

機体に依存しない遠隔吹付システムの開発

NATM吹付作業用脱着式遠隔吹付システムの開発

株式会社熊谷組
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組

○ 坂西 孝仁
尾畑 洋
宮川 克己
杉本 憲一

1. はじめに

NATM 山岳トンネル工事においてコンクリート吹付作業はトンネルの支保という点から非常に重要であるが、吹付粉じん下の劣悪な環境は作業員への負担が大きいものである。厚生労働省も令和2年7月20日に「ずい道等建設における粉じん対策に関するガイドライン」を改正し、粉じん濃度目標レベルは $2\text{mg}/\text{m}^3$ になるなど規制を強化しているのが現状である。

これに対して施工業者は液体急結剤の使用、吸引捕集方式の換気方式の採用等、粉じんを抑えつつ影響を最小限にするなどして作業環境改善に努めているが、その中で遠隔操作によるコンクリート吹付作業をすることは作業環境の大幅な改善という点で一つの解決策であり、この取り組みの一環として遠隔吹付システム開発を進めてきた。その過程の実験を通して発生した課題から、「機体に依存しない遠隔吹付システム」というフレーズで脱着を基本としたシステムの開発を進めているので、これまでの開発経緯と合わせて報告する。

2. 開発の経緯

開発背景と経緯について述べる。

2.1 開発背景

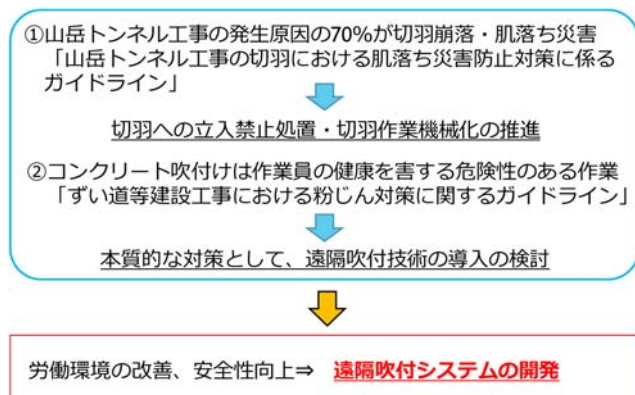


図-1 遠隔吹付システム開発背景

山岳トンネル工事切羽災害の発生原因の70%が切羽崩落・肌落ち災害切羽作業であり、厚生労働省

「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」からは、切羽への立入禁止処置・切羽作業機械化が求められている。

また厚生労働省「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」から換気、呼吸器用保護具に加えて、粉じん発生源に係る措置としての本質的な対策に遠隔吹付技術の導入を検討することが明記されている(図-1)。

これより労働環境の改善と安全性向上を目指して遠隔吹付システムの開発を開始した。

2.2 システム概要

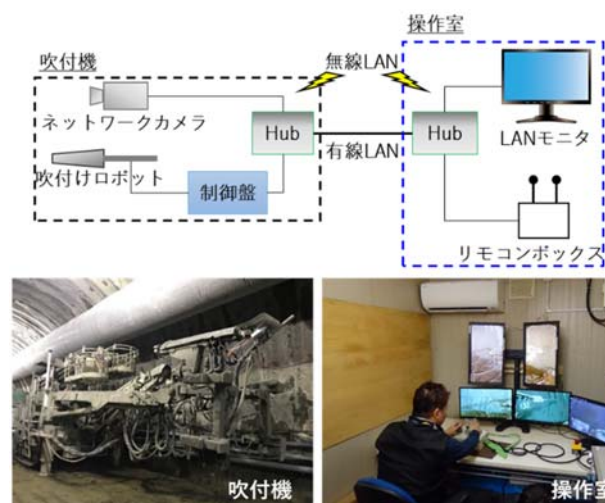


図-2 遠隔吹付システム概要図

通常は吹付作業員が切羽周辺で吹付ロボットコントローラにより吹付ロボットを操作するが、遠隔吹付では粉塵に影響のない範囲に設置される操作室で、吹付機に取り付けられた操作用カメラからの映像を吹付作業員がモニターで視認しながら吹付ロボットコントローラで遠隔操作を行うものである。(図-2)

①吹付機操作システム

吹付機の動作は吹付機に搭載した PLC 制御盤と遠隔操作室の PLC 制御ボックス間を有線または無線 LAN で接続され、操作室から吹付ロボットコントローラボックスで吹付機を遠隔操作する。

②操作作用映像システム

遠隔操作に使用する操作作用映像カメラは吹付機エレクトアーアーム部に左右2か所、全体俯瞰用として車体中央部に1か所設置した。また操作室には通常の無人化施工と同様にディスプレイを4台設置した。

2.3 基本的システムの確立

2016年よりAトンネル現場において遠隔吹付システムの実験を開始した。当トンネルは全線鋼製支保工を使用するトンネルパターンで初期段階の遠隔吹付の実験現場としては理想的であった。

まずは操作作用カメラ、無線機の選定を行い、使用機器の基礎実験を実施した。ネットワークカメラを数種類選定して動作確認後、取付位置を吹付作業員も含めて検討して決定した。カメラ雲台の自作も行い理想的なパン・チルト方向動作を追求した。また無線LANに関しては5GHz帯の他、2.4GHz、25GHz等色々実験して、トンネルにおける吹付機と操作室の離隔がどの程度まで可能か確認をした。

その後実作業で数度にわたり実験を実施したが、(写真-1)無線機の距離制約、映像の遅延等も抱えながらも吹付作業員は2-3回の練習で、基本的吹付作業を遠隔操作で行い、システム有用性の確認ができた。



写真-1 遠隔吹付風景

2.4 新規課題への対応

2017年より実験場所をBトンネル現場に移して、技術開発を進めることになった。

(1) 新規課題について

解決しなければならない課題は以下の通りであった。

①吹付作業員の吹付コントローラ操作速度と操作作用映像遅延

吹付機の動作信号はON、OFFのみなので吹付作業員は吹付ロボットのノズルワーク回転方向の操作では、コントローラを正逆方向に50msのスピードで動作させて微妙な動きを操作していることがビデオ解析で確認できた。しかし吹付機に搭載さ

れた操作作用ネットワークカメラ映像は遠隔操作室でモニター視認すると映像のエンコード、デコード時間によりHD720P映像においても200-300msの遅延が発生していることが実験で明らかになり、同様の操作は遠隔吹付では難しいことが確認できた。

②奥行き感の差異と操作の違和感

雲仙普賢岳や阿蘇大橋等で実施された無人化施工¹⁾では、掘削機の車載カメラの他に、無人化作業外エリアに建設車両に対して4方向から視認できる操作作用カメラが多く設置され、遠隔操作作業員は適切なカメラを切り替えて、作業の際に必要な奥行き感を補填している。しかしトンネル内では吹付機にカメラを取り付けられても、トンネル土平等に取り付けることは現実的でなく、奥行き感の把握が難しいことが認識できた。



写真-2 奥行き感の差異

写真-2より、操作作用カメラが斜め方向から対角で吹付ノズルを撮影していることからノズル前後方向の奥行き感が視認し辛く、実際は2m以上離れていてもモニター映像では1m未満に見えることがわかる。これによりノズル操作で思った以上に動作が大きく動き、適切な吹付箇所への誘導が難しくなっていた。

③無支保工区間の対応

当初現場は鋼製支保工が入る支保パターンであったが、途中より無支保工区間になった。通常の有入吹付の場合は後方100m程度の天井に取り付けられているレーザーマーキングシステムで教示される吹付限界を視認しながら吹付可能であるが、無人化施工で操作室の映像モニターによるレーザーマーキングの視認が難しく、遠隔操作では無支保工区間の施工が難しいことが実験でわかった。

(2) 課題の解決方法検討と結果

あがった諸課題に対して以下の対策により解決を目指した。

①ノズルワーク自動システムの開発

吹付作業員が常時ノズルワークする動作はノズル回転、ノズル前後、アームスライド前後の3動作である(図-3)。この動作スピード、動作範囲を調整可能にして自動的に動作させ、必要に応じて手

動介入が出来れば動作の低減が可能と考えた。この3動作の自動化実験で顕著な効果があったのは、前述した 50ms のスピードで微妙な操作していたノズル回転の動作であった。

ノズル回転の自動化のみでも吹付作業員の負担改善が顕著であることが確認できた。

①ノズルの回転

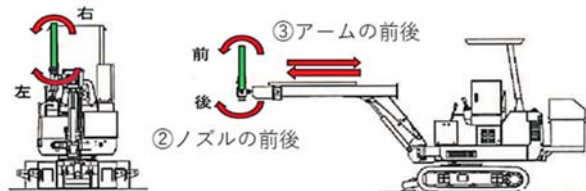


図-3 ノズルワークの3動作図

またこれにより操作カメラ映像遅延の影響も大きく受けずに作業員の負担軽減が可能になった。

②吹付ガイダンスシステムの開発

奥行き感確保と無支保工区間の対策にはバックホウ、ブルドーザ等に搭載されているマシンガイダンスシステムと同様の吹付機用ガイダンスシステム開発が効果的と考えたが、屋外で使用するガイダンスシステムとは違い GNSS が使用できないトンネルの環境下でどのようなシステムにするかが課題であった。



図-4 緑点照射カメラ追尾式ガイダンスシステム図

検討した結果、ノズル筒先部に取り付けた緑色レーザーポインタが照射する点とノズル根元に設置される赤点照明をステレオカメラで距離認識をしてノズル位置と方位を認識する緑点照射カメラ追尾式ガイダンスシステムを採用した。(図-4)

この方式では以下の表示が可能になった。

a.ノズル位置表示ガイダンス

緑色レーザーポインタの壁面照射点と赤色ノズル位置認識灯の三次元位置をステレオカメラで認識して、ノズル筒先の位置と方向をガイダンス用PCで算出して表示する。

b.吹付厚巻推定表示

レーザーポインタ三次元位置の蓄積により、マーキングシステムから取り込んだ設計断面と比較して、どの程度の吹付余裕があるのか表示する。

緑点位置の画像データの解析は、ステレオカメラに内蔵されているミニコンが 30fps で行っていたが、振動の影響や吹付ロボット位置で認識可能なカメラ台数の変動に連動して位置精度値も変動し、表示位置が大きく変化するなど、システム改良の余地が多くあることがわかった。また毎回レーザーマーキングシステムの照射点を使用してステレオカメラ 8 台の自己位置、方位を計測する必要があるが、精度を出そうとすると当初予想していた点数より多くの計測が必要になり毎回十数分かかってしまった。

2.5 Bトンネル実験結果

(1)実験後の課題

①配線等の破損



写真-3 配管配線状況

当初からノズルワーク自動、ガイダンスシステムを想定しておらず、後付けでシステム追加した結果、LAN、センサー、粉塵対策用エア管、電源線を敷設したことにより多くの配線、配管になり、吹付粉塵、油圧の交換、日常の稼働によるシステム維持が容易でなかった(写真-3)。開発サイクルが長期となる場面では、ほぼ配線、配管のやり直しを余儀なくされ、実験効率の低下、費用の増大を招いた。

②発破の影響

前述した配管、配線にも影響があったが、特に操作室での発破衝撃の影響は甚大であった。4t 平トラックにユニットハウスを搭載したが、室内のディスプレイ、エアコン、空気清浄機等も発破の影響で破損した。

③専用機による高額な開発費

後付けで操作カメラ、センサーや配線配管もあったが、当初から専用の PLC 制御盤、比例電磁弁が搭載されており、システムの維持も含めて多くの費用がかかった。

(2)得られた成果

①映像による遠隔操作

どこの現場でも吹付作業員は 2,3 日の練習で映

像による遠隔操作に対応して基本吹付程度は容易にこなしていた。

② ノズルワーク自動

ノズルワーク自動は前述したノズル回転のみでも遠隔吹付では顕著な改善効果があった。吹付作業員は遠隔操作当初は、ノズルワーク自動をあまり使用しなかったが、しばらくして遠隔操作に慣れてくると必ず使用を始めて、「負担が減る良いシステム」という意見であった。

③無線機、粉塵対策

トンネル内でも安定した伝送可能な無線 LAN の選定や、カメラの粉塵対策システムを確立できた。これにより 200m 程度離れた範囲であれば安定して遠隔操作が可能になった。

3. 新規開発目標

これまでの課題経緯から「機体に依存しない遠隔吹付システムの開発」という目標で脱着式遠隔吹付ユニットの開発を進めることにした。

まずは導入予定現場を決めて以下のシステムを開発することにした。

3.1 後付け遠隔操作コントローラ制御装置

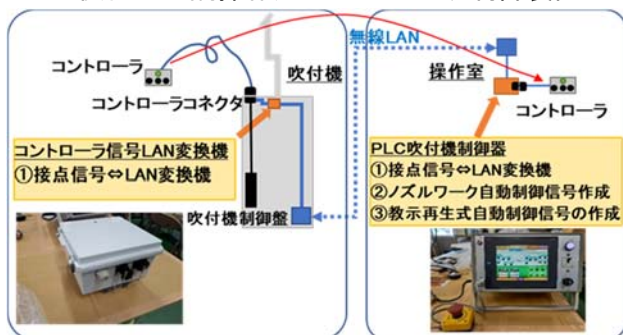


図-5 後付け遠隔操作コントローラシステム図

有人吹付の場合は吹付コントローラをコントローラコネクタに接続して使用するがここに後付けでコントローラ信号 LAN 変換機を接続する。

操作室側 PLC 吹付機制御器と無線 LAN で接続することにより、操作室へ吹付コントローラを移設すれば遠隔操作が可能になる。

また操作室側の PLC 吹付機制御器から回転ノズルワーク自動制御信号や教示再生式自動信号を作成して送れば、吹付機側の吹付機制御盤の制御することが可能になる。これにより吹付機を改造することなく操作室側 PLC 吹付機制御器により簡単な遠隔制御が可能になる。また無線 LAN 等の設置は必要であるが容易に機体からの脱着が可能になる。(図-5)

まずは導入予定現場に合わせた吹付機メーカーと制御信号仕様に関して確認後、PLC 吹付機制御器側で対応できる仕様とした。

3.2 脱着式低遅延高精細映像伝送システム

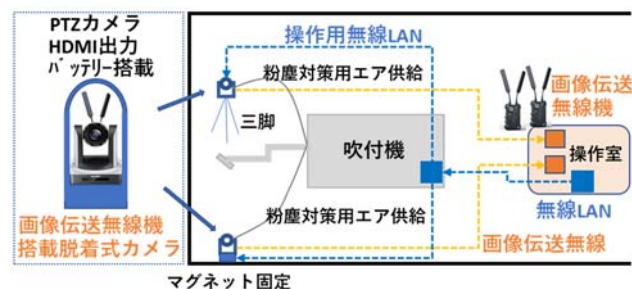


図-6 脱着式低遅延高精細映像伝送システム図

映像無線・バッテリー搭載 PTZ カメラユニットを製作して、吹付毎に所定の箇所に設置する移動式にする。作業終了時は取り外して充電とメンテナンス作業を行う。また PTZ カメラは屋内用汎用カメラを使用してコスト低減に努めた。HDMI 出力を搭載した PTZ カメラを使用して映像無線機に HDMI 入力で直接映像伝送をする。映像無線機は 5GHz 帯を使用しているが帯域が広いので、一度に使用できる台数は 4 台であるが今回の吹付機のケースでは十分な仕様である。また操作室へフル HD 映像が遅延なく伝送が可能で屋外トンネル実験において 400m 程度の伝送において遅延なく伝送が可能であった。

カメラ操作は RS485 出力を無線 LAN に変換して操作室から PTZ の制御が可能になる。(図-6)

しかしながら粉塵対策用エアは吹付機本体から供給とするので脱着可能なエアコネクタとエアリールを装備する予定である。

3.3 小型移動操作室の製作

従来は機器スペースや居住性を考慮してユニットハウスを車載する方式であったが操作室全体が大きくなり、トンネル内の旋回はぎりぎり退避がしづらかった。そこでワンボックスカーをベースにした小型の遠隔操作室にして、発破の際は影響のない範囲まで退避を容易にすることにした。

4. 今後について

今回の技術開発はターゲット現場に導入を目指して開発を進めており、年内には試験運用から実作業を目指している。ただし今回の現場は鋼製支保工が全線に入る支保パターンであるので上記の開発で十分であるが、今後の無支保工パターンの現場に合わせて脱着式のガイダンスシステムの開発も同時に進めている。その内容はまた別の機会 で発表をしたい。

参考文献

- 1) 飛鳥馬翼, 中出剛, 北原成郎, 天下井哲生, “阿蘇大橋地区崩壊斜面の応急対策から恒久対策までの取組み”, 土木施工, Vol. 62, No. 6, pp.104-107, 2021