

# 山岳トンネル覆工用自動化セントルの開発

## Development of the tunnel lining form with automatic controls system

椎名 貴快*	山本 悟*
Takayoshi Shiina	Satoru Yamamoto
八巻 大介**	西川 菜々彩**
Daisuke Yamaki	Nanase Nishikawa

### 要 約

山岳トンネルの覆工コンクリート施工において、移動式型枠（以下、セントル）のセットやコンクリート打込み、脱型・移動の一連作業をすべて機械制御で行う「自動化セントル」をメーカーと共同開発し、（仮称）五郎窪トンネル工事に初導入した。大断面トンネルで通常6人編成の作業を4人編成で可能とし、セット作業は最小2人で据付誤差3mm以内に短時間で実施できた。またコンクリート打込み作業も高流動配合の採用で最小2人での作業ができるなど、大幅な省人化と生産性向上を確認できた。本稿では、自動化セントルの技術概要および現場導入の効果について報告する。

### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 自動化セントル
- §3. 現場導入効果
- §4. まとめ

#### §1. はじめに

技能労働者の高齢化や新規入職者の確保が厳しい現況下で、施工の品質を保ちつつ生産性を向上させることは事業の継続と収益確保に直結するため、省人化に資する技術革新が急務となっている。

山岳トンネル工事における覆工コンクリートの施工は、通常5、6人編成を標準とし、その作業工程はセントルのセット、コンクリートの打込みおよびセントルの脱型・移動の3つに大別できる。この内、コンクリートの打込み作業は狭隘なセントル内での苦渋作業となるため、近年では作業を効率化する技術が幾つか開発され、導入が進みつつある。またセット作業についても開発・検討が進み始めている。しかし、これらのすべての作業工程を機械制御で行う統合技術はなく、また実施工で効果検証された実績もなかった。

当社は2018年度からセントルメーカーの岐阜工業（株）と自動化施工に向けた技術検討に着手し、開発した「自動化セントル」（写真一1）を施工現場に初めて導入



写真一1 自動化セントル

した。本技術は、これまで作業員が行っていた一連の覆工作業をすべて機械制御で行うことができ、大幅な省人化と生産性向上を期待できる。本稿では、本技術の概要および現場導入の効果について報告する。

#### §2. 自動化セントル

##### 2-1 技術の概要

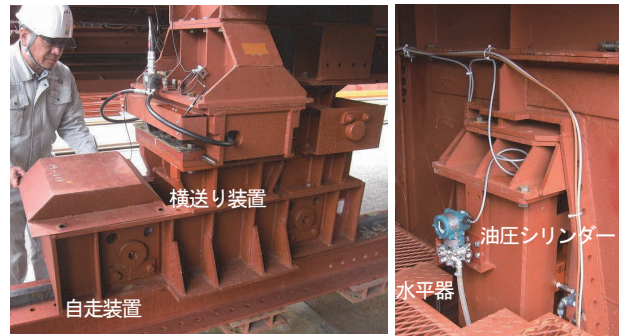
自動化セントルの主要なシステムは、自動セットシステム、コンクリート打設自動化システム、脱型・移動システムの3つで構成される。

##### (1) 自動セットシステム

セット作業は専用制御盤を用いて集中管理でき、セントル搭載の自走装置や位置調整装置（走行・横行・高さ）、フォーム調整装置、鋼製妻板装置などを用いる（写真一2）。主要作業のフローは以下のとおりである。

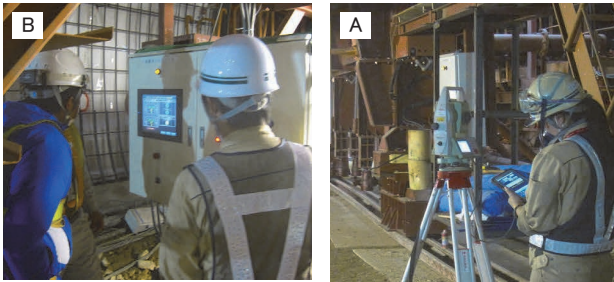
\* 技術研究所土木技術グループ

\*\* 北日本（支）五郎窪トンネル（出）



自走・横行調整 高さ調整・水平器

写真-3 セントル位置調整装置



制御盤によるセット操作 位置情報の取得・転送

写真-2 セントル自動セット状況



写真-4 天端誘導装置

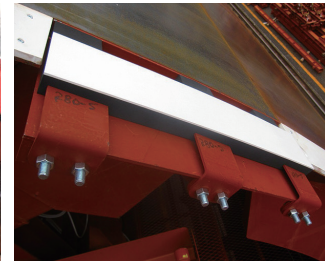


写真-5 面状感圧センサー

- ① 自動追尾トータルステーションでセントルに取り付けたプリズムを視準して現在位置を測定
- ② 設計位置との差分値を自動算出してタブレット端末からセントル搭載の制御盤へ自動転送
- ③ 差分値に基づき、制御盤からの起動指令で設計位置に自動誘導し、必要な高さと同幅まで稼働
- ④ 油圧伸縮式鋼製妻板を所定位置まで張り出してセット完了

なお、セントルの自走方向・横行方向・高さ方向の移動はミリ精度で稼働制御でき、高さは四方4か所での調整も可能な機構となっている(写真-3)。また天端部に設置した高精度ポテンショメーター(写真-4)により、目標位置に精度良く最終誘導させることができる。この時、ラップ部での既設覆工との過度な接触による損傷を防ぐため、独自の接触型面状感圧センサー(写真-5)をラップ部に配置した。これで所定の管理値に達すると自動停止する構造となっている。側フォームおよびインバートフォームの稼働は油圧アクチュエータで制御でき、所定の位置まで簡易に動かすことができる(写真-6)。妻板の設置には油圧伸縮式鋼製妻板(写真-7)を用いた。断面で8ユニットに分かれており、吹付け面やアンカー定着部による不陸に対応するため、防水シートとの間にエアバルク(写真中の青色部)を配置して密着性を向上させるほか、硬質スポンジを用いる方法がある。エアバルクは直径150mm、1本の延長が4mで、複数本用いて防水シートとの隙間を埋めるため、膨らませるタイミングや順序が重要となる。

以上より、従来のようにセット時に車両の通行を一時的に規制し、水準測量や下げ振りをを用いた人力作業が大



側フォーム用 インバートフォーム用

写真-6 油圧アクチュエータ

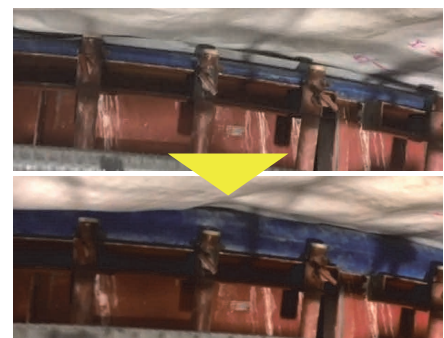


写真-7 油圧伸縮式鋼製妻板とエアバルク送気状況

幅に省人化される。セット作業の時、上げ越しや上げ越しでのセットを安全にできるように、上げ調整または下げ調整の両方ができるシステムとなっている。

(2) コンクリート打設自動化システム

コンクリートの打込み作業には、自走式マニピュレータを用いた自動化システムを開発した(写真一8)。自動配管切替えのための制御盤のほか、フォーム面に設置した各種センサー(写真一9)で打込み状況を常時監視するための制御盤が搭載されている。なお本システムは、コンクリートの配合が普通、短繊維補強、中流動、高流動のいずれにも使えることを想定している。主な作業の流れは以下のとおりである。

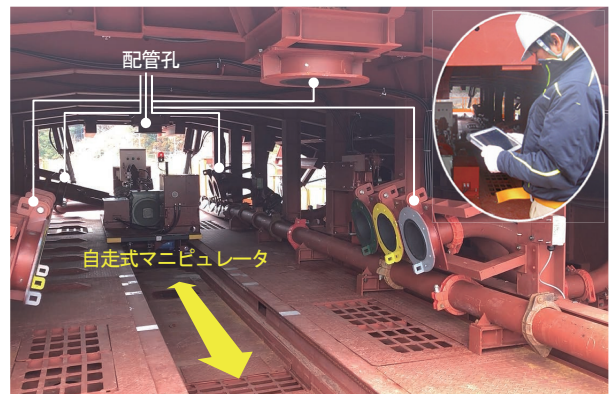
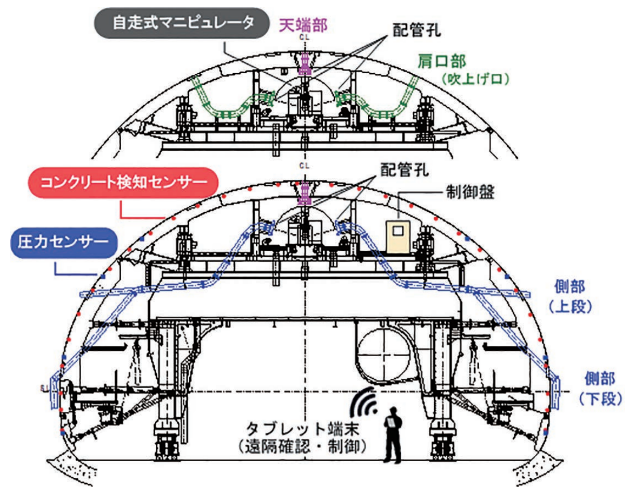
- ① 自走式マニピュレータが所定の配管孔前で停止後、配管を自動接続し、直ちにコンクリートの圧送開始(図一1)

- ② コンクリート1層あたりの打込み高さが500mmに達すると高さ検知センサーが反応して打込みを自動停止し、直後に圧縮空気を配管内へ送って管内に残ったコンクリートを送出

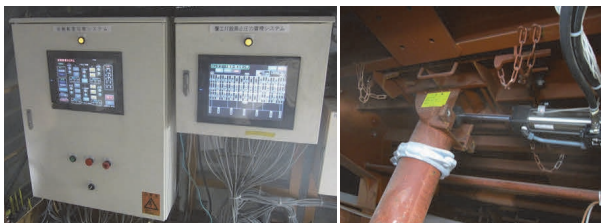
- ③ 打設口を自動で閉じてから次の配管孔へ移動
- なお、図中の側部(上・下段)打設口がシャッター構造ではなく、通常の打設口となっている。これは普通配合や短繊維補強配合での施工の際、フレキシブルホースを配管先端に取り付けてコンクリートの自由落下高さを軽減するためである。材料分離抵抗性の高い高流動コンクリートを打ち込む場合にはシャッター構造となる。この他、配管の切替え作業はタブレット端末による遠隔操作でも任意に実施でき、打込みの進行状況や型枠に作用する側圧などもタブレットで確認できる(写真一10)。



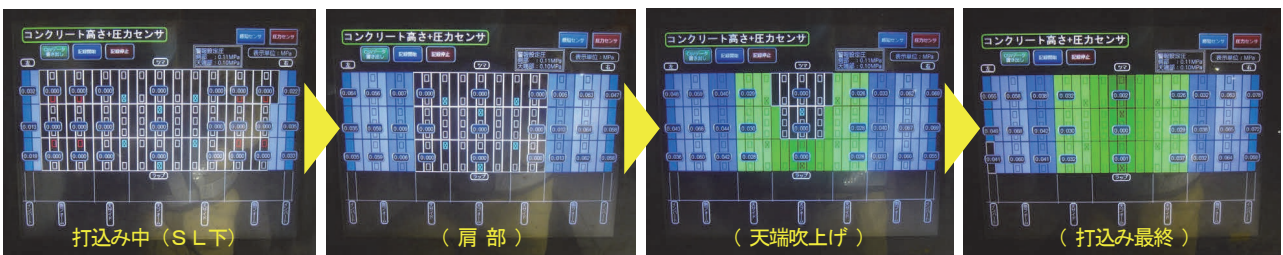
写真一8 コンクリート打設自動化システム



図一 マニピュレータ式自動配管切替システム



写真一9 セントルフォーム面に設置したセンサー



写真一10 コンクリート打込み進捗状況、型枠側圧の見える化

### (3) 脱型・移動システム

フォームの収納およびセントルのダウン作業では、自動セットの際に用いたフォーム調整装置およびセントル位置調整装置を用いる。油圧アクチュエータ操作でフォームの収納に要する労力が大幅に軽減される（写真-11）。また剥離剤の塗布およびケレン作業には、既存の剥離剤塗布内蔵ベルト式自動ケレンシステム（写真-12）を用いた。次スパンまでの移動は、制御盤からの指令もしくはペンダントスイッチでの手動操作で行うことができる。

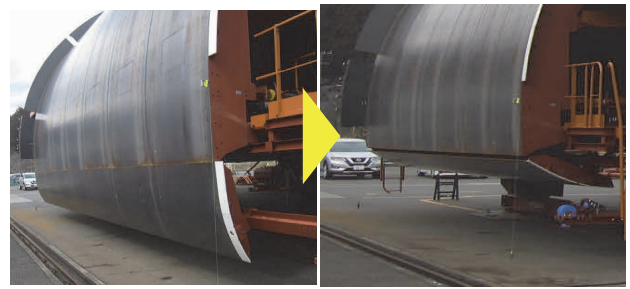


写真-11 フォームの収納（インバート）

## §3. 現場導入検証

### 3-1 工事概要

工事名：第17-41330-0033号道路橋りょう整備(再復)工事(トンネル)(仮称)五郎窪トンネル  
 発注者：福島県 県南建設事務所  
 施工者：西松・壁巢特定建設工事共同企業体  
 工事場所：福島県白河市五郎窪地内  
 工期：2018年3月23日～2021年8月31日  
 工事内容：全体延長L=611.0m, W=6.5(14.5～15.0)m  
 トンネル工L=474.0m, W=6.5(14.5)m  
 掘削(NATM)L=461.7m, 覆工L=472.0m  
 道路改良工L=137.0m  
 仮設工一式

### 3-2 地形・地質, トンネル仕様

福島県の国道294号白河バイパス整備事業の内、(仮称)五郎窪トンネル工事は、江戸時代中期に白河藩主の松平定信公が作った日本最古の公園である南湖公園の直下を掘削する工事である。(仮称)五郎窪トンネル(正式名:南湖トンネル)は、全長474.0mの2車線の道路トンネルで、左右両側に3m幅の歩道を有した内空高10.8m×幅16mの大断面トンネルとなる。地質は火山性凝灰岩や砂岩と頁岩の互層などで地山等級がDI, DIII, Eパターンと悪く、覆工自体も構造的補強が必要となり、全線で主筋D22@250mm, 配力筋D19@300mmを配置した覆工厚400～450mmの構造である。また、1スパンのコンクリート打込み量が約140m<sup>3</sup>で標準的な道路トンネルの2倍近くある。

### 3-3 セントル仕様

覆工コンクリートの配合として、普通、短繊維補強、中流動のほか、高流動コンクリートでの自動化施工を実施できるように側圧0.11N/mm<sup>2</sup>の耐荷力で設計し、セントルの補強および各種自動化装置を搭載した。その結果、セントル総重量は約180tに達し、例えば、一般的な2車線道路トンネルが約90t、第二東名高速道路クラスで約120t、(仮称)五郎窪トンネルと同クラス断面で約150tのため、スキンの補強や自動化装置分で約30tの重量増加となった。重量のあるセントルに対応するため、セントル走路下の路盤整備等に十分留意した。



写真-12 剥離剤塗布内蔵ベルト式自動ケレンシステム

### 3-4 施工

#### (1) 脱型・移動(ケレン), セット

トンネル断面が同規模の工事と比較した場合、従来は脱型・移動(ケレン)およびセットの作業に6人編成で7時間を要していた。一方で、本工事では4人編成6時間での作業が可能となり、省人化率57%(=24時間・人/42時間・人)であった。

セット作業において、上げ越し量や下げ越し量はセントル基盤支持力や打設速度などの条件を考慮して算出し、初回施工では上げ越し量30mm, 下げ越し量20mmとし、以降は出来形を確認して数値を決定した。セットの据付誤差は3mm以内で、従来の人力による作業と同程度であり、作業人員は最小2人で実施することができた。またセット時間は、妻板作業を除けば、従来半分の以下で済んだ。

油圧伸縮式鋼製妻板の使用は、覆工巻厚が大きく断面の大きなトンネルには特に有効で、仕上りも平滑となることから、縁切り効果が高い(写真-13)。ただし、鉄筋区間ではエアバルクや妻板との取り合いで一部の鉄筋



写真-13 鋼製妻板を用いた妻面の仕上り

をあらかじめずらしておく必要があり、鉄筋組み替え作業に多大な時間を要した。そこで写真-14のように鋼製妻板を薄く改良し、エアバルクの代わりに硬質スポンジを採用した。これにより妻枠作業時間の一部軽減にはつなげたものの、妻枠設置作業の省人化率は8割ほどに留まり、更なる改良の余地があった。

## (2) コンクリート打込み

セントルには、コンクリート高さ検知センサーを500mm高さごとに全93個(=周方向31個×延長方向3列)、型枠側圧を測定するための圧力計を全27個(=周方向9個×延長方向3列)配置し、コンクリートの一層打込み高さは500mmで、時間打込み速度を20m<sup>3</sup>程度とした。本工事では、普通配合や短繊維補強配合、中流動配合、高流動配合の打込みを行ったが、本システムですべての配合とも問題なく施工できることを確認した。

通常のスランプ15cm配合を用いた打込み作業では、6人編成で9時間を要する所、本工事では3.5人で9時間、これに肩部に打ち上がるまでの増員分2人×4時間を追加すると、省人化率73%(=39.5時間・人/54時間・人)であった。一方、自己充填性を有する高流動コンクリートを用いた場合、省人化率は47%(=25.5時間・人/54時間・人)まで上昇した。なお、本工事では気温や運搬等の影響によるベースコンクリートの品質変動に対応するため、増粘剤一液型流動化剤を現場であと添加して高流動コンクリートを製造する方法を採用した(写真-15)。このため、あと添加剤を投入する担当者や準備・片付けに要する増員が必要となった。仮に出荷ベースの高流動コンクリートを用いることができれば、省人化率はさらに上昇して、25%になったと試算される。

## (3) その他

施工中のシステム不調による異常動作に対処するため、安全上、緊急停止ボタンを各所に配置した(写真-16)。また従来と同じ作業をできるように、通常のペンダントスイッチ操作も可能とした。なお、脱型後のセントル移動において、ケレンや剥離剤の塗布、妻板の清掃、洗いなどの作業でセントルを任意に動かすことが多く、実務的にはペンダントスイッチ操作が最も多かった。

## §4. まとめ

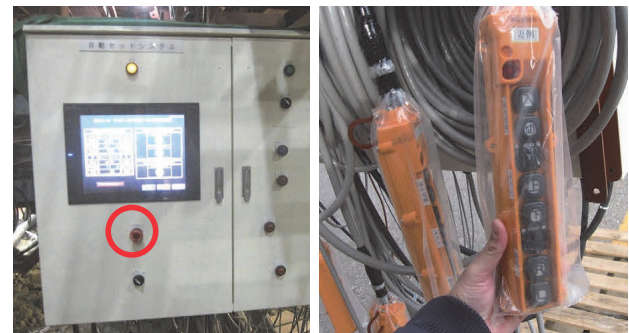
セントルに各種装置を搭載した自動化セントルは、専用の制御盤を用いて作業を迅速で安全に行うことを可能とした。(仮称)五郎窪トンネル工事での施工検証の結果、覆工班は従来の6人編成から4人編成まで減らすことが可能となり、特にセット作業は最小2人で従来と同程度の据付誤差3mm以内で実施できた。またコンクリートの打込み作業では、高流動コンクリートの使用によって



写真-14 鋼製妻板の改造 (硬質スポンジタイプ)



写真-15 あと添加型高流動コンクリート



緊急停止ボタン

ペンダントスイッチ

写真-16 システム不調への対処策

実質2人での作業ができるなど、大幅な省人化と生産性向上を実現した。ただし、幾つか改善の必要な箇所も残されており、今後も引き続き改良を継続していく。

**謝辞.** 現場での施工検証にご協力を頂いた、桜沢トンネル工事および(仮称)五郎窪トンネル工事の関係者の皆様に心より謝意を申し上げます。また高流動コンクリートの施工にご協力を頂いた(株)フローリック様に御礼申し上げます。そして本技術の開発に多大なご協力を頂いた岐阜工業(株)の関係者様に厚く御礼申し上げます。