

HMDを使用したトンネル吹付コンクリートの遠隔操作技術の開発

大成建設(株) 正会員 ○竹中 計行
大成建設(株) 正会員 高倉 克彦

1. はじめに

山岳トンネル工事では、岩石の落下等(肌落ち)による労働災害がたびたび発生しており、肌落ち災害では、その半分近くが死亡か休業1ヶ月以上と重篤度が高い状況にある¹⁾(図-1参照)。そのため、厚生労働省から、山岳トンネル工事の切羽における労働災害の防止を図るため、「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」が平成28年12月に公表されたが、その後の災害発生状況を踏まえ、平成30年1月にはガイドラインが改正されている。ガイドラインの「第5 事業者が講ずることが望ましい事項」において、「事業者は、肌落ちによる労働災害を防止するため、切羽への労働者の立入りを原則として禁止し、真に必要な場合のみ立ち入らせるようにすること。また、この措置を実効性のあるものとするため、(中略)等の完全な機械化等を積極的に進めること」となっている。

また、厚生労働省はトンネル建設工事の切羽における作業環境改善のため「ずい道等建設工事における粉塵対策に関するガイドライン」を令和2年7月に改正している。ガイドラインの「第3 事業者の実施すべき事項」において、「事業者は、ずい道等の掘削等作業主任者に、次の事項を行わせること。(中略)(2)換気(局所集じん機(中略)粉じんの発生を抑制する措置の採用又は遠隔吹付の採用等を含む)の方法を決定すること」となっている。

そこで、肌落ち災害の発生削減と、吹付コンクリートで発生する粉塵による健康被害低減を目指して、トンネル吹付コンクリートの遠隔操作技術の開発を行うこととした。

開発にあたっては、大成建設保有の人の目と同じように2眼のカメラにより遠近感の把握が可能な「臨場型遠隔映像システム T-iROBO®Remote Viewer」²⁾を、トンネル吹付工に適用することとした。以下にその概要を示す。

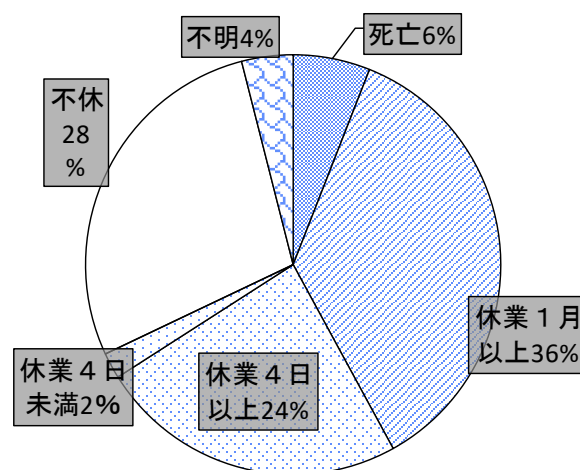


図-1 トンネル工事の肌落ち災害の程度

2. システム構成

本システムは、切羽近くで吹付作業を行っている操作者の位置に2眼のカメラを設置し、操作者は切羽より後方の安全かつ粉塵の少ない場所でヘッドマウントディスプレイ(以下HMDという)を介して切羽の画像を見ながら吹付機を操作する(写真-1,写真-2参照)。



写真-1 HMD



写真-2 2眼カメラ

ここで、カメラは吹付作業時の粉塵ならびに跳ね返った吹付材から防護するカメラボックスに内蔵し、カメラ視認性の向上させるためLED照明をカメラボックスの両側に配置した。

キーワード トンネル、吹付、遠隔操作、ヘッドマウントディスプレイ、マンケージ

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設(株)技術センター生産技術開発部 TEL045-814-7229

3. HMDによる吹付遠隔操作性確認（その1：視認性の確認）³⁾

まず、粉塵が無い、照明の状況が屋内・屋外とも異なるトンネル切羽付近に2眼カメラを設置した状態で、操作者がHMDを介して十分な視認性が得られるかの確認を行うこととした。現状の吹付作業と本技術における吹付作業の模式図を図-2、図-3に示す。

最初、2眼カメラは図-3に示すように三脚上に配置していたが、カメラの移動・設置を円滑に行うために、レールを配置し、カメラボックスはそのレール上を走行させることとした。



写真-3 カメラボックス概要

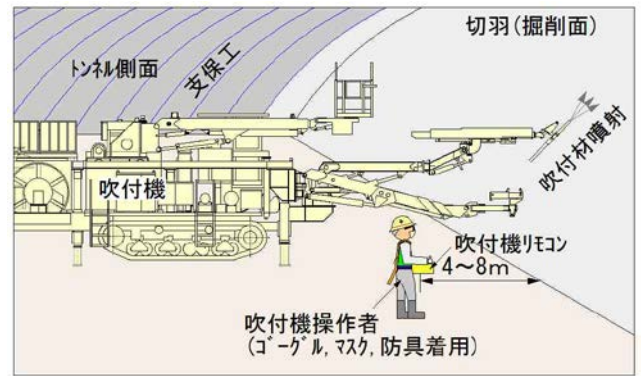


図-2 吹付作業状況（現状）

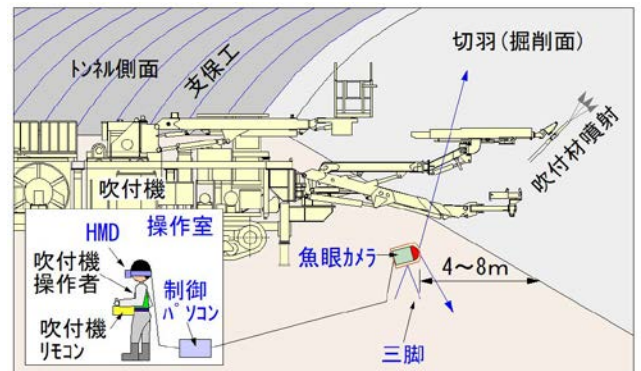


図-3 吹付作業状況（HMD+カメラ）

カメラボックスの状況を写真-3に、視認性確認時の機材配置図を図-4に示す。視認性確認は、断面積約160m²の東京都内の道路トンネル工事において行った。

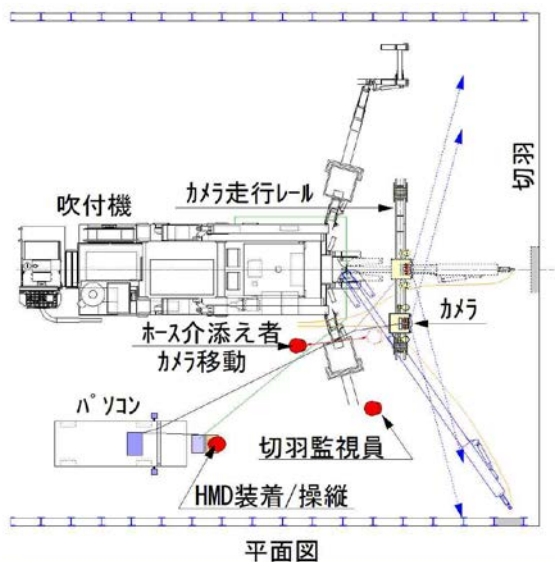
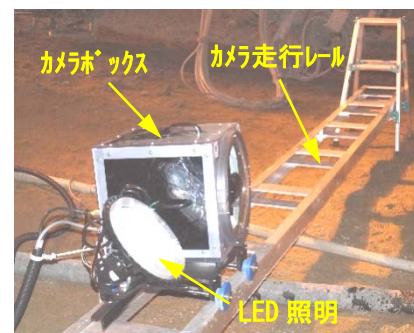


図-4 機材等配置状況



カメラ配置状況（中央）



カメラ配置状況（側方）

HMD 遠隔吹付作業状況を写真-4 に示す。作業後に吹付機操作者からヒアリングを行ったところ、「HMD の画像でも切羽の吹付作業は十分行えることができる。ただし、支保工間の吹付は見づらい、ズームができないか」という意見を得た。なお、HMD 遠隔吹付作業時の吹付ノズルの動きは、最初はノズルが暴れる状況だったが、徐々に落ち着いた動きとなっていた。

吹付作業の開始から終了時点までトンネル切羽付近に配置したカメラボックスへの吹付材の付着状況を写真-5 に示す。付着物はあるものの、この状況で HMD を介して吹付状況を視認することは十分可能であった。

以上の結果から、HMD による遠隔吹付の実現性は十分あると判断し、次ステップの開発を行うこととした。

4. HMDによる吹付遠隔操作性確認（その2：2眼カメラ配置位置の確認）⁴⁾

前出の視認性確認の課題として、①視認性向上のためのズーム機能、②切羽前面に毎回カメラを設置し撤去する手間を省くカメラ配置が挙げられた。

現状の HMD システムでは、ズーム機能を持たせることは難しいことから、カメラの配置位置について検討することとした。

吹付機にカメラを配置することを考え、支保工把持機能を有するエレクター付吹付機（写真-6 参照）を対象とした。

カメラの移動が可能な配置位置としては、吹付ブーム、エレクターならびにマンケージが挙げられるが、チルト機構などカメラの向きを変化させる自由度の高いマンケージを選択することとした。吹付ブームについては、吹付を行う掘削面のより近くにカメラ配置が可能だが、吹付時の振動が大きいことから採用しなかった。

なお、マンケージの下方にカメラを配置することによって、衝突などからカメラの防護を行うことも可能となり、切羽手前の路盤にカメラを設置するよりも吹付を行う掘削面にカメラを接近させることができることから、ズーム効果も期待した。

マンケージに2眼カメラを設置する際の問題点は、①吹付時の吹付ブームの振動が、マンケージに伝わり、カメラからの取得映像が揺れないか②片側のマンケージのカメラで切羽全体の吹付作業をカバーできるかである。そこで、実際のトンネル工事におい



写真-4 HMD 装着下の吹付作業状況



写真-5 吹付作業後のカメラボックス状況

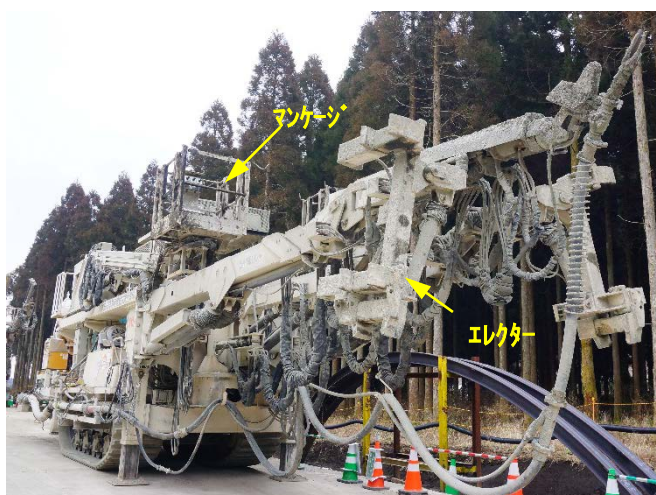


写真-6 エレクター付吹付機

て、このカメラ設置方法の遠隔吹付操作における有効性を確認することとした。マンケージへのカメラ設置状況を写真-7に示す。

有効性の確認は、断面積約120m²の熊本県内の道路トンネル工事において行った。

切羽右側吹付時の機材配置状況を図-5に、切羽左側から、中央、右側までの吹付状況を写真-8に示す。カメラの映像は、吹付ブームの動きに合わせてマンケージを移動させることで取得した。

支保工間の遠隔吹付を4名の操作者に実施してもらったところ(写真-9参照)、全員から

①マンケージの揺れによる画像の乱れは全く感じない、②支保工間の吹付も十分できる、③吹付に掛かる時間は通常の吹付と変わらない、④吹付ブームを目視する位置が今までとは異なるが、慣れれば問題ないだろうとの高評価を得ることができた。ただし、機材のセットアップに時間が掛からないようにしてほしいとの意見が聞かれた。

5. まとめ

2眼カメラをマンケージへ設置し、吹付を行う掘削面近くにカメラを移動することによって、HMD遠隔吹付の実用性が向上することが認められた。

今後は、機材のセットアップ時間の短縮などの課題を解決し、HMDを使用したトンネル吹付コンクリートの遠隔操作技術の当社トンネル現場への水平展開をしていく所存である。

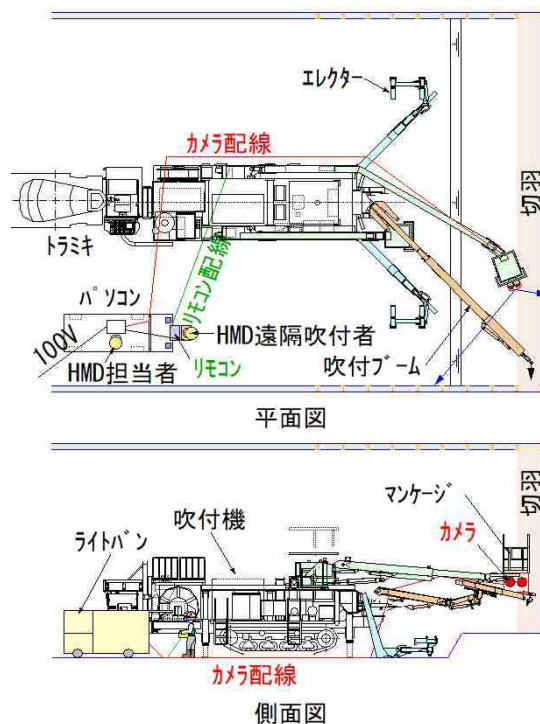


図-5 機材等配置状況(切羽右側吹付時)

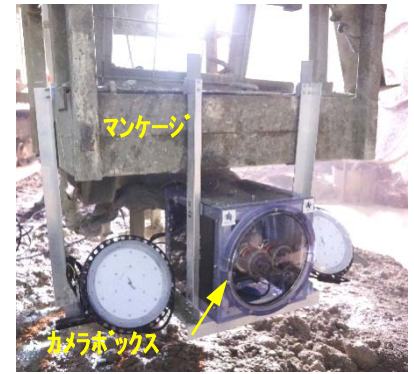


写真-7 カメラ設置状況



写真-9 HMD 遠隔吹付状況

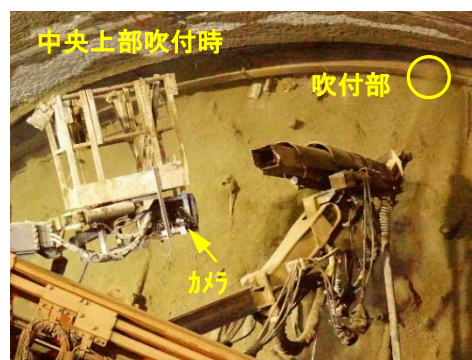
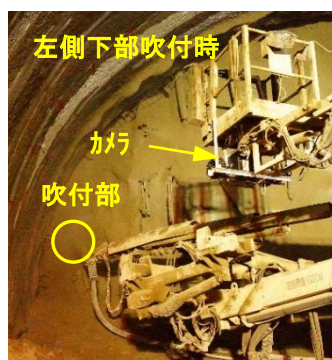


写真-8 HMD 遠隔吹付時のカメラ配置状況

- 参考文献**
- 1) 厚生労働省 ホームページ <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html>
 - 2) 加藤ほか：HMDを用いた臨場型遠隔映像システムの開発，土木学会第73回年次学術講演会，VI-684
 - 3) 西田ほか：HMDによるトンネルコンクリート吹付機の遠隔操作技術の開発，土木学会第74回年次学術講演会，VI-739
 - 4) 高倉ほか：HMDによるトンネルコンクリート吹付機の遠隔操作技術の開発（その2）～2眼カメラ配置方法に関する実験～，土木学会第75回年次学術講演会，VI-434