

山岳トンネルのコンピュータジャンボの穿孔データに基づく情報化施工

ー 国道 106 号 宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事 ー

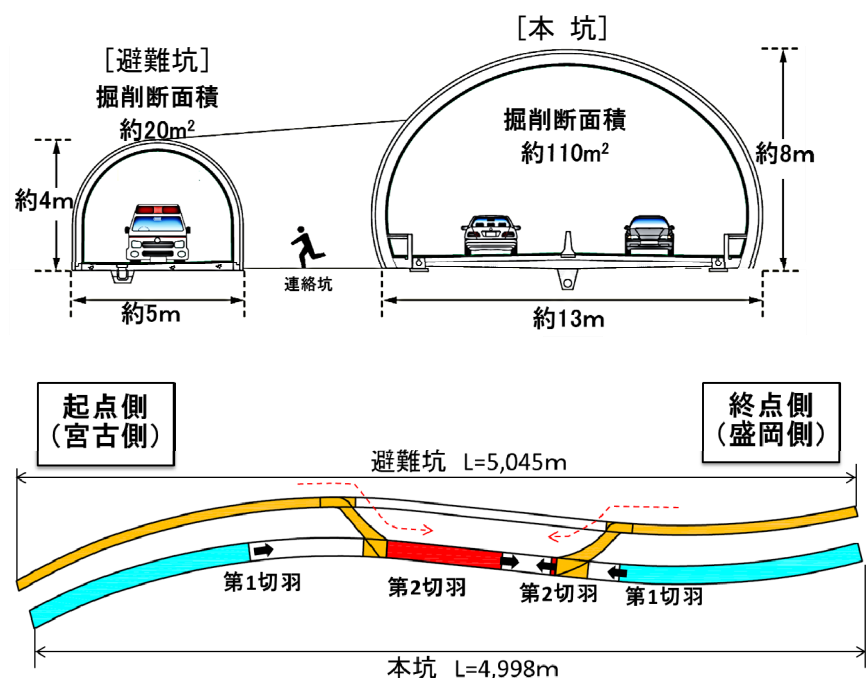
鹿島建設（株）	正会員	○宮嶋 保幸	正会員	岩野 圭太
	正会員	白鷺 卓	正会員	犬塚 隆明
	正会員	川野 広道	正会員	栗山 和之
	正会員	池田 廉	正会員	井上 勇太

1. 目的

近年、山岳トンネルの施工の合理化を図ることを目的として、コンピュータジャンボの導入事例が増えている。コンピュータジャンボは、発破の装薬孔の位置や方向、孔尻を計画通り正確に穿孔し、余掘りの少ない効率的な発破を迅速に行うことを目的として、穿孔の誘導や自動穿孔の機能を有しているものである。また、装薬孔とロックボルトの穿孔といった施工の副産物として、トンネル前方と周辺の穿孔データを自動的に取得することができるため、これらのデータを有効に利用すれば、掘削箇所の地山状況を高密度に取得することが可能となる。そこで筆者らは、これらのデータから施工へフィードバックを行うことができるように、施工サイクルの中で迅速にトンネル周辺の地山状況を評価することができるシステムを開発している。このシステムにより、地山状況に応じた適切な支保選定の判断を迅速に行うことが可能となる。さらに、当社で開発した一体型簡易 3D スキャナによる発破形状の測定結果とコンピュータジャンボの穿孔誘導を合わせて利用することで、地山状況に応じた適切な発破を行うことが可能となる。本稿では、これらの新しい情報化機械やシステムを最大限に利用することで、施工の合理化を図った事例について報告する。

2. 適用現場の概要

今回、コンピュータジャンボを導入した現場は、宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事である。掘削断面積約 110m^2 、全長 4,998m の避難坑を有する道路トンネルであり、掘削を早期に完了させることを目的として、両坑口からの掘削に加えて、途中、避難坑を本坑への作業坑として利用することで、4 箇所での本坑同時掘削を行っている（図－1）。コンピュータジャンボは、これらの切羽に対し、フルオートジャンボとセミオートジャンボ、従来のマニュアルジャンボを導入した。



図－1 新区界トンネル工事の概要

キーワード コンピュータジャンボ、地山評価、ICT、情報化施工、地球統計学、余掘り低減

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設株式会社 技術研究所 TEL 042-489-8109

3. 4 ブームフルオートジャンボの自動穿孔機能とその活用

新区界トンネルのように掘削断面積が大きなトンネルの穿孔機械は、通常、2ブームや3ブームのジャンボを2台組み合わせた編成とすることが多い。それに対し、新区界トンネルの終点側では、穿孔能力が高く、4ブームを有するフルオートジャンボを導入した。

フルオートジャンボは、事前に穿孔パターンと各ブームの穿孔順序を登録することで、ジャンボを切羽に据え付け後は、正確な位置と角度、深さの発破孔を全自動で穿孔することができる。この機能によって、当現場の穿孔作業は専任のオペレータ1名のみで行っており、ブーム操作もほとんど不要となっている。また、コンピュータジャンボでは、穿孔データを自動的に取得しており、地山評価への活用が可能となった。

新区界トンネルでは、これらのコンピュータジャンボの機能を活用し、以下の効果を確認することができた。①穿孔精度の向上による余掘りやアタリを低減した効率的な発破、②発破孔の孔尻位置が揃うことで切羽形状が平滑となるため切羽の安定性が向上、③穿孔データによる地山評価、④施工人員の削減。

また、ロックボルト孔の穿孔の誘導機能を追加することで、ロックボルトのマーキング作業が不要となり、正確な穿孔を効率良く行うことができるようになった。

写真－1にフルオートジャンボの穿孔状況を示し、写真－2にロックボルトの打設状況を示す。



写真－1 4ブームフルオートジャンボ（専任オペレータによる自動穿孔）



写真－2 フルオートジャンボによるロックボルト打設（マーキング不要）

4. コンピュータジャンボと発破形状の測定による効率的な発破

前述の通り、コンピュータジャンボによって穿孔精度を格段に向上することが可能となった。しかしながら、設計した通りに穿孔ができて、実際の地山条件で発破パターンや装薬量の適不適の判定は、発破の結果として掘削形状を測定することが必要となる。掘削形状の測定は発破の適不適を日々判定し、迅速に発破パターンを見直すことが重要である。そのため、日常の掘削サイクルで適用が可能な軽量・迅速（計測時間：5分以内）に掘削形状を測定し、余掘りを可視化、数値化できる一体型簡易3Dスキャナを開発し¹⁾、発破パターンの見直しに活用した。写真-3に発破ずり出し後の測定状況を示す。



写真-3 掘削形状の測定

図-2には、発破形状の測定結果を踏まえ、発破パターンを見直しながら、発破の効率を向上させた事例を示した。左側に示す当初の発破パターンでは、青い点線で囲んでいる芯抜き最下段部を下向きにすることで、自由面が下に凸となって広くなり、発破効率が高くなることを期待した。しかしながら、発破形状を測定した結果、当該箇所が十分に起砕されずに残っていることが分かった。これは、先ほどの芯抜き最下段部を下向きにした結果、1段上部の孔との孔尻の離隔が大きくなり過ぎた結果だと考えられた。そこで、右図に示すように下向きの角度を小さくした発破パターンとした。その結果、当該箇所の起砕を改

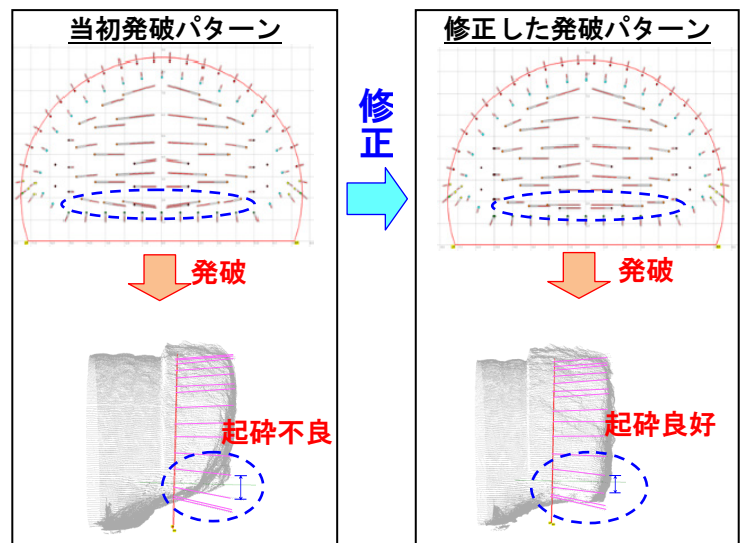


図-2 発破形状測定結果に基づく
発破パターンの修正結果

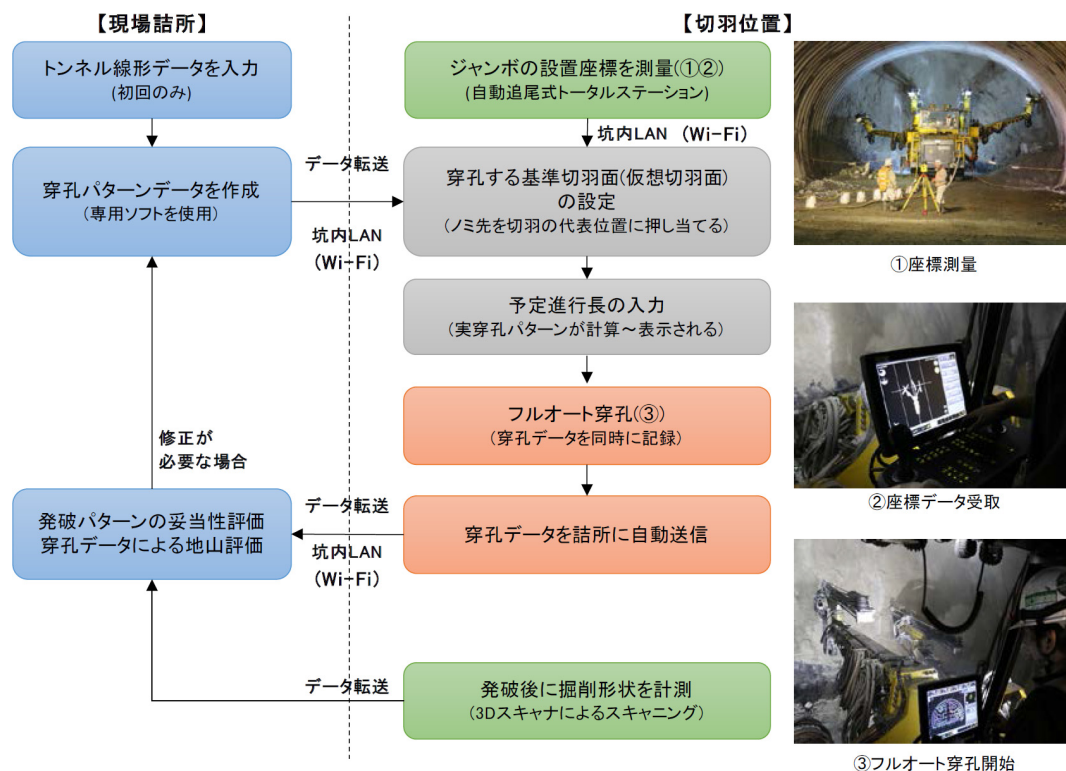


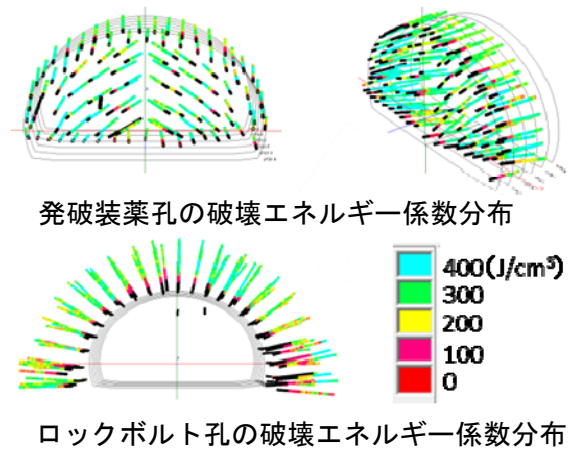
図-3 フルオートジャンボの ICT 活用による効率的な掘削

善することができた。

このように、正確に穿孔できるというコンピュータジャンボの機能を最大限に活用するためには、発破形状を日常的にフィードバックすることが重要である。また、これらのコンピュータジャンボと発破形状の情報を統合して評価する技術は、トンネル掘削における ICT の構築が不可欠である。図－3 にフルオートジャンボの場合の ICT 活用による効率的な掘削フローを示す。

5. 穿孔データを利用した地山評価

コンピュータジャンボでは、フルオートとセミオートのいずれについても発破孔やロックボルトの穿孔データの自動収集機能により、地山情報を高密度に取得できるようになった。また、取得したデータは即座に詰所のパソコンに転送されて、図－4 に示すような出力図で、地山の硬軟分布を確認することができる。ここでは、穿孔データから地山状況を予測する技術の開発と施工に活用した事例を紹介する。

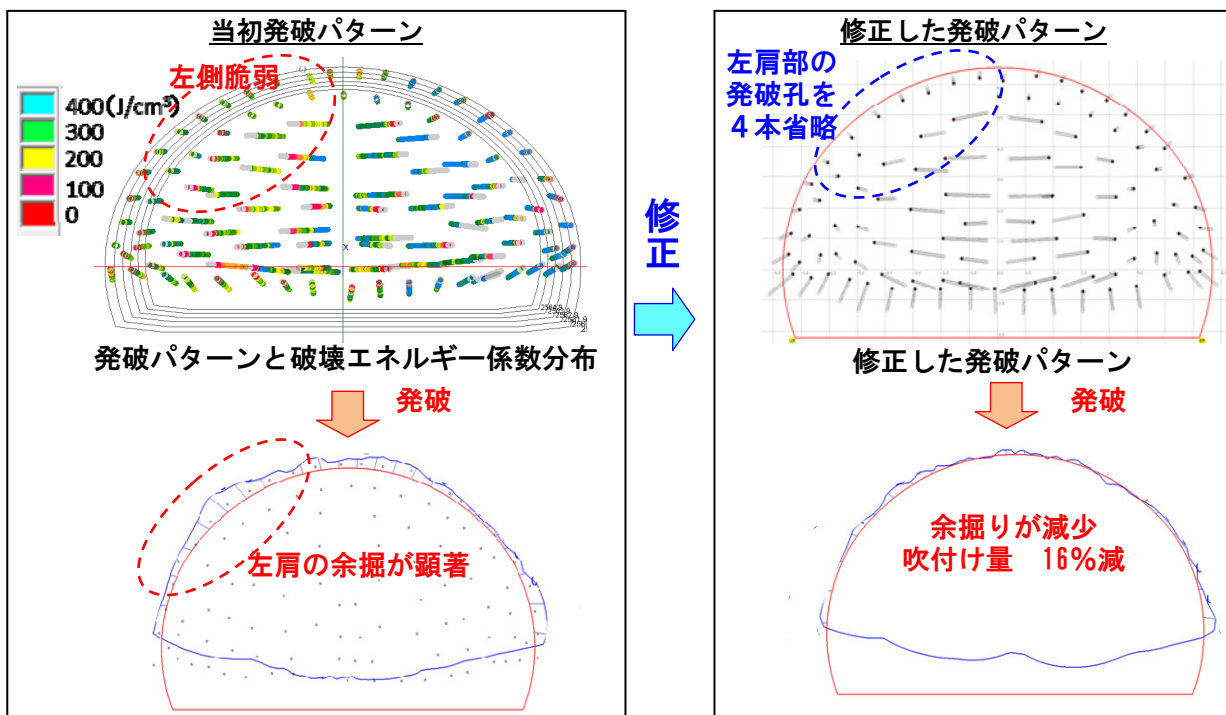


図－4 取得する穿孔データの出力例

(1) 地山状況を考慮した適切な発破パターンへの設計

前述の 4. では、適切で効率的な発破パターンを見出すために、コンピュータジャンボと掘削形状の情報を総合的に評価した事例を紹介した。しかしながら、地山状況が複雑な場合には、部分的に軟弱な箇所や硬質な箇所で、結果的に余掘りが増大することやアタリが発生することがある。これを改善するためには、地山状況に応じた詳細な微調整が必要となるが、コンピュータジャンボによって穿孔データから切羽の硬軟分布を詳細に把握し、地山状況に応じた発破パターンを検討することが可能となった。

図－5 は、切羽の左側が比較的脆弱であったために、左肩部に顕著な余掘りが発生した箇所において、穿孔データを確認して左肩部の発破孔を省略することで余掘りの低減を図った事例を示した。



図－5 地山状況に応じて発破パターンを修正した事例

(2) ロックボルト穿孔データによるトンネル断面外の地質状況の評価

起点側において脆弱な蛇紋岩が出現し、内空変位が 70mm を越える区間に遭遇した。その対策として D II パターンを適用した（鋼製支保工 H-200、厚さ 25cm の吹付けコンクリート、長さ 6m のロックボルト）。蛇紋岩が主にトンネル左側に分布し、当パターン適用範囲を判断するためには、切羽観察だけでは確認できないトンネル周辺の蛇紋岩の分布を把握することが求められた。

そこで、図-6 に示すように、切羽観察に加えてロックボルトの穿孔データを利用してトンネル周辺の脆弱部を把握しながら、掘削管理を行った。断面 2 と 3 の変位計測の結果を比べると、断面 3 では切羽で確認できる蛇紋岩の分布の割合が減っているが、変位は大きく、適切に支保パターンを選定するためには、左側の穿孔データを加味した地山評価が必要であることがわかる。

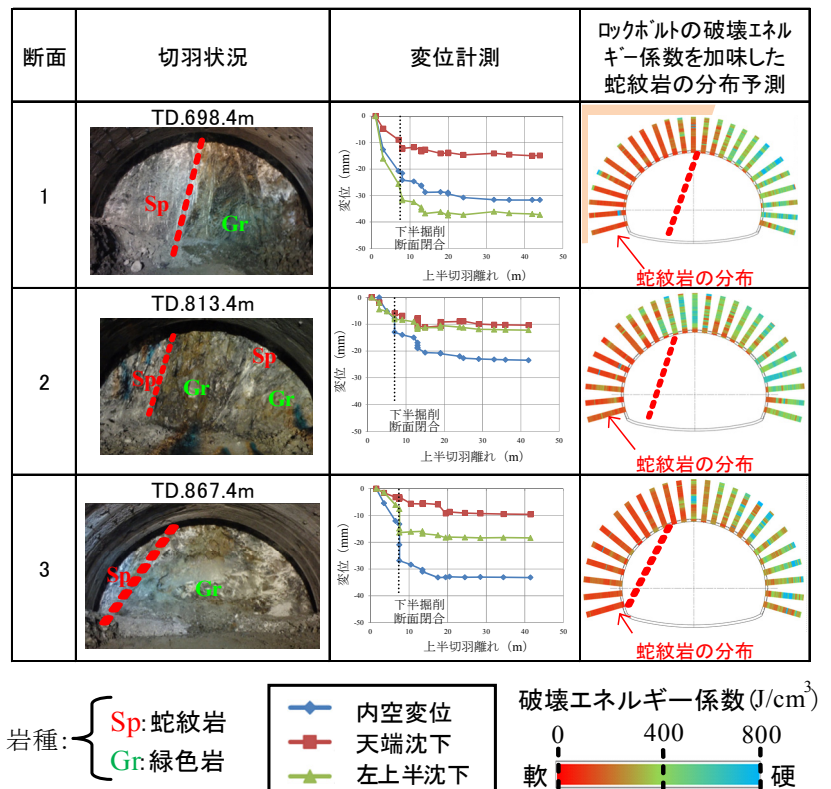


図-6 ロックボルトによるトンネル断面外の地山評価

(3) 地球統計学を利用した前方地山予測システムの開発

(1) では、1 サイクル毎に穿孔データを参照し、発破パターンの最適化を検討した事例について示し、(2) では、ロックボルトの穿孔データから切羽より外側の地質状況の評価した事例を示した。一方、地山状況に応じた適切な支保パターンの選定を行うためには、断層などの脆弱部の連続的な分布状況を把握し、切羽前方やトンネル周辺の地質の分布状況を予測することが必要となる。

今回開発した前方地山予測システムは、コンピュータジャンボから得られるサイクル毎の穿孔データ（破壊エネルギー係数）を自動的に統合して解析評価するシステムである。解析には、3 次元的に分布する数値データから空間をバリオグラムという統計的指標によってモデル化し、その周辺を予測することができる地球統計学のクリギングという手法を利用した。これにより、切羽前方やトンネル周辺の破壊エネルギー係数の分布を予測することができる。

図-7 は、起点側（宮古側）において脆弱な蛇紋岩がトンネルの左側に連続的に出現した延長 50m 区間について、施工時に取得した破壊エネルギー係数を統合し、3 次元分布図で示したものである。このような 3 次元の出力図は、地質のおおよその分布状況について工事関係者が共有するために非常に有効であった。しかしながら、具体的な対策や施工判断を行うには、場所や程度、分布状況が不明確であり、平面図や断面図のように具体的な出力が求められる。そこで、図-7 のデータを用いてクリギングにより解析した結果を図-8 に示

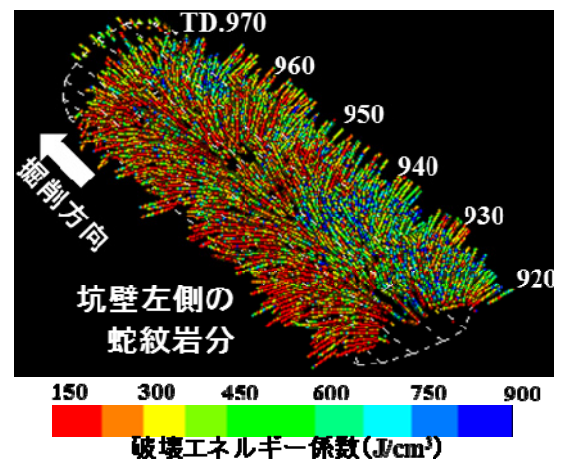
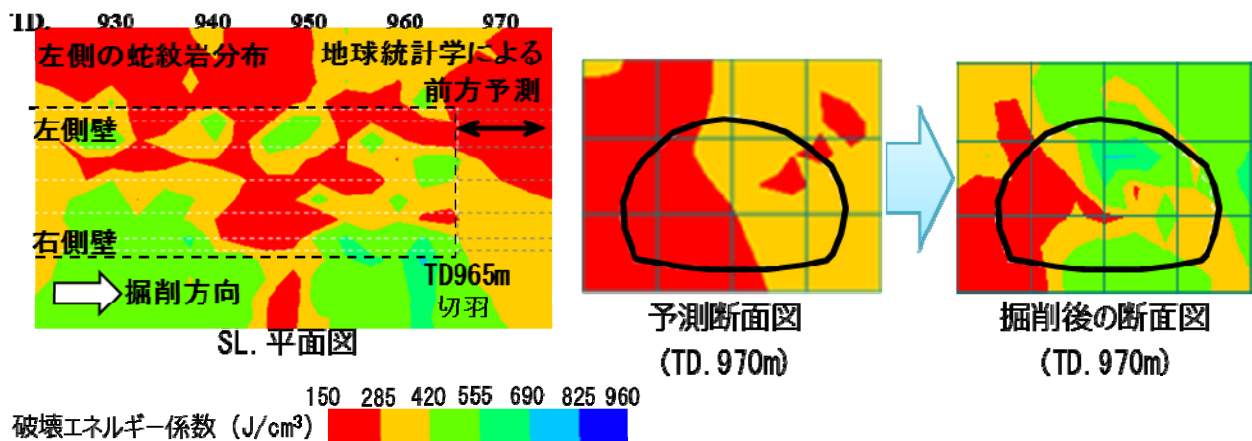


図-7 穿孔データの可視化

す．ここでは、翌日までに掘削する範囲の地質状況をオンタイムに把握することを目的として、TD. 965mまで掘削した時点の穿孔データを利用して、5m前方まで予測した結果をスプリングラインの高さの平面図と、予測精度を検証するため、切羽から5m前方のTD. 970mの予測断面図と掘削後の断面図を示した．これらの断面図を比較すると、左側の脆弱部の連続性を予測できていることが分かる．一方、右側が実際の地山状況の方がやや良好な結果となっており、今後、さらなる精度向上の検討が必要と考えている．

また、クリギングは切羽前方予測に有効な手法ではあるが、解析範囲を設定すれば予測精度が十分でない遠方まで解析できるので、予測結果からの的確な施工判断を行うためには、予測結果の精度や脆弱部の出現確率などを定量的に把握することが重要となる．そこで、今後、シミュレーション解析手法を利用して脆弱部の出現確率も評価することで、的確な施工判断を行うことができるシステムの高度化を図る予定である．

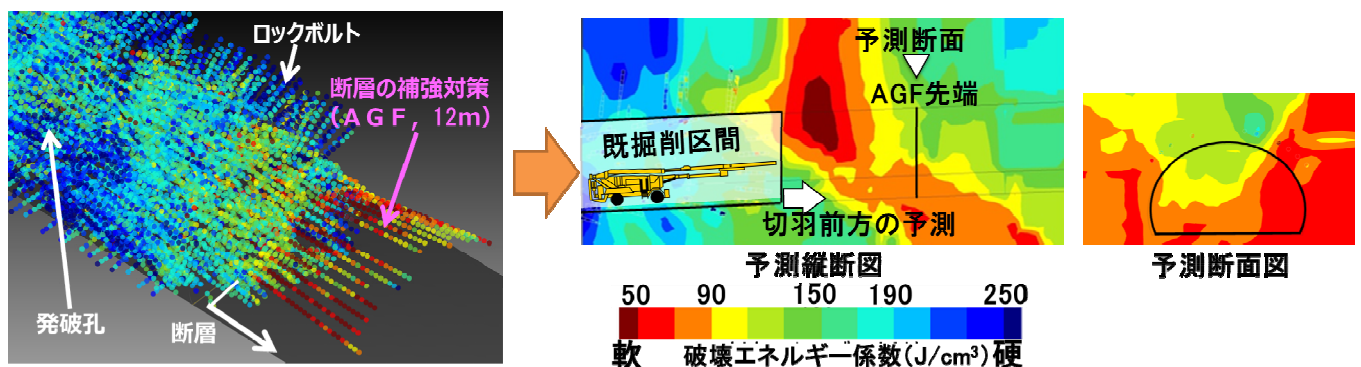


図－8 地球統計学による地山状況の予測

(4) 断層部における補助工法の要否判定事例

終点側（盛岡側）において粘板岩区間で断層が出現し、補助工法として長尺先受け工（AGF工法）を適用した事例を図－9に示す．ここでは、AGF 1シフト目の穿孔データを加味して切羽前方の地質状況をクリギングによって予測した．穿孔データの3次元分布図を見ると前方にも断層が連続していることが分かるが、詳細な分布状況を把握することができない．一方、トンネルセンターにおける縦断面図では、断層の傾斜が切羽に対して差目方向に分布していることがわかる．また、任意の箇所の断面図を出力することが可能であり、AGF先端部における予測断面図を示した．予測断面図からは、掘削が進むに従って天端部の地質状況は比較的良くなるが、左右側壁側には断層部が続くことがわかる．

現在、掘削を進めている段階であり、今後、地球統計学を利用した予測と断面図によって詳細な地質状況の分布を評価し、次のAGFの要否や断面内での適用範囲など詳細な検討を行いながら、安全で合理的な施工判断を行うことを目指している．



図－9 断層部における切羽前方地山予測（AGF適用区間）

6. おわりに

近年導入が進められているコンピュータジャンボで得られる施工の穿孔データを利用した、効率的な発破設計事例と安全で合理的な支保、補助工法の適用を行うために必要となる地山評価システムについて紹介した。

今回導入したジャンボのうちフルオートジャンボについては、地山状況に応じた最適な穿孔方法で自動穿孔することが可能となるなど、穿孔性能が向上しており、C I パターンのように穿孔数が多くなる地山に対しては、従来のジャンボに比べて穿孔に要する時間が2分の1程度に短縮することができた。しかしながら、効率的な掘削を実現するためには、従来は穿孔精度に依存していたため積極的な管理が困難であった起砕不良（アタリ）や余掘を合理的に管理することが不可欠である。今後、今回紹介したコンピュータジャンボやスキャナ技術を活用し、データを収集して分析を続けることで、さらに効率的な掘削を確立したいと考えている。

また、コンピュータジャンボによって、これまで取得することが難しかった穿孔データを簡単に取得できるようになり、これを利用した地質評価システムを開発した。これらの高密度で大量なデータを施工に利用するためには、次の施工判断を行うことができる迅速性が必要であり、今回、現場でオンタイムに運用ができるシステムを構築した。

今後、掘削サイクル内で合理的な意思決定を行うための情報化施工を確立するため、施工情報を有効に活用したトンネル掘削の ICT 活用技術の確立を図る予定である。

7. 参考文献

- 1) 犬塚隆明，手塚康成，岩野圭太，浜本研一，白坂紀彦：一体型簡易 3D スキャナと余掘り評価ソフトの開発，第 72 回土木学会年次学術講演会 講演概要集，2017（投稿中）。