

# 6 m 継ぎボルト打設装置を搭載した ロックボルト打設機の開発

切羽作業を完全機械化し、安全で効率的な作業を実現

宮本 真吾

山岳トンネルにおけるロックボルト打設作業は、切羽近傍での高所作業であり、1本あたり20 kgを超える最長で6 mにも及ぶロックボルトを人力で挿入する作業であり、トンネル掘削作業の中でも特に過酷な重労働作業となっている。一方、建設業界全体を通じて担い手不足や作業員の高齢化が深刻化しており、ロックボルト打設作業のような人力作業を機械化・自動化することにより省力化や安全性の向上を図る技術開発が近年急速に進められている。本稿では、ロックボルト作業を完全に機械施工可能とすることを目的として開発した、6 m 継ぎロックボルト打設装置を搭載したロックボルト専用機「BOLTINGER」について紹介する。

キーワード：山岳トンネル，NATM，ロックボルト，機械化，省人化，安全性向上

## 1. はじめに

建設業では、高齢化が深刻化しており、それと同時に担い手不足の問題に直面している。経験工学といわれる土木工学では、今後の担い手不足は大きな問題となっている。このような状況でありながら、山岳トンネル工事では肌落ち災害が後を絶たない。トンネル工事の災害で最も多い災害が「肌落ち災害」であり、その多くが切羽で発生している。切羽での肌落ち災害が発生した場合、その重篤度は非常に高いため、肌落ち災害が発生する可能性の高い、切羽近傍での人力作業を可能な限り機械化することで、切羽近傍に作業員が立入らず作業を行えること、また現状の作業人員編成を低減することが特に重要である。以上のような背景から、切羽近傍での非常に危険な作業から作業員を解放すべく、6 m 継ぎロックボルト打設装置を搭載した「BOLTINGER」の開発を行った。本技術は、切羽近傍の作業の中で特に危険かつ過酷なロックボルト作業に着目して開発を行ったものである。

### (1) 従来のロックボルト工

山岳トンネルにおけるロックボルト工は、吹付コンクリートの施工が完了した地山に対して、周方向にドリルジャンボにて削孔を行い、モルタルを充填した後、ロックボルト（異形鋼棒）を挿入して、地山を縫い付ける工法である（図-1）。

従来のロックボルト工は、ドリルジャンボで周方向

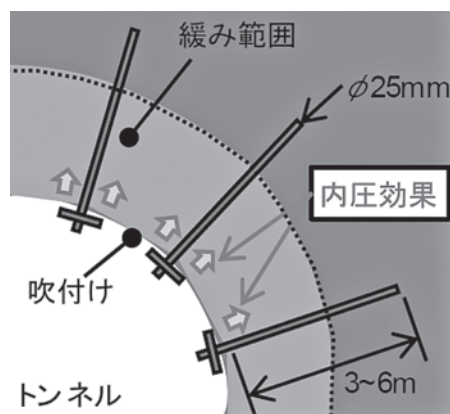
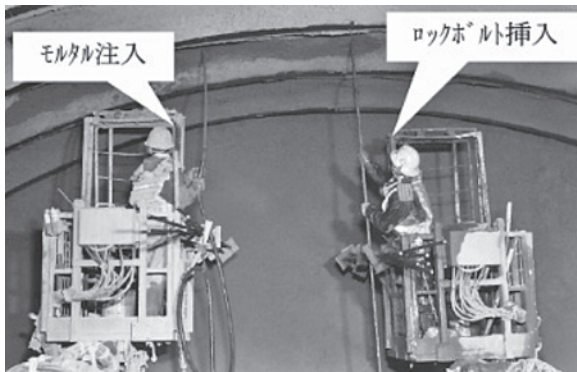


図-1 山岳トンネルにおけるロックボルト

に削孔を行った後、マンケージバスケットに乗った作業員がモルタルをホースで充填し、バスケットにあらかじめ積み込んでおいたロックボルトを人力で挿入する。ロックボルトは地山の性状に合わせて3 m~6 m程度の規格が設計され、中でも6 mのロックボルトは1本あたり20 kgを超える重量となり、狭隘なバスケット上での空中作業で長尺かつ重量物のロックボルトを人力にて挿入する作業はかなりの重労働となっている（図-2）。また、この作業は切羽直近での作業であり、切羽が崩落した場合は崩壊土砂に巻き込まれ、重篤な災害となるリスクを孕んでいる。

### (2) 既存のロックボルト打設装置

ロックボルト工の機械化を目指した技術は、海外を中心として普及が進んでいる。この装置の機構はロッ



図一2 ロックボルト人力打設状況

クボルト工における削孔、モルタル充填、ロックボルト打設の一連作業を全て行うものであり、削孔用削岩機、モルタル充填ホース並びに打設するロックボルトを保持しておくマガジンと挿入用の削岩機が一体となった機構となっている。この装置は、一連作業の機構全てが組み込まれていることから、総じて重量が重くなってしまい、機械本体に対して1台の組み合わせとなるのが一般的である（図一3）。既存のロックボルト専用機は、打設するロックボルトの全長に合わせて機械が設計されており、一般的に打設するロックボルト長に約1.5mの削岩機長を加えた全長となっている。つまり、6mのロックボルトを打設する場合には、7.5m（6m+1.5m）程度の打設装置全長となる。このような機械を国内で使用するには高さ方向に7.5mを超える空間が必要になるが、一般的に6mのロックボルトが設計上計画されるようなトンネルにおいては、地質条件が悪い場合が多く、計画断面を一度に掘削するような全断面掘削工法ではなく、掘削断面を上下に分割する上半先進ベンチカット工法等の採用が一般的である。上半先進ベンチカット工法の場合、上半盤に施工機械を設置する必要があり、掘削断面が小さくなることから、打設装置の全長が収まらない断面となることが多い。また、トンネルは地山の状況に



図一3 ロックボルト専用機例

応じて支保パターンが変わり、パターンに応じてロックボルトの長さも変更となることから、ロックボルト長の変更に柔軟に対応可能な打設装置の仕様が必要となる。

以上のような背景から、日本国内のトンネル現場特有の施工条件に適用可能なロックボルト打設専用機の開発を行ったものが今回の技術である。

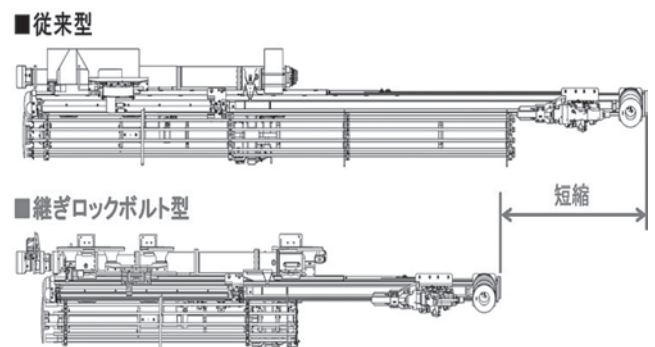
## 2. 技術の内容

### (1) 継ぎボルト打設装置

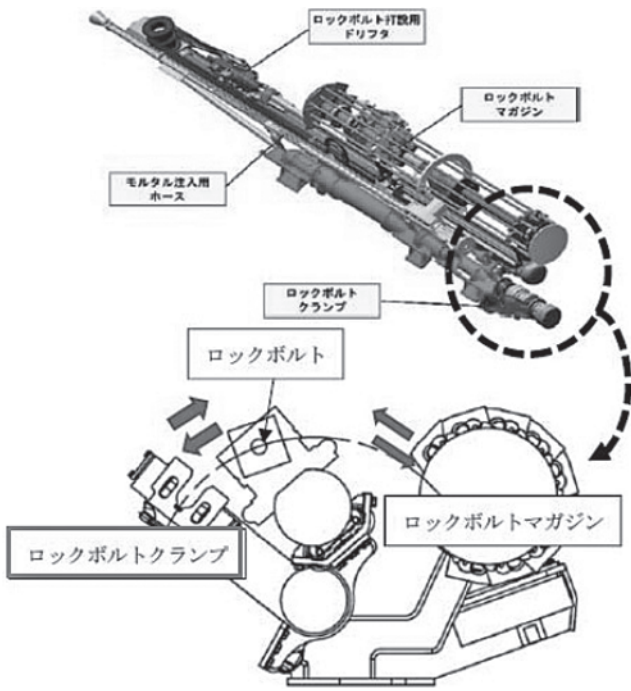
日本国内のトンネルの内空断面積は70~80m<sup>2</sup>程度であり、上半先進ベンチカット工法では、上半盤からトンネル天端までの高さが7m未満となることが多い。6mのロックボルトを打設しようとする、打設装置が断面内に収まらなくなってしまう。そこで6mのロックボルトを3mのロックボルト2本を継ぐ仕様にする事で、打設装置の長さを抑えることにより、断面内に収まる仕様とした。また、打設する可能性のある長さの異なるロックボルトへの対応も考慮し、装置長は1本物で最大となる4mのロックボルトを打設できるようにしながらも、全長6m未満となる機構を目指して開発を行った（図一4）。2本のロックボルトを継ぎ足す構造とするにあたり、1本目のボルトを把持できるように油圧のクランプを開発した（図一5）。打設の手順は、削孔した孔に1本目のロックボルトを挿入した後、これを油圧クランプで把持して、2本目のロックボルトを回転させながら連結する方式である。この機構に必要な専用のロックボルトも合わせて開発を行った。

### (2) 削孔作業

打設装置を検討するにあたって、前工程となる削孔機能を打設装置に持たせるかどうかの検討を行った。前述の通り、既存のロックボルト専用機は削孔から



図一4 打設装置全長の短縮

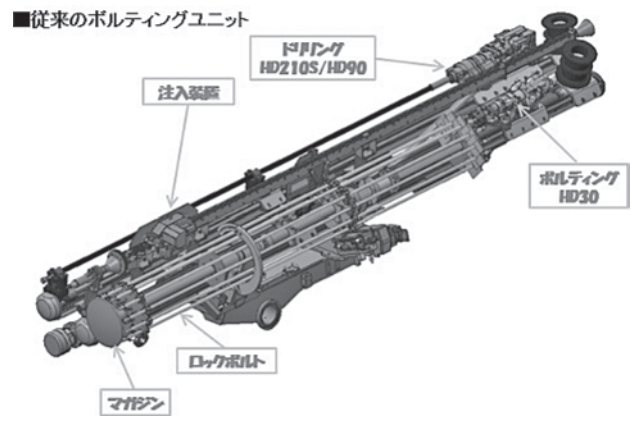


図一5 油圧クランプと打設装置

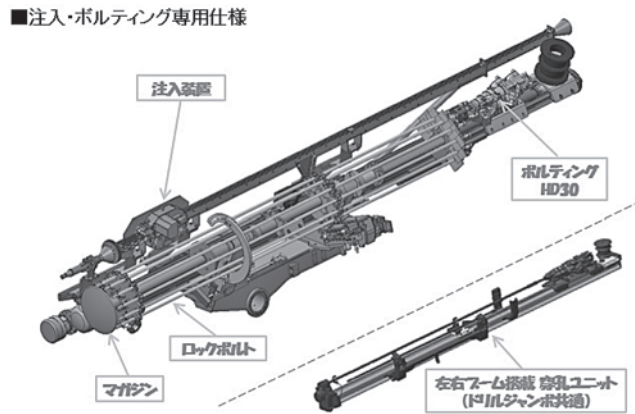
ロックボルト打設まで一連の作業を行うことができる半面、打設が完了しないと次の孔に移行できず、総じて施工時間が長くなる傾向にある。また、削孔機能まで付与すると削孔用と打設用の削岩機それぞれを1つの装置に搭載する必要があるため、重量上不利になるという問題があった。そこで、当該打設装置を使用する場合、削孔作業は別のブームで行うこととし、削孔用ブームと、モルタル充填、ロックボルト打設用ブームを分けることとした(図一6, 7)。なお削孔ブームで6mを削孔する際には、ロッドを機械的に接続できる既存技術「ロッドセッター」を使用することとした。この技術を使用することで、削孔は3mのロッドを継ぎながら行うことができるため、削孔装置においても全長を抑えることができた。これにより、削孔とロックボルト打設作業を同時並行で進められることとなり、作業サイクルの短縮を図った。機械全景を図一8に示す。

(3) 削孔ガイダンス機能

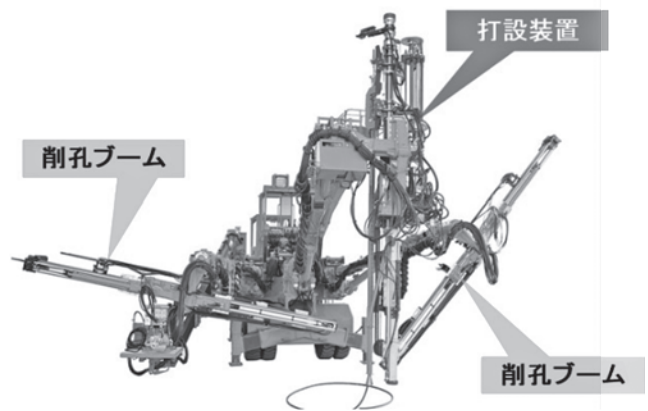
本技術の仕様は、削孔ブームと打設ブームが異なるため、削孔が終了した孔に対して打設ブームを移動させて施工を行う必要がある。開発した初号機(以下、1号機)はガイダンス機能を搭載していない仕様であったため、施工時に問題が生じた。具体的には、削孔した口元は目視確認が可能であるが、孔内部の三次元方向は確認ができないので、削孔した孔の方向と打設しようとする方向がうまく合わずに、無理にロック



図一6 従来の打設装置

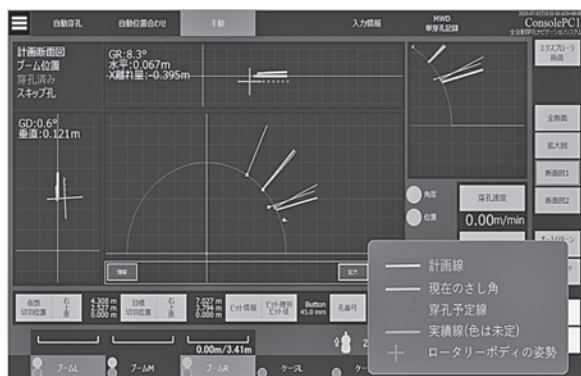


図一7 本技術の打設装置

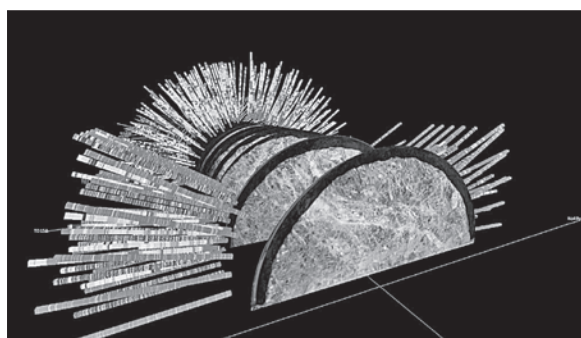


図一8 ロックボルト専用機全景

ボルトを挿入する形となった点である。これを解決するために2号機以降はベースマシンをコンピュータ仕様とすることで機械位置、ガイドシェルの方向が三次元座標で管理されたガイダンス機能を搭載し、削孔した孔の位置情報を画面で確認しながら打設装置を合わせることができるようになった。また、この機能により、位置情報だけでなく削孔データ(位置情報、速度、各種圧力等)も取得できるようになり、三次元削孔情報をBIM/CIMモデルに統合することで、地山内部の状態を立体的に把握できるようになった。図一9に



図一〇 ガイダンス画面



図一〇 三次元削孔データ (BIM/CIM モデル)

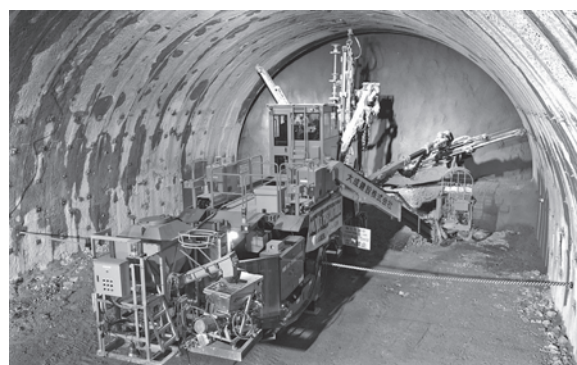
削孔ガイダンス画面を、図一〇に三次元削孔データを示す。モデル空間に地山情報が見える化されることで、岩判定や補助工法の選定などの判断材料として削孔情報が有効利用されることが期待される。

#### (4) モルタル供給装置の一体化

1号機ではロックボルト専用機として、削孔と打設に関しては可能となったものの、モルタル充填を行うためには、別にモルタルポンプ、モルタル供給装置とこれを搭載する車両の配置、さらに操作する作業員が1名必要であった。2号機以降は、さらなる省人化と効率的な施工を実現するために、これらの機能をロックボルト専用機本体と一体化した。ベースマシンの後方にモルタルを供給するためのサイロと、モルタルを練り混ぜるポンプを搭載し、その操作を運転席内部のボタン操作で可能な仕様とした(図一〇)。このモルタル設備はリフト式で上下できるようになっており、車体走行時は上方にあげておくことで、不陸走路への干渉を回避できるように工夫している。これによりモルタル充填に必要な機能全てを一体化させることができ、モルタルポンプを操作する作業員が1名とモルタル供給装置を搭載する車両を1台削減することが可能となった。2号機での作業状況を図一〇に示す。



図一〇 モルタル供給装置の一体化



図一〇 BOLTINGER での施工状況 (2号機)

### 3. 技術導入の効果

#### (1) 省人化の達成

従来のロックボルト作業はオペレーターが2名、高所でのロックボルト打設作業員が2名、モルタルポンプ操作者1名の計5名編成で作業を行っていた。本技術を活用することで、オペレーター2名がキャビン内で削孔からロックボルト打設までの一連作業を行うことが可能となり、作業に必要な作業員を60%削減することで、生産性が2.5倍に向上した。

#### (2) モルタル専用車両が不要に

従来はドリルジャンボの他に、モルタルポンプを搭載した4t平車級の車両を必要としていたが、ロックボルト専用機とモルタルポンプ、供給装置を一体化させたことにより、車両を1台削減することができた。また、トンネル坑内を走行する車両を減らすことにより、安全性の向上に繋がったといえる。

#### (3) 切羽肌落ち災害のリスクをゼロに

ロックボルト工に関わる一連の作業を完全に機械化することにより、切羽近傍での人力作業を排除し、作業員を高所での重労働作業から解放することで、切羽

肌落ち災害のリスクをゼロにすることができた。

#### (4) ガイダンス機能の活用

ガイダンス機能を搭載したコンピュータ仕様とすることで、削孔装置と打設装置が別のブームになってしまうことで生じる、位置合わせの問題を解決した。また、従来はロックボルトの作業前に行っていた、打設位置をスプレー等で明示する作業が不要となった。この打設位置を明示する作業は、吹付作業の合間に行っていたので直接サイクルタイムに影響はないが、危険な高所作業を削減できたことで、安全性が向上した。

また、削孔データを取得し、三次元モデルに統合することで、周辺地山の情報を立体的に把握することが可能となり、岩判定や補助工法の検討にも活用することができる可能性を示した。

## 4. おわりに

山岳トンネルの掘削作業は、削孔、装薬、発破、ズリ出し、支保工建込、吹付、ロックボルトの一連作業を繰り返すものである。これらの作業はトンネル特殊工と呼ばれる多能工が5人1組となってすべての作業をこなしながら進めるものであり、海外のように作業ごとに専門工事業者が入れ替わりながら進めるものではない。よって、すべての作業工程において、自動化・機械化技術を高いレベルまで開発しなければ、全体を通じての省力化は達成し得ない。

本技術はロックボルト工に着目して開発したもので

あり、ロックボルトが省力化されたからと言って、すべての作業を2人で施工できるように変わるわけではないが、各作業工程において、それぞれ省力化技術は開発されており、すべての工程において技術が整えば、その中で最も人数を要する作業に合わせて作業人員が計画されることとなる中で、先陣を切って省力化の道筋を示せたものと考えている。

将来的にはトンネル掘削作業全体が1~2人で施工できるようにロックボルト工以外の作業工程でも技術開発を進め、建設業における山岳トンネル工事分野での担い手不足解消と、安全性の向上による切羽災害の撲滅、および生産性向上の推進に引き続き尽力していきたい。

JICMA

#### 《参考文献》

- ・宮本真吾、友野雄士：6m 継ぎロックボルト打設装置の開発，第76回土木学会年次学術講演集（VI-904），2021
- ・川元健太郎、宮本真吾ら：6m 継ぎロックボルト打設装置の現場導入による作業の省力化，第76回土木学会年次学術講演集（VI-905），2021
- ・宮本真吾、友野雄士ら：ロックボルト打設専用機の機能拡張，第77回土木学会年次学術講演集（VI-798），2022

#### 【筆者紹介】

宮本 真吾（みやもと しんご）  
大成建設株式会社  
土木本部 土木技術部  
課長

