

特殊条件下のトンネルにおける 切羽前方探査の適用

村山秀幸¹・丹羽廣海²・清水信之³・黒田 徹⁴

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

²正会員 (株)フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

³理博 (株)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)

⁴(株)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)

トンネル工事において施工中に切羽前方の地山性状を的確に予測し、適切に対処することは、トンネルの品質・安全および経済性の向上を目指す上で極めて重要となる。筆者らは、起震源が発破に限定されない切羽前方探査としてトンネル浅層反射法 (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels) を開発し種々のトンネルに適用してきた。本稿では、本切羽前方探査手法の概要を述べると同時に、特殊条件下として起震源に発破を用いることが極めて困難な事例として、TBM導坑内 (掘削外径5,000mm) での探査事例およびトンネル坑口周辺における探査事例を紹介し、本手法の適用性と課題について述べる。

キーワード: 山岳トンネル, 切羽前方探査, 反射法弾性波探査, TBM, トンネル坑口

1. はじめに

トンネル工事では、施工中に切羽の地山性状を的確に予測し適切に対処することがトンネルの品質・安全および経済性の向上を目指す上で極めて重要となる。筆者らは、トンネル施工時に切羽前方の地山性状を把握し、設計・施工に反映する切羽前方探査技術として、トンネル浅層反射法探査 (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels: 以下SSRTと称す) を開発し、各種トンネルにおいて検証を進めてきた^{1)~6)}。

SSRTは各現場の特殊条件と個々の探査目的を考慮して、探査機器の適切な配置 (坑内および坑外からの発震・受振)、複数の震源装置の併用 (発破、油圧インパクト、パイプレータ)、各種波形処理方法による検討 (VSPによる切羽前方・後方強調、水平構造解析、トモグラフィ等) などにより、トンネル切羽前方および周辺地山を探査可能な汎用性の高い手法である。

また、SSRTは、地山弾性波速度 $V_p=3.0\text{km/s}$ 以下の軟岩 (最小 2.4km/s) から弾性波速度 $V_p=4.0\text{km/s}$ 以上の硬岩まで、幅広い地山に適用実績がある⁴⁾。

一方、特殊な地山・地形条件におけるSSRTの適用事例^{1)~5)}としては、①活断層により地山が破碎され

た土被りの小さい区間の探査、②トンネル出口側坑口周辺の表層風化帯の分布予測、③土被りの小さい沢部を通過する区間における地質予測などがある。

本稿では特殊条件下のトンネルにおけるSSRTの適用事例として、第二東名高速道路島田第一トンネル (下り線) 工事におけるTBM先進導坑への適用、および三遠南信道路別所トンネル工事における掘削開始前に坑外から実施したSSRTの適用事例を紹介する。

第二東名高速道路島田第一トンネル (下り線) 工事は、延長2,675mのうち2,278mをTBM先進導坑 (外径 $\phi 5,000\text{mm}$) で掘進し、TBM導坑貫通後に大断面に拡幅掘削する計画であった。しかしながら、TBM掘進中に大小の地山崩壊が頻発し、特にSTA. 533+60付近で発生した大きな崩壊によって、TBMマシンが拘束され掘進の停止を余儀なくされた。そこで、TBM導坑内から切羽前方を予測するために、油圧インパクトを起震源とするSSRTを採用した⁶⁾。

三遠南信道路別所トンネル工事 (延長948m、標準掘削断面積約 86m^2) は、地山トラブルの発生頻度の高い三波川変成岩類に属する黒色片岩と緑色片岩等から構成され、地山の不安定化が危惧された。よって、トンネル掘削以前に坑外から油圧インパクトとパイプレータを起震源としたSSRTを実施し、坑口周辺地山の評価にSSRTを初めて適用した事例である⁷⁾。

2. TBM導坑内での探査

(1) SSRT探査の改良

a) 改良の必要性

島田第一トンネル（下り線）の TBM マシンは掘削外径 $\phi 5,000\text{mm}$ のフルシールド型であり後続設備がマシン後方の約 100m 区間に連なり、切羽からこの約 100m 区間が特に作業空間が狭い。よって、同様な探査法で起震源が発破に限定される TSP や HSP において、発破孔を間隔 2m 程度で後続設備区間の側壁に削孔することは容易ではなく、発破時には各種計器に影響を与えないために入念な防爆処理が必要となる。なお、このような限定された空間での発破作業は、安全管理上当然、避けるべきである。

一方、TBMでは通常火薬類の使用を申請しない。島田第一トンネル（下り線）でもTBM掘進期間中は火薬類の使用許可申請を実施していなかった。よって、起震源は機械震源に限定され、起震・受振方法を本現場に合わせて改良、工夫する必要があった。

b) 起震源の選択（油圧インパクト）

SSRT は機械震源として、油圧インパクトとバイブレータが利用可能で探査目的に応じて機種を選択できる。油圧インパクトには、打撃エネルギー（ピストン下の支点ガス圧 0.6MPa ）3,000 ジュール、6,400 ジュール、2,000 ジュールの 3 機種⁴⁾がある。そのうちミニインパクト（JMS-MINI65）は、最も小型（打撃エネルギー 2,000 ジュール）であるが P 波を用いた地表からの反射法探査で深度 500m 程度の起震能力を有する。ミニインパクトは、小型油圧ショベルをベースマシンとした自走式震源であり、従来から機動性を重視してトンネル坑内での SSRT に使用しており探査実績が豊富である⁵⁾。

図-1にミニインパクトの形状図を示す。本震源は最大幅1,200mm、高さ約2,230mmであり、ベースマシンの軽微な改良（屋根の取り外し）により外径 $\phi 5,000\text{mm}$ のTBM導坑内の後続設備区間で探査可能であり、総重量も1.2tfで現場への輸送や坑内での移動に有利である。よって、このミニインパクトを起震源として採用することとした。

c) 探査手順の工夫

図-2 に TBM 導坑内の後続設備区間におけるミニインパクトでの起震方法の概念図を示す。導坑内は軌道式であり、ミニインパクトは台車に乗せて搬入する。通常ミニインパクトは鉛直下向きにトンネル底盤を起震しながら移動を繰り返すので、TBM 導坑内では底盤から軌道上の台車まで約 1,300mm の離隔が発生し直接底盤を起震することができない。そこ

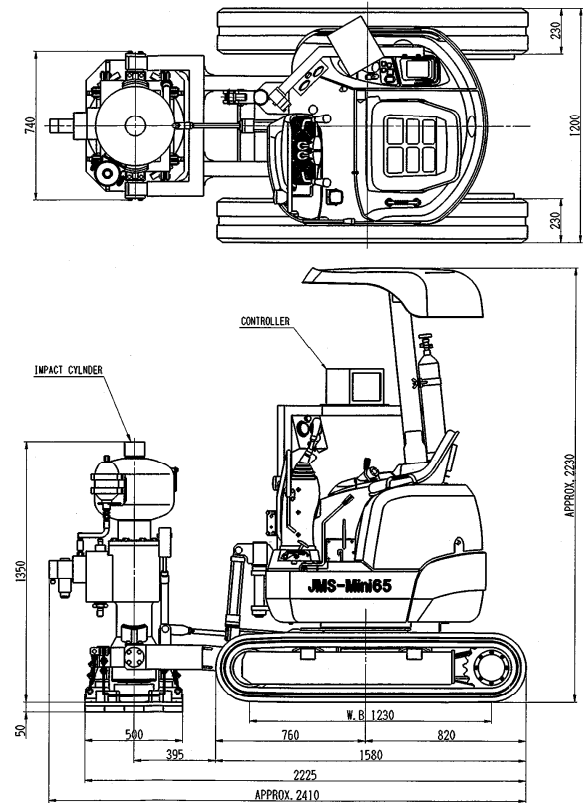


図-1 ミニインパクト [JMS-MINI65] 形状図

で、図-2 に示したように、専用の台座アンビルを作成した。台座アンビルは H 型鋼（H-300）を用い基準高さを 1,200mm として、底盤の凹凸に合わせて 100mm 単位で高さ調整が可能なピース材を用いて起震位置で順次高さを調整し、常に最大の起震力が地山に伝達されるように工夫した。

受振器（ジオフォン100Hz）は、底盤起震位置から100mm程度離して、地山にニードル状のスパイクを打ち込み設置した。受振器から坑内に設置した記録装置への配線は軌道上に敷設し、ミニインパクトの移動等によって断線しないように配慮した。

(2) SSRT探査の実施と結果

a) 現場概要と探査実施位置

図-3 に島田第一トンネル（下り線）の西側区間における地質縦断面図を示す。本トンネルは、静岡県中部を南東方向に流下する瀬戸川と大井川支流大津谷川に挟まれた山地で、静岡県島田市の北方約 4km に位置する。山地は概ね標高 300m～400m で、主な河川方向と同じ北西－南東方向の尾根が発達する。

トンネル地質は、大部分が瀬戸川層群と呼ばれる古第三紀～新第三紀中新世前期に形成された堆積岩類からなる。東側坑口部付近は新第三紀前期中新世に形成された大井川層群からなり瀬戸川層群とは断

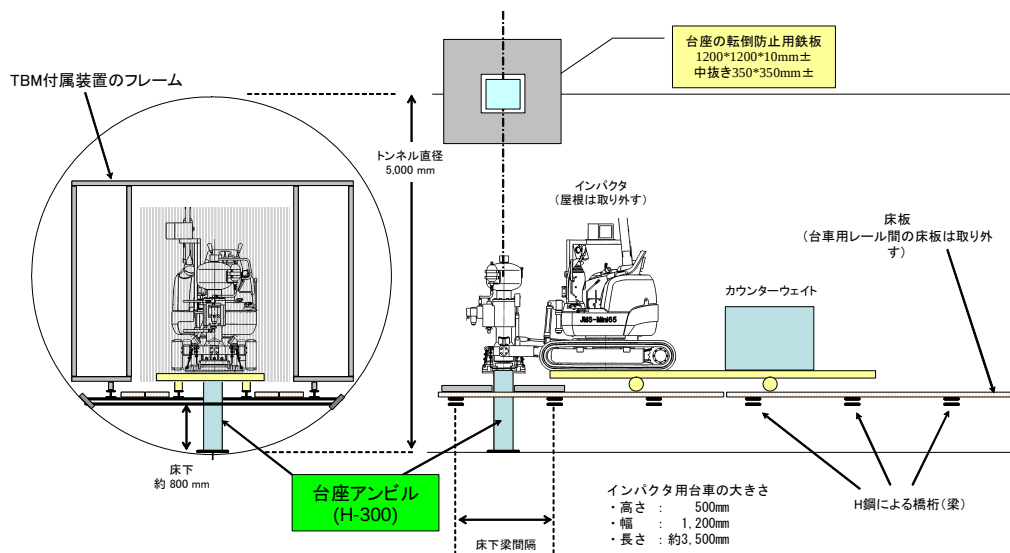


図-2 TBM 導坑内の後続設備区間を考慮したミニインパクト起震方法の概念図

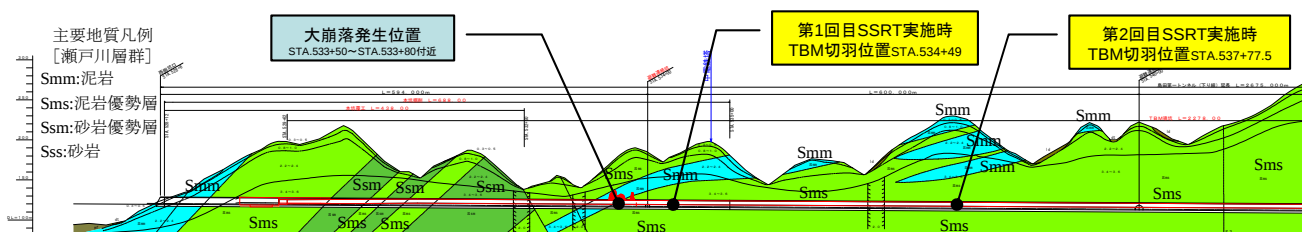


図-3 島田第一トンネル（下り線）の西側区間における地質縦断面図 [SSRT 探査実施時の TBM 切羽位置を併記]

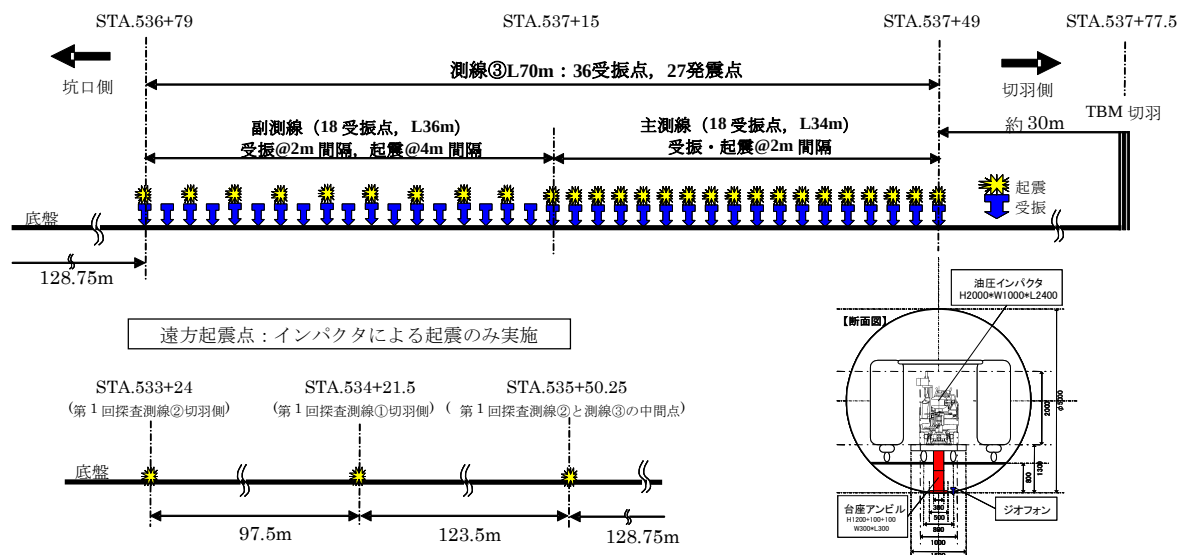


図-4 第2回目SSRTの測線配置

層で接している。瀬戸川層群は砂岩と泥岩を主体とし、その含有率によって砂岩～砂岩優勢層～泥岩優勢層～泥岩に区分されている。地山弾性波速度は、風化部を除く地山深部で $V_p=3.4\sim3.6\text{km/s}$ であり、数箇所に低速度帯($V_p=2.0\text{km/s}$)が確認されている。

b) 探査実施方法

SSRTは計2回実施しており⁶⁾、本稿では主に第2回目について述べる。SSRT測線の設定は第1回目を測線①、②とし、第2回目を測線③とした(測線①、②、③の位置関係は後述する図-7を参照されたい)。

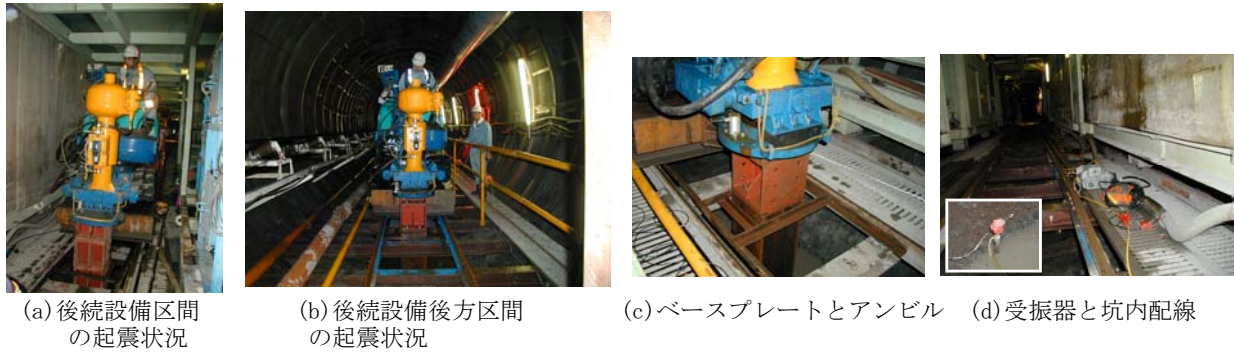


図-5 TBM 導坑内での SSRT 実施状況

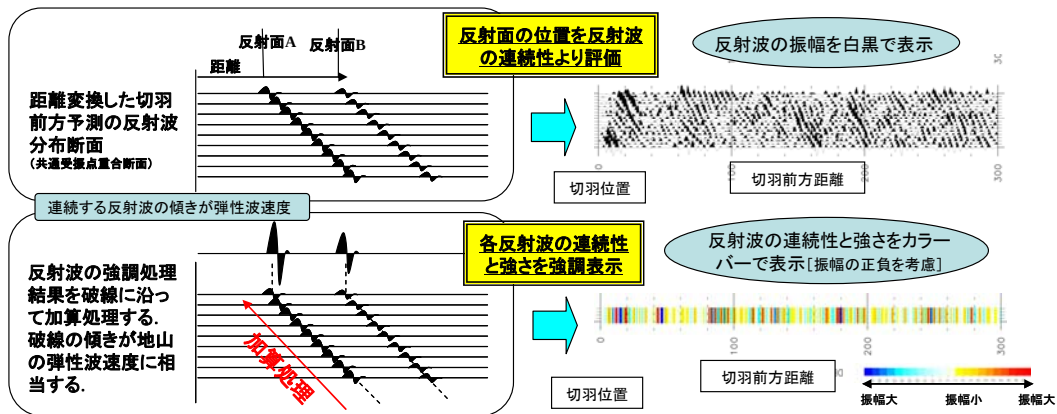


図-6 反射面強度のバーチャート表示の考え方

図-4に第2回目SSRTの測線配置を示す。測線③は第1回目の結果を踏まえ、屈折法解析で地山P波速度を精度よく取得するために測線延長を70mと第1回目より長く設定した。測線③の切羽側34mを主測線として、受振器を間隔2mで18箇所に設置し起震も2m毎で実施した。坑口側36mを副測線として、同様に受振器を間隔2mで18箇所に設置し、起震を4m毎とした。さらに、各測線間の地山P波速度を把握するために、遠方起震点として測線①と②の切羽側受振点位置、測線②と③のほぼ中間点で起震を行った。

起震回数は、遠方起震点で20回のスタッキングを実施し、測線③では10回とした。一方、TBM切羽後方の約30m区間はマシン本体およびベルトコンベアによる排泥設備が導坑内に錯綜しており、起震と受振はTBM切羽から約30m後方が限界であった。

図-5に探查実施状況を示す。1回の起震に要する時間は移動を含めて5分程度であった。

c) 探查結果と掘削実績の対比

図-6にSSRT探查結果の表示方法として、反射面強度のバーチャート表示の考え方を示す。このバーチャート表示から、連続性が高く相対的に強度の強い反射面を視覚的に抽出することが可能となる。

表-1 切羽・天端の安定性に対する反射面コントラストと強反射面の分布マトリックス

		強反射の分布		
		なし	単発	連続
反射強度のコントラスト [全体傾向]	低	安定	小崩落	大崩落の危険性あり
	高	安定	安定	安定

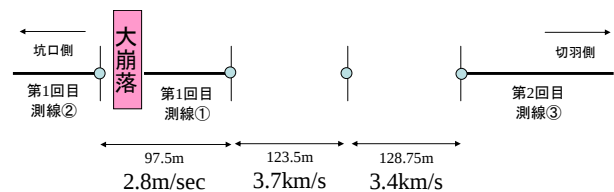


図-7 遠方起震における平均地山弾性波速度(P波)

第1回目のSSRT探查結果と掘削実績の対比から、本トンネルの地山評価においては、反射面コントラストの変化と強反射位置に注目することが重要であることが示され⁶⁾、表-1に示す地山評価マトリックスを作成した。表より、崩壊は全体的に反射強度コントラストが低い領域の強反射が分布する区間で発生しており、コントラストが高い領域とコントラストが低くても強反射が分布しない区間では崩壊は発

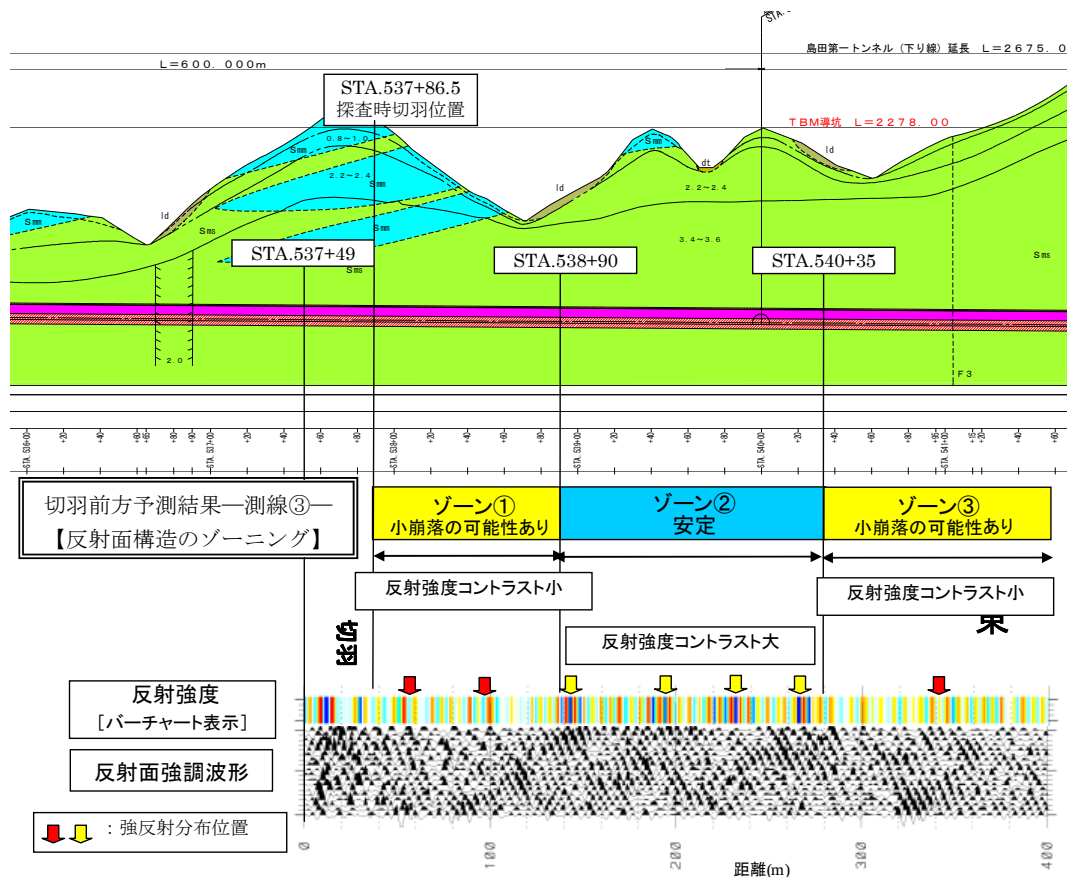


図-8 第2回目SSRTにおける切羽前方地山の予測結果

生していないことがわかる。

第2回目のSSRT解析に用いた地山弾性波速度は、測線③における初動走時から得られる平均値として $V_p=3.4\text{km/s}$ を採用した。

図-7に、遠方起震による第1回目の測線②～①および測線③間における平均地山弾性波速度を示す。図-8に第2回目のSSRT探索結果を示す。切羽前方地山の評価は、反射強度コントラストと強反射面の分布性状に着目し、表-1に示したマトリックスに従って以下のように推定した。

- ・ゾーン①および③：反射強度コントラストが低く、単発的に強反射面が分布するので小崩落が発生する可能性がある領域。

- ・ゾーン②：反射面強度が高く強反射面が連続する区間であり安定していると考えられる領域。

TBM 掘進記録からこの予測結果を検証すると、ゾーン②と③の境界付近のゾーン③側で小規模な崩壊が10m程度連続して発生したが、それ以外の箇所ではほとんど安定していた。よって、切羽前方地山の予測結果は、妥当であったと考えて良い。

(3) 考察

図-9にTBM掘進後の本坑掘削時に実施した切羽

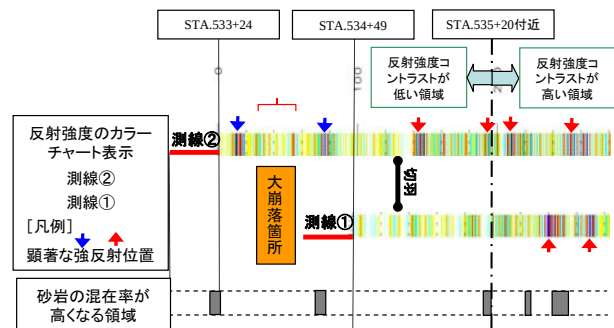


図-9 砂岩の混在率と強反射面位置の関係

観察結果から砂岩混在率が高くなる領域と、測線①、②の前方探索区間における反射面強度を対比して示す。図より、強反射位置と砂岩混在率が高くなる位置は概ね一致し、反射強度コントラストが高くなる付近から砂岩の混在率も高くなる傾向を示している。

よって、本トンネルで発生した切羽崩壊および地山変状の要因は、砂岩と泥岩の工学的な性状の相違に依存する。すなわち、褶曲等の地質構造的な作用によって、砂岩に比較して強度が小さく変形しやすい泥岩が選択的に強いダメージを受け塑性化しやすい性状となり、切羽崩壊と地山変状の素因となった可能性が示唆される。

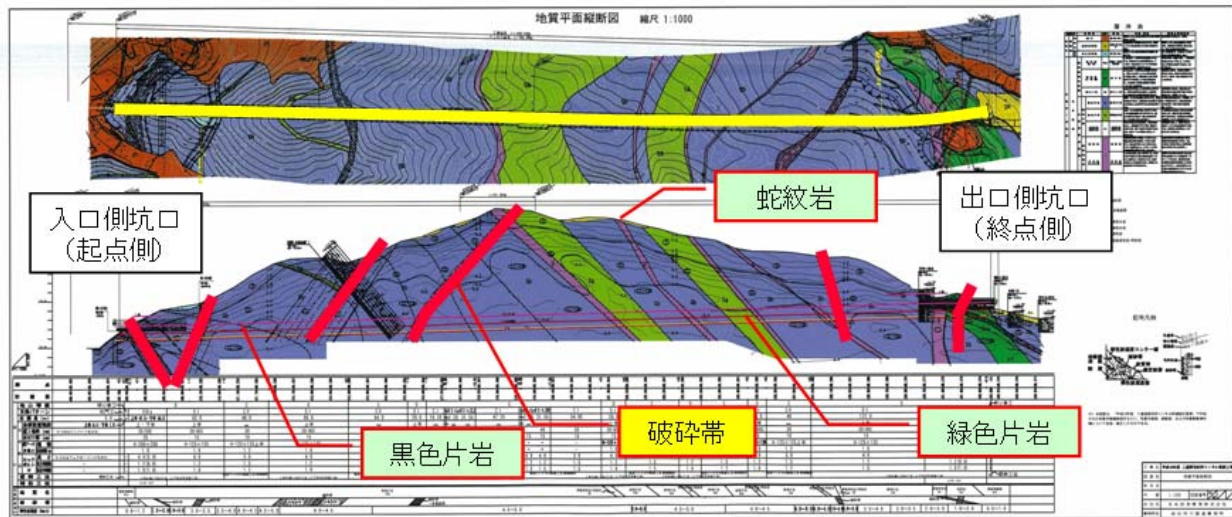


図-10 別所トンネルの地質縦断と平面図

3. トンネル坑口部の坑外からの探査⁷⁾

(1) トンネル坑口部における課題

トンネル坑口区間では、土被りが小さく地山の風化・浸食作用によって地山が脆弱化し施工上課題となる場合が多く、切羽前方探査に対するニーズが高い。しかしながら、坑口部で発破を用いて探査することは各種制約から困難であり、坑口部で発破を起震源とするTSPやHSPを実施することは現実的ではない。SSRTでは坑外から機械震源を用いて支障なく探査することが可能であり、SSRTのトンネル出口側への地山評価に適用した事例を既に報告した³⁾。

トンネルの事前調査では、屈折法弾性波探査や鉛直および水平方向のボーリング調査を実施するケースが多い。坑口区間の屈折法では、本坑区間より測線上に受振器を密に配置し、精度の高い探査が実施される。しかしながら、屈折法では地山が概ね水平の速度構造を有すると仮定するので、風化帯などの水平構造の把握に適するが、断層等の鉛直構造を精度良く予測することは原理的に困難である。

一方、鉛直と水平方向のボーリングを併用すれば両方向の構造が把握できる。しかしながら、採取されたコアから予測される地山性状が切羽で観察される性状と必ずしも一致しないケースが散見され、ボーリング調査にも限界があるのが実状である。

以上から、坑口部において事前に支保構造や補助工法を選定する際に、その必要性や区間延長を判断する客観的な調査資料として、従来の屈折法やボーリング調査では不十分な場合があり、SSRTのようなVSP処理に基づく反射法弾性波探査を活用することが、施工上有益であると考えられる。

(2) 坑外からのSSRT探査の実施と結果

a) 現場概要と地質概要

三遠南信道路別所トンネル工事（以下、別所トンネルと称す）は、ほぼ全線に渡って三波川変成岩類の黒色片岩が分布し、黒色片岩中の挟在層として緑色片岩、蛇紋岩、超塩基性岩類が分布すると想定されていた。図-10に、別所トンネルの地質縦断および平面図を示す。図の左側が掘削を開始する入口側坑口で、右側が出口側坑口である。これらの変成岩類は、過去のトンネル施工においてトラブルを発生した事例の多い地山に相当する。

片岩類はトンネルに対して45～60°とやや高傾斜で受け盤に発達し、いくつかの破碎帯の発達が想定されていた。この破碎帯は片岩類の方向性とは異なり、主に流れ盤構造で発達する。入口側坑口の土被りの小さい区間は、比較的なだらかな平坦面となりその前後に破碎帯が発達すると想定されていた。

以上から、入口側坑口部の坑外から実施するSSRTは、この破碎帯（その位置や幅等）を的確に把握して施工に反映することを目的とした。

b) SSRT探査の実施と結果

本トンネルの入口側坑口の底盤高さは、原地盤から比高差約7m上部となり、坑口前面の敷地を盛土造成し、トンネル仮設備用ヤードとして使用する計画である。さらに、トンネル坑口までの取り付けは、補強盛土による仮設道路の構築が計画されていた。

SSRT探査測線は、ほぼ平地でトンネル縦断方向に延長約50mを確保する必要がある。よって、本現場では坑外からSSRTが実施可能な時期は、坑口ヤードの造成が完了し、仮設備の建て方が開始される直前に限定されていた。

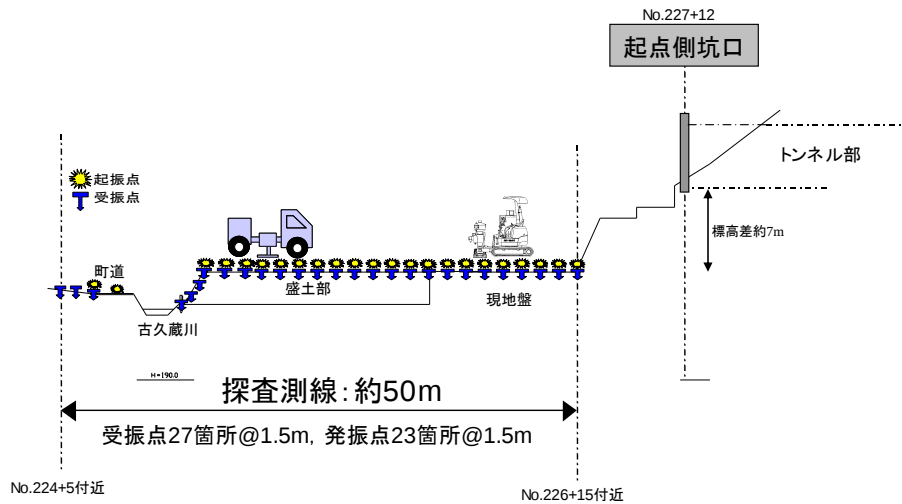


図-11 別所トンネル入口側坑口における坑外からのSSRT探査機器配置状況の概念図

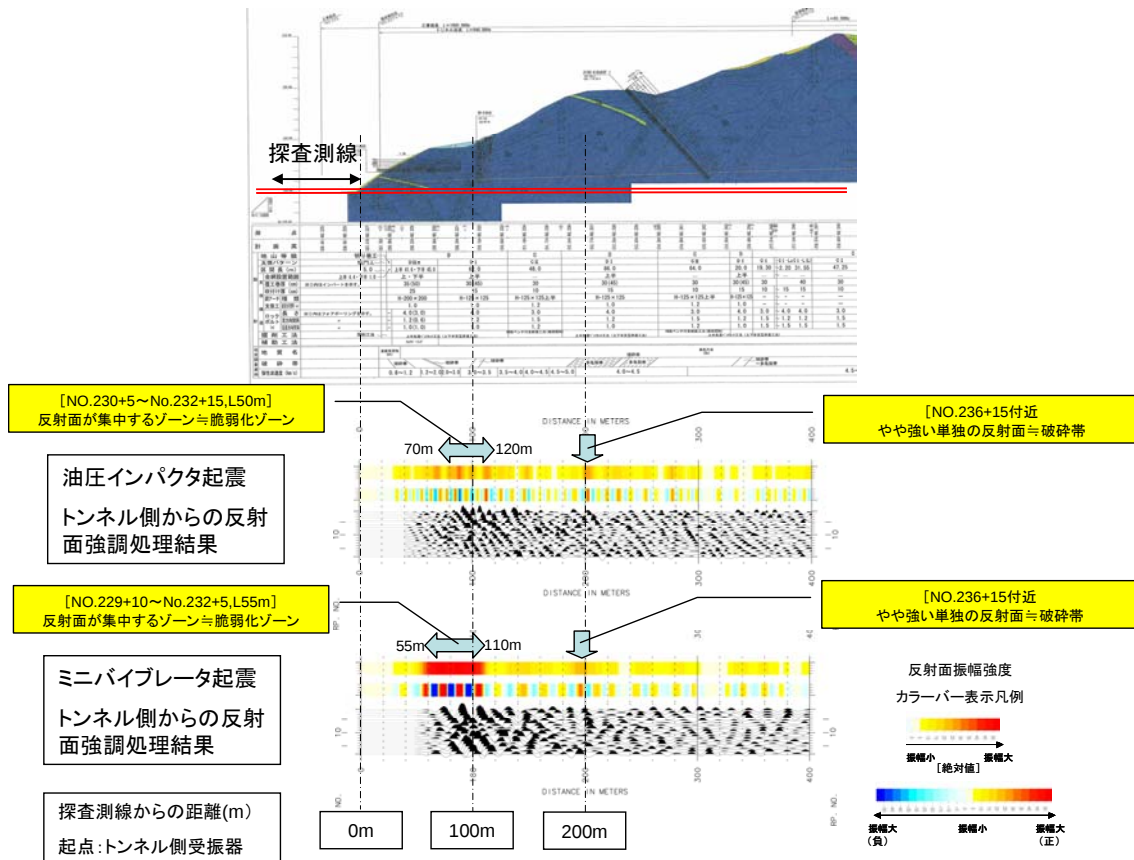


図-12 起震源別の切羽前方探査結果と反射面の抽出

図-11に、別所トンネル入口側坑口における坑外からのSSRT探査機器の配置状況概念図を示す。

起震源としては、坑内におけるSSRTで実績が多く探査深度150m程度までに有効な油圧インパクトと、起震力が大きく探査深度300m程度が期待できるミニバイブレータを併用した。探査測線は、古久蔵川を横断し一部平坦面ではないが延長約50mを確保した。受振器（ジオフォン）は通常坑内で用いている卓越

周波数100Hzと表面波ノイズを考慮して卓越周波数10Hzのものを併用し、間隔1.5mで27箇所設置した。発震点は受振器近傍で傾斜地の影響で発震できない箇所を除き23箇所を選定した。油圧インパクトは10回スタッキングを実施し、ミニバイブレータは周波数20-160Hzでスイープした。

図-12に、油圧インパクトおよびミニバイブレータを起震源とした切羽前方からの反射面強調処理結

果を示す。切羽前方予測の距離同定に用いる地山弾性波速度としては、地山新鮮部の速度を考慮して $V_p=4.0\text{km/s}$ を採用した。

油圧インパクト起震では、探査測線から70～120m 区間に反射面が集中するゾーンが確認でき、200m 付近にやや強い単独の反射面が確認できる。ミニバイブレータ起震もほぼ同様に、探査測線から55m～110m 区間に反射面が集中するゾーンが確認でき、200m 付近にやや強い単独の反射面が確認できる。両震源共に、それ以外に目立った反射面はない。よって、反射面が集中するゾーンを「地山が脆弱化したゾーン」と想定し、やや強い反射面が確認できる箇所を「比較的硬質な地山中に発達する破砕帯」と想定した。その他の区間は比較的硬質でほぼ安定した地山であると評価した。

掘削中の切羽観察結果から、坑口側の反射面が集中するゾーンは、破砕帯が発達するゾーンではなく地山全体が風化作用を強く受けた強風化～風化ゾーンであることが確認された。一方、探査測線から約200m 付近では、緑色片岩が粘土化した幅3～4m 程度の破砕帯を確認した。

以上のように、坑外から実施したSSRTに基づく切羽前方地山の予測結果は、ほぼ予測通りの現象を掘削中に切羽で確認できたと言える。

(3) 考察

本探査で得られた波形記録には、表面波ノイズが非常に多く記録され、特に卓越周期10Hzの受振記録にノイズが多かった。よって、前方予測には卓越周期100Hzの受振器で得られた記録を採用し、波形処理における速度フィルタの設定を試行錯誤して確定し、ノイズがほぼ除去されたと考えられる波形から反射記録を抽出した。しかしながら、トンネル坑内におけるSSRTと比較してS/N比（Signal to Noise ratio：信号とノイズの比であり波形記録の品質を表すパラメータ）がかなり低い。

一方、両起震源の反射記録は数10m程度のずれで非常に調和的な反射記録となっており、S/N比が低く品質はやや劣るものの、掘削記録との対比から相応にトンネル路線の地山性状を反映した反射記録が得らることができたと考えられる。

4. おわりに

本稿では、特殊条件下のトンネルにおける切羽前方探査SSRTの適用事例として、TBM先進導坑および坑口部の坑外からの探査結果を紹介した。両適用事例共に、SSRT探査結果と掘削実績との対比から、施工前に切羽前方の地山情報を的確に得ることができたと考えられ、SSRTの汎用性が高いことが示された。

なお、SSRT探査結果からトンネル地山の土木地質的考察を実施するためには、探査実績の蓄積が重要であることは言うまでもなく、今後も様々な地質条件および施工条件のトンネルに適用し、探査事例を収集することが重要であると考えている。

参考文献

- 1) 加藤卓朗, 柳内俊雄, 村山益一, 清水信之: 油圧インパクトを起震源とする切羽前方弾性波反射法探査の開発と適用, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 22-28, 2001.
- 2) 加藤卓朗, 村山秀幸, 清水信之, 岡村浩孝, 望月齋也: トンネル坑内および地表からの弾性波反射法を用いた切羽前方探査, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, pp. 171-176, 2001. 11.
- 3) 加藤卓朗, 村山秀幸, 浦木重伸, 浅川一久, 柳内俊雄: 弾性波反射法とトモグラフィ解析を用いた坑口周辺部の地山評価, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第12巻, pp. 263-268, 2002. 11.
- 4) 村山秀幸, 末松幸人, 萩原正道, 間宮圭, 清水信之: 異なる起震源を用いたトンネル切羽前方探査の比較実験について, 土木学会トンネル工学研究報告集, 第15巻, pp. 227-234, 2005. 12.
- 5) Shimizu, N., Murayama, H., Asada, H., and Hagiwara, M., 2006, The Comparison of Different Seismic Sources in the new method for Seismic Reflection Survey ahead of a Tunnel Face, *Proceedings of The 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics, Chinese Geophysical Society & CUG*.
- 6) 村山秀幸, 上野博務, 福田秀樹, 黒田 徹: TBM 先進導坑内における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16巻, pp. 99-106, 2006. 11.
- 7) 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, 第17巻, pp. 67-73, 2007. 11.