# トンネル掘削時の削孔データを使用した 3次元地山評価システムの開発

山下 雅之1・山本 悟2・三井 善孝3・塚田 純一4

<sup>1</sup>正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋六丁目17番21号) E-mail:masayuki\_yamashita@nishimatsu.co.jp

<sup>2</sup>正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋六丁目17番21号) E-mail:satoru\_yamamoto@nishimatsu.co.jp

<sup>3</sup>正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋六丁目17番21号) E-mail:yoshitaka\_mitsui@nishimatsu.co.jp

<sup>4</sup>ジオマシンエンジニアリング株式会社(〒116-0001 東京都荒川区町屋一丁目19番1号904) E-mail:junichi\_tsukada@geomachine.co.jp

削孔位置・角度データが容易に入手可能なコンピュータ制御のドリルジャンボの施工データ(装薬孔・ ロックボルト孔削孔データ等)を使用して、切羽およびその近傍の地山性状を定量的かつ詳細に3次元評 価することが可能な地山評価システムを開発した.

さらに、開発システムを施工中の長距離トンネルへ試験適用し、本システムの計測装置の作動性や坑外 への計測データ送信、遠隔モニタリングシステムに問題がないことを確認するとともに、計測された大量 の削孔データを処理・解析して得られた地山強度の3次元分布が実際の地山性状(脆弱な凝灰岩層や硬質 な安山岩層の分布状況等)と概ね一致することも確認できた.

Key Words : tunnel, drill jumbo, drilling data, three dimensions, ground evaluation

# 1. はじめに

山岳トンネルの掘削時において、切羽およびその近傍 の地山性状を詳細かつ定量的に把握することは、切羽の 安定性や安全性を確保する上で非常に重要である.その 把握手法の一つとしてドリルジャンボの削孔データの利 用が古くから注目されており、とくに削孔検層と呼ばれ る切羽前方探査法が開発、適用されてきた.しかし、削 孔検層では1ヶ所もしくは2~3ヶ所程度の長尺削孔デー タを用いて切羽前方30m程度の比較的広い範囲の地山性 状を概略的に把握することに重点が置かれており、切羽 およびその近傍の地山性状を詳細に評価するのは困難で あった.

そこで筆者らは、最近普及が進んでいるコンピュータ 制御のドリルジャンボ (コンピュータジャンボ)から得 られる削孔位置・角度情報に着目し、装薬やロックボル ト打設等の施工時に得られる多数の短尺削孔データを使 用して、迅速かつ詳細に切羽およびその近傍の地山性状 を3次元評価するシステムの開発を進めてきた<sup>1)</sup>.

本稿では、開発システムの詳細や施工データを取り扱

う上での留意点について述べるとともに,掘削中のトン ネル現場への試験適用を通して得られた3次元地山評価 結果の妥当性についても考察した.

#### 2. システムの概要

#### (1) システムの構成

施工時における多数の削孔データを収集・評価するために、図-1に示すようなシステムを構築した.本システムは、トンネル坑内においてドリルジャンボによるすべての削孔データを自動計測する『計測システム』および、得られた削孔データを処理・解析して地山性状を3次元評価する『解析・評価システム』から構成される.

以下に各システムについて詳述する.

#### (2) 計測システム

本システムは、削孔位置・角度情報の取得が容易なコ ンピュータジャンボの使用を前提に構築されているが、 通常のドリルジャンボによって決められた位置・角度で 削孔された多数の長尺削孔データ(例えば,削孔検層デ ータや長尺鋼管先受け工法,鏡ボルト等の補助工法実施 時の削孔データなど)を計測することも可能としている. 計測装置はドリルジャンボ本体に常設され,ドリルジャ ンボ稼働時における削岩機のすべての作動油圧,削孔距 離,孔口位置および削孔角度が自動収録される.また, これらの収録情報は装置内のモニタ画面にリアルタイム で表示される(図-1参照).

図-2に示すように、計測データは坑内の無線・有線通 信設備を使用してトンネル坑外の現場詰所に設置した専 用パソコンに適宜送信され、さらにインターネットを介 して現場事務所や技術研究所などの遠隔地にも送られる. また同時に、ドリルジャンボの稼働状況をリアルタイム で遠隔地からモニタリングすることも可能となっている.

## (3) 解析・評価システム

本システムでは、図-3に示すような流れで計測データ が処理・解析されるが、これらの作業は専用の解析処理 ソフトを用いて半自動で行われる.この一連の処理の中 で、削孔データから算出される地山評価指標は穿孔エネ ルギーと呼ばれ、式(1)から求めた.

$$S_E = \frac{E_i \times bpm}{A_H \times P_R} \tag{1}$$

ここに、 $S_E$ :穿孔エネルギー( $J/cm^3$ )  $E_i$ :削岩機で発生した打撃エネルギー(J) bpm:打撃数(blow/min)  $P_R$ :削孔速度(cm/min)  $A_H$ :孔断面積( $cm^2$ )

穿孔エネルギーは掘削体積比エネルギー(Specific Energy)<sup>2,3</sup>とも呼ばれ,「単位体積の地山を削孔するために削岩機が要したエネルギー」に相当する.この値が小さいほど"より脆弱"な地山であると評価することができる.さらに本システムでは,既往の研究<sup>3</sup>で報告されている式(2)を使用して穿孔エネルギーから地山強度を換算し,これも地山評価に使用した.

$$\sigma_{\rm C} = \left(\frac{S_E}{\rm C}\right)^{\frac{1}{\rm b}} \tag{2}$$

ここに, S<sub>E</sub>:穿孔エネルギー (J/cm<sup>3</sup>) C:定数 (-), σc:地山強度 (MPa) b:乗数 (=0.5)

図-3のデータ処理・解析過程で得られる3次元ボーリ ング図および3次元ブロック図の表示例を図-4,図-5に 示す.ここに示した3次元ブロック図は,逆距離加重平 均法(IDW法)と呼ばれる空間データ補間処理法を使用



図-1 システムの構成



図-2 計測システムの概要



図-3 データ処理の流れ



図-4 穿孔エネルギーの3次元ボーリング表示例



図-5 地山強度の3次元ブロック表示例

した出力結果である.その他の手法としてクリギング法 と呼ばれる地球統計学的手法も解析処理ソフトに実装さ れており、地質条件等を考慮してより最適な空間データ 補間手法を選択することができる.

また、3次元ブロック図からは図-6に示すような任意 断面における種々の2次元表示も可能であり、事前地質 調査資料(地質縦断図や平面図)や切羽写真、切羽観察 記録等との比較が容易となっている.これらのデータ処 理・解析に要する時間は、掘削1サイクルの施工データ (数10~100本程度の削孔データ)を3次元処理・解析し た場合でも概ね数分程度であり、施工サイクルの中で3 次元の地山評価を迅速かつ連続的に行うことが可能とな っている.

### 3. 施工データ使用による評価への影響

決められた削孔条件で実施可能な削孔検層(切羽前方 探査)とは異なり,施工時の削孔データを使用して地山 評価を行う場合には,様々な条件下の削孔データを一括 して評価する必要がある.しかし,同一の地山であって も,削孔条件の違いにより式(1)で求めた穿孔エネルギ ーが変化してしまう可能性があるため,地山性状を正確 に把握するためには削孔データの補正が不可欠である.

以下に,施工データを使用した場合に穿孔エネルギー の算出に影響を及ぼす可能性がある穿孔条件とその補正 方法について述べる.

#### (1) フィード圧(推力)の影響

施工時の削孔作業では、安定した削孔を確保するため に地山性状に応じてフィード圧(ビットを削孔面の地山 ヘ押し付ける圧)をオペレータが適宜変化させることが 普通に行われている. 図-7に示すように、フィード圧 (図中では推力に換算)がある値以下の領域では、同一 性状の地山であってもフィード圧の低下に比例して削孔 速度が低下することが知られており<sup>4</sup>,それに伴い穿孔 エネルギーが増加することが指摘されている<sup>5</sup>. とくに 施工データのようなフィード圧条件が異なる複数の削孔 データを一括して取り扱う場合、上述のようなフィード 圧の影響を受けた穿孔エネルギーが多数含まれることに より、3次元地山評価の精度が大きく低下する可能性が ある.

本システムでは、図-7に見られるような穿孔エネルギ ーが一定となる推力の最低値(図中の硬質岩では8~ 10kNに相当)に対して、それを下回る推力条件の削孔 で得られた穿孔エネルギーについては、推力と穿孔エネ ルギーの比例関係から推力の影響を受けない範囲の穿孔 エネルギーに換算して地山評価を行った。



図-6 任意断面における2次元表示例



図-8 削孔角度がビットに作用する推力へ与える影響

#### (2) 削孔角度の影響

天端や肩部のロックボルト打設孔の削孔等,とくに上 方向に削孔する場合には削岩機本体の重量がフィード方 向と逆方向に作用してしまうため,実際にビット先端に 作用する推力が削岩機に作用する推力(計測される推力) よりも小さくなる可能性がある.図-8は削孔角度を変化 させた場合の削岩機に作用する推力とビット先端に作用 する推力の関係を実験から求めたものである.図のよう に、削岩機に作用する推力が一定であっても、削孔方向 によってビットに作用する推力が変化することが実験か ら明らかになった.例えば、削岩機に作用する推力が 8kN(フィード圧が概ね4MPaに相当)の場合を見てみる と、水平方向の削孔に対して真上方向に向けた削孔では、 ビットに作用する推力が約半分程度にまで低下する.こ のように、とくにロックボルト打設孔の削孔データを他 の施工データと一括して評価する場合には、条件によっ ては削孔方向に伴うビットに作用するフィード圧低下の 影響を考慮する必要がある.

この補正方法としては、図-8の関係図から実際にビットに作用する推力を求め、その値が図-7に示した穿孔エネルギーに影響を与える領域の推力に相当する場合には、前述の「フィード圧(推力)の影響」の節で述べたフィード圧の影響補正を実施する手法が挙げられる.

#### (3) 削孔径の影響

式(1)に示した穿孔エネルギーの算出式では、削孔径 (孔断面積)の違いも考慮されている.しかし、削孔径 の違いにより削孔効率が変化すること(寸法効果)が知 られており<sup>5,0</sup>,算出式ではその影響は考慮されていな い.図-9に同一の花崗岩ブロックに対する削孔実験で得 られたビット径と穿孔エネルギーの関係を示す.図のよ うに、同一の岩盤ブロックであるにも関わらず、ビット 径が大きくなるほど穿孔エネルギーが低下する(削孔効 率が向上する)傾向が認められた.例えば、¢125mmの ビットを使用するAGF鋼管打設時の穿孔エネルギーは、 ¢45mmのビットを使用する装薬孔やロックボルト打設 孔の削孔に比べて30%程度小さい値となっており、地山 評価をする上で無視できないほどの差が生じている.

このように、施工データとともにより大口径のビット を使用する削孔検層やAGF工法の削孔データも含めて地 山評価を実施する場合には、これらの大口径ビットの使 用で算出された穿孔エネルギーを施工時に使用される *φ* 45mmのビット径相当の値に補正する等の処理が必要と なる.

#### 4. 現場適用結果

#### (1) 適用方法および結果

コンピュータジャンボを導入したトンネルにて本シス テムを試験適用し、その妥当性について検討した.適用 したトンネルでは凝灰岩や凝灰角礫岩等の堆積軟岩層が 広く分布しており、比較的硬質な安山岩の岩脈が局所的 に出現していた.本適用では、掘削時において日々得ら れる施工データに加えて 30-40m 毎に実施した削孔検層 データを用いて地山強度の3次元ブロック図を継続的に



図-9 ビット径の違いが穿孔エネルギーに与える影響



図-10 適用トンネルにおける地山強度の3次元評価例



図-11 本システムによる換算強度と原位置試験結果の比較

作成した. さらに, 必要に応じて横断図(正面図)や SL 平面図, CL 縦断図を適宜作成し, その結果を切羽に おける地山強度分布の傾向把握や予測等に役立てた.

図-10 に適用結果の一例を示す. 図のように本システ ムで換算された地山強度は全体的に 5~20MPa 前後を示 すが,掘削時に実施した原位置試験でもほぼ同様の値が 得られた. 図-11 に本システムによる換算地山強度と原 位置で計測された地山強度の比較例を示す. このような 比較検討を掘削時に適宜実施し,本システムにより評価 した地山強度の妥当性を確認しながら現場適用を行った. また,切羽観察記録との比較も都度実施し,地山の硬軟





部の分布や地質(岩種)の変化状況が本システムの評価 結果と概ね一致することも確認された.

本システムの妥当性を評価する上で、とくに脆弱層の 把握に着目した検討結果および前方探査(削孔検層)結 果を含めた評価結果について以下に詳述する.

#### (2) 脆弱層の出現状況評価

適用区間では凝灰角礫岩の軟岩層が広く分布していた が、一部の区間ではより脆弱な灰白色凝灰岩層が繰り返 し出現していた.図-12に灰白色凝灰岩層出現時の切羽 写真と本システムで評価した地山強度分布の比較結果を 示す.図中の切羽写真では、天端から出現した灰白色凝 灰岩が掘削が進むにしたがって徐々に切羽全体に広がっ ていく状況が確認できるが、本システムにより地山強度 が5MPaを下回る脆弱層と評価された暖色領域が灰白色 凝灰岩と概ね同様の分布を示すことが確認できた.

ここで注目すべき点は、切羽における地山強度の分布 状況がその切羽が出現する前作業の装薬孔削孔終了時に 得られたということであり、施工データのみを使用して も次サイクルの切羽状況を事前に把握可能であることが 確認できた.このように、直前であっても次切羽の地山 状況を正確に把握することができれば、急激な地山の変 化にも十分な対策を講じることが可能となる.

#### (3) 切羽前方も含めた3次元地山評価

本トンネルでは30-40m毎に切羽前方に向けて2ヶ所の 削孔検層を実施しており、今回の適用では日々得られる 施工データに加えて、これらの前方探査データも用いた 地山評価手法について検討した.

施工時に得られた多数の短尺削孔データおよび削孔検 層による長尺削孔データを用いて、切羽近傍の掘削区間 および切羽前方区間の地山評価結果(穿孔エネルギー) を連続出力した事例を図-13に示す.また、切羽前方区 間の掘削時において、施工データを用いて再度実施した 3次元評価結果を図中の下段に示した.

今回の事例のように削孔検層データのみを使用して3 次元評価する場合には、空間補間に使用可能なデータ数



図-13 掘削地山の評価と切羽前方予測結果の同時出力例

が制限されるために削孔データの局所的な変動傾向が強調された評価結果となってしまう場合がある. 図-13中段の切羽前方地山の予測領域の補間結果でもそのような傾向が一部で認められたが,全体的な穿孔エネルギーの空間分布傾向は,図-13下段に示した施工データを使用した地山評価結果と概ね調和的であった.

このように、切羽前方探査も含めて本システムを運用 することにより、切羽前方の空間的な地山変化傾向に注 意を払いながら切羽近傍の地山性状を詳細かつ定量的に 把握するといった地山評価を、連続的かつ3次元的に実 施することができた.

# 5. おわりに

今回,施工時におけるドリルジャンボの削孔データを 用いて、切羽およびその周辺の地山性状を詳細かつ連続 的に3次元評価可能なシステムを開発した.現在,本シ ステムのトンネル適用は約1,800m区間に達しているが, システムの動作性等に大きな問題もなく運用されている. 地山評価についても、穿孔エネルギーに加えて地山強度 を評価指標とした手法を導入することにより、切羽の強



図-14 山岳トンネルにおけるIoT活用イメージ

度特性を迅速かつ3次元的に把握することができた.今後は,現在実施している試験適用を継続するとともに他トンネルへの展開も進め,更なるシステム改良を実施していく予定である.

また、今後の展開としてCIMとの連携や図-14に示す ような山岳トンネルにおけるIoT活用についても積極的 に進め、地山評価だけでなくドリルジャンボの稼働状況 診断(マシン診断)等も含めた総合的な掘削管理への展 開を図っていきたいと考えている.

謝辞:本開発を進めるにあたり、株式会社地層科学研究 所にはデータ処理および解析のためのソフトウェア開発 について多大なご協力をいただいた.また、古河ロック ドリル株式会社および株式会社マックには本システムの 現場適用に際し多大なご協力をいただいた.以上の関係 者の皆様に深く御礼申し上げます.

#### 参考文献

- 山下雅之,三井善孝,塚田純一:ドリルジャンボの 削孔データを使用した3次元地山評価システムの開発, 土木学会第72回年次学術講演会,VI-208, pp.415-416, 2017.
- Teale, R. : The concept of specific energy in rock drilling, Int. J.Rock, Mech.Min.Sci., Vol.2, pp.57-73, 1965.
- 3) 山下雅之,石山宏二,福井勝則,大久保誠介:さく岩 機のさく孔効率と岩盤特性についての検討,第41回 岩盤力学に関するシンポジウム講演集,pp.1-6,2012.
- Hustrulid,W.A. and C.Fairhurst : A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part 1theory of percussive drilling, *Int.J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.8, pp.311-333, 1971.
- 5) 山下雅之,平野 享,石山宏二,塚田純一,福井勝則, 大久保誠介:油圧さく岩機の掘削体積比エネルギー を用いた坑道周辺岩盤の特性評価に関する研究,土 木学会第66回年次学術講演会,Ⅲ-109, pp.217-218, 2011.
- 福井勝則,大久保誠介:掘削体積比エネルギーを用いた岩石強度の寸法効果の推定,資源と素材, Vol.120, pp.555-559, 2004.

(2018.8.10 受付)

# DEVELOPMENT OF THREE-DIMENSIONAL GROUND EVALUATION SYSTEM USING DRILLING DATA DURING TUNNEL EXCAVATION

# Masayuki YAMASHITA, Satoru YAMAMOTO, Yoshitaka MITSUI and Junichi TSUKADA

Three-dimensional ground evaluation system in tunnel face using drilling data of computerized drill jumbo which can easily obtain drilling position and angle data was developed.

Furthermore, through application of the development system to tunnel in excavation, it was confirmed that there is no problem in the operability of the measurement device and the transmission of measurement data to the outside the tunnel. Moreover, it was also confirmed that the three-dimensional distribution of the ground strength obtained by analyzing a large amount of measurement data roughly coincides with the characteristics of natural ground at the face.