全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」の開発

ー　山岳トンネル工事における余掘り低減技術及び地山診断技術　ー

㈱鴻池組　技術部　　正会員　○若林　宏彰
㈱鴻池組　技術部　　正会員　　富澤　直樹
㈱鴻池組　技術部　　正会員　　福井　正規
㈱鴻池組　土木部　　　　　　　森山　祐三
㈱鴻池組　土木部　　　　　　　高田　篤

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で多く採用される発破工法では，一般的に余掘りが課題となっている．この余掘りの増大は，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．

通常，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ス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．

通常、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=10～30m)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 定期的な切羽前方探査や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．

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
連絡先　〒136-8880　東京都江東区南砂 2-7-5　㈱鴻池組　土木事業本部　技術部　　ＴＥＬ03-5617-7790

２．システム概要

図-1に本システムのフロー図を示す．以下に穿孔誘導技術と地山診断技術の概要について説明する．

2.1　穿孔誘導技術の概要

穿孔誘導技術は，穿孔誘導機能とオートリターン機能で構成される．これらの機能により，トンネル外周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）穿孔誘導機能の特徴

穿孔誘導機能は，ガイドシェル後端に設置した測量用プリズムの自動追尾式トータルステーションによる自動測量(以下 TS 測量)（**図-2**）と，全削岩機に搭載した 9 箇所の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**）にリアルタイムに表示することで，削岩機を高精度に誘導する機能である．

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外周孔の穿孔には，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が影となり，ガイドシェル後端の測量用プリズムを TS 測量できないトンネル中央付近の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することで余掘りを低減でき，余掘りに起因する吹付けや覆工コンクリートの材料ロスや，ずり出し時間や吹付け時間などの施工サイクルのロスを低減できる．また，本機能は，発破孔だけでなくロックボルトや長尺先受け工等の全穿孔作業に適用できる．

（２）オートリターン機能の特徴

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，V カットによる芯抜き孔やトンネル外周孔などの穿孔長の深さ精度が求められる穿孔や，切羽鏡面の凹凸が大きく穿孔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ができる．

本機能により，余掘りのさらなる低減と，穿孔時間の短縮が可能となり，1 発破毎の進行長も計画的に管理できる．

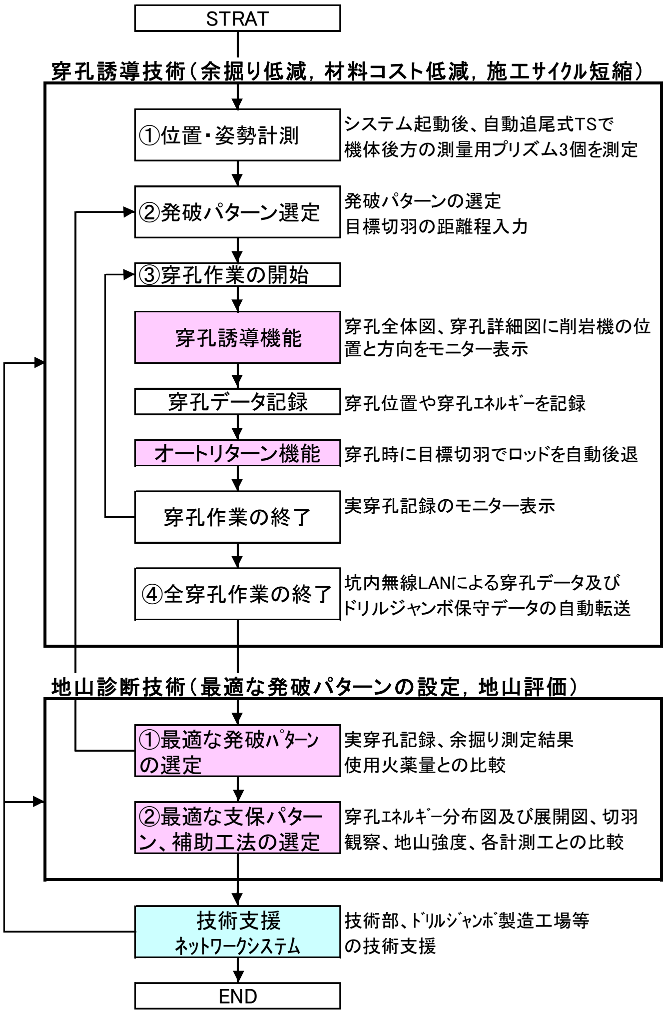


図-1　全断面追尾式穿孔誘導システム　フロー図

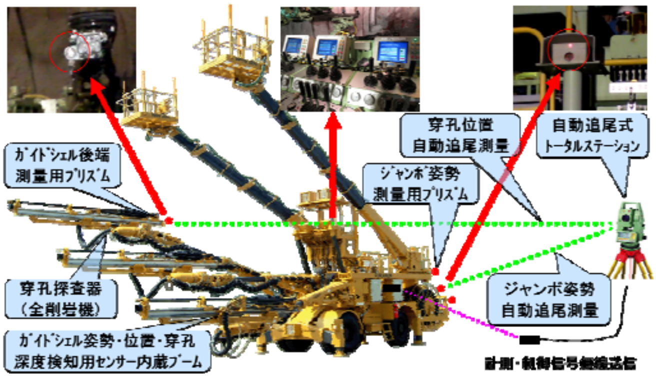


図-2　全断面追尾式穿孔誘導システム　概要図

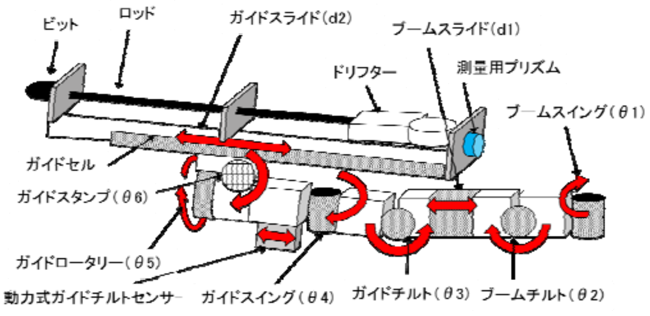


図-3　位置検知用センサー　概要図

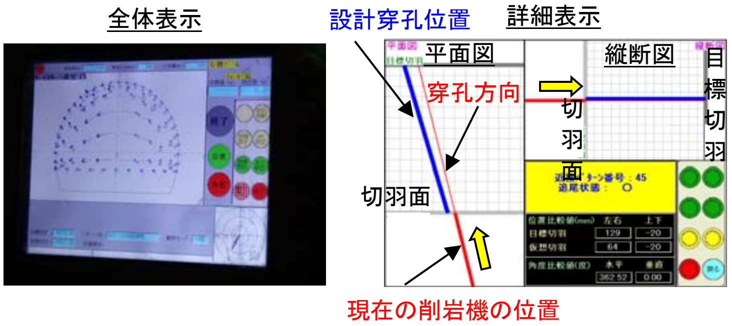


図-4　ガイダンス用モニター　概要図

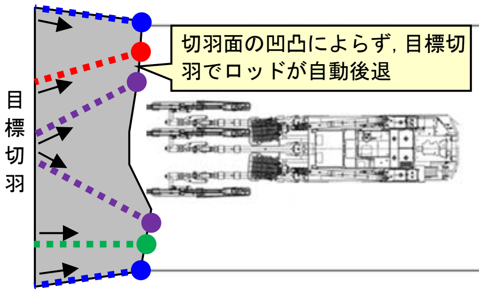


図-5　オートリターン機能　概要図

2.2　地山診断技術の概要

穿孔中の油圧データ（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，余掘り測定結果と実穿孔記録（図-7）とを比較して最適な発破パターンを設定できるとともに，切羽前方探査で得られる長尺の穿孔データと，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活用することで，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高精度かつリアルタイムに地山診断を行うことができる（図-8）.

図-6　穿孔探査器

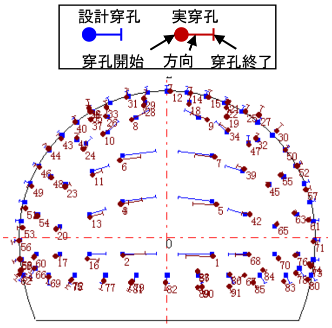


図-7　実穿孔記録表示例

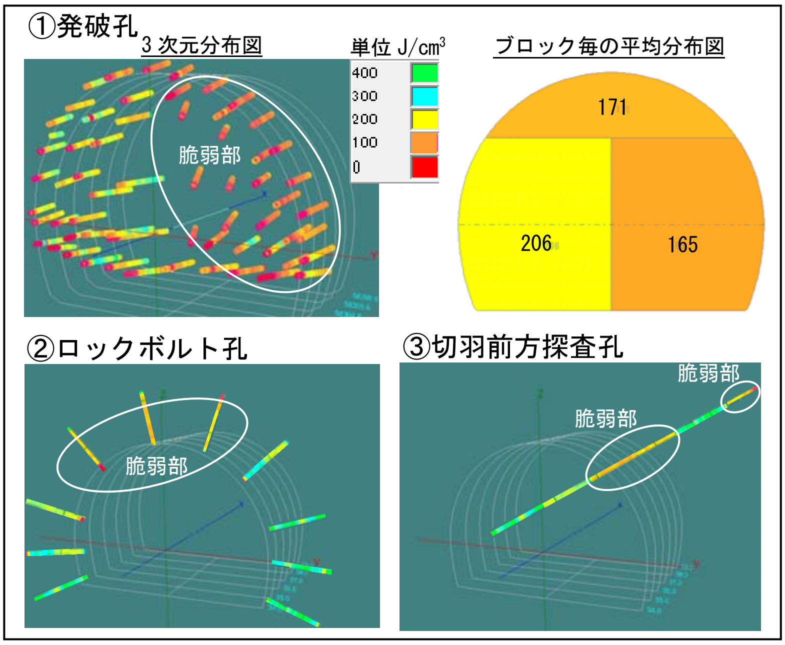


図-8　穿孔エネルギー分布図

2.3　穿孔誘導技術の運用手順

穿孔誘導技術の運用手順を以下に示す.

①ドリルジャンボが切羽に到着後，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トータルステーションで測定し，機体の位置座標を確定する.

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，計画した発破パターンやロックボルト打設位置を表示する.

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 箇所の位置検知用センサーにより，削岩機の位置座標をリアルタイムに検知し，ガイダンス用モニターに±5cm の高精度で表示する.

④オペレータは，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ながら穿孔を開始する.

⑤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．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．
⑥穿孔ビットが目標切羽位置に到達すると，オートリターン機能により自動で穿孔が終了しロッドが後退する．
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全穿孔作業終了後は，⑤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 を経由して，工事事務所，ドリルジャンボ製造工場や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．

2.4 地山診断技術の運用手順

地山診断技術の運用手順を以下に示す．
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．
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）に平均化した平面図で表示し，地山状況を定量的に評価する．
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**に地質縦断図及び平面図，**図-10**に試験施工区間の支保パターン図を示す．

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66.8m2、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

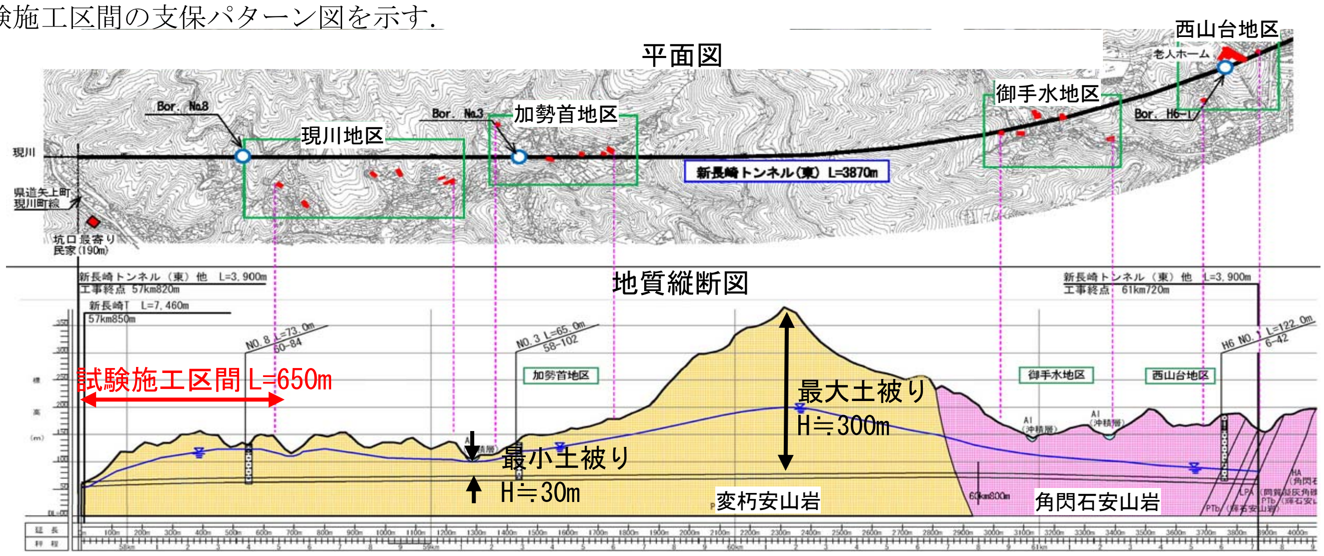
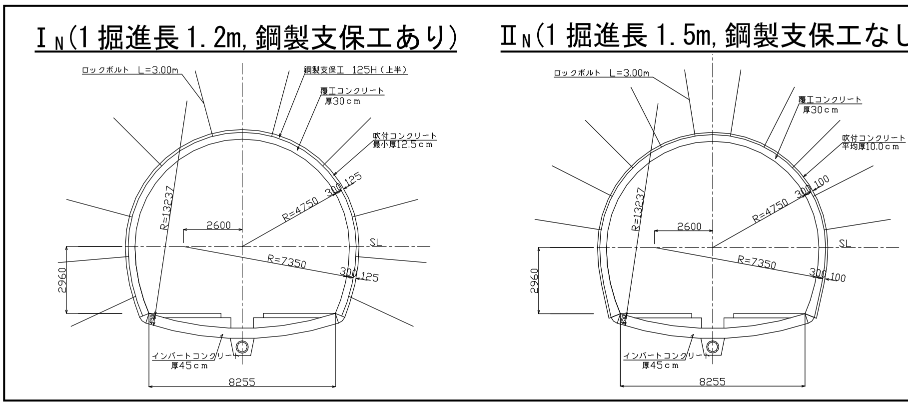


図-9 九州新幹線（西九州）新長崎トンネル（東）他工事 地質縦断図及び平面図



試験施工区間の内訳

	ＩN	ⅡN
誘導なし	110m	125m
誘導あり	90m	325m
合計	200m	450m

図-10　支保パターン図

3.2　穿孔誘導技術の効果確認方法

（１）余掘り量測定方法

余掘り量は，吹付け面の凹凸をレーザースキャナーで測定し，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）サイクルタイム測定方法

穿孔，装薬，発破，ずり出し，吹付け及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．

3.3　地山診断技術の効果確認方法

（１）最適な発破パターンの作成方法

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ヤリングを重ね，最適な発破パターンに修正した．

（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次式で算出し，穿孔位置データと統合した．

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

$$\text{平均穿孔エネルギー}(\mathrm{J/cm^3}) = \text{各孔の穿孔エネルギーの合計／孔数}$$

次に，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するとともに，定期的な切羽前方探査で取得した長尺の穿孔データと日常の穿孔作業で取得した短尺かつ複数の穿孔データを，切羽においてロックシュミットハンマーで測定した岩盤強度と比較し，相関性を確認した．さらに，短尺かつ複数の穿孔データを，穿孔エネルギーの3次元分布図やブロック毎の平均分布図に表示し，切羽観察記録と比較した．

４．本システムの導入効果

4.1　穿孔誘導技術の導入効果

（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ＩN 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%低減することができた．また，鋼製支保工の

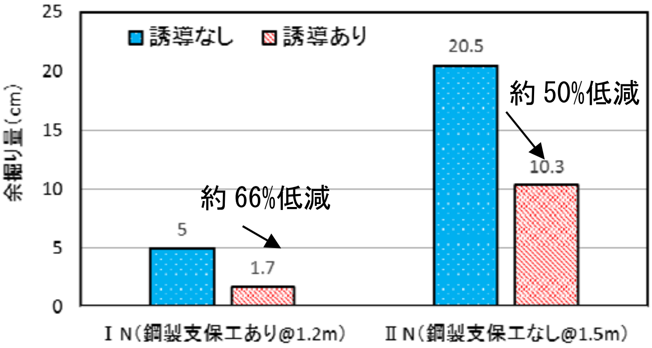


図-11　余掘り測定結果

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%低減することができた．

（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** に穿孔時間測定結果を，**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/孔，誘導ありで 20 秒/孔となり，約 31%低減した．また，穿孔時間は，誘導なしで 42 秒/孔，誘導ありで 33 秒/孔となり，約 27%向上した．

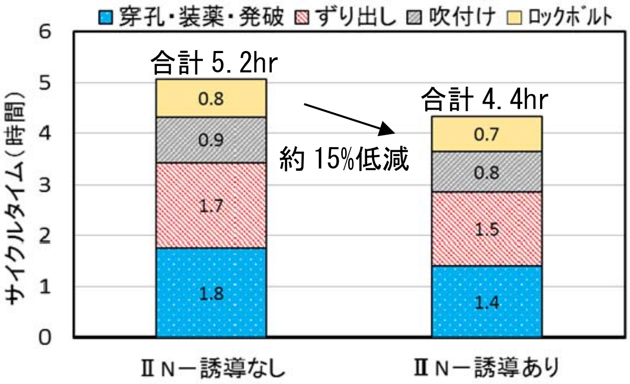


図-12　サイクルタイム測定結果（Ⅱ$_N$パターン）

図-14 より，地山の平均穿孔エネルギーが 100～400J/cm^3 の範囲における発破孔数は，誘導なしでは，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，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．

これらの測定結果より，誘導ありでは，ガイダンス用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，穿孔時間や掘り過ぎを抑制できることがわかった．

特にオペレータへのヒヤリングより，**図-14** に示すように，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込んでいたが，誘導ありでは，ガイダンスとそれまでの発破結果から，その必要性がないことを確認できた．その結果，孔数抑制による装薬時間の短縮や，余掘り低減によるずり出し時間や吹付け時間の短縮にも効果があることを確認できた．

今後は，これらの結果に基づき，地山の平均穿孔エネルギーに応じて最適な孔数を割り出し，施工効率の向上に繋げていく方法を検討していきたい．

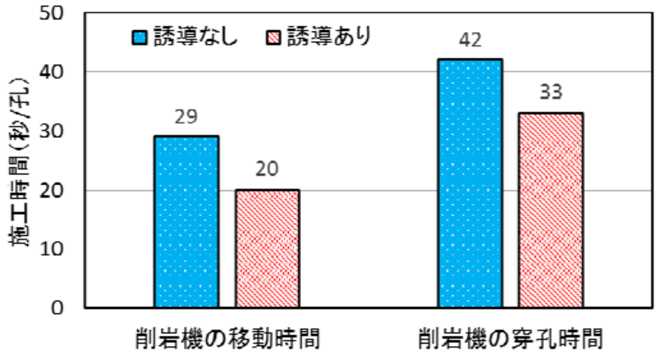


図-13　穿孔時間測定結果（Ⅱ$_N$パターン）

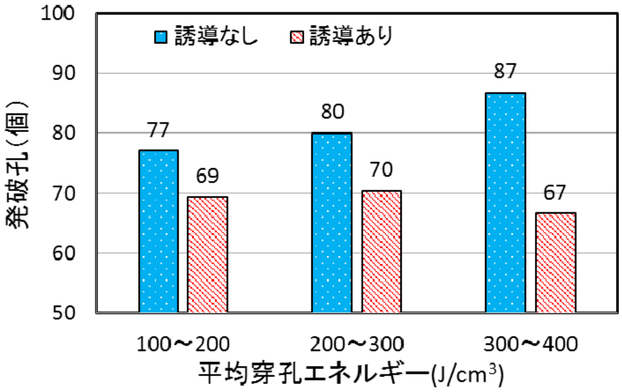


図-14　発破孔数測定結果（Ⅱ$_N$パターン）

4.2　地山診断技術の導入効果

（１）最適な発破パターンの作成

図-15 に掘削担当の A 班及び B 班の実穿孔記録（誘導前）と計画発破パターンを示す．

誘導前の実穿孔記録結果によると，同一支保パターンにおいて，A 班より B 班の方が孔数が多く，穿孔長も長いこと，また，同一班でも左右のオペレータによって，孔数，位置，間隔等が異なることを確認できた．このことから，実際の発破パターンは，各オペレータの感覚，経験や技量によって大きく異なることがわかる．

最適な発破パターンの作成にあたっては，余掘り量測定結果と実穿孔記録を比較し，オペレータへのヒヤリ

ングを重ね，芯抜き孔やトンネル外周孔の間隔，穿孔長やさし角を調整しながら修正していった．

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．

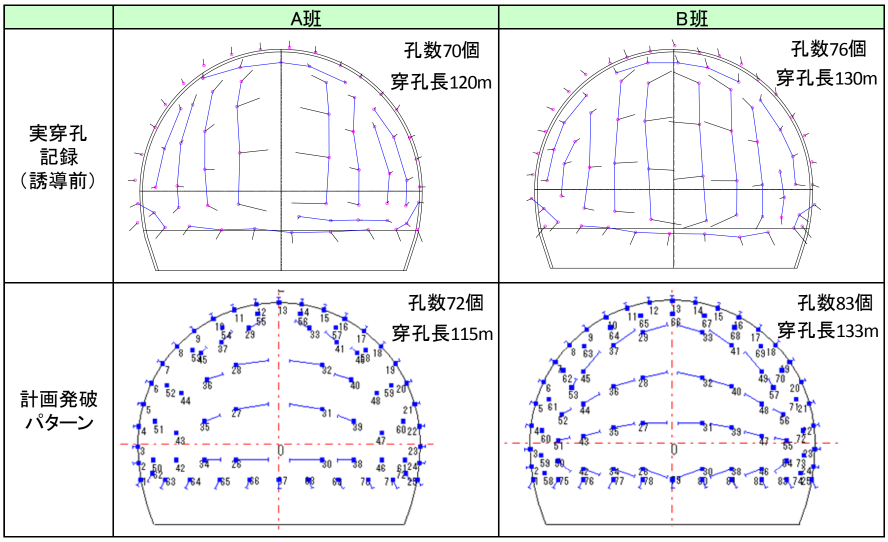


図-15　実穿孔記録と計画発破パターン（Ⅱ$_N$パターン）

（２）地山評価

図-16 に支保パターン毎の穿孔エネルギー分布状況を，図-17 に穿孔エネルギーと岩盤強度の関係を，**図-18** に切羽観察記録と穿孔エネルギーの関係を，**表-2** に設計時及び施工時の支保パターンの延長を示す．

図-16 より，平均穿孔エネルギーは，Ⅰ$_N$パターンで 100 未満～300J/cm^3（平均 159J/cm^3），Ⅱ$_N$パターンで 100～400J/cm^3（平均 283J/cm^3）の範囲に分布していることがわかった．

図-17 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，日常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．このことから，切羽前方探査は，長尺かつ単数の穿孔エネルギーで地山評価するため，発破や掘削による緩みや切羽全体の地山状況を適切に把握できないこと，一方で，日常の穿孔作業で取得した穿孔エネルギーは，短尺かつ複数の穿孔エネルギーを平均化して評価するため，切羽全体の地山状況を面的かつ定量的に把握できることがわかった．

図-18 より，切羽での肌落ちや崩落箇所が，穿孔エネルギーの低い箇所と概ね一致していることがわかった．

表-2 より，設計時はⅢ$_N$パターン（1 掘進長 2m）が 66%以上設定されていが，施工時は，Ⅱ$_N$パターン（1 掘進長 1.5m）が 69%以上を占め，設計時と大きく異なる結果となった．これは，設計時の支保パターンが，地上から弾性波探査やボーリング結果に基づいて設定していたが，実施工では，ゆるみの大きな潜在亀裂の発達した地山であったため，平均穿孔エネルギーが低下し，切羽の安定性が低下したためと考えられる．

以上より，定期的な切羽前方探査で前方地山の概要を把握し，日常の穿孔作業で取得した穿孔エネルギーで直近切羽の地山状況を面的に把握することで，トンネル全長にわたって高精度な地山診断が行えるため，最適な支保パターンや補助工法を迅速かつ適切に修正できることがわかった．

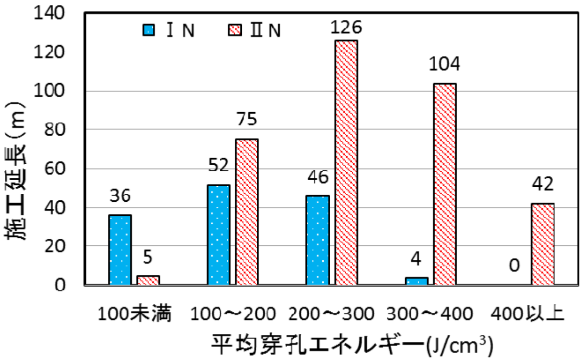


図-16　支保パターン毎の穿孔エネルギー分布状況

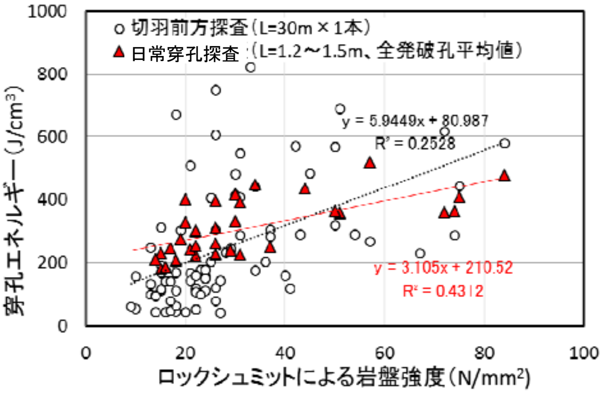
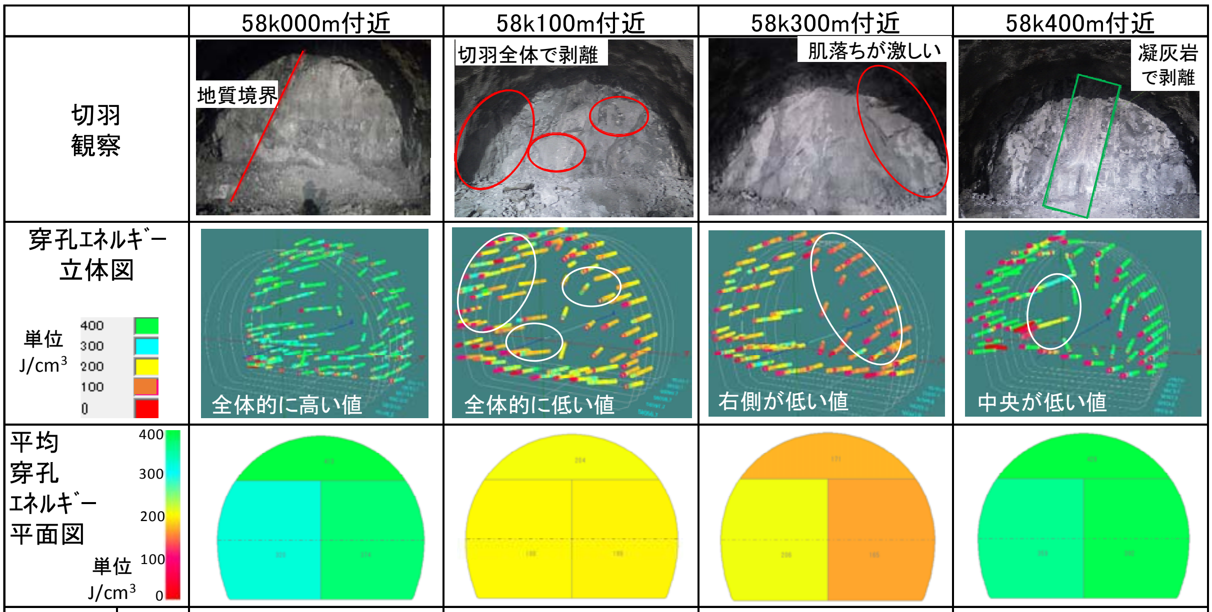


図-17　穿孔エネルギーと岩盤強度の関係



平均穿孔ｴﾈﾙｷﾞｰ (J/cm^3)		58k000m付近	58k100m付近	58k300m付近	58k400m付近
	天端	413	204	171	429
	左側	320	198	206	359
	右側	374	195	165	392
	全体	369	199	181	393

図-18　切羽観察記録と穿孔エネルギーの関係

表-2　設計時及び施工時の支保パターン

距離程	57900 / 58000 / 58100 / 58200 / 58300 / 58400				I_N	II_N	III_N	合計
設計時の支保ﾊﾟﾀｰﾝ	I_N(120m)	II_N(100m)	III_N(430m)		120m	100m	430m	650m
					18.5%	15.4%	66.1%	100.0%
施工時の支保ﾊﾟﾀｰﾝ	I_N(108m)	II_N(219m)	I_N(92m)	II_N(231m)	200m	450m	0m	650m
					30.8%	69.2%	0.0%	100.0%

4.3　本システムの導入効果まとめ

九州新幹線（西九州）新長崎トンネル（東）他工事での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」の導入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，面的に高精度な地山診断が行える.

③定期的な切羽前方探査と日常の穿孔作業で取得した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，最適な支保パターンや補助工法を選定できる.

5．おわりに

九州新幹線（西九州）新長崎トンネル（東）他工事での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」の優れた導入効果を確認できた.

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，並びに，共同開発者である古河ロックドリル㈱，マック㈱，カヤク・ジャパン㈱の関係各位に感謝の意を表します.