

40. 山岳トンネルにおけるドリルジャンボの遠隔操作システムの開発

～切羽作業の無人化に向けた取り組み～

西松建設(株)	○ 瀬藤 善孝
ジオマシンエンジニアリング(株)	塚田 純一
古河ロックドリル(株)	梶島 秀一
(株)カナモト	高橋 真琴

1. はじめに

山岳トンネル工事では、ベテラン作業員の引退や若手入職者の減少による将来的な施工品質の低下や労働力の不足が懸念されているとともに、切羽での肌落ち災害がたびたび発生していることから、切羽作業の無人化が求められている。しかし、切羽では狭隘なスペースで複数の特殊機械を使用する複雑な作業が必要であるため作業が属人化している等の事情から、現状では無人化技術の導入が進んでいない。

そのような背景から筆者らは山岳トンネルの各施工重機を対象とした無人化技術の開発に取り組んでいる。AI等の判断に基づいて自動で重機を稼働させることが最終的な目標であるが、現在では操作信号を与えて遠隔で重機を稼働させることを中間目標として開発を進めている段階である。本稿では、このような取り組みの一環として開発を進めているドリルジャンボの遠隔操作システムの開発状況について述べる。

2. システム構成

システムの構成を図-1に示す。

2.1 遠隔操作室

ドリルジャンボの遠隔操作は、切羽から離れた

位置に配置された遠隔操作室にて行う(図-2)。室内は12m²程度の広さであり、メインとサブの2台の操縦席が設置されている。

メイン操縦席には、前方に12台のモニタ、正面に実機と同じ削孔用コンソールや画面、足元にペダル、手元に制御盤が設置されており、走行と削孔作業を遠隔操作することができる。サブ操縦席にはモニタと削孔用コンソールが設置されており、メイン操縦席と合わせて2名体制で削孔作業を遠隔操作することができる。

なお、遠隔操作室の設定を変更することで、共通の設備を用いてドリルジャンボ以外の重機も遠隔操作することが可能となっている。この機能は、将来的に複数の重機を遠隔化・自動化することを見据えて実装したものである。

2.2 ドリルジャンボへの搭載機器

ドリルジャンボの前後や側方には複数のフルHDカメラが設置されており、機体周囲や切羽近傍の様子を遠隔操作室内で確認することが可能となっている。また、機体後方には左右2台のデプスカメラが設置されており、後進時にAIによって一定の範囲内に人が検知された場合には、緊急停止する仕組みとしている(図-3)。



図-1 ドリルジャンボの遠隔操作システムの構成

2.3 通信設備

遠隔操作室からの操作信号やドリルジャンボからのカメラ映像、音声、機体の稼働状況、削孔データ等のデータは、遠隔操作室とドリルジャンボに搭載したデータ処理装置や坑内に設置した通信設備を介して伝送される。ドリルジャンボの稼働範囲で無線通信を行うために、切羽直近の坑内設備とドリルジャンボに送受信アンテナを設置し、遠隔操作室から送受信アンテナまでの区間のみで有線通信を採用している（図-1 参照）。なお、現段階ではシステムの試行中のため遠隔操作室を坑内に配置しているが、将来的には光ケーブル等で無線通信区間を延長して坑外や現場外から遠隔操作を行うことを想定している。

無線通信の規格は、伝送するデータの種類ごとに適したものを選定している。すなわち、カメラ映像や音声の通信においては、遠隔操作室で遅延なく確認することを可能とするためにVバンド帯高速無線（60GHz）や小電力無線（2.4/5.0GHz）を採用している。一方、操作信号や機体の稼働状況、削孔データ等のデータの通信においては、途切れない安定的な通信を図るために4.9GHz帯長距離無線LANを採用している。

各種データは坑内ネットワークを通して坑外にある詰所のデータ保存用PCに蓄積されるため、地山評価データや将来的に自律施工の検討に活用するための施工データの取得が可能となっている。

3. 期待される効果

3.1 走行や掘削作業の遠隔化

エンジンの始動、切羽までの移動、作業位置での停止、アウトリガの張り出しや収納、ケーブルリールの操作等の走行に関する全ての動作を遠隔操作することが可能である。また、削孔作業は、レバー操作による“手動削孔”と、開始信号を与えると事前の設定通りに自動で削孔が進む“自動削孔”の2通りの方法で遠隔操作することが可能である。なお、メイン操縦席の下には3本の電動式シリンダを設置しており、ドリルジャンボ側で計測した傾斜に連動してシリンダを伸縮させて傾斜や振動を再現することで、走行中に機体の傾きを把握して逸走やスタック等を防ぐことや、削孔作業中に機体の振動を把握して手応えを感じることを可能にしている（図-4）。走行や削孔作業の遠隔化によって切羽直下作業が軽減されることにより、安全性や労働環境の向上が期待される。



図-2 遠隔操作室の概要



図-3 デプスカメラによる人体検知



図-4 メイン操縦席下の電動式シリンダ

3.2 リアルタイム地山評価

削孔の進捗や削岩機の稼働データ等のデータは自動的に収集され、各孔における掘削体積比エネルギーや岩盤強度等の地山評価値が算出される。掘削体積比エネルギーは、単位体積の地山を削孔するために費やされた打撃エネルギーであり、一定値以上の打撃圧が作用している間は式(1)に従って毎秒算出される。また、岩盤強度は経験式(2)によって換算される。

$$E_d = \frac{E_i \times T_{rod} \times bpm}{V \times A} \quad (1)$$

$$\sigma_c = \left(\frac{E_d}{C}\right)^2 \quad (2)$$

ここで、 E_d は掘削体積比エネルギー (J/cm^3)、 E_i は削岩機のピストンの各打撃によってロッド中に発生した弾性波エネルギー ($J/blow$)、 bpm は打撃数 ($blow/s$)、 T_{rod} は弾性波エネルギーのロッド中における伝達係数 (%)、 V は削孔速度 (cm/s)、 A は孔の断面積 (cm^2)、 σ_c は岩盤強度 (MPa)、 C は定数 ($MPa^{0.5}$ 、30~40程度)である。

さらに、逆距離加重法を用いてトンネル周辺地山全体における地山評価値の分布が計算され、切羽面、側壁、路盤における結果がモニタに表示される。削孔初期で地山評価がまだ行われていない領域は白色、削孔が行われた領域は評価値に応じて暖色~寒色で色分け表示される。これらの計算は削孔の最中に自動で行われ、モニタ上の表示は10秒間隔で更新される(図-5)。定量的かつリアルタイムな地山評価システムを活用することで、客観的な地山評価や危険箇所の早期把握が可能である。

4. 現場実証と今後の取り組み

4.1 現場実証

当社施工中の山岳トンネル現場にて、本システムの実証試験を行った。走行や削孔作業の最中、施工に影響を及ぼす通信上の不具合は生じず、ドリルジャンボによる一連の施工動作を無線で遠隔操作可能であることを確認することができた。

今回の遠隔操作の実証試験と普段の運転席での操作による作業時間の比較結果を表-1に示す。装薬孔の作業時間は1断面分の上半の削孔に要した時間を示しており、運転席での操作時には手動削孔を実施したのに対し、遠隔操作時には基本的に自動削孔を実施し、孔荒れ等で自動削孔ができない場合には手動削孔に切り替えた。遠隔操作の結果、普段の運転席での操作と比較して作業時間は同程度であり、自動削孔機能が問題なく動作することが確認された。

ロックボルトの作業時間は、深さ3mの孔を手動削孔した際にビットの位置調整と削孔自体に要し

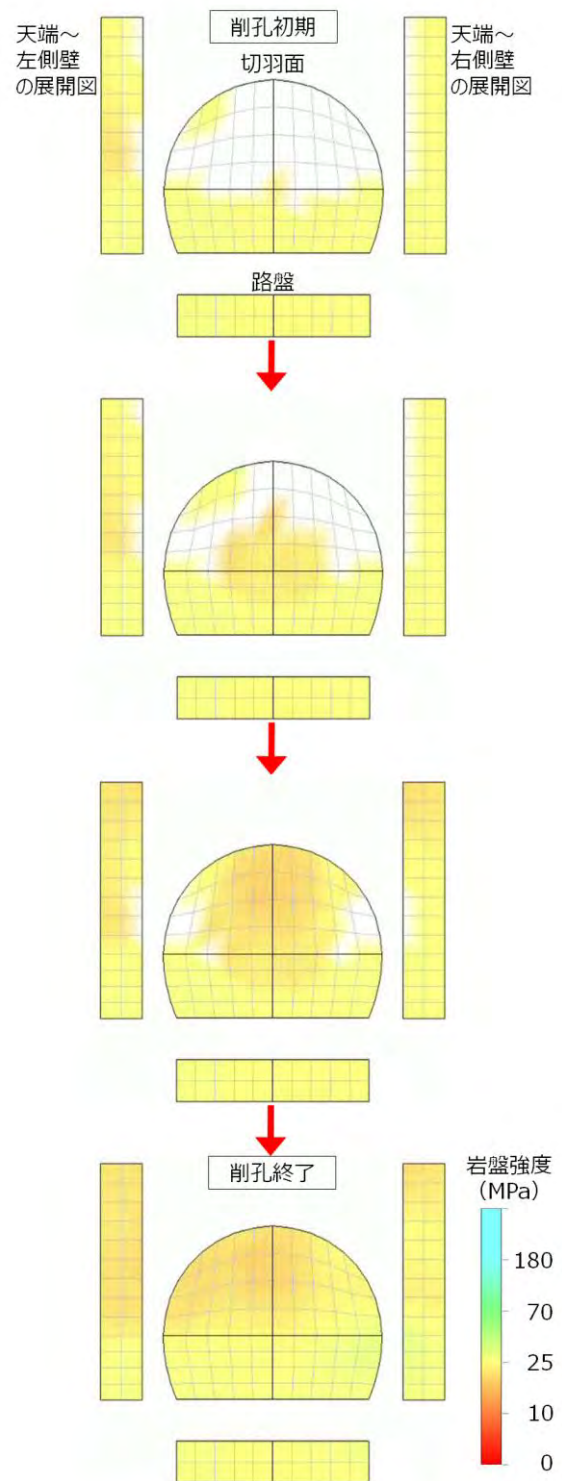


図-5 地山評価の更新例

表-1 作業時間の比較

		運転席での操作	遠隔操作
装薬孔 (上半1基分)		29分 58秒	31分 54秒 (+6%)
ロックボルト孔 (1孔当たり)	ビット位置調整	48秒	2分 19秒 (+189%)
	削孔	1分 35秒	1分 30秒 (-6%)

た数孔分の平均の時間を示している。遠隔操作の結果、削孔自体に要した時間は普段の運転席での操作と同程度であったが、ビットの位置調整の際には遅延が生じた。削孔自体は実機と同じコンソールを用いて普段と同様に問題なく操作可能であったのに対し、ブームを動かす際にはカメラ映像だけでは奥行き方向の距離感が把握しにくいいため、ブーム同士が干渉しないように気を付けながらビットを孔口に合わせるのに時間を要したことが原因であると考えられる。

4.2 今後の取り組み

(1) 改良点

ロックボルトの手動削孔時には奥行き方向の遠近感をカメラ映像で把握できずビットの位置調整に時間を要した。そのため、シリンダの伸縮量や関節の角度から各ブームの位置関係を算出し、遠隔操作室内での確認を可能とするガイダンス機能の構築を進めている(図-6)。今後はこのガイダンス機能を活用して遠隔操作を試行し、改良を重ねる予定である。

また、手動削孔時にビットを孔口に合わせる際には、ブームに遮蔽されてビットの着岩を確認できない場合がある。そのため、今後はカメラの追加や設置位置の再検討を行う予定である。

(2) 今後の遠隔化や自動化に関する取り組み

今回は短期的に試行を実施したが、今後は長期的な運用を見据えた検証を予定している。具体的には、発破振動や粉じんに対する各種装置の耐久性の調査や、有線通信区間における配線の延伸方法の確立等が挙げられる。

また、走行と削孔作業に続き、装薬やロックボルト挿入等の作業の遠隔化も進める。システムを自社で開発するだけでなく、既に機械化されている他社技術を当社で無線遠隔化するという選択肢も視野に入れ、切羽作業の無人化の早期実現を目指す。それとともに、他重機の遠隔化や自動化にも取り組んでいく。

5. おわりに

今回、山岳トンネル工事におけるドリルジャンボの走行や削孔作業を無線遠隔操作するためのシステムを開発した。当社施工中の山岳トンネル現場にて本システムの実証試験を行った結果、施工に影響を及ぼす通信上の不具合は生じず、ドリルジャンボを無線で遠隔操作可能であることが確認された。今後は、更なる実証試験を通して本システムの改良を行うとともに、ドリルジャンボによる他作業の遠隔化技術や、他重機の遠隔化・自動化技術の開発も進めていく。

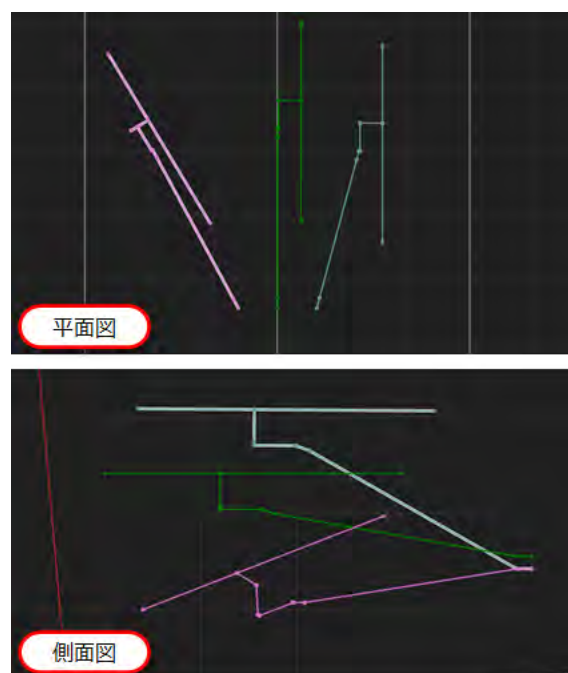


図-6 ブーム位置関係のガイダンス

参考文献

- 1) 山下雅之, 山本悟, 田口毅: 山岳トンネルにおける無人化施工への取り組み 施工機械の遠隔操作システムの実用化を目指して, 土木施工, Vol.62, No.1, pp.135-139, 2021
- 2) 山下雅之, 山本悟, 田口毅: 山岳トンネルにおける切羽近傍作業の無人化を目指した取り組み, 建設機械施工, Vol.73, No.7, pp.43-48, 2021