

中流動覆工コンクリートにおける 自動締固めシステムの適用性

小池 悠介¹・久保 則雄²・垣見 康介³
松永 厚彦⁴・遠藤 大治⁵・高杉 英則⁶・福田 毅⁷

¹正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1)
E-mail: y_koike@shimz.co.jp

²正会員 清水建設株式会社 高取山トンネル西工事事務所 (〒257-0031 神奈川県秦野市曾屋 841-3)
E-mail: n-kubo@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 高取山トンネル西工事事務所 (〒257-0031 神奈川県秦野市曾屋 841-3)
E-mail: kakimi_kousuke@shimz.co.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 川西工事事務所 (〒258-0112 神奈川県足柄上郡山北町岸 3709-8)
E-mail: a.matsunaga@shimz.co.jp

⁵正会員 清水建設株式会社 萱沼トンネル工事事務所 (〒258-0003 神奈川県足柄上郡松田町松田惣領 798)
E-mail: daiji@shimz.co.jp

⁶正会員 清水建設株式会社 高松トンネル工事事務所 (〒258-0112 神奈川県足柄上郡山北町岸 3709-8)
E-mail: h.takasugi@shimz.co.jp

⁷正会員 清水建設株式会社 新東名川西高松建設所 (〒258-0112 神奈川県足柄上郡山北町岸 3709-8)
E-mail: tys.fukuda@shimz.co.jp

従来、覆工コンクリートの打設では、天端部の締固め不足によるコンクリートの密実性の低下、コンクリート流動に伴う材料分離、充填不足による背面空洞の発生等が懸念されていた。そこで NEXCO は、これら不具合の削減のために中流動覆工コンクリートを開発し、2008 年(平成 20 年)にその施工の基本を施工管理要領に示した。その後改定を経て、現在の「トンネル施工管理要領」では、トンネル覆工の品質向上と施工性改善を目的として、セントルに取り付けた型枠バイブレータによる締固めを標準としている。著者らはトンネル施工管理要領に準拠しながら、より一層の品質の均一化と生産性の向上を目的として、型枠バイブレータによる締固めを自動化かつパターン化した。これに伴って取得された覆工施工パラメータに関する基本データと特性が得られたので報告する。

Key Words: *lining concrete, automatic compaction, medium-fluidity concrete, productivity improvement, quality improvement, safety improvement*

1. はじめに

NATMは国内に導入され、40年以上が経過し、その間、機械の大型化や掘削工法、補助工法等の新技術の開発により、不良地山の克服や大断面トンネルの施工に見られるように工法としての進化を遂げてきた。

今般、人口減少時代に伴う技能労働者の不足という問題に直面している。そのため、施工方法自体の改善を含めた生産性の向上や自動化による省力化は時代の要請であり、積極的に取り組んでいく必要がある。

このような背景から、NEXCO では、従来の覆工コンクリートよりも施工性が良く、高流動コンクリートよりも安価な中流動覆工コンクリートの適用を検討し、その性能基準や照査および施工方法をトンネル施工管理要領に取りまとめた¹⁾。現在のトンネル施工管理要領においては、セントルに取り付けた型枠バイブレータの振動のみでコンクリートを締固めることを標準としている。また、施工性に優れた中流動コンクリートを採用することで、技能労働者の技量・熟練度に依存しない、安定的に高品質な覆工を構築できることが期待されている。



図-1 新東名高速道路と当システムの適用現場

2. 覆工打設時の課題とシステム開発の目的

覆工コンクリートの打設作業において、従来よりいくつかの課題がある。まず、セントルは、内部に梁部材やジャッキ類が数多く配置され、作業員の往来や作業を行う空間は極めて狭隘となり、苦渋作業を強いられる。このような作業環境下で、長時間にわたり、狭隘な空間を移動しながら打設作業を行う作業員は、疲労を蓄積しやすく、これに起因して注意力の低下や機敏な動作を阻害する要因となり、転倒、転落、挟まれ災害を誘発することもある²⁾。

次に、コンクリート打込み時には、確実な充填を意識して無理な圧送を行うことで過大な圧送圧力が生じ、配管や棲枠の崩壊によるコンクリートの飛散が懸念される。

脱型では、打設初期に実施する若材齢試験から養生時間を決定し、脱型するのが一般的であるが、坑内環境によっては養生不足になる可能性があり、結果的に覆工コンクリートにひび割れを生じさせる等、構造上の不具合を発生させる懸念がある。

また、品質においても、技能労働者の技量や熟練度に左右された締固めを行うことで、品質の不均一性を生じさせることとなる。

そこで、著者らは、これら従来の課題を解決するとともに、より一層の生産性向上と品質の均一化を目指して、覆工コンクリート自動締固めシステムの開発を行った。

開発の着手は、2018年の湯浅御坊道路川辺第一トンネルにおけるトンネル S.L上（上半部）を対象とした自動締固め技術である。締固め方法をパターン化し、自動化の有効性を確認した³⁾。

本報告では、この開発成果を踏まえて S.L上（上半部）だけでなく S.L下（下半部）も含めたトンネル全周において、型枠パイプレータを集中制御し、その有効性の検証を行った。あわせて、配合や施工条件が異なる場合においても、均一な覆工品質を確保できることを検証した。これらの検証は、新東名高速道路高取山トンネル西工事、川西工事（谷ヶ山トンネル）（以下、川西工事と称す）、萱沼トンネル工事の3現場で実証試験を行った。本報告は、実証試験の結果から覆工施工パラメータに関する基本データとその特性が得られたので、ここに報告する。

3. 工事概要

図-1は、新東名高速道路のうち事業中区間である伊勢原大山 IC～御殿場 JCTを示している。そのうち本システムを展開（予定含む）している現場を明示している。東側（東京方面）から高取山トンネル西工事、萱沼トンネル工事、高松トンネル工事、川西工事である。本報告の実証試験現場は、高松トンネル工事を除く3現場で行ったものがある。

東側に位置する高取山トンネル西工事は、秦野市と伊勢原市を結ぶ全長約 3.9 キロメートルの 2 車線道路双設トンネルである高取山トンネルのうち西側の工区である。トンネル延長は上り線 1,573m、下り線 1,609m でいずれも 2% の下り勾配となっている。坑口部から約 300m 区間は小土かぶり部であり、そのうち坑口から約 100m はローム層が多く分布する未固結地山となっている。また、坑内湧水が多いという特徴がある。

隣接する萱沼トンネル工事は、神奈川県秦野市八沢と足柄上郡松田町寄を結ぶ全長約 1.4 キロメートルの 2 車線道路双設トンネルである。トンネル延長は上り線 1,363m, 下り線 1,358m で、神奈川県から静岡県側に向けて上り線が+0.3~-1.1%~-0.3%勾配, 下り線が+0.3~-1.0%~-0.3%勾配となっている。東側坑口の約 120m は、小土かぶり低強度地山となっている。また、西側坑口付近では、中津川断層を横断する工事である。

西側の川西工事は、全長約 2.8 キロメートルのうち、神奈川県山北町向原～神奈川県山北町川西を結ぶ約 1.2 キロメートルの 2 車線道路双設トンネルであり、静岡県と神奈川県を結ぶトンネルである。トンネル延長は上り線 1,207m, 下り線 1,167m でいずれも 2% の上り勾配となっている。地山は全線にわたって湧水は少なく、比較的良好な地山であるが、最小土かぶり約 5m の沢部直下を横断する工事である。

4. 覆工コンクリート施工

本報告では、本システムの適用にあたり、コンクリート配合、施工条件、セントル構造等の相違が締固め状況や覆工コンクリート品質に及ぼす影響を定量的に把握するために、上述した 3 現場で比較検討を行った。

(1) 自動締固めシステムの概要

自動締固めシステム³⁾とは、セントルに装着した型枠バイブレータの自動締固めとし、型枠を個別に操作するのではなく、セントルに設置するコンクリートセンサの信号を利用して、型枠バイブレータやコンクリートポンプをタッチパネルで集中制御して施工するものである。

システムフローを図-2に示す。締固め手順は、セントル中央に配置されたコンクリートセンサにより、所定の高さまでコンクリートが打ち上がると、ポンプ車のコンクリート圧送が自動停止し、型枠バイブレータが自動的に移動して締固めを行う機構である。コンクリートの打設は左右交互に行い、一連の動作をタッチパネルにて操作して施工する。

本システムは、上述したように覆工打設における各作業をタッチパネルにて集中制御するものである。そのため、従来覆工打設では、5 人体制で施工するのに対し、本システムの適用により、3 名まで省人化できると見込んでいる。また、本システムではモニター上で全施工状況を確認できるため、セントル内の狭隘な空間での移動が少なくなり、転倒、転落、挟まれ災害が低減する。さらに、コンクリート打込み作業を自動化することで、作業員の負担軽減を図り、疲労による注意力低下に起因したヒューマンエラーの抑制に寄与する。また、安全面に加え、型枠バイブレータをタッチパネルにて集中制御することで、自動締固めのパターン化が可能となり、均一

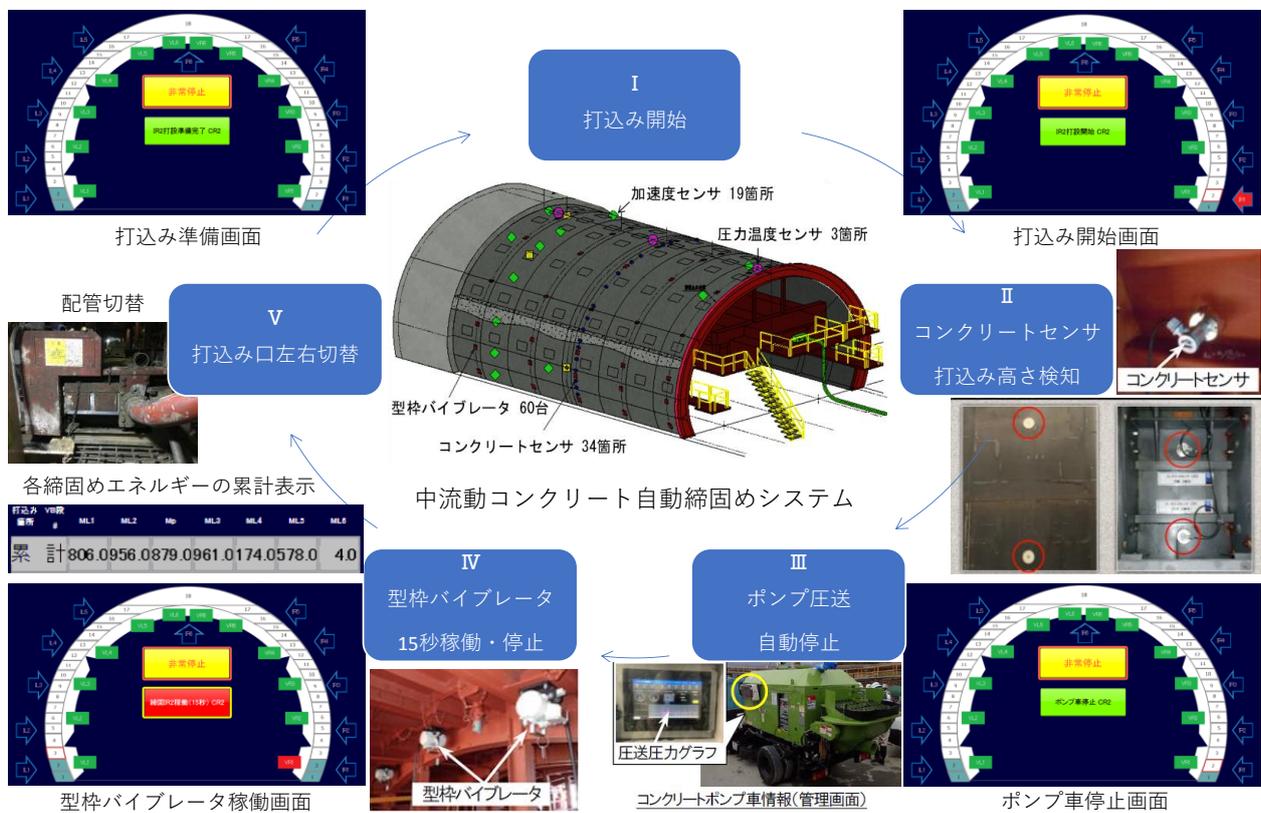


図-2 自動締固めシステムフロー

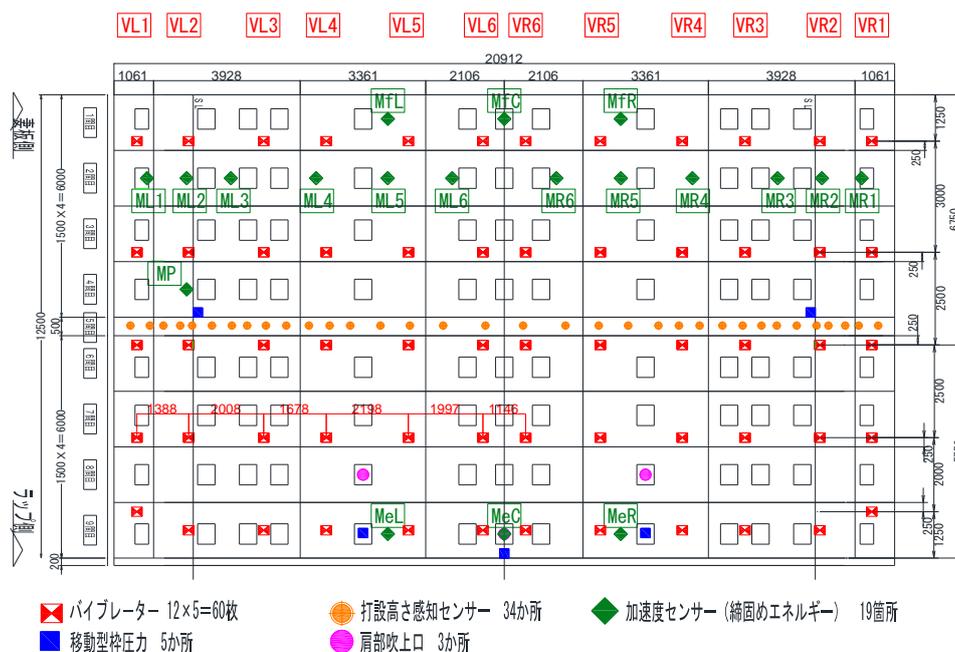


図-3 締固め機器とセンサ類の配置図

表-1 締固め機器とセンサ類の仕様

機器・計器	規格・性能値	台数	用途
型枠 バイブレータ	550M 100Hz	60	コンクリート締固め
コンクリート センサ	1.0N/mm ²	34	コンクリート表面 位置検知
加速度計	MAX 235m/s ²	19	振動エネルギー算定
圧力 センサ	MAX 2.0N/mm ²	5	コンクリート 打込み圧
圧力温度 センサ	1.4N/mm ² , 85℃	3	打ち止め圧力 脱型枠強度

なコンクリートを構築可能であり、打設圧力もリアルタイムで数値を確認できるため、覆工コンクリート背面の確実な充填を可能とする。すなわち、本システムの適用により、より一層の安全と品質の向上ができる。

型枠バイブレータおよび各種センサの配置を図-3に示す。各現場の型枠バイブレータの配置は、事前のモデル施工³⁾を経て、管理要領に定められた加速度の測定（最大加速度と最小加速度の平均値が3.7J/L以上を目安とする）により所定の振動エネルギーで締固められることを確認して配置した。また、その仕様は表-1に整理した。

(2) セントルに設置されたセンサ類

型枠バイブレータは、コンクリートが均一に締め固まるように、あらかじめ試験施工を行い、配置と稼働時間を定めた。型枠バイブレータの設置間隔は、高さ方向1.5m、延長方向3.0m以下とし、高さ方向に左右各6段、延長方向に5断面とする。稼働時間は1層あたり15秒とし、型枠バイブレータの稼働回数は最下段が5回、2段目が4回、3段目および4段目が3回、5段目が2回、最上段が1回とした。

コンクリートセンサはセントル中央に配置し、高さ方

向に300～500mmのピッチで設置する。コンクリートがセンサに触れるとセンサが反応し、上述した型枠バイブレータが稼働する機構である。

中流動コンクリートと型枠バイブレータによる覆工コンクリート打設を自動化するため、コンクリート圧送、配管切替、コンクリート打込み口の移動、バイブレータの締固めをPCで制御可能とした。また、図-4および図-5に示すようにシステム上でコンクリートの打込み状況を確認できる他、時系列グラフで各パラメータの値を確認することができる。本システムは7つの画面で構成され、画面上のタブにて切替え可能である。

締固めに必要な振動エネルギー⁴⁾が確実に投入されていることをモニタリングするために、最も振動エネルギーが小さくなる型枠バイブレータ間の中央に加速度センサを配置した。最大235m/s²まで計測可能である。

コンクリートの発現強度は累積温度と明瞭な関係があることが一般に認められており、セントル脱型に必要な強度について、累積温度を客観的に管理していくことで脱型時の強度不足を防止することが可能である。

累積温度は、覆工背面（防水シート表面）に貼付した温度センサからデータ取得し、図-6に示す集中制御パネルにてリアルタイムで数値化する。打設後も自動で温度データを取得して累積温度を集計する。

覆工コンクリート背面に空隙を残さず、確実な充填を行うためにはある程度の圧力でコンクリートを圧送する必要がある。すなわち、適切な圧送圧力を管理するとともに、覆工背面側に確実にコンクリートが充填されることを客観的な指標に基づいて管理することが重要である。そこで、コンクリートポンプの圧送圧力、覆工背面(防



図-4 打込み状況画面

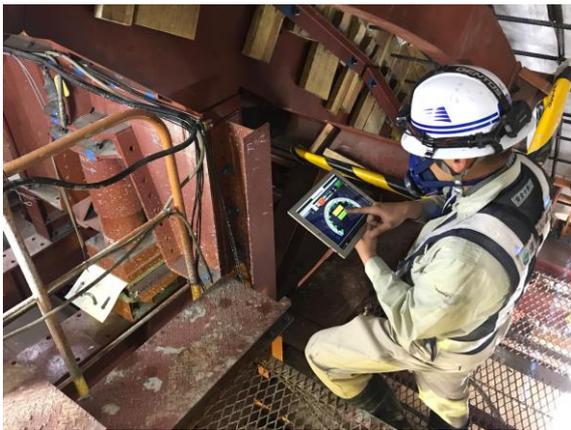


図-5 職員による打設進捗のリモート確認

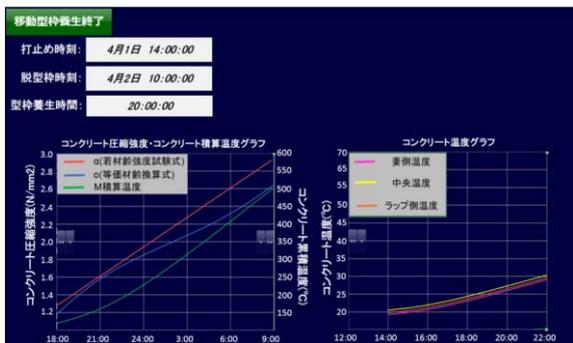


図-6 養生温度確認画面



図-7 打止め管理画面

水シート表面)にあらかじめ設置した圧力・温度センサから取得するコンクリート充填圧力をリアルタイムに測定し、システム画面に表示することで安全かつ確実な施工を行う(図-7)。

(3) コンクリート配合

中流動コンクリート、繊維補強覆工コンクリートの配合決定のための基準¹⁾を表-2に示す。

表-3にコンクリート配合に使用材料を示す。セメントCは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材はS₁(砕砂)、S₂(山砂)、粗骨材はG₁(砕石 2005)、G₂(砕石 2005)を用いた。混和剤SPは増粘剤一液タイプ高性能AE減水剤を使用した。繊維(PP)は、比重が0.91のポリプロピレンを使用し、形状はφ0.72×47を用いた。NEXCOトンネル施工管理要領²⁾に準拠して配合計画し、フレッシュ性状が良好であった配合を採用した。

高取山トンネルと萱沼トンネルでは、単位セメント量が350kg/m³であるが、川西工事では、単位セメント量が360kg/m³である。また、高性能AE減水剤の添加量が、高取山トンネルはC×1.15%、川西工事はC×1.30%、萱沼トンネルはC×1.25%であり、現場ごとに添加量が異なる。その他に、使用骨材や養生方法に相違があり、高取山トンネルでは養生バルーンとミスト噴霧による養生、川西工事では養生材散布、萱沼トンネルではアクアカーテンによる浸水養生を行った。上述した配合が異なるコンクリートに、本システムを適用することで、生コンクリート性状が硬化時のコンクリート品質に及ぼす影響を把握する。

(4) 各適用現場のセトル構造の特徴

高取山トンネル西工事のセトル構造を図-8、川西工事のセトル構造を図-9、萱沼トンネル工事のセトル構造を図-10に示す。図-8～図-10を比較すると、高取山トンネルのみにベルトコンベヤが併設されている。セトルの材質には、高取山トンネルと川西工事では、セラミック、萱沼トンネルでは無垢のものを用いた。また、

表-2 配合決定の基準

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
スランブ、スランブフロー(cm)		21±2.5, 35~50
空気量(%)		4.5±1.5
加振変形試験(cm)		10±3
U形充填性高さ(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(g/m ³)		300
繊維混入率(%)	—	0.3以上
材齢28日曲げ靱性係数(N/mm ²)	—	1.4より上

表-3 3現場のコンクリート配合

—高取山トンネル西工事—

スラブ (m)	スラブ フロー(m)	空気量 (%)	Q/MX (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位置量(kg/m)								繊維 混入率(%)
						C	W	S1	S2	GI	Q2	SP	PP	
21±2.5	42.5±7.5	4.5±1.5	20	50.0	50.0	330	175	621	257	882	-	3.680	2.73	0.3

—川西工事—

スラブ (m)	スラブ フロー(m)	空気量 (%)	Q/MX (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位置量(kg/m)								繊維 混入率(%)
						C	W	S1	S2	GI	Q2	SP	PP	
21±2.5	42.5±7.5	4.5±1.5	20	49.6	51.7	360	175	901	-	844	-	4.680	2.73	0.3

—萱沼トンネル工事—

スラブ (m)	スラブ フロー(m)	空気量 (%)	Q/MX (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位置量(kg/m)								繊維 混入率(%)
						C	W	S1	S2	GI	Q2	SP	PP	
21±2.5	42.5±7.5	4.5±1.5	20	50.0	50.0	350	175	625	266	535	345	4.025	2.73	0.3

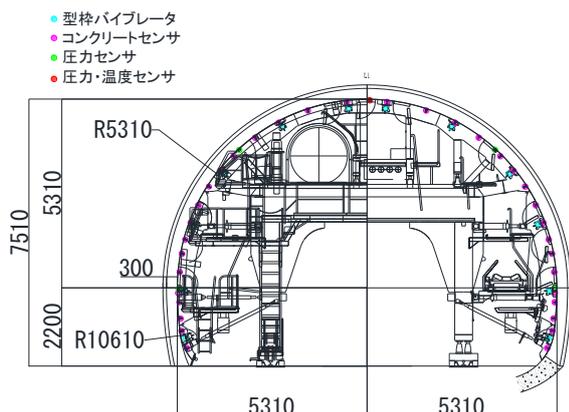


図-8 セントル断面図 (高取山トンネル西工事)

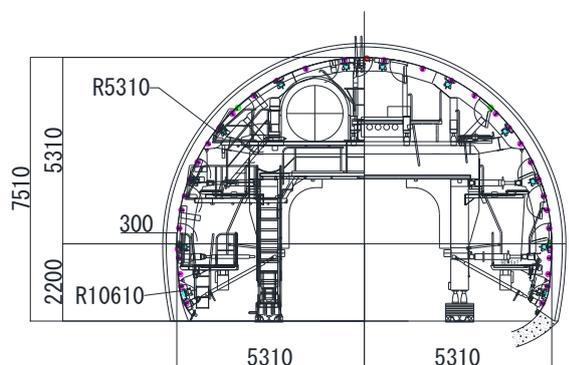


図-9 セントル断面図 (川西工事)

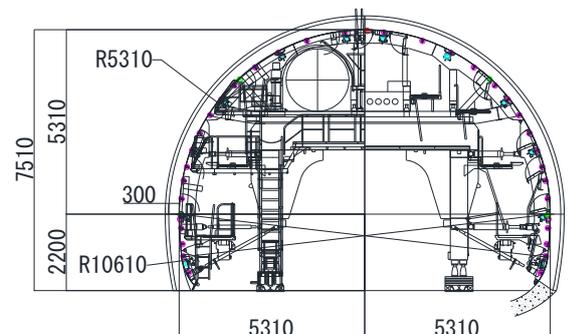


図-10 セントル断面図 (萱沼トンネル工事)

生コンクリートの投入口は、川西工事と萱沼トンネル工事ではセントル中央部、高取山トンネルではラップ側とした。なお、3現場ともにセントル延長は12.5mとし、機内配管にて施工を行った。本システムの適用にあたり、設備の有無、セントルの材質、生コンクリートの投入口の相違が、締固めに及ぼす影響を把握する。

(5) 覆工コンクリート性能評価

川辺第一トンネルにて、本システムの適用により、上半部のコンクリート品質は確認されている。そこで、本報告では、下半部にのみ着目して、コンクリート品質の確認を行い、性能評価を行った。

無筋アーチ構造を基本とする中流動覆工コンクリートの力学特性は、覆工施工4週後以降に、テストハンマーによる強度推定試験(JSCE-G 504-2007)で数値化し、強度特性を確認した。試験断面は、BL端部から1m離れの妻側とラップ側の両端、BL中央の位置で、SL下1mの計3箇所とした。また、コンクリート表層の緻密性を計測するために、透気試験を同位置にて行った。

5. 実証試験結果

施工条件の相違を表-4に示す。諸条件が異なる現場において、本システムを適用した結果を比較検討した。

締固めに必要な振動エネルギーとコンクリートの品質の相関関係を把握する目的で加速度の測定を行い、投入された振動エネルギーを定量的に把握した。コンクリートの品質を評価するために、材齢28日を経過した覆工コンクリートに対して透気試験、および強度特性を評価する非破壊試験を実施した。以下にその結果を示す。なお、計測数は、高取山トンネル西工事が14箇所、川西工事が12箇所、萱沼トンネルが6箇所にて実施した。

(1) コンクリート品質評価

図-11に3現場のスランプフロー試験結果の平均値を示す。3現場とも中流動コンクリートのスランプフロー

表-4 施工条件の相違

項目	高取山 TN	川西工事	萱沼 TN
コンクリート配合	24-21-20N	24-21-20N	24-21-20N
単位セメント量	350kg/m ³	360kg/m ³	350kg/m ³
粗骨材	砕石 2005	砕石 2005	砕石 2005
細骨材	砕砂, 山砂	細砂	砕砂, 山砂
高性能 AE 減水剤	C×1.15%	C×1.30%	C×1.25%
養生方法	養生バルーン ミスト噴霧	養生材散布	アクアカーテン による浸水養生
養生期間	7日	7日	28日
生コン運搬時間	40分	20分	30分
ペルコン有無	有	無	無
使用材料	セラミック	セラミック	無垢
生コン投入口	ラップ側	中央	中央
断面積	66.9m ²	66.9m ²	66.9m ²
セントル延長	12.5m	12.5m	12.5m

の管理値である 35~50cm を満足している。高取山トンネルと萱沼トンネルは、概ね 46cm のスランプフロー値を示している。一方、川西工事は 42cm 程度を示し、他の現場に比べスランプフロー値が小さい。このように例えばスランプフロー値の違いが、本システムを適用する中で、締固め性や最終的なコンクリート品質に及ぼす影響について考察した。

(2) 振動エネルギー計測結果

前述したように各現場の型枠バイブレータは、最大加速度と最小加速度の平均値から算出される振動エネルギーが 3.7J/L 以上になることを確認して配置している。

各現場の実機において、型枠バイブレータの性能は同じであるため、型枠バイブレータ直近の締固めエネルギー（最大値）は同じであるが、型枠バイブレータから最も離れた箇所（最小値）においては、セントルの構造に依存されるものと考えられる。そこで、振動エネルギーが最も小さくなる型枠バイブレータ間の中央で測定されたデータを分析し、コンクリート性状やセントル構造の違いによる投入エネルギーの違いについて考察した。

各現場の測定結果を図-12~図-14 に示す。各現場での型枠バイブレータ直近の振動エネルギーは概ね 20.0J/L であった。また、最も振動エネルギーが小さくなる型枠バイブレータ間の中央における振動エネルギーは、最も小さい値が概ね 1.0J/L であり、川辺第二トンネル⁹⁾と同程度であった。すなわち、1回あたり締固め時間を 15 秒とする型枠バイブレータのパターン締固めは、加振点と評価点の平均が最小でも約 10.5J/L となり、適正振動エネルギーの 3.7J/L より大きく、十分な締固めが為されていることを確認した。

以上のことから、コンクリート性状やセントル構造の違いが締固めに及ぼす影響はほとんどないと言える。

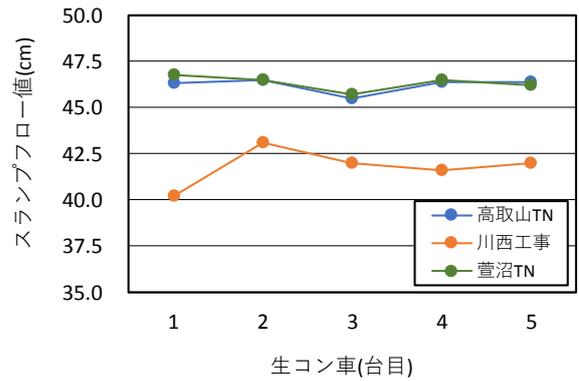


図-11 スランプフロー値の平均値

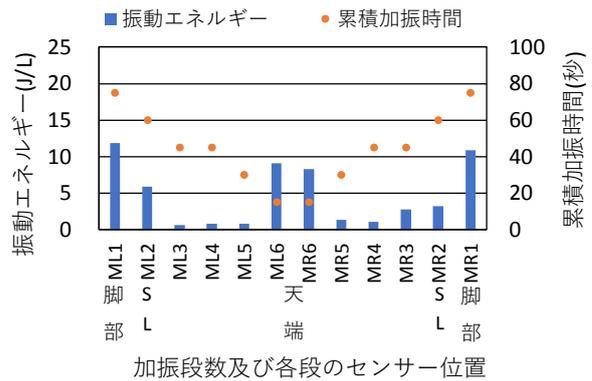


図-12 高取山トンネルの振動エネルギー

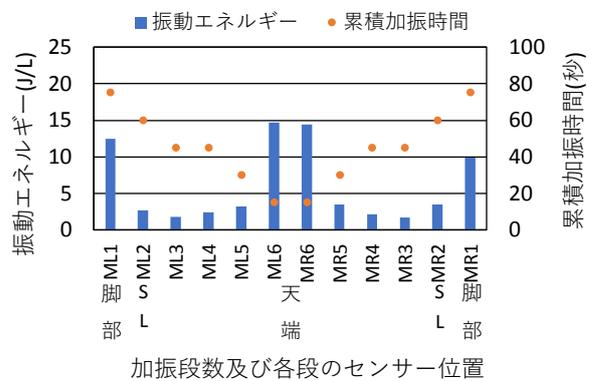


図-13 川西工事の振動エネルギー

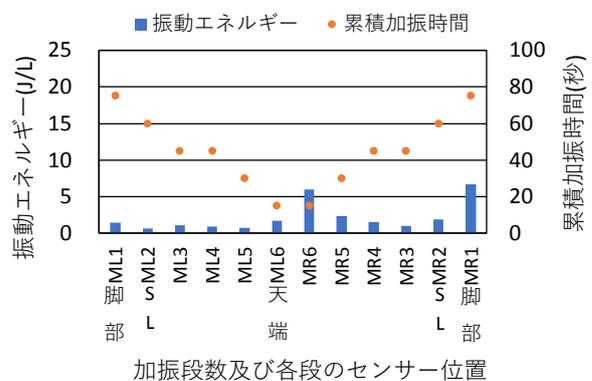


図-14 萱沼トンネルの振動エネルギー

(3) 表層透気係数計測結果

覆工コンクリート表面の表層透気係数計測結果の平均値を図-15に示す。高取山トンネルと川西工事の透気係数に着目すると、測定箇所に関わらず、概ね $0.10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を示している。すなわち、スランプフロー値に相違があっても、透気係数に及ぼす影響は小さいと言える。また、萱沼トンネルの透気係数は、測定箇所に関わらず、 $0.50 \times 10^{-16} \sim 0.60 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度の透気係数であった。これは、振動エネルギーが他現場と比較して小さいことやセメント材質が無垢であるためと考えられるが、 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 未満であるため、標準グレードのコンクリート表層を構築しており、品質的に問題ないと言える。

以上のことから、縦断方向における差異は小さいため、均一性は確保できたといえる。緻密性においても、標準～良好グレード相当の品質を確保した。また、スランプフロー値よりも振動エネルギー値の差異がコンクリート表層の緻密性におよぼす影響の方が大きく、適正振動エネルギーにて締固めることが重要であると言える。

(4) 非破壊試験結果

覆工コンクリートの非破壊試験結果の平均値を図-16に示す。3現場ともに推定圧縮強度は、測点に関わらず、 $40 \sim 42 \text{N/mm}^2$ であり、また、各現場ともに全ての測点で材齢28日における供試体の推定強度の85%以上であり、

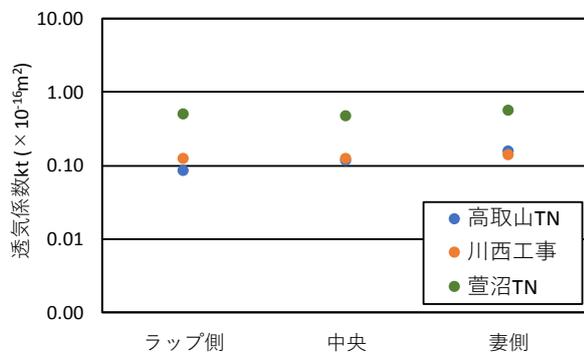


図-15 表層透気係数計測結果

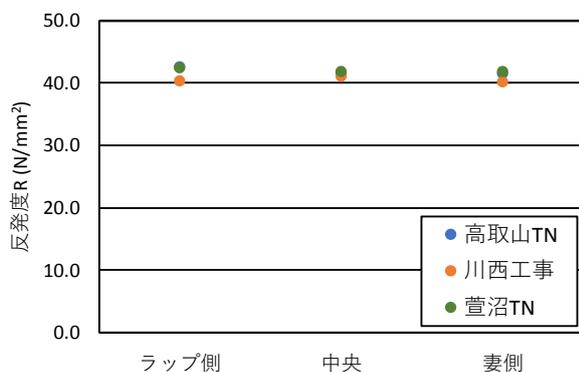


図-16 非破壊試験結果

十分な強度を有していることを確認した。さらに、透気試験同様に縦断方向のばらつきも小さく、各現場でそれぞれ推定強度のばらつきが 1N/mm^2 程度であるため、強度の均一性も確保されていると言える。

以上のことから、スランプフローおよび振動エネルギーの差異が強度に及ぼす影響は小さく、規格値内の中流動コンクリートであれば、中流動コンクリート自体の自己充填性により、所定の強度を確保できると言える。

6. 試験結果まとめ

本システムは、セメントに装着した型枠バイブレータの自動締固めとし、型枠を個別に操作するのではなく、セメントに設置するコンクリートセンサの信号を利用して、型枠バイブレータやコンクリートポンプをタッチパネルで集中制御して施工した。締固め手順は、セメント中央に配置されたコンクリートセンサにより、所定の高さまでコンクリートが打ち上がると、ポンプ車のコンクリート圧送が自動停止し、型枠バイブレータが自動的に稼働して締固めを行った。コンクリートの打設は左右交互に行い、一連の動作をタッチパネルにて操作して施工した。型枠バイブレータの設置間隔は、高さ方向1.5m、延長方向3.0m以下とし、高さ方向に左右各6段、延長方向に5断面とした。稼働時間は1層あたり15秒とし、型枠バイブレータの稼働回数は最下段が5回、2段目が4回、3段目および4段目が3回、5段目が2回、最上段が1回とした。

スランプフロー値に着目すると、3現場とも中流動コンクリートのスランプフロー許容値である35～50cmを満たした。高取山トンネルと萱沼トンネルのスランプフロー値は46cm程度であり、川西工事のスランプフロー値は42cm程度であった。

振動エネルギーに着目すると、コンクリート性状やセメント構造の相違に関わらず、各現場で適正振動エネルギーの3.7J/Lを満たし、十分な締固めが為されていることを確認した。

高取山トンネルと川西工事の透気係数に着目すると、測定箇所に関わらず、概ね $0.10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を示した。また、萱沼トンネルの透気係数は、測定箇所に関わらず、 $0.50 \times 10^{-16} \sim 0.60 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度の透気係数であった。これは、振動エネルギーが他現場と比較して小さかったことやセメント材料に無垢を用いたためと考えられる。縦断方向における差異に着目すると、ばらつきは小さいため、均一性を確保できたといえる。また、緻密性においても、標準～良好グレード相当の品質を確保した。また、3現場ともに推定圧縮強度は、測点に関わらず、 $40 \sim 42 \text{N/mm}^2$ であり、全ての測点で材齢28日における供試体の推定強度の85%以上であることから、十分な強度

を有していることを確認した。さらに、透気試験同様に縦断方向のばらつきも小さく、各現場でそれぞれ推定強度のばらつきが 1N/mm^2 程度であるため、強度の均一性も確保されていることを確認した。

7. 自動締固めシステム適用による効果

本報告では、本システムの適用における下半部のコンクリート品質に着目して性能評価を行った。下半部においても、透気係数および推定圧縮強度ともに要求品質を満たしており、縦断方向でのばらつきも小さいことから、川辺第一トンネルでの結果と合わせて考慮すると、本システムの適用により、トンネル全周方向で、より一層の高品質化および均一化を可能としたと言える。さらに、従来覆工コンクリートの打設では、5人体制で棒状バイブレータによる締固めを行っていたのに対し、本システムでは、コンクリートの締固めに要した人員を削減できるため、オペレータと確認者2人の3人体制での締固めが可能となり、生産性向上に寄与した。

本システムの適用では、締固めのパターン化、打設圧力及び天端圧力の数値化、脱型までの累積温度から算出される若材齢時の圧縮強度可視化を可能とした。すなわち、本システムの適用により、狭隘な空間での作業員の往来や作業を削減でき、ヒューマンエラーに起因した災害を未然に防ぐことに貢献したと言える。また、コンク

リートの確実な充填や、強度発現に必要な養生後の脱型が可能となったため、コンクリート施工に伴う災害抑制にも寄与した。

今後は、本実証試験により得られた知見を踏まえ、更なる生産性・安全性の向上を目指して隣接工事の高松トンネル工事へ展開する予定である。

参考文献

- 1) 高速道路総合研究所：トンネル施工管理要領(本体工編)，p.41，2017.7.
- 2) 日本トンネル専門工事業協会：トンネル覆工作業における労働災害発生事例及び作業環境の調査研究とその対策調査報告書，2015.3
- 3) 信永博文，山中慎也，木村厚之，山中将：中流動覆工コンクリートの打込み締固め方法をパターン化，湯浅御坊道路 川辺第一トンネル，トンネルと地下，Vol.49，No.7，pp35-44，2018.7.
- 4) 高速道路総合研究所：トンネル施工管理要領，p.47，2017.7.
- 5) 高速道路総合研究所：トンネル施工管理要領(繊維補強コンクリート編)，p.4，2017.7.
- 6) 信永博文，山中慎也，山中将：中流動覆工コンクリートの ICT 活用で自動施工，湯浅御坊道路 川辺第一トンネル，トンネルと地下，Vol.51，No.3，pp53-63，2020.3.

(2020. 8. 7 受付)

APPLICABILITY OF AUTOMATIC COMPACTION SYSTEM FOR LINING CONCRETE USING MEDIUM FLUIDITY CONCRETE

Yusuke KOIKE, Norio KUBO, Kousuke KAKIMI, Atsuhiko MATSUNAGA,
Daiji ENDOH, Hidenori TAKASUGI and Tsuyoshi FUKUDA

For conventional method of tunnel concrete lining, there have been concerns about the deterioration of concrete density due to insufficient compaction at the top end, material segregation during concrete placement, and local cavities due to insufficient filling. In order to reduce these defects, NEXCO (Nippon Expressway Company Limited) has developed medium-fluidity concrete lining, and the basics of its construction were described in the Construction Management Guidelines in 2008. The current "Tunnel Construction Management Procedure", which has been revised since then, makes the compaction of the formwork vibrators attached to the mobile formwork as the standard for the purpose of improving the quality and workability of tunnel concrete lining. The authors will report the automatic compaction by the formwork vibrator which is patterned in order to further improve the quality and productivity of the construction work. The basic data and characteristics of the lining construction parameters are obtained in accordance with the tunnel construction management guidelines.