『３ブーム自動装薬専用機』を用いた現場実証施工

青木　道範[1]

[1]前田建設工業株式会社　土木事業本部　土木技術部　トンネルグループ

山岳トンネル工事における切羽作業の安全性向上を目的として，切羽への作業員の立入りを不要とする3ブーム自動装薬専用機を開発した.現場において本装薬機を使用し，全自動ドリルジャンボのせん孔実績データを活用した孔誘導と，親ダイおよび増ダイの連続自動装薬を実証した.その結果，装薬作業時の切羽直下を無人化し，キャビン内からのワンマン操作による連続装薬を実現した.また，不爆や残留火薬は確認されず，良好な発破結果が得られ，自動装薬システムの実用性を確認した.

キーワード：自動装薬，装薬機，切羽作業，自動化，山岳トンネル

１．はじめに

山岳トンネルにおける労働災害の 9 割は切羽で発生している．特に装薬作業時の被災事例が約 4 割を占めている．これらの作業は切羽直下に作業者がやむを得ず立ち入る人力作業であり，この切羽立入作業そのものを無くすことが，抜本的な安全性向上につながる.

一方，令和 6 年 3 月に改正された「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」では，切羽（天端）から 45 度の範囲を特段の配慮を必要とする範囲として，可能な限り避けることが示されるとともに，最新のデジタル技術等を活用した各種作業の遠隔化・自動化を積極的に進めることが求められている．このような背景から，当社では，切羽への作業員の立入りを不要とし，装薬作業における安全性を抜本的に向上させることを目的として，これまで自動装薬機の開発 [1)]を進めてきた．本稿では 2024 年度に完成した，自動装薬システム搭載型「3 ブーム自動装薬専用機」（以下，装薬機）[2)]を山岳トンネル現場に導入し，実証施工を行った内容について報告する.

２．３ブーム自動装薬専用機の概要

一般的な装薬作業は，ドリルジャンボでせん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，込棒で突き固める（写真-1）.



写真-1　一般的な装薬状況

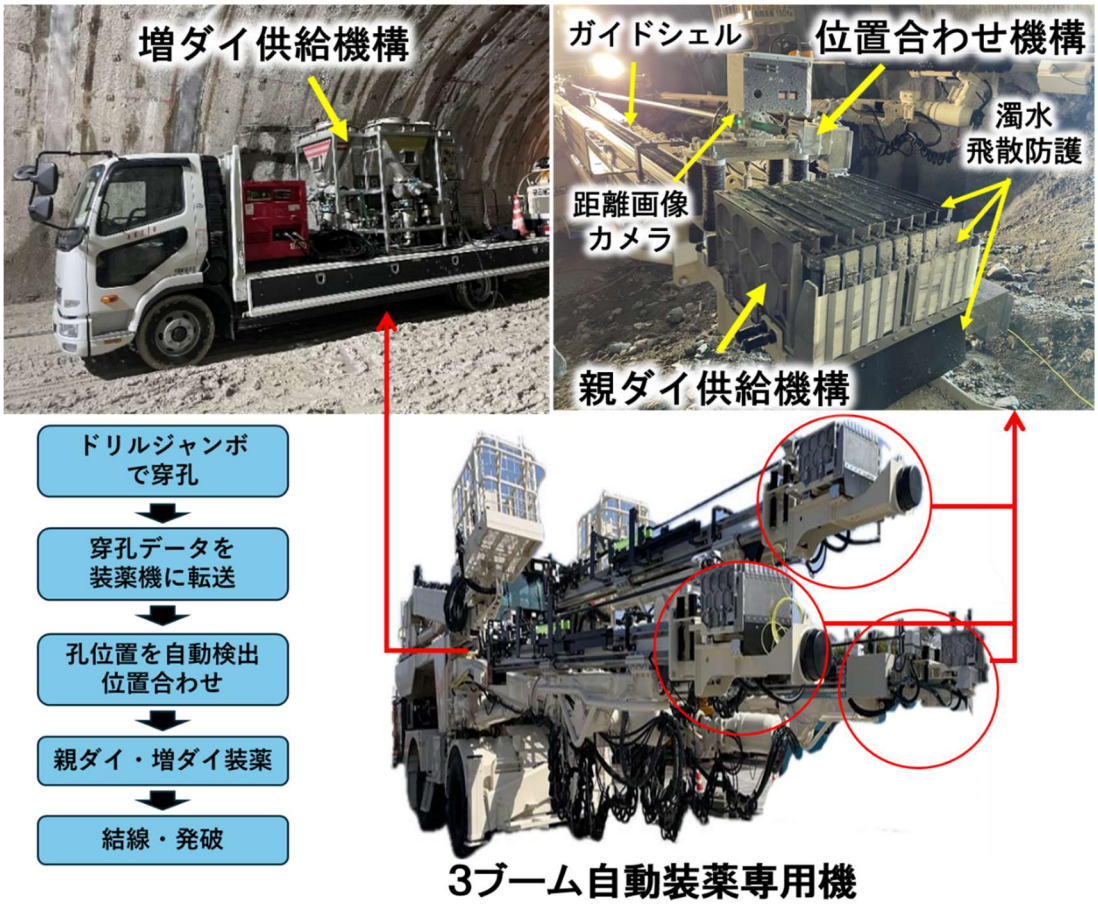


図-1　装薬機全体概要

新たに開発した装薬機は，全自動ドリルジャンボの機体をベースとし，3 本のブームに自動装薬システムを搭載したガイドシェルを装備している．装薬機による装薬作業は，ドリルジャンボでのせん孔終了後に機械を入れ替えて実施する．ドリルジャンボからせん孔位置や差し角等の実績データを装薬機に引き継ぎ，全自動で装薬孔への位置合わせを行う．その後，自動装薬システムにより高精度な孔位置検出を行い，火薬類の供給機構を用いて親ダイ（紙巻含水爆薬と非電気式雷管），および増ダイ（粒状爆薬）を自動で装填する（図-1）．

使用する火薬類について，親ダイは紙巻含水爆薬と非電気式雷管（導火管付雷管や無線電子雷管）の組み合わせとし，先端コーン（位置合わせ誤差・孔荒れ対策）と生分解性樹脂管（収納・把持機能）に内包してカートリッジ化した（写真-2）．親ダイカートリッジ外装に生分解性樹脂を使用することで，時間経過とともに分解されるため，トンネル掘削ずりへの産業廃棄物などの異物混入を防ぐことが可能となる．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が可能になる．また，粒状爆薬のため，密装填効果により込め物を詰める作業を省略することができる．



写真-2　カートリッジ化された親ダイ

３．実証施工

現場実証施工はトンネル延長 1,764 m，掘削断面積約 66 m²のＣⅡ-b パターン，上半断面を対象とした．地質は中生代白亜紀の花崗岩および花崗閃緑岩が分布する．

全自動ドリルジャンボによるせん孔完了後，せん孔実績データを用いて装薬機側で装薬プランを作成し，機械を入れ替えた．装薬機により爆薬を装填する孔は，切羽の上段・中段・下段より 2 箇所ずつ選定し，1 ブームあたり 6 箇所の孔に対して連続的に自動装薬を行った．カートリッジ化された親ダイを供給 BOX に格納（写真-3）し，増ダイ供給機構へ粒状爆薬を投入した後，自動装薬を開始した．

装薬作業中は，切羽直下約 7.5 m（切羽天端から 45°）の範囲を無人とし，キャビン内からの操作のみでワンマンオペレーターによる連続装薬を実施した（写真-4）．キャビン内では，カメラ映像による装薬状況の確認ができるほか，フィード圧や動作ステップを常時確認することが可能である（写真-5）．孔荒れによる親ダイの引っ掛かりや，孔奥での過度な爆薬の押し付け防止のため，フィード圧が規定値に達することで緊急停止する機構を備えている本実証施工では，連続して目標数量の爆薬を自動で装填できることを確認した．その後，従来と同様の方法で結線および発破を行い，不爆や残留火薬は確認されず，良好な発破結果が得られた（写真-6）．そのため，複数の孔に対して，装薬機による連続自動装薬が安定して実現可能であることを確認した．



写真-3　親ダイ格納状況



写真-4　自動装薬状況



写真-5　自動装薬状況（キャビン内）



写真-6　発破完了状況

４．おわりに

山岳トンネル工事の装薬作業を自動化できる 3 ブーム自動装薬専用機を開発し，現場における実証施工を行った．実際に火薬類を用いて，切羽直下に立ち入ることなくワンマンオペレーターでの装薬を実現した．しかし，実証施工の準備段階で切羽での自動孔誘導において，孔周りの吹付けコンクリートが広い範囲で割れている場合は，距離画像カメラで認識した孔位置がズレてしまう事象も確認されたことから，装薬孔検出アルゴリズムの改善が必要となっている．今後は，3 ブームでの同時装薬による作業時間の短縮を目指すとともに，現場での連続稼働による耐久性についても検証を重ねる予定である．また，今後社会実装が望まれている無線式の雷管等に対しても，対応できる仕様に機能拡張を進め，トンネル発破装薬作業全体の自動化，安全性・生産性向上を目指す．

謝辞：本技術開発に協力いただいた，㈱前田製作所，古河ロックドリル㈱，アスラテック㈱，ブレインビジョン㈱，カヤク・ジャパン㈱に感謝申し上げます．

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

2） 土木学会令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会，Ⅵ-631，自動装薬専用機の開発に関する報告