

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 (DRISS-3D) の開発

3D Ground Evaluation System using Drilling Data of Drill Jumbo

山下 雅之*

Masayuki Yamashita

三井 善孝*

Yoshitaka Mitsui

山本 悟*

Satoru Yamamoto

要 約

山岳トンネルの掘削に使用されるドリルジャンボの施工データ（装薬孔・ロックボルト孔の削孔データ）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次元評価可能な地山評価システム「DRISS-3D」を開発した。本システムは坑内においてドリルジャンボのすべての削孔データを自動計測する『計測システム』および計測されたデータを専用ソフトで3次元処理する『解析・評価システム』で構成されており、施工サイクルの中で連続的に3次元の地山評価を行うことが可能となっている。また、開発システムを施工中の長距離トンネルへ試験適用し、システムの動作性および地山評価の妥当性について確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. システムの概要
- § 3. 施工データ使用時の留意点
- § 4. 適用事例
- § 5. 今後の展開

§ 1. はじめに

山岳トンネルの掘削では、切羽周辺やその前方の地山性状を定量的に把握することが最適支保を迅速に適用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、主に切羽前方探査法（削孔検層）としての開発・適用が進んできた。しかし、削孔検層では1本もしくは数本の長尺削孔データを用いて切羽前方の地山性状を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までには至っていない。

近年、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）の普及が進んでおり、装薬孔・ロックボルト孔といった施工時の削孔位置・角度データが容易に入手可能となってきた。今回このような技術を利用し、削孔検層データに加えて、施工時に得られる大量の削孔データを処理・解析して切羽近傍の地山性状を3次元評価可能なシステム¹⁾を開発した。以下に、その技術内容を

紹介する。

§ 2. システムの概要

2-1 システム構成

本システムは、図-1に示すように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計測する『計測システム』および得られた削孔データを専用ソフトで処理する『解析システム』で構成されている。

2-2 計測システム

計測システムは、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基本として構築されている。計測装置はドリルジャンボ本体に常設され、施工時もしくは切羽前方探査時における削岩機の各種作動油圧、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、これらの収録データ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、図-2参照）。

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にモニタリングすることも可能となっている。

2-3 解析・評価システム

計測システムで得られたデータは、専用の解析ソフト

* 技術研究所土木技術グループ

を使用して図-3に示すような流れで半自動処理・解析される。この処理の中で、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、下式で求められる。

$$S_E = \frac{E_i \times bpm}{A_H \times P_R} \quad (1)$$

ここに、 S_E ：穿孔エネルギー (J/cm³)

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 (cm²)

穿孔エネルギーは掘削体積比エネルギー (Specific Energy)²⁾³⁾ と呼ばれ、「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、大きいほど“より硬質”な地山であると評価することができ、さらに以下の独自式により穿孔エネルギーから地山強度を換算することも可能となっている³⁾。

$$\sigma_c = \left(\frac{S_E}{C} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2)$$

ここに、 S_E ：穿孔エネルギー (J/cm³)

C ：定数 (-)、 σ_c ：岩盤強度 (MPa)

b ：乗数 (=0.5)

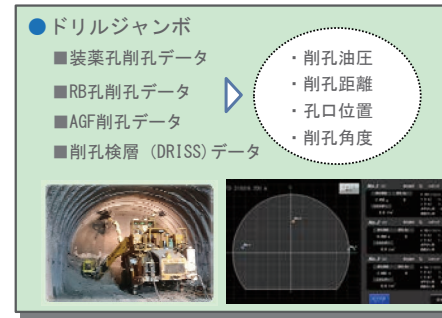
図-3の処理・解析過程で得られる3次元ボーリング表示および3次元ブロック図の出力例を図-4、図-5に示す。ここに示した3次元ブロック図は、IDW法 (逆距離加重平均法) と呼ばれる空間データ補間処理法を使用した出力結果であるが、他の手法としてクリギング法と呼ばれる地球統計学的手法も解析ソフトには実装されており、地質条件等を考慮してより最適な空間データ補間手法を選択することが可能となっている。

さらに本システムでは、図-6に示すように3次元ブロック図から任意断面における種々の2次元表示が可能であり、事前地質調査資料 (地質縦断面図や平面図) 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。また、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. 施工データ使用時の留意点

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、一定の条件で実施する削孔検層 (切羽前方探査) と異なり様々な削孔条件下の削孔データを一括して評価す

★計測システム (トンネル坑内)



★解析・評価システム (現場事務所)

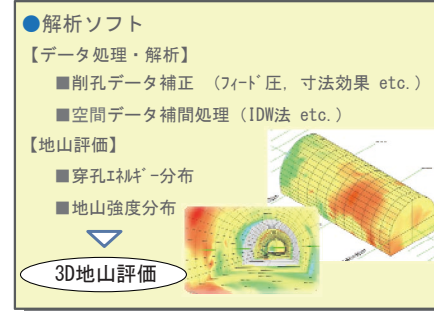


図-1 システム構成

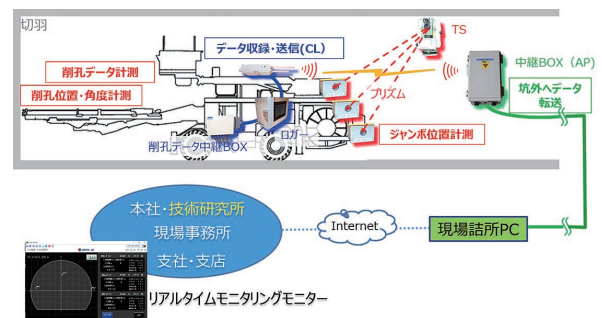


図-2 計測システムの構成

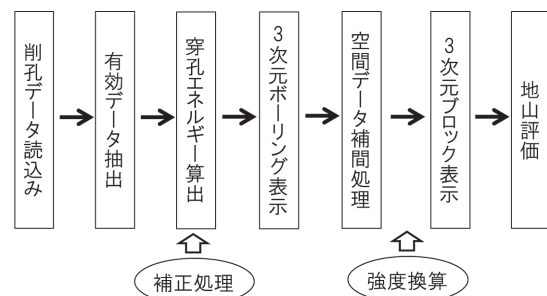


図-3 データ処理の流れ

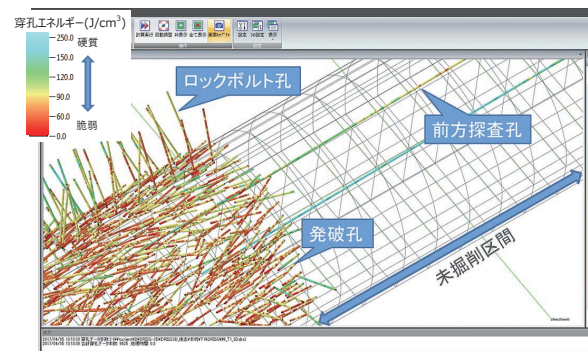


図-4 穿孔エネルギーの3次元ボーリング表示例

る必要がある。削孔条件の違いは、同一性状の地山であっても式(1)で求めた穿孔エネルギーが変化する可能性があるため、精度よく地山性状を評価するためには削孔データの補正が必要となる。

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。

3-1 フィード圧の影響

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削孔ビットを岩盤に押し付ける力(フィード圧)をオペレータが適宜変化させることがある。図-7に示すように、フィード圧(推力)を変化させることにより同一強度の地山であっても穿孔エネルギーが変化することが知られており⁴⁾、今回のようにフィード圧条件が異なる複数の削孔データを一括して地山評価する場合には、フィード圧の影響補正が必要となる。

補正方法としては、図-7のような穿孔エネルギーと推力の関係図から必要最低推力(穿孔エネルギーが一定となる最低推力: 図中の硬質岩では10 kNに相当)における穿孔エネルギーに換算する手法等が挙げられる。

3-2 削孔角度の影響

とくに天端や肩部のロックボルト打設孔の削孔等、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の方向と逆方向に作用してしまう。そのため、実際にビットに作用する荷重は計測されるフィード圧に比べて小さくなる。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、このようなフィード圧低下の影響も考慮する必要がある。

3-3 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)の違いが考慮されている。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⁴⁾⁵⁾、算出式ではその影響が考慮されていない。図-8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に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傾向が認められる。これはビット径が大きくなるほど削孔効率が高くなることを示しており、例えば施工時とAGF鋼管打設時の穿孔エネルギーには約30%の差が生じている。

φ65 mmのビットで実施される切羽前方探査やφ89~120 mmのビットで実施されるAGF等の補助工法の削孔データも含めて評価する場合には、装薬孔やロックボルト孔の削孔に使用されるφ45 mmのビット径を基準径として穿孔エネルギーを補正する等の処理が必要となる。

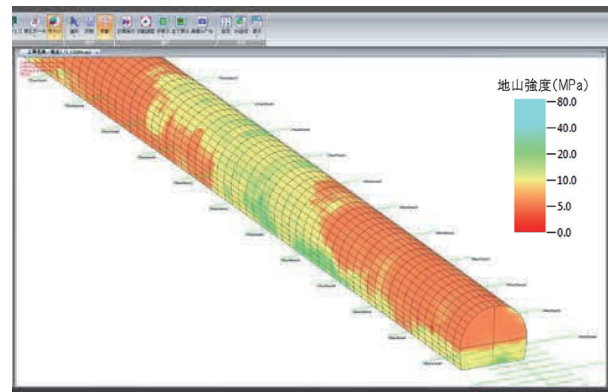


図-5 地山強度の3次元ブロック図の表示例

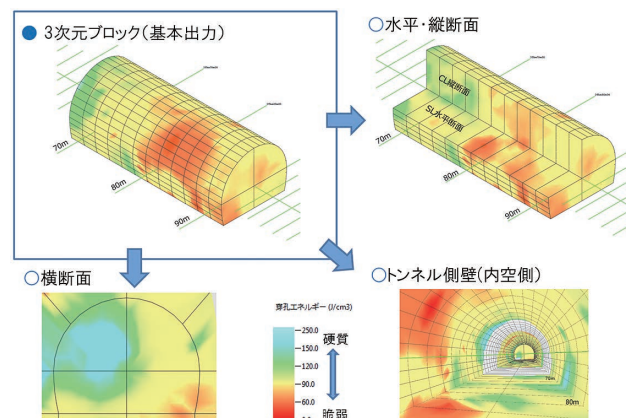


図-6 任意断面における2次元表示例

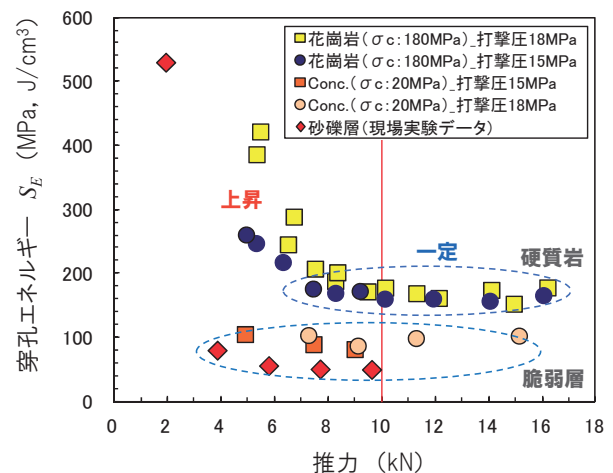


図-7 穿孔エネルギーと推力の関係

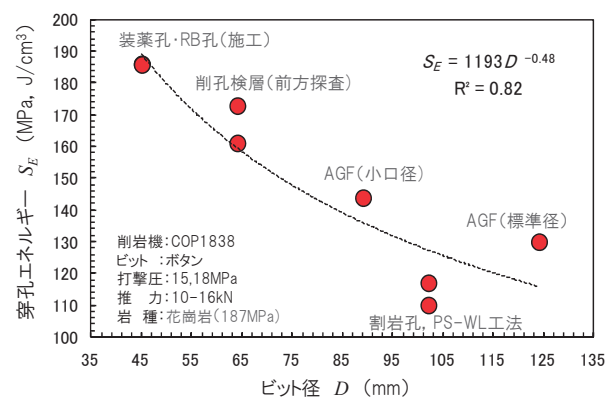
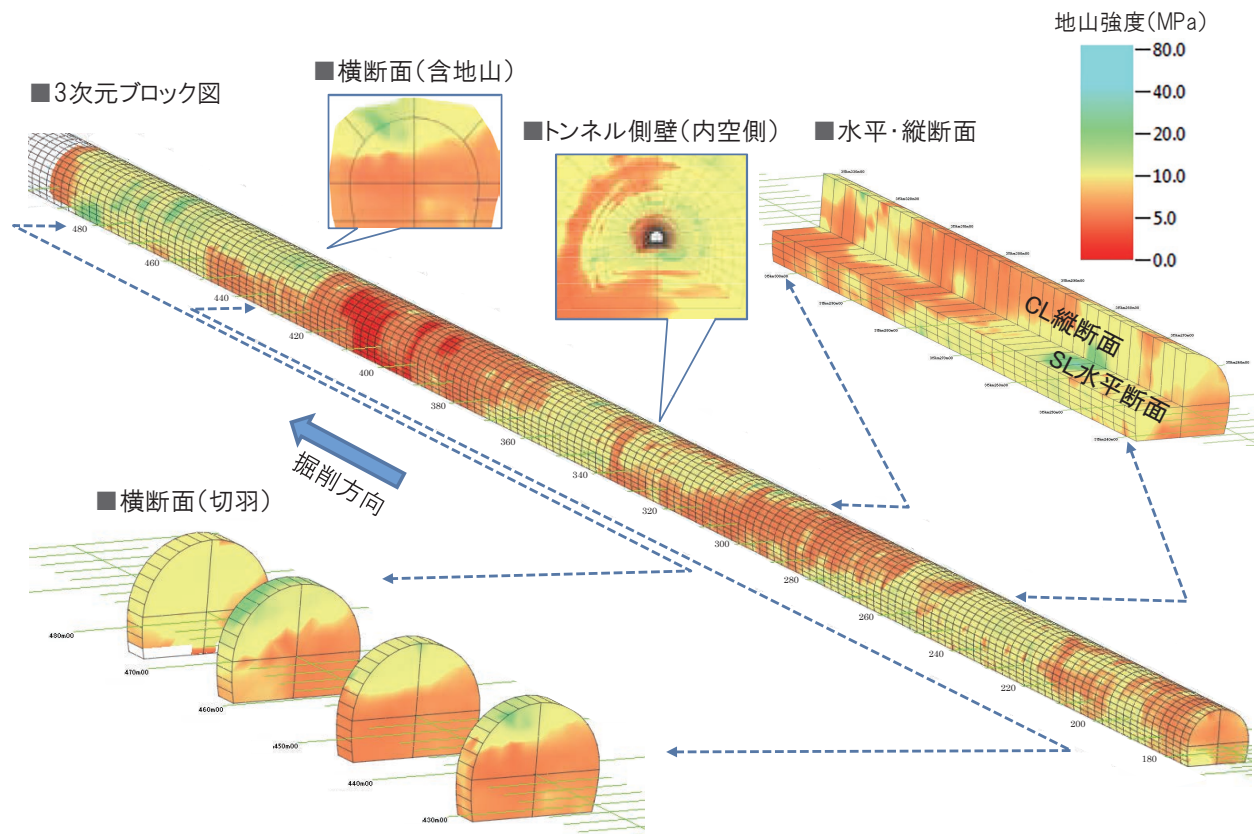


図-8 ビット径の影響(寸法効果)

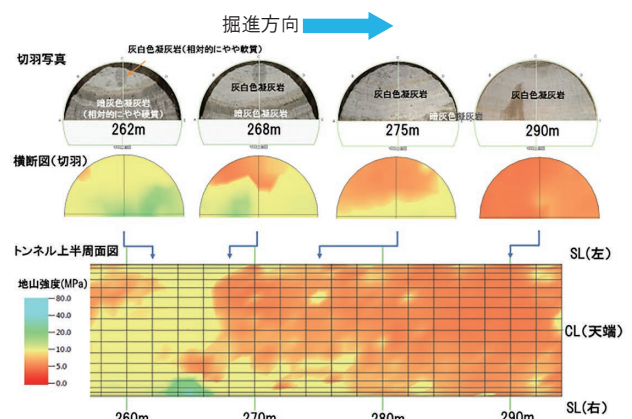


図一9 適用トンネルにおける地山強度の3次元評価例

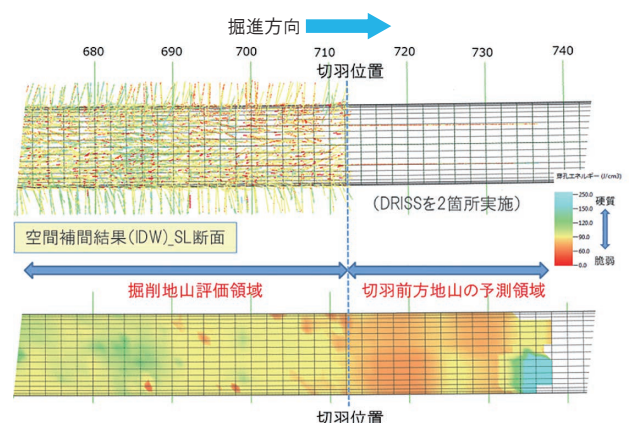
§ 4. 適用事例

コンピュータジャンボの導入トンネルにおいて本システムの適用試験を実施した。図一9に適用結果の一例を示す。この事例では、掘削時に地山強度の3次元ブロック図を継続的に作成・更新した。そして必要に応じて横断面図（正面図）やSL平面図・CL縦断面図を適宜作成し、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。図のように、適用区間の地山強度は全体的に10 MPa前後を示しており、掘削時に原位置試験で求めた一軸圧縮強さもほぼ同様の値が得られた。

適用区間では凝灰質砂岩・凝灰角礫岩を主体とした堆積軟岩層が広く分布していたが、その中でとくに脆弱な白色凝灰岩層の分布状況を地山強度の分布図を用いて予測・評価することもできた（図一9中の各図における5 MPa以下を示す暖色部に相当）。図一10は上述の白色凝灰岩の出現状況写真とDRISS-3Dの評価結果を比較したものである。図中の切羽写真では、天端から出現したより脆弱な白色凝灰岩が掘削が進むにしたがい（写真左から右に向かって）徐々に切羽全体に広がっていく状況が確認できるが、DRISS-3Dでも地山強度が5 MPaを下回る脆弱領域（図中の暖色領域）が同様の分布を示すことが確認できた。ここで注目すべきは、切羽における地山強度の分布状況が写真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することが



図一10 切羽の地山性状評価例



図一11 掘削地山の評価と切羽前方予測結果の同時出力例（穿孔エネルギー）

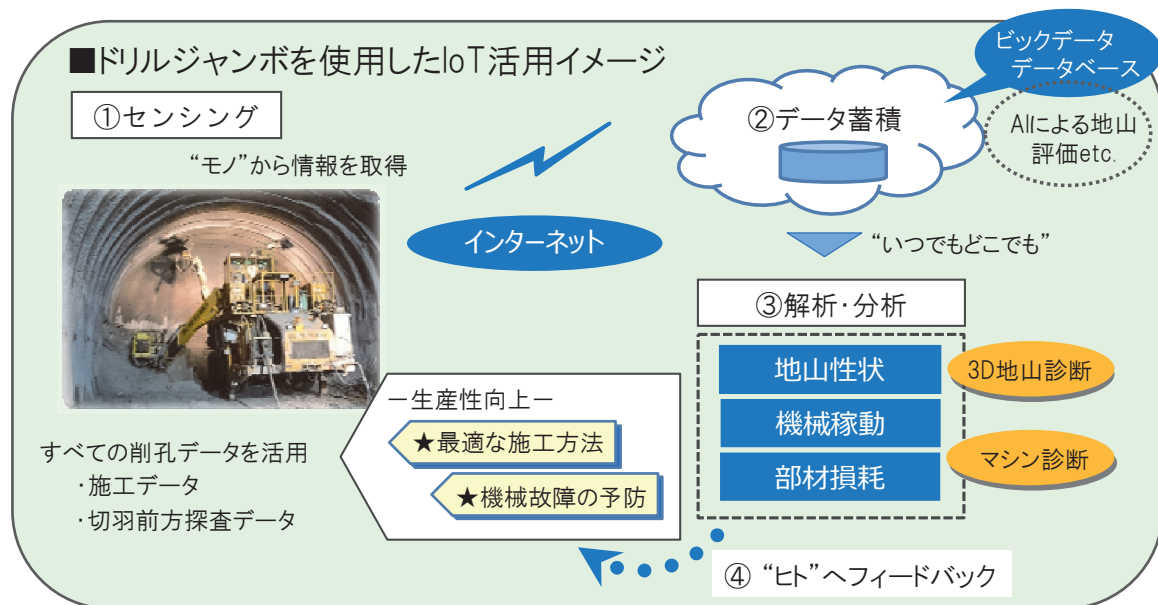


図-12 山岳トンネルにおけるIoT活用イメージ（ドリルジャンボ）

できた。このように、直前であっても切羽の地山状況を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。また、図-11に示すように複数の切羽前方探査データ（DRISS）を使用して切羽前方30～40 m程度の3次元地山予測結果を出力させることで、掘削地山の3次元評価と切羽前方地山の3次元予測を連続的に実施・出力させることもできた。

§5. 今後の展開

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、切羽前方に加え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次元評価することが可能なシステムを開発した。現在、適用トンネルにおいて約1,500 m区間の連続評価を実施しているが、システムの動作性等に大きな問題もなく運用を続けている。

今後は、現在実施している適用試験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行う予定である。さらに本システムのCIMとの連携や図-12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マシン診断等を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. 本システムの開発にあたり、ジオマシンエンジニアリング（株）、（株）地層科学研究所、古河ロックドリル（株）およびマック（株）の皆様に多大なご協力をいただいた。また、本システムの適用試験については札幌支店新幹線後志出張所にご協力いただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.