

JCMA 報告

令和2年度 日本建設機械施工大賞 受賞業績 (その2)

大賞部門 最優秀賞

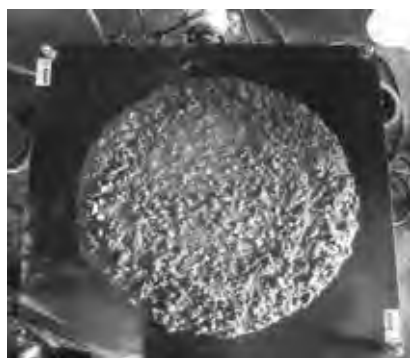
トンネル覆工コンクリート自動施工ロボットシステム

清水建設(株), 西日本高速道路(株), 岐阜工業(株)

1. 業績の行われた背景

建設現場の生産性向上「i-Construction」では、測量・設計から、施工、維持管理に至る全プロセスにIoT/ICTを取り入れることで、「設計データ」と「施工・機械データ」「出来形（品質）データ」を同時多次的に3Dモデルデータとリンクさせることができる、デジタル管理を活用したロボット化・自動化生産システムが求められている。

トンネル覆工コンクリートの施工においても、高度な技術を有する熟練技能労働者が急激に減少するなかで、当該工種の施工合理化・省力化が、生産性向上に大きく寄与することが期待されている。トンネル覆工コンクリートの施工10m強の延長を有する施工1スパンにおいて、中流動コンクリート（写真—1）の材料特性を最大限に活かした施工生産システムの開発が急務となっていた。（類似技術なし）



写真—1 中流動コンクリート（加振時フロー状況：30 cm → 50 cm）

2. 業績の詳細な技術説明

2.1 新規性（写真—2, 3）

本技術は、トンネル覆工コンクリートの施工において、打設配管切替えにマニピュレータ方式を採用することで、従来スライド型枠の検査窓から配管投入していた生コンクリートを、所定打上げ高さまでのコンクリート充填を吹上げ打設方式とする新しい機構とした。複数の圧力、温度、加速度センサー群から得られるデジタル信号と機械システムを連携制御することで、覆工作業主任者を含む2名体制での施工が可能となった。また、施工状態を可視化することにより、デジタルデータ駆動型の覆工コンクリート自動施工を実現している。

2.1.2 システム構成および機構（写真—4～15）

本技術は、覆工コンクリートスパン割り延長12.5mを基本としたスライド型枠とコンクリートポンプ装置、コンクリート圧送時の圧力、速度、吐出送量のデジタルデータ取得システム、マニピュレータ方式によるコンクリート配管切替え装置、シャッターバルブ付きコンクリート打設孔（左右天端11カ所）、コンクリート検知センサー（全30箇所）、型枠パイプレータ（全60箇所）、締固め加速度計（全19箇所）、スライドセントル表面での圧力温度計（全13箇所）、天端覆工裏面側に設置する埋め込み充填センサー（全3箇所）、制御盤、通信・制御PCシステムおよび表示デバイス（モニターおよびタブレット）から構成されている。

打設孔から打込まれた生コンクリートに対して、コンク



写真—2 マニピュレータ方式配管切替え装置



写真—3 覆工コンクリート自動施工状況

リート検知センサーが接触反応すると型枠バイブレータが起動。締固めは、設定した累計加速度に達するまで継続される。左右5箇所+天端1箇所の打設孔は、配管が自動的に脱着される機構となっており、下半部から側壁部、そしてトンネル肩部から天端部へと、所定高さの位置で打設を順次繰り返しながらコンクリート打込みと締固め作業がデ

ジタル信号に連動して行われる。

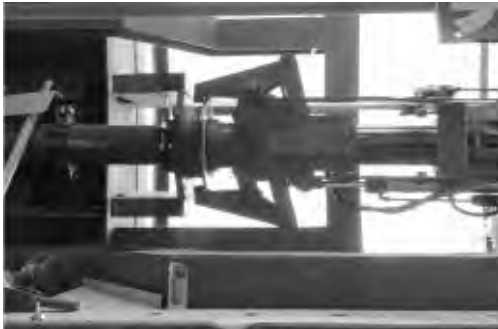
一方、肩部から天端部にかけてはコンクリート未充填の空隙箇所が発生しないように、コンクリート圧力温度センサーと裏面の埋め込み充填センサーによる並行測定し検知される。設定した所定の締固め加速度値、充填圧力値が、双方に満足していることを制御しながら打設管理するもの



写真一4 ポンプ圧送デジタルデータパネル



写真一8 型枠バイブレータ



写真一5 自動配管脱着機構



写真一9 加速度センサ



写真一6 シャッターバルブ付き打設孔



写真一10 圧力温度センサーモニター



写真一7 コンクリートセンサ



写真一11 打込み締固めモニター (断面)



写真-12 打込み締固めモニター (展開)



写真-14 安全装置



写真-13 自動施工システム制御盤



写真-15 統合管理モニター (事務所)

となっており、最終的に圧力充填値が、実績理論値に達したことを確認しての打ち上げ打設終了となる。

2.2 優秀性

デジタルモニター値によるコンクリート打設施工は、覆工作業主任者を含む2名体制での施工が可能である。

マニピュレータ方式による打設配管の機械的な切替えは狭隘空間での重量配管組バラシ作業がなくなり、安全性が向上するとともに切替え時間が短縮されることから、打継ぎ品質が確保されるとともに、施工時間が1時間半程度短くなった。打設完了後からのコンクリート強度発現の状況は、圧力温度センサーの積算温度換算値より確認することができ、打設スパンの養生・脱型枠時期を予測することが可能となっている。

各制御要素の設定値は、各試験施工で得られたベース値を基に、中流動コンクリートの出荷工場特性値を加味して決定するが、インプット情報（受入れ生コン、気温環境）からプロセス情報（圧送、打込み・締固め、打止め・養生）、アウトプット情報（出来形品質、出来栄え）までが、一貫通貫のデジタルデータとしてBIM/CIM3Dモデルに紐づき保存可能で、作業者の技量に依存することなく施工改善が容易に行えるものとなっている。また、これらプロセスデータを維持管理段階へ引き渡すことで、コンクリート構造物の予測診断手法への適用可能性も広がるものとなっている。

2.3 応募技術の適用範囲

本技術の要素技術は、平成27年4月より開発に着手し、フェーズ1：中流動コンクリートの適正締固め・打止めパ

ターンの構築と、フェーズ2：打設配管・切替え装置の自動化システムの構築の2段階とした。

フェーズ1では、コンクリート打込み・締固めエネルギー、時間・圧力、養生環境特性の適正化、覆工養生方法と弱材令強度パラメータ測定方法と覆工コンクリート性能評価を求めて型枠パイプレータの配置間隔（高さ、延長方向）、打込み高さや打込み速度、打込み量単位、側部左右の配管切替え高さ、密閉養生台車による噴霧湿潤養生の設定、テストハンマーによる強度推定試験、Torrent法による表面透気試験を繰り返し、プロセス仕様のパターン化を行った。途中、性能保証が得られた段階でフェーズ2を並行スタートさせた。

フェーズ2では中流動コンクリートの性能特性を最大限利用する打設孔の位置および配管の自動脱着機構について、要求性能検討と設計精査を実施。接合部の気密性、コンクリートの圧送圧力に耐える接合ロック機能、簡素な切離し機構、制御機構の軽量化、可動部の安全性能および安全柵機能、耐久性について、モックアップ製作や性能評価試験を実施した（写真-16、17）。最終製作段階では、可動設備巻き込まれ災害を防止するために、塗装配色検討までを実施した。

発注者からの、システム機能の検査、実施時の検査および覆工品質向上のための検査を通じた評価・改善策の技術指導・実施承諾・検査協力も頂きながら（写真-18～20）、中流動コンクリートに対する自動施工への適用性について、精度の高い開発評価と導入方針を得られたことか



写真—16 モックアップ試験（接合機密）



写真—20 システム機能ワーキング



写真—17 モックアップ試験（配管脱着）



写真—21 タブレット端末モニター 2



写真—18 現地立会状況



写真—22 タブレット端末モニター 2



写真—19 発注者立会確認

ら、早期の導入展開につながっている。

3. 技術的効果・経済的効果

本技術は、受入れコンクリートの圧送から打設孔の配管切替え、打込み・締固め、打止め・脱型枠管理までを完全自動化した日本初の技術である。以下に直接的・間接的効果を示す。

3.1 直接的効果

作業時間・サイクルの短縮、省人化、施工管理の効率化、長寿命化、単純化の次の効果を得た。

3.1.1 コンクリート打設時間の短縮と養生時間の延長

配管切替え時間が20分から5分に短縮され、合計で約1～1.5時間の作業時間短縮効果が得られた。

これより、養生開始の前倒しと養生時間の延長が図られ、高品質・高密度なコンクリートとなっている。

3.1.2 施工管理の効率化・作業人員の削減・省人化

通常5名体制での覆工施工において、ポンプ圧送制御、打込み・締固め、配管切替え・清掃、打止め作業等、2名体制作業が可能となった。この間、他の3名は、既施工スパンの養生作業と次スパンの準備が可能となり、品質向上と作業サイクル短縮を実現している。デジタル化により遠隔モニタリングも可能となった（写真—21, 22）。

3.1.3 長寿命化・熟練技能労働者不足の解消

コンクリート圧送から打止め・脱型枠管理までの全てのプロセスにおいてデジタルデータによる可視化管理が可能となり熟練技能者の技量に依存しないガイダンスシステムとして、表層緻密性（表面透気試験：0.001～0.1良好：写真—23）が常時確保できる高品質な施工システムとして証明された。これにより、覆工作業主任者などの特別技能労働者と作業経験の無い地元土工業者との混成人員編成での施工が可能となっている。



写真—23 透気試験状況

3.2 間接的効果

魅力ある建設業、建設現場の生産向上化、インフラデータプラットフォームへの帰属性への効果がある。

3.2.1 魅力ある建設業（人材確保遅延発生0%）

従来のトンネル覆工施工は、狭隘部での施工、重量配管の人力による組バラシ、生コンクリートによる汚れ、坑内汚気環境下での作業で苦渋労働環境であり、魅力ある職場環境とは言えず定着率が低い事から、作業編成技量が低下して工程遅延が時折発生することがある。これに対し、定常的にサイクル労働作業をロボット化・自動化することで判断指揮・施工管理型に特化した技能労働者として定職率改善と地位向上に貢献し、人員確保による施工遅延発生0%としている。

3.2.2 建設現場の生産工場化

（施工管理指示・教育時間ロス0%）

各箇所のセンサ群より得られるデジタルデータ駆動型の施工体制を組めることから生コン出荷プラントとの同時連携や遠隔地からの検査管理・監視体制を構築することができた。デジタルデータによる評価・可視化により、誰もが同時に共通の認識基準を持つことができることから、技術の平準化と改善方策へのプロセス行動が早くなった。これにより、表面の緻密性が確保されるとともに、剥離性、気泡・色むら、打重ね線等のない、表面不良発生率0%の高品質化コンクリートを実現している。

3.2.3 インフラデータプラットフォームへの帰属性能

（BIM360DOCS 試行開始：NEXCO 西，NEXCO 中）

施工過程で得られる一貫通のデジタルデータ（インプットデータ（生コン情報や坑内環境情報など）、プロセスデータ（打込み・締固め、打止め・脱型枠管理情報など）、アウトプットデータ（出来形/品質・出来栄情報など）の自動集約など、3Dモデルに属性化されてデータサーバーに集約保存されることから、インフラ予測診断や対策工程の策定など、施工段階からのフロントローディング検討が可能となり、維持管理段階での業務効率化が図られるものと期待される。

4. 施工実績

平成29年より、川辺第一トンネルでの半自動打設検証

を経て、令和元年12月に川辺第二トンネルでの完全自動打設検証を完了している。

5. 波及効果

5.1 社会的意義

今日、我が国では、建設業就業者数は年を重ねるごとに減少し、また高齢化も進んでいる。今後更なる技能労働者不足が懸念されるところは周知であり、その対策は急務となっている。その一方で、世界の全産業においては、AI、IoTなどの革新的技術の導入が急速に始まっており、ICTやロボット化・自動化などのデータ駆動型の情報生産活動（モノ売り切りではなく、モノをベースとするサービスソリューションを売る時代）へと移行している。そのような社会的環境の中で、土木施工の労働集約型生産体系から脱却するために、産官学一体となった「i-Construction」の推進、発注応札の段階からの、いわゆる国土交通省での「新技術導入促進Ⅱ型」や「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト（PRISM）」など、技術革新が強力に推し進められており、受注者は、開発予算組込み型発注や技術開発導入促進の期待に応じてゆく義務がある。

これら技術開発に期待する核心の部分は、「あらゆるデータが、各種プロセスから自動的に吸い上げられるとともに、多面的な解析・評価によるガイダンス・コントロールによって、全体最適化が図られることにより、社会活動が飛躍的に豊かになる時代を目指す（Society5.0）」ところにある。建設生産活動により生み出されるインフラ・サイクルは、人の生活サイクル（1年）や都市オペレーションサイクル（都庁任期4年など）に比べて、50～100年単位と長い時間軸を有している。このため、他の生産活動に比べてデジタルデータの有用性が広く一般に目立つことはないが、国民生活を支えるインフラデータプラットフォームの最も重要な基盤データであることから、これらデータの存在により予測診断が可能になるなど、重大なインシデント・リカバリーを効率化（デジタルツイン/サイバーフィジカルシステムの創出と活用）できる意義は、大きくなっている。

5.2 発展性

本技術の核心は、最少人数の管理者が、施工プロセスを一気通貫でデジタルデータ化できることである。海外でのシンガポール政府の「スマートネーション構想」は、スマートシティ構想の一部であり、社会生産プロセスをすべてリアルタイムにデジタルデータで吸い上げて、社会基盤管理に活かす方策となっている。一方でシンガポールでの建設施工においては、外国人労働者の受け入れを制限する発注仕様などもあり、特に、海外施工などで熟練工の確保が難しい場合など、繰り返し単純作業におけるロボット化・自動化された建設機械のニーズは高いものとなっている。

高度成長する各国においても、自国の生産体系を脅かす外国人労働者の流入問題は、解決すべき課題として広がる可能性を有しており、本技術のシステム自身とコンセプトは、他分野への展開可能性も大きく期待できる。

最後に、本技術は、(株)高速道路総合技術研究所 NEXCO 総研により、トンネル覆工コンクリートの将来像を予測し、トンネル覆工コンクリートに特化して開発された「中流動コンクリート」材料の標準仕様化・展開が、高額な研究開発投資を可能とした（新規材料の創出・標準化が、適正な生産技術を生み出すパターン）、発注者の検査・施工承諾を得た、高品質の高度生産システムである。

お断り

この JCMA 報告は、受賞した原文とは一部異なる表現をしています。

