上曽トンネル本体工事（桜川工区）

～ICT基盤の整備で現場の状況をリアルタイムに把握～

三谷　一貴（大成・岡部・白田 特定建設工事共同企業体）

写真-1　トンネル施工状況

1.はじめに

建設業への入職者数は近年増加傾向にあり、女性の入職者数も増えつつある。だが、いまだ慢性的な人手不足の状況に変わりない。さらに今後、熟練技術者の一斉退職や老朽化インフラの急増も見込まれていることから、建設技術者･技能者の不足はより深刻化すると考えられる。

以上の背景から、我々は地域づくりの担い手として、業界の魅力向上による人材の確保･育成に加え、新技術の活用や創意工夫などによる生産性の向上に、より一層の熱意･努力を注がねばならない。

（仮称）上曽トンネル本体工事（桜川工区）では、「工事関係者がひとつに繋がり、互いに教え合い、助け合える環境」を醸成すべく、ICTをはじめとする新技術の導入･開発へ積極的な投資を図っている（図-1）。本稿では、現場管理の効率化･高度化に向けたICT活用の取組みについて紹介する。

図-1　現場の目指す姿

2.工事概要

（仮称）上曽トンネル整備事業は、茨城県石岡市と桜川市を繋ぐ道路トンネルの整備を行うものである。上曽峠を含む石岡市上曽から桜川市真壁町山尾までの道路は、幅員狭小で屈曲部が多く、急勾配の交通危険個所である。また、冬季の凍結や降雪時に度々交通不能となるなど、交通の難所となっている。

トンネルを含む道路整備により、公共交通の利便性向上による地域振興交流の活性化、災害時の緊急輸送路確保による地域防災力の強化などの効果が期待されている。

上曽トンネルの総延長は3,538mであり、完成すれば県内最長の道路トンネルとなる。（仮称）上曽トンネル本体工事（桜川工区）は、このうち終点側の1,599m区間を施工するものである（表-1）。

本工事は上曽峠の地下を最大土被り400mで貫くトンネルである（図-2）。当該地質中世代白亜紀～

表-1　工事概要（桜川工区）

工事延長	L=1,599.0m（非常駐車帯4箇所）
掘削断面積	A=60.2m²（B断面）～82.6m²（非常駐車帯）
掘削補助工	N=1式（長尺鋼管ﾌｫｱﾊﾞｲﾘﾝｸﾞ 1ｼﾌﾄ、充填式ﾌｫｱﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ）
インバート工	L=123.0m
覆工工	L=1,598.4m（箱抜き工53箇所）
坑門工	L=0.6m（終点側）
舗装工	A=12,200m²（コンクリート舗装）

新生代古第三紀に貫入した花崗岩が主で、一軸圧縮強度は平均約130N/㎜²と極めて堅硬で、割れ目間隔も数m～数十m程度に達する。一方、坑口付近については風化帯がやや厚く、一部マサ化していることから、補助工法を併用したトンネル工法（NATM）で施工を行った。

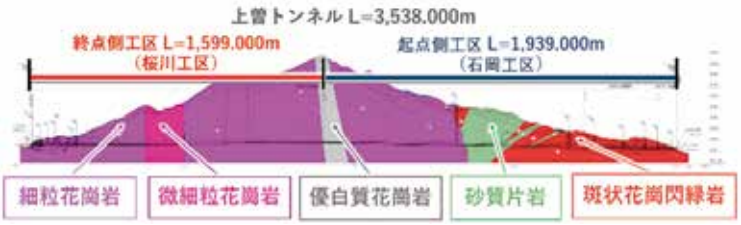


図-2　トンネル縦断図

3.工事の特徴および課題

3.1　掘削工

トンネルは線状構造物であり、掘削作業がその先端の切羽に集中する。作業にあたっては、掘削機械はもちろん、コンクリートを製造する吹付プラントや、排水を処理する濁水プラントなどが正常に稼働する必要がある。また、NATM工法は地山の状態に合わせて適切な支保を選定しながら進めていくもので、現在の支保の妥当性を評価するためにも、日々の計測管理は欠かせない。

このように、機械設備や計測の管理は工程遅延に直結するため、掘削作業においては、これらの管理を日々適切に行うとともに、トラブル発生時に早期復旧できる体制を整えることが重要である。

一方、従来の管理体制では、機械・設備にトラブルが生じた際の原因特定や情報共有に多大な時間を要していた。原因特定にあたっては、職員が現地へ行き、機材・機器を一つずつ確認する必要があった。中には複雑な異常もあり、さらに対応が遅れることも少なくなかった。計測データを共有する際、いったん事務所まで機器を持ち帰り、データを加工しグラフとして可視化した上、出力する工程が必要であった。計測中に地山に変状がみられた場合には、情報共有の遅れから掘削作業を一時中断せざるを得ない事態も頻発していた。

3.2　覆工コンクリート工

覆工作業はトンネル本体の仕上げ工程にあたり、覆工コンクリートの耐久性の確保は、維持管理・更新を含めた総合的なコスト削減につながる。ゆえに、コンクリート品質を確保できる体制づくりもまた重要となる。

コンクリート打設は、覆工専用の移動式型枠であるセントルを使用して行うのが一般的である（写真-2）。セントルはトンネル断面に沿った半円柱状の型枠であり、防水シートとセントルの狭隘な隙間にコンクリートを充填していく。そのため、従来は打ち上がり状況などを確認する際には、職員が定期的に狭いセントル内を何度も往復しながら、限られた数の打設窓を覗いていた。特に、天端部の打設においては、コンクリートの打ち上がりとともに打設窓も使用できなくなることから、技術者・技能者の経験と勘による管理となっていたのが実情である。

写真-2　セントル内の打設状況

また、計画工程上コンクリート打設の頻度が2日に1回のペースで設定されており、打設翌日には脱型が必要なことから、発現強度の不足によるひび割れ発生が懸念された。そのため、打設毎にテストピースを採取し、脱型前に現場強度の確認を行うが、2日に1回の頻度で行われる試験は職員にとって大きな負担となっていた。

3.3　共通する課題

掘削・覆工それぞれに課題はあるものの、本質的には、「職員が足を動かし、自分の目で確認するしかない」という共通点があることが分かった。そこで、各種センサ等を用いて現場のあらゆる情報をデジタル情報として取得・可視化し、関係者と共有することで、徹底した現場の見える化を図った。以降、現場の見える化に向けた取組み事例を紹介する。

4. 現場の見える化に向けた取組み

4.1　ICT基盤の整備

はじめに、坑内外のシームレスな情報共有の促進を図るため、坑口から切羽にかけてWi-Fi中継機を一定間隔ごとに設置し、坑内に安定かつ高品質なネットワーク環境を構築した（写真-3）。

ネットワークの整備により、リモート環境においても、ビデオ通話等、より確実な意思疎通が可能となった。また、坑内の騒音環境においても外部からの連絡を確実に受信できるよう、職員にウェアラブル端末を配付し、着信時に腕に振動を与える工夫も行った（写真-4）。

4.2　位置情報の利用

つづいて、上曽トンネルにある全ての機械と人の位置・稼働データを、ビーコン等を用いて常時取得し、自社開発のデータプラットフォーム「T-iDigital Field」のクラウド基盤上に集積した（図-3）。位置情報はトンネルの坑内坑外においてシームレスに取得できる。機械については、停止中・稼働中など、機械の状態が色分けで表示される。

位置情報を見える化するだけでも、機械のメンテナンスサイクルの把握やトラブル要因の早期発見、入坑管理のデジタル化等、様々な場面で役立っている（図-4）。

さらに、位置情報を分析・活用することにより、施工進捗の自動管理システムを構築した。NATMの管理においては、切羽での各作業工程にかかる所要時間（サイクルタイム）を把握し、ボトルネックとなる要因の抽出・対策を行うプロセスが、施工生産性を向上する上で重要な役割を果たす。

従来は目視による作業観察の結果を野帳等の紙ベースで記録・管理するのが一般的であったが、全てのサイクルタイムを正確に記録するのは困難であった。

本アプリケーションは、ドリルジャンボや吹付ロボット等、使用機械の位置および稼働データを用いて切羽での作業状況を読み取り、サイクルタイムを自動的に取得・可視化するアルゴリズムを実装している。

また、ずり出しダンプの詳細な運搬回数、発破検知センサからの発破時刻データ等も併せて利用している。

本アプリケーションを使用することにより、日々の作業状況をリアルタイムに把握できるようになった。さらに、蓄積されたサイクルタイムの記録から、どの作業が想定より遅延しているか、もしくは改善の余地があるか、定量的に分析することが可能となった。これにより、現場状況に応じた対策を即座に

写真-3　坑内アクセスポイント（坑口）

写真-4　ウェアラブル端末の活用

図-3　人と重機の位置･稼働データ取得画面

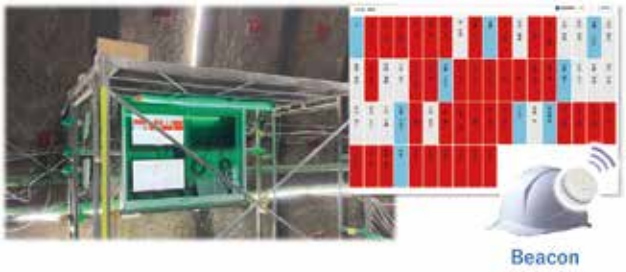


図-4　入坑管理のデジタル化

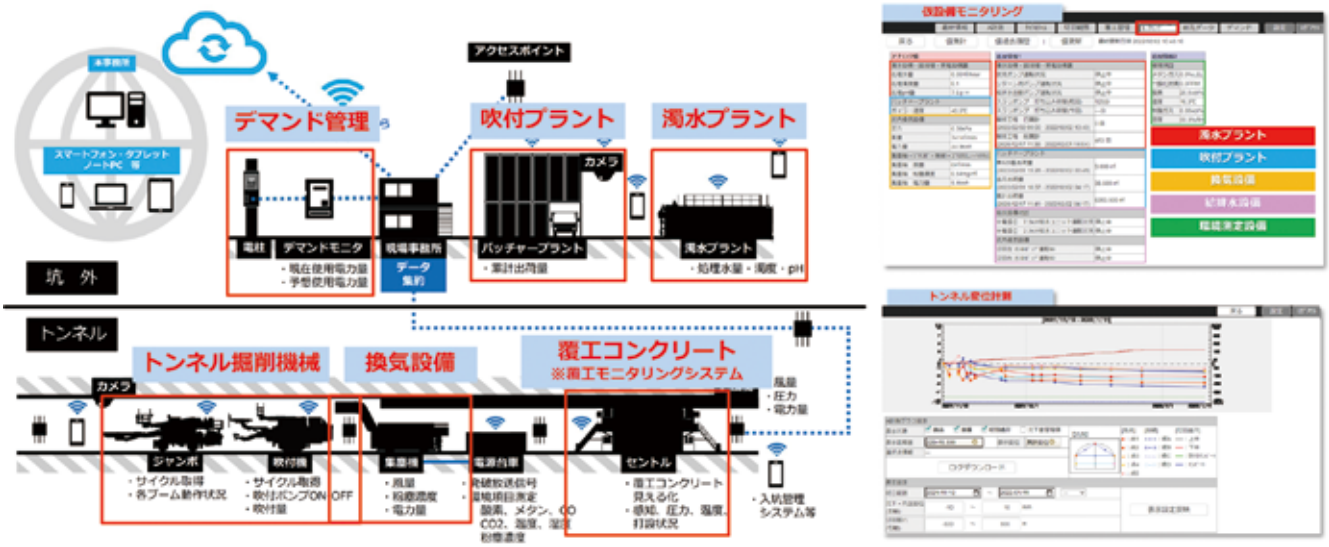


図-5　NATM管理システム

検討したり、指示・是正等を迅速に行ったりすることで施工効率の向上につなげている。

4.3　NATM管理システム

トンネル工事で使用される機械、仮設備に専用の機器を設置し、稼働状況・各種のデータをWeb上で共有する「NATM管理システム」を開発・導入した（図-5）。具体的には、トンネル掘削作業で用いられるドリルジャンボや吹付ロボットの機体から直接信号を取得し、機械の稼働状況と掘削作業時間を取得している。また、濁水プラントなどの仮設備に各種センサを設置して、ポンプやフィルタープレスの稼働状況、処理水のpH・濁度などのデータをスマホやタブレットでどこからでも確認可能とした（図-6）。

トンネルの変位計測データについても、測量機器からWi-Fiを通じてクラウドにアップロードされるよう仕様を変更することにより、計測直後から地山の変位を確認できるようになった（図-7）。

その他、現場のニーズに応じて電気使用量のわかるデマンドモニタなども追加でき、次節に述べる覆工モニタリングシステムも本システムに組み込むことができる。

4.4　覆工モニタリングシステム

本システムは、覆工コンクリートの品質確保を目的に開発・導入したものである。セントル全体に設置された各種センサの情報を用いて、打設中におけるコンクリートの状況を、定量的かつ視覚的に確認することができる（図-8、写真-5）。

コンクリートの打ち上がり高さは、感知センサの情報を基に管理している。セントル全面にわたって詳細な把握が必要と考え、各センサの中で最も高密度に設置した。コンクリートの充填状況は、面板に作用する

図-6　仮設備モニタリング画面

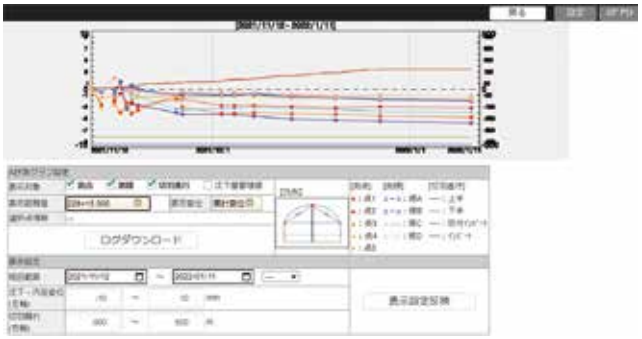


図-7　トンネル変位計測モニタリング画面

コンクリートの液圧を圧力センサで読み取り、この値を基に判断している。さらに、温度センサを用いて各部位のコンクリート温度を測定し、積算温度管理による発現強度の予測に利用している。

本システムの導入によって打設状況が見える化された結果、打設作業の各段階における施工・品質管理の生産性が向上した（図-9）。

Step-1: 足元の打設状況

コンクリートの高さが表示され、トンネル進行方向の打ち上がり高さが一目で分かるようになった。また、セントルの表面温度を監視することにより、

冬季における局所的な加温対策や脱型時期を明確な根拠をもって指示できるようになった。

Step-2: 肩部の打設状況

左右の打ち上がり高さが重要な局面で、高さと圧力を監視しながら打設を進められるようになった。ポンプ車に取り付けたセンサから、生コン車両ごとの打設が縞模様で表示される仕組みである。

Step-3: 天端の打設状況

コンクリートの打ち上がり状況が最も分かりにくい段階においても、充填状況を容易に把握できるようになった。

作業現場では、タブレット端末などで打設状況を確認している。情報を一元的に管理できるようになったことで、職員がより打設管理に集中できるようになったことに加え、先輩社員による遠隔指導も可能となった。

また、取得された情報は施工履歴データとして整理・蓄積されるため、現場のPDCAサイクルの高速化につながっている。例えば、冬季において打設後に局所的なひび割れが生じたことがあった。この際も、履歴データから当該箇所の養生温度が比較的低いことが判明したため、すぐに対策をとることができた。

ここで、システムの導入段階にあたっては、システムの目的や活用方法等について、関係者と共有・議論を重ねることに注力した。また、モニタ画面の表示方法についても、表面温度の数値と色を連動させるなど、職員・職長らの意見も取り入れながら工夫を重ねた。こうした小さな改善を繰り返した結果、本システムは単なるセンサ情報の「可視化」に留まらず、コンクリートの品質確保に向けて行動を促す「見える化」として効果を発揮するまでに成熟した。

4.5　発破パターンの自動最適化に向けた取組み

上記の取組みに加え、トンネル施工の完全自動化を見据えた中長期的な技術開発にも挑戦している。以下、開発背景を含め概要を簡単に紹介する。

本工事の施工計画にあたり、地山が非常に堅硬であるとの調査結果から、支保工の無い支保パターンであるB・CⅠパターンによる掘削作業の量が通常よりも多くなることが予想された。

そこで、削孔作業の効率化のため、フルオートコンピュータジャンボを導入した（図-10）。本機械は、プリズム測距を用いて機体の位置を削孔作業開始前に確定できる利点を持つ。ここで、機体を一部改造することにより、測定した機体の位置情報と事前に作成したドリルプラン（削孔位置・方向の指示データ）

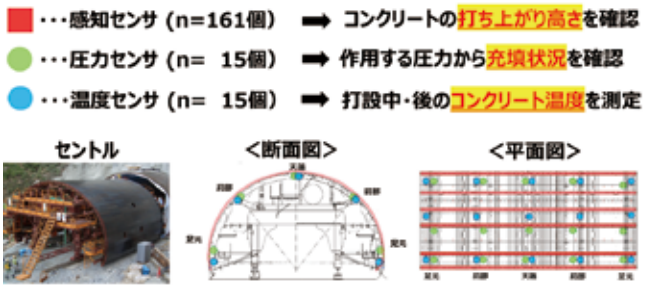


図-8　使用センサ

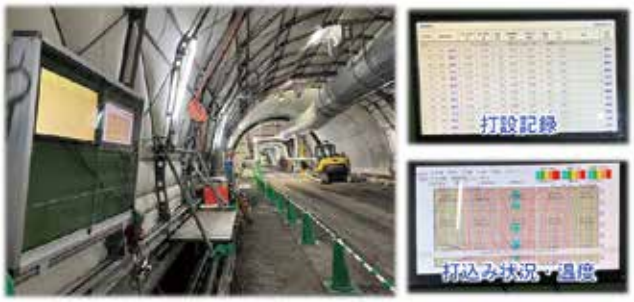


写真-5　覆工モニタリングシステム使用状況

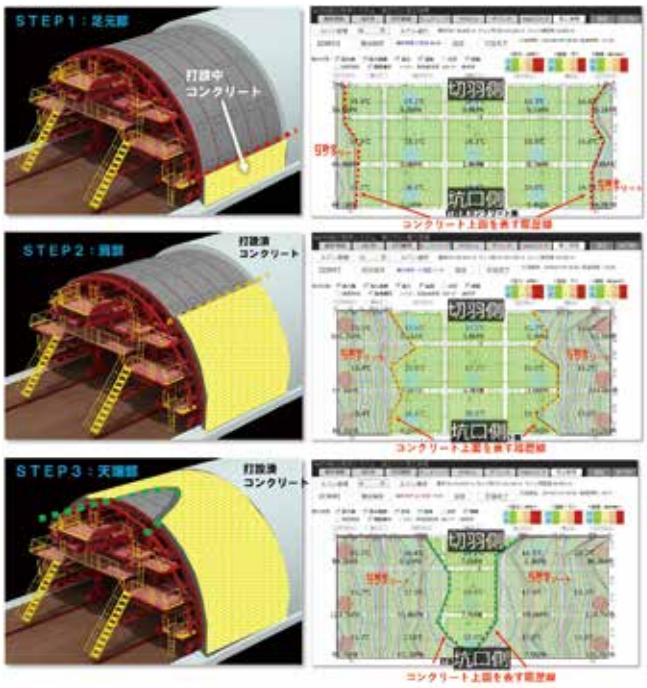


図-9　覆工モニタリングシステム画面

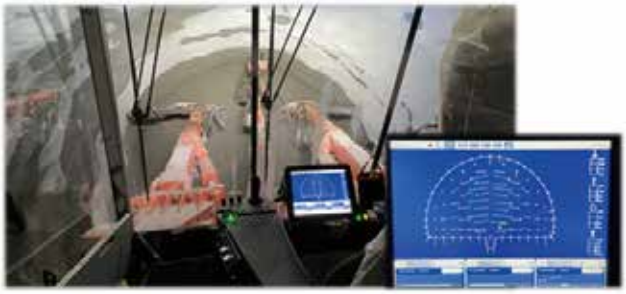


図-10　フルオートドリルジャンボによる削孔作業

を自動連携するシステムを開発した。

余掘り量の測定には、レーザートラッカーと呼ばれるレーザースキャナの上位互換機を使用し、測量時間の短縮にも留意している。また、坑内に安定したWi-Fi環境を整備しているため、測量結果やドリルプランのデータ連携に伴う事務所と機体PC間の通信はスムーズである。

現状、フルオート化された範囲は機械の駆動に関する部分に留まり、ドリルプランの作成・改善はいまだ手作業が必要な状態である。だが今後、余掘り量・地山データ・火薬量等の情報をAI教師データとして蓄積していくことにより、将来的にはドリルプラン（発破パターン）の最適化を自動化することも可能と考える（図-11、図-12）。

人の手に依らない「真の意味でのフルオート」の実現に向けて、引続き技術開発に邁進していく所存である。

5. おわりに

現在、建設業界は将来の技能者不足を解消する方策として生産性向上を目指し、i-Constructionの推進を含めインフラ分野のDXに向けて様々な取り組みを行っている。

今後も当工事においては「安全で快適な労働環境の実現」、「AI等の活用による作業の効率化」、「熟練技能のデジタル化による効率的な人材育成」等を目標に据えて、ICTをはじめとする新技術の導入・開発、更にはDXに向け積極的な投資を図っていきたい。

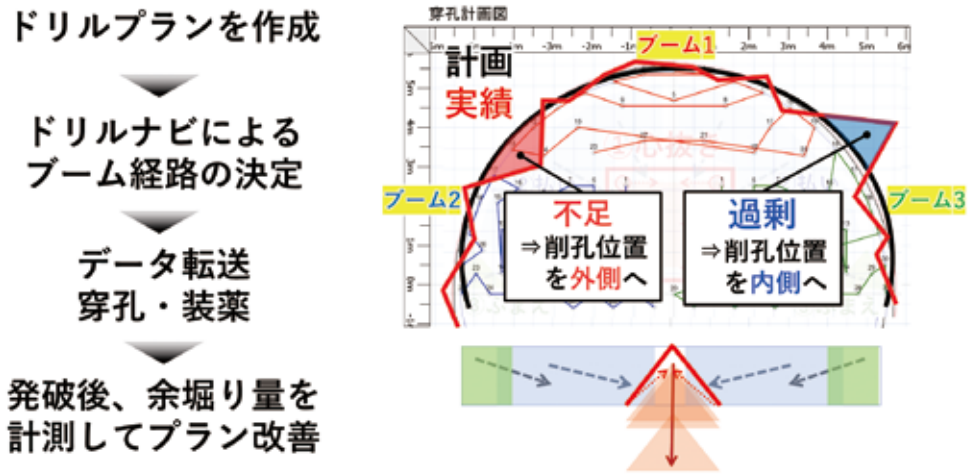


図-11　ドリルプランの最適化フロー

図-12　自動最適化に向けたAI学習

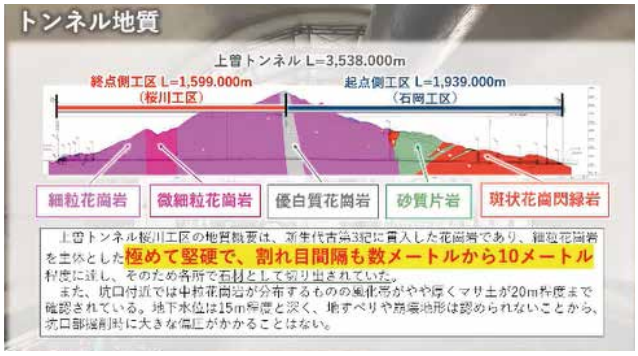
「上曽トンネル本体工事（桜川工区）」オンライン見学会を実施

実施日：令和4年5月18日（水）　参加者：50名

筑波山系の麓に上曽トンネル（桜川工区）の坑口と関連施設が広がっている

見学会では採用された新技術などの紹介を行った。紹介の仕方も現場写真、ドローンによる空撮、手持ちカメラによる坑口から切羽までの映像など、見学者が興味を引く工夫が随所に感じられる見学会となった。

工事説明をいただいた上曽トンネル作業所
作業所長 三谷一貴（大成建設）氏（右）



説明資料

参加者の声

- ICT施工の方法や品質管理手法など動画を使った説明がとてもわかりやすかった。国内で初めての機械導入など、先進的な取組みをされていると思った。
- 所長の説明が詳細で丁寧でわかりやすかった。トンネルの施工情報一元管理がここまで進んでいるのかと驚いた。
- 3Dイラストを用いた施工方法、施工機械の紹介がとてもわかりやすかった。土木工事に従事しているがトンネル工事を知らない自分でも理解することができた。無人化・自動化が進んで少数の人員でも管理体制を組めていることに驚きを感じました。