

34. 距離計カメラを搭載した小断面積込機械の開発

トンネル機械の遠隔操作に向けた取り組み

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
宮川 克己
手塚 仁

1. はじめに

近年FIT（固定価格買取制度）により水力発電所導水路トンネル改修や新規構築の需要は高まっている。水力発電所導水路トンネルは幅員や高さが3m以下の小断面が多数を占め、タイヤ工法機械では施工が難しく、レール工法機械が使用される。しかしここ数十年間、レール工法機械は勾配の制約や付帯設備の煩雑等で採用されず、新規機械製作が見送られている。現在トンネル機械の進展は目覚ましく自動化や省力化等の新技術が導入されており、タイヤ工法機械と比較して見劣りしているのが現状である。

そこで当社では、新技術を取り入れた削孔、積込、吹付の各工程に対応した小断面レール工法機械を同時開発している。遠隔操作を基本に2段階に分けてシステム開発を進めている。掘削機と吹付機は自動化を推進し、積込機は距離計カメラを搭載した遠近距離可視化システム開発を進めている。

通常のディスプレイを使用した遠隔操作では奥行き感補填のために多くのカメラを必要とするが、当機では距離計カメラを使用して距離を色で表示することにより、少ないカメラ台数で直感的な距離把握を可能にした。本稿は遠隔操作に向けた各小断面開発機械概略、積込機に付属する距離計カメラを使用した遠近距離ガイダンスシステムについて述べる。

2. 小断面新規機械開発について

2.1 基本的開発方針

当社では以下の小断面レール工法機械の新規同時開発を進めている。開発した機械は現在施工中の現場に投入して、技術的な実験検証を行い、改良を進めていく予定である。基本的な開発方針は以下のとおりとした。

削孔機、吹付機には自動作業機能を搭載し、遠隔操作を行う際に、この自動システムで操作を補完する方式にした。ただし積込機の自動運転システム導入は現状では技術対応が難しいので、遠隔操作が可能な仕様で開発を進めた。

開発方針は第1段階として最初の導入現場では、操作作業員が切羽で従来の使用位置より後方の安

全な位置から機械を遠隔操作して、問題がないことを確認する。次に問題点の改良を進めた上、操作室で遠隔操作の環境を整えて、第2段階への移行を考えている。(図-1)

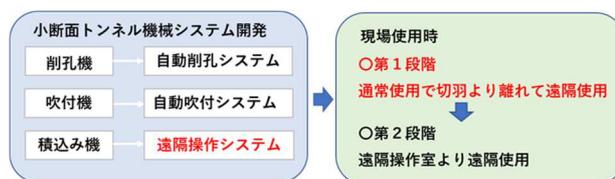


図-1 小断面トンネル機械の開発方針

2.2 各開発機械の概要

前述した開発方針に基づいて、以下の機械群の開発を進めた。

(1) 削孔機械

1 ブーム式レールジャンボで、2.5mの長孔発破に対応かつ削孔効率を向上するため、ドリフターはEpiroc社製 COP1838HDを搭載し高速施工に対応する。また長孔発破実現に対応するため、削孔精度の確保が必要になることから自動削孔機構も搭載している。(図-2)

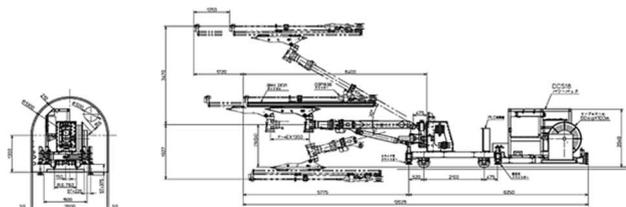


図-2 削孔機械の概要

また削孔機の後部に遠隔爆薬装填装置が連結されている。「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」に基づき、当社では爆薬装填は遠隔装填を基本としている。



写真-1 遠隔爆薬装填装置

既に運用され実績のある通常断面向け装填装置の技術ノウハウを踏襲しつつ、全く新たな仕様で開発中である。(写真-1)

(2) 吹付機械



写真-2 吹付機

吹付機械はコンプレッサー37kW×3 台を搭載した2両編成の一体型吹付機で、吹付区間が2.5mとなることを想定して、吹付が可能な構造になっている。また吹付ポンプは乾式、湿式どちらにも対応可能となっており、現在は乾式仕様のアリバ 285 を搭載している。載せ替えてコンクリートポンプの搭載が可能で、最新の液体急結剤の対応も考慮している。(写真-2)また吹付自動化に対応した既開発の教示式の自動吹付機システム機能やリアルタイムモニター(写真-3)も搭載している。



写真-3 リアルタイムモニター

(4) 積込機+トレンローダー

積込機は掘削バケットとチェーンコンベアによる移送方式である。掘削効率向上を目指しコンベア処理能力は150 m³/Hで、この断面に適合する同クラス機械のシャフローダーKL-7と比較して倍以上の能力がある。操作は遠隔操作を前提としたリモコン方式とし、視認はカメラモニターと新規開発の距離計カメラを搭載した遠近距離可視化システムを使用して操作をする。(写真-4)積込機の仕様は以下のとおりである。

| | |
|------------|----------------------|
| 全長 | 7407mm |
| 全幅 | 2000mm |
| 全高 | 2202mm |
| ポニートラック走行時 | 1822mm |
| 全重量 | 9.8t |
| ブームリーチ | 4016mm |
| 最大掘削高さ | 2993mm |
| コンベア能力 | 150m ³ /H |

| | |
|--------|-------------------|
| コンベア幅 | 700mm |
| 電動機 | 37kW 4P 400V |
| 操作器 | ワイヤレスリモコン(429MHz) |
| レールゲージ | 914, 762mm |
| その他 | ブレーカ用配管付 |

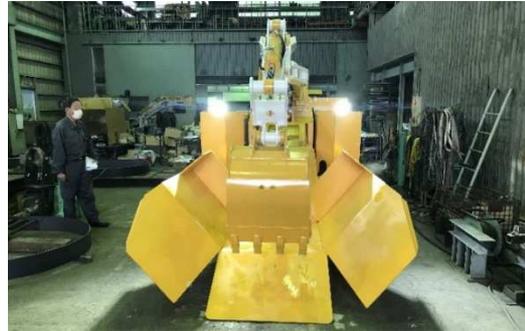


写真-4 積込機

また積込機からずり鋼車へ土砂を中継積み込みこむ機械、トレンローダーも開発した。土砂搬送するベルトコンベアは専用のずり鋼車に搭載される形となっている。搬送能力は積込機に合わせて150 m³/H以上で、曲線半径200mに対応できるように本体フレームが5m毎のヒンジ構造で、折れ角2度まで屈曲可能としている。(写真-5)



写真-5 トレンローダー

3. 遠近距離可視化システムの開発

積込機の遠隔操作を実現すべく、今回のシステムは以下の問題点の解決を主眼して開発を進めた。

3.1 トンネル施工における遠隔操作の問題点

この遠隔操作システムをトンネル作業機械に導入した場合、以下の問題の発生が考えられる。

(1) モニター映像の奥行き感の欠如

通常の無人化施工カメラ配置

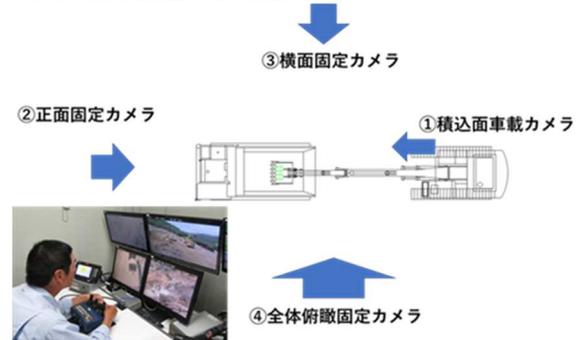


図-3 通常の遠隔操作カメラ配置

カメラ映像における最大の問題点は奥行き感である。2次元映像カメラを使用した通常の遠隔操作では奥行き感の把握は難しく、車両本体車載カメラに加えて、周囲の固定カメラを後方と横方向に配置して、奥行き感を把握して作業する方法がとられる。(図-3)

トンネルの遠隔操作となれば、発破作業や空間の狭さの制約により複数方向からのカメラ設置自体が難しく、車載カメラが主体となり奥行き感の担保が難しい。小断面トンネルになれば更に制約を受ける。今回の開発の主眼になった問題である。

(2) ジャイロ, GNSS 等の使用できない環境

無人化施工における GNSS や 9 軸ジャイロセンサー等を使用したガイダンスシステムは、映像データを補完する技術として大変有効であるが、トンネル内ではこうしたデバイスが使用できない環境である。通常トンネル内でこれを補完する手段として、機体センサーと、TS(レーザー測量機)を組み合わせて絶対位置を特定する方法等が採用されている

3.2 積込機の遠隔操作システム

今回積込機の開発では機体後方からの操作であるが、最終的に操作室での操作を考慮してリモコンによる操作システムの導入となった。(図-4)

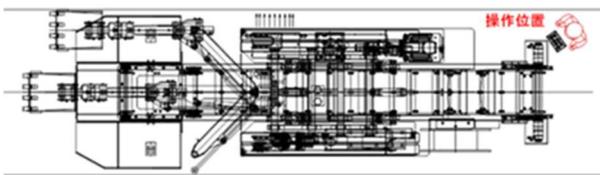


図-4 積込機の操作位置

また能力増強により車体が大型になり、開発方針第1段階での切羽から少し離れた機械後方で操作する場合において、前方の積込状況が確認し辛く、映像視認による遠隔操作になる。従ってどのように切羽目視に対応するか問題となった。基本的には機械前方に車載カメラを取り付け、操作位置付近に映像モニターを設置する。

しかし、機器配置から考えるとカメラを多数取り付けることは前述したとおり難しく、スペースも十分ではない。また通常の GNSS や 9 軸ジャイロセンサーの使用したガイダンスシステム導入は難しい。機械後方で操作する場合と今後の操作室における操作も考慮すると、このような状況でどのようにして映像により奥行き感を担保する方法があるか、検討する必要があった。

3.3 距離カメラを使用した距離可視化の実験

遠隔操作を前提に奥行きを担保する方法を数案検討し、予備実験を実施して有効性を確認した。

(1) 距離計カメラシステムの選定

- ① 高精細映像使用 (4K) による距離認識

- ② 俯瞰カメラ使用の上空視点による距離認識

- ③ 距離計カメラを使用の色による距離認識

以上のとおり数案を文献等⁽¹⁾により検討した結果、① 高精細映像の使用でも奥行き感の担保は十分ではない。③ 俯瞰カメラ映像は移動の際に周囲の状況の把握は容易であるが、操作作業員視線ではないので操作性向上にはつながらない。この中で③ 距離計カメラを使用した色による距離認識は遠隔操作用として実用化されていないが、操作作業員が直感的に状況判断できるので有効ではないかという結論になった。

(2) システム構成と予備実験

距離計カメラを使用した色認識システムの有効性を確認するために、開発機と同等能力の機械に距離計カメラと色認識が可能なシステムを搭載し、現場で視認実験を実施した。

- ① 実験場所 国道 103 号線青ぶな山トンネル避難坑工事
- ② 実験内容 積み込み作業における距離計カメラを使用した距離の色認識映像による操作作業員の視認感覚実験
- ③ 使用機材 ITD Lab 製ステレオカメラ ISC-100XC (100 万画素 有効画角: 83°)
ノート PC CF-SZ5 (Windows10)
レーザー距離計 BOSCH 製(GLM500)
照度計 TRUSCO 製(TLX-204)
- ④ 搭載機械 積込機 KL-15 (コトブキ技研)
- ⑤ 機器取付 (図-5) のとおり操作席前方にカメラ表示システムを設置
- ⑥ 色の設定 色を 40cm 間隔で設定
- ⑦ 実験確認方法 複数操作者からのヒアリング

ステレオカメラ取付位置 (前方から)



ステレオカメラ取付位置 (後方から)



図-5 距離計カメラによる視認実験状況

本距離計ステレオカメラの映像は白黒出力である。一眼は映像表示用、もう一眼は計測用のカメラとなっており、映像出力は距離を色で表す視差映像、白黒生映像を合成した合成映像を採用した。

(3) 実験方法

以下の条件で実験を実施した。

- ① 積み込みバケットと積み込み部付近が視認できるようにカメラを設置。
- ② 最初、操作作業員は目視で通常の積み込み作業。
- ③ 次に操作作業員は、ノート PC のモニターに表示されている合成画面を見ながら 1 分程度作業

を続け、この動作を3回繰り返す。

(4) 操作作業者のモニター結果

操作作業者からの意見は以下のとおりであった。

- ② 色の認識による位置確認は大変容易で使いやすい。
- ②あまり色が多くない方がよい。
- ③積込みブレード部の境界で段差があるので、ここで色が変わると作業がしやすい。

(5) 映像分析結果

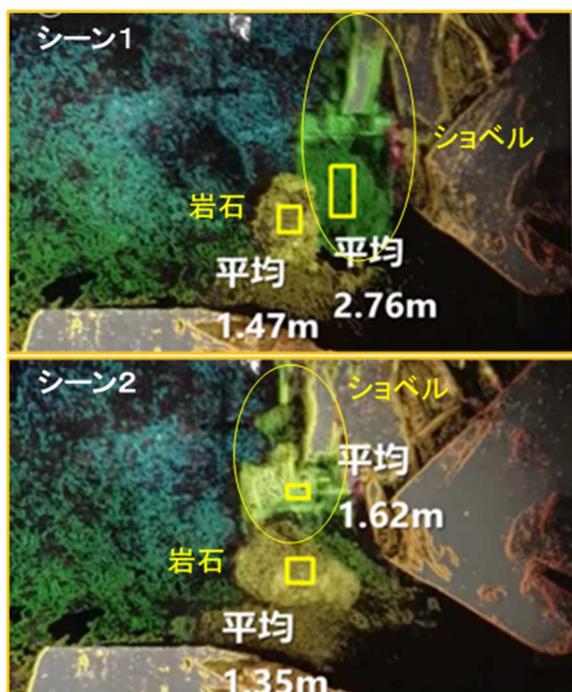


図-6 画像分析画面(上:シーン1 下:シーン2)

シーン1,シーン2共に両方ショベルと岩石が接しているように見えるが,ステレオカメラで測距をするとシーン1は1m以上離れ,シーン2では10~40cm程度の近距離にあることが判った。また合成画像の色を見比べると,シーン2のバケツは岩石と近い黄色に着色され,より岩石に近い位置関係にあることが分かる。(図-6)

(6) 実験のまとめ

実験結果より距離計カメラを使用した色による距離表示は,直感的かつ容易に視覚アシストが可能であると認識できた。ただ表示色に関しては掘削範囲の限界距離,積込みブレード境界等のポイントになる距離で色分けし,色を少なくする方が認識しやすかった。この実験結果を基にシステム開発を進めた。

4. 遠近距離可視化システムの開発

今回の積込機用のシステム開発では左右積込ブレード境界部の認識及び機体中心にブームが配置されているため,左右2か所に距離計カメラを設置したが,画面を左右均等に表示すると画面認識

に迷いが出るのがわかり,今回は左側カメラ映像を中心に全体表示をし,右側カメラ映像は右側境界部を中心に映像補完をする合成画面とした。

(図-7)



図-7 システム表示画面と距離計カメラ

またカメラ位置,角度入力によって積込みブレードの位置を平行に色表示できるように,微調整が可能なカスタム設定ができるようにした。今回は積込みブレード面エリア,積込み可能エリア,それ以外のエリアと3色に色分けし,どこまで積込みが可能か認識でき,少ないカメラ視点で奥行き感の担保が可能になることが確認できた。これにより操作作業者は直感的に奥行き感が把握でき,操作性が改善されると考えられる。

5. 今後について

今回完成した遠近距離可視化システムは小断面トンネル積込機に試験的に搭載するが,現場使用で視認性の検証を加えて,実際の遠隔操作を目指してブラッシュアップを図りたいと考えている。また実映像との違いの違和感をいかに低減するかが今後の課題である。

参考文献

- (1) 建設機械の遠隔操作技術向上に関する共同研究報告書
平成28年12月 (国立研究開発法人土木研究所
国立研究開発法人情報通信研究機構)