圧下におけるシールドテール部の止水性を確保する計画とした(図-12)。緊急止水装置とは、テールブラシの2段目と3段目の間にゴムチューブをシールドに内蔵し、高圧水を注入することでゴムチューブを膨らませ、テール部の一時的な緊急止水とテールブラシの交換を可能とする装置である(写真-3)。

本工事では、テール部からの出水に対応し、4,300m, 5,580m, 7,860mにて計3回のテールブラシ交換を実施した。交換作業は、緊急止水装置の使用により、出水トラブルなどなく実施できた。

交換したテールブラシを確認すると、1段目は保護板が破断しているが、ブラシは比較的残っている状態であった(写真-4)。2段目のテールブラシは、保護板が破断しており、ブラシも半分になっ



写真-3 緊急止水装置



写真-4 交換したテールブラシ(1段目)



写真-5 交換したテールブラシ(2段目)

ていた(写真-5)。高水圧下における裏込めや地下水の浸入により、ブラシが弾性を失い損傷したことにより、破断・破損したものと考えられる。

4-2-2 高水圧におけるセグメントの止水性向上

(1) セグメント本体の止水性の確保

本工事では全ピース同一六角形状の「ハニカムセグメント」を採用した。「ハニカムセグメント」は、六角形で、くさび状に連結した継手構造により、継手強度とリング剛性が高いのが特徴である。施工時荷重が大きい場合は、Kセグメントは軸方向挿入型が基本となるが、ハニカムセグメントは、全ピースが軸方向挿入型であり、かつ継手面に取付けた凹凸上のプラグソケットのガイド機能により、組立精度が良く、止水性が優れている(図-13)。

(2) 高水圧に対するシール材について

セグメントのシール材は、一般的にセグメントの側面で接着剤を用いた突合せ接合のため、組立



図-13 ハニカムセグメント

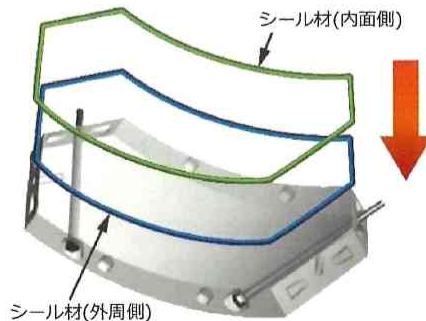


図-14 シームレスシール材

て時の剥がれなどで漏水上の弱点となりやすい。そこで、リング状に工場加工した継ぎ目のない、シームレスシール材を採用した(図-14)。

また、シール材を内側と外側の2段配置とすることで、万が一片方のシールが損傷しても止水性を確保した。

ハニカムセグメントおよびシームレスシール材の使用により、シールドトンネル内は漏水がなく、施工できた。

4-2-3 荷振れ防止対策および安全対策

荷振れ防止対策として、立坑にガイドレールを設置し、セグメントグラブを使用して、セグメントを吊り降した(写真-6)。また、揚重作業の安全対策として、吊り荷安全警告システムを設置した。

(1) セグメント把持・投入装置とガイドレール

セグメントグラブは電源不要で、機械的に把持するため、ナイロンスリングなどで玉掛けするよりも短時間に脱着することができた。また、ガイドレールを使用することで、大深度でも荷振れすることなく定位置に降ろすことができた。立坑開口部が狭い上、立坑内にも構造物が存在するが、接触することなく揚重できた。

(2) 吊り荷安全警告システムを採用

立坑への資機材投入時は、押しボタンによる警報が一般的であるが、立坑にクレーンを検知して警報を発するレーザーバリアによる吊り荷認識警報機を採用した。写真-7に示したオレンジ色の範囲に吊荷が来るとレーザーにより吊荷を検知し、警報が鳴り周囲への警戒を呼び掛けるシステムとした。合わせてクレーンフックに取り付けた作業員に警告を行うフックコールによる二重の対策を実施した。

これにより、吊り荷下への人払いを確実に行うことができた。

4-3 狭隘な発進基地ヤード対策

920m²のスペースに泥水式シールドの設備を配置するために以下の対策を実施した。

4-3-1 防音ハウスの3階構造

本工事では、防音ハウスを3階構造としたことで、2,200m²の延床面積を確保した(図-15)。低周



写真-6 セグメントグラブ稼働状況



写真-7 レーザーバリア

波対策の防音ハウスを内部に設置するため、振動篩の基礎をGLより1.7m下げた。これにより、全体的なハウスの高さを変更せずに高さ21.3mに収めることができた。

また、防音ハウス内の多くの設置面積が必要となる泥水設備は、5 cm 程度の礫や固結回収される土丹層の粘土塊を想定して、前処理機1台と振動篩2台を設置する必要があったが、敷地面積には収まらなかったため前処理機と振動篩の兼用機を製作することで設置面積を2/3に抑えることができた(図-16)。

4-3-2 天井クレーン(15t)ガーダー構造の変更

一般的に天井クレーンのガーダー構造は矩形で

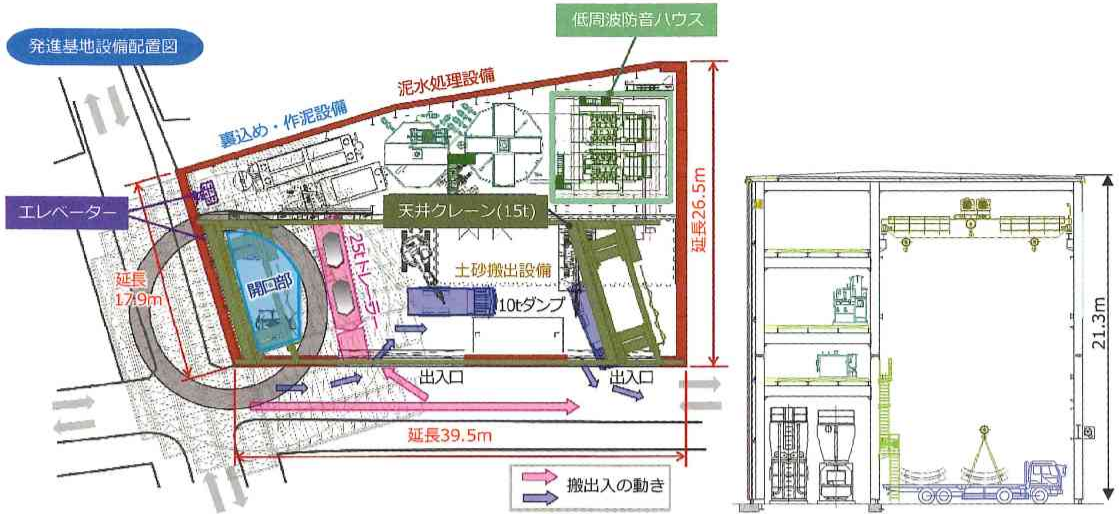


図-15 発進基地各設備配置図

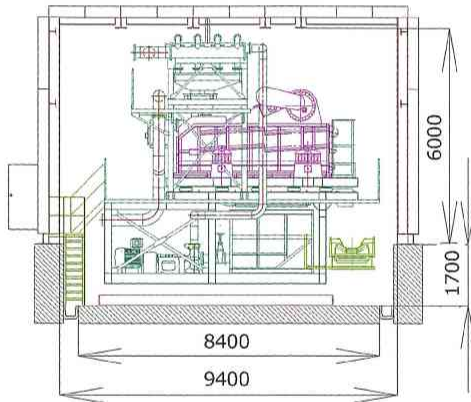


図-16 一次処理機(前処理機+振動機兼用機)



写真-9 到達状況



写真-8 天井クレーン(15t)稼働状況

あるが、天井クレーンに対して斜めの立坑開口部であるため、天井クレーンのガーダーを斜め構造とした。これにより、円滑な揚重作業を行うことができた(写真-8)。

5 おわりに

大深度・長距離シールドの施工報告を行った。厳しい条件下での施工となったが、安全とより高い品質の確保を目指して施工を進めて、無事に8.7kmという超長距離の掘進を終えることができた(写真-9)。

最後に、本工事の施工にあたり、多大なご指導・ご協力をいただいた関係者の皆様に感謝申し上げますとともに本稿が同種工事の参考になれば幸いです。