

山岳トンネル施工における覆工の品質向上・省力化システム「OTISM/LINING」の構築

(株)大林組 正会員 ○鈴木 拓也 (株)大林組 正会員 斎藤 有佐
 (株)大林組 正会員 秋好 賢治 (株)大林組 正会員 西浦 秀明
 (株)大林組 正会員 桜井 邦昭 (株)大林組 正会員 伊佐治 優
 (株)大林組 正会員 東 努 (株)大林組 正会員 樋下 祐輔

1. はじめに

わが国の少子高齢化や人口減少は、今後さらに顕著となることが明らかであり、喫緊の課題となっている。そこで、筆者らは山岳トンネル施工における掘削作業の安全性向上および覆工の品質向上を図り、それぞれの作業の一連の工程を省力化することで、全体の生産性を向上させる統合システム「OTISM® (Obayashi Tunnel Integrated System)」の構築に取り組んでいる。その第一歩として、トンネル覆工に係る品質向上・省力化を実現するシステム「OTISM/LINING® (オーティズム/ライニング)」(図-1)の構築を進めている。



図-1 OTISM/LININGの概要

2. 覆工の課題と OTISM/LINING について

山岳トンネルの覆工構築作業は、狭隘な施工空間における非効率な作業や、重量物を人力で扱う苦渋作業が多く、生産性向上の余地は大きい。また、そのような作業環境のため施工時に初期欠陥が発生する品質リスクも内包している。覆工コンクリートの経年劣化は、初期欠陥による影響を大きく受けるため、施工時に品質を確保することは構造物の長寿命化にとって重要な要素である。しかし、これらの品質リスクは特定の作業において発生するものでなく、1つの技術では解決できない。そこで、覆工作業を主たる5つの分野（防水シート張り付け、移動式型枠の設置、コンクリート、打設、養生）に分け、各分野における苦渋・非効率作業や品質リスクを抽出し、それらの改善に資する要素技術を開発した。そして、これらの要素技術を統合させて運用し、一連の覆工作業を改善するシステム「OTISM/LINING」の構築に取り組んでいる。本システムのコンセプトでは、より合理的・経済的な解決方法を選択することとしており、機械化、IT化、材料の改善、機材の構造変更等と多岐にわたる。表-1に各分野の苦渋・非効率作業と品質リスク及びその解決方法の一覧を示す。本稿では、このうち防水シート張り付け、移動式型枠の設置、コンクリート、打設の要素技術を紹介する。

表-1 苦渋・非効率作業と品質リスク及び解決方法の一覧

作業分野	苦渋・非効率作業	品質リスク	開発技術名	解決方法および効果
防水シート張り付け	・1巻き約50kgのロール状の防水シートを人力で広げ、壁面に押し当てながら張り付ける作業 ・防水シート現場溶着部	・一定の余裕量を持たせた張り付けを行わなかった場合、覆工打設時にシートが引っ張られて、破損する	壁面追従型長尺防水シート急速展開システム	特殊引込み装置により適度な余裕量を確保しながらバルーンを用いて幅10.5mの長尺防水シートを壁面に押し付けることで自動展開可能なシステムである。これにより、シートの破損を防ぐとともに張り付け労力が解消され生産性を向上できる。
移動式型枠の据付け（セントルセット）	・既設工部等との接触監視やセントルの位置計測、制御に多くの人員を要す	・既設コンクリートとの接触不具合 ・セントルの配置精度による不具合	セントルの全自動セットシステム	セントルにセンシング機器等を搭載し、高精度にリモートセンシング可能とし、併設するコンピューターにより、自動で駆動制御を可能とするシステムである。これにより、従来の作業人数を大幅に削減できるとともに既設工部との接触や型枠の位置ずれによる不具合を解消できる。
コンクリート	・狭隘な施工空間内での締固め作業 ・パイプブレイクによる締固め時の騒音	・締固め不足による充填不良 ・高流動コンクリート使用時の収縮ひび割れ	低セメント量の高流動コンクリート ニューロクリートNeo	少量の特殊増粘剤と市販の高性能AE減水剤を用いることで、普通コンクリートに対しセメント量を増加することなく、高流動コンクリートを製造可能である。これにより、ひび割れ発生リスクを低減し、締固め等の苦渋作業を解消でき生産性が向上する。
打設	・狭隘な施工空間内での鋼製配管の切替作業	・落下高さ起因する材料分離、余剰空気の巻き込み ・打ち重ね時間の超過によるコールドジョイントの発生	ホース伸縮式連続打設システム	長尺ホースを打ち上げりの高さに合わせて自動で引き上げ、配管切替作業を不要として連続打設できるシステムである。これにより、最小限の落下高での打ち込みが可能となり、材料分離や打ち重ね時間の超過を防ぎ、苦渋作業も解消できる。
養生	・養生作業手間（散水やテレスコピックセントル等） ・湿度等の日常管理手間	・脱型後の急激な乾燥や温度低下によるひびわれ	超音波加温保湿養生システム モイストキュア	覆工脱型後に表面を養生シートで覆うことで外気と遮断した密閉空間を作り、この空間内を超音波加湿器で高湿度の状態に維持するシステムである。自動運転制御機能により密閉空間内の湿度を常時90%以上に維持できる。密閉空間のため保温性が高く、加温設備が不要となる。

キーワード 山岳トンネル、覆工、生産性向上、品質向上、防水シート

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株)大林組土木本部生産技術本部 TEL03-5769-1319

3. OTISM/LINIG の要素技術

(1) 防水シート：壁面追従型長尺防水シート急速展張システム

a) 従来の課題

覆工を構築するには、事前にトンネル壁面に防水シートを設置する必要がある。従来の作業手順は、幅 2.2m のロール状シートを専用の台車に揚重し、シートを人力で広げ、壁面に押し当てながら（以降、この作業を展張と呼ぶ）、釘打ち機で壁面に固定する。固定後は新設シートの端部を既設シートと全周溶着させる。以上を繰り返して作業を進めるが、防水シート（不織布含む）は 1 ロール約 50kg となるため、人力で抱えて展張するには多大な労力と時間を要していた（写真-1）。また、凹凸のあるトンネル壁面にシートを密着させるには、シート展張時に適度な余裕量を持たせる必要があり、その余裕量が不足した状態で張り付けると覆工コンクリート打設時にシートが引っ張られて破損するリスクがあった。加えて、シート同士の現場溶着作業にも労力を要しており改善が求められる作業であった。

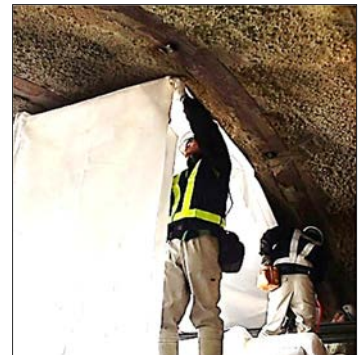


写真-1 従来の展張状況

b) 技術概要

そこで、特殊引き込み装置により適度な余裕量を確保しながら、幅 10.5m の長尺防水シートを自動展張可能なシステムを開発した。本技術は工場で溶着した長尺防水シートをバルーンで持ち上げ、吹付け面に密着させながら展張し、固定するものである。本技術による施工手順を下記に示す。

- ① 工場で幅 2.2m のシートを 5 枚溶着した全長 10.5m の長尺防水シートを蛇腹折りし、ロール状にして現場搬入する（図-2）。
- ② ロール状のシートを台車下部からトンネル周方向にウインチで巻き上げ、台車上に蛇腹折りの状態でセットする（図-3）。
- ③ 新設シートの端部を引き出して全周に渡って釘打ち固定する（図-4 ②）。
- ④ 台車を移動させながら壁面にシートを密着させ、適正な位置で移動を停止させ引き込み装置によりシートに計画的に余裕量を与える（図-5）。
- ⑤ その後順次釘打による固定を進める。上記を順次繰り返し作業を進める。

従来作業の課題と本技術により期待される改善効果の一覧を表-2 に示す。

表-2 従来作業と効果の一覧

改善項目	従来方法と課題	期待される効果
シートの溶着作業	・幅2.2mの防水シートを現場にて全周溶着して連結 【課題】全周溶着に掛かる作業労力	・幅2.2mのシート5枚を工場溶着し、幅10.4mの長尺シートとして加工 【効果】溶着作業量が1/5となる
シートの展張・固定作業	・シートを壁面に展張しながら固定する作業 【課題】人力による苦渋作業	・バルーンと送風機を用いて、蛇腹状態のシートを広げながら壁面に押し当て、順次釘打ち固定する 【効果】展張作業を機械化することにより苦渋を解消
	・トンネル壁面に張り付ける際は作業員の経験や技量で適度な余裕量を確保させる 【課題】余裕量が不足すると覆工コンクリート打設時にシートが引っ張られて破損する又はシート背面に空洞を生じるリスクがある（品質リスク）	・特殊引き込み装置により機械的に適度な余裕量を確保する 【効果】覆工コンクリート打設時のシート破損や背面空洞リスクを低減できる

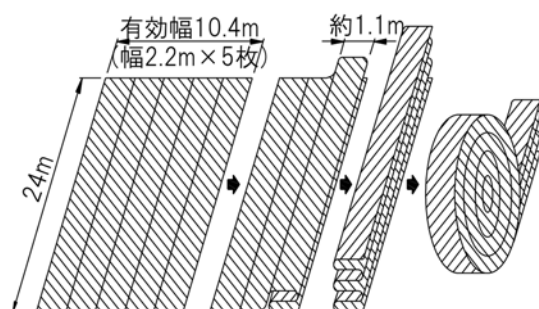


図-2 長尺防水シート蛇腹折り，ロール巻き

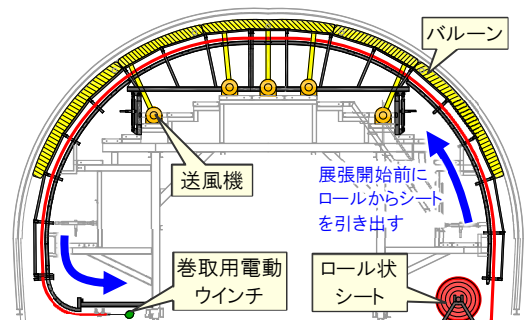


図-3 防水シート引き出し・展張

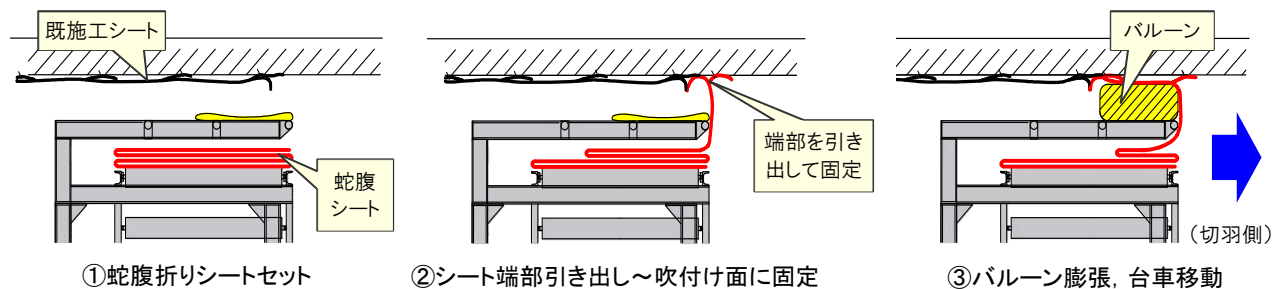


図-4 長尺防水シート展張・固定 ステップ

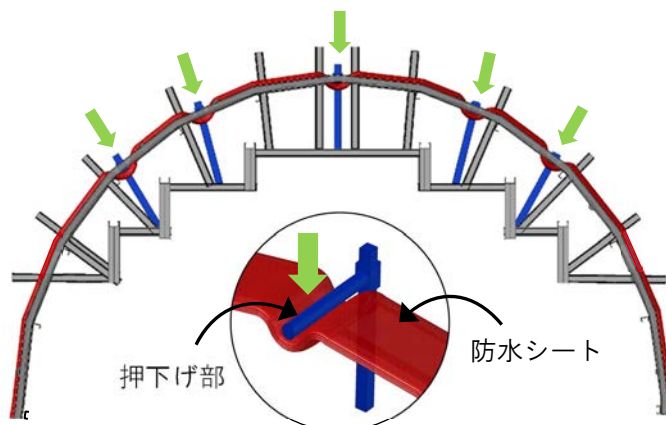


図-5 引込み装置の概要

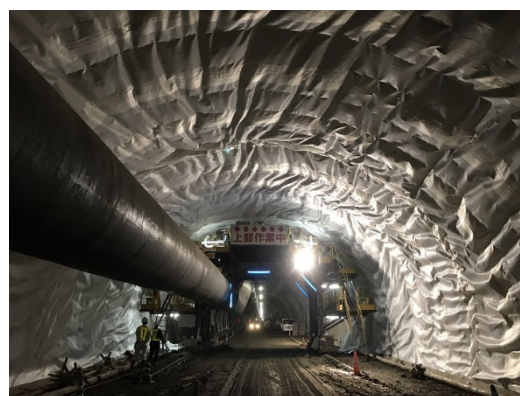


写真-2 シート設置完了状況

C) 効果や適用結果

本技術を標準的な道路トンネル断面の現場に適用した結果、従来の施工方法（社内実績）に対して約 90% 作業効率が増加した。品質面では、現場溶着部を加圧試験により確認したが全て良好な結果が得られた。また、シートの緩みについては引込み装置の採用により、事前に設定した余裕量（壁面周長に対して付加長+4%）を与えることで、従来の方法と同等の仕上がりになることが目視で確認できた（写真-2）。

(2) 移動式型枠の据付け：セントルの全自動セットシステム

a) 従来の課題

覆工コンクリートを構築する際に用いる移動式型枠(以下セントル)は、大型の鋼製部材で構成されている。従って、セントルを所定の位置に据え付ける際には、それらの部材が既設コンクリートと接触し、不具合を生じさせないように複数名により監視を行いながら、精密な位置合わせを行う必要がある。そのため、覆工構築の中でも当該作業は高度な技量を要するだけでなく、監視・計測・操作・調整に多くの人手を必要とする。これらの理由から、セントルセットは品質確保と生産性向上の両者の観点から改善が求められる作業であった。

b) 技術概要

そこで、セントルに各種のセンシング機器や測量器を設置し、セントル部材各種の位置関係の計測や接触監視を高精度にリモートセンシング可能とした。また、併設するコンピューターにより、所定の位置までの移動量や油圧ジャッキの伸縮量を演算し、駆動制御するシステムを開発した。表-3 にシステムを構成する機器の一覧及びその機能を示し、図-6 にシステムを搭載した

表-3 構成機器一覧表

分 類	機 器	機 能
制御機器	PC・モニター	演算・駆動司令用
測量機器	計器①:トータルステーション	セントル自己位置確認
センシング機器	計器②:走行距離測定器	セントル走行方向の移動距離計測
	計器③:傾斜計	セントルの水平検知
	計器④:レーザー距離計	天端フォームジャッキ上下・横送りストローク計測
	計器⑤:ワイヤエンコーダ	サイドフォームジャッキストローク計測
	計器⑥:リミットセンサ	既設コンクリートとの接触検知

したセントルの概要を示す。本システムを用いたセントルセット手順を概略フローとして図-7 に示す。これらの手順はあらかじめ演算用 PC にトンネル線形や測量座標、セントルの配置計画情報等を入力しておくことで、以降の作業はセントルセット時に図-8 に示すタッチパネル式のモニターを操作することで、駆動司令用 PC を

介して天端フォーム・サイドフォームそれぞれのジャッキを自動で制御し、所定の位置に自動で据付け可能である。また、各ステップにおいて各計器の計測値をチェックする機能を設けており、許容値を超えた場合には自動でフィードバックを行い、誤差を修正させることが可能である。本システムの安全機能については、既施工部との接触はリミットセンサーによる危険検出型のインターロック、人やその他接触物に対しては安全確認型のインターロックシステムを備えており、異常時には非常停止ボタンにて対応する。

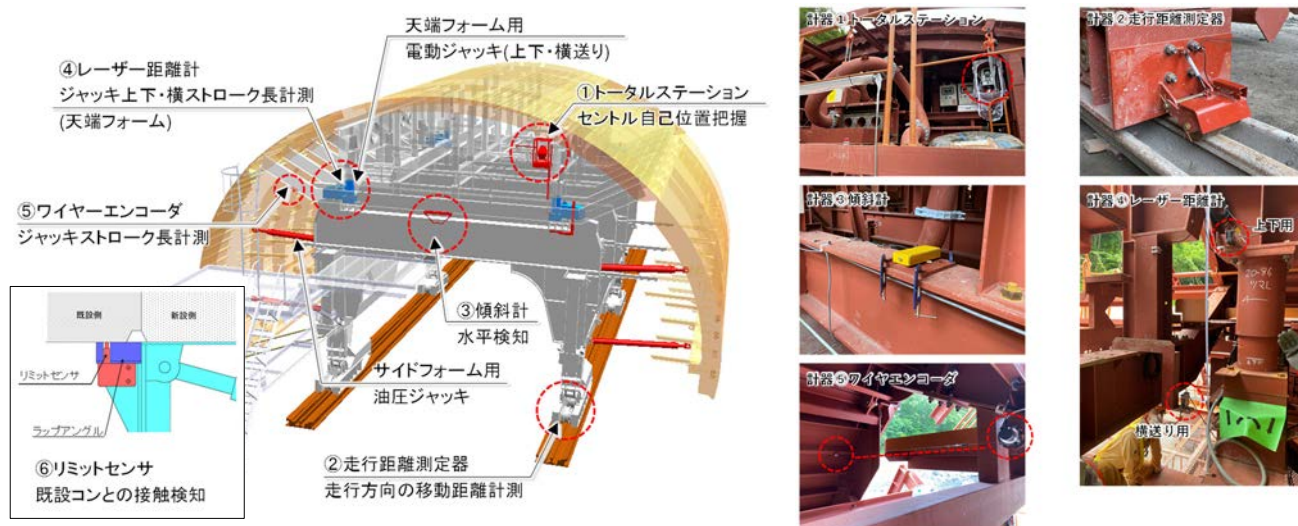


図-6 システム搭載セントルの概要



図-7 セントルセット概略フロー



図-8 タッチパネル式モニター

C) 効果や適用結果

本技術を実施工に適用した結果、監視・計測・操作・調整を各種のセンシング技術が代替することで従来の作業人数の3分の1にあたる2名での作業が可能となり、自動セット作業に要した時間も30分程度（従来は90分程度）と大幅に改善され生産性向上に大きく寄与した。また、目視や巻き尺ではなくセンシング技術による精密な計測に基づく制御を行うことにより、高い精度でのセントルセットが可能となるとともにヒューマンエラーによる不具合も防止でき、品質確保にも貢献した。本技術は全て後付け可能な装置で構成されており、セントルメーカーを問わず広く適用可能としている。

(3) コンクリート：ニューロクリート Neo°

a) 従来の課題

覆工コンクリートは部材厚さ30cm程度の薄いアーチ状構造体であるため、締固めや打込み作業には多くの労力を伴うとともに、施工の際には締固め不足による充填不良が発生するリスクがある。また、打込み作業はセントルに設けた限られた打込み口から行うため、所定の空間を全て充填させるにはコンクリートを長い距離流動させる必要があり、それにより材料分離が発生するリスクがあった。これらを改善させるには、締固め

作業が不要となる高流動コンクリートの適用が効果的である。しかしながら、従来の高流動コンクリートは、高い流動性に見合った材料分離抵抗性を確保するためにセメント量を大幅に増加させる必要があり、材料コストや収縮ひび割れの発生リスクが増加する課題があった。

b) 技術概要

これらの課題を解決するため、少量の特殊増粘剤と高性能AE 減水剤を用いることで、普通コンクリートに対しセメント量を増加させることなく、高い流動性と自己充填性を確保できる高流動コンクリート（ニューロクリートNeo）を開発した¹⁾（図-9）。なお、特殊増粘剤の主成分はセルロースエーテルである。平均粒径80μmの微粉末で、使用量は30～60g/m³と少量である。また、高性能AE減水剤は市販の汎用品である。このため、この高流動コンクリートは、日本各地の生コン工場で容易に製造することが可能である。

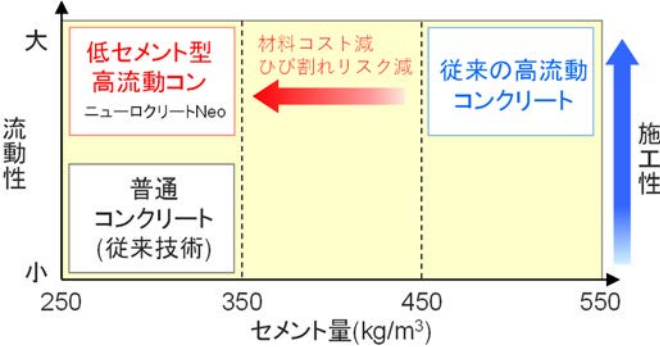


図-9 低セメント量高流動コンクリートの位置付け

c) 目標とした品質や配合例

高流動コンクリートの配合を選定するにあたり目標とした品質を表-4に示す。目標品質は土木学会のコンクリート標準示方書や高流動コンクリート指針を参考に設定した。トンネル覆工は、大半が無筋構造物であることから自己充填性のランクは3、スランプフローの目標値は60±10cmとしている。

また、ニューロクリート Neo を道路トンネルの覆工に適用した際の配合例及び各種品質試験の結果を表-5 に示す。本現場ではセメント量 284kg/m³ で製造可能であった。

表-4 高流動コンクリートの目標品質

試験項目	目標とした品質	試験方法
充填高さ(ランク3)	30cm以上	JSCE-F511
スランプフロー	60±10cm	JIS A 1150
空気量	4.5±1.5%	JIS A 1128
ブリーディング	従来の覆工に対して低減	JIS A 1123
加圧ブリーディング	指針※に示される「良好な圧送」の範囲内	JSCE-F502
圧縮強度	・設計基準強度以上 ・従来覆工と同等以上の発現性	JIS A 1108
中性化深さ	従来の覆工に対し同等以下	JIS A 1152 JIS A 1153
凍結融解抵抗性	従来の覆工に対し同等以上	JIS A 1148

※土木学会:コンクリートのポンプ施工指針[2012年版]、コンクリートライブラリー135、2012.6

表-5 低セメント量高流動コンクリートの配合例とフレッシュ試験結果

コンクリート種類	自己充填性のランク	目標スランプフロー (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		フレッシュコンクリートの品質			
						水 W	セメント C	砂 S	石 G	減水剤 (C×%)	特殊増粘剤 (g/m ³)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	充填高さ (cm)	ブリーディング率 (%)
従来の覆工コンクリート	—	スランプ 15±2.5	20	58.8	49.9	167	284	895	933	WR 1.5	—	スランプ 17.5	4.1		3.9
ニューロクリートNeo	ランク3	60±10	20	58.8	52.1	167	284	934	892	SR 1.5	60	60.0	4.0	35.4	0.3

d) 効果や適用結果

上記配合のニューロクリート Neo を覆工に適用した結果を写真-3、写真-4 に示す。コンクリート自体の高い流動性により締固め作業を不要として容易に流動・充填し、生産性向上に大きく寄与した。ニューロクリート Neo は既に全国 10 箇所以上のトンネル現場で実績を重ね、総数量は 10 万 m³ を超える。

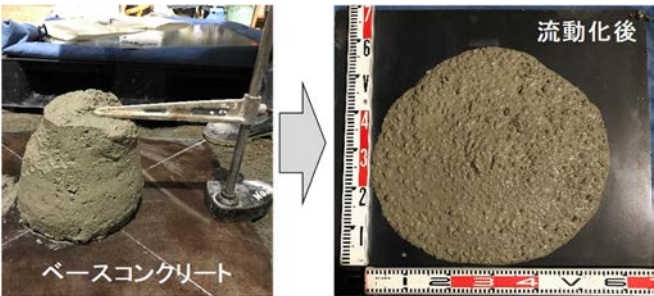


写真-3 流動化前後のコンクリート外観



写真-4 高流動コンクリートの流動状況

(4) 打設：ホース伸縮式連続打設システム

a) 従来の課題

セントル内部はコンクリートの打設作業を行う空間としては非常に狭隘であり、加えて型枠を支持するための各種部材が張り巡らされており作業性が悪い。従来は、そのような環境下において重量物である鋼製配管を作業員がコンクリートの打上がり高さに応じて都度切り替えて打設してきた。そのため、多くの時間と労力を要しており、これらの作業が遅延した場合には、コールドジョイントが発生するリスクもあった。また、セントルの構造上、限られた打設口からコンクリートを流し込む打設方法となるため、筒先からの落下高さが大きくなることがあり、コンクリートの材料分離や余剰空気を巻き込むリスクもあった。図-10 に従来の打設方法を示す。

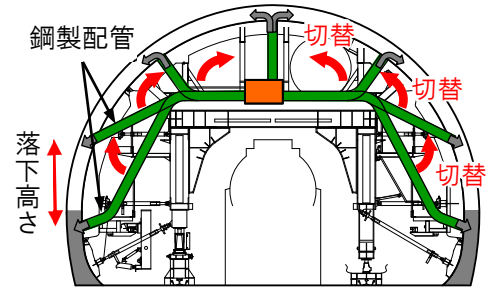


図-10 従来の打設方法

b) 技術概要

そこで、配管切替を不要とした新しい覆工コンクリートの打設システムを開発した。本技術は、セントル天端フォームの打設口から左右それぞれに1本のホースを脚部まで配置し、コンクリートの打上がり高さに合わせて自動で引き上げるものである（図-11）。ホースの引上げ機構は、門型移動架台（ガントリー）上部に配置した移動台がホースを抱えてトンネル軸方向へスライドするものとしている（写真-5）。付属のコントローラーにより移動台の操作が自動で行え、コンクリート打設時の落下高さを自在に調節できる。打設は、打込み高さを1層50cmとして左右交互に打ち込み、打上り面がホース先端に達した時点でホースを引き上げて行う。これを繰り返し、天端部へ達した時点で吹上口へ切り替え、以降は従来の覆工打設と同様の方法で打設を完了させる。

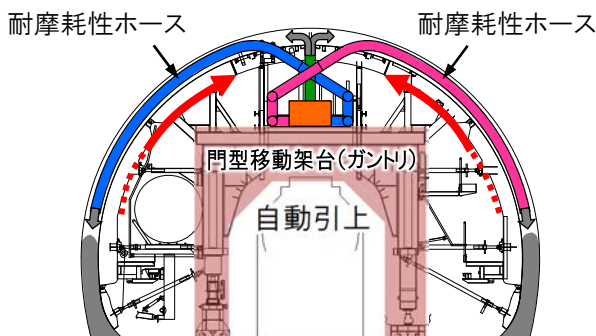


図-11 打設システムの概要



写真-5 打設システムの構造

c) 効果や適用結果

本技術を標準的な道路トンネル断面の現場に適用した結果²⁾（写真-6、写真-7）、最小限の落下高さでの打ち込みが可能となり、材料分離や余剰空気を巻き込むリスクを低減できた。また、従来の配管切替式からホースの連続引き上げ式にすることで、切替作業（20分×6箇所程度）をなくし、苦渋作業を改善するとともにコールドジョイント発生リスクも低減できた。その他の品質に影響もなく、美観も良好であった。



写真-6 打設システム全景



写真-7 本システムによる打設状況

4. おわりに

今回紹介した要素技術はいずれも現場適用の結果、目的の品質を確保できるだけでなく、苦渋作業の解消や効率化など生産性の向上にも大きく寄与することが確認できた。従来、覆工構築に係る一連作業は全て1組の作業班が担うことが多く、作業班は6～9人で編成されていたが、これらの開発技術によりそれぞれの作業に要す人員は2～3人程度まで削減することが可能となった。よって、これら全ての技術を統合して1つの現場に導入することで覆工作業員を2～3人とした班編成にまで省人化できるものとする。設備投資費との費用対効果からも十分実現可能な範疇である。また、覆工構築作業は生コンを取り扱う作業であることからイレギュラーな対応をゼロにすることは困難であり、ある程度の人員は常時確保しておくべきであるとする。従って、2～3人の班編成は生産性向上や品質確保の観点からバランスの取れた体制と考える。

今後の目指す方向性としては次に示す2点の解決と考える。①作業人員を削減したことにより起こり得る情報不足や属人化に起因する品質リスク、②顕在化していない苦渋作業による負担。前者はICT技術を利用し、情報をデジタル化・定量化させて適切に伝達することや熟練技術を要す作業の標準化により解決し、後者は更なる省力化に向けたPDCAを図ることで解決することが望ましいと考える。

参考文献

- 1) 桜井邦昭ほか：セメント量の増加を抑制した高流動コンクリートの開発とトンネル覆工への適用，トンネルと地下，Vol.50，No.10，pp.45-55，2019.10
- 2) 鈴木拓也ほか：覆工コンクリート打設作業の品質向上・省力化への取り組み，建設機械施工，Vol.73，No.3，pp.77-81，2021.3