

自己充填コンクリートを用いた覆工の自動化に関する研究（その6）

－低炭素型自己充填コンクリートを採用したトンネル覆工の圧入施工－

Development of automated lining construction using self-compacting concrete (Part 6)
-Press-in construction of tunnel lining using low-carbon self-compacting concrete-

キーワード

覆工、自己充填コンクリート、省力化、フライアッシュ、低炭素

藤原 正佑*, 小山 広光*, 中谷 幸一*, 北川 真也*
飯塚 建**, 小橋 和周***, 逸見 真也****

研究概要

自己充填コンクリートをスライドセントル下端から圧入して覆工を構築する施工において、フライアッシュを使用した低炭素型自己充填コンクリートを道路トンネルの覆工一般部の全線に適用した。これまで、配管切替えは手動による操作が必要であったため、打込み高さの管理に作業員を専属させが必要といった課題を残していたが、セントルに設置したセンサとポンプを連動させコンクリートの吐出量を自動制御する装置を導入することで、打上がり高さの管理を自動化し、従来工法と比べ打込み時間を約37%短縮、作業人員が3名（約50%の削減）となり、本工法が生産性向上に大きく寄与することを確認した。

1 はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートは、スランプ15cm程度のコンクリートを使用し、スライドセントル（以下、セントル）側部の作業窓から打込みおよび締固めを行い、配管を順次覆工上部へ切り替え、コンクリートを充填させる施工が行われている。狭隘な空間での作業となるため、作業員の負担が大きくなることや、作業の多くが作業員の技能や経験に頼らざるを得ない状況となっている。

このような背景から、筆者らは、覆工施工の省力化、省人化および品質確保を目的とし、自己充填コンクリートをセントル下端部から圧入してトンネル覆工を構築する「自己充填覆工構築システム」（以下、本システム）の開発¹⁾を進めてきた。本システムを実工事の一部区間に適用²⁾しており、省力化や品質確保に加え作業環境の改善が可能であることを確認している。しかし、装置の手動操作による配管切替えが必要なため、打込み高さの管理に固定の作業員を要するといった課題を残しており施工性の観点から改善の余地を残しているといえる。

一方で、近年各分野で環境負荷低減への取組みとしてCO₂排出量削減が進められている。自己充填コンクリートは、高い充填性能を確保するために多量の結合材を必要とするため、結合材をセメント単味とした場合は一般的なコンクリートよりも製造時のCO₂排出量が増大する。そこで、結合材の一部をCO₂排出量の低いフライアッシュに置き換える一般的なコンクリート配合と同程度のCO₂排出量と

なる低炭素型自己充填コンクリートの適用を検討した。現場適用に際し、壁状型枠にコンクリートを圧入する実験³⁾を事前に実施し、フライアッシュの利用が環境負荷低減だけでなく、材料分離抵抗性の向上に寄与することを確認した。

本稿では、前述した本システムの施工性の課題を改善し、低炭素型自己充填コンクリートを「令和4年度俵山・豊田道路第1トンネル工事（以下、俵山第1トンネル）」に適用し、省力化、省人化および環境負荷低減を図った成果について報告する。

2 俵山第1トンネルへの適用

2.1 工事概要

本工事は、国土交通省中国地方整備局の山陰道事業のうち俵山・豊田道路のトンネル工事である。当該区間は、急なカーブや坂道が連続しており、大雨による交通規制や土砂災害が発生する可能性が高い箇所が集中している。こうした災害や事故による通行止めが長時間発生した場合、大幅な迂回が発生している状況であり、さらに一部区間では孤立する危険性がある。このような背景から、俵山・豊田道路の整備は、災害時の代替道路の確保、交通の円滑化を図る事業となっている。

表-1にトンネル概要を、図-1に工事区間平面図を示す。トンネル延長は278.0m、内空断面積が88.7m²となっており

* 技術センター 土木研究部, **土木事業本部 土木設計部, *** 大阪支店, **** デジタル推進部

表-1 トンネル概要

工事名	令和4年度俵山・豊田道路第1トンネル工事
工事箇所	山口県長門市俵山市内
発注者	国土交通省 中国地方整備局
施工者	佐藤工業株式会社
工事内容	トンネル延長：278.0m, 内空断面：88.7m ² 0.8%（上り）
覆工厚	DI : 400mm, DIII : 450mm
インバート厚	DI : 500mm, DIII : 500mm



出典：中国地方整備局山陰道HPより（一部加筆）

図-1 工事区間平面図

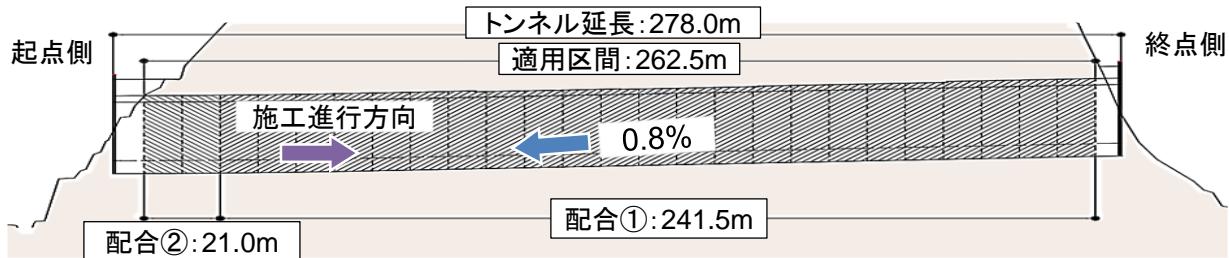


図-2 適用区間と配合区分

表-2 コンクリートの配合

配合名	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)									
					W	C	FA	S1	S2	G1	G2	SP	AE1	AE2
①	20	58.9	49.9	4.5	165	280	130	425	424	601	257	3.08	0	6.15
②	20	55.0	50.1	4.5	165	300	110	427	427	601	257	3.08	0	2.87
21-15-20 BB	20	62.5	48.4	4.5	172	273	0	451	451	564	285	0	1.91	0

大断面に分類される。本工事では、27BLのうち、坑門工を除く本体一般部(25BL×10.5m/BL=262.5m)において本システムを適用した。

2.2 低炭素型自己充填コンクリート

図-2に適用区間における配合区分を、表-2に使用したコンクリートの配合と一般的な覆工の配合である21-15-20BBを示す。特記仕様書では、呼び強度、セメントの種類、W/Cの上限値、単位セメント量の下限値が定められていた。配合①で呼び強度18N/mm²、高炉セメントB種、W/C=60%以下、単位セメント量270kg/m³以上、配合②で呼び強度24N/mm²、高炉セメントB種と設定されていたため、各仕様を満たす配合①、②の2種類の配合を設定した。フライアッシュの単位量は圧入実験を参考に、配合①については130kg/m³、配合②においては110kg/m³とした。スランプフローは、いずれの配合も60±10cmを目標値とした。配合②に関しては、使用区間において鋼材の最小あきが200mm以下となることから、自己充填性ランクを2とした。配合①に関しては、無筋もしくは鋼材量が少ない箇所での使用となることから、自己充填性ランク3を目標値に設定した。写真-1に試験練り時の低炭素型自己充填コンクリートの性状



写真-1 低炭素型自己充填コンクリートの性状

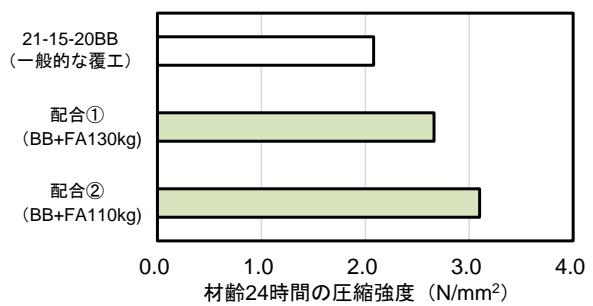


図-3 材齢24時間の圧縮強度

状を示す。山岳トンネル覆工は通常、打込み→翌日に型枠の取外し（約12時間～20時間後）⁴⁾、セントルの設置→翌日に打込みのサイクルで施工を進める。そのため、型枠取外し時の強度不足が施工サイクルの遅延の要因となる。一般に、覆工コンクリートの脱型時に必要な圧縮強度は2～3N/mm²が目安とされている⁵⁾。図-3に各配合の24時間後の圧縮強度を示す。図より、配合①、②いずれにおいても所定の圧縮強度を満足しており、また、一般的な覆工の配合（21-15-20 BB）と同等以上の強度を発現していることを確認した。

図-4に既往の文献⁶⁾を参考に算出した各配合のCO₂排出量を示す。図より、高炉セメントB種を単味で使用した自己充填コンクリートと比較し、配合①、②ともにCO₂排出量が約25%削減され、一般的な覆工配合と同程度のCO₂排出量となった。

2.3 スライドセントルおよび打込み方法

図-5にセントルを示す。一般に自己充填コンクリートは流動性が高く、凝結時間が長い特徴を有しており、打込み後、長時間にわたり側圧が減少しにくい。そのため、打込み後に型枠に作用する側圧は、液圧と同等になることを前提として、型枠設計を行う必要がある。今回使用したセントルでは、セントルの補強材となる胴梁を路盤上に設置し、上部に桟橋を設けることによって、セントル内部を車両等が通行できるようにした（図-5（a））。このセントルの使用により、覆工施工箇所より前方（終点側）においては鉄筋の組立、防水シートの敷設作業が行われており、日々資機材の搬入出があったが、これらの作業に影響をすることなく施工を進めることができた。また、セントル型枠面に充填感知センサを105個、圧力センサを27個設置し（図-5（b）），これらのセンサから採取したデータを施工時にセントル内に設置したモニターやタブレット端末からモニタリングできる仕様とした。

図-6に配管平面図を示す。使用する配管は6Bとし、圧入口を片側2箇所、計4箇所から圧入する計画とした。各圧入口の手前にはピンバルブ（片側2箇所、計4箇所）、分岐管の直後にシャッターバルブ（片側1箇所、計2箇所）を設置した。分岐管後のつま側圧入口へ向かう配管の水平換算距離をラップ側圧入口へ向かう配管よりも大きく（約3.4倍）することで、ラップ側圧入口の吐出量がつま側圧入口よりも卓越するようにした。また、これまででは作業員が左右の打上がり高さに応じ、配管切替え装置を手動で操作し圧入する箇所を左右に切り替えていた。しかし、この方法では配管切替え装置を操作する作業員が作業全般にわたり拘束される。そこで、左右に1台ずつ配置したコンクリートポンプ（最大吐出量60 m³/hr）と充填感知センサを連動させ、コンクリートの吐出量を自動制御する装置を導入した。左右の打上がり高さに差が生じた場合は、打上がり高さが高い方のポンプの吐出量をあらかじめ設定した吐出量まで減少する。左右の差が解消されると減少していた側の吐出量を正規に戻す制御を行うことで左右の打上がり高さが

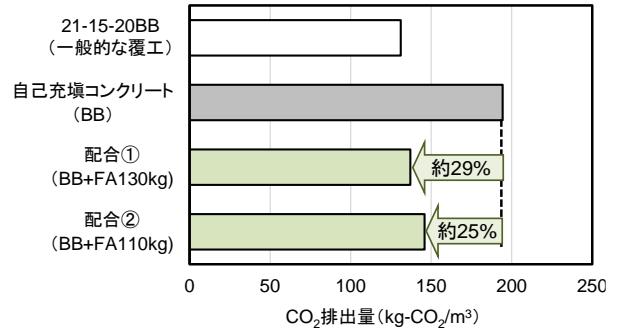
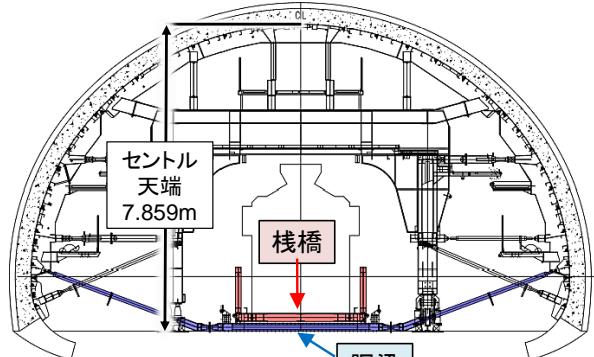
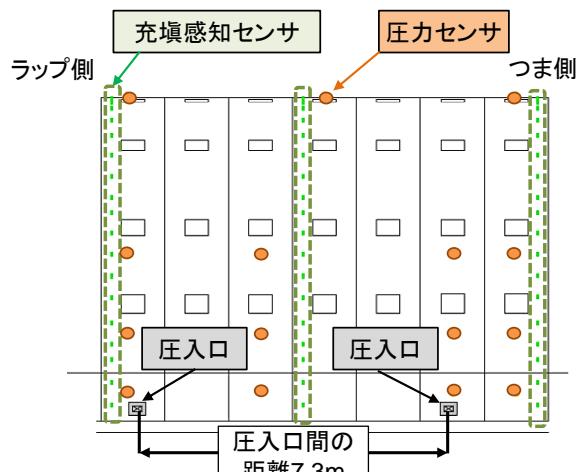


図-4 CO₂排出量の比較



（a）正面図



（b）側面図

図-5 使用したセントル

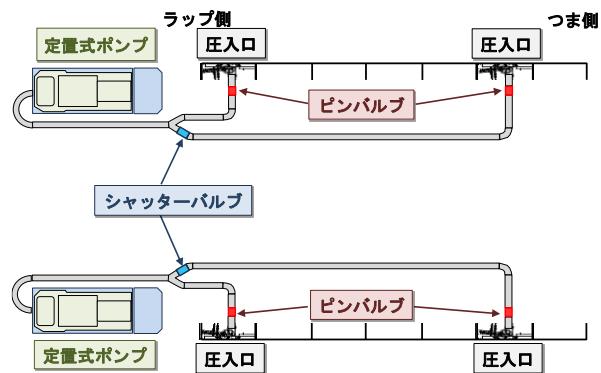


図-6 配管計画平面図

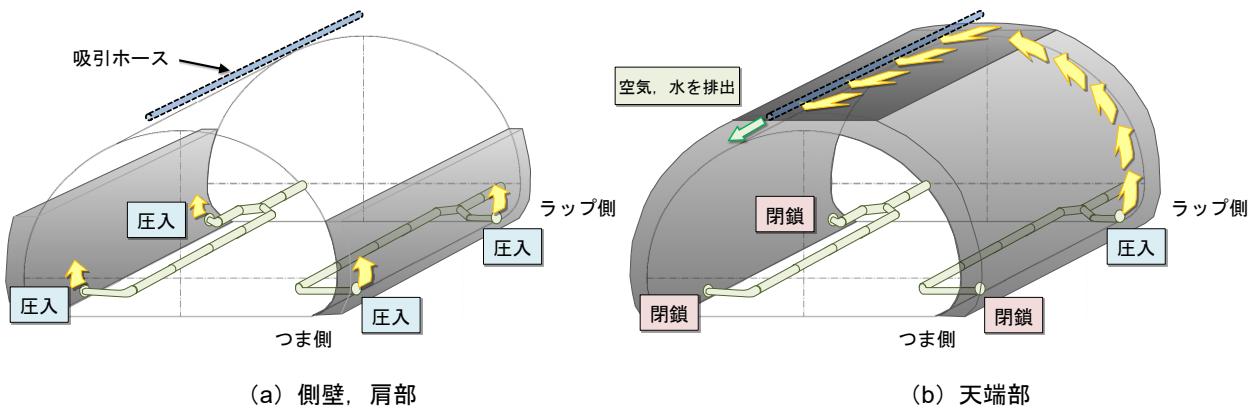


図-7 打込み方法

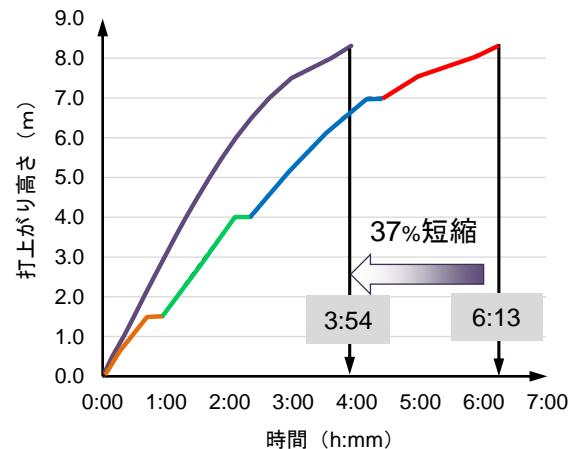
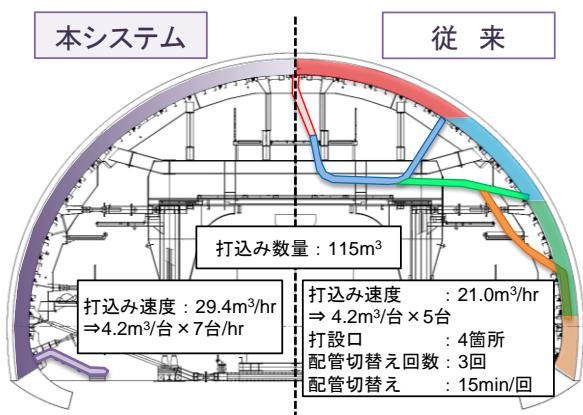


図-8 打込み時間の比較

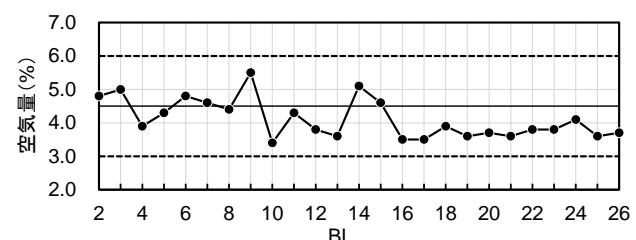
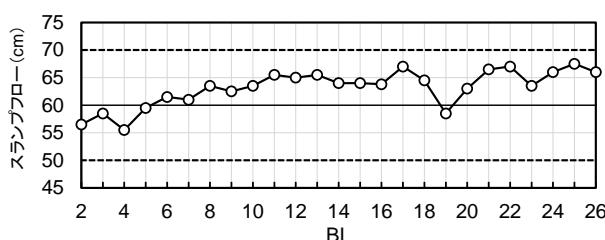


図-9 受入れ検査の結果

均等になるように打上がり速度の調整を自動で行う。この装置により、これまで手動でおこなっていた打上がり高さの管理を自動化し、さらなる施工の省力化を試みた。

図-7に打込み方法を示す。基本的に、4つの圧入口をすべて使用して打込みを行った。2台のコンクリートポンプから左右の打上がり高さが同程度となるよう制御を行いながら、左右同時に自動圧送した(図-7(a))。天端の感知センサまでコンクリートが到達すると同時に、自動圧送を停止後、手動操作による圧送で天端部の打込みを行った。筆者らは既報りにおいて、片側ラップ側の圧入口のみで圧入することで、後から圧入されたコンクリートが、先に圧入されたコンクリートをかき分けながら天端部へ到達し、ラップ側からつま側へ充填されることを確認している。本工事においても同様に、天端部の打込みにおいては、片側ラップ側の圧入口のみで圧入しラップ側からつま

側へ充填されるように打ち込んだ(図-7(b))。充填状況は、防水シート面に設けた充填感知センサと、セントル天端に設置した圧力センサの値で確認した。ラップ側における未充填箇所の発生を防止するため、防水シート面に配置した吸引ホースにより、つま側へ排気、排水しながら天端部へのコンクリートの圧入を行った。

本システムにおいては、前述したように、セントルに作用する設計側圧を液圧としている。そのため、打上がり速度に制限なくコンクリートの供給速度を上げることができる。そこで、アジャーテータ車の1時間当たりの配車台数を従来工法よりも2台増加した、1時間当たり7台の予定とすることで、打込み時間の短縮を図った。さらに、上部への配管切替え作業がなく、連続的に打ち込むことができるため、これらの作業を省略した分をそのまま打込み時間の短縮に反映させることができた。図-8に従来工法との打込み

時間の比較を示す。なお、図に示す従来工法の打込み時間はポンプ1台における試算結果である。本システムの導入により、打込み時間が約4時間程度となり、従来工法よりも約37%の短縮を見込んだ。

3 適用結果

3.1 受入れ検査

図-9に各BLの受入れ検査の結果を示す。検査の頻度は1日1回とした。図より、スランプフロー、空気量、いずれの項目においても受入れ検査を問題なく合格する結果となった。検査対象としたもの以外のコンクリートも良好な性状を示していることが目視でも確認でき、施工中、コンクリートの性状に起因するようなトラブルは発生しなかった。

3.2 打込み時間

コンクリートの打込みに要した時間は、平均で4時間14分、打込み数量は平均で123m³であった。どのBLにおいても約4時間前後で打込みが完了し、おおむね計画通りの打込み時間となった。

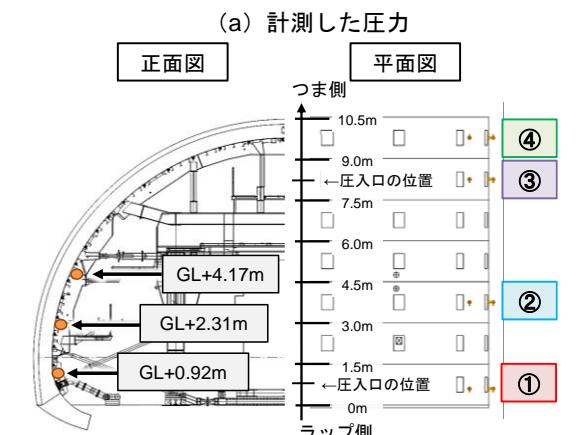
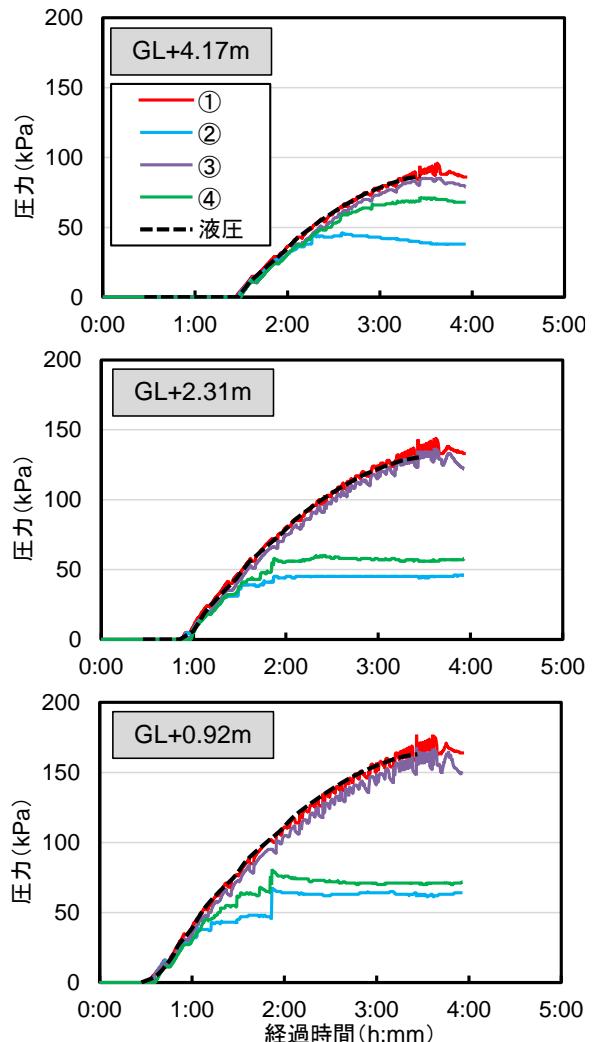
3.3 充填状況

側壁および肩部は充填感知センサによって、天端部は充填感知センサの反応と圧力値によって充填状況を確認することにより、偏圧や未充填箇所を発生させることなくコンクリートを充填することができた。

図-10に圧力の測定値の一例を示す。図よりいずれの圧力センサにおいても、打込み後2時間程度までは液圧に相当する圧力が作用した。その後、圧入口と同じ位置の圧力センサは打込み終了まで液圧に相当する圧力が作用し続け、それ以外の箇所においては、打込み後2時間に示した圧力で頭打ちとなった。これは、圧入口から常に新しいコンクリートが打ち込まれ型枠内に充填され、圧入口付近以外のコンクリートは充填された状態から流動せずに自立したと考えられる。これまで、全断面に液圧相当の圧力が作用することを前提にセントル設計を行ってきたが、得られた圧力分布を精査し、型枠設計を合理化することで、セントルの低廉化が期待できる。

3.4 作業人員

図-11にコンクリートの作業状況を示す。従来工法では、作業員5~6名程度で打込み作業を行うが、バイブレータによる締固め作業や配管切替え作業が不要なため、タブレットによる充填状況確認、監視員の1名（職長）と、つま型枠での打込み状況確認、監視員2名の計3名となり、作業人員を約50%削減することができた。さらに、コンクリート吐出量の自動制御により、さらなる省力化を図ることが可能となった。



(a) 計測した圧力



(b) 圧力の計測位置の凡例

図-10 圧力の一例



図-11 作業状況



(a) 全景



(b) 箱抜き部

写真-2 覆工の出来映え

3.5 硬化後の覆工の出来映え

写真-2に覆工の出来映えを示す。硬化後の覆工表面にコンクリートの流動跡がやや残るもの、側壁部の表面気泡の発生は少なかった(写真-2(a))。これまで筆者が行ってきた施工実験の結果と同様に良好な出来映えを呈しており、フライアッシュを混和材として利用することによる外観への影響は認められなかった。箱抜きの箇所においても未充填箇所や表面気泡は確認されず、良好な出来映えであった(写真-2(b))。

図-12に表層透気係数(トレント法)の測定結果を示す。測定箇所は、起点側を向かって左側のSL付近の3箇所とし、3BL(材齢125日、表面含水率:ラップ側から4.9%、3.0%，4.9%)、5BL(材齢119日、表面含水率:ラップ側から5.0%，5.1%，4.7%)、12BL(材齢83日、表面含水率:ラップ側から4.9%，4.9%，5.1%)で測定を行った。図より、3BL、5BL、12BLのいずれにおいても表層透気係数のグレード^④は「一般」、もしくは「良」の範囲内におさまっており、本システムで構築された覆工の表層品質が、配合に関わらず均質な結果となっていることが確認できた。

4 おわりに

俵山第1トンネルにおいて、「自己充填覆工構築システム」の改良と低炭素型自己充填コンクリートの適用を行った。その結果、棧橋の採用、感知センサとポンプを連動させ、吐出量を自動で制御するシステムを導入したことにより、省人化、省力化を図ることができた。また、セメントを一部フライアッシュに置換した低炭素型自己充填コンクリートを採用したことにより、従来工法の配合と同程度のCO₂排出量に抑えつつ、生産性向上を同時に達成することができた。

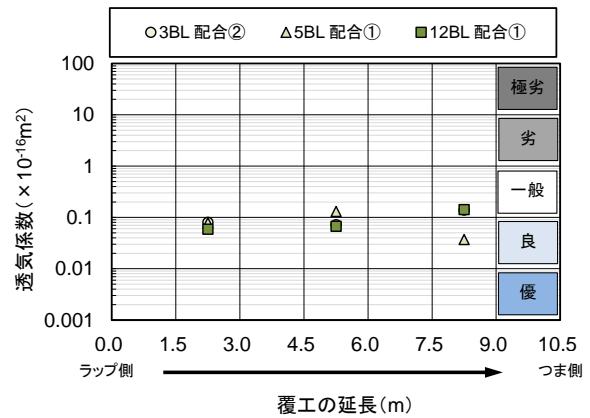


図-12 表層透気係数の測定結果

参考文献

- 1) 弘光太郎, 藤原正佑, 小山広光, 小野知義:自己充填コンクリートの圧入によるトンネル覆工構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp334-339, 2023.7
- 2) 村松賢一, 加藤公章, 小山広光, 濑谷正巳:セントル下端からのコンクリート圧入により覆工施工の省力化を実現—国道418号足瀬トンネル—, トンネルと地下, Vol.54, No.9, pp751-757, 2023.9
- 3) 市川晃, 弘光太郎, 橋本紳一郎, 小山広光:型枠内に圧入される自己充填コンクリートの均質性におよぼす配合要因の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp481-486, 2024.7
- 4) 宇野洋志城, 京免継彦:覆工コンクリート脱型時期判定システムの開発と導入, 建設の施工企画, pp57-61, 2011.11
- 5) 土木学会:2016年制定トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説, p193, 2016
- 6) 土木学会:コンクリートの環境負荷評価(その2), コンクリート技術シリーズ62, pp.39-40, 2004.9
- 7) 国土交通省中国地方整備局:コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(トンネル覆工コンクリート編), p107, 2023.3