

層状岩盤からなるトンネルの 前方探査と施工事例

押村 嘉人¹・中島 耕平¹・奥田 兼郎²・村山 秀幸³・渡辺 義孝⁴

¹(株)フジタ 九州支店 土木部 (〒812-8568 福岡市博多区下川端町 1-1 明治通りビジネスセンター本館)
E-mail:oshimura@fujita.co.jp

²宮崎県 日向土木事務所椎葉駐在所 (〒883-1601 宮崎県東臼杵郡椎葉村大字下福良 1747-10)

³正会員 工博 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)

⁴株式会社地球科学総合研究所 (〒112-0012 東京都文京区大塚 1 丁目 5-21 茗溪ビルディング)

国道327号は宮崎県日向市から熊本県山都町を結ぶ一般国道であり、路線は近年の台風や豪雨によって土砂災害が頻発に発生している耳川流域の山岳地帯を通過する。野地トンネルは、国道327号岩屋戸バイパス(延長3km)の日向側に位置する延長1 019mの山岳トンネルである。トンネル地質は、四万十帯に属する砂岩と頁岩およびその互層からなる層状岩盤であり、数条の断層の発達により地山の脆弱化が懸念されていた。そこで、本トンネルでは施工時の安全性確保および合理的な設計施工を目指すために、施工時の切羽前方探査としてトンネル浅層反射法探査(SSRT)および穿孔探査システム(DRISS)を採用した。

本報告では、野地トンネルの層状岩盤において適切に地山性状を予測しながら合理的にトンネルを設計施工した事例について述べる。

Key Words : mountain tunnel, geological survey ahead of tunnel face,
Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels(SSRT), Drilling Survey System(DRISS)

1. はじめに

国道 327 号は宮崎県日向市から諸塚村、椎葉村を經由して熊本県山都町を結ぶ一般国道であり、諸塚村から椎葉村間を除けば概ね 2 車線道路として整備されている。国道 327 号に沿って流れる耳川流域は、近年の台風や豪雨によって甚大な土砂災害が発生しており、日常的に道路が寸断され生活物資や医療物資の流通が滞り整備の遅れが指摘されている。

野地トンネル工事は、椎葉村中心部から約 10km 東方の松尾地区に位置し、国道 327 号岩屋戸バイパス(延長 3km)における日向側の延長 1 019mを施工する。本バイパスは、路線狭小や隘路区間を解消して安全で円滑な交通の確保を目的として計画されている。

本トンネルの平面線形は起点側坑口側の約 130m が R160m, 終点側坑口側の約 170m 区間が R1 000m の曲線区間となり残りの中間部が直線区間となる。トンネル経過地の標高は EL.250~550m 程度の山岳地形をなし、最大土被り約 280m となる。

トンネル地質は、四万十帯に属する砂岩と頁岩およびその互層からなる層状岩盤であり、設計における地山分類としては、砂岩を主体とする区間を C I ~C II、頁

岩主体区間を C II ~D I と考え、数条の断層が発達し断層付近における地山の脆弱化が懸念されていた。

トンネル周辺の地下水位は低く、湧水は少ないと想定されていた。

上記の地山課題を考慮し、本トンネルでは施工時の安全性確保と合理的なトンネルの設計施工を目指すことを目的として、施工時に切羽前方探査を計画した。

採用した手法は、弾性波反射法(VSP)の一種であるトンネル浅層反射法探査(Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels, 以下 SSRT と称す)¹⁾と油圧削岩機を用いた穿孔探査システム(Drilling Survey System, 以下 DRISS と称す)²⁾であり、当初断層が発達すると想定された区間において両手法を併用して探査した。起点側坑口近傍の曲線区間にける SSRT は、坑外から機械震源を用いて複数の探査測線を設定して実施し、坑内の直線区間では掘削発破を震源に活用する連続 SSRT³⁾を用いた。

本報告では、野地トンネルで採用した切羽前方探査手法の概要および探査結果を述べると共に、層状岩盤において適切に地山性状を予測しながら合理的にトンネルを設計施工した事例について述べる。

2. 工事概要

(1) 概要

図-1に、野地トンネルの位置図を示す。野地トンネルは、宮崎県北西部の熊本県との県境に位置する椎葉村中心部から約10km東方の松尾地区に位置し、延長3kmの国道327号岩屋戸バイパスのうち日向側の延長1,019mの2車線道路トンネルである。

(2) 地形地質概要

当該地域は九州山地に相当する標高1,000m以上の山稜が重畳し、耳川が蛇行しながら東方に流下している。山地の山腹傾斜は一般に急峻であるが、山稜の尾根筋や中腹部などに比較的傾斜の緩い箇所が認められ、集落や耕作地が立地すると共に、大半の地域が地すべり危険箇所に対応する。耳川流域は近年の台風や豪雨によって土砂災害が頻発しており、野地トンネル近傍においても地すべり・崩落災害が発生している。

図-2に、トンネル計画平面図と想定地質縦断面図を示す。野地トンネルの地質は、四万十帯の諸塚層群に属する厚さ数mから数10mの砂岩と頁岩を主体に構成され、数m

の厚さで砂岩頁岩の互層を挟在する。諸塚層群の全体構造としては北東-南西の帯状構造となり、トンネル経過地における地層の見掛け傾斜は、起点側坑口に向かって水平から25°程度で緩く受け盤に発達していると想定さ

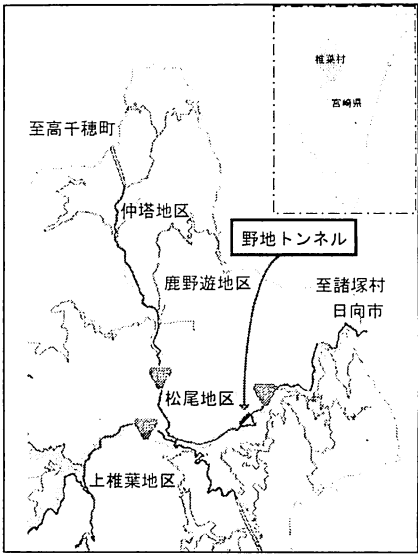
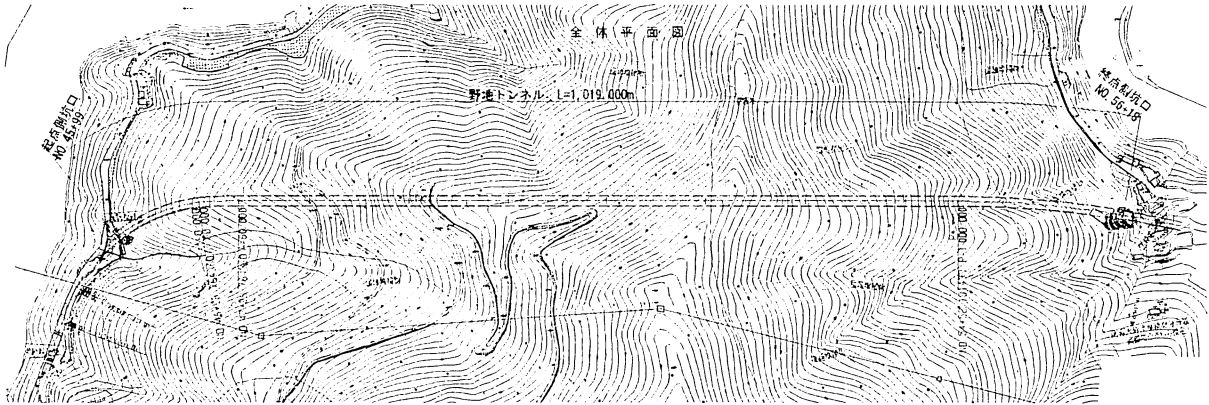
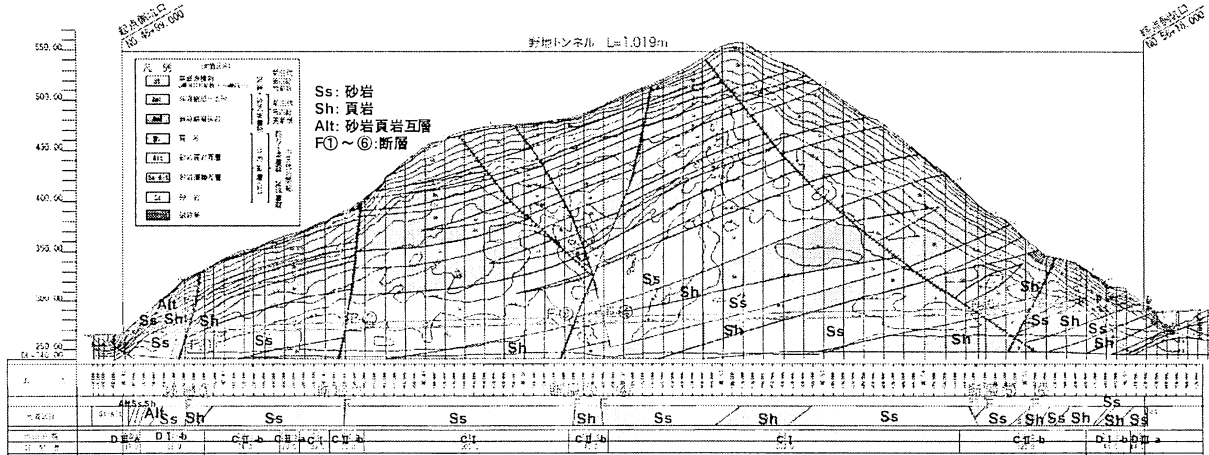


図-1 野地トンネル位置図



(a) トンネル計画平面図



(b) トンネル想定地質縦断面図

図-2 トンネル計画平面図と想定地質縦断面図

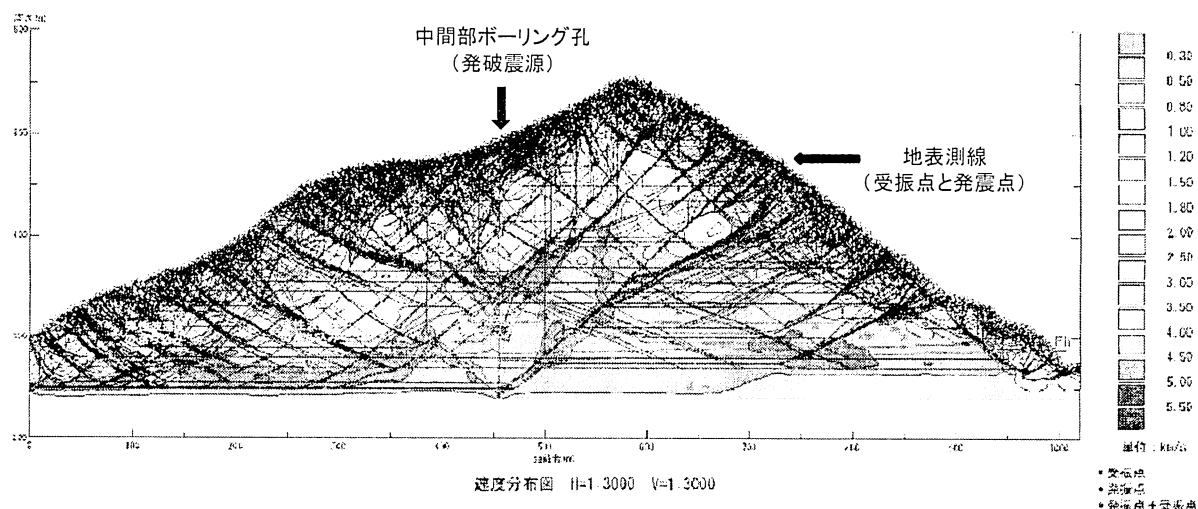


図-3 高密度弾性波探査による地山弾性波速度の分布と波線

れていた。また、周辺の地質踏査から、砂岩は頁岩の薄層を頻繁に挟在するもののブロック状の節理が発達する塊状岩盤として層全体の連続性が比較的高いと想定されていた。よって、トンネル想定地質縦断面図には、頁岩および砂岩頁岩の互層に加え、連続性の高い塊状の砂岩の発達が想定され、トンネル地質の約75%程度がこの塊状の砂岩に相当すると想定されていた。

地下水に関しては、坑口部周辺およびトンネル中間部で実施したボーリング調査で恒常的な地下水頭が確認できないことから顕著な湧水は発生しないと想定されていた。一方、両坑口近傍にはトンネル路線と並行して沢部が発達し沢水のトンネルへの流入が考えられるが、通常時における水量は少ない。

周辺の断層は、鉛直構造に近いものや低傾斜で衝上性のものも確認され、破碎幅は概ね薄く規模は小さいと想定されていた。一般に断層が低傾斜で発達する場合、トンネル路線に露出する延長が長くなり、トンネル安定性の観点からは不利となり、断層を含めた地山性状を施工時に事前に把握することが有益となる。

(3) 事前地質調査とトンネル設計の考え方

トンネル事前地質調査に多用されている地表から実施する弾性波屈折法（はぎとり法）において得られる探査深度は、一般に、測線長や震源の強さに依存し、深度100～200mが限界とされている⁴⁾。

本トンネルの最大土被りは約280mであり、土被りが100mを超える区間が65%程度を占めている。よって、事前調査では、この弾性波屈折法の探査限界を考慮し、地表での受振点と震源（発破）点の測線配置に加えて、中間部で実施したボーリング孔内で発破することによってトモグラフィー的な解析処理を実施する高密度弾性波探査を実施し、地山の弾性波速度を推定している。

図-3に、高密度弾性波探査における地山弾性波速度の分布と波線を示す。図の波線は、弾性波が地山を通過した経路を示しており、波線が到達していない箇所は、弾性波が到達していないことを示している。波線が達していない箇所の弾性波速度は高密度弾性波探査の解析処理によって補間されている。

本トンネルでは中間部のボーリング孔を発破点としたことから、波線が地山深部まで達していることがわかり、信頼性の高い地山の弾性波速度分布が得られていると言える。しかしながら、図より表層部の波線密度と比較すると地山深部に達する波線は少なく、地山深部の調査密度は通常より改善されているものの相対的には低くなっている。これは弾性波屈折法をトンネル事前調査に適用する際の課題と言える。

一方、図-2に示した地質想定と図-3の弾性波速度分布を比較すると、基盤の弾性波速度は4.5～5.0km/sと高く特にトンネル起点側から中間部において弾性波速度の基盤への落ち込みが3箇所を確認でき、図-2に示した断層位置（断層①、②、③）との整合性が高い。一方、砂岩が塊状で分布すると想定される区間の弾性波速度は全般に4.5km/s以上と高く地質構造と弾性波速度分布の整合性が示唆されるが、弾性波速度分布は、起点側坑口に向かう地層の流れ盤構造を明確に表しているとは言えず、土被りに依存して弾性波速度が高くなる傾向を示していると解釈でき必ずしも整合しない。一般的に、地質構造と弾性波探査の結果は整合しない場合も少なくなく、その結果解釈が難しいのが現状である。本トンネルでは中間部を発震点とする高密度弾性波探査より、精度の高い事前調査が実施されて設計に反映されていると言える。

当初設計における採用支保パターンは、坑口部を除き、頁岩、砂岩頁岩互層および断層区間をCII-b～DI-b、砂岩区間をCIからCII-aと設定している。

表-1 施工時の切羽前方探査手法の一覧

	調査手法	特 徴	利点・欠点	コスト
削孔・穿孔調査	水平ボーリング	- 専用の削孔機を使用する。 - ロータリー方式とロータリーとパーカッション(打撃力)を併用する方式がある。いずれの方式でもコア採取が可能である。 - 掘進延長は、地山性状と切羽占有可能な工程に依存するが 100m 程度までの事例が多い。	- コア、スライム、削孔水から地質状況を直接確認できる。 - 削孔に時間を要するので削孔機と削孔設備が切羽を占有し、トンネル掘削作業と競合する。 - 得られる情報は限定的な点のデータであり切羽地質を代表しない事例も少なくない。	高額
	探りノミ	- トンネル掘削で使用する油圧削岩機を使用する。 - 削孔速度、スライムの状態、削孔水、湧水等から地山状態を推定する。 - 地山状態にもよるが削孔延長は 30m 程度が限界となる。	- 油圧削岩機の打撃力、トルク、回転力等のデータを削孔中に計測し削孔エネルギーから地山の相対的な硬軟を判定する。 - 削孔延長が短いが簡便な手法で、現場で多用されており、同時に複数孔を削孔する事例が多い。	安価
物理探査	弾性波探査	- 弾性波反射法(VSP 処理)を応用した手法であり、切羽前方の地山変化(音響インピーダンスの差)を相対的に判定する。 - 震源(発破や機械震源)と受振器、記録装置等から構成される。 - 探査深度は切羽前方 100～300m 程度で深いことが特徴である。	- 探査装置が坑内を占有するため休日に実施する事例が多い。 - 探査作業に 1 日、解析処理に 1～3 日を要する。 - 適用事例が非常に多い。 - 間接的な探査であり、反射波の最小検知幅は数 m 程度で、コア採取のような精度はない。	中程度
	電気・電磁波探査	坑内で比抵抗電気探査を実施する手法や地表から電磁波探査を実施する手法等がある。	地下水探査に有効といわれているが、適用事例が少ない。	高額

3. 切羽前方探査手法の概要と特徴

(1) 切羽前方探査手法の概要

施工時の切羽前方探査⁵⁾⁶⁾は、切羽からの削孔・穿孔調査と弾性波等を用いる物理探査に大別される。表-1に、切羽前方探査の一覧を示す。穿孔・削孔調査は、コアやスライムで直接地山を確認でき、水抜き効果も期待できることが利点となるが、削孔延長が長くなると工期が長く調査費用も高額となる。物理探査は、弾性波や電気・電磁気等を用いて間接的に地山を調査する方法であり、探査深度が数100mと深いことが利点となる。

本トンネルにおける切羽前方探査は、前述の地質性状を考慮し、探査深度が深い弾性波反射法（VSP）の一種であるSSRTをまず実施し、断層等の地山性状を概略的に把握しながら、穿孔調査であるDRISSを併用しながら施工を進めることとした。

(2) SSRT

図-4にSSRTの探査概念図を、図-5にSSRTの分類を示す^{3), 7)}。SSRTは現場条件を考慮して様々な震源（発破、機械）や測定配置を選択できることが利点であり、本トンネルでは、起点側の曲線区間において図-5(b)に示した坑外SSRTを機械震源を用いて実施し、坑内直線区間においては図-5(c)に示した掘削発破を震源とする連続SSRTを採用した。連続SSRTでは掘削発破を震源と活用することから、特別に探査実施日を設ける必要がなく、観測機器を坑内に常設することによって、掘削サイクルに影響を与えずに探査できることが利点である。

なお、SSRTおよび連続SSRTの詳細に関しては参考文献1),7)等を参照されたい。

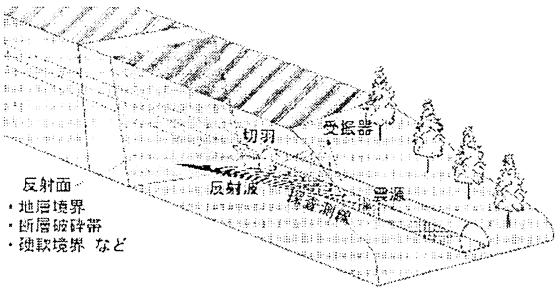
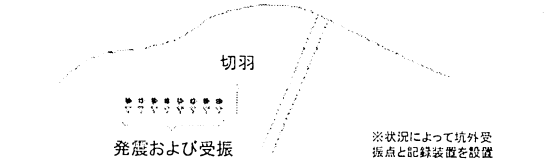
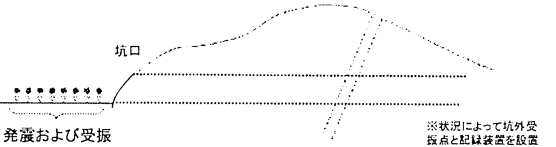


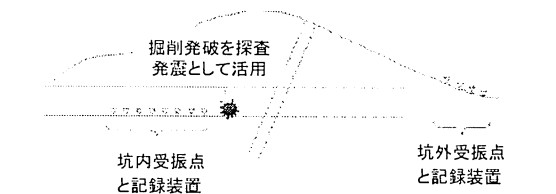
図-4 SSRTの切羽前方探査概念図



(a) 通常SSRT：発震と受振点を同一箇所坑内に配置



(b) 坑外SSRT：発震と受振点を同一箇所坑外に配置



(c) 連続SSRT：掘削発破を震源として受振点を坑内と坑外に配置

図-5 探査装置の配置の相違によるSSRTの分類

(3) DRISS

図-6に、油圧削岩機を用いたDRISSの調査概念図³⁾を示す。DRISSは、穿孔時に穿孔速度等の各種穿孔パラメータを自動的に記録・採取し、穿孔速度（のみ下がり）、穿孔エネルギー、タンピング圧（穿孔反力）などをパラメータとして前方地山を評価する手法であり、適用事例が非常に多い。なお、油圧削岩機による削孔延長は30m以上も可能であるが、延長30mを超えると穿孔エネルギー等の算出誤差が大きくなるため、メーカーからの推奨として実務的な探査深度は30mが限界とされている。

なお、DRISSの詳細は参考文献2)等を参照されたい。

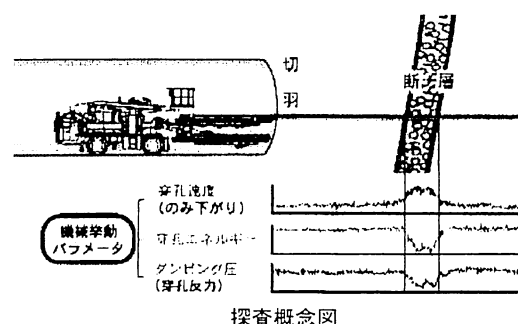


図-6 DRISSの探査概念図

4. 施工

(1) 前方探査

写真-1に、起点側のR160m曲線区間において坑外から実施した坑外SSRTの実施状況を示し、写真-2に、坑内直線区間における連続SSRTの観測機器の設置状況を示す。写真-3に、坑内で実施したDRISSの実施状況を示す。

一般に、トンネル線形が急曲線になると前方探査の実施が困難となるケースがある。例えば、弾性波反射法として最も適用事例の多いTSP⁸⁾では、曲線区間に合わせた切羽前方探査を実施することはできず、探査したとしても前方予測位置はトンネル路線線形から徐々に遠方に離隔することになる。一方、削孔・穿孔調査においても削孔装置の反力の得やすさ、切羽背面の穿孔装置の空間確保（ドリフタやロッド等）の関係から直線区間で実施する方が望ましいと言える。

本トンネルは、起点側坑口から約130m区間がR160mの曲率半径の小さな曲線であことから、現場条件を考慮して様々な探査配置と震源を選択できる汎用性の高いSSRTを採用した。

SSRTでは図-7に示すように、まず事前地質想定における断層位置（断層①、②）をターゲットとして、坑外から2つの探査測線を設定した。SSRTにおいても探査結果は設定した測線の延長上（直線）であり、切羽前方予測位置がトンネル路線から大きく離隔する区間も発生する。しかしながら、図-7のように探査ターゲット位置を考慮して測線を配置できることが利点となる。

図-8、9に、想定断層①および想定断層③、④付近におけるSSRTとDRISSの予測結果をそれぞれ対比して示す。

図-8の掘削実績における地質確認から、当初想定された断層①に相当する脆弱部は出現せず、砂岩と頁岩の境界も想定位置とやや異なっていたことが分かる。

図-8に示したDISSの削孔エネルギーから、頁岩と砂岩の境界および頁岩中の脆弱部を点のデータとしてとらえ



(a) 測線1 [パイブレータ震源] (b) 測線2 [油圧インパクト震源]
写真-1 起点側坑口の曲線区間における坑外SSRT実施状況

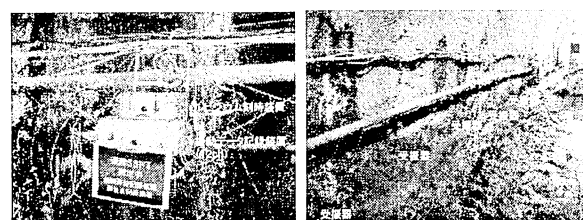
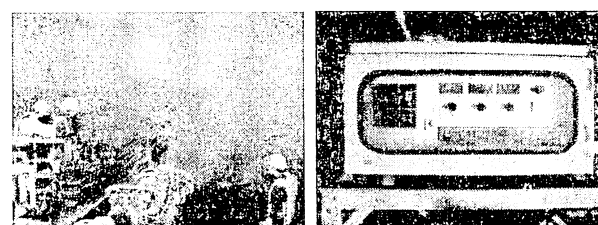


写真-2 坑内直線区間における連続SSRTの機器配置状況



(a) 油圧削岩機による穿孔状況 (b) 穿孔パラメータ記録装置

写真-3 DRISS実施状況

ているが、全体傾向としては特に穿孔エネルギーが小さく相対的に脆弱と想定された位置において、脆弱な地山は分布しなかった。

同様に、図-8に示したSSRTにおける反射面の振幅強度表示⁷⁾からは、砂岩と頁岩の境界位置を強い反射面が集中する区間として捕らえていることが分かる。その他の反射面強度が小さいあるいは、反射面が少ない区間は地層変化がほとんどない区間と一致していた。

以上から、想定断層①近傍の探査結果において、DRISSは点として地山の性状を予測することに有利であ

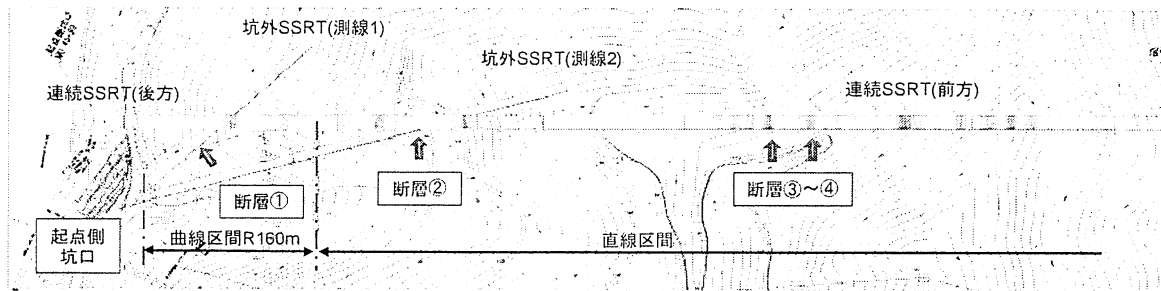


図-7 起点側坑口付近の曲線区間におけるSSRT探索測線と探索結果〔直線区間の連続SSRT探索結果を併記〕

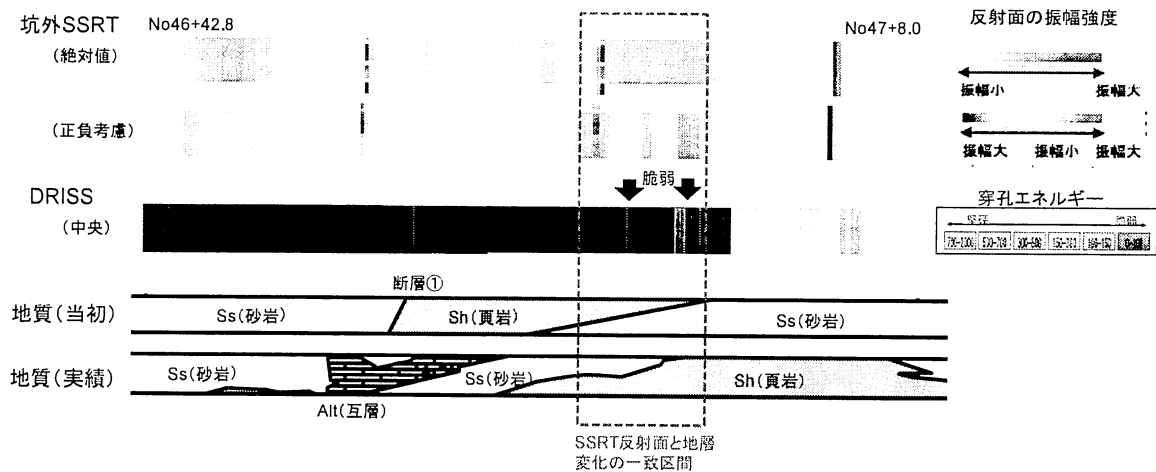


図-8 想定断層①付近におけるSSRTとDRISSの前方予測結果の対比

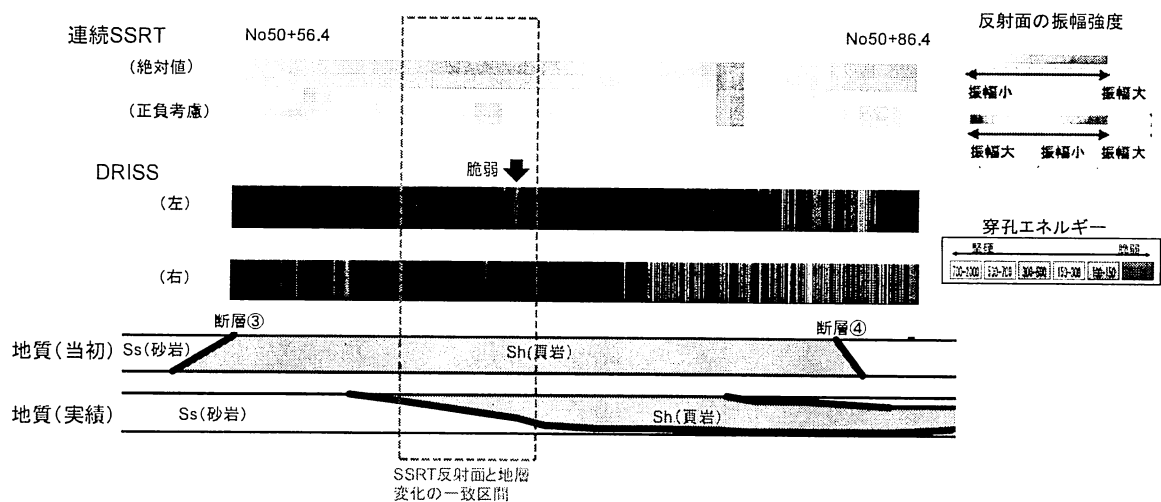


図-9 想定断層③、④付近におけるSSRTとDRISSの前方予測結果の対比

るが全体傾向を表しておらず、SSRTは反射面の分布区間から全体傾向を的確に予測していたと言える。

図-9 に示した想定断層③、④区間における地質確認においても断層に相当する脆弱部は出現せず、砂岩と頁岩の分布も想定と異なっていた。DRISS における削孔エネルギーから、前回と同様に砂岩と頁岩の境界における

脆弱部を点のデータとして捕らえているが、削孔エネルギーの全体傾向は確認された地質現象と整合していないと言える。また、地層境界が図-9 のように受け盤で発達する場合、天端から地質が変化することになり、トンネル計画高さから数 m 上方で実施する DRISS では脆弱部が遅れて予測されるので注意が必要となる。

以上の地質特性から、起点側坑口からほぼトンネル中間地点までは一部の脆弱区間および湧水区間を除き、C II-bパターンでの施工が主体となった。

図-10に、掘削完了時における想定地質と確認地質を対比して示す。トンネル延長のうち終点側約半分の区間においては、連続SSRTにて地山変化の少ない区間を予測し切羽観察結果と対比することによって堅硬な砂岩（設計でのC I 区分の地山）の分布を想定した。その結果、一部区間でC I，C II-aを採用したが頁岩の露出によって切羽の安定性が低下し延長10m程度しか採用することができなかった。図-10より、トンネル延長の約70%に頁岩および砂岩頁岩互層が分布し、当初砂岩と想定された比率とほぼ等しいことが分かる。

以上のように、SSRTは地山の良好区間の予測に適用することも可能であり、トンネルの設計施工の合理化に寄与する可能性が示された。しかしながら、本トンネルでは、前述のように事前想定と異なる地質現象に遭遇したことから、経済性を向上させるには至らなかった。

5. おわりに

野地トンネルの地質は砂岩と頁岩の互層であり、2～5m程度で岩質が移り変わるとともに、硬質・軟質の層が交互に現れることが顕著に見られた。SSRTとDRISSを併用して実施した結果、層状岩盤において適切に地山性状を予測することができ、安全性の確保および合理的な施工をすることができた。また、起点側坑口のR160mの

曲線区間においても坑外からのSSRTにより断層位置を適切に予測することができた。

SSRTとDRISSの併用については、SSRTによって切羽前方の全体的な地質変化の傾向を予測し、DRISSでその変化点を詳細に確認するなど、両手法の利点を適用することによって、今後有効な切羽前方探手法となると考えられる。

参考文献

- 1)例えば、村山秀幸，丹羽廣海，中島耕平，川中卓，黒田徹：トンネル坑口部における坑外からの切羽前方探査の適用，土木学会トンネル工学研究報告集，第17巻，pp.67-73，2007.
- 2)例えば、石山宏二，山下雅之，木村哲，岡井崇彦，里優：削孔データを利用した地山評価手法へのニュートラルネット適用に関する考察，岩の力学連合会，第11回岩の力学国内シンポジウム，2002.
- 3)村山秀幸，丹羽廣海，大野義範，押村嘉人，渡辺義孝：ルビジウム刻時装置を用いた連続的な切羽前方探査の開発と適用，土木学会，トンネル工学研究報告集，第20巻，pp.51-58，2010.
- 4)物理探査学会：物理探査適用の手引き（とくに土木分野への利用），pp.17～18，2003.
- 5)土木学会：2006年制定トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説，pp.23-25，2006.
- 6)社団法人日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針（平成21年改訂版），pp.69-80，2009.
- 7)丹羽廣海，村山秀幸，小笠原和久，中島耕平，黒田徹：坑外からの切羽前方探査における到達側坑口受振記録の活用，土木学会トンネル工学研究報告集，第19巻，pp.165-172，2009.
- 8)例えば，土木学会関西支部：トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム講演論文集，2000.

CASE STUDY AND GEOLOGICAL SURVEY AHEAD OF TUNNEL FACE IN THE BEDDING ROCK MASS

Yoshihito OSHIMURA, Kouhei NAKAJIMA, Kenrou OKUDA,
Hideyuki MURAYAMA and Yoshitaka WATANABE

The Noji tunnel (extension 1,019m) is located on the Hyuga side of the route No.327 called the Iwayado By-pass (extension 3km). The tunnel geology is the bedding rock mass that consisted of sandstone, shale and the alternation of strata that belonged to the Shimanto group and making the natural ground weak was feared by the several faults. Then, to aim at an ensuring safety and reasonable design of tunnel construction, the shallow seismic reflection survey for tunnels (SSRT) and the drilling survey system (DRISS) were adopted as geological survey ahead of tunnel face under construction.

This paper describes the case study and geological survey where the Noji tunnel is reasonably constructed while appropriately forecasting the natural ground properties in the bedding rock.