

トンネル覆工コンクリート全自動打設システムの 施工実績

松本 修治・手塚 康成・坂井 吾郎

近年、建設業界における技能者不足の問題を解決するために、専門スキルのない新規入職者など、誰が施工に携わって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が求められている。本稿では、中流動覆工コンクリートおよび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実現現場に導入することで、狭隘な作業環境下での人力作業を完全に排除でき、打設時の人員を9名から4名に減少できるなど、省力化および省人化を実現した現場の施工実績を紹介する。

キーワード：全自動打設システム、中流動覆工コンクリート、高流動覆工コンクリート、トンネル、省人化、表層品質

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年から適用される時間外労働時間の上限規制など、現場が抱える課題も相まって、省人化、省力化などによる生産性の向上が強く求められている。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。このような背景の中、国土交通省では、i-Construction¹⁾を掲げ、建設業者をはじめ、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。

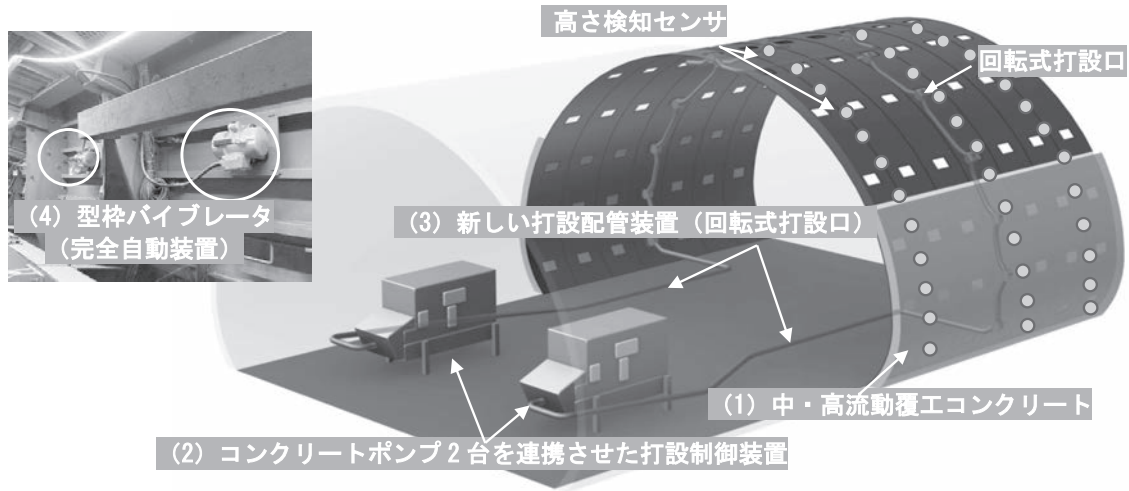
従来からトンネル覆工コンクリートの施工は、スランプ15cm程度のコンクリートを用い、移動式型枠内の狭隘な空間において入念な締め固めや配管の切替えを行うなど苦渋を伴う人力作業が多い。また、良好とは言いがたい作業環境の下、品質は技能者の技量に依存しており、品質不良を生じるリスクが高い。そのため、近年では、型枠面板に取り付けた型枠パイプレータのみで締め固めを行える中流動覆工コンクリート²⁾が普及している。筆者らは、型枠パイプレータの自動制御

装置を組み込んだ全自動打設システム^{3), 4)}を岐阜工業(株)、(株)シンテックと共同で開発し導入することで、人力作業を削減し、品質面、施工面において改善を図っている。しかしながら、型枠パイプレータの自動制御装置においても課題があり、コンクリートのフレッシュ性状に応じて型枠パイプレータの稼働を自動で制御することは困難であった。特に、スプリングライン(以降、SLと記す)下部、箱抜き箇所などの打込みにおいて、コンクリートの流動を補助する目的での複雑な稼働操作は困難であった。特に箱抜き部は、入念に締め固める必要があるが、型枠パイプレータのみでは、打設中において型枠のずれや浮き上がりが懸念されるため、棒状パイプレータによる人力での締め固め補助が必須となっている。そこで、筆者らは締め固めを不要とすることで、流動補助が必要のない高流動覆工コンクリート⁵⁾を用いた全自動打設システムを実現現場の一部区間に試験的に導入した。

本稿では、中流動覆工コンクリートおよび高流動覆工コンクリート(以降、中・高流動覆工コンクリートと記す)を用いた全自動打設システムの施工実績について紹介する。

2. 全自動打設システムの概要

本システムは、図1に示すような新しい打設配管装置と各種制御システムを備えた移動式型枠を用いて、中・高流動覆工コンクリートを、ポンプによる圧送から打設口の切替え、型枠パイプレータの操作まで



図一 1 トンネル覆工コンクリートの全自動打設システム

を自動制御しながら打ち込めるものである。以降に、各技術および装置について述べる。

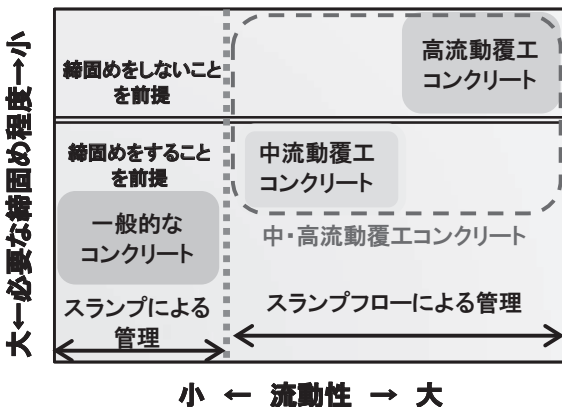
(1) 中・高流動覆工コンクリートの技術

図一2に中・高流動覆工コンクリートの位置づけを示す。中流動覆工コンクリートは軽微な締固めで充填でき、高流動覆工コンクリートは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。

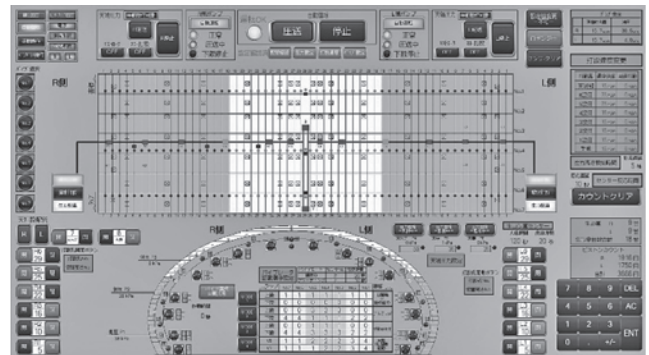
技術的課題は、所定の流動性を確保した上で、ブリーディングや材料分離を抑制すること、可使時間の確保と所定の早期強度発現を両立することである。これらを同時に実現するため、新規の増粘剤含有高性能 AE 減水剤⁶⁾を開発した。この混和剤を用いることで、ブリーディング量を一般的なスランプ 15 cm 程度の覆工コンクリートの半分程度にまで低減しつつ、中・高流動覆工コンクリートの適切なフレッシュ性状の確保が可能となる⁶⁾。また、一般的な覆工コンクリートと同様に、材齢 18 時間で脱型に必要な強度を確保できる⁶⁾。

(2) コンクリートポンプを 2 台連携させた打設制御装置

大断面トンネルの覆工においては、大量かつ高速打設に対応するため、コンクリートポンプ（以下、ポンプと記す）を左右に 1 台ずつ、計 2 台配置することが多い。一般的に中・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、図一3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開発した。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。また、各ポンプの吐出量と吐出圧もリアルタイムで表示されるため、ポンプの圧送管理も制御位置で、1 名が集中して管理できる。



図一 2 中・高流動覆工コンクリートの位置づけ



図一 3 打設制御装置のシステム画面

(3) 新しい打設配管装置 (回転式打設口)

従来は、別々の圧送配管が打設口に繋がっており、人力による配管切替えと配管内に残るコンクリートの廃棄および清掃が都度必要だった。今回開発した新しい打設配管装置 (図-4) は、それらを解決するもので、打設口および配管と移動式型枠とが一体になっており、回転式打設口 (写真-1) 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、前述した打設制御装置と連動しており、吹上げを基本とした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えが容易かつ即座に完了させることができる。また、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。

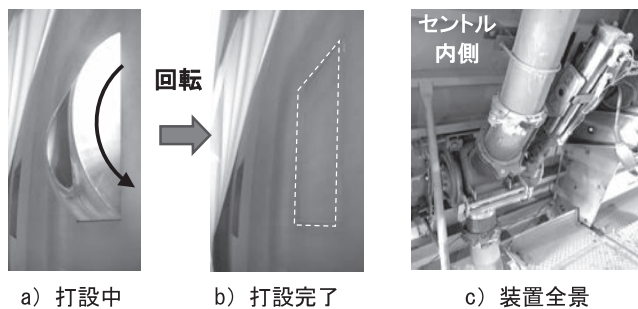


写真-1 回転式打設口

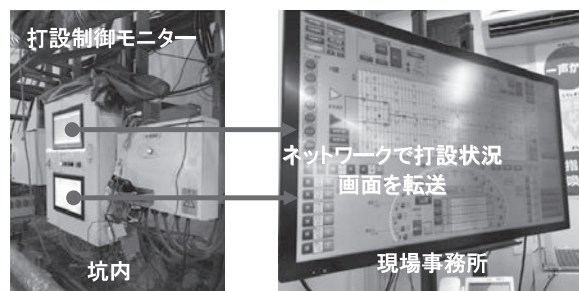


写真-2 打設状況の共有化

(4) 型枠バイブレータの完全自動制御装置

従来の中流動覆工コンクリートの締固めは、型枠バイブレータで行われ、その制御を人が操作盤を用いて手動で行っていた。そこで、型枠バイブレータを自動制御する装置を開発し、中流動覆工コンクリートにおけるSL下部や箱抜き箇所などの充填状況に応じた流動補助操作以外は、人による操作を不要とした。本装置は、稼働のタイミングや振動時間をパターン化して事前に設定することにより、前述の打設制御装置と連動して、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。

(5) データのロギングと情報の共有装置

打設履歴データを記憶媒体に自動で記録し、写真-2に示すイメージで、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装置である。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. 中・高流動覆工コンクリートでの施工実績

(1) 概要

新名神高速道路宇治田原トンネル西工事に、中流動覆工コンクリートに加え、一部区間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導入している。本工事は、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。一般的な道路トンネルでは、非常用設備などを設置するスペースとして、トンネル延長50~200mごとに箱抜きを設ける必要があり、一般的に箱抜き箇所などにおいて、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となっ

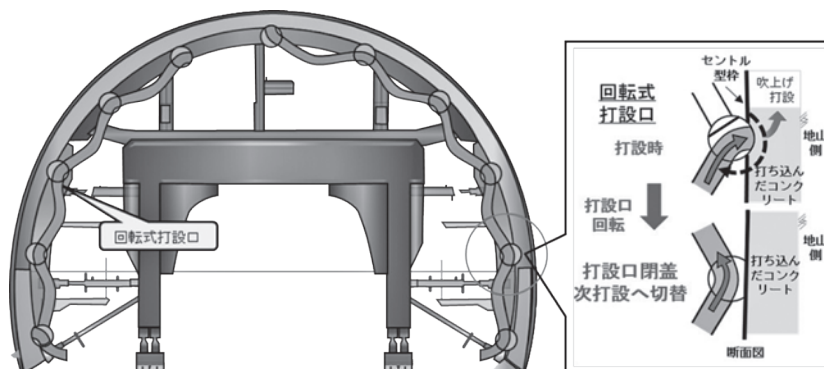


図-4 新しい打設配管装置

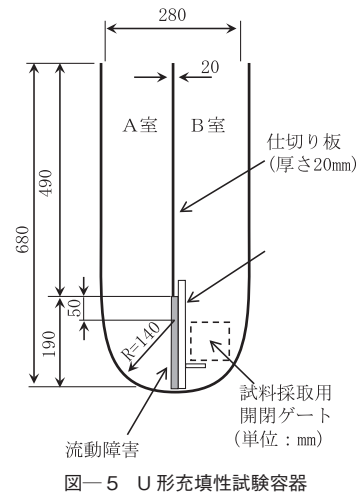
ている。そこで、本工事では、箱抜き箇所における締固め作業が不要であること、すなわち完全な自動打設を検証するために、締固めを必要としない高流動覆工コンクリート⁵⁾を用いた全自動打設システムを試験的に一部区間に導入するに至った。ここでは、高流動覆工コンクリートの施工実績を、通常区間の中流動覆工コンクリートの施工実績と比較して述べる。

(2) コンクリートの配合検討

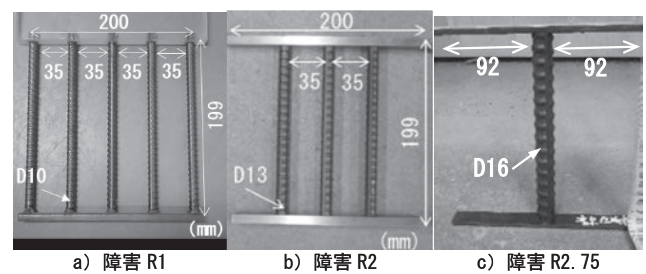
中・高流動覆工コンクリートの配合は、表一に示すとおりである。同工事における中流動覆工コンクリートは、剥落防止を目的とした繊維（ポリプロピレン製、繊維長47mm）を混入する仕様で、目標スランプフローを425 ± 75 mm、目標空気量を4.5 ± 1.5%としている。これに対し、試験的に導入した高流動覆工コンクリートは、同じく繊維を混入する仕様で、スランプフローを600 ± 50 mm、空気量を4.5 ± 1.5%とした。高流動覆工コンクリートは、中流動覆工コンクリートよりも流動性を高める必要があり、さらに高い材料分離抵抗性を確保するために、土木学会の「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」⁷⁾（以降、高流動指針と記す）を参考にすると、単位セメント量450 kg/m³以上必要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された新規の増粘剤含有高性能AE減水剤⁶⁾を用いることで、450 kg/m³よりも30 kg/m³少ない420 kg/m³で必要な材料分離抵抗性を得ることができた。

自己充填性のランクの設定は、高流動指針に則った場合、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、図一5に示すような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）（以降、U形充填性試験と記す）では流動障害なしでの評価となる。ただし、繊維補強仕様であることから、鉄筋と繊維の干渉による充填性の低下を考慮し、より

安全側で充填性の評価をする必要があった。しかし、写真一3a), b) に示すランク1, ランク2の障害R1, R2では、流動障害の鉄筋あきは35mmと繊維長より狭く、厳しすぎる充填性の評価となり合理性に欠けることが考えられた。これまで筆者らは、一般的な配筋条件のRC構造物を対象としてランク2と3の間の充填性を評価する指標としてランク2.5を検討⁸⁾している。それを参考として、今回はランク3に該当するものの、安全側で充填性を評価するために、トンネル覆工用として新たな充填性の指標であるランク2.75を考案した。ランク2.75は、写真一3c) に示すような本トンネルの配筋条件であるD16で、鉄筋あき92mmの障害R2.75を配したU形充填性試験であり、これにより充填性を評価するものとした。



図一5 U形充填性試験容器



写真一3 U形充填性試験の流動障害

表一 中・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	
中流動覆工コンクリート	425 ± 75	4.5	47.3	52.0	336	175	370	857	894	5.18	0.3
覆工用高流動コンクリート	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2.58 g/cm³，G：砕石2005 表乾密度2.66 g/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

(3) 打設計画および評価項目

(a) 打設計画

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 ~ 2.0 m/h 程度となるように、打込み速度はポンプ 1 台あたり 15 ~ 25 m³/h に設定した。SL 下部の最下位置から 3 段目までの回転式打設口においては、自由落下高さ 0.5 m として、以降は吹上げ打設とした。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、天端の仕上がり向上を目的として、予め天端の型枠にトンネル軸方向 1.5 m、周方向 1 m 程度の間隔で全 28 台設置した型枠パイプを、打込み完了後に自動制御で合計 20 秒稼働させた。

(b) 評価項目

中・高流動覆工コンクリートの打設中に、作業内容に対する人員とトータル打設時間を測定し、省人化、省力化の効果を評価した。フレッシュコンクリートにおいては、表-2 に示すとおり、スランプフローと空気量の測定に加え、高流動覆工コンクリートでは U 形充填高さを測定し評価した。硬化コンクリートにおいては、トレント法による透気係数⁹⁾を測定し表層品質を評価した。なお、これらの測定は、高流動覆工コンクリートを導入した 2 区画、中流動覆工コンクリートでは高流動覆工コンクリートと隣接する 2 区画で行った。

(4) 中・高流動覆工コンクリートのフレッシュ性状

中流動覆工コンクリートと高流動覆工コンクリートのスランプフロー (図-6) および空気量 (図-7) の一例は、いずれも目標とする管理範囲にあることが確認できた。また、スランプフローのばらつきは、高流動覆工コンクリートの方が、中流動覆工コンクリートよりも小さい結果であった。高流動覆工コンクリートの U 形充填高さ (図-8) は、スランプフローと空気量と同様に全てで目標値を満足し、安定していた。

(5) 打込みと充填状況

前述にて設定した打設速度と型枠パイプの稼働

働時間で打ち込んだ結果、高流動覆工コンクリートの打込み、充填状況は、写真-4 に示すように、材料分離することなく棲板まで流動し、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。一方、中流動覆工コンクリートの打込み、充填状況は、コンクリートの勾配が生じる

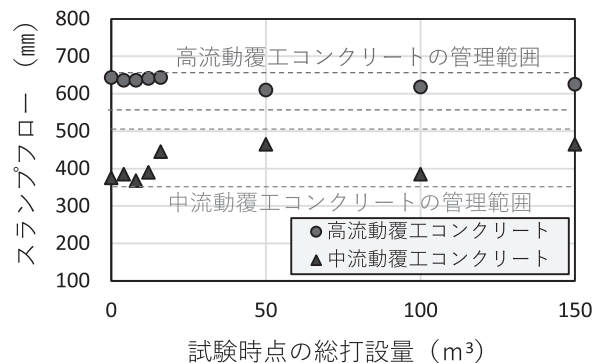


図-6 スランプフローの推移

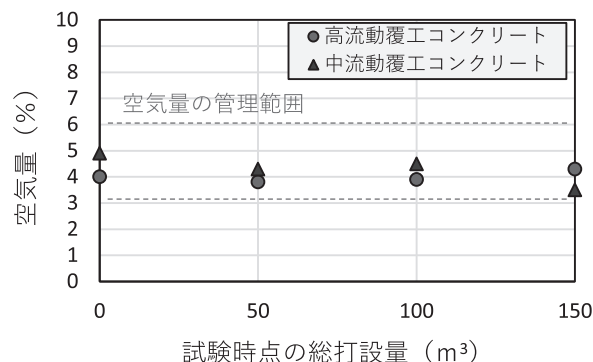


図-7 空気量の推移

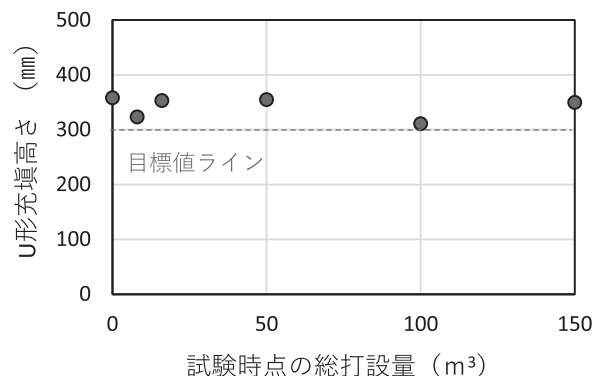


図-8 U形充填高さの推移

表-2 評価項目

段階	評価項目	方法	頻度
フレッシュコンクリート	スランプフロー	JIS A 1150	最初の連続 5 台、以後 50 m ³ ごと
	空気量	JIS A 1128	最初の 1 台目と以後 50 m ³ ごと
	U 形充填高さ	JSCE-F 511 を応用 (R2.75)	最初の 1, 3, 5 台目と以後 50 m ³ ごと
硬化コンクリート	透気係数	トレント法透気試験	区画の中間において、SL 下部、側壁下部、側壁上部、天端部の 4 か所測定

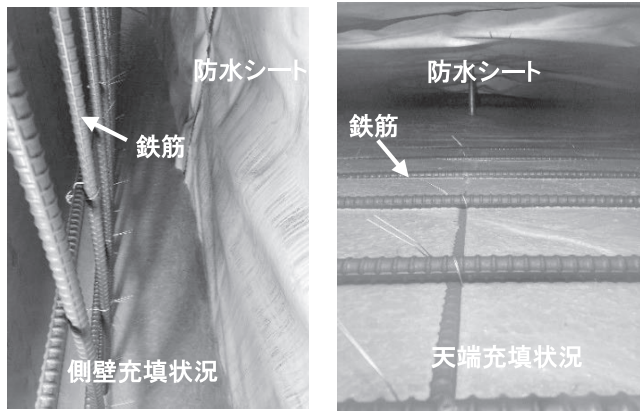


写真-4 コンクリートの充填状況

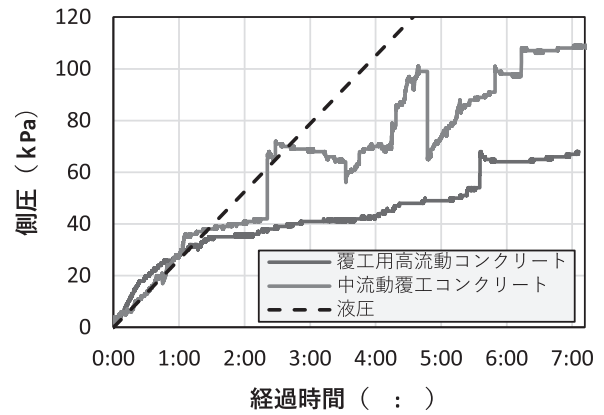


図-9 コンクリートの側圧

ものの、型枠パイプレタの自動稼働により、流動補助を行うことで高流動覆工コンクリートと同様の充填状況となった。

また、全自動打設では打上がり高さ検知センサの反応に基づき、型枠の左右において、事前に設定した30 cm以上の高低差が生じた際に打設速度が自動で調整されるほか、アジテータ車の入替え時も自動で、圧送停止および再開を行うため、人による打設中のコンクリートポンプの補助的な操作は全く必要としなかった。移動式型枠内の作業としては、打設完了後の配管清掃を除けば一切の人力作業が不要で、主に襍枒監視のみであった。

作業内容と人員の記録は、表-3に示す通りで、配管切替など狭隘な環境での人力による苦渋作業が多い従来工法と比べ、全自動打設では作業人員を9名から4名に減少できた。また、その4名の作業は、苦渋作業ではなく、襍枒監視、制御盤確認および打設完了後の配管清掃などの軽作業であり、省人化、省力化を図ることができた。さらに配管切替の時間短縮などで、通常10時間の打設を2時間短縮できた。

(6) 側圧

中・高流動覆工コンクリートの側圧は、図-9に併記した破線で示すトンネルの内空高さ9 mにおける液圧と比べ、いずれも打上がり開始から1時間程度

までは同程度になっているものの、2時間以降の時点では液圧以下に低下している。しかし、中流動覆工コンクリートの側圧は、型枠パイプレタの稼働等により、変動が大きくなり瞬間的に液圧になる場面が生じることで変動が大きくなっている。一方、高流動覆工コンクリートは、型枠パイプレタによる振動を与えないこと、繊維を混入したコンクリートと鉄筋の障害による抵抗が生じたことなどが影響したことで、変動が小さく最大68 kPaと想定より低い結果であった。

(7) 仕上がりと表層品質

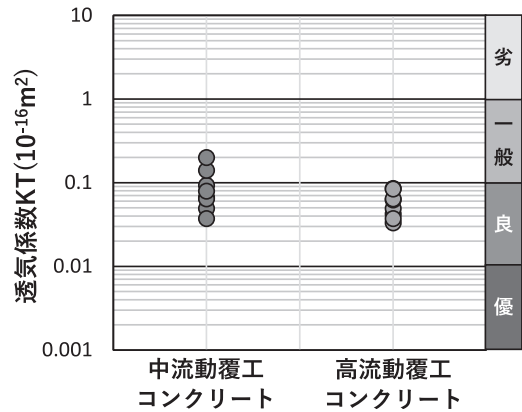
代表的な高流動覆工コンクリートの仕上がりは、写真-5に示すように天端部に発生しやすいコンクリートの流動跡などは少なく綺麗な仕上がりとなった。できる限り連続的に打込んでいることと、天端部全面が平坦に打ち上がるため、吹上げ口の圧力が上がり分離しにくいことで、流動跡などが生じなかったものと考えられる。一方、SL下部に注目すると、中流動覆工コンクリートと高流動覆工コンクリートのいずれも吹上げ打設を行うことで、打込み時のエンラップトエアが低減された。一方で、写真-6に示すように中流動覆工コンクリートと比べ、高流動覆工コンクリートの方が表面気泡が少ない結果であった。これは、中流動覆工コンクリートより充填性が優れること、SL下部では型枠パイプレタを稼働させないことで、コンクリート内部の気泡が表面に誘導され合泡することもなく型枠表面に気泡が残存しにくかったためと考えられる。特に、SL下部においては断面形状がオーバーハングしているため、気泡が抜けずに表面にとどまりやすく、表面気泡の差が顕著に表れたものと考えられる。また、中流動覆工コンクリートを用いて全自動打設を実現する上で課題であった箱抜き箇所においては、高流動覆工コンクリートを用いることで、締固め作業の必要はなく、写真-7に示すよう

表-3 作業内容と人員

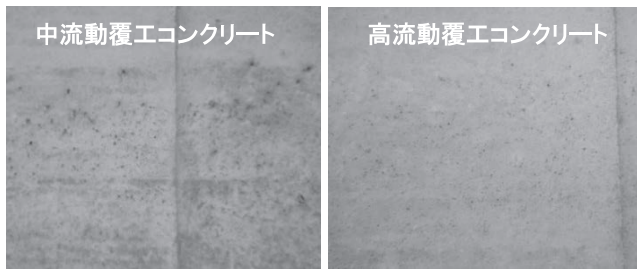
作業内容	従来工法 (人)	全自動打設 (人)
パイプレタ	4	0
襍枒監視	2	2
制御盤確認	0	1
ポンプ操作	2	0 (上記兼務)
配管清掃時	1	1
合計	9	4



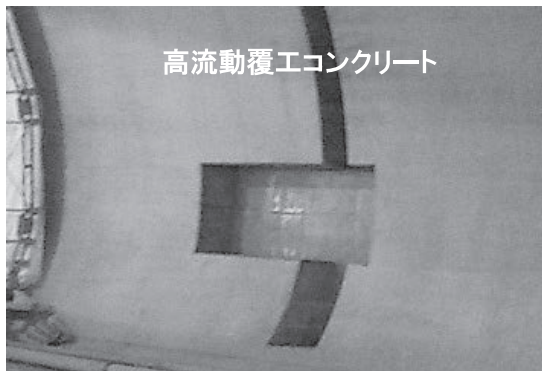
写真—5 高流動覆工コンクリートの仕上がり



図—10 透気係数の比較



写真—6 SL下部表面気泡の比較



写真—7 箱抜き箇所の高流動覆工コンクリートの充填状況

の効果を検証した。いずれのコンクリートにおいても、打設人員を9名から4名に低減し、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。また、高流動覆工コンクリートを用いることで、箱抜き箇所などにおける棒状パイププレートを使った流動補助的な締固め作業を完全に不要にできた。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したとともに、高流動覆工コンクリートを用いることで全自動打設システムのメリットを最大限に活かせるものと考えられる。今後、他のトンネル工事においても中流動覆工コンクリートおよび高流動覆工コンクリートを用いた本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。そして、将来的には、型枠の設置からコンクリート打設および養生に至るまでのすべての作業工程を自動的に行う統合システムの構築を目指す。

JCMA

に隅々まで充填されることが確認された。以上より、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導入することで、施工と品質の両面において改善を図ることが確認できた。

覆工コンクリートのSL下部、肩下、肩下、天端で測定したそれぞれ2区画分におけるコンクリートの表層品質の評価指標となる透気試験の結果は、図—10に示すように、同環境におかれた覆工用中流動コンクリートでは「一般」から「良」に多少ばらつくのに対し、高流動覆工コンクリートでは「良」の結果にまとも、均質であることを確認できた。

4. おわりに

実現場に中流動覆工コンクリートと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初導入し、そ

《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) 樹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) 藤原浩一, 坂平新志, 石井利治, 影山 心, 松本修治, 手塚康成, 宮内智昭, 藤田健士: 中流動覆工コンクリートを用いた自動打設システムの適用実績, 第78回年次学術講演会, VI-969, 土木学会, 2023.
- 5) 松本修治, 佐藤崇洋, 坂井吾郎, 手塚康成, 青柳隆浩, 西岡和則: 山岳トンネルにおける覆工用高流動コンクリートの適用実績, トンネル工学報告集, 第27巻, I-17, 土木学会, 2017.
- 6) 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-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.
- 7) 土木学会: 高流動コンクリートの配合設計・施工指針, 2012.6.
- 8) 松本修治, 橋本 学, 渡邊賢三, 橋本紳一郎: 汎用的な締固め不要コンクリートにおける新規の粉末分散剤と新たな充填性評価手法に関する検討, コンクリート工学年次学術論文集, vol.44, pp.820-825, No.1, 2022.

- 9) R.Torrent and G.Frenzer : A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "covercrete", International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering(NDT-CE), pp.985-992, Sep.1995.

[筆者紹介]



松本 修治 (まつもと しゅうじ)
鹿島建設㈱
技術研究所 土木材料グループ
主任研究員



手塚 康成 (てづか やすなり)
鹿島建設㈱
土木管理本部 土木工務部 トンネルグループ
担当部長



坂井 吾郎 (さかい ごろう)
鹿島建設㈱
技術研究所
主席研究員, 博士 (工学)

