切羽への立入を不要にする自動装薬システムの開発

前田建設工業(株)　正会員　○小笠原　裕介　正会員　水谷　和彦
正会員　五味　春香　正会員　浅井　秀明
坂下　誠

１．はじめに

厚生労働省が策定した「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」によれば，山岳トンネルにおける労働災害は切羽で 9 割発生しており，その中でも鋼製支保工建込みや装薬作業時の被災事例が 8 割を占めている．これらの作業は切羽直下に作業員がやむを得ず立ち入る人力作業であり，この切羽立入作業を無くせば被災リスクを限りなく減らすことができる．そこで筆者らは，切羽立入作業を不要にする自動装薬システムの開発 [1)]，および装薬の全自動化を図るために，装薬孔位置検出システム [2)]を開発している．本稿では，これらのシステムを用いた現場実証試験の結果について報告する．

２．自動装薬システムの開発

(1) 従来の確認方法

一般的な装薬は，ドリルジャンボで削孔した装薬孔の孔奥から①起爆用の親ダイ（紙巻含水爆薬と電気雷管）②増ダイ（紙巻含水爆薬を数個）③込物（粘土）の順に人力で挿入し（**図-1**），込棒で突き固める（**写真-1**）．20 年程前に機械装填技術が開発され，切羽より数 m 離れた遠隔装填が可能になった（**写真-2**）．しかし，数 m 離れた所から，小径装薬孔への長尺パイプ挿入は困難であり，通常作業として定着していないのが現状である．



図-1 一般的な装薬模式図



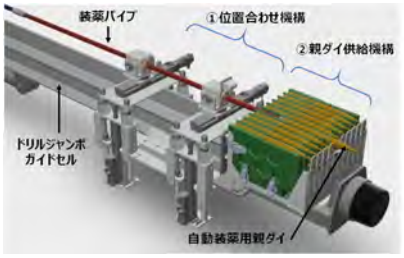
写真-1 一般的な装薬状況



写真-2 遠隔機械装填状況

(2) 自動装薬システムの概要と現状

そこで筆者らは切羽立入が不要な自動装薬システムを開発した．本技術はドリルジャンボのガイドセルに搭載し（**写真-3**），①位置合わせ機構②親ダイ供給機構③送出し機構④増ダイ供給機構で構成した．親ダイは紙巻含水爆薬と非電気式雷管（導火管付雷管）の組合せとし，先端コーン（位置合わせ誤差・孔荒れ対策）と紙管（収納・把持機能）に内包してカートリッジ化し，増ダイは粒状爆薬（含水爆薬や ANFO）にする事で，エア圧送による機械装填を可能とし，密装填効果により込物の省略を可能にした（**図-2**）．



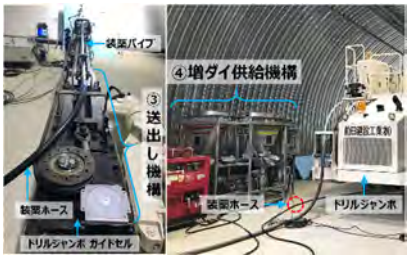


写真-3　自動装薬システム構成

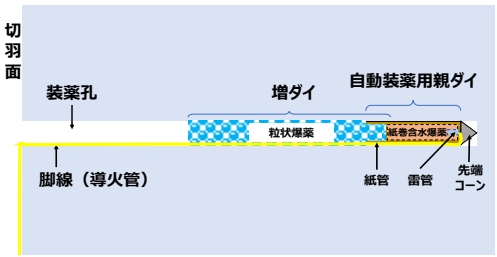


図-2　自動装薬模式図

キーワード　山岳トンネル，発破掘削，安全性・生産性向上，装薬自動化，センシング技術
連絡先　〒102-8151　東京都千代田区富士見 2-10-2　前田建設工業（株）　TEL：03-3265-5551

本システムは装薬孔を削孔するドリルジャンボとは別の機械で構成しており，全自動ドリルジャンボの削孔データ（座標，角度，深さ）を元に対象の孔位置にセットする．しかしながら，座標を元にセットしても装薬パイプと孔位置は上下左右で最大 50mm の誤差が生じることが後述する現場試験により明らかになったため，筆者らは座標を元にセットした後，パイプを正確に位置合わせするための孔位置検出システムを開発し，当社研究施設 ICI 総合センターの模擬トンネル内で実大検証試験を実施し，一連の動作確認が完了した後に実際の山岳トンネル現場に本システムを持ち込み，検証試験を行った．

（3）孔位置検出システムの概要

本システムは，a:距離画像カメラ b:ToF センサ c:レーザーサイト d:USB エクステンダーで構成し，専用の孔位置検出用ソフトフェアは独自のアルゴリズムでトンネル坑内の照度において孔を検出できるように検証を重ねて改良した（写真-4, 写真-5）．

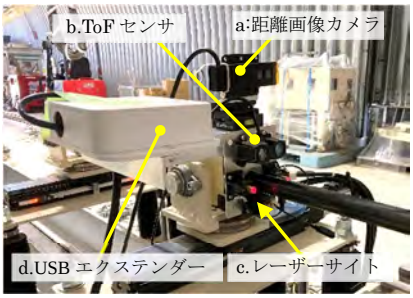


写真-4　孔位置検出システム

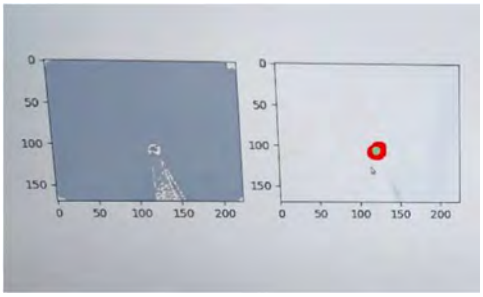


写真-5　検出時のモニター画面

孔の検出から装填開始までのフローを次に示す．①a:距離画像カメラで孔を検出②検出した孔のカメラ座標から孔位置を推定③推定した孔位置を元に位置合わせ機構を制御し，装薬パイプの軸を孔位置に合わせる④b:ToF センサで軸上の距離を計測し，孔があることを最終確認⑤装填開始．また，c:レーザーサイトは装薬パイプの軸と孔位置のズレを視覚的に確認するための補助機能，d:USB エクステンダーは USB 機器を Ethernet ケーブルで距離延長するためのアダプタとして使用している．

３．試験概要

（1）模擬トンネル概要

場　所：前田建設工業㈱
　　ICI 総合センターICI キャンプ内（写真-6）
延　長：L＝29.570m（図-3）
断面積：固定部 A＝50.7m²，移動部 A’＝55.2m²
備　考：トンネル先端部（約 6m）はスライド可動式



写真-6　ICI キャンプ内 模擬トンネル

設置目的を次に示す．

①トンネル施工に関わる技術の開発

山岳トンネルの切羽や坑内で試験を行う際に生じる時間や場所の制約を取り払い，技術開発を加速するため，実験・検証を模擬トンネルで実施する．

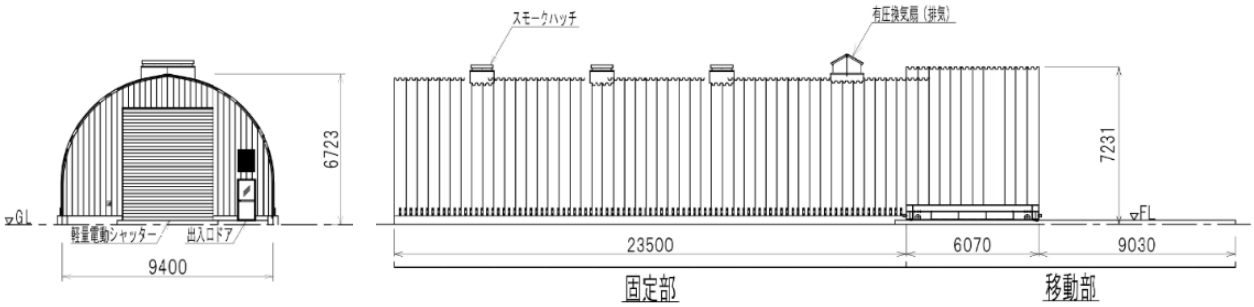


図-3　模擬トンネル概要図

②社内社外に対する教育・体験の場を提供

社内および協力会社の研修や安全教育に活用すること．また，近隣住民に対し，見学会や閉鎖空間を利用したイベントを実施し，地域貢献する．

(2) 自動装薬システムの試験概要

上記で説明した模擬トンネル内に，本システムを搭載したドリルジャンボ実機を配備し，一連動作（**図-4**）の実証試験を実施した．実証試験状況および装薬システム画面状況を**写真-7～9** に示す．

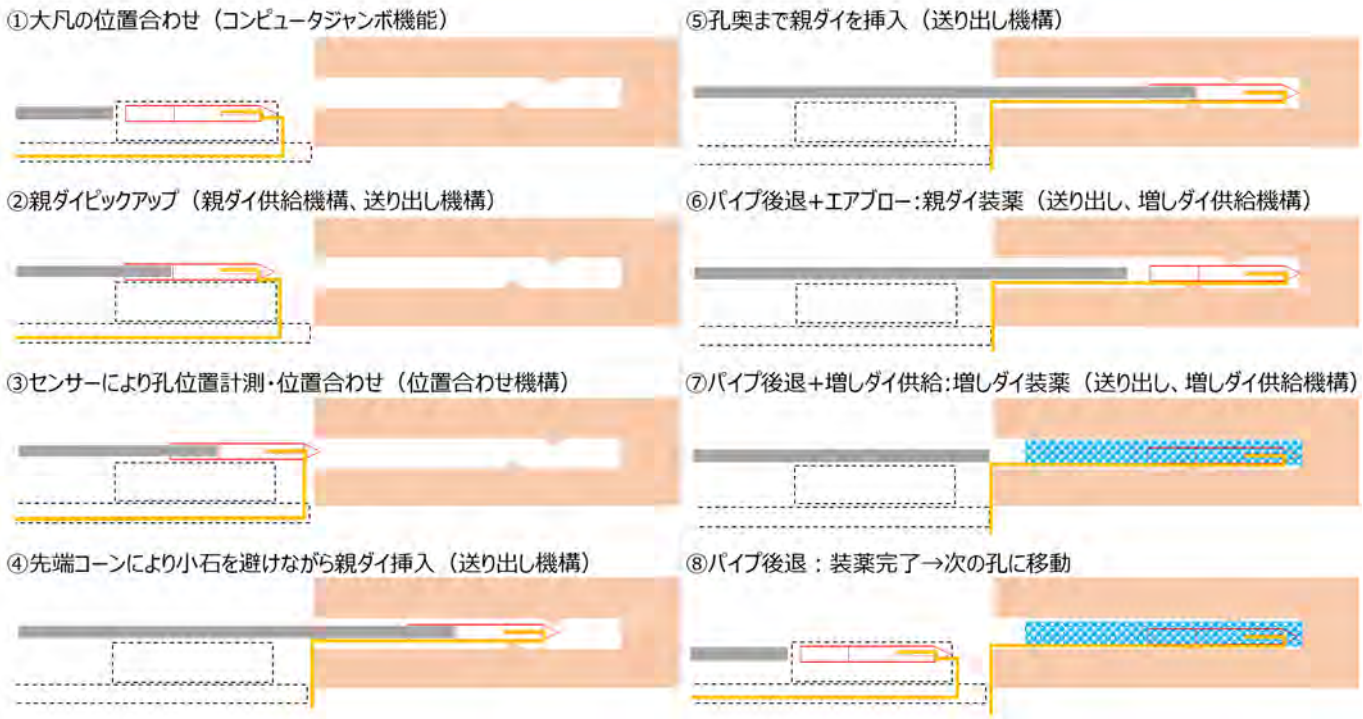


図-4　自動装薬の一連動作



写真-7　自動装薬状況

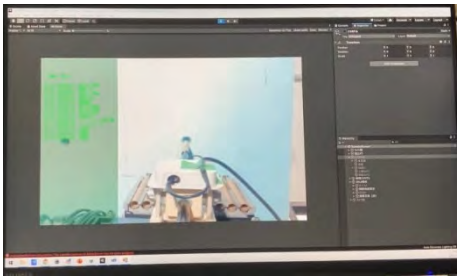


写真-8　システム画面（カメラ）



写真-9　システム画面（VR 表示）

(3) 孔位置検出システムの試験概要

本システムの開発にあたって，実際の全自動ドリルジャンボの座標位置合わせ精度を確認するために現場で検証試験を実施した（**写真-10**）．その後，室内試験でカメラやセンサなどの単体要素試験を実施し，模擬トンネルで自動装薬システムと併せて本システムの検証を実施した．

現場検証では，まず削孔データを収集し，その後，ジャンボ本体を少し移動させて再度設置し，本体座標を再取得後，削孔データを元に対象の孔位置座標にブームを移動させて装薬パイプを実際にガイドセルで送り出し，孔位置とパイプ位置を実測することで誤差の確認と挿入可否の検証を実施した（**表-1**）．

現場検証結果を元に，最大で 100mm 程度の誤差があっても孔位置を補正できるようなシステムを目指し，まずは室内で要素試験を行い，カメラやセンサの選定，ソフトウェアの基本アルゴリズムの確認を実施した．

模擬トンネル内の検証(**写真-7**)ではトンネル坑内の照度と一致するよう調整し，さらに切羽の凹凸と吹付の状態を再現した模擬切羽を製作して自動装薬システムの一連動作と併せて本システムの検証を実施した(**表-2**).

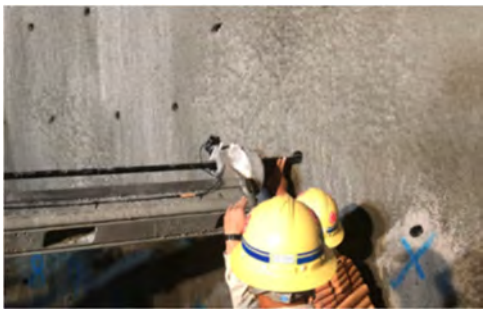


写真-10 現場検証

表-1 現場検証結果

孔番号	横方向誤差 (mm)		縦方向誤差 (mm)		装薬パイプ挿入可否
1	左	30	上下	0	×
2	左右	0	下	10	○
3	左右	0	下	10	○
4	左右	0	上下	0	○
5	左	20	下	30	×
6	左	30	下	20	×
7	左	**50**	下	**50**	×
8	左	10	下	10	×
9	左	30	下	10	×
10	左右	0	下	20	×

表-2 模擬トンネル検証結果

回数	孔位置からの離隔	装薬パイプ挿入可否
1	左に100mm	○
2	左に100mm	○
3	左に100mm	○
4	右に100mm	○
5	右に100mm	○
6	右に100mm	○
7	上に100mm	○
8	上に100mm	○
9	上に100mm	○
10	下に100mm	○
11	下に100mm	○
12	下に100mm	○

(4) 模擬トンネルにおける試験結果

実証試験結果を以下に列挙する.

【自動装薬システム】

・位置合わせ機構：孔位置検出システムと連動し，パイプ位置合わせや角度合わせが可能.

・親ダイ供給機構：50 本の模擬親ダイ（1～10 段×5 本）を供給可能（3 ブーム×50 本＝150 本供給可能）.

・送出し機構：親ダイ供給機構から自動装薬用親ダイの取出し，および，孔奥への親ダイ装薬が可能.

・増ダイ供給機構：含水爆薬や ANFO を想定した模擬粒状爆薬を模擬装薬孔内に隙間なく装薬が可能.

・全体システム : 各機構の連携により自動で模擬装薬孔（φ45mm, L=1.0m）に模擬親ダイ・増ダイを装薬可能.

【孔位置検出システム】

・孔位置と装薬パイプ位置に上下左右 100mm の誤差がある場合でも，正確な位置合わせが可能（**表-2**）.

・孔中心と装薬パイプ断面中心の誤差は最大で左右前後 10mm 以内の精度でセットすることが可能で，この誤差を吸収するために自動装薬用親ダイの先端コーンが十分機能していることが確認できた.

・一般的なトンネル坑内を想定した明るさ（100～150 ルクス）において，正確に装薬孔を検出できた.

4．現場試験概要と試験結果

(1) 現場試験の概要

模擬トンネル内での試験により，自動装薬システムの基本性能および孔位置の検出から装薬作業までの一連の動作が確認できたため，本システムを実際の山岳トンネル工事現場に持ち込み，現場環境下における性能の確認を実施した（**写真-11**）．本試験では孔位置検出後に実際の親ダイと増ダイ（粒状爆薬）を装薬し，発破するところまでを実施した．現場試験での確認項目は以下の通りとする.

① 切羽における本システムの動作（孔位置検出，装薬，位置合わせ・送り出し機構の連続動作）確認。

② 切羽に穿孔された孔へ親ダイを共有する際の，孔ずれや孔荒れに対する先端コーンの機能性.

③ 本システムで装薬された孔の発破状況.



写真-11 現場試験状況

(2) 試験結果

①システムの動作確認

穴位置の検出は，現場環境下においても正常に検出することができた．しかし，**写真-12** に示すように，検出対象とする孔の周囲に 5cm 以上の凸部があると，その部分を孔のエッジ（縁）として誤検出する（**写真-13**）ため，正確な孔の中心座標を算出することができないということが分かった．これについては今後，検出アルゴリズムの改良を行い，検出精度の向上を行っていく．



写真-12　孔周辺の凹凸状況

装薬作業については，穿孔長に合ったストロークを適切に設定し，親ダイを孔奥に設置した後，図-4 の手順⑧の通り，装薬パイプを後退させながら増ダイ（粒状爆薬）を装薬することで，しっかりと密装填されることが確認できた．比較するために装薬パイプを後退させた後，孔の口元付近から増ダイを装填してみたが，この場合は密装填ができずに粒状爆薬が孔内に散乱した状態となった．



写真-13　エッジ（縁）の検出状況

位置合わせおよび送り出し機構については，孔位置の検出後，中心座標が算出された状態においては制御した通りに動作することが確認できた．また，今回は孔位置検出システムと合わせて視覚的に位置合わせ状態を確認するためのレーザーサイト（**写真-14**）を実装して試験を行ったが，本機能は人間が目視で確認できるため，検出後の位置確認（誤操作防止）や，検出システムにエラーが生じた際の遠隔位置合わせの目印として非常に役立った．

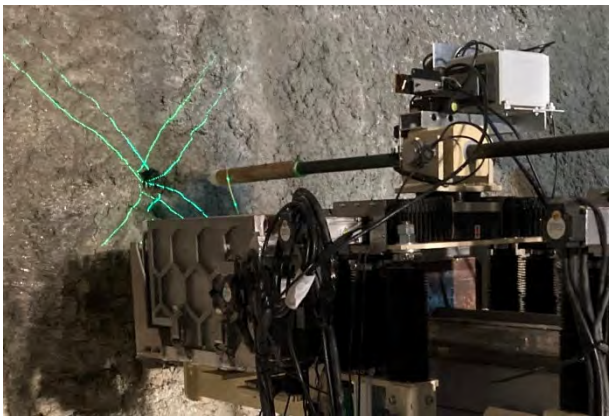


写真-14　レーザーサイトの実装状況

②先端コーンの機能性

今回の現場条件において先端コーンは実際の切羽でも，数ミリの孔ずれに対して柔軟に追従し，孔内に小石が残っている状態でも引っかかることなく装薬ができた．今後は様々な地山状態に対して検証を重ねていき，実用化を目指していく．

③発破状況

今回の試験においては，従来通り人力で装薬を行った箇所と同様に発破できていることが確認できた．

5．おわりに

今後は現場試験で得られた課題改善を行って本システムの完成度を向上させ，専用機の開発を進めるとともに，早期の実用化に向けて技術開発を推進していく．

謝辞：本技術の開発は，㈱前田製作所，アスラテック㈱，カヤク・ジャパン㈱，古河ロックドリル㈱，また，孔位置検出用ソフトウェアの開発は，ブレインビジョン㈱に協力を頂き，ここに記して謝意を表します．

参考文献

1）水谷和彦･坂下誠･浅井秀明･小笠原裕介･五味春香･下山悠･鈴木麟大郎：土木学会令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，山岳トンネル施工における自動装薬システムの開発，VI-662

2）小笠原裕介･坂下誠･浅井秀明･水谷和彦･五味春香･鈴木麟大郎：土木学会令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，自動装薬システムにおける装薬孔位置検出システムの開発，VI-957