

山岳トンネルにおける生産性向上に向けた新しい技術の適用

鹿島建設(株)	正会員	○廣惠なつ美
西日本高速道路(株)	正会員	前田 佳克
西日本高速道路(株)	正会員	畔津 伸彦
鹿島建設(株)	正会員	福田 博之

1. はじめに

本工事は、新名神高速道路の城陽～大津間（図-1）において、上下線とも3車線からなる大断面トンネルであり、西側半分を施工する（延長約2kmの内、上り線：822m、下り線：992m）。掘削対象地山は中生代の付加体地質で、近傍トンネルの施工実績から、亀裂の発達した頁岩部での地山崩壊や突発湧水、目まぐるしい地山変化を伴う不安定な地山であることが計画段階から予想されていた。



図-1 新名神高速道路位置図（城陽～大津）

山岳トンネル工事において、不安定な地山では、余掘り・アタリや変状・崩落などの不具合が発生する可能性が高く、縫返しや復旧作業が必要になることで、工費や工期に大きく影響を与え、生産性の低下を招く恐れがある。そのため、いかに設計通りの断面で掘削するか、安定した掘削を継続できるかが生産性向上を図る上で非常に重要となる。また、これらを実現するためには、地山状況を正確に把握し最適な支保構造・補助工法を選定する必要がある。しかし、不均質な地山が施工対象となる場合が多いため、作業の大半は熟練作業員の技量と判断に依存する部分が多く、定量的な判断を施工に取り込むことが難しい。

そこで本工事では、最新のセンシング技術を用いてコンピュータジャンボによる前方地山予測と3Dスキャナによる掘削形状の評価を実施した。これらの技術を組み合わせ、施工サイクルの中で実施することで、安定した掘削の実現と生産性の向上を目指した。

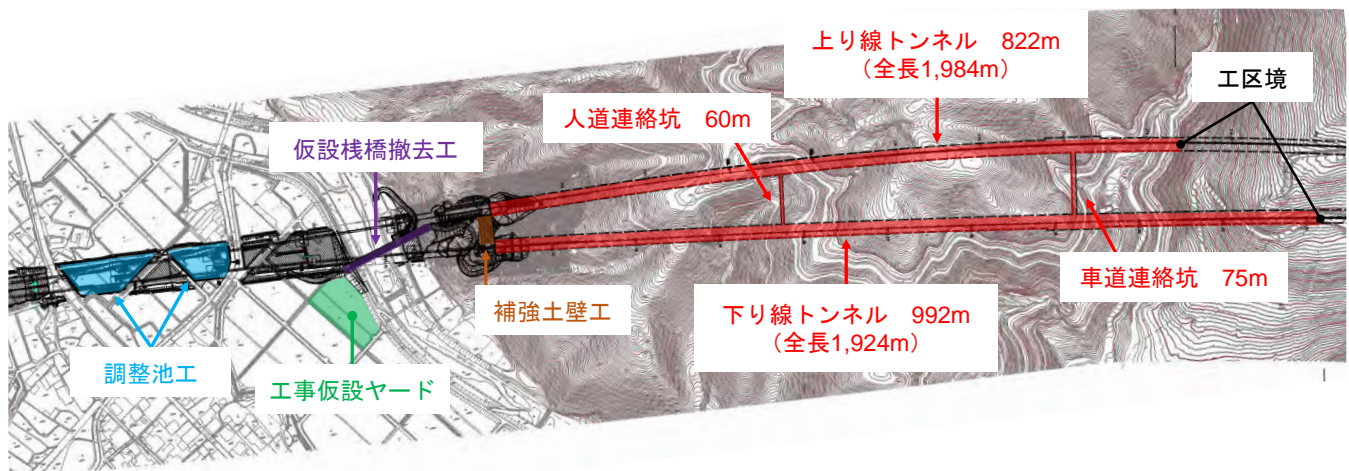


図-2 施工概要図

キーワード 山岳トンネル, 見える化, コンピュータジャンボ, 3Dスキャナ搭載吹付け機

連絡先 〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見 2-2-22 鹿島建設(株)関西支店土木部 TEL 06-6946-3311

2. 工事概要

(1) 全体工事概要

工事名：新名神高速道路宇治田原トンネル西工事

発注者：西日本高速道路株式会社関西支社

受注者：鹿島建設株式会社

工事場所：京都府綴喜郡宇治田原町岩山～郷之口

工期：2019.5.30～2023.11.4

主要工事数量（図-2）：

- ・トンネル掘削工 上り線 L=822 m (139m²～182m²)
- 下り線 L=992 m (139m²～175m²)
- 避難連絡坑（人道） L=60 m (19 m²)
- （車道） L=75 m (27 m²)
- ・坑門工 2基（竹割式），L=17 m
- ・トンネル掘削工量 27,000 m³

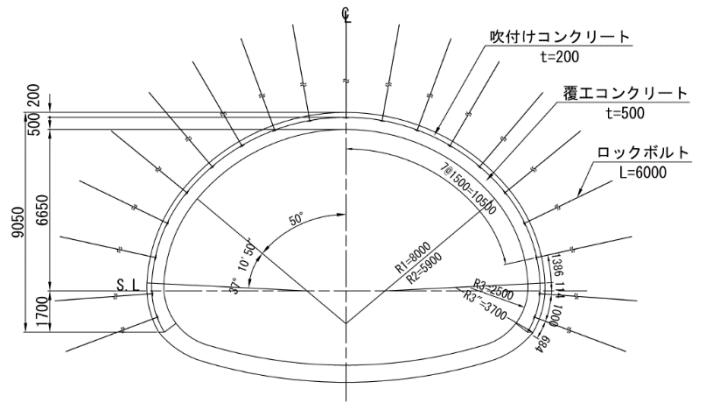


図-3 標準支保パターン(D I)

(2) 地盤条件

a) 設計時の地山条件

宇治田原町周辺には、丹波帯と呼ばれる地質が分布している。丹波帯は、西南日本内帯の中部～近畿地方に広く分布し、プレート運動により大陸縁辺部で海洋性岩類（チャート・緑色岩・石灰岩）の沈み込みと陸源砕屑岩類（頁岩・砂岩）が混在した岩相（メランジュ）が形成された地層である。地質平面・縦断図を図-4に示す。当該地は丹波帯のうちII型地層群に相当し、中生代ジュラ紀のチャート、頁岩、砂岩、砂岩頁岩互層で構成される。事前の地質調査結果から4本の断層部の出現が懸念され、共役断層の存在も確認されていた。さらに河川直下をトンネルが通過するため、低土被り部の地山安定や湧水が施工上の懸念となっていた。

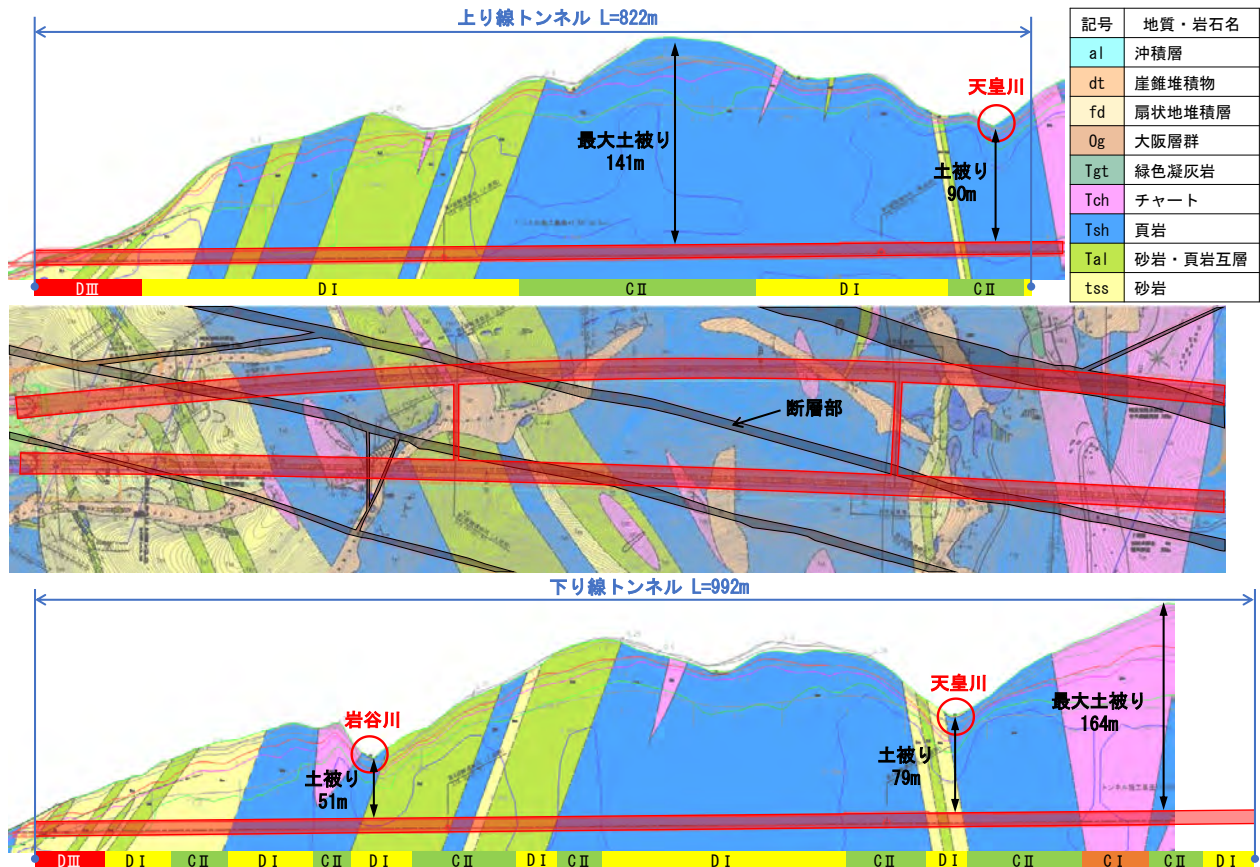


図-4 地質平面・縦断図

b) 施工条件

現在施工中の下り線の施工実績と坑壁面の地質展開図を図-5に示す。地山状態は想定以上に断層による影響が大きく、トンネル進行数メートルごとに岩質が異なる。地質展開図では、さまざまな岩が複雑に混在していることが確認できる。一定岩質が連続することが少ないため、前方地山の予測が非常に困難であり、掘削方法は大部分が当初設計の発破掘削から大型ブレイカによる機械掘削および部分発破・補助工法を併用した施工となっている。

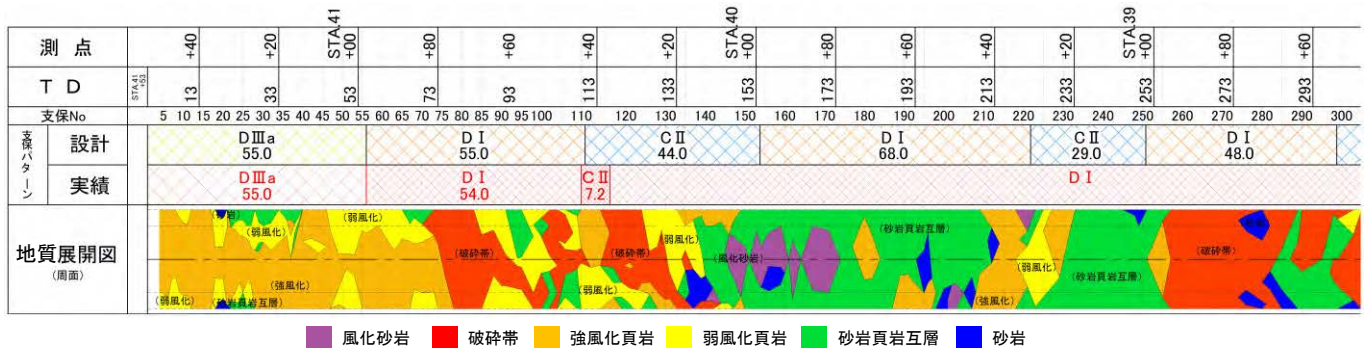


図-5 施工実績と地質展開図

3. 新技術の適用

(1) コンピュータジャンボによる前方地山予測

a) コンピュータジャンボの適用

地山状態に合った最適な支保パターン・補助工法を採用するためには、前方地山を正確に把握する必要がある。本工事では Epiroc 社製のコンピュータジャンボ (XE4C) を導入し、削孔検層による未掘削区間のより正確な地山状態の把握を目指した。

コンピュータジャンボは、削孔位置や削孔深度を設定でき、計画位置での正確な削孔を可能にする (写真-1)。また、削孔速度や打撃圧等のあらゆるデータから、岩の硬軟を正確な位置で定量的に把握できる。さらに、装薬やロックボルト等、日常作業に伴う全ての削孔データを取得することにより、適切に地山評価できることが特徴である。



写真-1 コンピュータジャンボによる削孔状況

b) 切羽前方地山の見える化

トンネル周辺の地山状況は、破壊エネルギー係数を用いて評価される。破壊エネルギー係数は、単位体積当たりの岩盤を掘削するのに用いた機械の仕事量を表し、値が大きいほど硬い岩とされる。得られた削孔データを地球統計学のうち、クリギング法を用いて三次元的に空間補間し、破壊エネルギー係数の分布をコンター表示することによって、任意の断面の硬軟を見える化できる²⁾ (図-6)。取得したデータから任意点の値を推定するため、削孔データが多い程、地山硬軟の分布に関する精度は向上する。

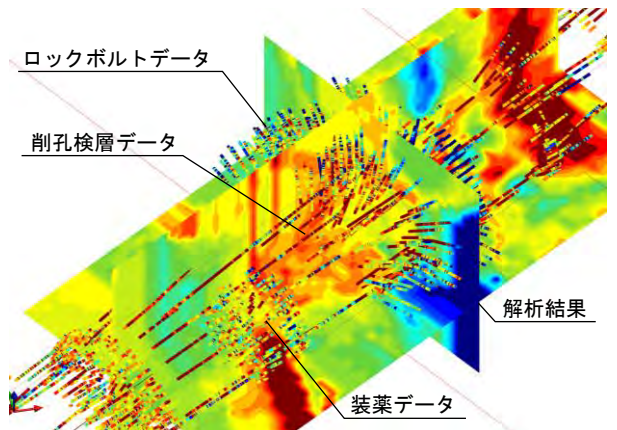


図-6 周辺地山予測結果

c) 削孔検層による地山予測の精度向上

通常、削孔検層では削孔長 20~30 m の孔をトンネル断面内に 1~2 ヲ所、または外周部に数箇所実施する。しかし、本工事は付加体地質で掘削ごとに全く異なる切羽状態となるうえ、断面内の岩の硬軟差が大きいため、通常の削孔検層では予測精度が低くなった。そこで削孔検層の孔数を増加し、削孔位置をパターン化することで地山予測の精度向上を図った。本工事では、掘削後に地山予想との比較検討を実施した結果、上半約 95 m² に対し 8 本の削孔数であれば、比較的正確に切羽での地山分布を掴めることが確認できた³⁾。採用削孔パターンを図-7に示す。

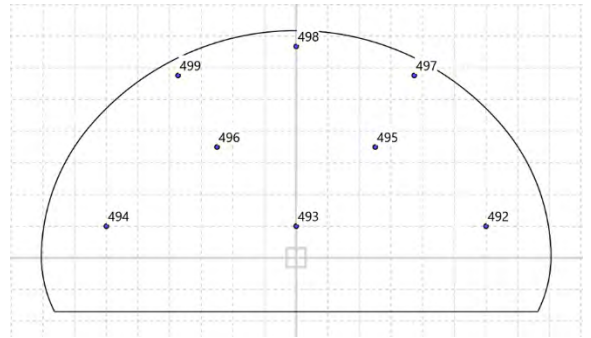


図-7 採用削孔パターン

(2) 3D スキャナによる施工状況の評価

a) 3D スキャナ搭載吹付け機の適用

本工事では掘削形状と鏡吹付け厚の定量的把握を目的として、Normet SmartScan を導入している。Normet SmartScan は、Normet 社製のコンクリート吹付け機に 3D レーザースキャン技術を組み合わせた機械である（写真-2）。掘削ごとに、掘削完了後と一次吹付け完了後の形状測定を実施し、掘削形状と吹付け量を把握している。本工事におけるスキャンの設定条件を表-1に示す。

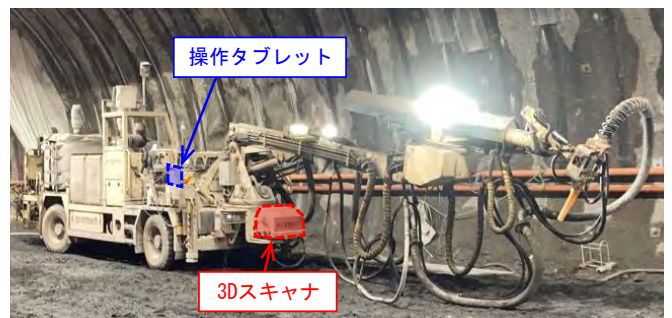
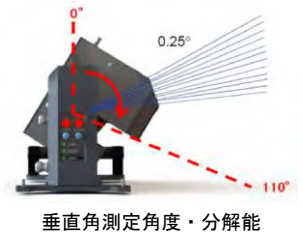


写真-2 Normet SmartScan

従来、トンネルの形状測定には三脚型や車載型のスキャナを使用した絶対座標による測定が行われてきたが、本機では鋼製支保工を既知点とした相対座標系により、従来型の課題であった自機位置の測量や機械の入替作業を不要とした。一次吹付け前後の機械のセッティング中に測定が可能であるため、現状、最も合理的なりアルタイム形状測定法と考えられる。また、吹付け機側面に搭載しているタブレットの操作も容易であり、作業員の操作による測定を可能にしている。

表-1 スキャン設定条件

スキャン角度	水平	0~180°
	垂直	0~110°
最大範囲		80m
水平角分解能		0.25°
垂直角分解能		0.25°
測定時間		約 1.5 分



b) 掘削形状の見える化

掘削後に測定した点群データを分析することで、余掘り・アタリの定量評価や装薬量の適正を評価できる。現地で測定したデータをフリーソフト CloudCompare で処理することにより、トンネル軸方向の掘削深度をコンター表示し、の余掘り量を把握している（図-8）。また、崩落発生時は、崩落状況を安全かつ即時に把握することができる。これにより、吹付け前の切羽直下に立入り崩落深度を測定する危険作業が無くなり、安全性向上に寄与している。また、崩落時の形状を発注者と早期に共有することで、対処方法や範囲を発注者と受注者が互いに納得し、過不足の無い補助工法の仕様を素早く判断できる。

さらに、点群データから鋼製支保工位置における最外周データを抽出し、周方向における余掘り量を算出し、帳票形式で掘削形状を評価している（図-9）。また、切羽写真と掘削形状を比較することで、崩落しやすい岩質を把握でき、周辺地山評価としても活用できる。この帳票を作業員と共有することで、余掘り・余吹き量の削減に繋がった。

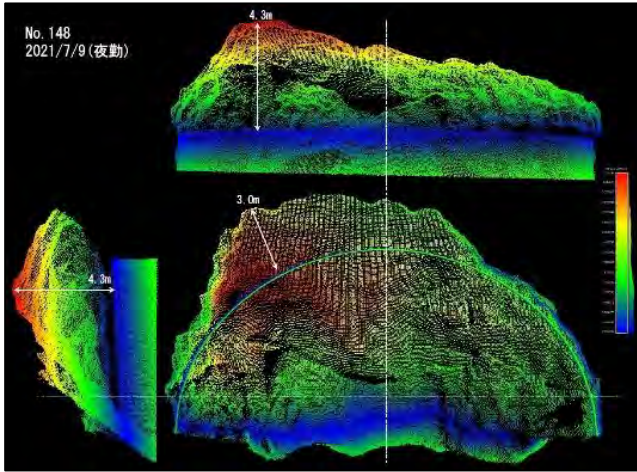


図-8 形状測定結果（軸方向）

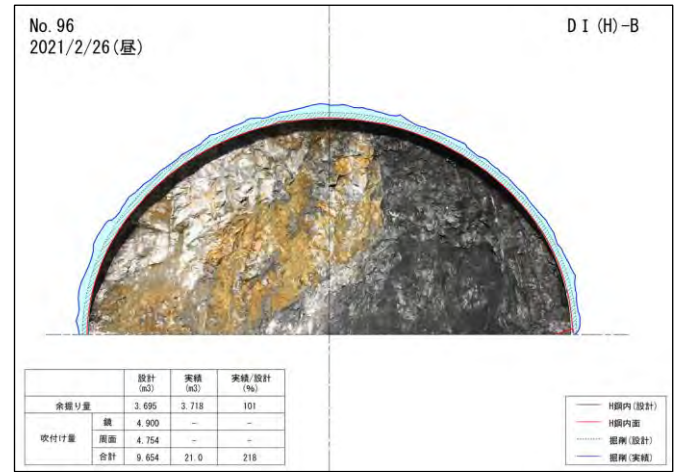


図-9 形状測定結果（周方向）

4. 適用結果

(1) 削孔検層による前方地山予測

a) 予測結果の出力

削孔検層の結果は、図-10に示す帳票にまとめ、発注者や作業員と共有している。削孔パターンの決定に加え、削孔水の情報を追記することで、出現する岩種を特定できるように工夫している。さらに、切羽写真と比較することで削孔検層の精度を確認し、支保パターンや補助工法の選定時に前方地山予測の補助資料として活用している。また、崩落の可能性が高い位置や発破の必要性について、資料を基に作業員と情報共有することで、特に安全性の観点で有効に活用できている。

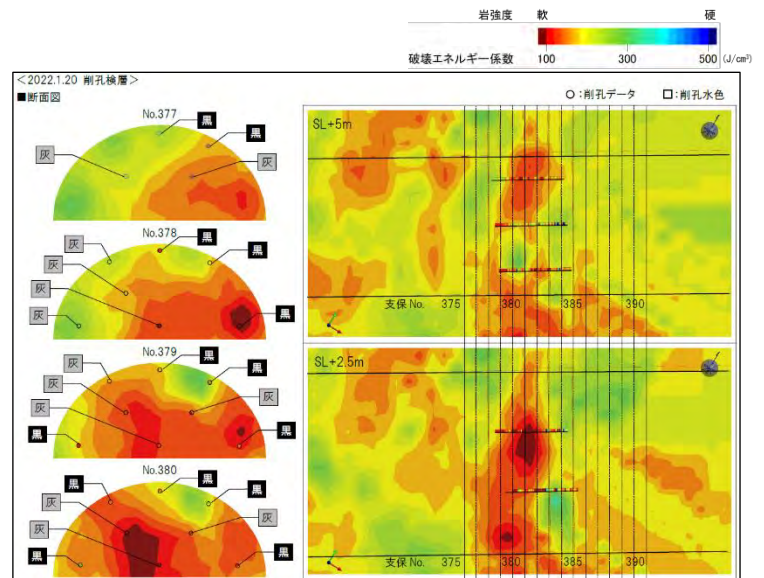


図-10 削孔検層結果

b) 予測結果の評価

予測断面における破壊エネルギー係数の平均値を切羽観察時と同様に天端、左肩部、右肩部に分割して（図-11）算出し、実際の切羽と比較する。岩種ごとの平均破壊エネルギー係数を図-12に示す。掘削時の見た目の岩強度と破壊エネルギー係数の大小関係は概ね一致していることが分かる。標準偏差は約50 J/cm³であり、風化砂岩頁岩互層と砂岩において値のばらつきが大きい。

図-13に風化度ごとの破壊エネルギー係数のヒストグラムを示す。ここでは、掘削時の様子から、

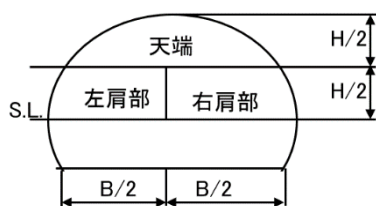


図-11 予測結果算出時の分割方法
(切羽観察記録簿より)

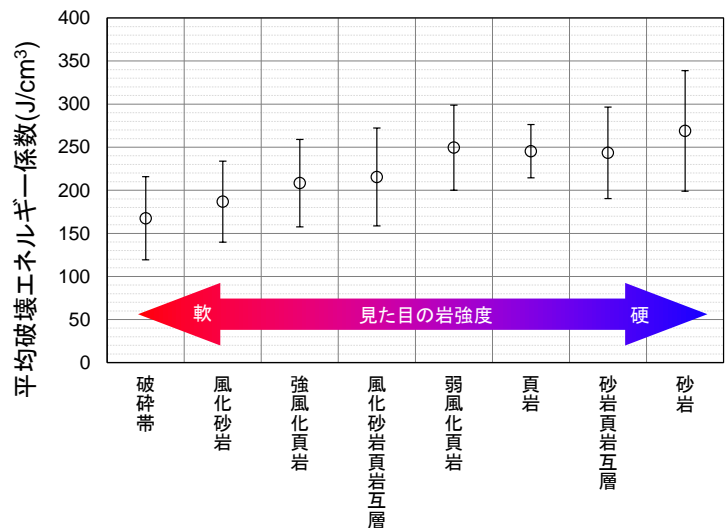


図-12 岩種ごとの平均破壊エネルギー係数

強風化、弱風化、新鮮と3種類に分類した。風化度ごとの破壊エネルギー係数は、強風化部は350 J/cm³以下、弱風化部は100～400 J/cm³、新鮮部は200 J/cm³以上である。値のばらつきが大きく、破壊エネルギー係数のみでは岩分類を特定することは難しい。本工事では、砂岩は化学的風化により茶褐色の粘土に変質し応力開放に伴って自由落下する傾向にある(写真-3)のに対し、頁岩は物理的風化が著しく、破碎質を示したり土砂を混在したりするものが多い(写真-4)。また、走向は高角度の流れ目であるため、鏡面が押し出され、特に頁岩部において亀裂に沿った剥落が発生しやすい。岩盤の粘性化の進行度や破碎度、割目状態による緩みの進行具合が岩種によって大きく異なるため、より詳細に岩種ごとの分析を実施することで削孔検層による前方地山の予測精度を向上できると考える。



写真-3 風化砂岩

破壊エネルギー係数と切羽評価点の相関を図-14に示す。ばらつきはあるものの、概ね相関は取れている。切羽評価点が25点以下、平均破壊エネルギー係数が150 J/cm³以下の際、肌落ちや小崩落が顕著に発生しており、補助工法無しで施工した履歴は無いことから、これらの値を補助工法要否判断時の参考値として使用できると考える。しかし、破壊エネルギー係数、切羽評価点が高い場合でも補助工法が必要な場合も多い。特に破壊エネルギー係数275 J/cm³以下、切羽評価点37点以下を示す場合は、地山状態を良く確認し、補助工法の要否を検討すべきである。



写真-4 破碎質頁岩

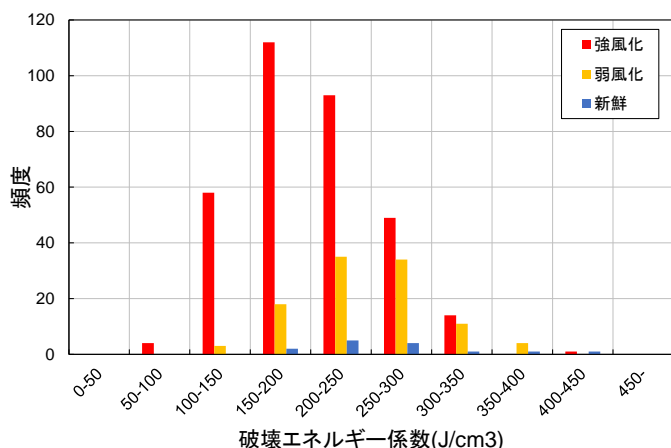


図-13 風化度ごとのヒストグラム

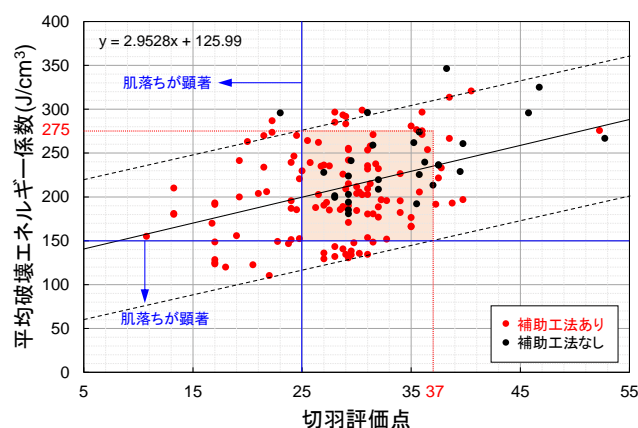


図-14 破壊エネルギー係数と切羽評価点

(2) 余掘り量・余吹き量の削減

余掘り量の計測結果と吹付け量の施工実績を図-15に示す。余掘り量については、設計余掘り量を1としたときの実掘削余掘り量を余掘り率として算出した。余掘り率の増減に伴い吹付け量も同様に増減しており、新技術の本格導入前の支保No.180までは全体にばらつきが大きく、破碎帯区間では崩落が拡大する傾向が確認できる。対して、施工実績と地山予測から補助工法を事前検討した支保No.220付近からは、余掘り率は100～210%で安定しており、吹付け量についても約23 m³ (設計吹付け量: 9.7 m³) で安定した施工ができています。

断面の主要構成岩に着目すると、破碎帯、風化砂岩における崩落割合が多く、崩落が発生しやすい岩質である。特にNo.100以降の破碎帯区間では、補助工法を施工しなければ更なる崩落を招いた可能性がある。支保No.100～140間の崩落対策を基に、支保No.255～305では事前に補助工法を提案し、施工した結果、ほとんどの崩落を抑制できた。また、新技術の本格導入前後を比較すると、余掘り率は15%、吹付け量は24%低減しており、新技術導入による支保構造の選定により、地山崩壊を抑制し、より設計に近い理想的な掘削に繋がれたと考える。

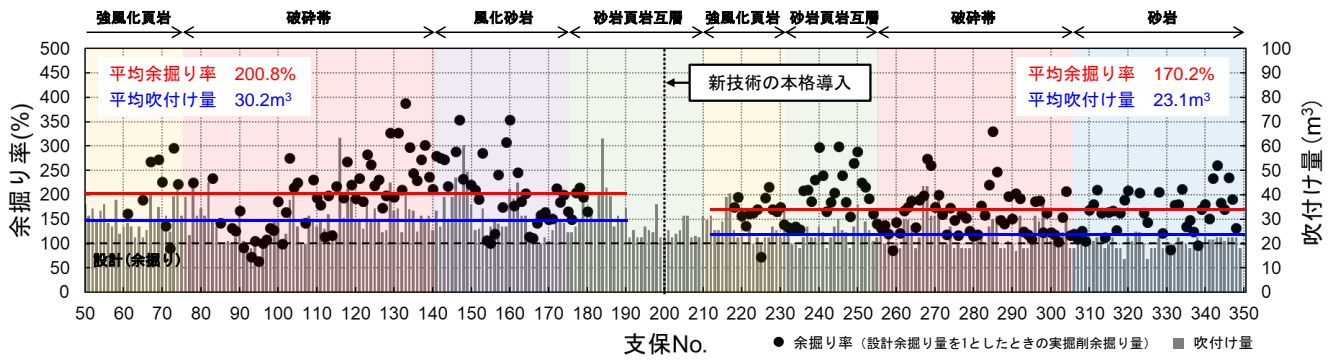


図-15 余掘り量の計測結果と吹付け量

(3) 新技術を用いた補助工法選定事例

前方地山予測と掘削形状測定は施工サイクルに組み込んで連続的に実施し、掘削工法や補助工法を決定するための判断材料として使用している。施工サイクルにおける新技術の適用フローを図-16に示す。まず、前方地山予測結果から施工履歴に基づき掘削工法や補助工法を決定する。決定した工法によって施工し、掘削形状を測定することで、出来形を確認し地山状態に適した施工法であったかを評価している。

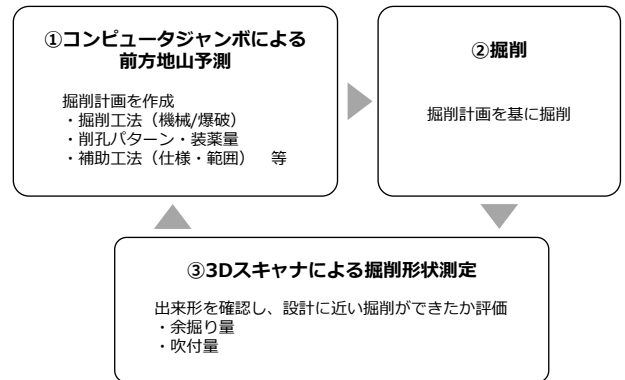


図-16 新技術の適用フロー

No.500で実施した削孔検層の結果を図-18に示す。左右の肩部から軟弱層が出現し、鏡面全体に拡大する様子が確認できる。削孔水が黒灰色を示すことから軟弱箇所は頁岩主体であることが想定された。頁岩の場合、岩強度が高い場合でも剥落が発生しやすく、特に破壊エネルギー係数が 150 J/cm^3 以下(赤～黄色)の際は、肌落ちや剥落を繰り返す不安定な地山である可能性が高い。そこで補助工法を事前に検討し、長尺鋼管先受け工と小口径鋼管鏡補強工を実施した(図-17)。

地山予測結果と実際の切羽写真、掘削形状の比較を表-2に示す。地山予測結果と切羽写真を比較すると、断面内の岩の硬軟傾向を概ね捉えていることが分かる。掘削形状は、

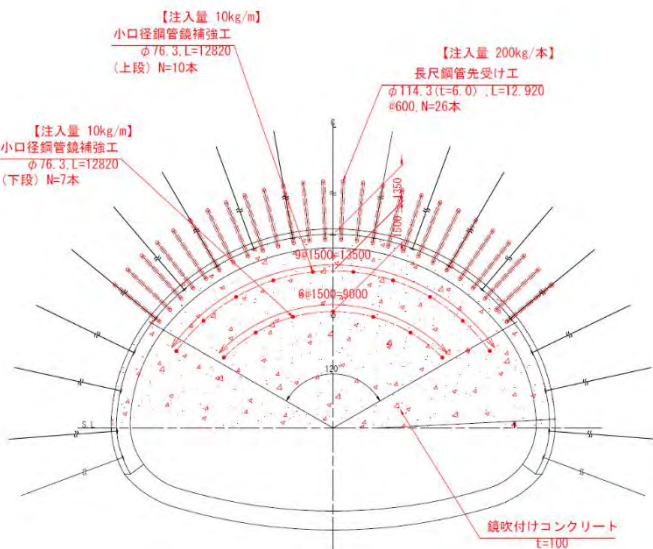


図-17 採用補助工法

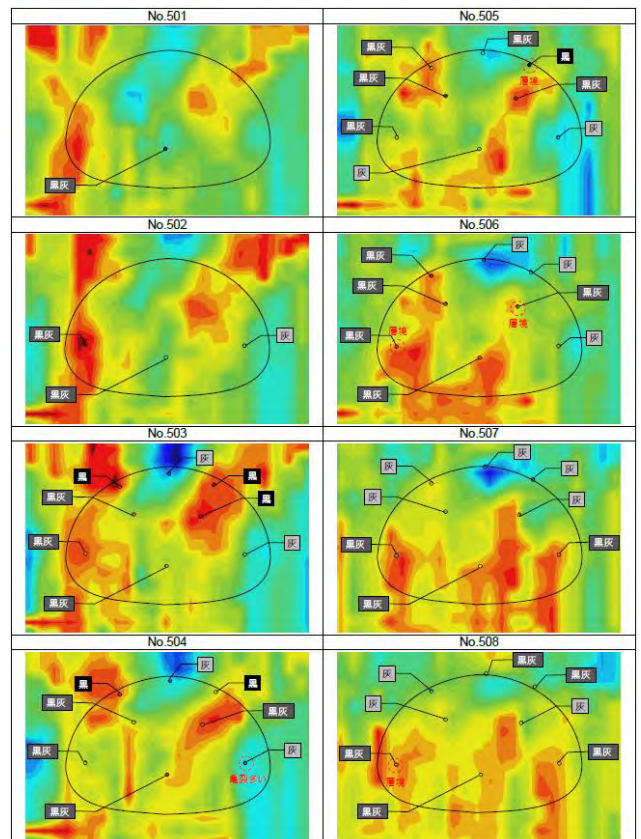
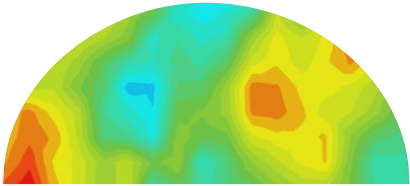
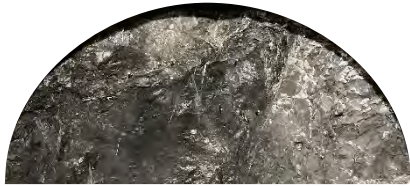
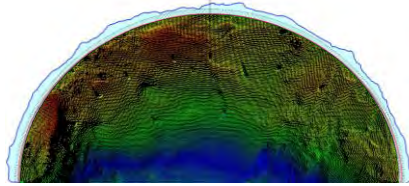
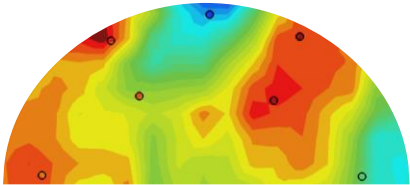

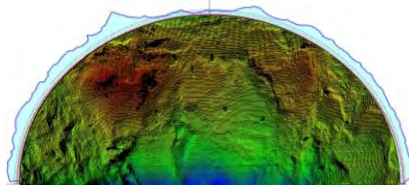
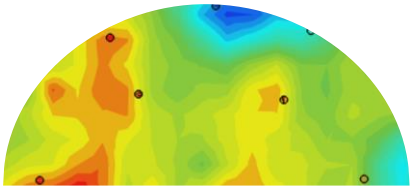

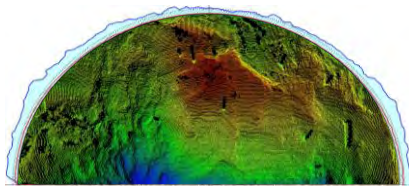


図-18 前方地山予測結果

掘進方向の深度をグラデーション表示させ、支保工位置における掘削外周形状を重ね合わせた。なお、深度は青色が1基前の支保工位置を示し、赤色ほど深い。余掘り率はいずれも210%以下であり、補助工法の施工により既施工区間と比較して安定した掘削を実現できた。また、破壊エネルギー係数が低い箇所では、補助工法を施工しても掘削されやすい場合があることが確認できた。

このように、新技術を施工サイクルに組み込むことにより、客観的に地山状態を把握し、掘削方法や補助工法を発注者・作業員とともに事前に検討し、定量的な情報を施工にフィードバックできるようになった。補助工法に関しては事前検討を進めることが可能になったが、掘削方法はサイクルごとに切羽状態を観察し、現地で決定するケースが多く、事前検討するまで至っていない。地山予測結果から機械的に掘削方法や補助工法を決定できるよう、今後施工履歴の蓄積と分析を重ねる必要がある。

表-2 結果比較

No.	地山予測結果	切羽写真	掘削形状
501	 <p>平均破壊エネルギー係数:263.3 J/cm³</p>		 <p>余掘り率:151%</p>
503	 <p>平均破壊エネルギー係数:214.1 J/cm³</p>		 <p>余掘り率:170%</p>
506	 <p>平均破壊エネルギー係数:243.0 J/cm³</p>		 <p>余掘り率:143%</p>

5. おわりに

本稿では、最適な支保パターン・補助工法の選定を目指した新技術の導入状況について紹介した。コンピュータジャンボによる地山予測の精度向上を図り、掘削出来形を連続的に測定することで崩落性地山を特定し、補助工法の効果を確認することができた。

昨今、経験者不足や労働人口減少に伴い土木工事における自動化・機械化を進める動きが活発化しており、山岳トンネル工事もその例外ではない。本工事で導入した技術は山岳トンネル工事における自動化施工に向けた要素技術でもあり、本稿が今後の開発の一助となることを期待する。

6. 参考文献

- 1) 京都島南部地域の地質：地質調査総合センター
- 2) 白鷺卓，宮嶋保幸，山本拓治，西川幸一，福田博之：トンネルの施工穿孔データを利用したオンタイム切羽評価と前方予測，トンネル工学報告集，Vol. 27，I-19，2017.
- 3) 前田佳克，畔津伸彦，福田博之，廣恵なつ美：日常的先山予測と形状測定を組み合わせた山岳トンネルの合理的施工方法，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，VI-811，2022.