地山予報を施工サイクルに取り入れた新しい山岳トンネル施工法

鹿島建設(株)　正会員　○杉本　康平
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　鹿島建設(株)　正会員　羽田　滋
鹿島建設(株)　奥津　圭佑　鹿島建設(株)　正会員　廣惠なつ美

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 2 km の内，上り線：822 m，下り線：992 m）．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，工費や工期が増大するため，生産性の低下を招く恐れがある．如何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．本工事では，コンピュータジャンボによる削孔検層を施工サイクルの中で全線にわたって実施し，定量的な前方地山情報「地山予報」を発注者・施工者間で事前に共有することで，支保構造・掘削方法・補助工法等の検討に活用してきた[1]．削孔検層の改善により可能になった本現場の地山特性を踏まえた前方地山の評価（新・地山予報）に基づく合理的な施工方法と掘削実績について報告する．

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：2019.5.30～2025.7. 1
主要工事数量：

・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　270,000 m³

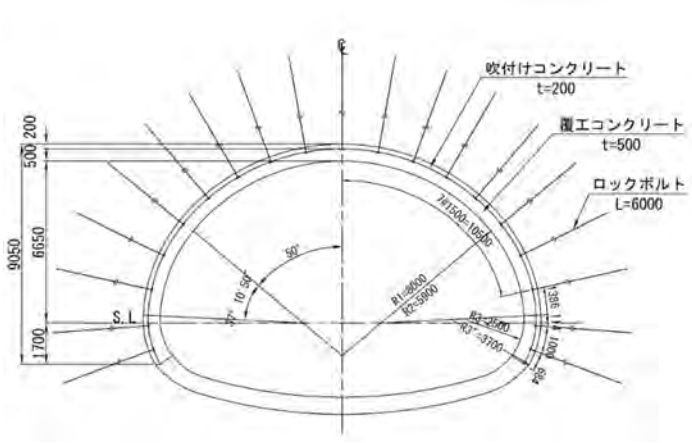


図-2　標準支保パターン(ＤⅠ)

キーワード　山岳トンネル，削孔検層，コンピュータジャンボ，３D スキャナ，液体急結材，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) 地盤条件

a) 設計時の地山条件

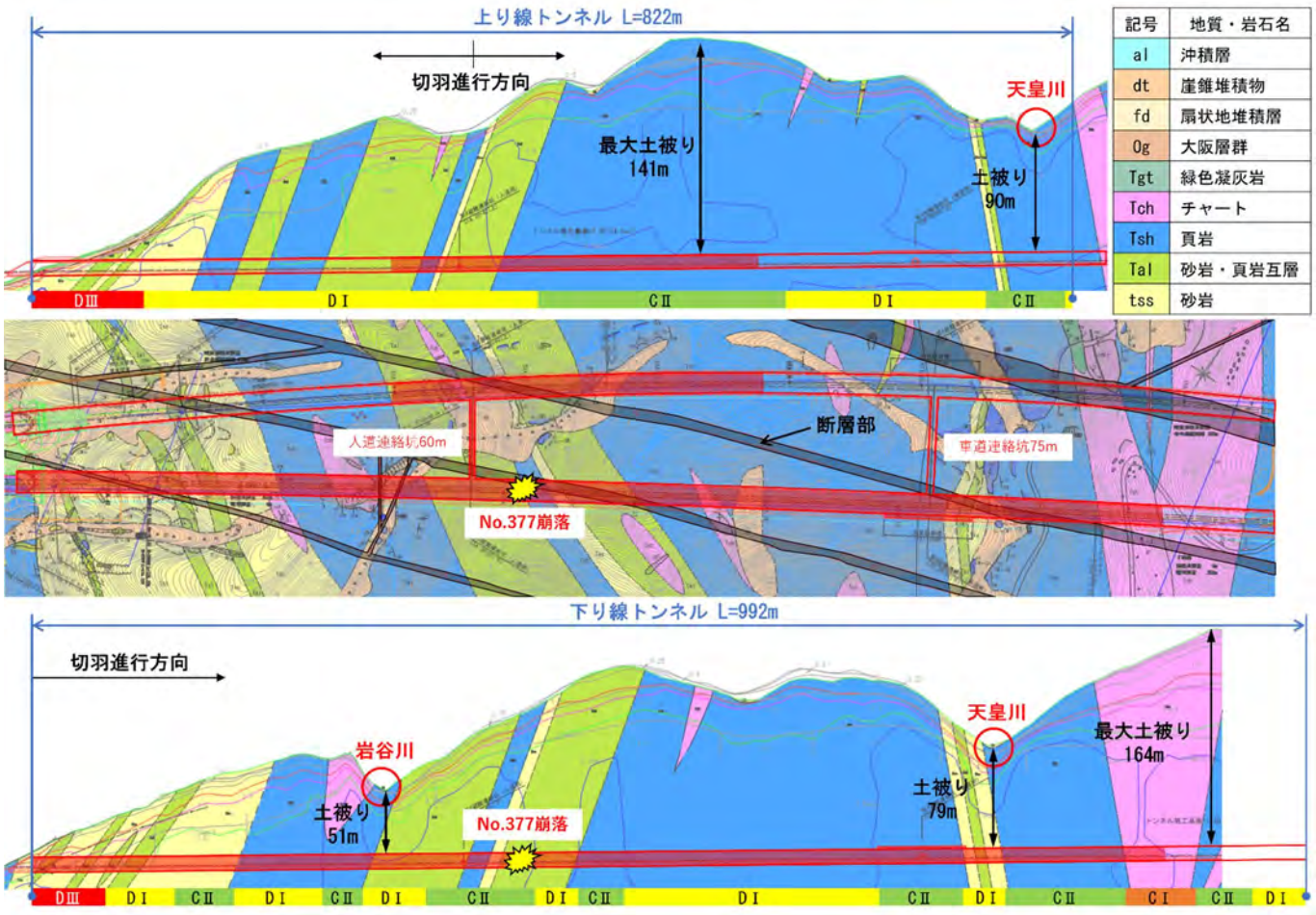


図-3　地質縦断・平面図

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[2)]．地質平面・縦断図を**図－3** に示すが，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．

b) 施工条件

現在までの施工実績と地質展開図を**図-5** に示す．地山は想定以上に断層による影響を受け，岩質は数メートルごとに異なり，切羽断面内においてもさまざまな岩が複雑に混在していることが確認できる．STA.34+00 付近までは頁岩主体の岩質であったが，それ以降では地質平面上で宇治田原トンネル近辺に僅かにしか確認できない緑色岩が約 60m 出現した．その後，チャート主体の地山へと遷移して現在に至る．頁岩主体の地山では特に，亀裂の発達や地層の傾斜（流れ目 80°）の影響を受けやすく、天端の抜上がりや鏡面の押出しが発生しやすい．そのため，掘削方法は大部分が当初設計の発破掘削から大型ブレーカによる機械掘削および部分発破となり，DIパターンにおいても 80%以上の区間で長尺鋼管先受工・小口径鋼管鏡補強工といった補助工法を併用した施工となっている．支保パターンにおいては，既掘削延長の設計は CI・CIIパター

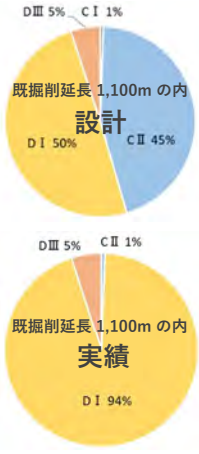


図-4　支保パターン構成

ンが全体の 46%を占めるが，実績としてはCⅡパターンが僅か 1%で 94%を DIパターンで施工している．残延長の多い上り線は頁岩主体であると想定されるため，この傾向は継続すると考えられる．（図-4 参照）

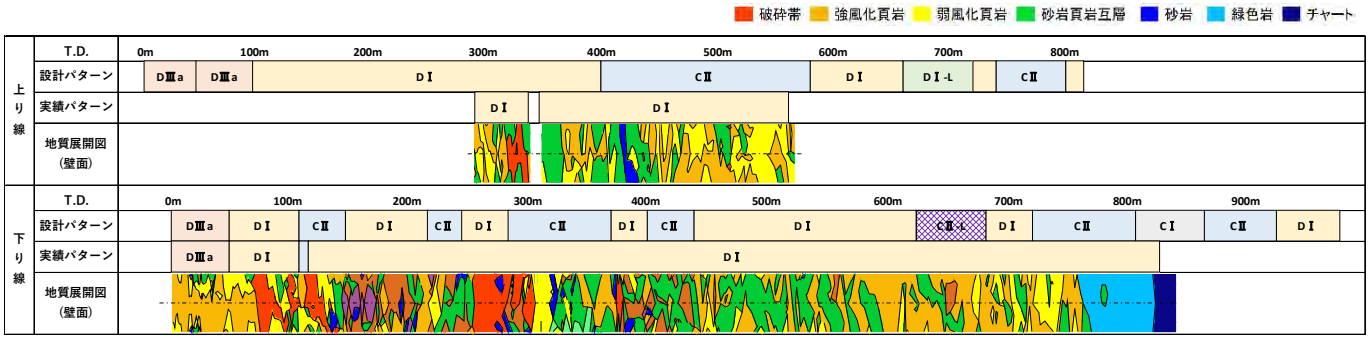


図-5　施工実積と地質展開図

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

削孔検層の機械として，下り線ではフルオートコンピュータジャンボ（Epiroc社製：XE4C）を活用し，上り線ではセミオートコンピュータジャンボ（Sandvik社製：DT1131）を導入した．後者は補助工法でも使用するため，長尺鋼管先受け工（AGF）や小口径鋼管鏡補強工（鏡ボルト）の削孔データを取得できる強みがある．検層は全線にわたって掘削サイクルに組込んで行っており，詳細は後述するが施工性と確実性を考慮して複数パターンを試行錯誤してきた．主なパターンの施工時間や必要解析時間（独自帳票の作成を含む）を表-1に示す．

表-1　検層パターン

穿孔長	孔数	施工時間	人工	解析時間
6m	8孔	0.5時間	OP×１	2時間
22m	8孔	3時間	OP×１+手元×1	3時間
14m	上段5孔	1.5時間	OP×１+手元×1	2.5時間

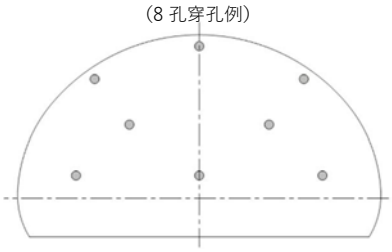


図-6　検層位置



写真-1　DT1131

(2) 3D スキャナによる施工状況の評価

本工事では掘削形状の定量的把握を目的として，Normet SmartScan を導入した．これは，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）．掘削サイクルごとに，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する．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，従来型の課題である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，一次吹付完了後，その場で吹付け厚さが確認でき．現状，最も合理的なリアルタイム形状測定法と考える．



写真-2　Normet SmartScan

(3) 全自動 BP と液体急結材吹付機の導入

吹付けコンクリートの製造から施工までを一定の品質で管理するため，全自動バッチャープラントと Normet 社製の液体急結材吹付機(Spraymec 8100VC)を導入した．バッチャーマン任せであった吹付けコンクリート練混ぜ時の生コン温度とスランプを自動管理することができ，ノズルマンの技量に委ねられていた吹付け吐出圧・吐出量，急結材添加率を，吹付機が一定に制御する施工により，計画通りの吹付け作業を行うことが可能となっている．

４．施工実績

(1) 新・地山予報の確立

a) 旧・地山予報

本工事では前方地山予測結果に削孔水の情報を追記した帳票を「地山予報」として発注者や作業員と共有し，補助工法協議資料や発破の要否の参考に活用してきた．断面を網羅する孔数と施工サイクルを考慮し，削孔検層のパターンは6m×8孔とした．本工事の経験として，破壊エネルギー係数が概ね150J/cm3以下のときに崩落や肌落ちが発生する可能性が高いことが確認されている．

b) 下り線支保No. 377掘削中の崩落

2022.1.20，支保No.377のずり出し中に湧水とともに破砕されたフレーク状の頁岩が鏡面より流出・崩落し始め，前方・上方へと崩落が拡大，最大で高さ・奥行ともに8m以上の空洞となった．支保No.371～376の削孔検層解析結果を図-7（左）に示すが，脆弱部が限定的で破壊エネルギー係数は良化傾向であったこと，また，No.304を最後に，70m程度の区間は補助工法なしで大きな崩落なく掘削を進めてきたことから，崩落個所近傍も通常掘削で施工していた．No.376の施工完了後に実施した検層結果を図-7（右）に示すが，崩落はこの検層の解析途中（切羽の掘削解放から30分後）で発生した．

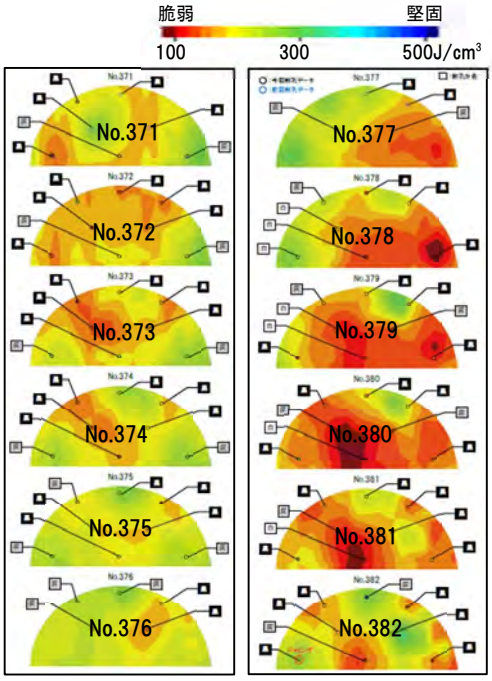


図-7　削孔検層解析結果

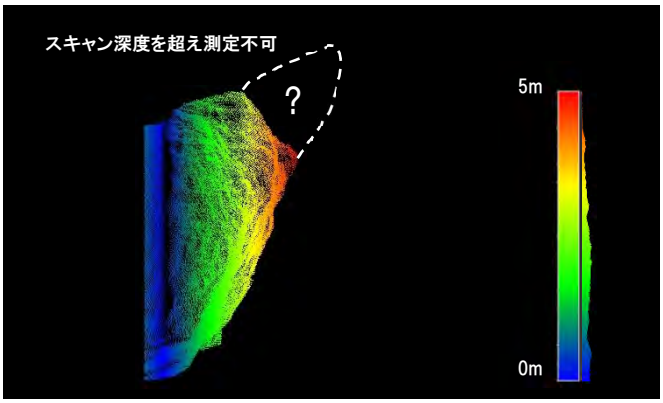




図-8　崩落状況

c) 崩落対策工

崩落対策工は以下に示す手順で行った。抑え盛土，鏡吹付けコンクリートで鏡面を抑え，φ76.3 鋼管水抜き工，空洞状況の把握のため探り削孔を行った．一次吹き時の 3D スキャン測定結果と探り削孔を組み合わせて空洞状況を推察して延長を決定し，長尺鋼管先受け工と小口径鋼管鏡補強を施工した（図-9 参照）．その後，注入圧管理による空洞充填（シリカレジン）を行い，掘削を再開した．No.377 切羽付近は地質平面上で断層直下であり（図-3 参照），破砕質の強風化頁岩がそれに該当すると考えられた．発注者と協議の上，断層帯区間は長尺鋼管先受け工（L=12.5m）を 6m ラップで施工することとなった．

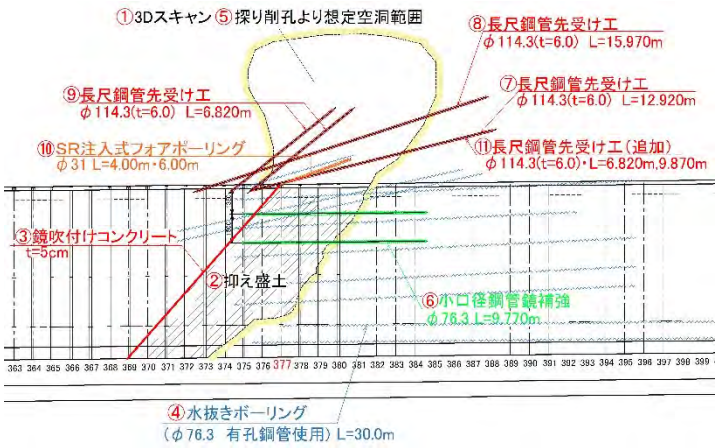


図-9　崩落対策工一覧

d）新・地山予報

崩落対策工に3週間を要し，二度と手戻りを起こすことはできない中で，今回「地山予報」が活用できなかった原因としては，「削孔検層1回あたりの延長が短い」「前後の検層でラップがない」ことが挙げられた．以上2点及び先受け工延長分（通常12.5m，3mラップ）の地山状況は把握すべきであることを踏まえ，L=22 m（6mロッド＋4mロッド×4本）を18m毎（補助工法2シフト分）に行い，4mのラップを設ける仕様に改善した．しかしながら，切羽から離れた場所で取得される破壊エネルギー係数は，解放切羽の緩み領域外であることや地山からの締込み等の影響を受けて大きくなる（＝堅固な地山だと判定される）傾向があり，削孔長を延長したことで，削孔データと実際の切羽状況にギャップを感じるケースが増加した．削孔検層ラップ部分の前後における破壊エネルギーを比較したものが**図-10**である．縦軸の減少率とは前回の検層で得られたある位置での破壊エネルギー係数が，今回切羽近傍からの検層により，同じ位置の値がどの程度減少したのかを示している．切羽からの距離が離れると，値を大きく捉えてしまう傾向が明白であり，10m先は切羽到達時点でデータ取得時の90%，20m先は70%程度と評価できる．そこで，解析結果に対して切羽からの距離に応じた減少率を上乗せした帳票を，本現場の地山特性を反映した「新・地山予報」として共有し，前方地山状況に応じた補助工法をタイムリーに施工することで，大きな崩落なく掘削を進められており，新・地山予報の採用以降は平均月進が28mから37mに増加し，余掘り・余吹き量の減少にも寄与している（**図-11**参照）．

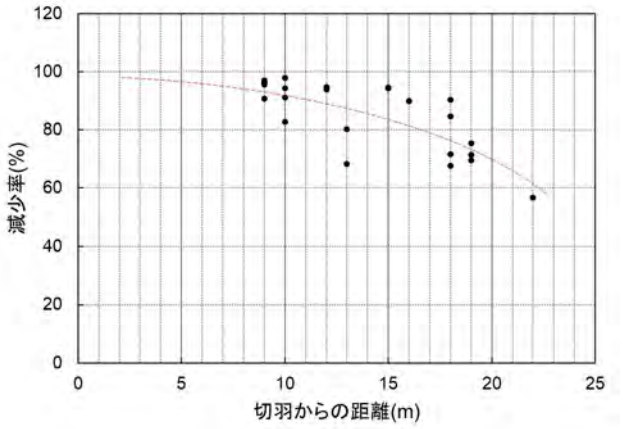


図-10　破壊エネルギー係数比較

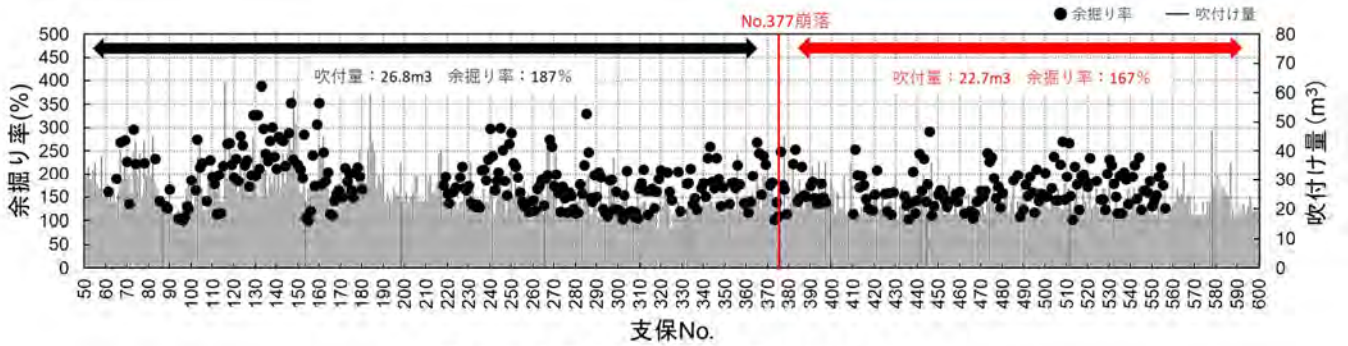


図-11　余掘り量の計測結果と吹付け量

図-12にNo. 530における検層解析結果と切羽状況を示す．該当切羽は削孔地点から20mと深い位置であったため，旧・予報では青～緑色の寒色で構成される硬質地山との評価になるが，新・地山予報では150J/cm^{3}以下の黄色～オレンジ色といった暖色の割合が増え，崩壊リスクの高い地山であることが判明し，補助工法が必要であると判断されたため，AGFを施工した結果，今回は大きな崩落なく掘削を進めることができた．実際，No.530の余掘り率は230%と補助工法を施工してもなお平均値の167%を上回っており，仮に補助工法なしで掘削を行っていた場合，大きな崩落に繋がっていたと想定される．

新・地山予報の確立により，切羽深部での地山不良箇所に対し，事前に長尺鋼管先受け工や，ピンポイントでの水抜きボーリング（探り削孔）等を行えるようになり，切羽自体の安定性に対しては従来の対症療法から，予防対策を実施することで，施工の安全性が格段に向上している．

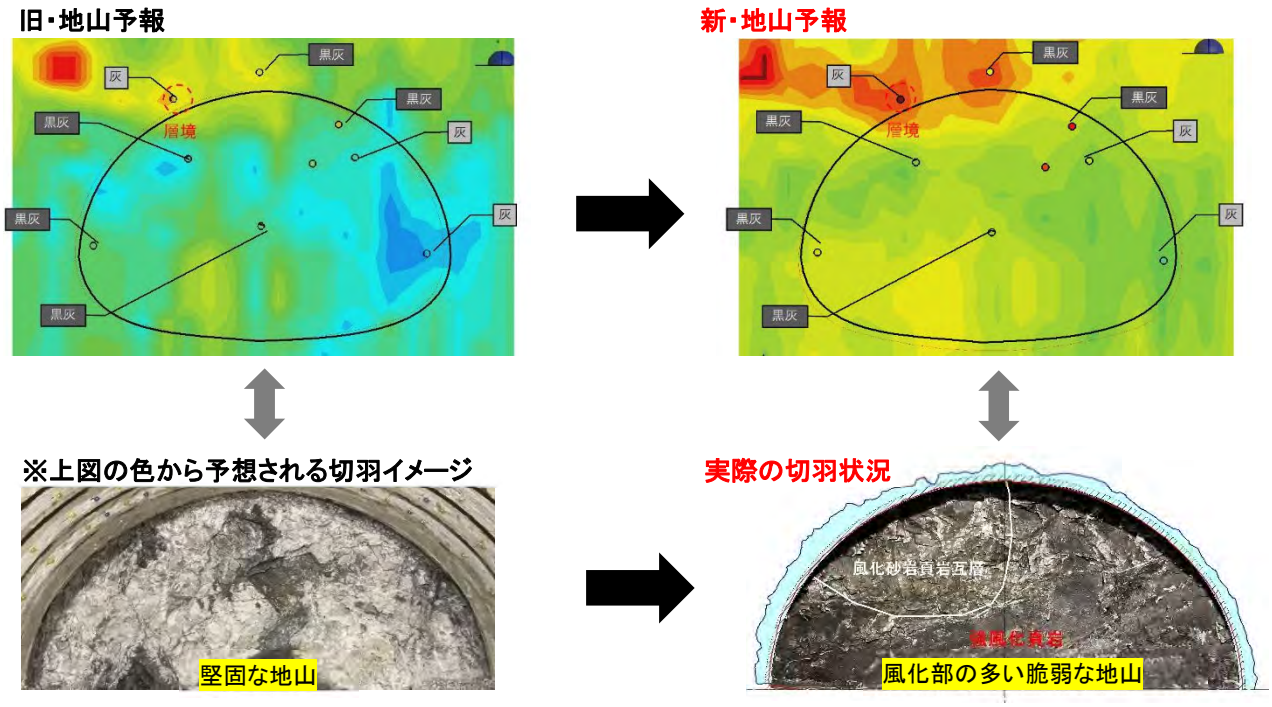


図-12　地山予報と切羽状況

(2) 削孔検層による岩種判定評価

本工事では**写真-3, 4, 5** に示すように頁岩，砂岩，緑色岩，チャートといった様々な岩種の出現が確認された．岩種によって，岩盤の粘土化の進行度や破砕度，割目状態による緩みの進行具合が大きく異なるため，削孔検層による岩種の把握は，掘削補助工法などの事前検討を可能とし，安全性の向上に寄与する．**図-13** に示す判定フローにより，削孔データを利用して，風化頁岩，砂岩混合岩，緑色岩，チャートの 4 種を判別することができた．

a) スライム色

削孔時に排出されるスライムの色（削孔水）を比較する．これは個人の主観に基づくため評価しづらいが，「チャート」は明らかに赤色である一方で，風化頁岩，砂岩混合岩，緑色岩は白灰色を示すことがあり，判別できなかった．　（**図-14**参照）

b) 破壊エネルギー係数

掘削時の様子から，地山を風化頁岩，砂岩混合岩の2種類に分類し，その破壊エネルギー係数のヒストグラムを**図-15**に示す．各項目で破壊エネルギー係数のばらつきは大きく見えるが累積度数率を考慮すると，225 J/cm3以上であれば80%の的中率で「砂岩混合岩」であるという結果を得た．

c) 破壊エネルギー係数の減少率

当現場の風化頁岩，緑色岩の破壊エネルギー係数は，ともに100～250J/cm3程度であり，見かけの数値では各々を判断することは難しい．そこで，削孔検層ラップ箇所の破壊エネルギー係数の減少率は**図-16**に示す通り，「緑色岩」は「風化頁岩」に対して減少率が小さい，つまり，緑色岩は掘削による緩み等の影響を受けにくいことが明らかになった．実際の掘削においても，緑色岩は軟弱ながら自立するケースが多く，風化頁岩は鏡面の剥落が止まらずにオーバーハング状態となる事例が多々見られた．

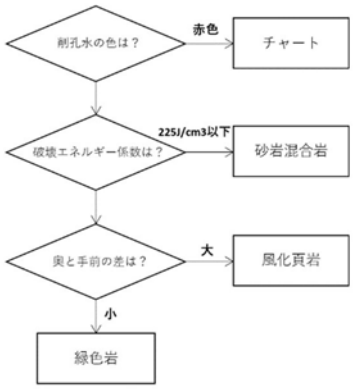


図-13　岩種判定フロー

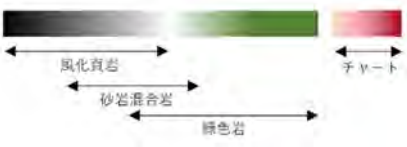


図-14　削孔水分布

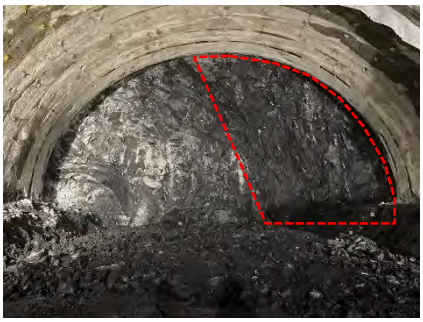


写真-3　風化頁岩



写真-4　砂岩混合岩

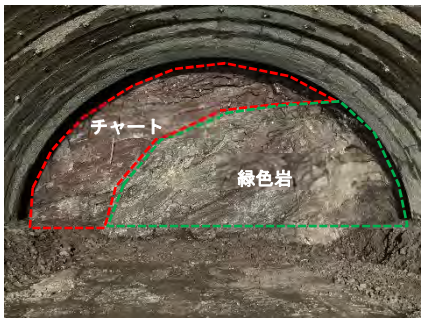


写真-5　チャート・緑色岩

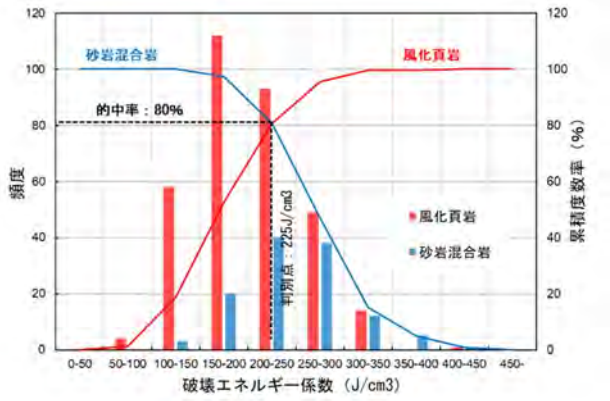


図-15　風化度ごとのヒストグラム

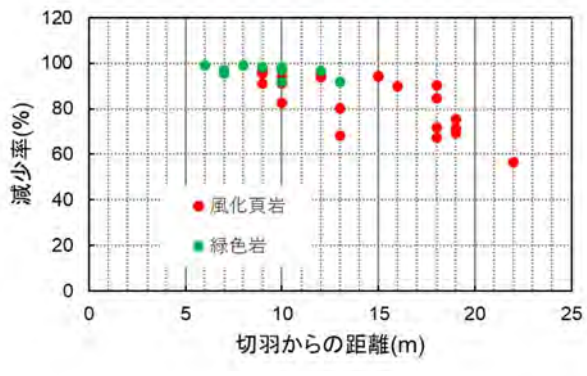


図-16　破壊エネルギー係数比較

大深度で取得された破壊エネルギー係数が切羽近傍で小さくなる事象は，解放面からの地山緩み・走向傾斜・掘削方法（発破or機械）・岩質・湧水等の様々な要因が複合的に絡み合った結果であるが，岩種の差異により破壊エネルギー係数の減少率が異なることが実証された．大断面トンネルでは同一断面に硬軟混在する場合も多々あるので，これらを考慮したより高度な地山予報へと改善するために，今後もデータの蓄積・解析を重ねる必要がある．

(3) 全自動BPと液体急結材吹付機による生産性向上

a) 全自動BP

本現場では，砂・砂利・セメント・練混ぜ水といったすべての生コン材料に温度センサを設置・管理し，練混ぜ水は常温用・温水用の2種類の水槽を用いて設定した温度となるよう配分し，練混ぜを行っている．図-17に外気温と生コン練上がり温度を比較するが，徹底した温度管理により酷暑期と厳冬期の一部を除いて，練上がり温度を自主目標値である15～23℃の範囲に収めることができた．ただし，練上がり温度の目標達成には練混ぜ水での温度管理だけでは限界があり，夏場は冷却水，冬場は骨材の加温装置などの設備増強が必要である．また，スランプについては，ミキサから生コンが落下する時間を計測するセンサを設置し，その時間とスランプとの関係を事前に把握し（図-18参照），その目標値を設定することで，一定スランプの生コン製造が可能となった．現場事務所では大画面モニタに生コン材料温度・水分補正値・落下時間等を常時表示させている．現場に行かずとも各種情

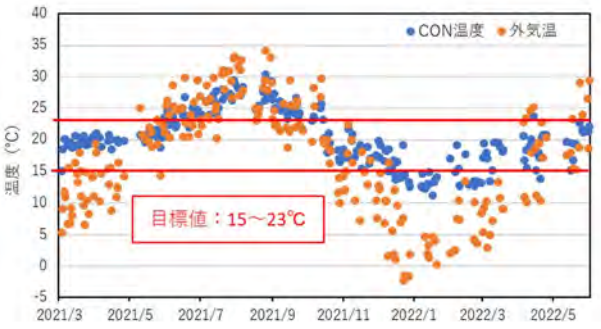


図-17　温度比較

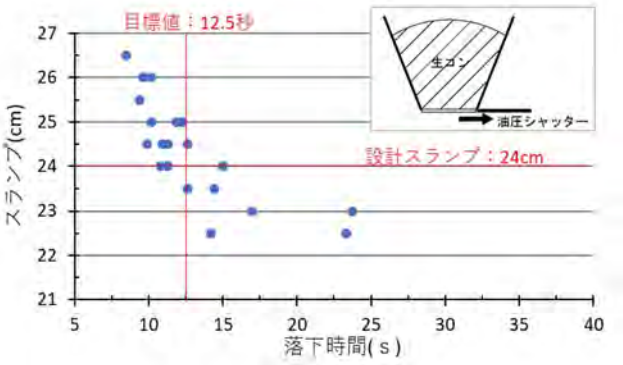


図-18　落下時間とスランプ

報を確認できる状態にあり，就労時間の短縮に寄与している．

b） 吹付機仕様

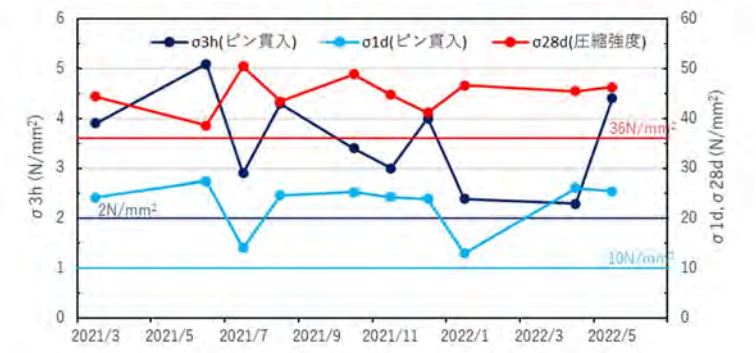
吹付機の仕様を**表-2**に示す．機械のサイズはコンパクトだが，理論吐出量は40m³/hと大容量で吹付け作動範囲も大きく，大断面トンネルに適している．コンプレッサ・液体急結材搭載型のため，別の台車を用意する必要がなく，エア・急結材ともに圧送距離が短くロスが少ないため，品質の安定化に寄与した．

表-2　吹付機仕様

項目		単位	仕様
型式			SPRAYMEC 8100VC
寸法	全長	mm	14,400
	全幅	mm	2,540
	全高	mm	3,400
重量		kg	14,500
吹付能力	型式		NSP 40
	理論吐出量	m³/h	40
	理論吐出圧力	Mpa	5.1
走行性能	走行速度	km/h	Max 15
	登坂能力	%	14
	駆動形式		4 輪駆動
定格出力		kW	135
電源ケーブル仕様			3 PNCT 100mm2
吹付作動範囲（幅ー高さ）		mm	16,000－14,000

c）液体急結材の採用

液体急結材は，粉体急結材と違い添加量を正確に測定できるため，計画に沿った添加率を管理できる利点がある．**図-19**にピン貫入とコア供試体の圧縮強度試験結果を示すが，特に1日強度については一部を除き，季節に関わらず25N/mm²程度で安定した強度を示した．3時間強度は冬季に強度が小さい傾向にあり，短期間強度は練上がり温度の影響を受けやすいと推察される．3時間強度で対規格値179%，1日強度で229%と，特に初期強度で優秀な値を示し，液体急結材により安定して高品質な吹付けコンクリートを供給することができている．また，粉塵抑制にも効果的であり，切羽から10m地点での粉塵量は，二次吹付け中で1.41mg/m³であった．目標とする2mg/m³以下の作業環境を確保できており，視界の晴れたクリーンな作業環境はトンネル作業員からも好評を得ている．



	規格値	平均値	対規格値
σ3h	2N/mm²以上	3.6N/mm²	179%
σ1d	10N/mm²以上	22.9N/mm²	229%
σ28d	36N/mm²以上	45.0N/mm²	125%

図-19　CON 強度

５．むすび

地山特性を踏まえた新・地山予報を活用した合理的な掘削方法は，生産性の向上，施工の安全性に大いに貢献し，先に掘削を始めた下り線の3次元削孔データは，広域地質予想として上り線の施工に反映させ，先手管理を可能としている．また，全自動プラントと大容量液体急結材吹付機の導入により，作業員の熟練度によらず，一定品質の生コンの製造および計画どおりの吹付けコンクリート施工が可能となり，掘削初期段階において最も重要な支保部材である吹付けコンクリートの品質向上に寄与した．

本工事で導入した技術はトンネル施工の自動化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)　前田佳克，畔津伸彦，福田博之，廣惠なつ美：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.

2)　京都東南部地域の地質：地質調査総合センター