

トンネル覆工コンクリートの自動打設システムの実適用

鹿島建設(株) 正会員 ○松本 修治 鹿島建設(株) 正会員 手塚 康成
鹿島建設(株) 正会員 日野 博之 鹿島建設(株) 正会員 青柳 隆浩

1. はじめに

近年、建設業界では作業員の高齢化による技能者不足が深刻化しており、国交省では生産性を向上させる重要な施策として「i-Construction¹⁾」を掲げ、流動性の高いコンクリートの積極的な活用や建設作業の機械化、自動化を進めている。現在、多くのトンネル覆工コンクリートの施工は、スランブ 15cm 程度のコンクリートを、覆工厚が 30cm 程度の狭小かつ閉空間となる移動式型枠内で、内部振動機を用いた人力による締固め作業が行われている。このような状況を改善するため、最近では、型枠面板に取り付けた型枠バイブレータの軽微な振動で締固め作業を行う覆工用中流動コンクリート²⁾³⁾が用いられている。これにより、狭隘な移動式型枠内での締固め作業が大幅に削減され、品質安定性の向上が図られている。しかし、スランブ 21cm 程度で管理する覆工用中流動コンクリートでは、打設状況に合わせた型枠バイブレータの稼働など操作が煩雑であることや、設備が複雑になることなどから、打設を自動化するのは容易ではない。そこで、筆者らは、締固めを必要としない覆工用高流動コンクリート⁴⁾を用いることで内部振動機や型枠バイブレータの煩雑な操作による締固め作業を不要とし、人力による圧送管の切替えを不要にした新しい打設配管装置やコンクリートポンプ車との連動制御技術を組み合わせた自動打設システムの開発を行っている。本稿では、覆工用高流動コンクリートの特性および、自動打設システムの適用実績について述べる。

2. 自動打設システムの概要

自動打設システムは、**図-1**に示すように、(1) 締固めが不要な覆工用高流動コンクリート、(2) 廃棄コンクリートの回収が容易な新しい打設配管装置、(3) 配管系統の高速切替え装置、(4) 打上がり高さを自動制御する打設制御装置の4つで構成される。(4)により、コンクリートポンプの圧送信号を受けて(2)、(3)を自動で制御することで、アジテータ車の入替え時を含め、人の手を全く介さずに、打上げ高さを左右均等に調整しながら、型枠延長の中央から全断面を吹上げてコンクリートを打ち込むことが可能となった。

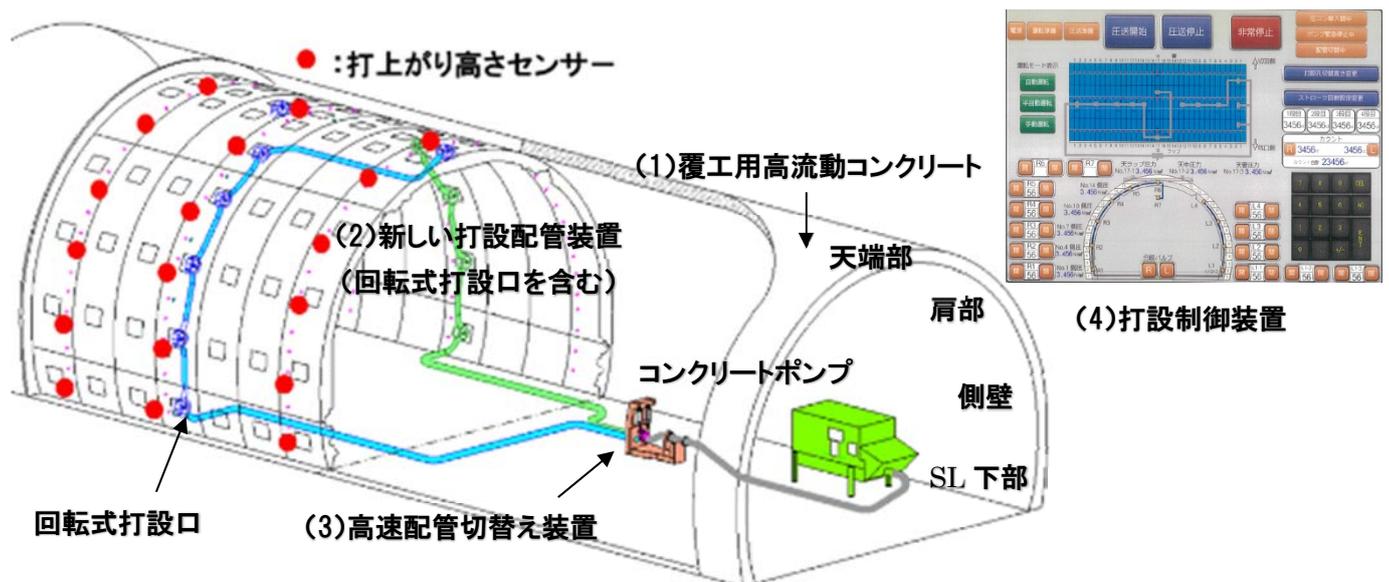


図-1 自動打設システムの概要

キーワード 覆工用高流動コンクリート、自動打設システム、制御装置

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL042-489-8014

3. 覆工用高流動コンクリートの特性

覆工用高流動コンクリート⁴⁾は、トンネル覆工コンクリートの施工を対象として、締固め作業の不要を実現したものである。写真-1に示すようにスランプフロー500~600mm、単位セメント量 400kg/m³以下で、混和剤には、新しく開発したブリーディング低減成分、分散性の高いポリカルボン酸塩および増粘成分を含有した特殊な高性能AE減水剤を用いている。この特殊な高性能AE減水剤は、既往の研究結果⁵⁾によると、単位セメント量300kg/m³の覆工用高流動コンクリートにおいて、従来の市販されている高性能AE減水剤と比べてスランプフローや充填性の時間経過に伴う変化は同等のまま、凝結の最終時間を100分程度早くできる。また、一般的に高流動コンクリートは、多量の高性能AE減水剤で流動性を高めるため、強度発現が遅くなる傾向がある一方で、覆工用高流動コンクリートの材齢18時間における圧縮強度はスランプ15cm程度の覆工コンクリートと同程度であり、さらに、ブリーディング量は半分程度まで低減できる。前述の覆工コンクリートの施工条件において有効な混和剤技術を用いた覆工用高流動コンクリートである。



写真-1 覆工用高流動コンクリート

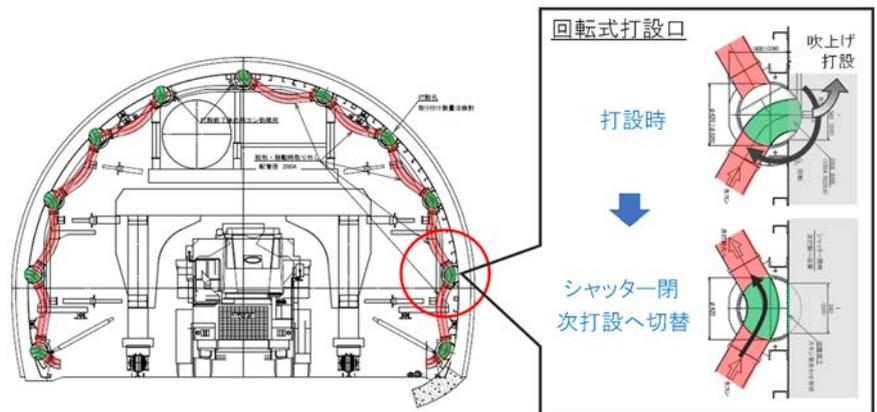


図-2 新しい打設配管システム

4. 自動打設装置の特長

(1) 廃棄コンクリートの削減と回収が容易な新しい打設配管装置

従来、覆工コンクリートの施工では、移動式型枠で閉鎖された空間に予め設置された複数の打設口からコンクリートを打ち込むため、打設口ごとにコンクリートを配る配管



a) 型枠内

b) センترل内側

写真-2 回転式打設口

が必要となり、配管を次の打設口に切り替える際に配管内に残るコンクリート(以降、廃棄コンクリートと称す)が多量に発生する。そのため、打設作業中に廃棄コンクリートの回収と配管清掃などの作業が必要となる上、回収後の廃棄コンクリートを処分しなくてはならない。そこで、廃棄コンクリートの削減と回収が容易な新しい打設配管装置を開発した。この装置は、図-2に示すように、下から順番に上の打設口からコンクリートを吹き上げて圧入して打ち込み、打設口からの打設が完了すると打設口の配管を回転させて、次の打設口からコンクリートを連続的に供給する構造である。写真-2に示す吹上げとなる回転式打設口に特徴があり、打設時の吹上げ口は型枠表面からコンクリート内部へ突出しているが、打設が完了すると打設口が回転して型枠表面と同じ位置に蓋が閉まると同時に、次の打設口への配管ルートが開通される。これにより、打設中の廃棄コンクリートの回収や配管清掃が不要となる。さらに、図-3に示すようにポンプを逆転させ左側の配管内コンクリートを回収し右側の配管へ圧送できるため、廃棄コンクリートの削減が可能である。

(2) 配管系統の高速切替え装置

従来の打設配管装置では、左右の配管系統の切替えに数十分を要するため、コンクリートの打重ね線のような流動跡が色むらとして残るといった課題があった。そこで、**写真-3**に示すようなコンクリートポンプの圧送信号と連携させた配管系統の高速切替え装置を開発した。本装置は、電気信号による油圧制御で、3秒間で左右の配管系統の切替えを可能とした。さらに、打上がり高さを自動制御する打設制御装置と連携させることで、15秒で左右の配管系統を切り替えることができるようになった。

(3) 打上がり高さを自動制御する打設制御装置

本装置は、**写真-4**に示すようにコンクリート検知センサにより打設状況を見える化し、配管系統の自動切替えを行うことで、左右のコンクリートの高さが同じになるように自動制御するものである。計画リフト割に応じて回転式打設口を一つ上の位置に切替えるタイミングと、左右の許容高低差に応じて左右配管系統の切替えるタイミングを設定して打設を開始すれば、その計画どおりに打設が自動で進行できる。また、アジテータ車の入替による打設の停止と再開は、コンクリートポンプ車のホッパに設置した液面計により制御する。ホッパ内のコンクリートが減少して液面計の下限を感知すると圧送を自動停止し、アジテータ車入替後に投入したコンクリートを感知すると自動で圧送を再開する。天端部の打設は、型枠に設置した3箇所（既設側、中間、棲側）の圧力計により制御する。天端の吹上げ口より打設を行い、事前に設定した圧力値に到達すると圧力充填でのコンクリートの打設を自動停止する。さらに、本装置は、打設履歴も記憶媒体に記録されるため、脱型後の表面の出来栄と関連付けることができ、次回以降の施工に反映させ品質向上を図ることが可能となる。

5. 実規模模擬トンネルでの自動打設システムの適用

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 となる実規模の模擬トンネルの 4BL で覆工用高流動コンクリートを用いた自動打設システムの適用を行った。なお、覆工用高流動コンクリートの使用材料および配合は、**表-1**に示すものである。コンクリートの配合は、事前の室内および実機試験での試し練りで目標性能を満足するものを選定した。また、適用時には、アジテータ車の全台でスランプフロー（JIS A 1150）試験を行った。その他、空気量（JIS A 1128）、U形充填高さ（JSCE-F 511-1999、ランク 2）、V

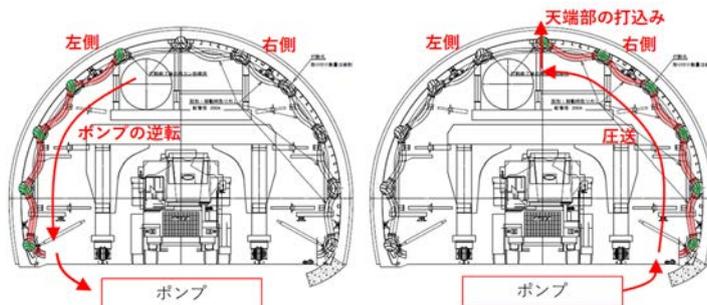


図-3 廃棄コンクリートの削減の仕組み



写真-3 配管系統の高速切替え装置



写真-4 打設制御装置のモニター画面

表-1 覆工用高流動コンクリートの配合

SF (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S1	S2	G	VSP
550	4.5	50.0	52.7	317	175	350	743	186	840	4.375

C:普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm³, S1:川砂, 表乾密度 2.63g/cm³, S2:山砂, 表乾密度 2.66g/cm³, G:砂利, 密度 2.66g/cm³, VSP:特殊混和剤

漏斗流下時間 (JSCE-F 512-2011) は、打設ブロックに対して2回の測定とした。以降に、適用した4BLのうち夏期に基本打設計画で実施したBLと、そこで得られた課題を解決するための改善打設計画で実施したBLの2BLにおける計画・実績について説明する。

(1) 基本打設計画

自動打設システムは、事前に自動制御パラメータ (打設口の切替え高さ、左右の配管切替え期) の設定を行う必要がある。打設口の切替えのタイミングは、**図-4** に示す打設口の上部の検知センサがコンクリートを検知した時とした。例えば、L2を使って打ち込んだ場合、10番のセンサがコンクリートを検知したらL3に切り替えることとした。また、左右の配管の切替えは、左右の打設高さの差が20cm以下となるように設定した。具体的には、コンクリート打設量の指標となるポンプスト

ローク回数を規定して、切替えることとした。本適用実績では、流動性の高い覆工用高流動コンクリートを用いていることから、理論吐出量 (0.023m³) ×ピストンの吸込み効率 (0.9) =推定実吐出量 (0.021m³) とし、1、2リフトはストローク回数を30回×0.021m³ (0.63m³)、3リフト以上は40回×0.021m³ (0.84m³) に設定した。さらに、各リフトのコンクリート検知センサが反応すると、設定回数以下でも自動的に左右の配管切替えを行い、巻厚差等があっても打上がり高さの差がでないように打設量が調整される。コンクリートの打設は、一般的な覆工コンクリートの打設実績である時間当りの打上がり速度 (1リフト: 1.5m/h, 2・3リフト: 2.0m/h) から、打設速度を計画し、配管切替え時間とアジテータ車の入替え時間を考慮してポンプの吐出量を設定した。覆工用高流動コンクリートは可能な限り流れを止めずに、低速でも連続的に打込むことが重要であるため、吐出量は計画の打上がり速度で最小となるように設定した。

(2) 基本打設計画での打設結果

覆工用高流動コンクリートのフレッシュ性状は良好で、全ての装置がトラブルなく順調に稼働し、基本計画どおりに覆工コンクリートを打ち込むことができた。

図-5にスランプフローの測定結果を示す。最初の数台は上限値近くを推移したものの、台数を重ねるごとに、目標中心値付近に収束しており、安定したフレッシュ性状での製造が可能であった。また、空気量は平均4.6%、U形充填高さは平均341mm、V漏斗流下時間は平均3.4秒と全てで目標範囲内であった。なお、コンクリート温度はいずれも31℃程度であった。

写真-5に各部位での覆工用高流動コンクリートの充填状況を示す。どの部位においても材料分離することなく流動先端となる棲板まで流れ、隅々までほぼ水平に充填されていく状況が確認された。しかし、天端部においては、コンクリート表面に粗骨材が比較的に目立ち、これは型枠内で硬くなったコンクリートが吹き上げられ

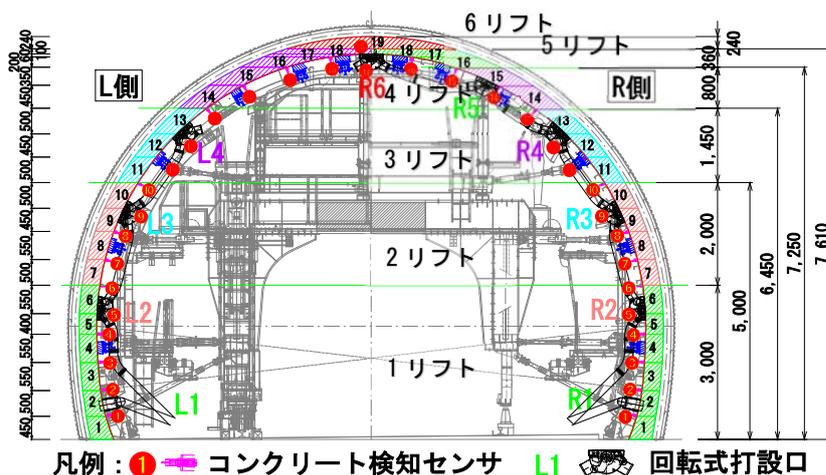


図-4 回転式打設口・コンクリート検知センサ配置図

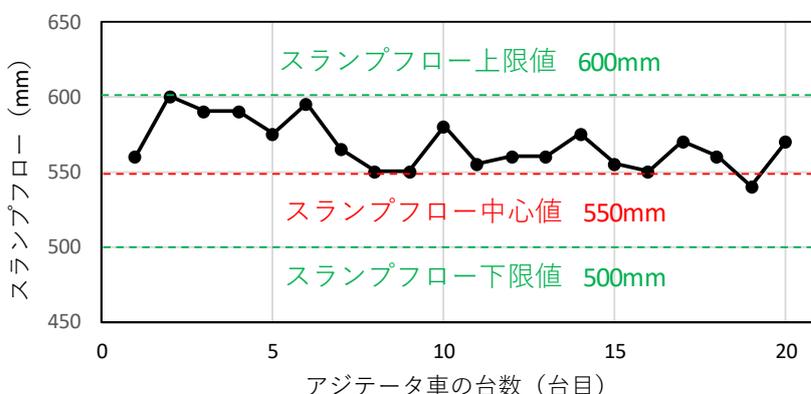


図-5 スランプフローの測定結果

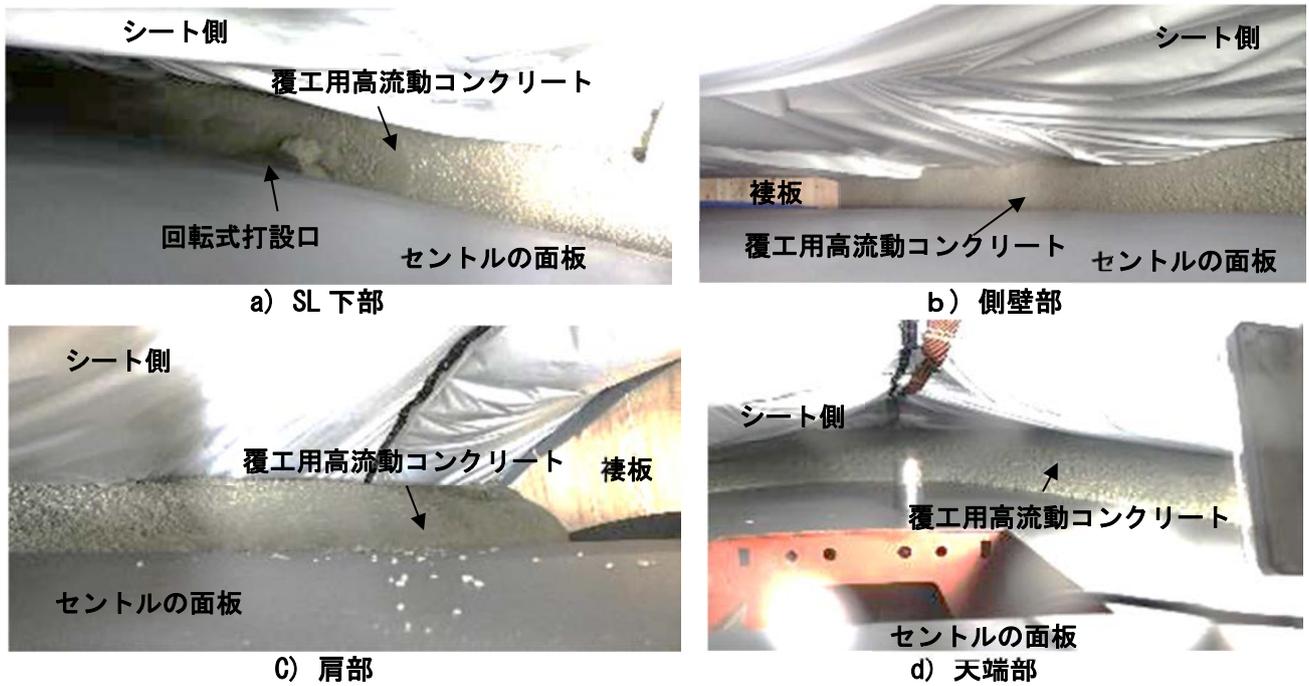


写真-5 コンクリートの充填状況

たためであると考えられた。なお、セントルにかかる側圧は、一時的に液圧になることもあったが、最大70kPa程度の結果で、覆工用中流動コンクリートと同程度⁶⁾であった。

写真-6 に覆工コンクリートの出来栄を示す。最下部に発生しやすい表面気泡は生じなかったが、縞模様と天端部に発生しやすいコンクリートの流動跡が若干見られた。SL 下部に表面気泡が生じなかったのは、吹上げで打設を行ったことで、打設時のコンクリートの落下によるエントラップトエアが低減されたためと考えられた。また、縞模様や流動跡が生じたのは、打設速度が遅かったことと、コンクリート温度が31°Cと暑い時期の打設であったことから、型枠内でコンクリートが硬くなり、そのコンクリートを吹き上げたことが影響したものと考えられた。これらより、美観を向上させるためにも、覆工用高流動コンクリートの夏期仕様の混和剤の開発や打設速度などの制御パラメータの最適化が課題であることを確認した。

図-6 に経過時間と打設量の関係を示す。計画した打設時間に対し、自動打設による実績時間との差異は、各アジテータ車において5分以内であった。このことから従来施工では一般的であった運搬時間などを考慮したアジテータ車の配車など、打設の進捗を予測しつつ行う煩雑な調整が不要とな



写真-6 覆工コンクリートの出来栄

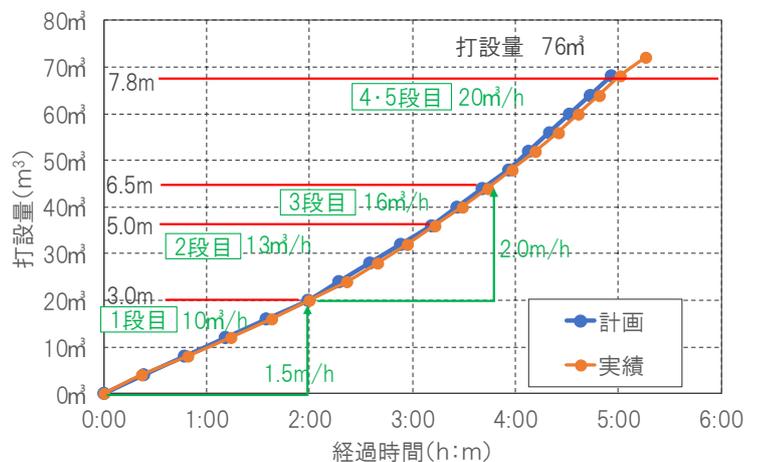


図-6 経過時間と打設量の関係

ったため、施工管理の省力化に寄与した。また、工場の出荷管理も容易となったことから、アジテータ車の待機時間もコントロールすることができた。そのため、所定のワーカビリティを有さないコンクリートが投入されるリスクが低減でき品質確保にも寄与するものと考えられた。

写真-7 に回転式打設口の打設後の状態を示す。移動式型枠の脱型後に、回転式打設口を稼働させた状態であり、回転部の隙間に若干のペーストが入り込んでいることが確認できた。そのため、打設後に長期間稼働させない場合などでは、メンテナンスを行わないと状況によっては稼働しづらくなることが想定された。しかし、当初の装置は、**写真-8** に示すように、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、容易にメンテナンスが行えなかった。このことから、メンテナンスを可能な構造への装置の改良が課題であることを確認した。

(3) 改善打設計画および回転式打設口の改良

基本打設計画での打設結果では、夏期における覆工用高流動コンクリートの時間経過に伴う流動性の変化が大きいことや打設速度が遅いことにより、覆工コンクリートに縞模様や流動跡が生じたものと考えられた。そこで、基本打設計画に対し、時間当たりのポンプの吐出量を2~4m³/h程度増やして3リフト目で20m³/h、4リフト目以降を22m³/hとして打設を行うこととした。また、混和剤は、時間経過に伴う流動性の変化を小さくするための調整を行い、さらに美観向上のために、天端部では、1.5mピッチで設置した型枠パイプレータの全28台を10秒程度稼働させることとした。また、回転式打設口のメンテナンス上の課題として、清掃が容易でない構造であることと、可動部へのグリースの給脂機構がないことが挙げられた。そこで、**写真-9** に示す改良版の回転式打設口のように溶接接合されていた部分をボルト接合での開閉式とし、回転可動部分にグリースを供給するための給脂配管を4ヶ所に設置した。これにより、日常においては、グリースの給脂のみとし、月に1回程度の頻度で開閉による清掃などを行うようなメンテナンスを可能とした。

(4) 改善打設計画での打設結果

写真-10 に覆工コンクリートの出来栄を示す。改善打設計画では、打設速度を速くし、天端部のみ型枠パイプレータを用いることで、コンクリートが型枠内で硬くなる前に吹上げ打設ができ、無理な流動や充填が低減され、型枠パイプレータで型枠表面をより密実にできたことで、実施した4BLの中でも最も流動跡が目立たない綺麗な出来栄となった。



写真-7 回転式打設口の打込み後の状態

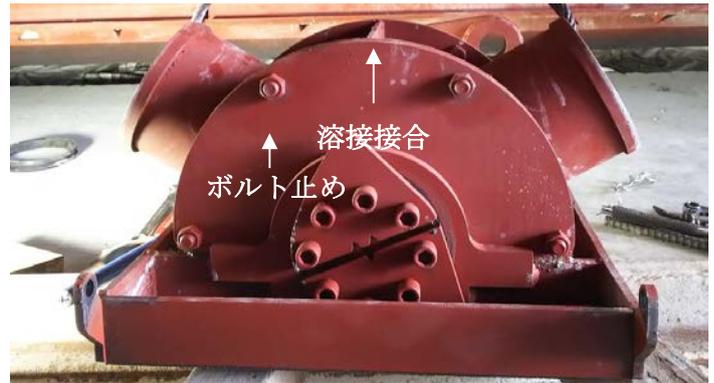


写真-8 回転式打設口の構造



写真-9 改良版の回転式打設口

図-7 に覆工コンクリートの表層品質評価の結果を示す。硬化後の覆工コンクリートの品質評価として、材齢 90 日程度で、覆工コンクリートの表面水分率が 5.5%以下となった時にトレント法による透気試験を実施した。測定箇所は、SL, 肩下, 肩上の両サイドと天端部のそれぞれで、棲, 中間および既設の全 21 点で行った。既往の評価方法⁷⁾では、どの部位も「一般」から「良」の評価で、全体平均では「良」の評価を得られており、一般的な覆工用中流動コンクリート⁸⁾と同程度の結果であった。



写真-10 改善後の覆工コンクリートの出来栄

6. まとめ

覆工用高流動コンクリートの自動打設システムを適用した全 BL において、全ての装置がトラブルなく順調に稼働し、実現性を確認できた。また、この自動打設システムを用いることで、打設履歴も記憶媒体に記録されるため、脱型後の表面の出来栄との関連付け、現場での覆工コンクリートの品質向上に向けた PDCA 活動が容易になることが分かった。さらに、打設状況をネットワーク配信することもでき、遠隔地での打設監視および遠隔臨場としての活用も可能となることが確認できた。今後は、覆工コンクリートの美観および品質の向上も含めた制御パラメータの最適化を図り、型枠セット、打設および養生に至るすべての工程を自動で行う統合システムの構築を目指す。

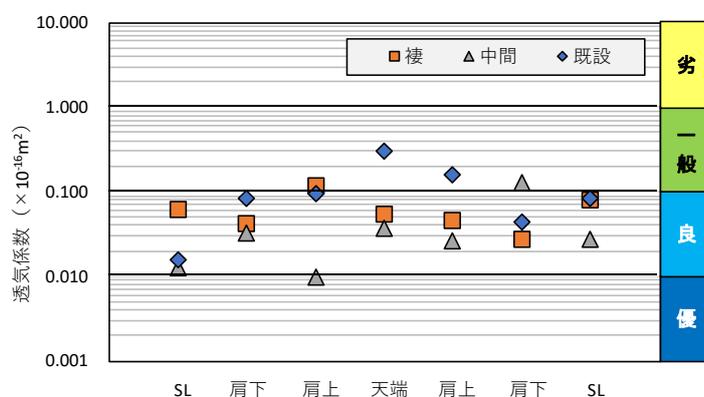


図-7 覆工コンクリートの表層品質

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, pp.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, 2011.12.
- 3) 松本修治, 坂井吾郎: 増粘剤一液型高性能AE減水剤を用いた中流動覆工コンクリートの性能評価実験, 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術に関するシンポジウム, 2020.7, V-77~V-80.
- 4) 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, 2017.11.
- 5) 作榮二郎, 亀島健太, 松本修治, 坂井吾郎: ブ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.
- 6) 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, 2018, pp.1185~1190.
- 7) 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.
- 8) 松本修治, 橋本学, 桧垣和明, 手塚康成, 青柳隆浩: 新型テレスコピックセントル工法および塗布型の水分逸散抑制剤による養生の効果, 第 72 回年次学術講演会, VI-167, 土木学会, 2017.