

全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の開発 —山岳トンネル工事における余掘り低減技術および地山診断技術—

Development of Drilling-Guidance-System "Drill Navi" by Tracking Position of Rock Drills Automatically

若林 宏彰*¹ 富澤 直樹*¹ 森山 祐三*²
Hiroaki Wakabayashi Naoki Tomisawa Yuzo Moriyama
高田 篤*² 福井 正規*¹
Atsushi Takada Masaki Fukui

要旨

山岳トンネルで多く採用される発破工法では、余掘りが増大することで、材料コストや施工サイクルのロスが問題になっている。また、山岳トンネルは地下深部にある線状構造物であり、事前に地表から十分な地質調査を行えないため、切羽前方の地質を適切に評価しながら掘進することが重要である。

全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」は、山岳トンネルで標準的に使用するドリルジャンボを高度化することで、発破孔やロックボルト、補助工法等の全ての穿孔作業を高精度に行うとともに、全削岩機に搭載した穿孔探査器で取得した位置情報を持った穿孔データを地山診断に活用することで、上記の課題を解決したものである。

本報告は、全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の概要と、九州新幹線(西九州)新長崎トンネル(東)他工事において本システムを導入した結果について紹介する。

キーワード：山岳トンネル 発破工法 穿孔 余掘り低減 地山診断

1. はじめに

国内大型プロジェクトとして期待されるリニア中央新幹線や北海道新幹線では、路線の大半を長大トンネルが占める。このような山岳トンネル工事の多くで採用される発破工法では、一般的に余掘りを低減させることが課題となっている。余掘りの増大は、材料や施工サイクルのロスになるほか、トンネル周辺地山を痛め、安全性や品質の低下の原因となる可能性がある。

この余掘り低減対策として、トンネル外周孔の間隔を狭め、1孔当たりの火薬量を低減しながら発破を行うスムーズブラスティング工法が一例として挙げられるが、最適な制御を行うためには、トンネル外周孔の正確な穿孔位置と、さし角（トンネル計画線に対する穿孔方向）を適切に確保しながら正確な深さで穿孔する必要がある。また、硬岩地山において工期短縮を図るために行う長孔発破掘削では、余掘り低減のためのトンネル外周孔の穿孔精度のみならず、最初に切羽奥行き方向に自由面を作るための芯抜き孔の穿孔精度を確保することが重要となってくる。

一方、山岳トンネルは地下深部にある線状構造物であり、事前に地表から十分な地質調査を行えないのが一般的である。したがって、トンネルの品質を確保しながら安全に施工するためには、施工中に切羽前方の地質を適切に評価しながら掘進することが重要である。

一般的にトンネル施工中に実施されている切羽前方探査には、ドリルジャンボの削岩機を利用して穿孔速度やくり粉性状を把握する短尺（L=3～5m）または長尺（L=20～30m）の探りノミ、穿孔中の削岩機の油圧データを解析して地山評価を行う削孔検層、発破等で岩盤を伝わる弾性波速度を解析して地層境界や断層位置を推定する弾性波探査等があるが、それぞれに経済性、施工性、探査時間、予測精度について問題点を抱えている。

今回開発した全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」は、山岳トンネルで標準的に使用するドリルジャンボに、

①自動追尾式トータルステーションと位置検知用センサーにより削岩機の穿孔位置を把握し、ガイダンス用モニターにしたがって予め計画した穿孔位置（位置、さし角、穿孔長）へ正確に誘導する穿孔誘導技術

②日常の穿孔作業で取得した位置情報を持った穿孔データを活用した地山診断技術

を搭載することで、山岳トンネル工事における施工中や完成後の品質や安全性確保、コスト縮減や工程確保を可能としたものである。

本報告では、全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の概要と、九州新幹線(西九州)新長崎トンネル(東)他工事に本システムを導入した効果について紹介する。

*1 土木事業本部 技術部 *2 九州支店 土木部

2. システム概要

2.1 システムの特徴

全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」は、穿孔誘導技術と地山診断技術で構成されている（図1）。

以下にそれぞれの技術について説明する。

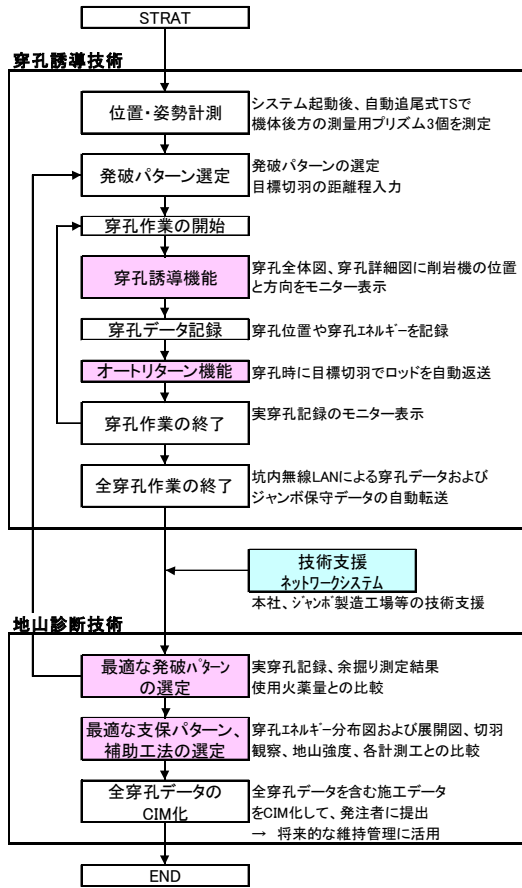


図1 全断面追尾式穿孔誘導システム フロー図

2.1.1 穿孔誘導技術

穿孔誘導技術は、①穿孔誘導機能と②オートリターン機能で構成される。これらの機能により、トンネル周辺孔や芯抜き孔を含む全発破孔を高精度に穿孔し、余掘りの低減や施工サイクルの短縮を図る。

①穿孔誘導機能

穿孔誘導機能は、ドリルジャンボのガイドシェル後端に設置した測量用プリズムによるTS測量（図2）と、全削岩機に搭載した9箇所的位置検知用センサー（図3）により穿孔位置を正確に把握し、予め計画した穿孔位置と実穿孔位置をガイダンス用モニター（図4）に表示して削岩機を誘導することで、トンネル周辺孔や芯抜き孔を含む全発破孔を高精度に穿孔する機能である。

本機能では、余掘り低減のために精度が求められるトンネル周辺孔の穿孔には、ガイドシェル後端に設置した測量用プリズムによるTS測量と位置検知用センサーで、また、

ドリルジャンボの機体の影になり、ガイドシェル後端の測量用プリズムを直接測定できない芯抜き孔等の穿孔には、位置検知用センサーのみで削岩機の位置情報を取得する。

本機能により、全発破孔を高精度に穿孔し、余掘りを低減することで、施工サイクルの短縮と使用材料のロス低減を図ることができるとともに、ロックボルトや長尺先受け工などの補助工法を高精度に穿孔できる。

②オートリターン機能

オートリターン機能は、穿孔ビットが計画位置（目標切羽）に到達すると、自動的に穿孔を終了しロッドが後退する機能である（図5）。

本機能では、長孔発破掘削や、Vカットで行う芯抜き孔とトンネル周辺孔など穿孔長の精度が求められる穿孔や、切羽面の凹凸が大きくビットの到達位置が判断しにくい穿孔において、オペレータの経験や技量に関係なく、全ての穿孔到達位置を自動で揃えることを可能とした。

本機能により、余掘りをさらに低減できるとともに、穿孔時間を短縮し、発破後の1進行長も計画的に管理できる。

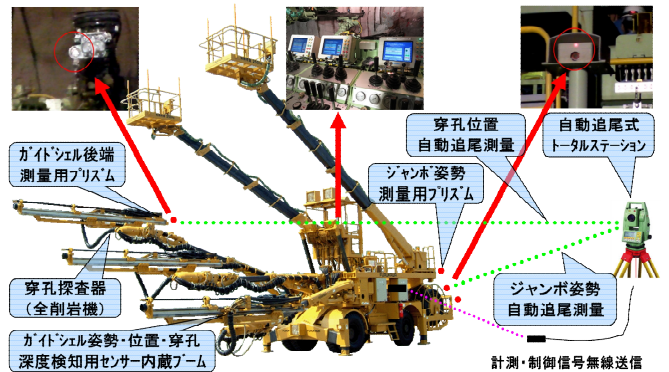


図2 全断面追尾式穿孔誘導システム 概要図

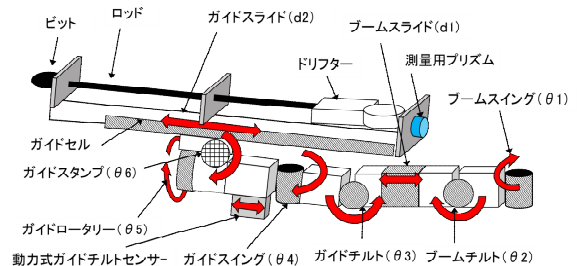


図3 位置検知用センサー 概要図



図4 ガイダンス用モニター

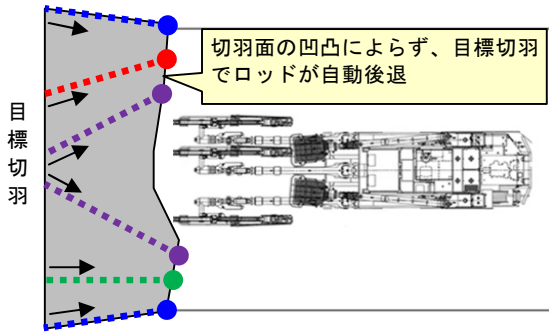


図5 オートリターン機能 概要図

2.1.2 地山診断技術

穿孔時の油圧データ（打撃圧、フィード圧、穿孔速度、打撃数等）を取得できる穿孔探査器（図6）を全削岩機に搭載し、得られた油圧データから地山状況の定量的な指標となる穿孔エネルギーを算出する。本機能と穿孔誘導技術で取得した穿孔位置データとを統合することで、位置情報を持った穿孔エネルギーを穿孔データとして取得、利用できる。

本機能により、定期的な長尺の切羽前方探査で得られる穿孔データと、日常の発破孔やロックボルト等の穿孔作業で得られる短尺かつ複数の穿孔データを利用することで、切羽前方、切羽全面、トンネル周辺を含むトンネル全長について詳細かつリアルタイムに地山診断を行うことが可能である（図8）。



図6 穿孔探査器（記録盤）

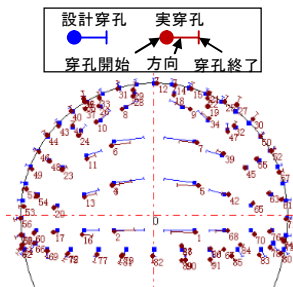


図7 実穿孔記録表示例

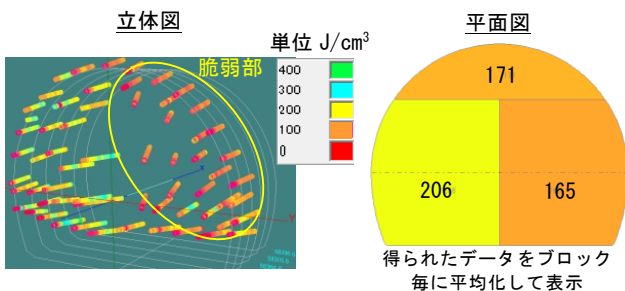


図8 穿孔エネルギー分布図

2.2 本システムの運用手順

穿孔誘導技術および地山診断技術の運用手順を示す。

2.2.1 穿孔誘導技術

- ①ドリルジャンボが切羽に到着後、ドリルジャンボの機体後尾に設置した3箇所の測量用プリズムを、自動追尾式TSで測定し、機体の位置座標を把握する（図2）。
- ②操作席に設置されたガイダンス用モニターに、目標切羽の距離程を入力するとともに、予め計画した発破パターンやロックボルト打設位置を表示させる。
- ③ガイドシェル後端に設置した測量用プリズムのTS測量と、各削岩機のブームに設置した9箇所のセンサーにより、削岩機の位置を検知し、ガイダンス用モニターにリアルタイムに表示させる（モニターに表示される穿孔位置の設計誤差は±5cm）（図3）。
- ④全体画面を見ながら計画した穿孔位置に削岩機を誘導後、詳細画面（平面図、縦断図）に切り替え、穿孔位置と角度を正確に合わせて穿孔を開始する（図4）。
- ⑤ビットが目標切羽に到達すると、オートリターン機能により、自動的に穿孔を終了しロッドが後退する（図5）。
- ⑥全削岩機に搭載した穿孔探査器により、穿孔時の油圧データ（打撃圧、フィード圧、穿孔速度、打撃数等）を取得し、地山状況の指標となる穿孔エネルギーを算定する（図6）。算出された穿孔エネルギーと位置情報データを統合し、穿孔データとしてドリルジャンボのシステムパソコンに記録する。
- ⑦穿孔作業中は、ガイダンス用モニターに実穿孔記録をリアルタイムに表示する。オペレータは、③～⑦を繰り返しながら穿孔作業を行う。
- ⑧穿孔作業終了後、⑥で統合した穿孔データとドリルジャンボの保守データ（電力過負荷や油温上昇などの異常履歴）を、坑内無線LANの経路で、工事事務所や、ドリルジャンボ製造工場、本社技術部等の技術支援ネットワーク関連部署のパソコンへ自動転送する。

2.2.2 地山診断技術

- ①工事事務所のパソコンにおいて、実穿孔記録や余掘り測定結果、使用火薬量等を比較して、最適な発破パターンを作成する（図7）。
- ②位置情報を持った穿孔データを、立体図やブロック毎（天端、右側、左側）の平均化した平面図により、地山状況を定量的に評価する（図8）。
- ③切羽前方探査で得られる長尺の穿孔データと、発破孔やロックボルト等の穿孔作業で得られる短尺かつ複数の穿孔データを蓄積し、最適な支保パターンや補助工法を検討する。
- ④掘削中の地山トラブルやジャンボの機械トラブルが発生した場合、技術支援ネットワークシステムを活用し、各専門分野の技術支援を受けることで早期解決を図る。

3. 現場実証試験

3.1 工事概要

九州新幹線（西九州）新長崎トンネル（東）他工事の57km850m～58km500mの650m間において、全断面穿孔誘導システム「ドリルNAVI」の現場実証試験を実施し、本システムの導入効果を確認した。

表1に工事概要、図9に地質縦断図および平面図、図10に支保パターンを示す。

表1 工事概要

工事名称	九州新幹線(西九州)新長崎トンネル(東)他工事
発注者	鉄道建設・運輸施設整備支援機構
施工者	鴻池組・日本国土開発・西武建設・竹下建設 共同企業体
工事場所	長崎県長崎市現川町地内
工期	2013年3月～2018年2月
穿孔機械	3ブーム2バスケットドリルジャンボ 170kg級
工事概要	・工事延長3900m、トンネル延長3870m (NATM、発破掘削、内空断面積66.8m ² 、補助ベンチ付き全断面工法) ・地質状況: 変朽安山岩、角閃石安山岩、輝石安山岩、凝灰角礫岩

3.2 本システムにおける導入効果の確認方法

3.2.1 穿孔誘導技術

①余掘り量の測定方法

余掘り量は、レーザースキャナーにより吹付け面の凹凸を測定し、設計吹付けラインと実吹付けラインとの差分をトンネル周方向で平均化して算出した。

②サイクルタイムの測定方法

穿孔、装薬、発破、ずり出し、吹付け、およびロックボルトの施工時間を測定した。また、発破孔の穿孔作業に着目し、削岩機の穿孔速度や移動時間、発破孔数を分析して、施工時間の短縮要因を確認した。

3.2.2 地山診断技術

①最適な発破パターンの作成

掘削を担当する協力業者の2班それぞれにおけるオペレータの実穿孔記録を分析し、ガイダンス用モニターに表示する計画発破パターンを作成した。その後、余掘り測定結果とオペレータによるヒアリングを重ね、最適な発破パターンに修正した。

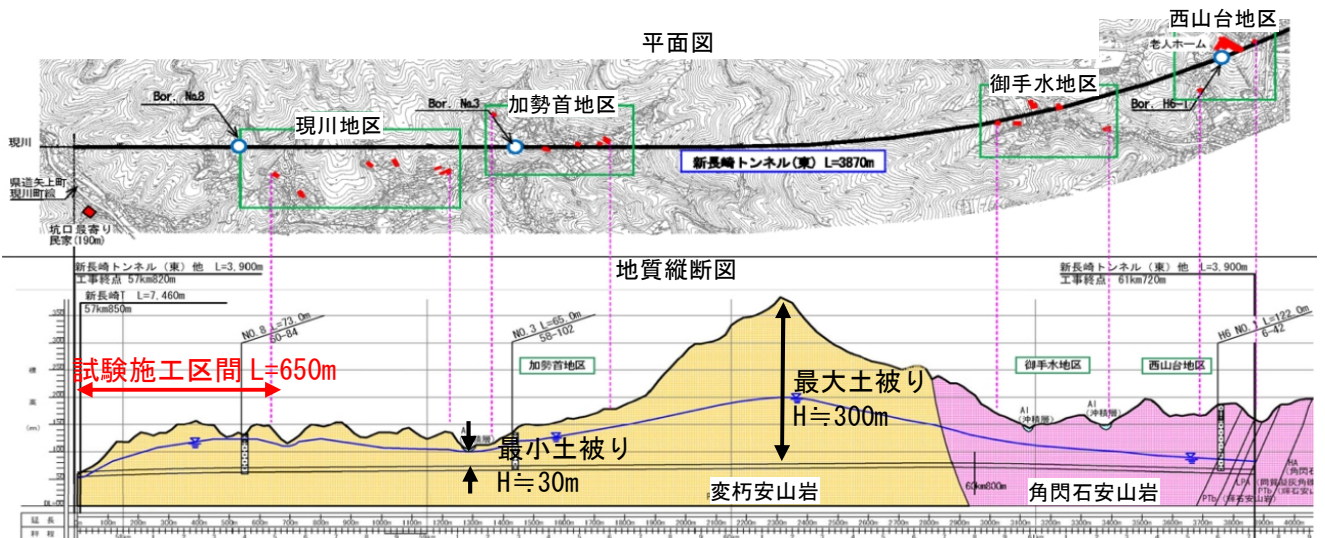


図9 新長崎トンネル（東）他工事 地質縦断図および平面図

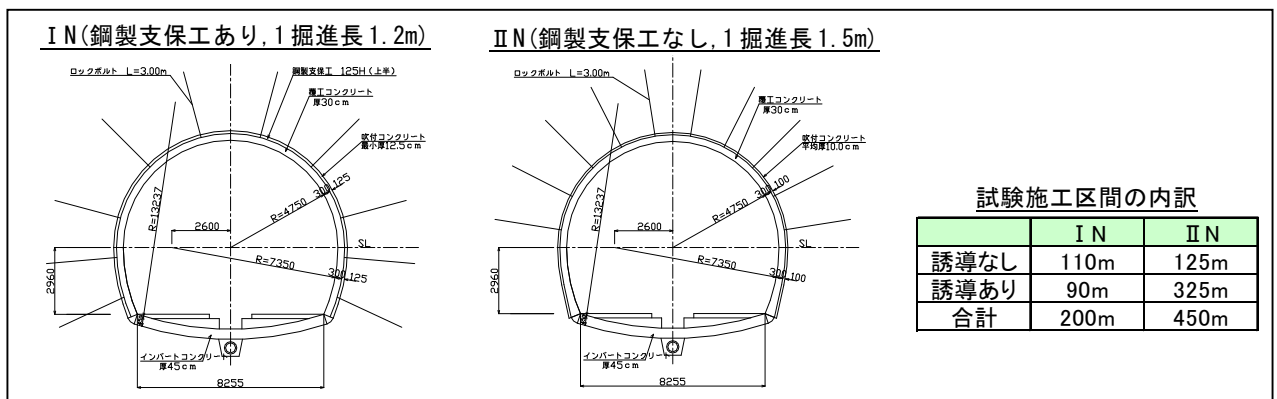


図10 支保パターン

②地山の評価方法

全削岩機に搭載した穿孔探査器で取得した油圧データから地山状況の指標となる穿孔エネルギーを以下の式で算出し、穿孔位置データと統合した。

$$\text{穿孔エネルギー}(\text{J}/\text{cm}^3) = \frac{\text{打撃エネルギー}(\text{J}) \times \text{打撃数}(\text{bpm}) \times \text{損失係数}K}{\text{穿孔速度}(\text{cm}/\text{min}) \times \text{孔断面積}(\text{cm}^2)}$$

次に、発破孔の穿孔データを、穿孔エネルギー立体図や各ブロック毎に平均化した穿孔エネルギー分布図に表示し、切羽観察記録と比較した。また、支保パターン毎に平均穿孔エネルギーの分布状況を確認した。

さらに、定期的な切羽前方探査や日常の穿孔作業で取得した穿孔エネルギーと、切羽における原位置でのロックシューミットハンマーによる岩盤強度との相関性を確認した。

3.3 本システムの導入効果

3.3.1 穿孔誘導技術

①余掘り量測定結果

図 11 に余掘り量測定結果を示す。

鋼製支保工のある I N パターンにおける平均余掘り量は、誘導なしで 5cm、誘導ありで 1.7cm となり、約 66% 低減した。また、鋼製支保工のない II N パターンにおける平均余掘り量は、誘導なしで 20.5cm、誘導ありで 10.3cm となり、約 50% 低減した。

②サイクルタイム測定結果

図 12 にサイクルタイム測定結果を、図 13 に穿孔速度測定結果を、図 14 に発破孔数測定結果を示す。

図 12 より、サイクルタイムは、誘導なしで 5.2 時間、誘導ありで 4.4 時間となり、約 15% 低減した。

図 13 より、削岩機の平均移動時間は、誘導なしで 29 秒、誘導ありで 20 秒となり、約 31% 低減した。また、穿孔速度は、誘導なしで 1.9m/分、誘導ありで 2.4m/分となり、約 26% 向上した。

図 14 より、発破孔数は、誘導なしでは、地山の穿孔エネルギーが大きくなるにつれて増加傾向にあったが、誘導ありでは、地山の穿孔エネルギーの大小にかかわらず、ほぼ一定孔数で推移していることがわかった。

これらの測定結果とオペレータへのヒアリングにより、誘導ありでは、穿孔誘導機能により、モニターに表示される計画発破パターンや実穿孔記録を参考に穿孔するため、削岩機の移動時間の短縮や孔数を抑制できること、オートリターン機能により、穿孔時間の短縮や掘り過ぎを抑制できることがわかった。特に図 14 に示すように、地山の穿孔エネルギーが 100~400J/cm³ の範囲において、誘導なしでは、オペレータは地山が硬くなると孔数を増やす必要があると思いついでいたが、誘導ありでは、ガイダンスと実

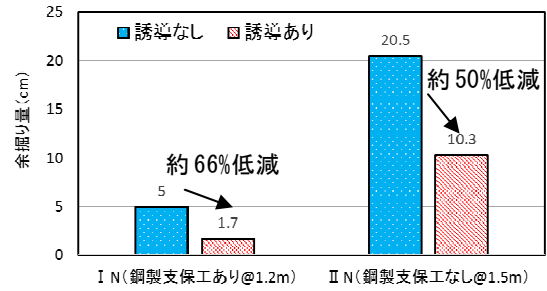


図 11 余掘り量測定結果

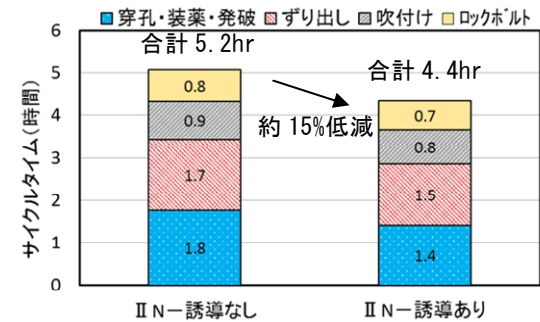


図 12 サイクルタイム測定結果

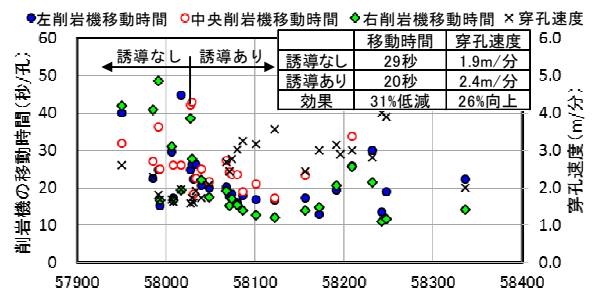


図 13 穿孔速度測定結果

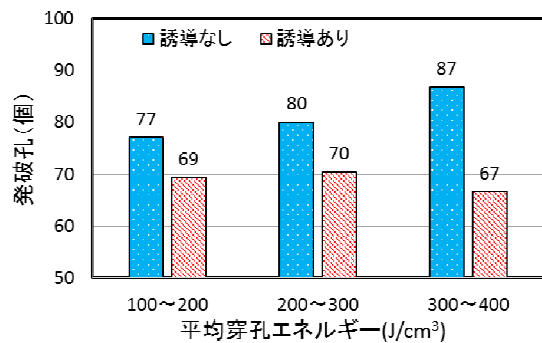


図 14 発破孔数 (II N パターン) 測定結果

際の発破結果から、その必要性がないことを確認した。その結果、孔数抑制による穿孔・装薬時間の短縮や、余掘り低減によるずり出しや吹付け時間の短縮にも効果があった。

3.3.2 地山診断技術

①最適な発破パターンの作成

図 15 に掘削担当の A および B 班の実穿孔記録と計画発破パターンを示す。

実穿孔記録によると、同一支保パターンにおいて、A 班より B 班の方の孔数も多く、穿孔長も長いことがわかった。

このことから、実際の発破パターンは、オペレータの経験や技量によって大きく異なることがわかった。

最適な発破パターンは、余掘り測定結果やオペレータへのヒアリングを重ね、芯抜き孔やトンネル周辺孔の間隔、穿孔長やさし角を修正しながらAB各班で作成した。

なお、現在、B班は、孔数が少なく、穿孔長の短いA班の発破パターンを参考に穿孔し、効率化を図っている。

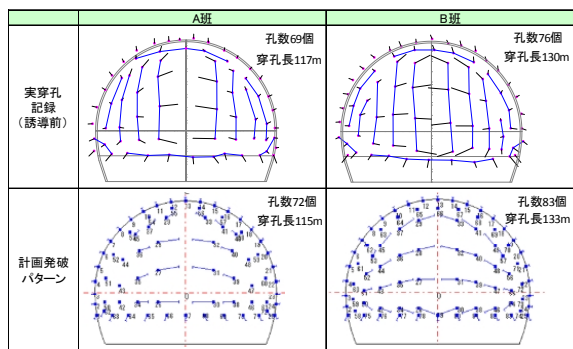


図 15 実穿孔記録と計画発破パターン (ⅡNパターン)

②地山評価

図 16 に切羽観察記録と穿孔エネルギーの関係を、図 17 に支保パターン毎の穿孔エネルギー分布状況を、図 18 に穿孔エネルギーと岩盤強度の関係を示す。

図 16 より、切羽の肌落ちや崩落箇所と穿孔エネルギーの低い箇所とが比較的一致していることがわかった。

図 17 より、平均穿孔エネルギーは、INパターンで100未満~300J/cm³ (平均 159J/cm³)、ⅡNパターンで100~400J/cm³ (平均 283J/cm³) に分布していることがわかった。

図 18 より、切羽前方探査 (L=30m×1本) で取得した穿孔エネルギーよりも、短尺で複数の穿孔作業で取得した平均穿孔エネルギーの方が、切羽における原位置での岩盤強度との相関性が高いことがわかった。

これらの結果より、日常の穿孔作業で得られる平均穿孔エネルギーは、直近切羽の地山状況を面的かつ定量的に評価でき、切羽の安定性を適切に把握できることがわかった。

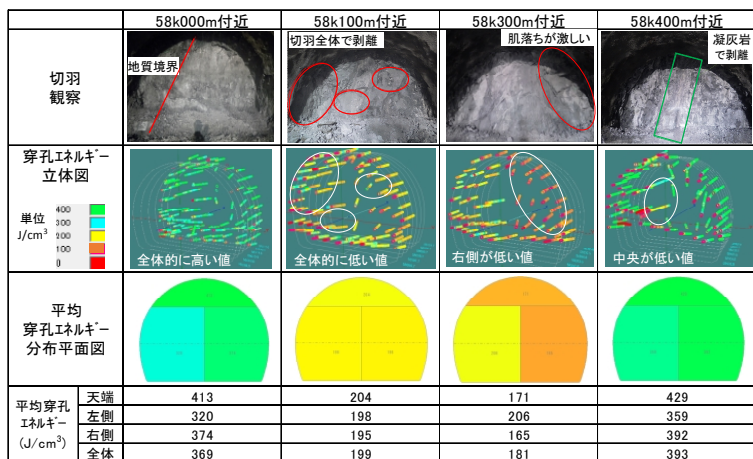


図 16 切羽観察記録と穿孔エネルギーの関係

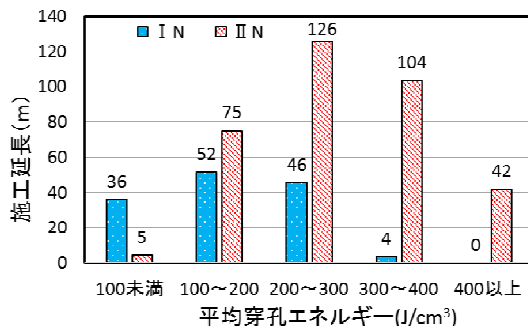


図 17 支保パターン毎の穿孔エネルギー分布状況

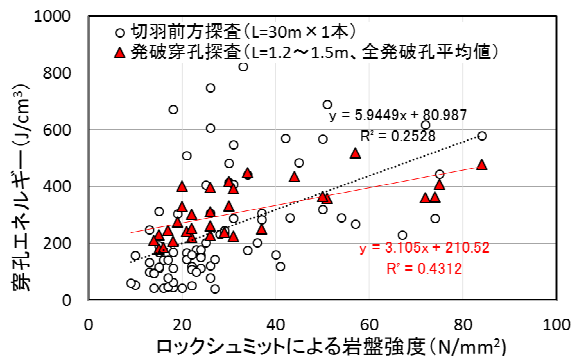


図 18 穿孔エネルギーと岩盤強度の関係

4. まとめ

現場実証試験における全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」を導入した効果を以下にまとめる。

- ①穿孔誘導技術により、オペレータの経験や技量によらず、余掘りを約 50~66%、サイクルタイムを約 15%低減できる。
- ②地山診断技術により、日常の穿孔作業において、特別な探査時間を要することなく、高精度な地山診断ができる。
- ③定期的な切羽前方探査と、日常の穿孔作業で得られる穿孔エネルギーを様々な方法で図化することで、切羽前方、切羽全面、トンネル周辺 (ロックボルト孔等) を含むトンネル全長について高精度かつ詳細な地山診断ができる。

5. おわりに

現場実証試験により、全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の優れた効果を確認できた。

今後は、切羽観察記録、岩盤強度や計測結果等の施工データを蓄積し、穿孔データとの相関性を把握することで、支保パターンの選定精度の向上を図るとともに、工事完了後は、これら穿孔データを含む施工記録を CIM 化し、発注者に引き継ぐことで、山岳トンネルの維持管理に活用していくことを目標としている。

最後に、本技術の現場適用をご承認頂いた (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構、ならびに、共同開発者である古河ロックドリル(株)、マック(株)、カヤク・ジャパン(株)の関係各位に感謝の意を表します。