

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

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

1. はじめに

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，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，この切羽立入作業が無ければ被災することはない．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を進めているが，装薬精度の向上を図るために，新たに装薬孔位置検出システムを開発した．本稿では，その構成と検証結果について報告する．

2. 自動装薬システムの概要

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起爆用の親ダイ（紙巻含水爆薬と電気雷管），増ダイ（紙巻含水爆薬を数個），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）が，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．

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）．

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た．



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

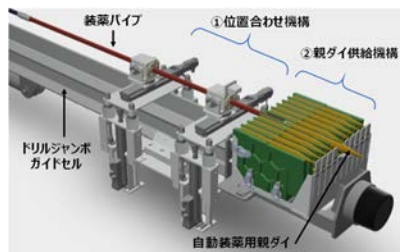


写真-3 自動装薬システム構成



図-2 自動装薬模式図

キーワード 山岳トンネル，発破掘削，装薬，自動装薬，センシング技術，自動化技術

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

3. 装薬孔位置検出システム

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ウ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。

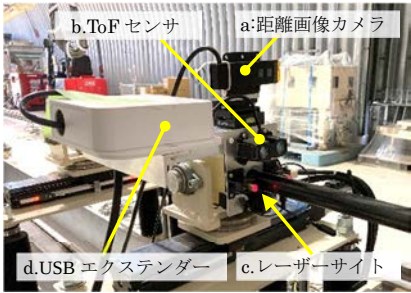


写真-4 孔位置検出システム

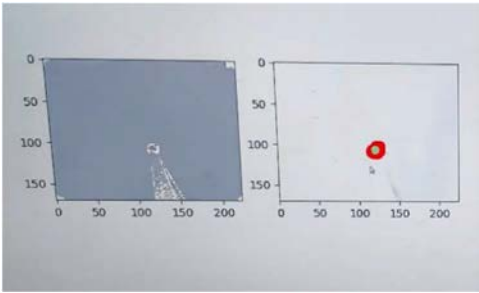


写真-5 検出時のモニター画面

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。

4. 検証内容

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-6）。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、最終的に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。



写真-6 現場検証



写真-7 模擬トンネル検証

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
	左	右	上	下	
1	左	30	上	0	×
2	左右	0	下	10	○
3	左右	0	下	10	○
4	左右	0	上	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	孔位置からの距離	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	○

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。

5. 検証結果

- ・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。
- ・トンネル内の明るさを想定した環境下において、正確に装薬孔を検出することが可能。

6. おわりに

模擬トンネルでの実証試験により、自動装薬および孔位置検出システムの基本性能が確認できたので、今後は本システムを実現場へ導入し、耐久性確認やマシンコントロールに向けた機能アップデートを行っていく。

謝辞：本技術の開発は、(株)前田製作所、アスラテック(株)、カヤク・ジャパン(株)、古河ロックドリル(株)、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(株)に協力を頂き、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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，VI-662，山岳トンネル施工における自動装薬システムの開発