

トンネル覆工コンクリートの全自動打設システムの開発

鹿島建設株式会社

○ 松本 修治
手塚 康成
坂井 吾郎

1. はじめに

近年、我が国では少子高齢化に伴う技能者不足が深刻化している。特に、建設業界においては、他産業と比べ若年入職者の減少や熟練技能者の高齢化が進んでおり、より技能者不足の問題が顕在化している。さらに、2024年から適用されている時間外労働時間の上限規制も相まって、省人化、省力化などによる生産性の向上が求められている。これらに対応するためには、専門スキルのない新規入職者などがすぐに活躍できるように、誰でも品質を確保しつつ少人数で効率的に施工ができる技術を開発する必要がある。

国土交通省では、それらを目指して i-Construction¹⁾ の取り組みなど、多方面で生産性向上技術や機械化、自動化技術の開発が進められている。山岳トンネルの分野においても、各作業工程の自動化が進められており、筆者らは、トンネル覆工コンクリートの施工の自動化技術の開発を進めている。

従来からトンネル覆工コンクリートの施工は、スランプ 15cm 程度のコンクリートを検査窓から自由落下させながら打ち込み、移動式型枠内の狭隘な空間において入念な締固めや配管の切替えを行うなど苦渋を伴う人力作業が多い。それゆえに、良好とは言い難い作業環境の下、品質は技能者の技量に依存しており、美観不良および品質不良を生じるリスクが高い。そのため、近年では、型枠面に取り付けた型枠バイブレータのみで締固めを行える充填性の高い中流動覆工コンクリート²⁾ が普及している。これにより、窮屈な姿勢での苦渋となる入念な締固め作業は必要なくなり、省力化されるとともに美観向上および品質向上が図られている。しかしながら、箱抜き部においては、下面などに未充填が生じやすい問題があるため、中流動覆工コンクリートにおいても型枠バイブレータの手動操作に加え、棒状バイブレータによる人力での締固め補助が必須となっている。さらに、図-1 に示す従来工法の打設配管を有する移動式型枠では、打設口を切り替えるごとに配管の取り外しから配管内に残ったコンクリートの廃棄、管内清掃など

の苦渋作業が必要であることから、生産性向上の観点では課題が残されていた。そこで、筆者らは、省人化および省力化を実現するために、締固めを不要とする高流動覆工コンクリートの技術と全自動打設システムを開発した。

本稿では、覆工用高流動コンクリートの技術と全自動打設システムの概要、開発時の課題と対策および開発成果と実績について述べる。

2. 全自動打設システム

図-2 に示す全自動打設システムは、新しい打設配管装置を主とした各種装置を備えた移動式型枠を用いるものである。このシステムにより、高流動覆工コンクリート³⁾を用いて、ポンプによる圧送、打設口の切替え、型枠バイブレータの操作、打ち込みまでを自動制御で行うことができる。以降に、高流動覆工コンクリートの技術と各種装置について詳述する。

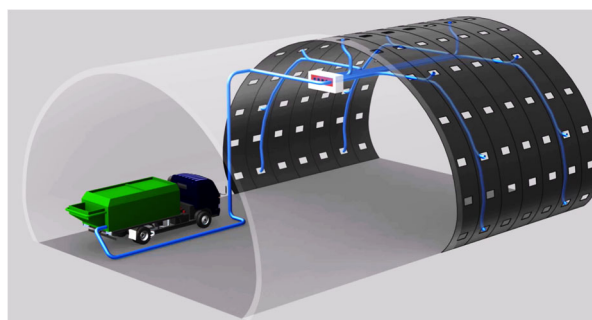


図-1 従来工法の打設配管

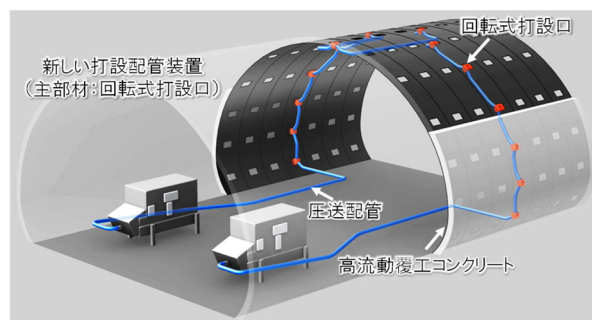


図-2 全自動打設システム

2.1 高流動覆工コンクリートの技術

山岳トンネルの覆工は、地山と型枠に閉鎖された空間に限られた打設口からスランプ 15cm 程度の覆工コンクリートを流し込みながら打ち込むものである。また、2日に1回のサイクルで打設するために材齢 18 時間程度で脱型されている。

高流動覆工コンクリートは、山岳トンネルの覆工コンクリートを対象として、スランプフロー500～600mm で締固め不要を実現する流動性の高いコンクリートである。

前述のような覆工特有の施工条件を踏まえて新規の増粘剤含有高性能 AE 減水剤⁴⁾を適用しており、ブリーディング量を一般的な覆工コンクリートの半分程度にまで低減しつつ、高流動覆工コンクリートの適切なフレッシュ性状の確保を実現している。また、一般的な覆工コンクリートと同様に、材齢 18 時間で脱型に必要な強度を確保できる⁴⁾。

2.2 各種装置

(1) 新しい打設配管装置（回転式打設口）

図-3 に示す新しい打設配管装置は、打設口および圧送配管と移動式型枠とが一体になり、写真-1 に示す回転式打設口を主部材とするものである。圧送配管は、回転式打設口を介して左右それぞれで連続的に接続されている。回転式打設口は、後述する打設制御装置と連動しており、打込み時には打設口が型枠内部に突出し、当該打設口の打込み完了を検知すると、回転して型枠表面で接続口の蓋が閉まる。それと同時に、次の打設口への配管ルートが形成される構造となっている。これらにより、次の打設口への切替を容易かつ即座に完了させることができる。さらに、打設完了した打設口への配管ルート内に残留するコンクリートの発生を防ぎ、打設中における人力による回収や配管清掃が不要となる。また、回転式打設口からの打込みは、吹上げとすることで、自由落下を防ぎ、品質確保にも配慮した。

(2) 型枠バイブレータの完全自動制御装置

高流動覆工コンクリートは、締固めが不要であるものの、天端部の美観向上を目的として、事前に面板に取り付けた型枠バイブレータを使用している。その型枠バイブレータの稼働においても人による操作をなくすために、型枠バイブレータの完全自動制御装置を実装している。本装置は、後述する打設制御装置の表示画面内で稼働のタイミングや振動時間をパターン化して設定することで、コンクリートの打上がり高さに応じて自動で型枠バイブレータを稼働させることができる。

(3) 打設制御装置

高流動覆工コンクリートは普通コンクリートに比べて流動性が高く型枠に作用する圧力が大きくなるため、左右の打上がり高さを均等にして打ち

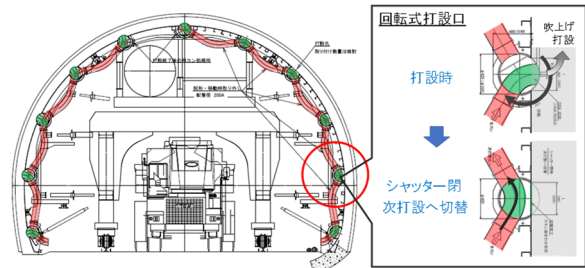
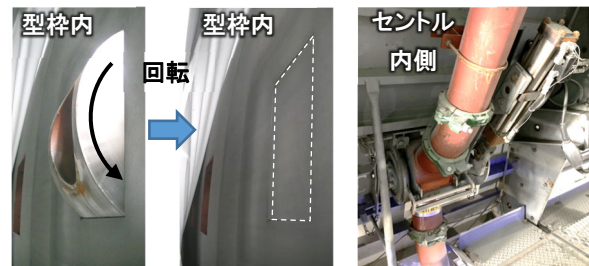


図-3 新しい打設配管装置



a) 打設中 b) 打設完了 c) 装置全景
写真-1 回転式打設口

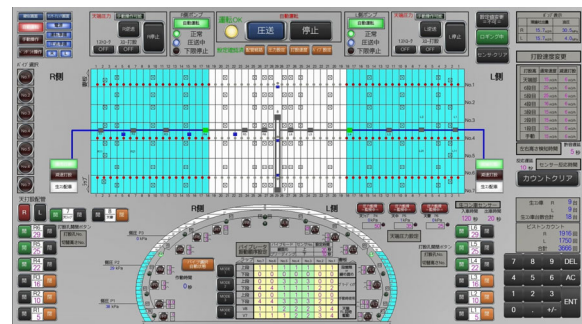


図-4 打設制御装置のシステム画面

込むことが重要な管理項目となる。そこで、型枠表面に設置した複数の高さ検知センサでコンクリートの打上がり高さを検知し、図-4 に示すようなシステム画面で打設状況を見える化しつつ、各ポンプの吐出量を自動で調整し、左右の打上がり高さを制御することができる装置を実装している。なお、システム画面には、トンネル覆工断面と移動式型枠の展開図を表示させており打設口の切替えタイミング、打設速度および天端圧力制御値を入力して打設を開始すると自動で打設が進捗し打設完了箇所を順次青色に表示することができる。

また、本装置は、打設履歴データを記憶媒体に自動で記録し、打設状況の画面をネットワークで配信することができる。これにより、CIM との連携、遠隔地での打設監視や遠隔臨場が可能で、覆工コンクリートの仕上がり改善活動等にも活用できる。

3. 要素技術の開発経緯

本章では、前述の高流動覆工コンクリートと全

自動打設システムの各種要素技術を開発するにあたり解決した技術的課題やその解決経緯について紹介する。

3.1 高流動覆工コンクリートの技術

高流動覆工コンクリートの技術的課題は、前述の覆工特有の施工条件を踏まえた配合設計技術⁵⁾⁶⁾に加え、所定の流動性を確保した上で、ひび割れや局所的な強度低下などの原因となるブリーディングや材料分離を抑制すること、可使用時間の確保と所定の強度発現性を両立することであった。そこで、これらを実現するため、新しい混和剤の開発を開始した。室内試し練りから覆工側壁を模擬した打込み実験を行い、改良を重ねることで、新規の増粘剤含有高性能 AE 減水剤⁴⁾の開発に至った。

3.2 各種装置

(1) 新しい打設配管装置（回転式打設口）

新しい打設配管装置の技術的課題は、打設口を切り替えるごとに配管の取外しから配管内に残ったコンクリートの廃棄を不要化することであった。移動式型枠のメーカーとブレンストーミングを行い、従来の打設配管を刷新させた図-3に示す新しい打設配管装置を考案し、要素毎に問題点を洗い出し、検証しながら導入を図った。

まずは、考案した装置の主要部材である回転式打設口の試設計から製作を行い、稼働を確認するために簡易実験を実施し、必要となる油圧ジャッキの仕様や回転部分のクリアランスを確認しつつ改良を行った。次に、移動式型枠と一体化した回転式打設口による装置仕様および美観向上が図れるような打込み方法の検討などを行うために写真-2に示すような高さ4.25m、覆工厚0.3m、延長5.5mの覆工側壁を模擬した中規模の打込み実験を8回、写真-3に示すトンネル断面が内空幅10m、内空高8m、覆工厚0.3m、1BLの延長10.5mとなる実規模の打込み実験³⁾を4回実施する過程で、回転式打設口を3cm吐出するような形とし、コンクリートの吹上げ高さを1m程度に抑えることで美観向上が図れること、回転式打設口の内部に残存したコンクリートの固着が稼働の問題になることが明らかになった。これは、打込み実験で用いた回転式打設口が写真-4に示すように完全クローズタイプで装置が鋼板同士で溶接加工され一部のみボルトで密閉されており、容易に清掃といったメンテナンスが行えなかったことが原因であった。そこで、回転式打設口の清掃をやすくするために写真-5に示すような開閉式とし、装置のクリアランスにペーストが漏れて固着しないように給脂配管の増設を行うといった改良を行った。また、玉送り清掃時に型枠内へのエアブローアウトが懸念されたので、シール性能試験も実施して1MPa以上の気密性が確保されていることを確認した。それらの改良は、

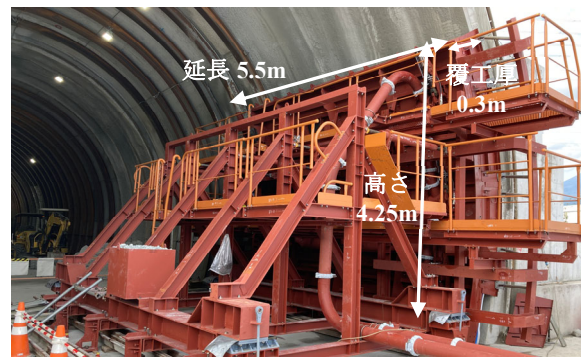


写真-2 中規模の打込み実験

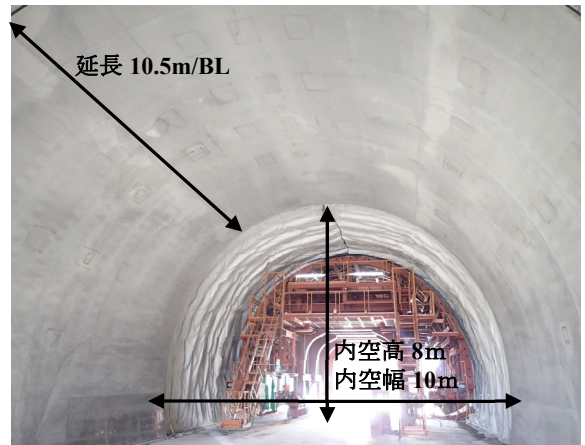


写真-3 実規模の打込み実験

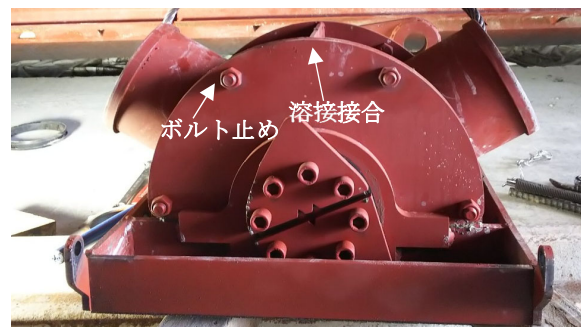


写真-4 回転式打設口の構造



写真-5 改良版の回転式打設口

最終の実規模の打込み実験に導入し、実現性を確認した。その後、回転式打設口の回転部の稼働に対する耐久性試験を実施した結果、実施工より厳し

表-1 高流動覆工コンクリートの配合

種類	SF (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)					PP Vol. %
						W	C	S	G	VSP	
高流動覆工 コンクリート	600±50	4.5	41.7	50.0	323	175	420	836	872	6.30	0.3

W:地下水, C:普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm³, S:砕砂・海砂の混合砂 表乾密度 2.58g/cm³, G:砕石 2005 表乾密度 2.66g/cm³, VSP:特殊高性能 AE 減水剤, PP:ポリプロピレン繊維 密度 0.91 g/cm³ 繊維長 47mm, SF:スランプフロー

い条件となるコンクリートが満管の状態では 454 回稼働させることで、回転部と面板が接触する部分で面板がめくり上がり、回転軸の部材が曲がる現象が生じた。1 回の打設で 2 回稼働させるものとして、227 回の打設分となり、スパン長 10.5m とすると、耐久打設施工距離として 2km 相当が確認できた。さらなる性能向上を目指して、油圧ジャッキを適切なものに変えるとともに、回転部と面板との離隔を大きく調整した。さらには回転時の負荷を小さくするために、回転軸をボールベアリング機構とし、油圧ジャッキの稼働時の反力を受ける構造の改良を行った。

(2) 型枠バイブレータの完全自動制御装置

高流動覆工コンクリートは締固め不要であるため、コンクリートを締め固める目的での型枠バイブレータは不要であったものの、実規模の打込み実験を行う中で、天端部の美観向上策が必要であった。そこで、型枠バイブレータを用いることとし、その自動制御装置の開発を行った。

(3) 打設制御装置

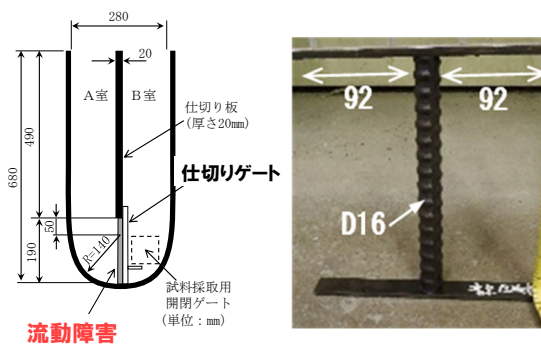
実規模の打込み実験では、コンクリートポンプ 1 台までを新しい打設配管装置および各種センサを連携して自動制御するものであった。打設制御装置の技術的課題は、コンクリートポンプ 2 台の同時制御機能の構築であり、これにより大断面トンネルへの適用および高速かつ大量打設を図る必要があった。その他、コンクリートポンプにレーザ検知計を取り付け、それによるトラックミキサの台数管理機能、型枠バイブレータの完全自動制御装置の設定機能を付与する形で各種実験的検討を進めることで完成に至った。

4. 開発成果と実績

4.1 適用現場の概要

新名神高速道路宇治田原トンネル西工事に全自動打設システムを導入した。導入現場は、3車線道路の大断面トンネル(内空幅約15m, 内空高約9m)である。施工開始時から中流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムによる施工を行っており、スランプ15cm程度のコンクリートを人力で打ち込み、締固めを行う従来工法と比べ、生産性の向上が確認されていた。

道路トンネルでは、非常用電話機などを設置するスペースとして、トンネル延長50~200mごとに



a) U 形容器 b) 流動障害 (障害 R2.75)
図-5 充填装置の形状および流動障害

箱抜きを設ける必要があり、本トンネルにも、大型の箱抜きが存在する。箱抜き箇所では、中流動覆工コンクリートは棒状バイブレータによる人力での締固めや型枠バイブレータの手動操作が必要であった。そこで、更なる生産性向上策として、箱抜き箇所の締固め作業を不要とするため、高流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムを適用した。

4.2 高流動覆工コンクリートの配合

表-1 に高流動覆工コンクリートの配合を示す。高流動覆工コンクリートは、剥落防止を目的とした繊維(ポリプロピレン製、長さ47mm)を混入する仕様であり、繊維混入後の目標スランプフローを 600±50mm、空気量を 4.5±1.5%とした。その配合は、土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」⁸⁾を参考にすると、繊維に対する材料分離抵抗性を確保するうえでも、単位セメント量が 450kg/m³以上になることが想定された。しかし、前述した覆工コンクリートの施工条件に適するように開発した増粘剤含有高性能 AE 減水剤によって想定よりも 30 kg/m³少ない 420kg/m³で材料分離抵抗性を確保することができた。自己充填性のランクの設定は、高流動コンクリートの配合設計・施工指針に則った場合、本工事の覆工厚 500mm、単鉄筋(主筋 D19@300mm, 配力筋 D16@200mm)の条件から、ランク 3 に相当する。これは、図-5 a) に示す U 形容器を用いた高流動コンクリートの充填試験方法(案)では流動障害なしでの評価となる。ただし、繊維を混入することから、鉄筋と繊維の干渉による充填性の低下に対して、安全側の評価を行うため、本トンネルの配筋条件を模擬した新た

な充填性の指標である鉄筋あき 92mm のランク 2.75 を考案し、図-5 b) に示す障害 R2.75 を配した U 形容器を用いた高流動コンクリートの充填試験方法(案)で評価するものとした。

4.3 施工実績

(1) 施工方法

一般的な覆工コンクリートの打込み実績である時間当りの打上がり速度 1.5~2.0m/h 程度となるように、打込み速度は、ポンプ 1 台あたり 15~25m³/h に設定した。また、高流動覆工コンクリートは締固めが不要であるものの、天端の美観向上を目的として、予め天端の型枠にトンネル軸方向 1.5m、周方向 1m 程度の間隔で全 28 台設置した型枠パイプレータを、打込み完了後に自動制御で合計 20 秒間稼働させた。

(2) フレッシュコンクリートの品質

高流動覆工コンクリートのスランプフローおよび空気量は、安定しており、全てのコンクリートが目標とするフレッシュ性状に対する管理範囲内であった。

写真-6 に高流動覆工コンクリートの充填状況を示す。材料分離することなく妻板まで流動し、人力による流動補助を一切必要とせず隅々までほぼ水平に充填されていく状況が確認された。

図-6 に覆工コンクリートの側圧を示す。高流動覆工コンクリートの側圧実績に加え、比較として、同材料で製造した中流動覆工コンクリートの側圧を青色、トンネルの内空高さ 9m における中流動覆工コンクリートの施工実績における液圧を破線で示した。いずれも打上がり開始から 1 時間程度までは液圧になっているものの、2 時間以降の時点では液圧以下に減少した。しかし、中流動覆工コンクリートの側圧は、変動が大きく、瞬間的に液圧相当に上昇する時点が存在している。これは、型枠パイプレータの稼働等により、中流動覆工コンクリートが瞬間的に液状化しているためと考えられる。一方、高流動覆工コンクリートは、変動が小さく最大 68 kPa (約 3m 相当の自重) と想定より小さい結果であった。これは、型枠パイプレータによる振動を与えないことが影響したものと考えられる。

(3) 硬化コンクリートの品質

写真-7 に高流動覆工コンクリートの仕上がりを示す。全区画において、SL 下部に発生しやすい表面気泡や天端部に発生しやすいコンクリートの流動跡などは少なく綺麗な仕上がりととなった。表面気泡の減少は、吹上げ打設を行ったことで、打込み時のエントラップトエアが低減されるとともに、できる限り連続的に打込んでいることの効果によるものと考えられた。また、天端部の流動跡の低減は、天端部全面が平坦に打ち上がるため、吹上げ口の圧力が上がらず分離しにくくなったためと考え

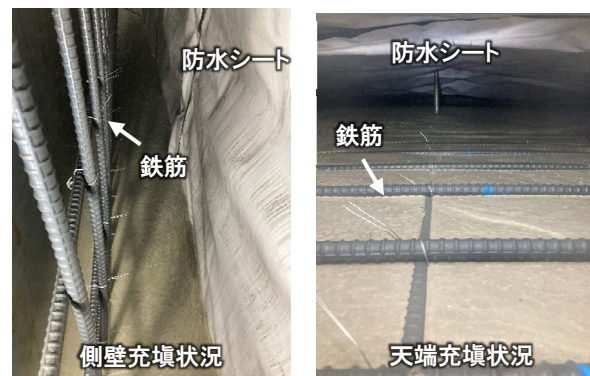


写真-6 高流動覆工コンクリートの充填状況

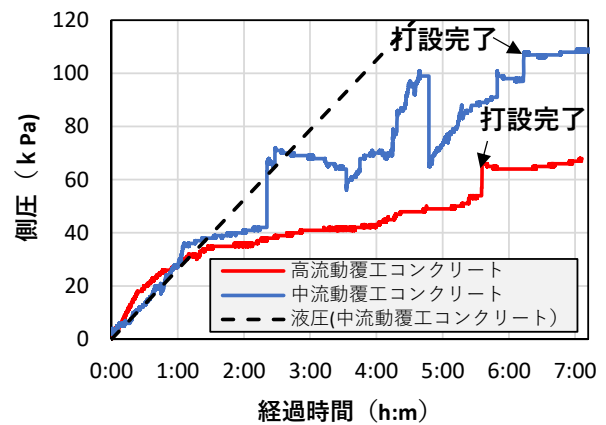


図-6 覆工コンクリートの側圧



写真-7 高流動覆工コンクリートの仕上がり

られる。

写真-8 に箱抜き箇所を示す。高流動覆工コンクリートと全自動打設システムを用いることで、締固め作業を行わずに自動で隅々まで充填されることが確認された。この仕上がりは、中流動覆工コンクリートを用いて棒状パイプレータを使った人力による締固めを行った場合と同等以上であることを確認した。

(4) 生産性向上効果

図-7 に歩掛りの比較を示す。従来工法では、ポンプ操作員 2 人、締固め作業を主とする打設作業員が 4 人、妻枠監視・清掃として 2 人、配管清掃に 1 人の

合計9人必要であることが想定された。一方、全自動打設システムでは、ポンプ操作員および打設作業員が0人、妻枠監視2人で、全自動打設システムの制御盤操作が1人、打設完了後の配管清掃が1人の合計4人に低減できることが分かった。特に、狭隘な作業環境下での人力作業を完全に排除でき省力化および省人化を実現できた。それに加え、回転式打設口によって即座に打設口を切り替えることができたことなどで従来工法に比べ打設時間を2時間短縮できた。その他、打設履歴は記憶媒体に記録されるため、脱型後の表面の仕上がりとの関連付け、現場での覆工コンクリートの品質向上に向けたPDCA活動を容易にした。さらに、写真-9に示すイメージで打設状況をネットワーク配信しており、遠隔地での打設監視としても活用している。これらのことから、本全自動打設システムの有効性を確認できた。

5. おわりに

高流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムを開発し実現場に初導入した。実現場への導入前に数多くの実験的検討を繰り返すことで多く課題を事前に抽出し改善を図ることで、全ての装置がトラブルなく順調に稼働することができ、省人化、省力化および施工時間の短縮による生産性向上を図ることができた。深刻化している技能者不足への対応や働き方改革の残業規制に関する法律にも対応できるほか、人の手をかけずに1日の打設量を増やすことが可能となるため、1ブロック割りのスパン長を長くすることで覆工工事の工程短縮を図ることもできる。今後、他のトンネル工事においても高流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムの導入を推進し、さらなる合理化施工を検証していく。

[謝辞] 岐阜工業株式会社の方々には、本開発に関して、多大なご協力を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堂山修治, 竹下正一, 堤 英彰, 城澤道正:i-Construction (建設現場の生産性革命)の推進と建設現場の安全性の向上に向けて, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.73, No.2, I_1-I_6, 2017.
- 2) 株式会社高速道路総合技術研究所: NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ, 2011.
- 3) 松本修治, 手塚康成, 日野博之, 青柳隆浩: トンネル覆工コンクリートの自動打設システムの開発, 土木建設技術発表会 2020, II-11, 土木学会, 2020.
- 4) 作榮二郎, 亀島健太, 松本修治, 坂井吾郎: プリーディング低減成分を含有した増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用した覆工用高流動コンクリートの基本特性, 第 75 回年次学術講演会, V-434, 土木学会, 2020.
- 5) 小山広光, 大野誠彦, 西岡和則, 坂井吾郎, 松本修治: 凝結促進剤を添加した中流動および高流動覆工コンクリートの各種性状について, 土木学会 第 70 回年次学術講演会, VI-640, 土木学会, 2015
- 6) 松本修治, 坂井吾郎, 林大介, 坂田昇: 締固めを必要としないトンネル二次覆工コンクリートに関する基礎的検討, VI-649, 土木学会, 2015
- 7) 松本修治, 佐藤崇洋, 北村義宜, 坂井吾郎: 覆工用高流動コンクリートの実施工における移動式型枠の発生応力および作用する側圧を含む各種検証結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1185~1190, 2018
- 8) 土木学会:高流動コンクリートの配合設計・施工指針, 2012.6.



写真-8 箱抜き箇所の充填状態

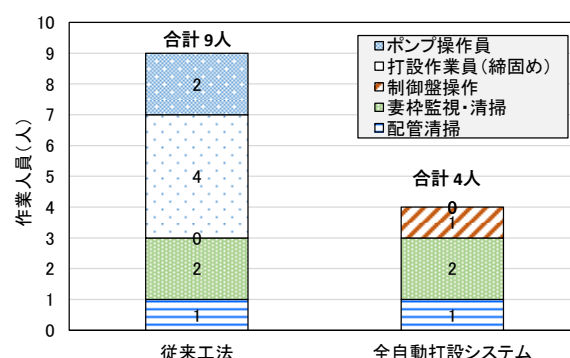


図-7 歩掛比較

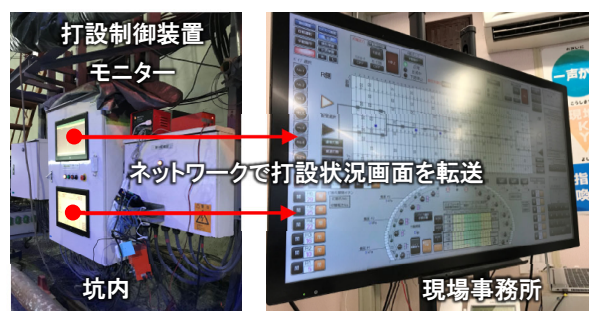


写真-9 打設状況のネットワーク配信