

新工法紹介 機関誌編集委員会

04-473	覆工コンクリートの 自動打設ロボット 「セントルフューチャーズ」	戸田建設 大栄工機 JUST.WILL ムネカタインダスト リアルマシナリー
--------	--	--

▶ 概 要

覆工コンクリート構築における省人化や苦渋作業の改善を目的として、自動でコンクリートを打設する「セントルフューチャーズ」を開発し現場に適用している。本技術は、覆工コンクリートで一般的に用いられるスランブ 15 cm 程度のコンクリートに対して適用可能である。自動打設を目的に開発したスライド型自動配管切替装置「スイッチャーズ」を中心として、各種センサやバイブレータを組合せてセントル（覆工コンクリート打設用の移動式鋼製型枠）に配置することにより、覆工コンクリートの側壁部から天端部までを自動で打設することができる。これによって従来人力で行っていた打設ホースの移動、打設口の開閉、コンクリートの締固めなどの作業が不要となり、打設人員を削減できる。

▶ 特 徴

主要な設備と機能の紹介（図-1、2、写真-1）

1) 2種類の配管切替装置を用いた自動の打込み

ポンプ車から圧送されたコンクリートは自動配管切替装置（分岐4方向）を経由してから「スイッチャーズ」により打ち込む。「スイッチャーズ」は打設の完了した高さの打設口を自動で閉じて、コンクリートの打ち上がりに合わせて次の打設口に自動で切り替わる。

2) 3種類のバイブレータを用いた自動の締固め

- ・側壁部はセンサ付き棒状バイブレータでコンクリートの打ち上がりを検知しながら、自動で一定時間締固める。
- ・天端部は自動伸縮式バイブレータでコンクリートの充填に合わせて自動で締固めを行い、締固め完了後はバイブレータ先端をセントル内へ自動で格納する。
- ・充填補助として型枠バイブレータを多数配置しており、打設口（側壁部）の近傍に山形状に溜まったコンクリートに自動的に振動を与えることで水平に均す。また、天端部においては妻部までのコンクリート充填を補助する。

3) センサによる充填状況の把握

- ・セントル全体に多数配置した高さセンサによって、コンクリート充填の進捗を把握できる。
- ・天端部に配置した充填検知センサと圧力センサで打設の完了を自動で判定する。

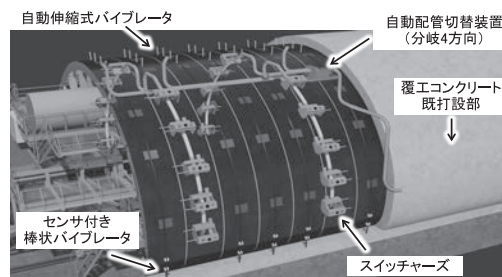


図-1 セントルフューチャーズの主要設備

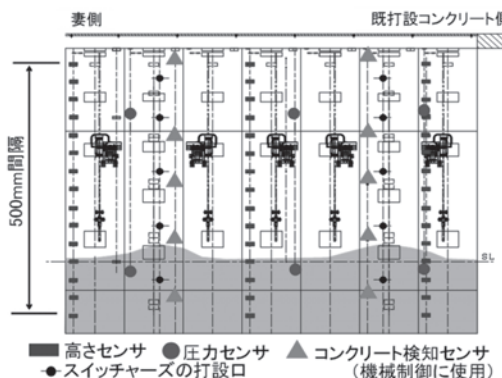


図-2 側壁部のセンサの配置

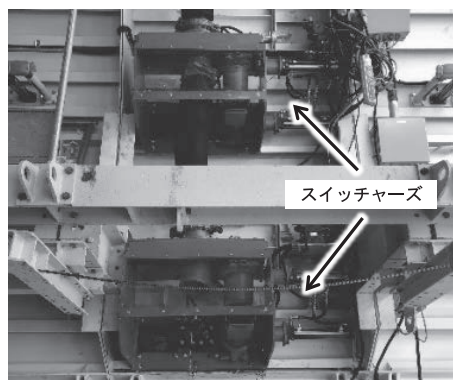


写真-1 スwitchャーズ

・各種センサで計測した結果はインターネットを介して事務所等のモニターでリアルタイムに確認できる。

▶ 用 途

・山岳トンネル工事

▶ 実 績

・中国地方整備局発注

令和3年度木与防災木与第1トンネル工事

▶ 問 合 せ 先

戸田建設(株) 名古屋支店 土木技術営業課 二宮伸二

〒461-0001 愛知県名古屋市東区泉 1-22-22

TEL : 052-951-8594

04-474	AI サイクル自動判定システム	清水建設 Lightblue
--------	-----------------	-------------------

▶ 概 要

山岳トンネル工事の現場では、坑内の作業状況を坑外から把握することが難しく、施工管理上の課題の一つである。従来は、カメラ映像の限定的な情報や個人の経験・感覚を頼りに坑内の状況を推察していたが、想定が外れた場合は、入坑した職員が無用の待機を強いられ、生産性を減じる要因となっていた。そこで清水建設と Lightblue は、画像解析 AI を活用して坑内作業の現況を把握し、現場関係者へタイムリーに情報共有するツール「AI サイクル自動判定システム」を開発した。

本技術は、トンネル切羽後方の約 40 m 地点にウェブカメラを設置し、その映像から AI が坑内の作業状況を自動判定し、その内容をリアルタイムに関係者に通知することによって、無駄な待機時間を削減するものである。

図一に AI サイクル自動判定の概要を示す。AI サイクル自動判定技術は、切羽周辺で作業する重機の種類、各施工サイクルに使用される重機の組み合わせ、および一般的な施工サイクルの順番をあらかじめ学習することで AI が作業状況の判定を行う。判定されたサイクルデータは、自動でクラウド上に保存される。また、社内 SNS を通して職員や作業員に判定結果の通知を行う。本技術によって、坑内の作業状況がリアルタイムに関係者全員に通知されるため、従来の経験や感覚に頼ることなくタイムリーに業務にあたる事が可能となる。

▶ 特 徴

山岳トンネル工事では、各施工サイクルで使用する重機の組み合わせが決まっている。そのため坑内に設置した切羽カメラの映像から施工に使用する重機を認識することで作業内容を判定することができる。本技術では、EVA-CLIP モデルを用いて、

7つの作業（削孔・装葉、ずり出し、コンクリート吹付、こそく、鋼製支保工建込、ロックボルト打設、停止）の重機組み合わせと坑内配置状況を学習し、実際の映像と比較することで、最も類似性の高い作業を判定する。なお、AI 判定を行うにあたり事前に約 5,000 枚の画像データを使用して学習を行った。

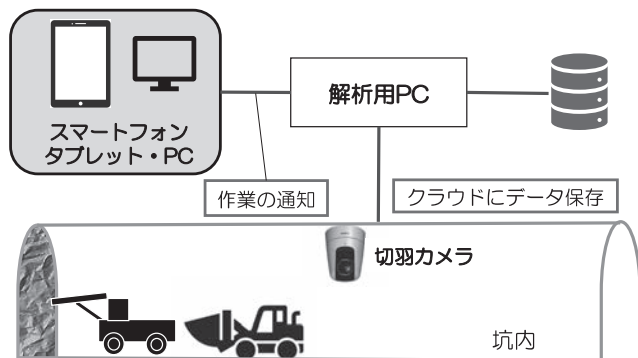
施工サイクルの判定精度を向上させるには、作業内容を学習させるだけでなく、施工順序も学習させる必要がある。特に「吹付けコンクリート」と「鋼製支保工建込み」は使用する重機が同じであるため、「一次吹付け」と「二次吹付け」の作業の間に「支保工建込み」の作業を学習させた。さらに、AI モデルに以下の仕様（ルールベース）を追加することで判定精度向上を行った。

- ①判定の精度が低い場合（閾値 0.8 未満の場合）は、直前の作業を継続する。
- ②施工サイクルの順番を考慮し、不自然な作業の遷移を防ぐ。
- ③直近 3 回の判定結果を参照することで、誤判定の確率を低減させる。
- ④過去の作業履歴を学習し、適切な施工サイクルを選択する。

写真一に AI サイクル自動判定の状況を示す。写真の左上には施工サイクル判定結果「穿孔・装葉」を示しており、AI が自動で施工サイクルを判定していることが確認できる。また、写真の下部には判定結果の精度を示している。



写真一 AI サイクル自動判定の状況



図一 AI サイクル自動判定の概要

▶ 用 途

- ・ NATM による山岳トンネル工事

▶ 実 績

- ・ 高速道路山岳トンネル工事（NATM、トンネル延長 2,298 m）
- ・ 一般国道山岳トンネル工事（NATM、トンネル延長 1,350 m）

▶ 問 合 せ 先

清水建設(株) 土木総本部 土木技術本部 地下空間統括部
〒104-8370 東京都中央区京橋2丁目16-1

TEL : 03-3561-8672

新工法紹介

04-475	自己充填覆工構築システム	佐藤工業
--------	--------------	------

概要

山岳トンネルの覆工コンクリートの施工は、スランプ 15 cm 程度のコンクリートをセントル側部の作業窓から打込み、配管を順次覆工上部へ切り替えながらバイブレータで締め固めて充填させる方法で行われている。施工時は、狭隘な空間での作業となるため、作業員の負担が大きくなることや、作業の多くが作業員の技量や経験に頼らざるを得ない状況となっている。さらに、近年問題となっている作業員の高齢化や熟練工不足によって、近い将来、従来工法を継続することが困難となること予想されており、それに伴った施工に起因した不具合の発生が懸念される。

そこで、これらの問題を解決するため、覆工施工のさらなる

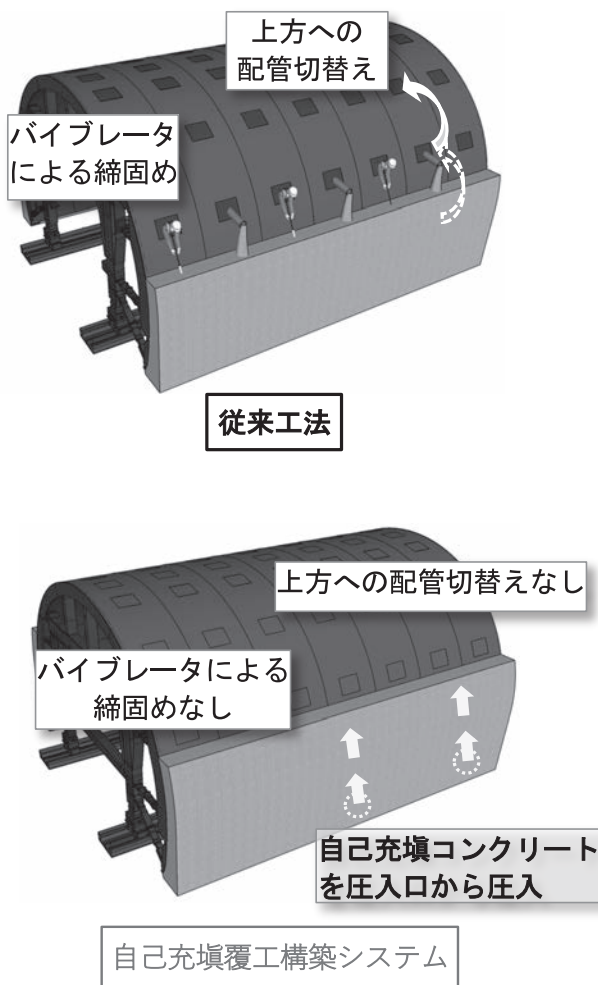


図-1 施工方法の比較

省力化、省人化および品質確保を目的とし、自己充填コンクリート（以下、SCC）をセントル下端部から圧入してトンネル覆工を構築する「自己充填覆工構築システム」を開発した。

これまでに本システムを現場で適用しているが、施工性、経済性、環境負荷の観点から以下の改良を行った。

特徴

- 1) 自己充填コンクリートを低炭素型に変更。原材料であるセメントの一部を二酸化炭素（CO₂）排出量の少ないフライアッシュに置き換えた。
- 2) スライドセントルを改良。トンネルの左右に各1台配置しているコンクリートポンプにコンクリート吐き出し量を自動制御する装置を新たに導入し、型枠面に設置した充填感知センサーと連動させ、左右均等なコンクリート打ち込み高さの確保を自動化した。
- 3) スライドセントルの補強を目的に設置する胴梁の配置を変更。工事車両の通行を制限していた中央部から地表面に位置を見直し、その上部に栈橋を設けることによって工事車両の通行をスムーズに行えるようにした。

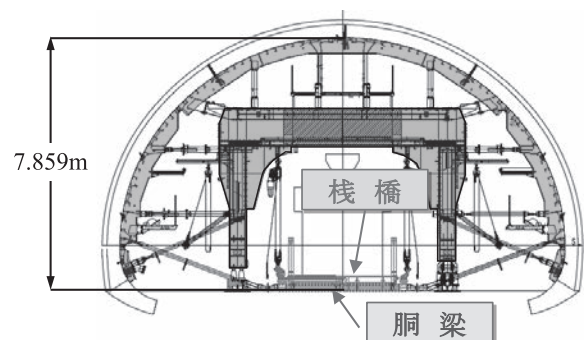


図-2 スライドセントル胴梁配置変更

おわりに

セントルの構造や設備、自己充填コンクリートの製造方法などにおいてさらなる検討を行い、自己充填覆工構築システムの汎用化を目指す。

用途

- ・ NATMによる山岳トンネル工事

実績

- ・ 国道 418 号下伊那郡天龍村 足瀬 1 工区（一部）
- ・ 令和 4 年度俵山・豊田道路第一トンネル工事

問合せ先

佐藤工業(株) 技術センター SOU 土木研究部
〒 300-2658 茨城県つくば市諏訪 C30 街区 1
TEL : 029-817-5101

04-476	発破パターン 自動適正化システム	佐藤工業 マック
--------	---------------------	-------------

▶ 概 要

近年の山岳トンネル工事では全自動穿孔を可能とする全自動ドリルジャンボが導入されるなど、発破掘削の自動化が進められている。今回、佐藤工業(株)とマック(株)は、全自動ドリルジャンボを用いた発破パターンの自動適正化システムを開発したので、その概要を紹介する。

山岳トンネルの発破掘削においては、発破孔の穿孔位置、穿孔数、装薬量、差し角、発破の段数からなる発破パターンを決める必要がある。発破パターンは切羽の地山状況から判定される岩盤等級毎に決められるが、同じ岩盤等級の地山であっても、細かく見れば地山状況は一様ではない。そのため、実際の施工では、熟練技能者が経験に基づき、実際の地山状況に合うように多少の修正を加えながら穿孔することも多い。

一方、ドリルジャンボは、近年、自動化および多機能化が進み、本システムに用いる全自動ドリルジャンボでは穿孔の際の穿孔エネルギーを常時、計測、記録することができる。そこで、この穿孔エネルギーを基に発破パターンを作成すれば、熟練技能者に依存することなく、実際の地山状況に適合する効率的な発破掘削を実現することが可能となると考えた。

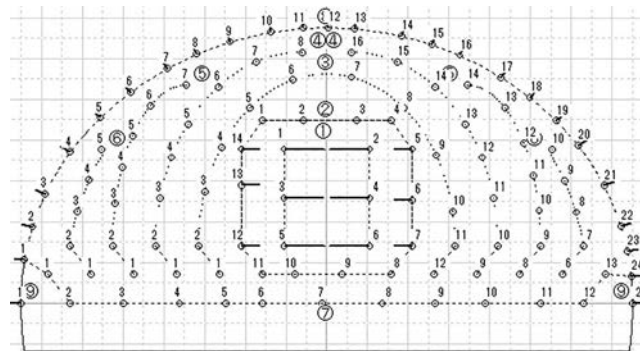
本システムによる発破作業は、次の4つのプロセスで行われる。①発破計画、②穿孔と発破、③発破出来形の確認、④発破掘削結果のフィードバックである。ここで、それぞれのプロセスについて述べる。

①発破計画

発破計画では発破パターン作成プログラムで発破パターンを作成する。まず、計測された穿孔エネルギーを基に推定した岩盤強度から単位体積当たりの必要装薬量を求める。そして、一定の条件の下にモンテカルロ法によりランダムに発破パターンの作成を一定回数繰り返し行い、発破の判定式(鉄道技研式)を適用して、作成した発破パターンが地山に適合しているかを判定する。地山に適合したパターンが複数の場合は、その中から最も適合したパターンを選択する。作成した発破パターンについては、自動的にブーム毎の振り分けと穿孔順序を決めた上で全自動ドリルジャンボ用のフォーマットに変換し、坑内の全自動ドリルジャンボに転送される。

②穿孔と発破

穿孔作業は前のプロセスで作成された発破パターンに基づき全自動ドリルジャンボで自動的に行われる。装薬・発破作業は、



図一 作成した発破パターンの例

従来通り、作業員が全て行う。

③発破出来形の確認

目視あるいは3D-Liderなどを用いて発破の出来形を確認し、余掘り量などから火薬量が適正だったかどうかを判断する。

④発破掘削結果のフィードバック

前のプロセスで火薬量が適正でないと判断されたら、それを修正する方向で発破パターン作成プログラムのパラメーターを変更する。

この4つのプロセスを順次、的確に実施することによって、地山に適合した発破掘削が可能となる。

▶ 特 徴

①穿孔エネルギーの値から地山の硬軟を判断

全自動ドリルジャンボによる穿孔時に得られる穿孔エネルギーの値から地山の硬軟を判断、可視化することができる。

②地山に応じた最適な発破パターンの作成

熟練作業員の判断に頼ることなく、地山の硬軟に応じた最適な発破パターンを自動で作成することができる。

③発破パターンの最適化による効率化と省人化

地山の硬軟に応じた最適な発破パターンを適用することにより、発破時の装薬量の削減、さらには発破後のアタリや余掘りが減り、効率化につながる。また、穿孔作業に必要な人員は二人なので、従来よりも少ない人数で作業することができる。

▶ 用 途

・NATMによる山岳トンネル工事(発破工法)

▶ 実 績

・国土交通省四国地方整備局「令和4-6年度 桑野道路下大野トンネル工事」(徳島県)

▶ 問 合 せ 先

佐藤工業(株) 技術センター 土木研究部

〒300-2658 茨城県つくば市諏訪 C30 街区 1

TEL: 029-817-5100

新工法紹介

04-477	クイック re インバート工法	三井住友建設 土木研究所
--------	-----------------	-----------------

▶ 概要

道路トンネルでは、建設時に想定していなかった地山の長期的な動きにより盤膨れなどが発生する事例が散見されており、必要に応じてインバートの補強や追加設置が行われている。このような工事では、迂回路がない場合、1車線の通行を確保しながら施工を行う必要があり、狭いスペースでの複雑な作業により工期や工費が増加する傾向がある。また、長期間の交通規制による社会的影響や経済損失も生じている。

これらの課題を踏まえ、工期の短縮を目的として、土留め工と掘削工を同時並行で行う工法の開発を行った。

▶ 特徴

本工法は、供用中のトンネルにおけるインバートの補強工事において、従来の土留め工に用いられる親杭横矢板工法に替えて、オープンピット工法による連続したU型土留めを設置する工法である（図-1）。これにより、従来の土留め作業に要する時間の短縮と、走行車線を走る車と重機との接触リスクの低減が可能となる。なお、本工法は、（国研）土木研究所と三井住友建設㈱が共同で開発したものである。

▶ 施工方法

- ①メッセルシールド機の搬入に先立ち、発進・到達立坑を構築する。U型土留め設置前の同立坑のみ、道路中心付近に親杭横矢板で土留めを行い、親杭を利用して仮設防護柵やガードレール、目隠しフェンスを設置する。立坑底面に均しコンクリートを打設した後、発進立坑内にメッセルシールド機を荷卸し、本体の組み立てを行う。
- ②メッセルシールド機による掘削は、バックホウの掘削に合わせてブレードを1枚ずつ伸ばすことで素掘り部の崩れを防止しつつ、オープンピット工法により連続したU型土留めを構築する（図-2）。オープンピット工法は、開削型のメッ

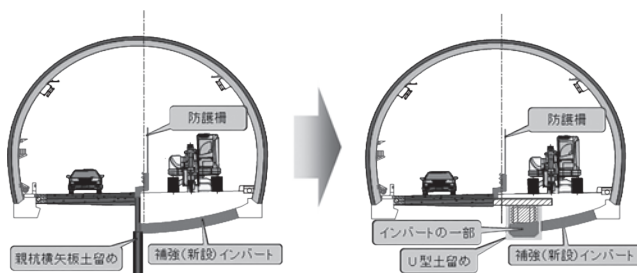


図-1 従来工法（左）とクイック re インバート工法（右）との比較

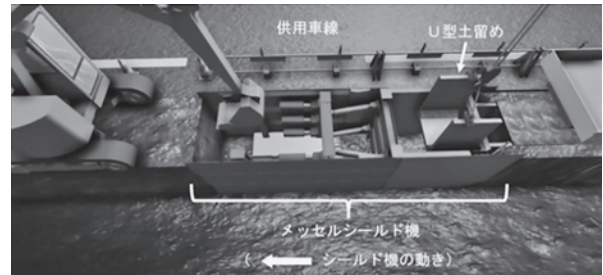


図-2 クイック re インバートの概要図



図-3 仮設防護柵設置状況

セルシールド機を用いて、管渠の埋設などを行う土留め工法であるが、特徴として、軟弱なシルト層から転石・巨礫層に至るまでの幅広い土質に対応できる。

- ③U型土留め構築後、覆工板を設置することで、メッセルシールド機後方の狭隘な施工ヤードを有効活用しつつ、供用線との段差を解消する。また、次工程で接続する仮設防護柵を考慮して、覆工受桁と埋込支柱を一体化した部材を1.5m間隔で設置し、U型土留め内にコンクリートを充填する。
- ④覆工受桁に仮設防護柵を設置し、走行車線側にはガードレールを取付ける。また、工事箇所がドライバーの視線に入らぬよう、仮設防護柵に目隠しフェンスを追加し、第三者災害を防止する（図-3）。その後、インバート本体工の施工を判断面ずつ行う。

クイック re インバート工法を適用した上信越自動車道関伽流山トンネル（上り線）補強工事では、供用中のトンネルにおいて、従来の土留め作業（インバートの一部構築を含む）に要する時間を約35%短縮することができた。

▶ 用途

- ・供用車線を確保したインバート補強工事の施工

▶ 実績

- ・上信越自動車道関伽流山トンネル（上り線）補強工事

▶ 問合せ先

三井住友建設㈱ 土木本部 土木技術部
〒104-0051 東京都中央区佃二丁目1番6号
TEL：03-4582-3060