

断面規模の小さい長距離水路トンネルにおける生産性向上の取り組み

水海川導水トンネル工事の例

中西大介・多宝徹

水海川導水トンネルは、山岳工法で片押し施工する延長4,717m、仕上がり内径8.5mの円形断面の長距離水路トンネルである。本トンネルは、長距離施工に加え、通常断面¹⁾に分類される山岳トンネルの中では規模が小さいため、多くの施工上の制約があり、難易度が高いトンネルである。

本稿では、水海川導水トンネルにおける生産性向上・良好な坑内環境の確保に向けた取り組みについて紹介する。

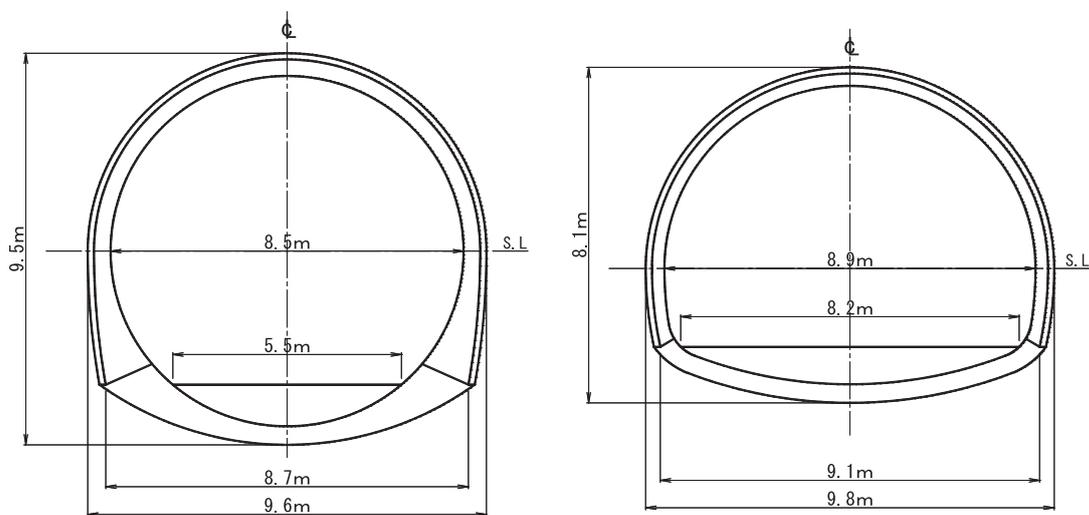
キーワード：山岳トンネル、長距離トンネル、水路トンネル、生産性向上、CIM

1. はじめに

水海川導水トンネルは、山岳工法で片押し施工する延長4,717m、仕上がり内径8.5mの円形断面の長距離水路トンネルである。

一般に、山岳トンネルでは、内空幅が8.5m程度以上の断面のものを通常断面のトンネルに分類する。道路トンネル技術基準（構造編）・同解説では、内空幅8.5～12.5mを通常断面のトンネルに分類しており¹⁾、多くの2車線道路トンネルが通常断面のトンネルとなる。また、長距離トンネルの施工事例の多い新幹線トンネルも内空幅は通常9.5mであり、通常断面のトンネルの範囲である。

通常断面の区分に入るトンネルは、統一された標準的な支保パターンが適用可能で、施工面からも汎用性の高い大型機械を用いた標準的な施工方法が適用できる。しかし、通常断面トンネルの範囲でも断面規模が小さくなると、標準的な施工方法は適用可能ながらも、さまざまな制約条件により、作業の効率や安全性が低下するケースが多い²⁾。水海川導水トンネルは、内空幅8.5mで通常断面の分類の下限の大きさで、加えて内空が円形に近いトンネル形状のため、施工基面の幅が約5.5mと狭く、施工性や安全性の確保が課題となるトンネルである。図-1に本トンネルのトンネル断面と断面規模の小さい道路トンネルの一例との比較を示す。



水海川導水トンネル

断面規模の小さい道路トンネルの例

図-1 トンネル断面比較

また、水海川導水トンネルのもうひとつの特徴として、トンネルの片押し施工延長が4,717mと極めて長いことが挙げられる。トンネル切羽へのアプローチは、坑口から掘り上がったトンネル坑内を通じてのみ行われるため、距離の長いトンネルでは切羽の進捗に伴い、坑内の搬出入路が延びて坑内の通行が過密化する。また、長距離で断面規模が小さい場合、人によっては多少の閉塞感を感じることもある。長距離トンネルでは良好な坑内環境の確保も通常のトンネルより強く求められるところである。

本稿では、断面規模が小さく、施工延長の長い水海川導水トンネルにおける生産性の向上施策ならびに良好な坑内環境の確保に関する取り組みについて述べる。また、今後、本トンネルのような大規模な長距離トンネルの生産を向上させていくことを目的に当現場で進めているCIMの取り組みについても述べる。

2. 工事概要

水海川導水トンネルは、福井県今立郡池田町で進められている足羽川ダム建設事業の一環で、工事を行っている。足羽川ダム建設事業は、足羽川、日野川、九頭竜川の下流域に位置する福井市などにおける洪水被害の軽減を目的としており、洪水調節専用のダムの他に、分水施設、導水路トンネルなどを一連で整備している。九頭竜川水系足羽川の支川部子川にダム本体を構築するとともに、足羽川の支川となる水海川、さらに、将来計画では足羽川本川の上流部などの3河川の洪水をトンネルでダムに導水し、足羽川流域全体の洪水をコントロールすることが特徴である。水海川導水トンネルは、水海川に設置される分水施設において水面を確保したのちに、足羽川ダムに洪水流を導水する施設である。図-2に足羽川ダム建設事業の平面図を示す。

3. 運搬路の確保

2022年11月末時点で、トンネル切羽は坑口から3,260m付近にあり、トンネル内ではトンネル掘削工、

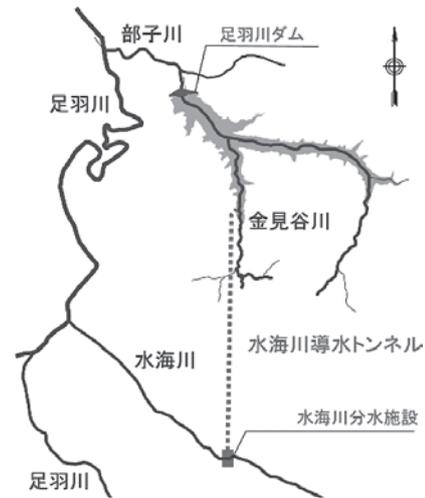


図-2 足羽川ダム建設事業平面図

インバート工、覆工のおもに3つの作業を行っている(図-3参照)。

長距離の細長い空間で3つの作業を並行して実施することから、トンネル断面を最大限活用して、3つの作業に必要な資材の運搬を効率的に実施する必要がある。

本章では、本トンネルにおける運搬路確保の施策について述べる。

(1) 連続ベルトコンベヤーの採用と高度化

本トンネルは、内空が円形断面のため、施工基面のトンネル幅が5.5m程度と狭く、大型車両同士のすれ違いが困難なため、約150mおきに施工基面を1mほど高くしてすれ違い区間を設けている。それでも、トンネル坑内で、多くの車両を滞留させることなく走行させることが困難である。そこで、坑内走路はトンネル掘削資材、覆工・インバートの生コンクリートなどの運搬専用とし、切羽での掘削ずりを連続ベルトコンベヤーで搬出する計画とした。

近年の長距離トンネルにおいて、連続ベルトコンベヤーは必須の技術になりつつあるものの、本トンネルのように最終延長5,000mのベルトコンベヤーを稼働させるためには、高度な技術が必要となる。

コンベヤーのベルトは往復10kmの1本の連続した輪ゴムのようになり、切羽のクラッシャーの後方に

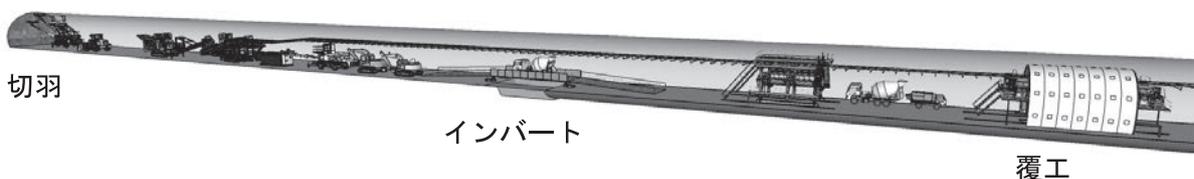


図-3 トンネル坑内施工配置

設置したテールピース台車と坑外の落とし口のローラーでテンションを掛ける。この 10 km ものベルトに荷を載荷した状態で、スムーズに動かす技術が必要である。そこで、通常の 1 箇所動かす駆動装置（メインドライブ）に加えて、中間部にブースターを設けて駆動力を上げるとともに、坑口部の単曲線区間（R600）や覆工完了区間ではベルトの縦断・横断線形を最適化し、メカニカルな負荷を最小化している（写真—1～3 参照）。

長距離のコンベヤーでは、切羽、坑内全線、坑外に点在する機器を連動させて制御する技術も必要である。クラッシャー、テールピース台車、ベルト、駆動装置などの機器に不調が発生した場合には、全体のシ

ステムを協調させて停止する必要がある。本トンネルでは、機器を Wi-Fi 網とつなぎ、事務所やモバイル端末で稼働状況をリアルタイムで監視している。これらの監視データから、機器の稼働履歴、エラー履歴をデータベース化し、分析するシステムを導入し、トラブルの予防措置に活用している。連続ベルトコンベヤーでは、距離が長くなるほど、トラブル時に原因を突き止め復旧するのが困難となるため、設備トラブルの防止やメンテナンス作業の効率化に有効活用している。

さらに、これまで、クラッシャーには、投入された掘削ずりの破碎状況を監視し、動作調整などを行う作業員が必要であったが、本トンネルではクラッシャーへずりを投入する重機の操作席にタブレットを設置し、掘削ずりの破碎状況をカメラ映像で確認しながら、クラッシャーの動作調整を行う遠隔操作システムを導入することで、重機 OP によるワンマン運転を実現している（写真—4、5 参照）。

さらに、連続ベルトコンベヤーを採用することにより、坑内での内燃機関の稼働が減り、良好な坑内環境の向上にもつながっている。

また、本トンネルは、一般的な道路トンネルと比較して断面形状が縦長であるため（図—1 参照）、トンネル断面を上下方向に有効活用している。

連続ベルトコンベヤーを低い位置に配置すると、重



写真—1 坑外設備



写真—2 中間ブースター



写真—4 掘削ずり投入状況



写真—3 テールピース台車



写真—5 クラッシャー遠隔操作状況

機のすれ違いができないことから、施工基面から5mほど高い位置に配置し、その空間を利用して重機のすれ違いを実現している。また、セントル、インバート栈橋の位置でも同様に干渉を防ぐ高い位置に連続ベルトコンベヤーを配置している。図-4に、重機のすれ違い位置、セントル、インバート栈橋部における連続ベルトコンベヤー、風管の配置を示す。

(2) インバート施工

本トンネルのTD1,800m以降は、インバートを設置する支保パターンとなっており、長距離のインバート施工を行う必要がある。通常の2車線道路トンネルでは、インバートを2分割して半断面施工とすることで、坑内通行車両の走路を確保しているが、本トンネルは断面が小さく半断面施工ができない。そこで、インバート栈橋を採用して通行車両の走路を確保するものとした。道路トンネルで採用されるインバート栈橋は、栈橋をセット後、左右に横送りして、栈橋の横でインバート掘削を行う横送り方式が一般的である。本トンネルは断面が小さく、横送りのスペースを確保することができないことから、跳ね上げ方式の栈橋を採用している(写真-6, 7参照)。跳ね上げ方式の栈橋では、横送りをせず、掘削を切羽側の斜路を跳ね上げてその下で行うため、掘削中は、一時通行止めになってしまう。そのため、トンネル切羽の施工サイクルに影響を与えないような工夫が必要となる。本トンネルでは、換気の自動管理システムのサイクルタイムを用いて、生コン車、火薬運搬車がインバート部分を通ずる時刻を事前に確認し、その時刻にあわせて、インバート掘削を一旦停止して斜路を降ろすことで、切羽作業のサイクルロスが生じないようにしている。

また、コンクリート打設においては、栈橋の桁下へのコンクリートの供給が問題となる。一般に道路トンネルのインバート打設では、ブーム車を用いてコンク

リートを供給するが、本トンネルでは、狭小断面のため、ブーム車を配置すると通行止めが避けられず、切羽作業と並行して作業することができない。そこで、ディストリビュータを栈橋下部に導入してフレキシブルに配管を移動して打設する方法とし、切羽作業と並行してのコンクリート打設作業を実施した(写真-8参照)。



写真-6 インバート栈橋



写真-7 インバート栈橋(跳ね上げ時)

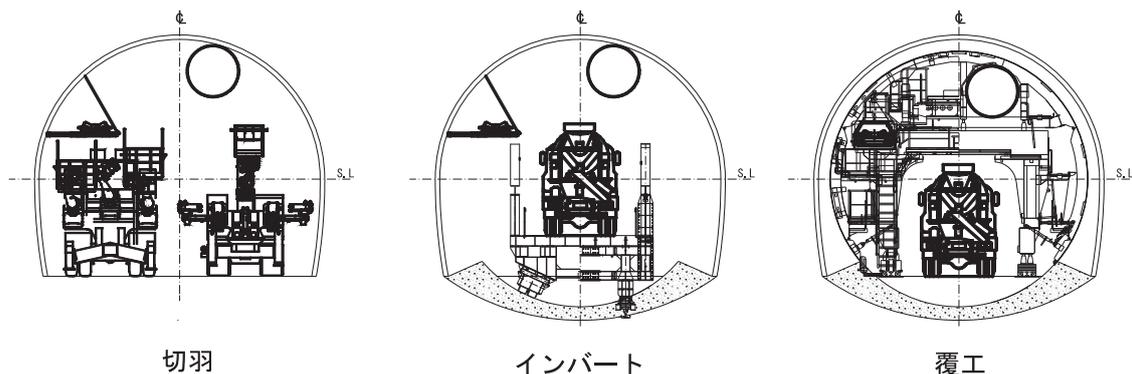


図-4 トンネル断面配置



写真-8 ディストリビュータ

4. 長距離トンネルにおける良好な坑内環境の実現

本トンネルでは、良好な坑内環境の実現に向けて、坑内空気環境を悪化させる要因となっている粉じん発生源対策として、吹付けコンクリート施工、ずり出し施工に着眼し、施工性と坑内環境とを両立した対策を実施している。また、坑内環境を一元管理し、換気設備を自動制御するシステムの運用も行っている。ずり出しについては、3章で述べたところであり、本章では、吹付けコンクリートと換気システムに対する取り組みについて述べる。

(1) 吹付けコンクリートの高度化

坑内粉じんの最大の発生要因となっている吹付けコンクリートに対して、本現場では、液体急結剤をベースに開発をした「大容量・高性能吹付けコンクリート」を採用している。大容量・高性能吹付けコンクリートでは、高性能ポンプを使用して、高性能減水剤を用いてワーカビリティを向上させたコンクリートを圧送し、特殊ノズルにより液体急結剤を適切に混合させて吹付け作業を行う。これにより、発生粉じん量を大幅に低減しつつ、吐出の大容量化と低リバウンドの急速施工を実現している。図-5に大容量・高性能吹付けコンクリートの概要を示す。

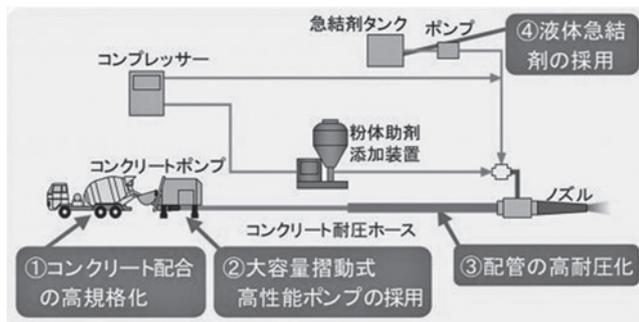


図-5 大容量・高性能吹付けコンクリートの概要

本トンネルのEパターンでは最大 $t=300$ mmの設計厚の吹付けコンクリートを行っているが、上半の吹付けコンクリートを15分程度で完了させる急速施工を実現しつつ、極めて粉じんの少ないクリアな作業環境を実現している。写真-9に吹付けコンクリート施工時の坑内状況を示す。

さらに、高強度コンクリートへの仕様変更を行い、溶接金網を省略したパターンを採用している。金網の設置作業がなくなるため、切羽直下の作業時間の削減となり安全性の向上と省人化による生産性の向上も実現している。参考に、写真-10に従来工法の溶接金網の設置状況を示す。

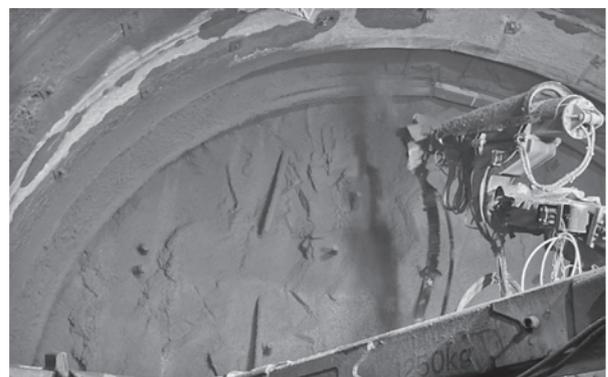


写真-9 吹付けコンクリート施工状況



写真-10 溶接金網設置状況 (従来工法)

(2) 換気システムの高度化

通常のトンネルの坑内換気は、坑口の送風機と切羽付近の集塵機で行っているが、本トンネルでは、長距離トンネルの良好な坑内環境を確保するために、送風機・集塵機の大型化に加えて、坑内の中間地点に中継ファンを増設する対応を行っている。

トンネル切羽での発生粉じんは、穿孔、ずり出し、吹付け、支保工建込みといった切羽作業により異なるが、これまでの長距離トンネルの施工では、坑口、坑内中間地点、切羽近傍と広範囲に点在するこれらの機器を連動させて制御することは難しく、作業毎に最適

な出力で運転することは難しかった。

本トンネルでは、送風機・集塵機の自動管理システムを導入し、切羽作業に応じた出力制御を行うことで坑内環境を維持しながら使用電力量を削減する取り組みを行っている。

自動管理システムでは、坑内全線に構築した Wi-Fi 網に、各種機器を接続するのが前提となる。切羽の掘削重機に通信ユニットを搭載することで、リアルタイムに稼働状況を把握し、このデータから、切羽の作業内容を自動判定している。判定した作業内容及び坑内で自動測定した環境データから、最適な換気量を算出して、坑口、坑内中間地点、切羽近傍に位置する3台の機器を連動させて自動制御している(図-6 参照)。

さらに、本トンネルでは、施工サイクルの見える化に焦点を当てて、自動管理システムの改良を行っている。自動管理システムの工種判定データを詳細な施工サイクルのタイムテーブルとして抽出し、事務所やモバイル端末でリアルタイムに確認できるようにするとともに、データベース化し、工程の異常等の分析に活用している(図-7 参照)。

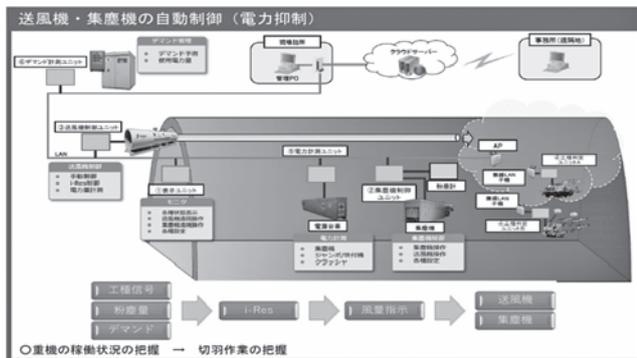


図-6 換気システム概念図

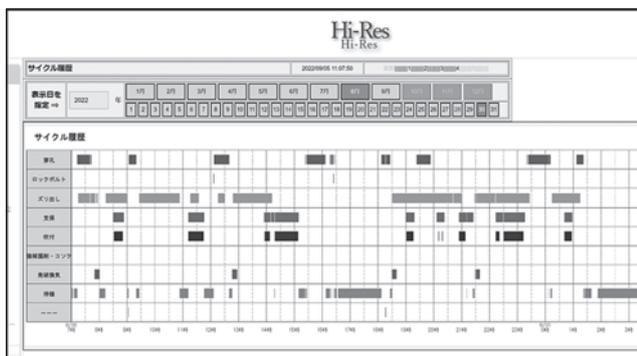


図-7 施工サイクル表

5. CIM による生産性の向上

(1) 支保パターンの設定

本トンネルの TD2,500 m 以降は、脆弱地山が続き、当初想定の地山等級から2~3ランクダウンの地山状況が続いている。加えて、TD3,220 m 付近で、大規模活断層である温見断層破碎帯に突入し、施工性向上のためには地山の前方予測が極めて重要となっている。

そこで、本区間では、表-1 に示す3段階の前方探査を行い、地山状況の把握に努めている。探査結果は、図-8 に示すように既施工区間の地質情報を相互に対比できる形で整理するとともに、地質 CIM で情報を統合し、前方地山の状況の予測に活用している(図-9, 10 参照)。

本区間では、標準パターン外となる E 等級の地山が続いており、切羽評価点のみで支保パターンを設定することが困難な状況となっていることから、地質情報から切羽前方の地山特性を予測し、支保パターンを選定している。

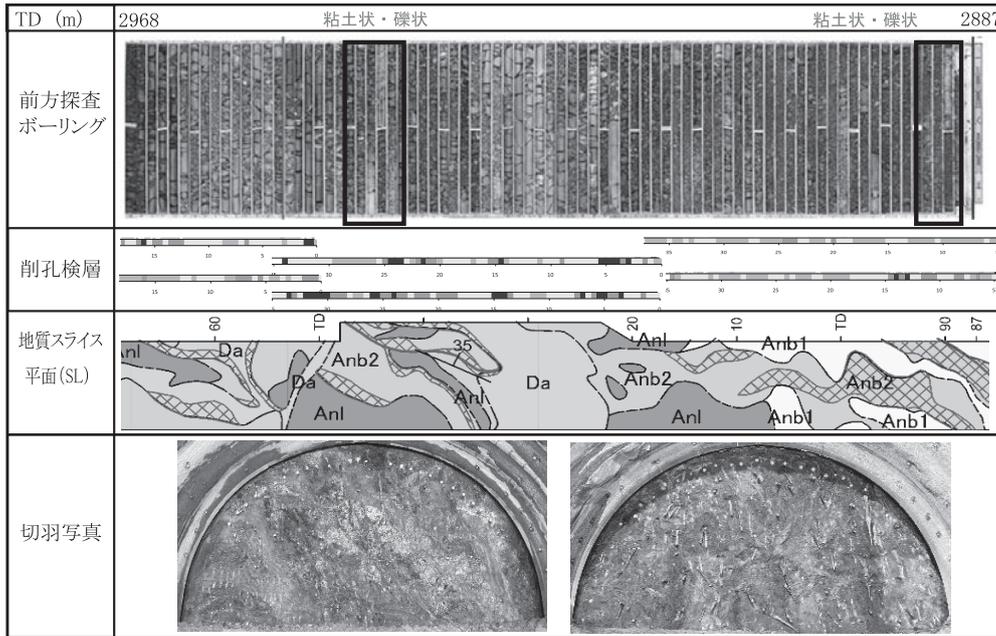
表-1 トンネル前方探査

名称	内容	延長	本数	目的
①長尺水平ボーリング	ロータリーパーカッションによるコア採取	100 m 程度	トンネル左右2本	トンネル前方地質の概略把握、大量・高圧湧水の把握
②削孔検層	ドリルジャンボによる削孔検層・スライム採取	30 m 程度	3本 + a	トンネル断面近傍の地山の確認、大量・高圧湧水の確認
③補助工法時の削孔検層	AGF、鏡ボルト施工時に削孔データ取得	10.5 m	23本 ~ 36本	トンネル前方地山の詳細な確認、前方の湧水の最終確認

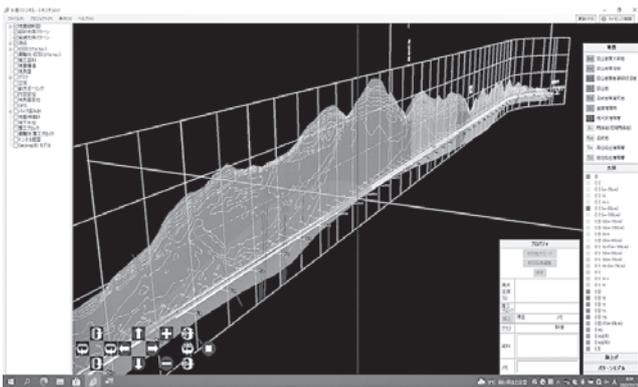
(2) デジタルツインの実現に向けて

本トンネルでは、坑内全線に Wi-Fi 網を設置し、これまでに説明した換気システムの制御、連続ベルトコンベヤーの制御のほか、トンネル切羽作業とインバート掘削作業の連携など多くの管理システムの運用に活用している。他にも、ナビゲーション機能付きジャンボへの発破データ送信、削孔検層データの回収、坑内カメラでのモニタリング、坑内環境測定データの取得、坑内でのモバイル端末などの各種 IoT 機器の運用など、さまざまなシステムのベースとなっている。

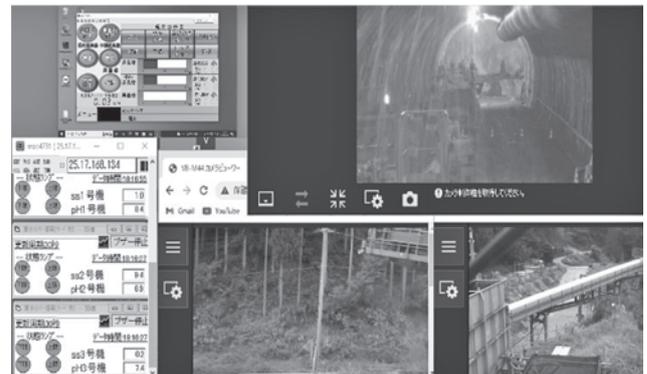
Wi-Fi 網で取得した情報は、事務所や坑内に設けた DX コントロールルームからも管理が出来る環境を構



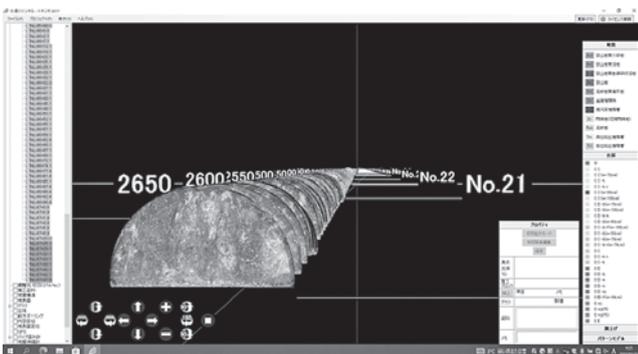
図—8 地質情報の整理



図—9 地質 CIM (縦断面)



写真—11 現場内監視モニター



図—10 地質 CIM (切羽写真)



図—11 トンネル施工・管理の最適化

築している（写真—11 参照）。DX コントロールルームでは、大容量吹付け、連続ベルトコンベヤー、換気システムなど掘削に関するハードの部分と ICT を活用して高度な施工管理を行うソフト的な部分を可視化している。この施工情報を元に、さらなるトンネル施工、管理の最適化を目指していきたい(図—11 参照)。

6. おわりに

本トンネルでは、今回紹介したもの以外に、切羽で汎用機が使えるようにするための補助ベンチ付き全断面掘削工法の採用、坑内ですれ違いができるように幅狭の建設機械の採用、坑内で生コン車などが回転でき

るようにするためターンテーブルの採用といった断面の小さい長距離トンネルに必要なさまざまな工夫を行っている。これらの工夫により、一般的なトンネルと同等以上の施工性を確保している。

今後は、本トンネルで実践している生産性向上の取り組みとともに、CIMに付加する品質・出来形などの管理情報を高度化し、トンネルのデジタルツインの実現に向けて引き続き取り組みたい。デジタルツインの情報を元に施工情報をナレッジベース化することで、本トンネルのみならず、今後のトンネル施工の高度化にもつながるものと考えている。

JCMA

《参考文献》

- 1) 道路トンネル技術基準（構造編）・同解説 p125
- 2) 断面規模が小さい2車線道路トンネルにおける施工上の問題点と今後の設計・積算のあり方について、NPO法人 臨床トンネル工学研究所 理事長特別小委員会報告書3（2013）

【筆者紹介】

中西 大介（なかにし だいすけ）
株式会社 安藤・間
大阪支店 水海川トンネル作業所



多宝 徹（たほう とおる）
株式会社 安藤・間
大阪支店 水海川トンネル作業所

