

第9回 ロボット大賞 国土交通大臣賞受賞

「トンネル覆工コンクリート自動施工ロボットシステム」実用化の取り組み

清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部 楠本 太

1. はじめに

山岳トンネル覆工コンクリート工の自動施工に取り組んでいる。熟練工の経験と技量を基本とする覆工コンクリート工の人力作業をPC制御の機械システムに置き換え、施工むらや品質のばらつきをなくす高品質覆工施工を確実にし、自動運転で作業時間を短縮するトンネル覆工コンクリート自動施工を実用化した。これまでに、道路トンネル4現場に採用し、2現場^{1),2)}で施工を完了、2現場で稼働中であり、3現場で計画中である。

本稿では、西日本高速道路株式会社、清水建設株式会社、岐阜工業株式会社で共同開発、実用化した「トンネル覆工コンクリート自動施工ロボットシステム」について、開発の背景、システム概要、1号機による実証結果を紹介する。

2. 開発の背景

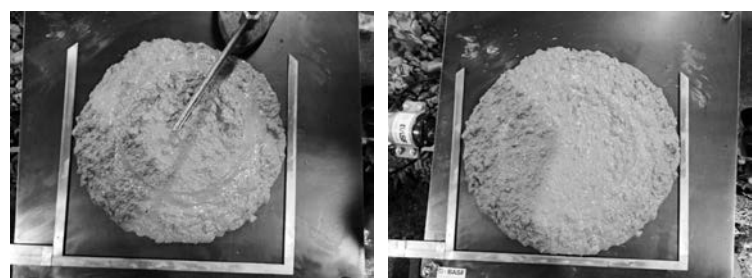
山岳トンネル覆工コンクリートは、修正JIS配合コンクリートをJIS生コン工場で製造している。これをトラックミキサー車で現場に運搬し、打込み高さ50cmを目安と

して、コンクリート配管を上方左右に切り替えながらコンクリートポンプで移動型枠内へ打込み、挿入式棒状バイブレータで締固めるコンクリート打設を人力作業で行っていた。

平成20年頃から、高速道路会社では、流動性に優れ材料分離がない中流動覆工コンクリートが山岳トンネル覆工に採用され、型枠バイブレータ(VB)による機械締固めが標準となり、PC制御による自動パターン締固めができるようになった(表-1、写真-1)。一方、コンクリート配管切

表-1 覆工コンクリート配合決定のための基準³⁾

コンクリート種別	T1-4 (Ad), T3-4 (Ad)
材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)	24
粗骨材最大寸法 (cm)	20, 25
スランプ、スランプフロー (cm)	21 ± 2.5, 35 ~ 50
空気量 (%)	4.5 ± 1.5
加振変形試験 (cm)	10 ± 3
U型充填性高さ (mm)	280 以上
最低単位セメント量 (kg/m ³)	320, 340
単位水量の上限 (kg/m ³)	175
最大塩化物含有量 (kg/m ³)	0.3

写真-1 T3-4 (Ad) スランプ試験結果¹⁾ (筒先サンプリング) (左：加振前、右：加振後)

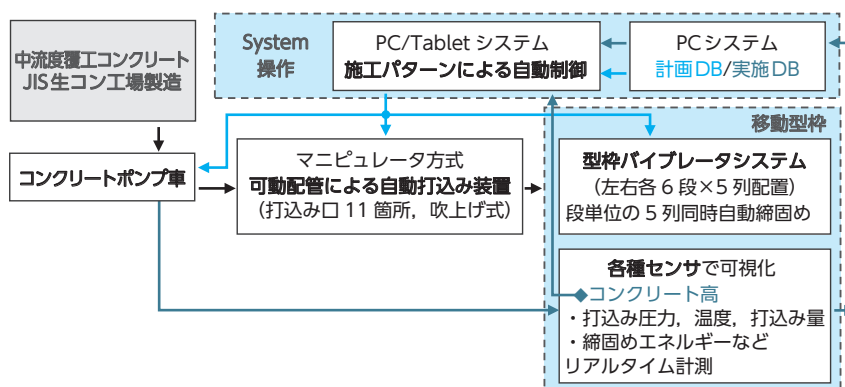
替えと移動型枠内コンクリート打込みを、PC 制御の機械システムにより施工する吹上げ方式コンクリート打込みが検討され、湯浅御坊道路川辺第二トンネル覆工において、「トンネル覆工コンクリート自動施工ロボットシステム」を設計、製作、試行し、適用性、有効性を実証した。

3. 覆工自動施工システム概要

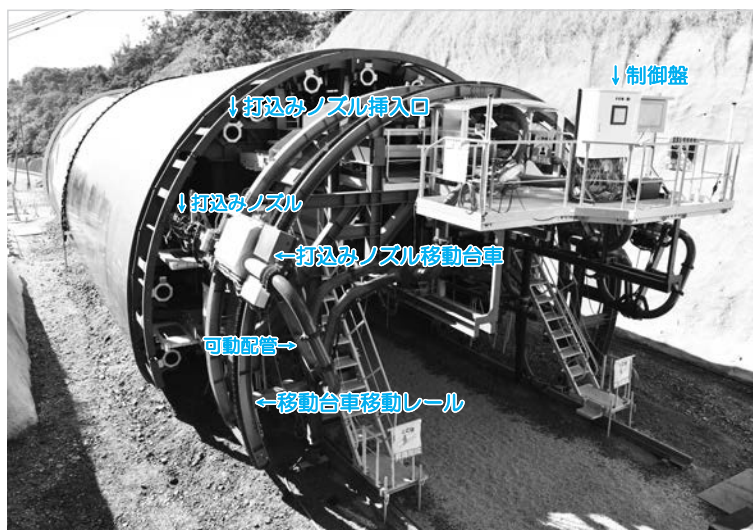
覆工コンクリートの締固めは、「型枠パイプレータ（VB）の加振で、打ち込んだコンクリートの表面が水平となり、流動が止まる状態にする」ことを基本とし、流動性に優れ、材料分離がない中流動覆工コンクリートの特性を活かす合理的な吹上げ方式の打込みを採用し、ワンマン自動施工を基本にしている。

コンクリート圧送、配管切替え、打込み装置の打込み口への移動、型枠パイプレータ（VB）締固めは、作業をパターン化し、PC システムによる機械制御で、覆工コンクリート施工を自動化する（図－1、写真－2）。打込み締固めの施工パターンは、PC システムの計画 DB で規定する。PC システムは、各種センサからのリアルタイムデータで施工状況を把握、監視し、計画 DB の施工順序に従ってマニピュレータ方式配管切替えと吹上げ方式打込み装置、型枠パイプレー

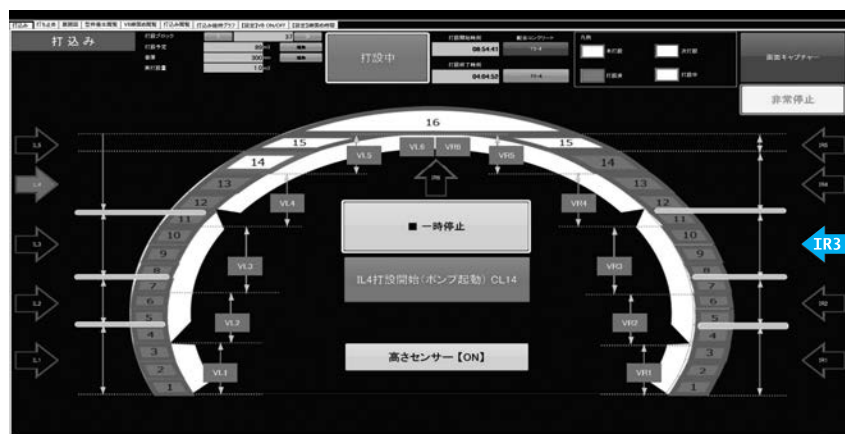
タシステムなどの各種装置およびコンクリートポンプを自動制御する（図－2、表－2）。施工状況や締固め状態は、各種センサからのリアルタイムデータで可視化、確認、監視でき、実施 DB に保存する（図－3、表－3）。



図－1 中流動覆工コンクリート自動施工システム概要



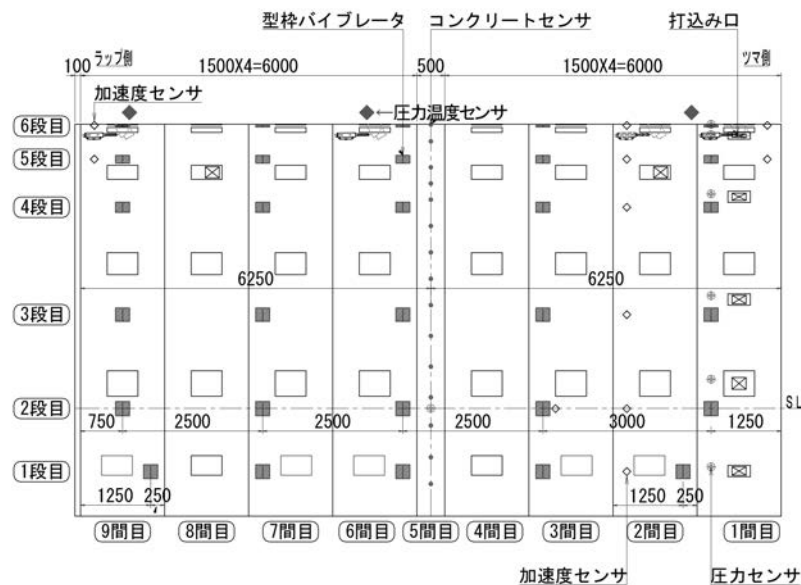
写真－2 マニピュレータ方式自動打込み装置全景



図－2 覆工自動施工システムメイン画面

表－２ 主要使用機械

機械名	規格・性能	台数	用途
バックホウ	0.25 m ³ 級	1	型枠レール移動、路盤整備
コンクリートポンプ車	8 t 級	1	コンクリート圧送、PS 制御
アジテータ車	4 m ³	3 以上	コンクリート運搬
繊維投入機	3 ～ 4 kg/min	1	繊維投入
マニピュレータ方式打込み装置	4 m/min	2	吹上げコンクリート打込み
打込み口	6 inch	11	移動型枠妻側、シャッタ自動開閉
打込みノズル	6 inch	2	自動打込み装置
打込みノズル移動台車	速度 4 m/min	2	
型枠バイブレータ (VB)	550 W, HKM55LFS	60	補助 (コンクリート締固め)
防水シート台車	R=5.0 m, L=6.0 m	1	自走式
スライドセントル	L=12.5 m	1	覆工自動施工用移動型枠工用
養生台車	L=37.5 m	3	密閉台車(1), 湿潤養生(2)



図－３ 型枠バイブレータ (VB) と各種センサ配置概要 (片側)

表－３ 主要センサ

センサ名	性能	台数	用途
コンクリートセンサ	1.0 N/mm ²	30	打込みコンクリート表面位置検知
圧力センサ	1.0 N/mm ²	13	打込みコンクリート圧力など
加速度センサ	235 m/s ²	19	締固めエネルギー算定
圧力温度センサ	1.4 N/mm ² , 85 ℃	3	打止め圧力, 脱型枠強度
沈下計	0.1 mm	4	移動型枠沈下量

4. 覆工パターン施工

覆工コンクリート施工は、打込み箇所番号順に左右切り替えながら施工フローに従って行う (図－４)。図中(1)の打込みは、PC システムから打込み箇所番号の打込み開始の確認が求められ、オペレータは PC 画面で確認、開始を指示する。これによりコンクリートポンプが稼働し、打込みを開

始する。打込み箇所の打込み高をコンクリートセンサが検知した時点でポンプは自動停止、打込みを終える。その後、(2)の型枠バイブレータ (VB) による締固めを開始し、15 秒間稼働する。この (1)、(2)を PC 画面で確認しながら打込み箇所最終番号まで繰り返す。コンクリートの打止めは、防水シート表面天端に貼り付けた 3 箇所の圧力温度センサからのコンクリート圧力と移動型枠の沈下が打止め管理目標値を満たし、密充填を判定した時点で、覆工施工を終える。初回のモデル施工



図-4 打込み箇所自動施工フロー

で、覆工自動施工システムの性能、動作を確認後、自動運転に切り替える。以後、システム監視者は、画面でシステム状態や施工状況、締固め状態を確認、監視し、施工を進める。打ち込まれたフレッシュコンクリートの性状確認、検査窓の閉鎖、打込みノズル挿入口の配管洗浄などを、1～2名の作業員が補佐する。

5. 試行工事結果

1号機で施工した川辺第二トンネル覆工の実証結果は、以下のとおりである。

(1) 打込み締固め状況

機械や装置などにトラブルはなく、PC システムは有効に機能し、所要性能を満足することを確認した。フレッシュコンクリート品質は安定しており、吹上げ方式打込み後のフレッシュコンクリート表面は、型枠バイブレータ（VB）締固め後も同様であるが、水平を保ち、ブリージング水は

なく、材料分離はみられず良好であった（図-5）。気温は13～14℃、コンクリート温度は18℃である。練り混ぜから打込み完了までの時間は60～90分、繊維補強コンクリート攪拌後（FB後）は24～28分である。

(2) 打込みコンクリート圧力

打込み口 11 箇所のコンクリート圧力とコンクリートポンプ押込み圧力を図-6 に示す。コンクリート押込み圧力の平均は 4.1 N/mm^2 ，最大は天端打込み箇所 16（図-2 参照）の 4.5 N/mm^2 である。打込み口 11 箇所における打込み箇所別コンクリート圧力の平均値は 0.015 N/mm^2 ，天端打込み箇所 16 は 0.011 N/mm^2 ，最大は打込み口 IR3 の 4 層時の 0.044 N/mm^2 となり，コンクリートポンプ押込み圧力の 0.4% 以下と小さく，吹上げ方式コンクリート打込み方法に課題はない。

(3) 打止めコンクリート圧力

妻側，中央，ラップ側 3 箇所の天端防水シート
表面のコンクリート打止め時圧力は，0.005

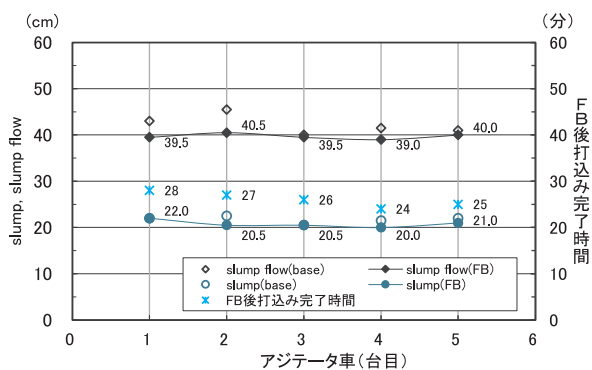


図-5 T3-4 (Ad) スランプとスランプフロー

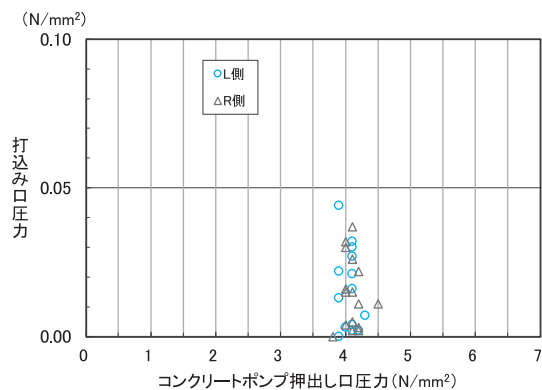


図-6 打込み口コンクリート圧力の最大値

N/mm² を超え、打ち込まれたコンクリートは圧力作用下にあり、移動型枠が-2～-5 mm 沈下、密充填を確認したので打止めた（図-7）。天端防水シート表面3箇所の打止め圧力の平均は、天端打込み箇所16の打込み圧力と同等である。

(4) 覆工コンクリート仕上がり品質

覆工表面仕上がり状態は、目視観察から、剥離、気泡、色むら、打重ね線などは見られず、吹上げ方式自動打込み装置と型枠バイブレータ（VB）パターン締固めの自動施工による覆工仕上がり面は、良好である（写真-3）。

(5) 覆工コンクリート強度特性

妻側、ラップ側の天端、締固めエネルギー評価の2間目の天端と左右SL部の計5箇所の反発度の平均値は、材齢3週で38.4 N/mm²である。これらの最大最小差は3 N/mm²であり、強度特性の反発度のばらつきは小さい。締固めエネルギーの違いによる差は、適正締固めエネルギー値3.7 J/Lを確保できているので有意な差はないが、適正值の約10倍以上のラップ側天端部は大きくなる（図-8）。これらから、吹上げ方式自動打込みパターン締固め方法は、強度特性のばらつきが小さい覆工施工法であることが示された。

6. おわりに

トンネル覆工の人力作業をPC制御の機械システムで自動化し、施工むらや品質のばらつきを抑制、高品質覆工施工を具体化し、ワンマン自動運転で作業時間を短縮できることを実証、実用化し、山岳トンネル覆工コンクリート自動施工の道を拓いた。

今後は、実用機を改良し、採用現場を増やし、山岳トンネル覆工の共通技術として発展、広く採用されるよう、トンネル覆工自動施工の普及に努めたい。

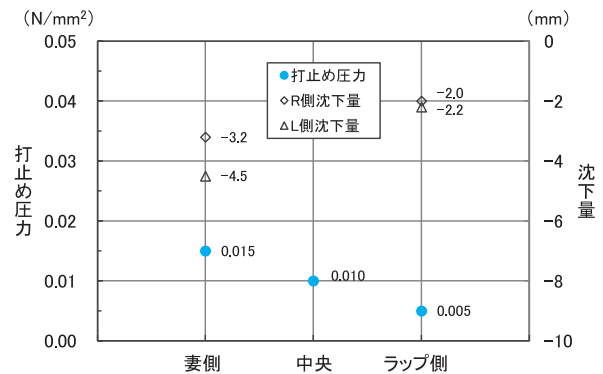


図-7 防水シート表面コンクリート圧力と移動型枠沈下量



写真-3 覆工コンクリート全景

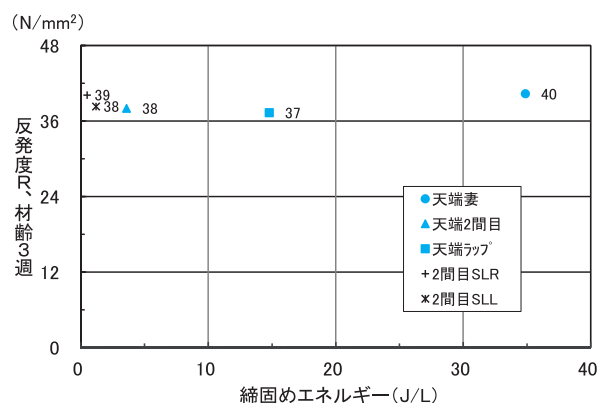


図-8 締固めエネルギーと反発度 R

【参考資料】

- 1) 信永博文・山中慎也・木村厚之：中流動覆工コンクリートをICT活用で自動施工，トンネルと地下，vol.51, no.3, pp.53-63, 2020.
- 2) 笹嶋和彦・水上裕介・谷村浩輔・楠本太：扁平大断面トンネル覆工を現場流動コンクリートを用いて自動施工，トンネルと地下，vol.52, no.2, pp.17-28, 2021.
- 3) 株式会社高速道路総合技術研究所：トンネル施工管理要領（本体工編），p.41，（繊維補強覆工コンクリート編），p.4，令和2年7月.