

複合推進工法による大深度・硬質地盤での小口径トンネルの施工

Construction of Small Diameter Tunnel in Large-depth and Hard Ground by Compound Jacking Method

弦本 優司*1 Yuji Tsurumoto
石 和摩*1 Kazuma Ishi
藤原 陸斗*1 Rikuto Fujiwara
本間 清真*1 Kiyomasa Homma
阪部 久敬*2 Hisanori Sakabe

要 旨

淡山連絡水路建設工事は、国営東播用水二期農業水利計画に基づき、延長約1.6kmに及ぶ管水路(内径φ1,000mm)の新設であり、路線中間部に両発進立坑を設けて両側に長距離推進を行う工事である。本報告では、硬質地盤での小口径トンネルの長距離推進における実施工上の課題と対策、および、狭小な大深度立坑での安全かつ効率化施工の事例について報告する。

キーワード： 硬質地盤 長距離推進 小口径トンネル 狭小 大深度

1. はじめに

兵庫県神戸市西区、三木市など東播磨地域に広がる丘陵地帯では、古くから水不足に悩まされ、明治中期から大正にかけて淡河川・山田川疎水事業が実施され対応してきた。

その後、水稻栽培の拡大等により農業用水の需要が増大したことから、農業用水不足の解消や水道用水の水源確保のため、1970(昭和45)年から1992(平成4)年にかけて国営東播用水土地改良事業が実施され、ダムや110kmに及ぶ用水路ネットワークが構築されて利便性の向上が図られてきた。さらに近年、施設の老朽化による補修・維持管理の増大や酒米(山田錦)の作付けの増大による用水不足などの新たな問題が生じたため、水利施設の改修および用水系統の再編を行うことを目的として、2013(平成25)年度より国営東播用水二期土地改良事業が着手された。

再編計画では、淡河川・山田川疎水事業において100年以上前に築造され、老朽化の進行が著しい淡河幹線水路と山田幹線水路のうち、特に三木市内の住宅団地下を通過しているために改修が困難な区間はこれを廃止して、山田幹線水路へ合流する新たな水路である淡山連絡水路が建設されることとなった。

2. 工事概要

本工事の位置図を図1に示す。また、表1に工事概要、図2に推進路線縦断をそれぞれ示す。

工事は、延長約1.6kmの管水路の中間部にあたる神戸市

と三木市の境界付近の丘陵頂上部に発進立坑を設け、南北両方向に向けて推進工法で掘進してトンネルを築造する。



図1 工事位置

表1 工事概要

工事名	東播用水二期農業水利事業 淡山連絡水路工事
発注者	農林水産省 近畿農政局
施工者	(株) 鴻池組
工事場所	兵庫県三木市志染町窟屋、青山1丁目、神戸市西区押部谷町西盛地内
工期	2017年9月～2020年5月
工事内容	管水路工 ・CMT工法(φ1000mm) 上流側推進延長 L=934.7m 下流側推進延長 L=692.6m ・立坑工 ライナープレート式 発進立坑 φ7.5m H=40m 到達立坑(上流) φ8.5m H=9.5m 到達立坑(下流) φ3.0m H=4.5m 構築工(合流工・接続工) ・その他 追加工事 一式

*1 大阪本店 土木部 *2 技術本部 土木技術部

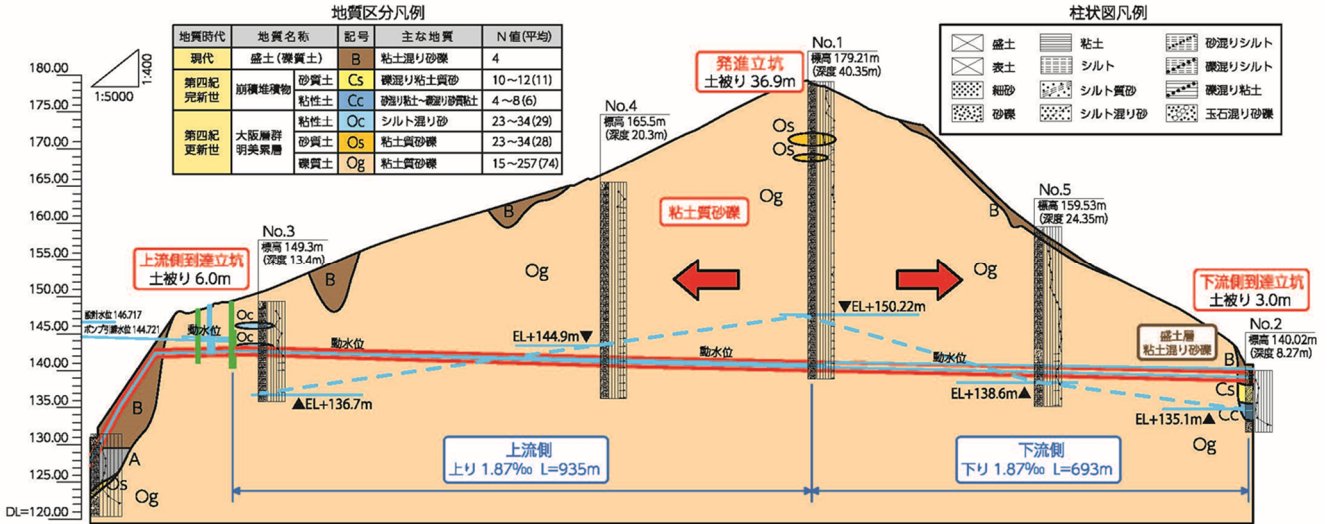


図2 推進路線 縦断面図

上流側の到達立坑は三木市防災公園近傍に設け、下流側の到達立坑は既設山田幹線との合流箇所付近に設ける。

上流側および下流側の推進延長は、それぞれ 935m、693m である。土被りは、発進立坑付近で約 37m であるが、丘陵中腹にある到達部は上流側で約 6m、下流側で約 3m と大きく変化する。

当該地域は明美丘陵内に位置し、表層より大阪層群明美累層が厚く分布している。分布地質は粒径 2~40 mm の垂円礫を多く含む礫質土(Og)が主体である。また、明美累層礫質土の N 値は 30~150 を示し、平均 N 値は 70 程度であり、礫当たりを考慮しても密実に締まった状態を示す硬質地盤である。発進立坑は、丘陵内の扇頂付近にあり、深さ 40m まで礫質土が主体に分布している。到達立坑は狭隘な谷底低地に位置し、表層より盛土、崩積堆積物、大阪層群明美累層礫質土の層順で分布している。

地下水位は、工事着手時に観測ボーリングを実施して、発進立坑では GL-30m、上流側到達立坑では GL-13m、および下流側到達立坑では GL-5m の深度を確認した。

3. 施工上の課題

内径 φ 1,000 mm で推進延長が 1,000m 超の工事実績は稀有である。実績が極めて少ない長距離推進となる本工事では、①中途での抵抗力増加にともなう掘進不能を防ぎ、確実に到達させること、②掘進時の精度確保および安全対策が重要な課題であった。

硬質地盤における長距離掘進では、推進管の許容耐力等の関係から中押し装置を採用するが、本工事ではこれに加え、曲線を含む路線での配置間隔と作動手順を考慮した低推力で効率的な推進計画が必要であった。

推進路線は丘陵地の両端付近までを施工延長としているため、ほぼ中間部に設けた発進立坑は 40m 近くの深さとなっている。また、立坑の平面形状は推進工に最低限必要な φ 7,500 mm であり、狭小で大深度の立坑の築造となるため、施工時のリスク要因を排除する安全対策の検討が必要であった。

立坑土留めは、当初設計では発進立坑部に地下水位はないとの判断で、立坑周りにはライナー掘削時の孔壁保護として薬液注入工が計画されていたが、現地地形や既存地盤調査から変動する地下水の存在が考えられたため、早期に地下水位の有無を確認する必要があった。

4. CMT 工法による推進

推進工法には、泥水式、泥濃式および土圧式があるが、本工事では、①地下水がない区間がある、②曲線を含む長距離の硬質地盤を掘進するという施工条件から、土圧式の複合推進工法である CMT 工法 (Compound Mini Tunnel) を採用した。CMT 工法は、推進システム、排土システム等を複合的に組み合わせ、種々の施工条件に対応することが可能で、硬質地盤の切削性や長距離推進、小口径トンネルでのビット交換の面でも他工法よりも優れている。

本工事では、非常に硬く締まった礫質土地盤を長距離掘進しなければならず、掘進機カッタの仕様の選定は重要な要素である。巨礫を含む地盤に対してはローラー型カッタヘッド形式とし、破碎取り込み型の掘削方法を採用した(写真 1)。また、カッタビット交換方法として機内からのビット交換が可能である「岩盤推進システム技術」を採用した。

切羽の安定方法については、カッタヘッドの面板で切羽面を加圧して切羽の安定を図る面板加圧方式(土圧式に分

類される)を採用した。

面板加圧方式においては、硬質地盤に対して掘進機の押付け力を確実に作用させることが効率的な掘進に重要となる。推進管継手の緩衝材の弾性変形により地山への押付け力の変化が生じると、切削時に過度の衝撃力が生じ、機械破損や切羽地盤の不安定化につながるおそれがある。そこで、掘進機直後に「セミシールド機構」(ジャッキ装置)を設置して掘進機を直接推進することとした。これにより、カタトルクや地山押付け力を直接監視、制御することができ、機械の損傷を防止して安定した切羽掘削が可能となった。さらに、後続の推進管を反力として掘進できるため、推進管へ過度な推力を掛けずに掘進が可能となった(図3)。

掘削土は、泥水による流体輸送を基本としており、パイプ搬送された掘削土は、ユニット式土砂振動篩機(一次処理)、連続式遠心分離機(二次処理)を組み合わせた泥水処理設備を経て場外へ排出した。

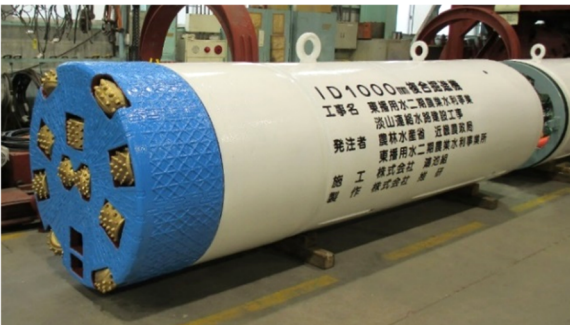


写真1 掘進機

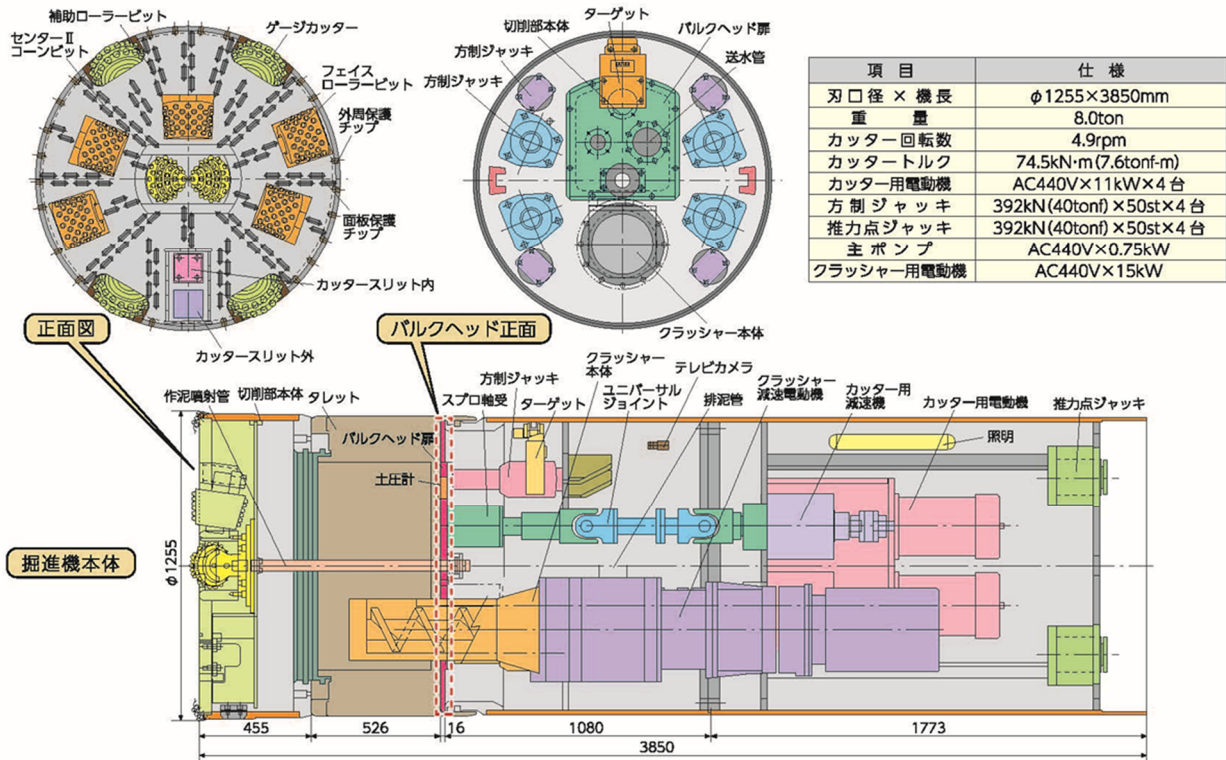


図3 掘進機 概要図

5. 長距離推進の掘進管理

5.1 総推力の低減対策

当路線は曲線を含む長距離推進のため、元押しジャッキで押し切ることが難しく、推進ジャッキを装備した中押し装置を管内に複数配置する必要がある。中押し作業は元押し設備との連動と部分推進の繰り返しのため、日進量が低下する反面、分割推進により推力の低減を図り、計画総推力の変動リスクを抑制することができる。中押し装置の設置は、①曲線(R=500m未滿)内では作動させない、②作動する推進延長が長い区間に設置する、③中押し装置以降の使用推進管種が経済的になること、という条件において最適な位置を検討し、上流側で3基(図4)、下流側で4基を配置する計画とした。

中押し装置の運転には、中央管理室からの遠隔操作で複数の中押し用ジャッキと元押し設備を制御できる「中押し自動推進システム」を採用した(写真2、3)。

各中押し装置とセミシールド機構の併用により、切羽推力(掘進機だけの推進抵抗力)および中押し装置で区分される各ブロックの管の周面抵抗力を常に監視した。各ブロックの周面抵抗力の上昇には、局所的な滑材の追加注入を遅滞なく実施することにより、安定した推力を保持することにした。

推進管の周面抵抗力低減対策としては、CMT工法の滑材で、鉱物系添加材に増粘剤を混合した塑性体「緩み土圧抑

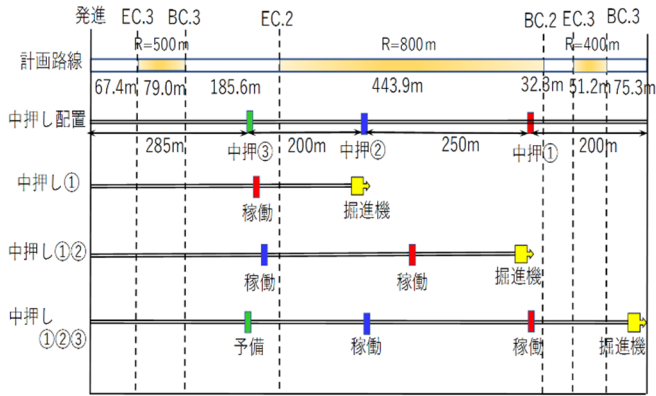


図4 中押し装置配置図(上流側)



写真2 掘進運転室

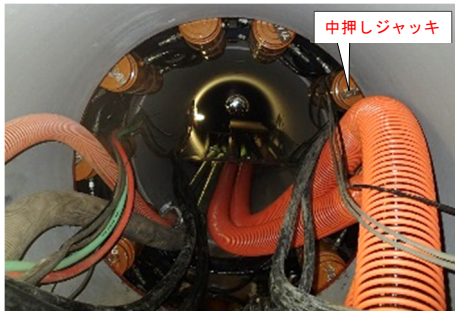


写真3 中押し装置

制材」を掘進機から注入することとした。

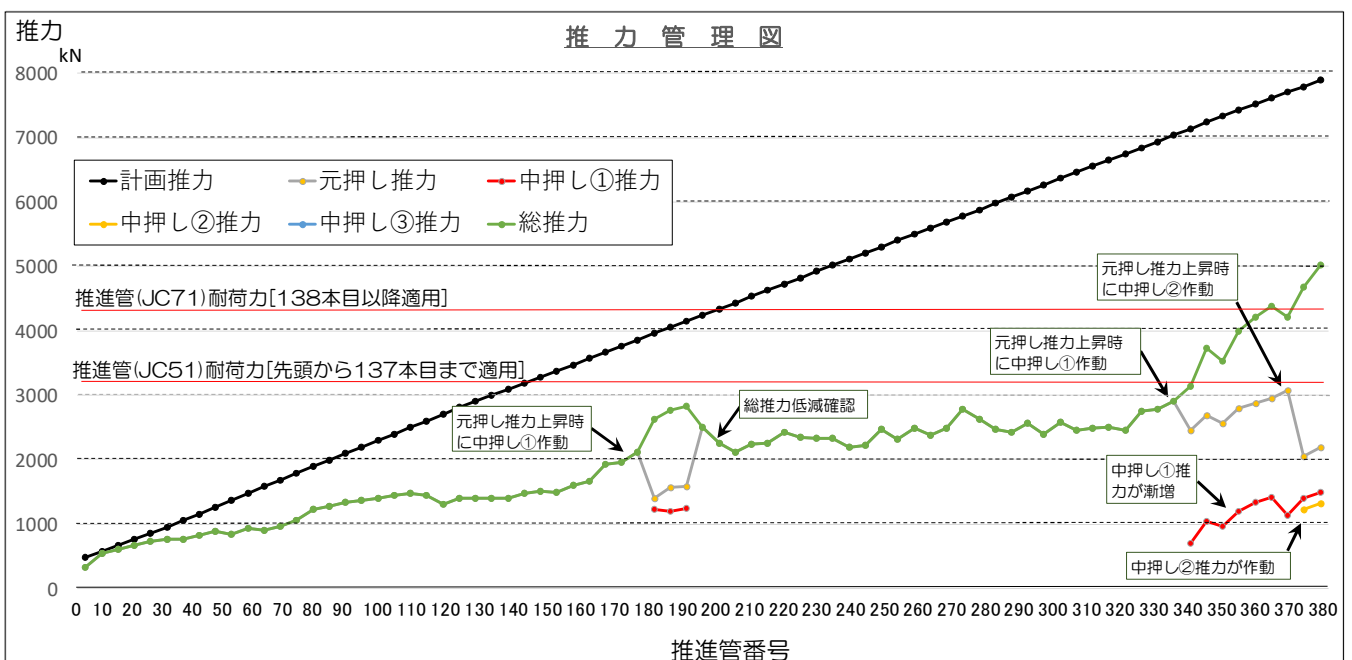
また、後続推進管(2本目)からは空隙保持効果のある二液混合滑材を注入した。さらに、長期にわたる推進とともに地山への浸透などで滑材層が細ってくる管周りには、周面抵抗力を監視しながらそれに応じて注入量を設定して、80m 間隔で設けた注入孔から高分子系摩擦低減滑材を注入し、総推力の上昇を抑制した。

上流側の推力管理図を図5に示す。中押し装置は、推進管耐荷力の70%程度を中押しの指標とし、元押し推力の上昇傾向を見ながら作動させることにした。実施工では、推力を常に監視しながら推進管への過負荷推力を防止して効率的に中押し装置を稼働させた。図5の中押し装置②の作動については、装置①の推力および元押し推力の上昇傾向と各推進管耐荷力の中押し指標を基に、装置②の必要性を判断して作動させた。これらの対策をとることで、施工上では総推力が常に計画推力以下での推移であったため、中押し装置③(予備)を使用せずに推進できた。

5.2 日進量向上の工夫

内径φ1,000mmの狭小なトンネル内空のため、作業員の安全と作業環境を考慮して、掘進管理は全て地上の掘進運転室にて遠隔操作と集中管理を実施した。さらに、掘進管理データはPCに集約してデータをグラフ化し、掘進状況を常時把握しながら状況変化に早期に対応できるようにした。

中押し装置によるブロックごとの推進時にも、運転室から遠隔操作で複数の中押し装置と元押しジャッキとを制御して、ブロックごとの周面抵抗力を管理しながら迅速に推



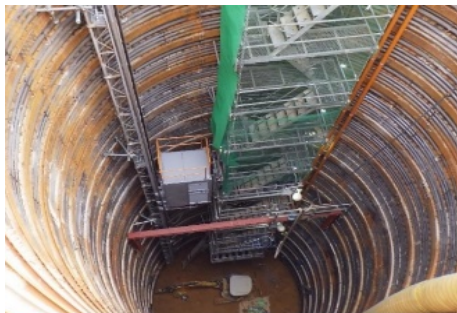


写真4 立坑内エレベータ

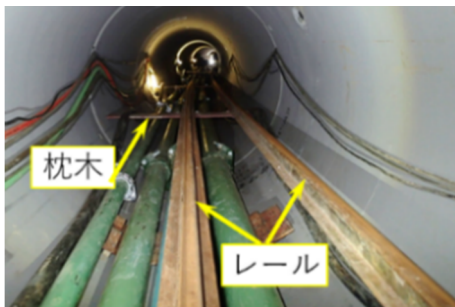


写真5 管内軌条設備

進管を前進させることにより掘進時の時間短縮を図った。さらに、ブロックごとに周面抵抗力に応じて滑材を追加注入することで総推力が抑制され、掘進時間の短縮にも繋がっており、日進量の増大を実現することができた。

また、立坑内には小型の昇降エレベータ（定員4名）を、管内には軌条設備をそれぞれ設置して、移動時の疲労軽減および安全の確保を図った（写真4、5）。

5.3 小口径トンネルでの線形精度の確保

推進基本線を立坑内に導入する際には、大深度立坑下への移設となることから、精度を高めるために立坑上下でのジャイロトランシット測量によって管内基本線を導入した。立坑内基本線は、定期的にジャイロトランシット測量で再確認して基本線の精度維持を図ったが、小口径トンネル内では中間ポンプ箇所での測量ができないため、推進管内の基線の再確認は実施できなかった。

そのため、日常の管内線形管理では、推進管を1本掘進ごとに発進立坑からの開放トラバースで蛇行量（上下・左右）を測量した。自動追尾式トータルステーションについては、狭小な管内の高温かつ多湿な環境条件で見送り、手動の光波距離計による測量にて全路線で対応した。長距離の管内測量には、最大24台の光波距離計を常時据え置きして、測量時間の短縮を図った。掘進機の基準高さは、水レベル計を装備することで常時計画高さとの差異を把握し、線形管理に反映させた。

到達付近では上流側・下流側とも土被りが3~6m程度になることから、掘進機の位置を把握するために地表面から

掘進機に直接ボーリング削孔し、振動位置を確認することで管内基本線の確認をした。

到達精度を表2に示す。基準高さ、左右のズレともに管理基準値内に収まり、高精度な線形を確保することができた。

表2 推進出来形表（到達精度）

	上流側	下流側	管理基準値
基準高さ	+20mm	+19mm	±30mm
左右のズレ	+48mm(右蛇行)	+48mm(右蛇行)	±65mm

5.4 長距離掘進における管内環境対策

管内の換気対策には送気方式を採用したが、φ1,000mmの管内では管径に制限があったため、2インチ管を使用した。また、送気圧力と風量を確保するためにコンプレッサを使用した。通常設備では高温多湿空気が供給されてしまうことから、乾燥・冷却・脱臭のラインを有する「高圧換気冷却脱臭機ユニット」を地上部に設置して送気することにより、管内切羽の高温多湿を低減した環境を維持した。

管内は常時無人化施工であるため、掘進機先端部には監視カメラと集音マイクを設置してカタモータや各機器の稼働状況を把握し、異常を早期に察知できるようにした。さらに、管内後方箇所や地上プラントにも集音マイク、拡声器を配置し、中央管理室と同時に接続することにより、常時、推進状況を把握できるようにした（図6）。

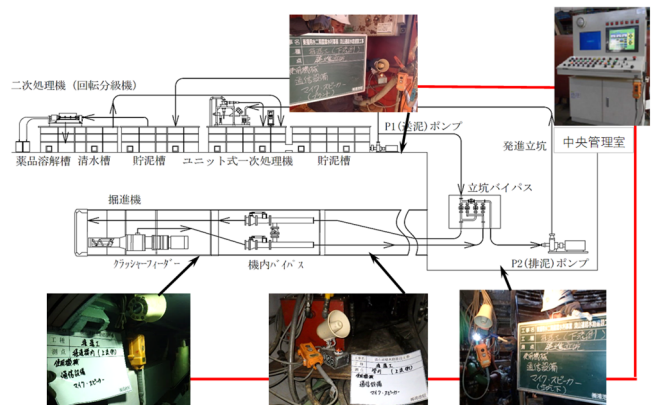


図6 通信設備

5.5 機内からのビット交換

CMT工法の掘進機は小口径でありながら外周部が駆動してカッターヘッドを回転させる機構を持ち、隔壁中央部に点検扉を配置した構造となっている。この点検扉を開放することで、切羽の目視点検、カッタービット交換および障害物の撤去を機内から対応することが可能である。地下水位以下の区間では、カッタービット交換は「岩盤推進システム技術」の一つである圧気工法を補助工法として併用した。

圧気設備は、図7に示すように地上部に配置する加圧設

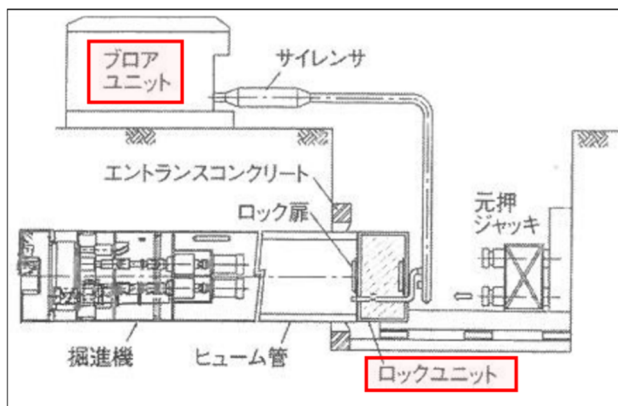


図7 圧気工法の概略設備



写真6 フロアユニット



写真7 ロックユニット

備の「フロアユニット」と、立坑の坑口部推進管に接続した閘門式の圧力調整室となる「ロックユニット」から成り立っている。各設備は、短時間で設置・撤去が可能なユニット式で構成されている（写真6、7）。

切羽を含めた管内を圧気することで、切羽の地山崩壊や湧水浸入を起こすことなく、上下流側それぞれ2回のビット交換作業を安全に実施できた（写真8、9）。また、交換するビット重量は30kg/個あり、その都度の管内運搬作業をなくすために、あらかじめ掘進機の後方に交換用ビットを収納して掘進を開始した。

5.6 様々な地盤への対応

各立坑部での土質ボーリング調査結果に基づき推進区間の土質を設定したが、掘進時においては想定できなかった



写真8 ビット交換状況



写真9 ビット交換後

様々な地盤に遭遇した。

5.6.1 無水礫質層

切羽添加材には、礫質層での逸泥対策や無水層での保持効果を考慮し、鈦物系添加材に増粘剤を混合させた可塑性・高粘性の添加材を使用した。無水礫質層においては、開口の少ない面板加圧方式による切羽安定機構と流動性の混練り泥土を充填させる効果により、逸泥は発生しなかった。

玉石層では、掘進機の周りは緩み土圧抑制のために滑材層は20,000mPa・s (mPa・s: 粘度を表す単位。たとえば、マヨネーズは15,000~20,000mPa・s) 程度の高粘性とし、二液混合型滑材を併用して周辺への拡散を防ぐとともに、地盤の緩みを防止した。

5.6.2 粘性土が卓越した礫質地盤

粘性土が卓越した地盤の掘進において、開口率の小さい面板構造のCMT工法では、チャンパー閉塞は掘進効率低下に繋がるおそれがある。そのため、切羽の面板およびチャンパーには清水を新たに注入して粘性土の付着を防止した。

6. 狭小大深度立坑の築造

6.1 立坑築造の再検討

発進立坑は、丘陵地の頂上部に位置する深さ約40mの大深度立坑である。当初設計では立坑部に地下水が存在せず、地盤がN値50以上の礫質土の想定から、ライナープレートに薬液注入工(B=1.5m)を付加した土留め工法が採用されて

いた。しかし、丘陵地周辺の状況から気象条件や季節変化に伴う地下水の変動が予想された。そのため、工事着手時に地下水観測孔を新たに設けるとともに、ヤード内に雨量計を設け、降雨と地下水位の経時変化を常時観測することとした。

追加の地下水調査から GL-30m 深度の透水係数が 10^{-6} ~ 10^{-7} m/s と非常に小さい結果であったため、帯水礫質地盤であっても、当初のライナープレート+薬液注入工法で施工可能と判断した。ライナープレートは地下水圧を考慮し、昇降エレベータ荷重も加えて最終仕様を決定した (図 8)。

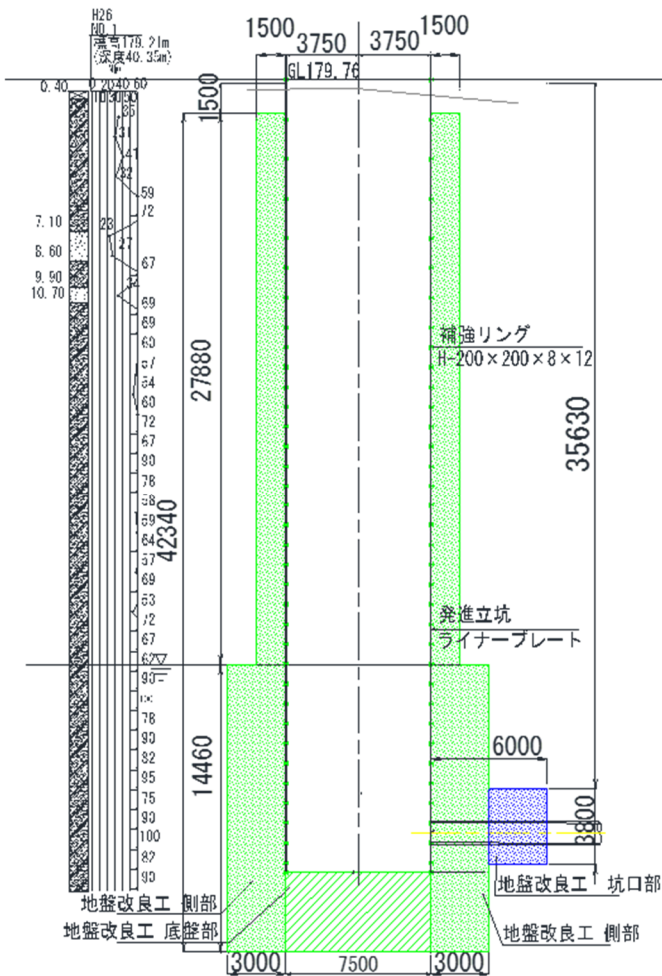


図 8 発進立坑側面

6.2 施工時の安全管理

6.2.1 土留め工

立坑掘削にともなって、ライナー土留めに作用する側圧を把握するために、10m、20m、30m 深度の 3 箇所の補強リングに歪み計を設置した。設計側圧の 80%を自主管理値として、警報発令機能を持った自動計測システムで経時変化を確認しながら築造した。実際の計測値は、20~80%の範囲の挙動を示し、十分に安全を保ちながら最終床付けまで掘

削することができた。

6.2.2 掘削

立坑掘削は、床付けまで小型油圧ショベルによる掘削・集積と土砂バケツによる揚重排土を行ったが、大深度かつ狭小空間での施工となることから、墜落・転落、飛来・落下、重機接触災害の防止および緊急時の迅速な対応が重要であるため、様々な安全対策や安全管理を行った。

掘削土砂や資機材の搬出入用として、立坑壁面にガイドレールを設置して揚重作業の定位置化を図った。さらに、ライナー部材には積込み用籠、掘削土砂には専用土砂バケツをそれぞれ使用して、荷振れによる飛来・落下の危険性を排除するとともに、立坑下に待避用の防護屋根を設けた (写真 10、11)。

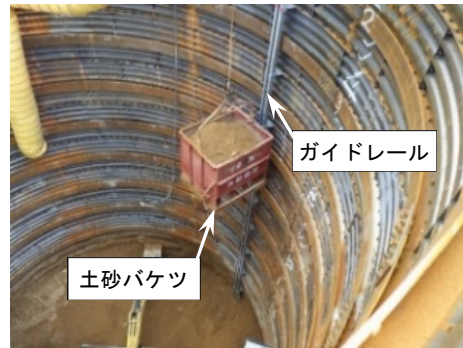


写真 10 ガイドレール

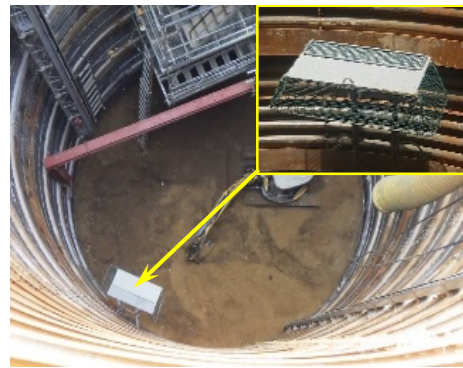


写真 11 退避用防護屋根

6.2.3 立坑上下での連絡方法

立坑上下での連絡合図や確認方法として、以下の安全対策を行い、安全環境を維持して築造を完了した。

- ① 立坑上下間の合図では、揚重機オペレータと立坑下の合図者は骨伝導無線機を使用した。
- ② 立坑上下に警報器付き赤色回転灯を設置し、揚重作業時には立坑内作業員に退避を指示する「揚重安全システム」を採用した。
- ③ 揚重機ブーム先端と立坑内深さ方向 4 箇所に Web カメラを設置して、揚重機オペレータの目視確認および事務所管理室での監視を行った (写真 12)。

また、狭小な立坑内掘削場所では、超音波センサーによる警報音と回転灯で近接作業員に警告するシステムを掘削重機に装備した。



写真12 クレーンカメラ(運転席モニター)

7. 働き方改革（完全週休2日制）への対応

本工事では、現場の働き方改革の柱である“週休2日制推進工事”の実践モデルとして、完全週休2日制に取り組んだ。このためには、工事工程の大部分を占める推進工の進捗率を向上させるとともに、掘進トラブルを未然に回避することが最も重要と考えた。

推進休止日が連続すると、推進管が周辺地山に締め付けられ、再掘進時に推力が増大するおそれがある。このため、各ブロックの管の周面抵抗力の経時変化を監視し、増加傾向や高い値を示している区間には、休止前の掘進完了後に一液性の摩擦低減滑材を毎回注入した。休工明けの掘進前には、中押しジャッキを使用して各ブロックの推進管にか

かる推力を計測監視し先端部から徐々に縁切りすることにより、推進管にかかる負荷を低減しながら掘進を再開した。

8. まとめ

2018年10月の下流側推進工事開始から、総推進延長1,628mの小口径トンネルを平均日進量9.5m(当初計画では7.5m)の進捗を達成し、2019年10月中旬に上流側推進工事を完了した(写真13)。

長距離にともなう進捗低下や総推力の増大による掘進不能のおそれがあったが、推力低減に重きを置いた掘進管理で当初計画の約75%の推力で到達できた。さらに、遠隔操作による各ブロックの推力管理による効率化施工とビット交換時の安全対策により、掘進トラブルもなく、計画工程よりも2.5ヶ月短縮することができた。本工事は、当社の推進工事の中でも狭小かつ長距離という特殊条件での施工事例となった。この事例が今後の同様な工事の参考になれば幸いである。



写真13 掘進機到達状況(上流側到達立坑)