

自己充填コンクリートを用いた覆工自動化施工の開発

ー現場実装による検証ー

Development of automated lining construction using Self-Compacting Concrete -Verification by on-site implementation-

キーワード

トンネル覆工, 自己充填コンクリート,
自動化, 充填, 圧入

弘光 太郎*, 小山 広光*, 藤原 正佑*,
小野 知義*, 宇野 洋志城**

研究概要

覆工施工のさらなる省力化, 省人化および覆工の品質確保を目的として, 令和3年度2 災公共土木施設災害復旧工事(足瀬トンネル)の一部区間に自己充填覆工構築システムを適用した。セントル下端からの自己充填コンクリートの圧入により, 締固め作業および上方への配管の切替え作業を行わずに良好な覆工を構築することができ, 省力化や品質確保に加え作業環境の改善が可能であることを実証した。本稿は, 自己充填覆工構築システムの概要および足瀬トンネルへの適用について報告するものである。

ABSTRACT

A self-compacting concrete lining construction method was applied to a section of the Ashise Tunnel to further reduce labor and manpower and to ensure the quality of the lining. It was demonstrated that the method can construct a good lining without compaction and switching pipes upward by injecting self-compacting concrete from the lower end of the tunnel, and that the method can improve the working environment in addition to saving labor and ensuring quality. This paper presents the outline of the self-compacting lining construction method and its application to the Ashise Tunnel.

1 はじめに

従来, 山岳トンネルの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作業窓から打ち込み, バイブレータで締め固めて充填させ, 配管を順次上部へ切り替える方法で行われている(図-1参照)。打設前の準備作業から清掃作業に渡り, 狭隘な空間での作業を余儀なくされるため作業員に掛かる負担は大きく, 技量や経験に頼らざるを得ないのが実状である。さらに, 近年の建設作業員の高齢化や熟練工不足により, 近い将来, 従来工法を継続することが困難となることが予想され, 施工に起因する不具合の発生が懸念される。

これらの課題を解決するため中流動コンクリートが開発され, 実用化されているが, 締固め作業を完全に排除することができないことから, 省力化や品質確保に対してはまだ課題があるのが現状である。筆者らは, 覆工施工のさらなる省力化および省人化に加え, 覆工の品質確保を目的に, 自己充填コンクリートを用いてトンネル覆工を自動化

する自己充填覆工構築システムの開発を進めてきた(図-2参照)。本技術のおもな特徴は, 自己充填コンクリートを使用していることと, セントル下端からの圧入方式を採用していることである。

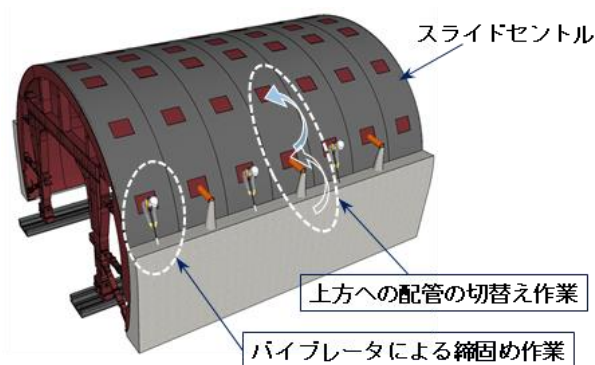


図-1 従来工法

* 技術センター 土木研究部, ** 技術センター

本稿では、長野県発注のトンネル工事である2災公共土木施設災害復旧工事（足瀬トンネル）において自己充填覆工構築システムを導入した結果について報告する。

2 工事の概要

令和2年7月の梅雨前線豪雨により、長野県下伊那郡天龍村（図-3参照）では推定土量約2万 m³の大規模な斜面崩落が発生し、国道418号の通行止めなどの措置を余儀なくされた。国道418号はこの地域の重要な生活道路であり、南信州の産業や観光に大きな役割を果たしているため、この崩落箇所をトンネルによるバイパスで早期に迂回させる必要があった。

表-1に工事概要を示す。崩落箇所を迂回するバイパスは長さ629mで、このうち足瀬トンネルは延長391m、内空幅9.0mの2線道路トンネルである。

足瀬トンネルは内空断面積が48m²と中小断面に分類されるため、作業空間が一般的なセントルより狭隘となり、作業性および視認性の低下による充填不良などの品質低下が懸念された。そこで、狭隘空間での作業を伴わず、型枠バイブレータの振動で締固めおよび充填が可能となる中流動コンクリートが採用された。今般、覆工の品質を確保しつつ、さらなる施工の省力化および省人化を目的として、一部区間（施工延長90m、10ブロック）に自己充填覆工構築システムを適用した。

3 自己充填覆工構築システムの適用計画

3.1 自己充填覆工構築システムの概要

自己充填覆工構築システムは、コンクリート打込み時に作業窓を使用せず、自己充填コンクリートをスライドセントル下端から圧入するという方式を採用していることが従来工法と異なる点である。図-4にスライドセントルの概要図を示す。自己充填コンクリートをスライドセントルの下端に設けた圧入口から型枠内に圧入し上方へ流動させることにより、従来工法では必須であったバイブレータによる振動締固め作業および打込みの進行に伴う上方へ

の配管切替え作業を必要とせず、覆工の天端部までコンクリートを充填することが可能となる。このような狭隘空間での作業を省略することにより、覆工施工の省力化および省人化を図るとともに、施工時のヒューマンエラーに起因する品質の低下を抑制することが可能となる。

3.2 コンクリートの配合

表-2に足瀬トンネルで使用した中流動コンクリートと自己充填コンクリートの配合を示す。既往の研究結果¹⁾を

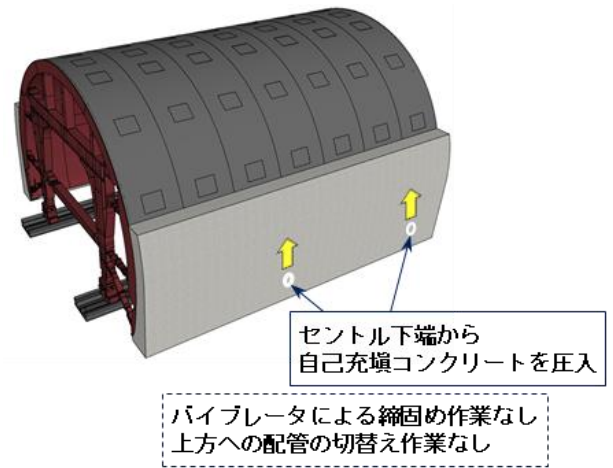


図-2 自己充填覆工構築システム

表-1 工事概要

工事名	令和3年度2災公共土木施設災害復旧工事 (足瀬トンネル)
工事場所	長野県下伊那郡天龍村足瀬
発注者	長野県
施工者	佐藤・木下特定建設工事共同企業体
工期	令和3年12月～令和5年9月
トンネル概要	延長：391m 全幅：7m、覆工内空：48m ² 、縦断勾配：1.1%(下り)



図-3 工事位置図

踏まえ、今回の適用において使用する自己充填コンクリートはスランプフロー600±50mm、自己充填ランク3とした。

写真-1に試験練り時の自己充填コンクリートの性状を示す。設定した配合で練り混ぜた自己充填コンクリートは、水や骨材の分離がなく、適度な粘性を有していることを確認した。

3.3 液圧に対応したセントル設計

写真-2にスライドセントル内部の状況を示す。自己充填コンクリートは、高性能 AE 減水剤を使用して圧入時の流動性を保持させているため、圧入後にスライドセントルに作用する側圧は液圧となり、圧入完了後も長時間にわたって側圧が減少しにくくなる。本工事では、自己充填コンクリート施工に対応したものとするため、スライドセントル内部に胴梁の設置や補強部材の追加を行った。

3.4 圧入方法

コンクリートの圧入は、スライドセントル下端に設けた圧入口に接続した配管からコンクリートポンプ車を使用して行った。中流動コンクリート施工で使用したポンプ車を用い、コンクリートの供給遅延による断続的な圧送とならないよう、圧送の吐出量を随時調整して圧入を行うこととした。また、コンクリートの充填の際には、棒状パイプレータや型枠パイプレータによる締固めを行わないこととした。

図-5に圧送配管の配置および圧入方法を示す。圧入口は左右2箇所（計4箇所）設け、左右の圧送経路の切替は路盤上に設置した配管切替え装置のレバー操作により行った。

側壁部から肩部にかけてのコンクリートの圧入は、片側2箇所の圧入口を同時に使用して行った。圧入時に左右の打上がり高さの差により偏圧が生じないように交互に圧入を行い、打込み高さは1層あたり0.5m程度とした。充填状況は、スライドセントルに設置した計66箇所の打設高さ検知センサを接続したモニタで管理し、1層打ち上がるごとに配管を切り替えた。

天端部のコンクリートの圧入は、片側のラップ側圧入口1箇所から行い、ラップ側からつま側にかけて充填させる

ように圧入した。天端部の圧入に切り替えると同時に、つま側への圧送経路を遮断するためピンバルブおよび圧入口を閉鎖した（図-5参照）。コンクリートの充填状況は、覆工天端部（防水シート側）に設けた充填感知センサと、スライドセントル天端部のラップ側、中間、つま側に設置した圧力計の値で確認した。ラップ側における未充填箇所の発生を防止するため、天端部（防水シート面）に配置し

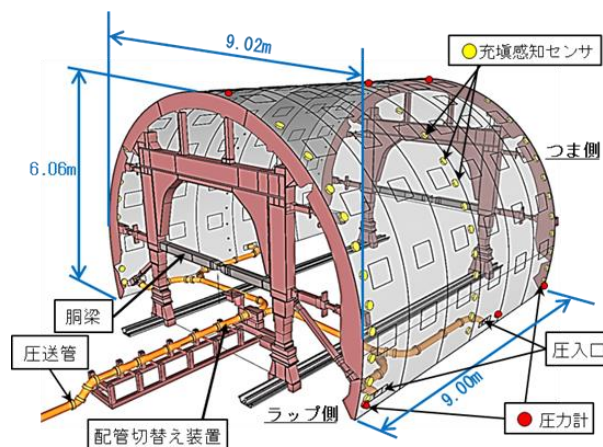


図-4 スライドセントルの概要図



写真-1 自己充填コンクリートの性状

表-2 コンクリートの配合

配合	スランプ (cm)	スランプ フロー (mm)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	SP
中流動	21±2.5	350~500	46.0	53.0	5.5	164	354	945	842	2.83
自己充填	—	600±50	36.4	52.1	5.5	160	440	897	829	5.50

C：普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)

S：川砂(長野県遠山川産, 表乾密度 2.66g/cm³, 粗粒率 2.80)

G：川砂利(長野県遠山川産, 表乾密度 2.68g/cm³, 粗骨材最大寸法 25mm, 粗粒率 6.90)

SP: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体)

た吸引ホースおよびスライドセントルのエア抜きピンを併用して天端部の圧入を行った。打込み完了の判定は、コンクリート充填感知センサの表示とつま型杵の打音により行い、充填完了後に圧入口を閉鎖して打込みを完了することとした。

3.5 現場施工時に想定されるトラブル対策

現場施工においてはコンクリートの供給や施工時のトラブルなどによって途中で圧入が中断されることが考えられる。圧入が中断し、時間が経過した場合は、配管の閉塞や、打重ね時間間隔が伸びることによるコールドジョイントの発生が懸念される。そこで、連続して圧送を行うため、アジテータ車を2台配置できるようにポンプ車の位置を調整し(写真-3参照)、コンクリートの供給の状況を随時確認した。また、土木学会コンクリート標準示方書では、許容打重ね時間間隔の上限を2.5時間と規定している。既往の研究結果¹⁾から、つま側肩部に充填されたコンクリートの上にラップ側から流動したコンクリートが打ち重なるまで約1時間を要することを確認しており、圧送の間隔が1.5時間を超える場合は下端部の圧入口から吹上げ口に配管を切り替えて打込みを行うこととした。さらに、打重ね時間間隔に大幅な遅れが生じ、未充填箇所やコールドジョイントの発生が生じる可能性がある場合に限り、型杵バイブレータを使用することとした。

4 自己充填覆工構築システムの適用結果

足瀬トンネルへの自己充填覆工構築システムの適用は、令和5年3月～4月に行った。施工中に大きなトラブルは発生せず、圧送が途切れた時間は最大でも30分未満であったため、バイブレータを一切使用せず施工を完了した。

4.1 打設時間

コンクリートの打込みに要した時間は、中流動コンクリートの場合で4時間20分程度であったのに対し、自己充填コンクリートでは平均で3時間3分であり、約1時間20分短縮できることが確認された。中流動コンクリートの場合には一般に、打上り速度を1.5m/h程度としてスライドセントルの設計を行っているため、打込み時間は最短でも4時間程度必要であるが、自己充填コンクリートの場合には液圧でスライドセントルの設計を行っており、打上り速度に制約がないため、作業の簡略化により打込み時間の短縮につながった。

4.2 充填管理

側壁部の打込みは、型杵面に設置した打設高さ検知センサによってリアルタイムに充填状況および充填高さを確認して行った(写真-4参照)。1層ごとに配管を切り替えて左右交互に充填を行ったが、コンクリートの流動方向はラップ側からつま側へと終始一定の方向に安定していた。天端部の打込みは、天端部(防水シート側)に設置した

充填感知センサと圧力値によってコンクリートの充填状況を確認することにより、未充填箇所を発生させること



写真-2 スライドセントル内部の状況

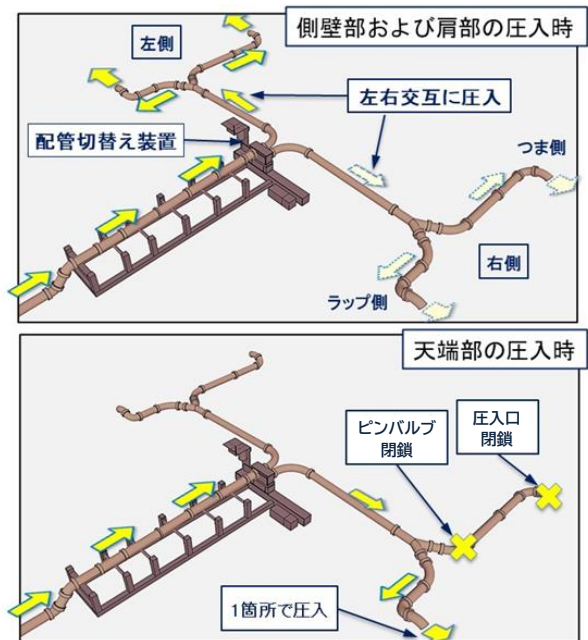


図-5 圧送配管の配置および圧入方法



写真-3 コンクリート打込み状況

なくコンクリートを充填することができた。

写真-5に天端部の充填状況を示す。施工箇所は1.1%の下り勾配の施工条件であったが、充填感知センサはラップ側から順に感知し、目視によってもラップ側からつま側の方向へ流動している様子が確認された。

4.3 圧力測定

図-6にセントル下端部に設置した圧力計の値の一例を示す。左右の圧力履歴は同様の傾向を示しており、配管切替装置で左右交互に圧入を行うことにより、打上がり高さの差による偏圧は生じなかった。また、圧力値は圧入開始からおよそ1時間までは液圧の計算値とほぼ同じ値で推移し、圧送に合わせて増減を繰り返しつつ、圧入完了直前に最大値に到達した。圧入開始から1.5時間後以降はあまり圧力が増加しなかったが、コンクリートのスランプや打上がり速度によって、その大きさや型枠面に作用する範囲は異なることが考えられる。既往の実験では最後まで液圧が測定されており、条件によって液圧が作用する可能性が排除できない。そのため、流動性の高い自己充填コンクリートを使用する本工法において現段階では、打上がり高さに自己充填コンクリートの単位体積重量を乗じて求められる液圧によりスライドセントルの設計を行う必要がある。

図-7に天端部の圧力測定結果を示す。圧力はラップ側、中央、つま側の順で上昇しており、下端部1箇所からの圧入によってラップ側からつま側の方向へ充填したことを示す結果となった。

4.4 施工時の体制

写真-6にコンクリート打込み状況を示す。コンクリート打込み作業はモニタによる型枠内部の充填確認および配管切替操作1名と、つま型枠監視2名の計3名で行うことができた。圧入中は、充填状況をモニタにより確認しつつ、配管切替装置のレバー操作により1層ごとに圧送経路を切り替える作業を繰り返し行った。打上がり高さが天

端部に達した時点で、圧入口とピンバルブの閉鎖を行ったのち、圧送を再開して下端部の圧入口1箇所から天端部充填完了まで圧入を継続した。従来工法における作業窓付近での作業を必要としないため、圧入中は狭隘空間での作業の省略や、パイプレタによる騒音が発生しないことにより、コンクリート打込み時の作業環境が改善した。

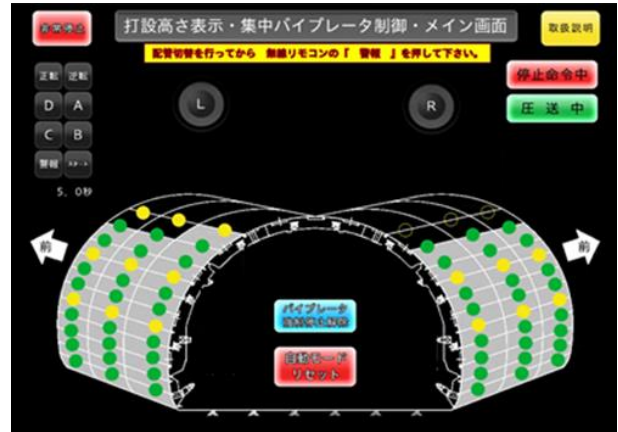


写真-4 コンクリート充填確認状況

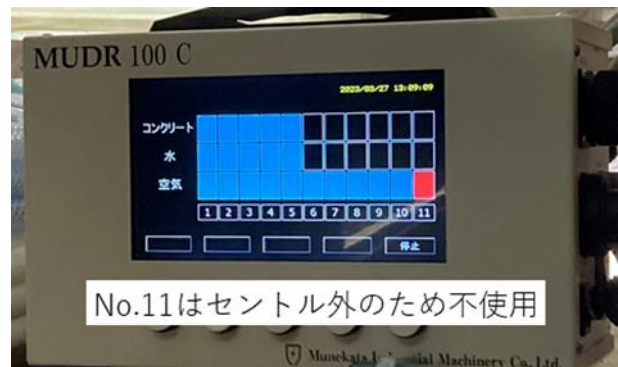


写真-5 天端部充填中の充填確認状況

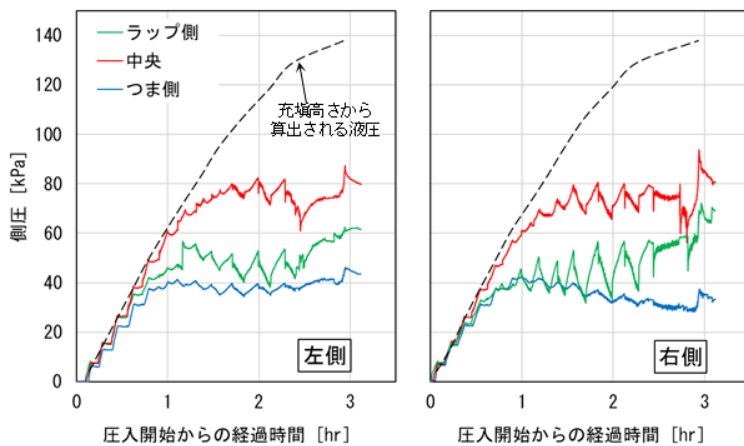


図-6 下端部の圧力測定結果

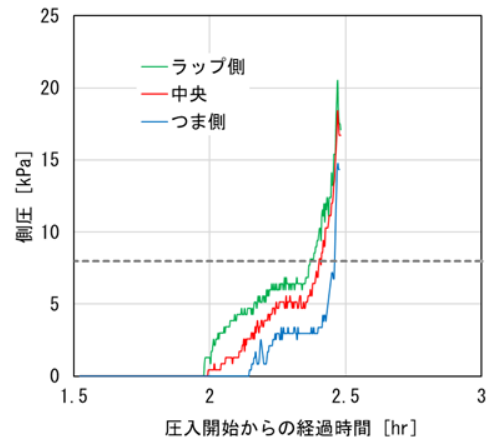


図-7 天端部の圧力測定結果

4.5 脱型後の出来映え

写真-7に覆工の出来映えを示す。硬化後の覆工表面には自己充填コンクリートの流動跡がやや残るものの、表面性状は良好であった。従来工法において発生しやすい、側壁部のスプリングライン下方の表面気泡の発生が抑制され、中流動コンクリートよりも気泡が少ないことを確認した。

5 おわりに

今般、足瀬トンネルにおいて自己充填覆工構築システムを適用し、覆工品質を確保し、施工の省力化および省人化が可能であることを実証した。

今回の施工では、掘削完了後の覆工施工であったことから、胴梁や配管切替え装置をスライドセントル内に配置することとしたため、車両や重機の通行止めが必要となった。また、現時点では、スライドセントルに対する作用荷重は、液圧を想定せざるを得ない。車両通行のための空間確保および施工時の値に基づいた安全かつ経済的な設計などが今後の課題となった。

さらに、自己充填コンクリートの経済性や汎用性を考慮すると、配合や製造方法などにおいてもさらなる検討が必要であると考えられる。今後、これらの課題を解決し、自己充填覆工構築システムの汎用化を目指していきたい。

参考文献

- 1) 弘光太郎, 藤原正佑, 小山広光, 小野知義: 自己充填コンクリートの圧入によるトンネル覆工構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.334-339, 2023.



写真-6 コンクリート打込み状況



写真-7 覆工の出来映え