

切羽プロジェクションマッピング技術による山岳トンネル掘削の効率化

大成建設(株)	正会員	○谷 卓也, 正会員	宮本 真吾
大成建設(株)	正会員	福原 俊一, 正会員	古賀 尚快
大成建設(株)	正会員	青木 智幸, 正会員	小柳 司

1. はじめに

夜の野外イベントといったエンターテインメント分野で使われるプロジェクションマッピング技術を山岳トンネル工事に活用し、施工の安全や効率性を向上させた開発、適用事例を紹介する。これは、施工に重要な地盤情報を、吹付けコンクリートで覆われた掘削面の切羽をスクリーンとして投影するもので、東北地整発注の復興道路等の国内山岳トンネル工事に適用した技術¹⁾である。

本稿では、開発経緯、技術概要、技術の活用効果、現場普及のポイントとなった地盤情報の簡易かつ迅速な提供、利用者の立場で考えた操作上の工夫等について述べる。

2. 開発経緯

山岳トンネル工事では、通常、昼夜の2班に分かれて掘削作業を行う。作業の交代時には、切羽の地質情報を含め、次の作業班に施工に必要な情報を引き継ぐ。しかしながら、交代で入坑する作業員は、切羽が吹付けコンクリートで覆われているため（写真-1）、亀裂の位置や状態、色の違いで見分けられる岩種や風化の度合い、といった切羽の状況を直接目視で確認できない。一方、近年、様々な調査技術や評価技術が開発され現場適用されているが、情報の多くはPCやタブレット端末を操作して確認する必要があり、作業中の現場では容易かつ時宜にかなった情報の取得が難しい。当社の国内トンネル現場においも、切羽前方探査の結果や計測結果から評価された地盤情報を、現場の切羽に居ながら確認できる技術の開発が望まれていた。

以上のような背景から、作業中の切羽において施工に関わる情報を簡単に確認できるよう、切羽をスクリーンとして、種々の情報を投影する「切羽プロジェクションマッピング」技術を開発した。

3. 技術概要

(1) 技術の特長

切羽プロジェクションマッピングは、トンネル掘削における主要な機械である油圧削岩機（ジャンボ）に搭載されたプロジェクターから、吹付け直前に撮影された切羽写真（写真-2）と地盤の硬軟を表す削孔エネルギー²⁾のコンター図（写真-3）を切羽の吹付け面に投影する技術である。投影画像は、ジャンボが切羽近傍の作



写真-1 吹付けコンクリートに覆われた切羽



写真-2 投影された掘削面の写真



写真-3 投影された地盤の硬軟コンター図

キーワード 山岳トンネル、情報化施工、プロジェクションマッピング、削孔検層

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設株式会社 技術センター TEL 045-814-7221

業箇所、たとえ切羽にきちんと正対せずに設置されても、切羽の形状に合わせて歪みなく投影される。投影される画像情報の取得、投影準備は自動で行われ、作業員は簡単なスイッチ操作のみで見た画像を投影することができる、といった特徴を有する。

(2) 投影装置

投影装置については、三脚等の設置架台を使わず設置手間なく活用できるよう、ジャンボの操作台の上に固定している(写真-4(a))。また、正しい位置に歪み無く画像を投影するマッピングには、プロジェクターの位置を座標で把握する必要があることから、近年普及が進んでいる削孔ガイダンス機能を有するジャンボの位置座標と姿勢情報を利用することにした。装置の搭載に当たっては、粉塵、滴水、振動の他、プロジェクターやPCの放熱にも対応するシャッター付き保護ケースを開発した(写真-4(b))。

(3) 投影画像

投影画像の切羽写真(写真-2)と地盤の硬軟を表す削孔エネルギー分布のコンター図(写真-3)について述べる。

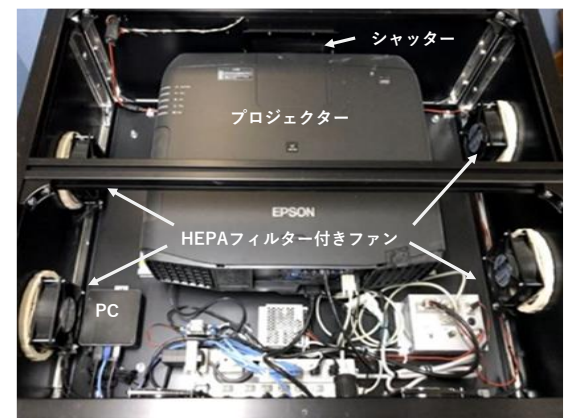
切羽写真は、掘削直後、吹付けコンクリートが切羽全面を覆う前に、現場担当者が施工管理のために撮影する画像を用いる。この画像ファイルは外部のサーバー経由し、最新のデータが投影装置内のPCに自動ダウンロードされ、投影準備が、意識せずとも完了するようになっている。

削孔エネルギーは、発破掘削時に切羽に設ける装薬孔(数十～百個程度)を削孔する際のフィード圧や打撃圧、打撃回数等の機械データから算定される。各孔の削孔時に、その奥行き方向の削孔エネルギーの変化を示したものが図-1(a)である。また、これらのデータを掘削断面内の分布図として処理したものが、図-1(b)に示すコンター図である。掘削エネルギーは、地盤(岩盤)の一軸圧縮強さと相関する指標なので、このコンター図は岩盤の硬軟分布を表していると言える。図-1に示す図は、古河ロックドリル社製の削孔ガイダンス付きジャンボが有する削孔検層機能と「ドリル NAVI」の機能によって作成される。標準的な機能としては、この図の作成はPC上で手動作成する必要があるため、本技術の開発では、これらの作業を自動処理するようソフトウェアを改良した。岩盤の硬軟コンター図は、地盤の硬い部分を寒色系で、軟らかい部分は暖色系の色で表示し、それぞれの色が示すエネルギー値の範囲を変えないことで、工事期間中は地盤の硬軟を色の違いとして比較できる。

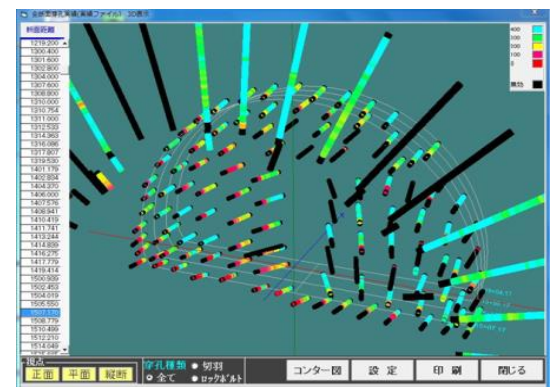
このコンター図は、装薬孔の削孔終了後、直ちに自動作成されるため、装薬孔の削孔前には、目の前の切羽が掘削され



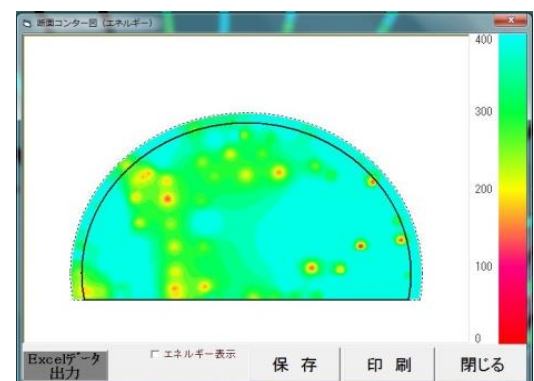
(a) ジャンボ操作席のプロジェクター



(b) 保護ケースに収められたプロジェクター
写真-4 投影装置の設置状況と保護ケース



(a) 各孔の削孔エネルギー分布図



(b) 断面内でのエネルギー分布のコンター図

図-1 削孔エネルギーの表示

た際の地盤の硬軟を、次に掘削する切羽の削孔が終わった直後には、これから発破をかける地盤の硬軟がコンター図で確認できる。

(4) マッピング機能（画像生成）

プロジェクターを搭載したジャンボは、作業の度ごとに、いつも切羽に対して相対的に同じ位置に据えられるとは限らず、また、路盤の状況により機体が傾いている場合もある。そのような場合でも、投影される画像が正確に切羽の形状に合わせて投影されるよう、前述のジャンボの座標および傾きの情報を利用して、補正画像が生成される³⁾。補正画像の生成は、既存の3DCGのプログラムを利用してPC内の仮想空間で行われ、最終的にはPCからプロジェクターに補正画像情報が送られてマッピング投影される。

(5) 投影操作の簡易化

近年、トンネル坑内でのプロジェクターを使用した技術開発事例も増えてきているが、プロジェクターの設置や撤去、位置の測量や投影のためパソコン操作については、依然として人の操作に頼るものが多い。これに対し、本技術では、データの処理の自動化の他、作業員による投影についても簡易にできるよう工夫した。

切羽への画像投影、撮影画像の切り替えについては、ジャンボの操作台の中央に配置したスイッチボックス（写真-5、左側はその拡大写真）のみで行う。このスイッチ類は、革手袋を装着したまま操作できる大きさ仕様となっている。投影は2個のスイッチ操作のみで可能であり、一番上のスイッチでプロジェクターの電源のON/OFFを行い、上から3番目のボタンを押すことで切羽写真（写真-2）とコンター図（写真-3）を切り替える。その他（上から2番目と4番目）は、投影画像の種別を示す表示灯である。なお、写真-5の右側には、コンピュータジャンボの削孔ガイダンスに

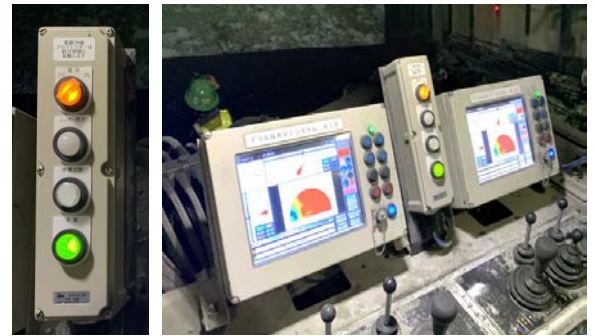
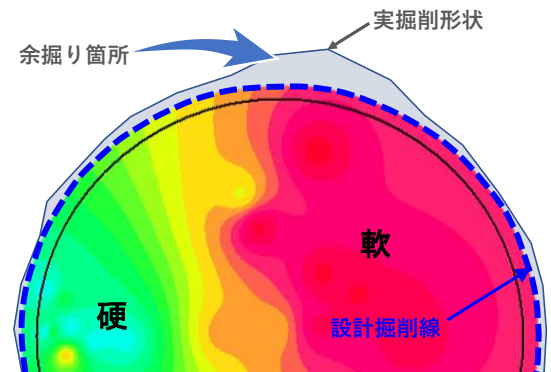
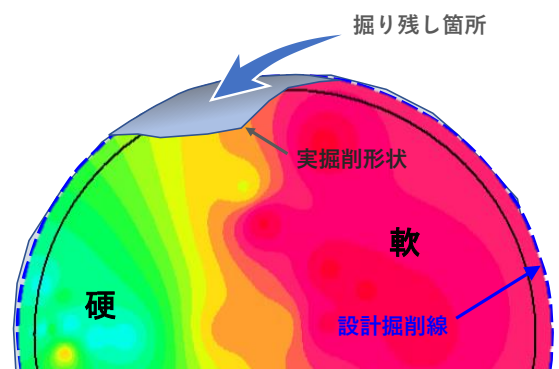


写真-5 プロジェクター起動スイッチおよび画像の切替えボタン



(a) 硬軟境界を実際より右側と誤認した場合



(b) 硬軟境界を実際より左側と誤認した場合
図-2 余掘りと掘り残しのイメージ

使用するモニターに、投影画像が表示されている。これは、作業員間で地盤情報等の共有がなされた後、プロジェクションを終了しても、操作台に居るオペレータは切羽写真とコンター図を手元で確認できるようにしたためである。

4. 活用成果

(1) 施工効率の向上

地盤の硬軟が、定量的な指標であるコンター図として、切羽写真とともに実際の切羽位置に投影されることで、切羽状況に応じた削孔間隔の設定や装薬量の調整ができるようになった。そのため、過装薬による飛石や余掘り、薬量不足による掘り残しがほとんど発生しなくなった。余掘りは、後の覆工コンクリートの打設量が増加する他、トンネル周囲の地盤を必要以上に損傷させることもある。一方、掘り残しは、その部分を改めて機械で破碎する必要があるため、再度発破を行う場合もある。これらは、いずれも対応に相応の時間がかかるため、施工サイクルや工期に大きく影響する。例として、図-2(a)に、切羽プロジェクションマッピングを用いず、地盤の硬軟の境界位置が実際よりも右側にあると誤認して、軟らかい地盤の範囲に火薬量を多く用いた発破を

かけた場合の余掘り発生イメージを示す。また、図-2(b)には、逆に硬軟の境界が実際よりも左側にあると誤認して、硬い地盤の範囲に十分な火薬量を施さずに発破をかけた場合の掘り残しの発生イメージを示す。

実際に切羽プロジェクションマッピングを、導入した国道 106 号下川井トンネル工事においては、導入後の施工効率の向上が顕著であった。当社における従来の CI 相当の地山の余掘り量は平均 30 cm 程度であるが、削孔ガイダンス機能による効果も含め余掘り量の平均が 14 cm となり、



写真-6 切羽観察スケッチ投影による技術教育

約 50% 低減でき、着実な掘削進行を得た。特に、この現場の地質は、見た目（切羽写真）では硬軟の区別が付き難い全面暗い灰色の岩盤の互層が連続し、効果的な発破を実施し辛い状況であった。切羽プロジェクションマッピングが導入されてからは、地盤（岩盤）の硬軟の誤認を要因とする過装薬や弱装薬といった事例も無くなり、着実な進捗が得られるようになった。

(2) 安全性の向上

切羽プロジェクションマッピング技術は、切羽写真や地盤の硬軟コンター図の他、切羽観察写真や施工図面が投影できる。そのため、不安定な切羽において実施する鏡ボルト等の補強対策工では、図面を投影することで切羽に近づいて行う事前のマーキング作業の省略が可能となる。また、切羽写真や地盤の硬軟コンター図からは、亀裂の密集箇所や、風化変質が著しい脆弱な地層の位置や規模等、施工に留意すべき箇所を正確に把握することができ、施工の安全性が高まったと考える。

5. まとめ

開発した切羽プロジェクションマッピングを構成する技術や利用者の利便性に配慮した工夫、また、山岳トンネル工事における運用による施工の効率性向上事例を紹介するとともに、安全性向上への活用方法についても述べた。今後は、投影する画像、動画のコンテンツを増やし、現場で行う技術教育（写真-6）や安全教育にも活用していきたい。また、掘削の効率化、生産性向上のため、発破の効果を定量的に把握できる計測装置と連携させ、データの蓄積と分析により発破パターンの自動設定技術についても開発を進めつつ、本技術を多くの方に利用してもらえよう、普及にも注力していきたい。

参考文献

- 1) 宮本真吾，福原俊一，谷卓也，古賀快尚，河上伸一：切羽プロジェクションマッピングシステムを活用した山岳トンネルの施工事例，土木学会第 74 回年次学術講演会，VI-732，2019.
- 2) 西松裕一：掘削方法とその評価方法について，日本鉱業会昭和 47 年度秋季大会分科会講演資料，1972.
- 3) 西田友是：コンピュータグラフィックスの数理（2）座標変換，応用数理 13 巻 4 号，pp334-342，2003.