

# 「切羽プロジェクションマッピング」の活用による安全性・効率性の向上

大成建設株式会社 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

山岳トンネル工事にプロジェクションマッピング技術を活用した事例を紹介する。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に見立て地盤状況を投影し、施工の安全や効率性を向上させた下川井トンネル工事（東北地方整備局発注の復興道路）の実績等を基に、開発の経緯、技術の概要、活用効果、現場普及のポイントについて述べる。

## 1. はじめに

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、施工にとって重要な地盤情報を、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、国内山岳トンネル工事で採用されている。

本稿では、開発の経緯、技術の概要、「使える技術」としての活用効果、現場普及のポイントとなる地盤情報のリアルタイムな提供、コスト低減や利用者の立場から考えた工夫について述べる。

## 2. 開発の経緯

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、切羽の地質情報等を次の作業班に引き継ぐが、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等の切羽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、結果についてはPCやタブレット端末を操作して確認する必要があるため、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。

以上の背景から、作業中の切羽において施工に



写真－1 吹付けコンクリートに覆われた切羽

関わる情報を簡単に確認、共有できるよう、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. 技術の概要

#### (1) 技術の特徴

切羽プロジェクションマッピングは、次の特徴を有する。

- ・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）にプロジェクターを搭載している。
- ・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のコンター図（写真－3）を切羽に投影できる。



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  
※実際は、地盤の左側が寒色系（硬い）、右側が暖色系（軟らかい）に色分けされています

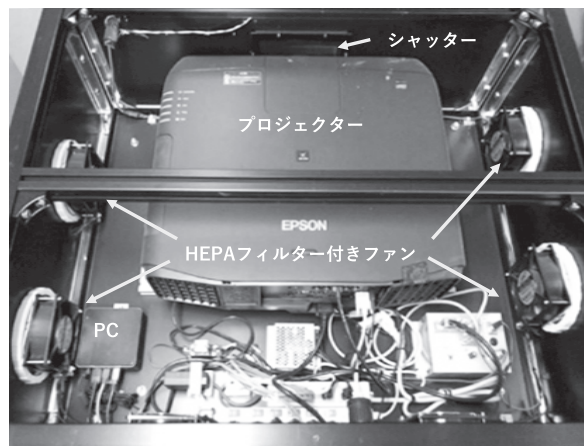
- ・投影画像は、ジャンボが切羽近傍のどの位置・どの向きに設置されても、切羽の形状に合わせて歪みなく投影される。
- ・投影される情報の取得、投影準備は自動で行われ、作業員は簡単なスイッチ操作のみで見たい画像を投影することができる。

#### (2) 投影装置

投影装置については、機器類の設置等の手間なく活用できるよう、切羽作業で使われるジャンボの操作台の上に搭載することとした（写真－4（a））。また、正しい位置に歪みな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座標が必要となることから、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および姿勢情報を利用することにした。搭載に当た



(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

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

主な投影画像である切羽写真（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、現場担当者が撮影する。これは、施工管理上必ず撮影するもので、画像ファイルは外部のサーバー経由で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、投影準備がなされる。

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、地盤（岩盤）の一軸圧縮強さと相関する指標である。削孔エネルギーのコンター図は、古河ロックドリル社製のジャンボに搭載される「ドリルNAVI」によって作成される。通常、この図の作成はPC上で手動作成する必要があるが、これを自動処理できるよう手を加えた。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

プロジェクターを搭載したジャンボは、作業の際には切羽近傍に設置されるが、同じ位置に据えられるとは限らず、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

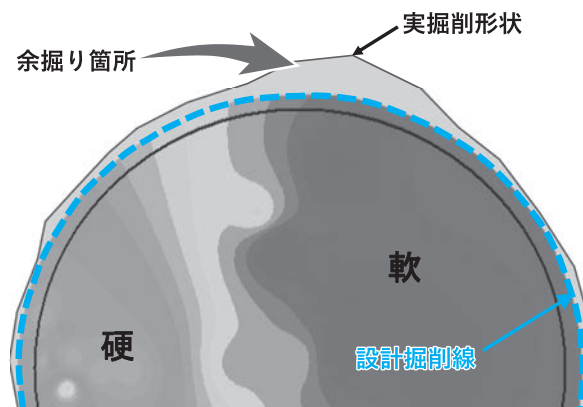
るよう、3次元コンピュータグラフィックス用のプログラムを利用した。補正画像の生成は、プログラムの仮想空間で行われるが、この時、ジャンボの位置座標やジャンボに付属する傾斜計から得られる情報を用いる。

## 4. 活用効果

### (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－1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して、弱層部に火薬量を多く用いた発破を行った場合の、余掘り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下川井トンネル工事においては、導入後の施



図－1 弱層の境界（中央部）を実際より右側と考えると発破した場合の余掘りのイメージ



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、約 50% 低減でき、着実な掘削進行を得た。

## (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. 現場普及のポイント

切羽プロジェクションマッピング技術については、現在、4 現場目に導入される状況である。前章で述べた、施工に活用できる可視化情報を適宜伝えられることの他、現場の利用者のニーズに配慮した対応、工夫について述べる。

### (1) コストの低減

通常、複数台で行うプロジェクションマッピングを、プロジェクター 1 台で稼働する設計とした。事前の投影実験から最低でも 10,000 lm 以上の仕様の製品を使う必要であることが分かった。また、万が一故障してもすぐに交換可能である点も重要と考え、特注品ではなくカタログ品のプロジェクター（EPSON 製、12,000 lm クラス）を使用し、投影装置全体の費用を抑えた。

### (2) 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

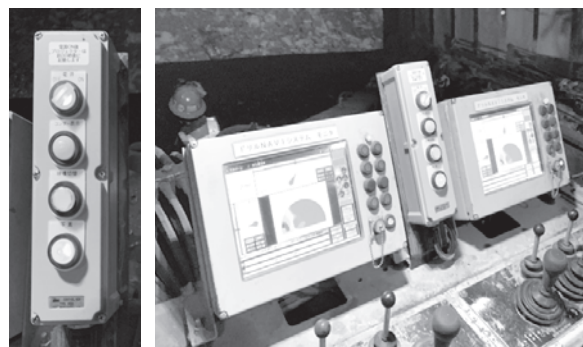


写真-5 プロジェクター起動スイッチおよび画像の切り替えボタン

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、ジャンボの操作台に配置したスイッチボックス（写真-5）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の仕様となっている。投影までは 2 回の操作のみであり、写真-5（左）に示す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。

## 6. まとめ

切羽プロジェクションマッピングの開発および運用により、山岳トンネル工事における施工の安全や効率性を向上させた事例について述べた。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・展開にも注力していきたい。