

トンネル地質 DX の開発

村岡 亜美*1・小山 俊滉*2・中原 法久*3・須志田 藤雄*4

概 要

山岳トンネルでは、事前調査のみにより地質状況を正確に把握することが難しいため、施工中に切羽状況を観察して支保パターンを決定する必要がある。しかし、熟練技術者の減少や肌落ち災害防止のためのガイドライン改正により、近接しての切羽観察が困難になっている。これに対応するため、安全性向上や切羽観察作業の補助、情報の可視化を可能とする「トンネル地質 DX」のシステムを開発した。本稿では、トンネル地質 DX の機能と開発概要について報告する。

キーワード：山岳トンネル、切羽観察、亀裂、DX、安全性向上、可視化

DEVELOPMENT OF TUNNEL GEOLOGICAL DX SYSTEM

Ami MURAOKA *¹, Toshihiro KOYAMA *², Norihisa NAKAHARA *³, Fujio SUSHIDA *⁴

Abstract

In mountain tunnels, it is difficult to accurately grasp geological conditions through preliminary surveys alone, so it is necessary to observe the tunnel face during construction to determine the support pattern. However, due to the decrease in number of experienced engineers and the revision of guidelines to prevent fall of rocks, close observation of the face has become difficult. To address these issues, the "Tunnel Geological DX System" was developed which enables enhanced safety, assists face observation work, and allows visualization of information. This paper reports on the functions and development overview of the Tunnel Geological DX System.

Keywords: Mountain tunnel, Face observation, Cracks, DX, Safety enhancement, Visualization

*1 Tunnel Geology Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*2 Uchiura Tunnel Office, Sapporo Branch

*3 Manager, Tunnel Geology Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*4 General Manager, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

トンネル地質 DX の開発

村岡 亜美*1・小山 俊滉*2・中原 法久*3・須志田 藤雄*4

1. はじめに

山岳トンネルでは、事前調査だけでは地質状況を正確にとらえられないため、施工時の切羽状況の観察結果や変位計測などによって、適切な支保パターンを決定する必要がある。また、厚生労働省が策定している「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」¹⁾の改正により、切羽（天端）からの45度の範囲内が原則立入禁止となったことで、切羽観察は遠方からの肉眼観察となり、技術者によって評価に個人差が生じやすく、熟練技術者であっても亀裂の判断等が難しい状況である。そのうえ、少子高齢化による熟練技術者の減少も著しく、若手技術者への技術の伝承が喫緊の課題となっている。

そこで、地質状況や切羽亀裂の的確な把握のための切羽観察作業の補助、および地質情報の可視化（見える化）を目的として、「トンネル地質 DX」のシステム開発を行った。本稿では、本システムの機能と開発概要について報告する。

2. トンネル地質 DX 概要

トンネル地質 DX は、AI を用いて切羽観察を補助する「トンネル切羽評価 AI システム」^{2),3)}と、切羽の亀裂を解析し危険箇所を抽出する「3次元トンネル切羽亀裂解析システム」^{4),5)}の2つのシステムで構成されている。

2.1 トンネル切羽評価 AI システム概要

トンネル切羽評価 AI システムは、切羽を撮影した写真と赤外線サーモグラフィ画像から切羽観察の評価項目を左肩・天端・右肩に分けて判定するシステムであり、出力された評価点に基づい

た適切な支保パターンを表示することが可能である。

2.2 3次元トンネル切羽亀裂解析システム概要

3次元トンネル切羽亀裂解析システムは、切羽周辺を撮影した動画から切羽面の点群を取得し、切羽全体の亀裂面を解析することで、卓越亀裂を示すピーク図や肌落ちしやすい箇所を示す危険箇所図を出力するシステムである。

3. 開発概要

3.1 トンネル切羽評価 AI システム

(1) システムの構成

本システムは、当初から開発を進めてきた IOS アプリの「切羽 AI アプリ」と、今回開発を行った PC クラウドアプリの「トンネル切羽観察システム」より構成されている。以下にこれらの開発の概要を述べる。

(2) IOS アプリによる切羽写真撮影条件の設定

切羽写真を用いて AI 判定を行う際に、切羽面の明暗のムラによって判定結果に差異が生じてしまうことがあった²⁾。そこで、切羽写真を撮影する際の条件を以下のように設定した。

カメラ: iPhone12 ProMax (1200 万画素・1.7 μ m ピッチの大型画素, LiDAR での高速フォーカシング, 高精度センサーシフト手ぶれ補正, 露出補正) 以上の低照度撮影性能を有する iPhone 機種

照明器具: バッテリータイプ切羽撮影専用 100WLED ライト (JCT・50×2, 50W×2 LED モジュール)

照明位置: 切羽正面 (切羽観察者が装備)

*1 土木本部 トンネル技術部 トンネル地質グループ

*2 札幌支店 内浦トンネル作業所

*3 土木本部 トンネル技術部 トンネル地質グループリーダー

*4 土木本部 トンネル技術部長

切羽写真撮影時の照明器具の使用状況を図-1に示す。上記の撮影条件は現在稼働中の山岳トンネル現場にて適用しており、これにより試行したいずれの現場でも本システムが使用可能な状態を整備することができた。

(3) 赤外線サーモグラフィ画像の活用

切羽観察の際には湧水の把握が重要であるが、少量の湧水や局所的な多量湧水の箇所は肉眼では捉えにくく、特に切羽写真のみでの湧水のAI判定はかなり困難であった。

そこで、湧水と周辺切羽では温度が異なることに着目し、赤外線サーモグラフィ画像の温度コントラストから、湧水の有無や湧水箇所、概略の湧水量の判定を行った。湧水判定の検証を行った切羽写真と赤外線サーモグラフィ画像、および本システムでの判定結果の一例を図-2に示す。この切羽では、右中央部から100L/分程度の湧水が確認されており、切羽写真ではその様子がとらえにくい。一方、赤外線サーモグラフィ画像では湧水による温度コントラストを明確に捉えており、本システムでの前述の判定結果でも右肩にて湧水が多いことを示す結果であった。これにより、肉眼観察では捉えにくい湧水に関する判定を、本システムを用いることでより的確に行うことができることを確認した。

(4) PC クラウドアプリの開発

これまでは、IOS アプリの「切羽 AI アプリ」を用いて、スマートフォンからのみのデータ入力や閲覧等の運用を行っていた。そのため、各判定結果の確認・修正や、切羽観察記録としての結果出力の際に手間がかかってしまうことがあった。

そこで、PC からアクセスできる WEB アプリケーションである「トンネル切羽観察システム」を開発し、PC からでもデータの入力や修正、結果出力を容易にできるようにした。

(5) 道路トンネル様式の適用

本システムは、当初鉄道トンネル向けに開発を始めたため、切羽観察項目や支保パターンの決定方法が異なる道路トンネルでは適用することができなかった。



図-1 照明器具使用状況

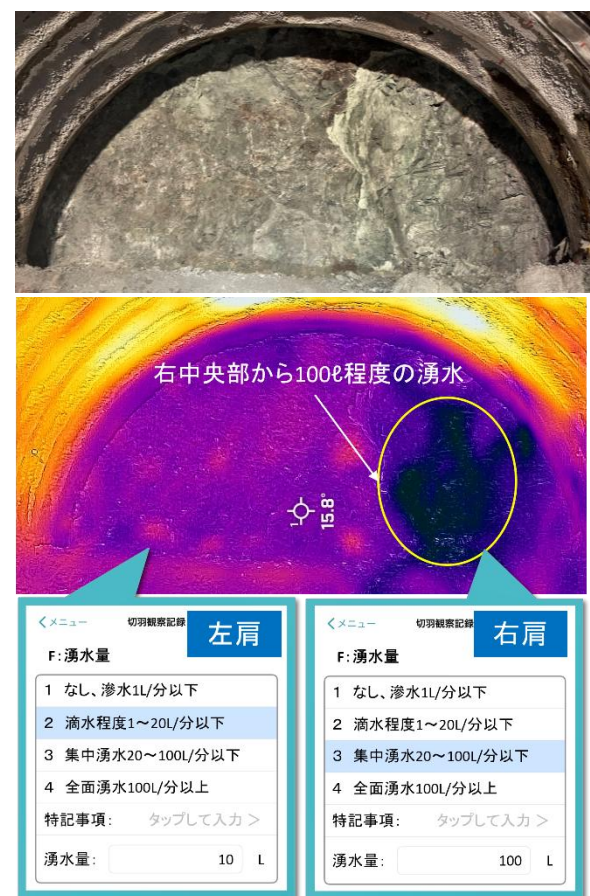


図-2 湧水判定結果の一例

そこで、道路トンネルの切羽観察項目を判定可能とするとともに、道路トンネルにおける支保パターン決定時に用いられる切羽評価点法に基づく支保パターン目安の判定結果も表示できるように、システムの改良を行った。道路トンネルでの支保パターン表示画面の一例を図-3に示す。この画面では一般的な支保パターンだけでなく、実際の施工で適用したローカルパターンについても、採用支保パターンとして別途入力できるよう

にした。

これにより、鉄道トンネル・道路トンネルを問わず、本システムを適用することが可能となった。

3.2 3次元トンネル切羽亀裂解析システム

(1) 解析フロー

3次元トンネル切羽亀裂解析システムの解析フローを図-4に示す。本システムでは、まずスマートフォン等を用いて、切羽周辺に設置された基準マーカを含めて切羽の動画を撮影する。次に、取得した動画からデジタルツインソフトウェア

を用いて切羽面の3次元点群データを取得する。得られた点群データを基に切羽全体の亀裂面を解析することで、卓越亀裂を亀裂面の向きの傾向ごとに色分けして表示したピーク図を作成する。さらに、亀裂同士の交差角度を基に肌落ち等が発生しやすい箇所を表示した危険箇所図を出力することが可能である。

(2) 卓越亀裂の判定

本システムでは、切羽で取得した点群データを解析し、その切羽で卓越している亀裂面の向き

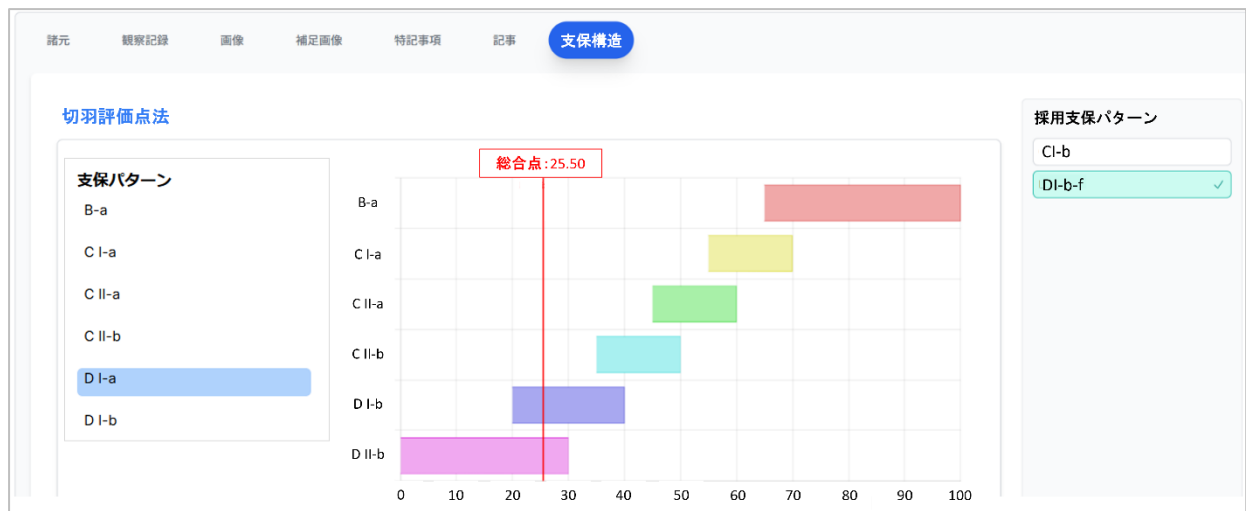


図-3 道路トンネル支保パターン表示画面の一例

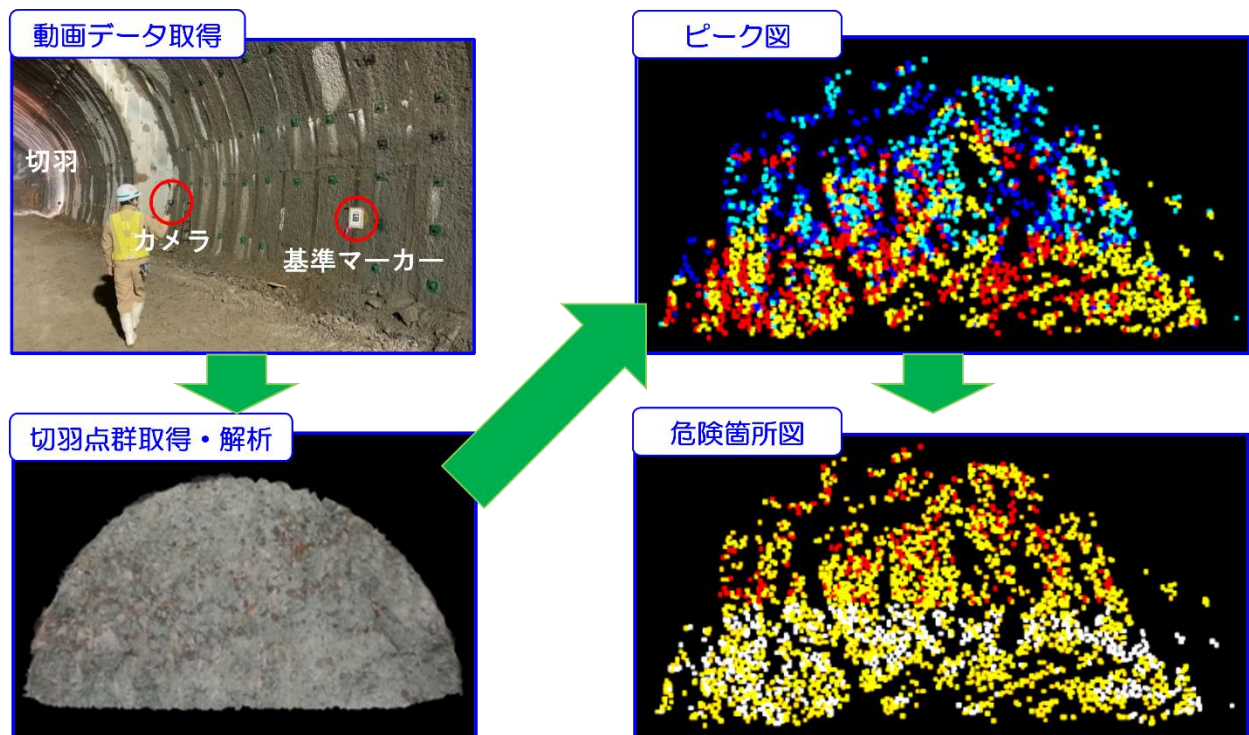


図-4 3次元トンネル切羽亀裂解析システム解析フロー図

(走向・傾斜)を解析することができる。

本システムの解析結果を確認するために、卓越亀裂の最頻値の上位4番目までの走向・傾斜と地質技術者が取得した走向・傾斜の頻度分布図を比較した。その比較結果の一例を図-5に示す。これにより、本システムで解析した結果が、地質技術者の結果と同様の傾向を示すことが分かった。

また、本システムで解析した卓越亀裂の分布位置を示す点群と、地質技術者が切羽を確認して判定した卓越亀裂の分布範囲を比較すると、ほぼ同じ位置であることを確認した。

(3) 危険箇所の判定

本システムでは、隣り合う卓越亀裂の交差角と走向・傾斜によって、肌落ちしやすい箇所を5段階で色分けして表示する機能を有する。

その危険箇所の判定結果と実際の切羽状況を比較した結果の一例を図-6に示す。本システムで判定した危険箇所判定結果を見ると、肌落ちが発生する危険性が高いことを示す危険度5の赤色の点群が密集している箇所が確認され、この箇所は、地質技術者が目視で危険と判定した箇所と一致していた。また、そのうちの一部で、実際に肌落ちが確認された。

この結果より、本システムにて肌落ちが発生する可能性の高い箇所を自動判定できる可能性が示唆された。

4. トンネル地質 DX 運用イメージ

トンネル地質 DX の運用イメージ図を図-7に示す。本システムは、切羽を撮影することで、経験に依存せず個人差の少ない解析・評価を行うことができ、解析結果から得られる定性的な情報より切羽観察日報を作成することが可能である。

また、トンネル地質 DX を構成する2つのシステムは、それぞれ取得したデータがクラウドを通してリアルタイムで現場や事務所、本社等の各関係者に共有される。そのため、トンネル坑内の通信設備を整えることで、事務所にて別の職員が坑内からのデータを用いて判定や解析をすぐに行うことが可能となる。そのうえ、解析結果等もク

ラウド上で共有されることで、遠隔地にいる関係者とのスムーズな情報共有や、そのデータを用いた現場支援、若手技術者の指導等を行うことが可能である。

5. まとめ

本稿では、安全性向上、切羽観察作業の補助、および情報の可視化を目的として開発した「トンネル地質 DX」の機能と開発概要について報告した。

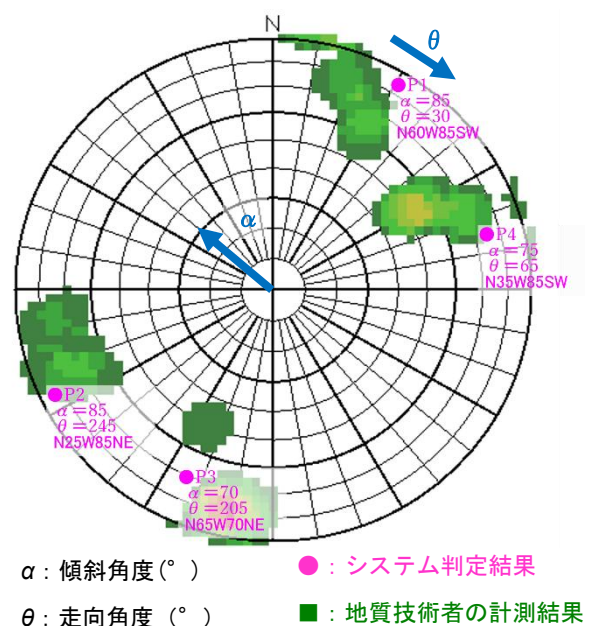


図-5 卓越亀裂面方向判定結果の一例

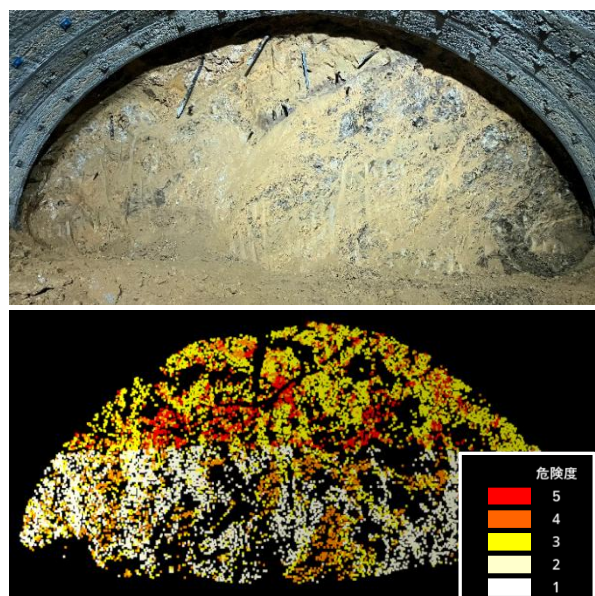


図-6 危険箇所判定結果の一例

今後はトンネル全線での適用により、各判定結果の妥当性について検証を行い、将来的には本システムをトンネルの前方地質予測にも活用できるように開発を進めていく。

参考文献

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン，基発0326第1号，2024.3
- 2) 村岡亜美，小山俊滉，中原法久，舟橋孝仁，須志田藤雄，岸田展明，石田滋樹：支保パターン判定AIシステムの開発と切羽撮影に適した照明の検討，土木学会第78回年次学術講演会，VI-272，土木学会，2023.9
- 3) 野田 奈央人，村岡 亜美，小山 俊滉，中原 法久，舟橋 孝仁，須志田 藤雄，岸田 展明，石田 滋樹：切羽観察AIアプリの開発とその評価の検証，土木学会第79回年次学術講演会，VI-1004，土木学会，2024.9
- 4) 中原法久，村岡亜美，舟橋孝仁，須志田藤雄，堤直之，竹市八重子，長尾達児，井口重信：山岳トンネルにおける3次元トンネル切羽亀裂解析システムの開発と検証，土木学会第78回年次学術講演会，VI-271，土木学会，2023.9
- 5) 中原 法久，野田 奈央人，村岡 亜美，舟橋 孝仁，須志田 藤雄，井口 重信，松本 裕樹：山岳トンネル切羽における3次元亀裂解析システムの改良と働き方改革，土木学会第79回年次学術講演会，VI-998，土木学会，2024.9



図-7 トンネル地質 DX システム運用イメージ図