

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

Application of Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT) executed from outside to estimate the geological conditions at the tunnel entrance zone

村山秀幸¹・丹羽廣海²・中島耕平³・川中卓⁴・黒田徹⁴

Hideyuki Murayama, Hiroumi Niwa, Kouhei Nakajima, Taku Kawanaka
and Toru Kuroda

¹正会員 工博 株式会社フジタ 技術センター基盤技術研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)

E-mail: murayama@fujita.co.jp

²正会員 株式会社フジタ 技術センター基盤技術研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)

³株式会社フジタ 名古屋支店 別所トンネル作業所 (〒431-2534 静岡県浜松市引佐町別所 958-1)

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)

The authors have developed the Shallow Seismic Refection survey for Tunnels (SSRT) to determine geological conditions ahead of tunnel faces. For the SSRT survey, a hydraulic impactor, vibrator or explosives can be used as the seismic sources according to construction methods and geological conditions of each tunnel applied. In general, because of rock weathering and erosion, the trouble occurs easily at the tunnel entrance and shallow overburden condition.

This paper describes an improved SSRT survey executed from outside at the Bessho Tunnel entrance. The processed results show that characteristic reflection images coincide with the zones of weathering and fault obtained from the SSRT executed from outside.

Key Words : Geological prediction ahead of tunnel faces, Shallow Seismic Reflection survey for tunnels (SSRT), Tunnel entrance zone, Survey executed from tunnel outside

1. はじめに

トンネル工事において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、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、地山弾性速度 $V_p=3.0\text{km/s}$ 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、幅広い地山に適用性がある⁴⁾。一方、特殊な地山・地形条件におけるSSRTの適用事例^{1)~6)}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、④外径5mのTBM導坑内での切羽前方探査などがある。

SSRTで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、パイプロサイズ)、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。

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の制約から困難であり、発破を起震源とするTSPやHSPを坑口部に適用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をトンネル出口側の坑口区間の地山評価に適用した事例を既に報告した³⁾。一方、掘削開始側の入口側坑口に対するVSP処理を基本とする切羽前方探査は、国内外を問わず報告された事例が見当たらない。

本稿では、三遠南信道路別所トンネル新設工事（静岡県浜松市北区引佐町、延長948m、標準掘削断面積約86m²）の掘削開始側の入口側坑口において、トンネル掘削に先立ち坑外から油圧インパクトとミニバイブ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対する本手法の適用性を検証した結果について報告する。

2. 坑口部における施工課題と切羽前方探査

(1) 坑口部の施工課題と切羽前方探査に対するニーズ

図-1に示すように、坑口部や沢部等の土被りが小さな区間では、風化・浸食作用によって地山が脆弱化し天端や切羽が不安定となると同時に、地すべり・崩壊の発生や地耐力不足等が懸念され、地山の不確実要素が高い区間であると言える。一方、断層等の地質的な弱面が分布することから、沢部や谷部が形成され凹地形を呈すると換言することもでき、このような区間では施工時に地山トラブルの発生頻度が高くなると考えられる。

トンネルの事前調査では上記の設計・施工課題を考慮して、坑口部や沢部で弾性波屈折法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く、本坑区間と比較して事前調査密度が高い区間となっている。

坑口区間の弾性波屈折法では、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ケースが多い。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。また、地山中間部に低速度層が水平に分布するとそれ以降は探査できない。

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捕らえられる。最近の事前調査では、坑口から水平ボーリングが実施されているケースが多く、コア採取や現位置試験によって地山の工学物性や地質性状を把握している。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、ボーリング調査から切羽地質を評価することが困難な場合があるのも現実である。

SSRTあるいはTSP、HSPのようなVSP処理に基づく弾性波反射法で得られる情報は、地山の音響インピーダンスの境界（地山の密度差に起因する弾性波速度の変化面）を反射面構造として捕らえた結果である。すなわち、切羽前方地山からの反射波を捕らえて、その反射面の位置と振幅強度から地山の硬軟変化とその変化位置を予測し

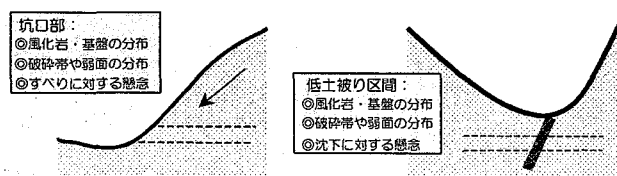


図-1 坑口および土被りの小さい区間における地山課題

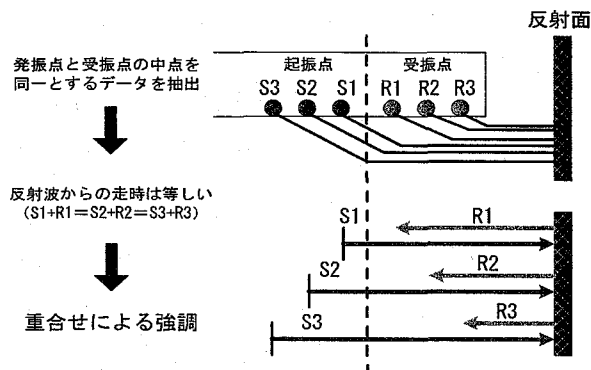


図-2 第一屈折波を用いた重合強調処理のイメージ

ている。ここで、得られる反射面の識別分解能は、地山弾性波速度や震源の卓越周波数等に依存するが最小検知厚さで3m程度と考えられる⁵⁾。よって、得られた反射面は、地山に発達している微細な割れ目等を直接捕らえたものではなく、風化程度の相違や岩質・岩種の相違、比較的規模の大きな断層破碎帯などの地質現象を反映していると想定され、本手法は比較的マクロな調査手法であると位置づけることができる。

SSRTではTSPやHSPとは異なり、図-2に示すようにトンネル底盤での緩み領域を利用して、第一屈折波に対する反射波を重合強調処理して鉛直方向の反射面構造を抽出している。よって、トンネル掘進方向に対する鉛直構造の変化を精度良く予測することが可能となる。

坑口部や土被りの小さい区間では、特に切羽地質が急変する際の対処法が課題となる。よって、施工管理では、地山がどの切羽位置から硬質あるいは軟質に変化するか、その変化位置と区間の予測が注目点となる。さらに、その結果を支保構造の変更や補助工法の採用および変更・採用区間の設定に反映させることが重要となる。

以上から、坑口部の施工課題を考慮して支保構造の選定や補助工法を採用する際に、事前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、従来の弾性波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処理に基づく弾性波屈折法を活用することが、施工管理上有益であると判断することができる。

以上の事前調査と施工時調査における特徴や適用区間における特性を表-1のようにまとめた。

表-1 トンネルにおける主な事前調査と施工時調査の特徴および適用区間における特性一覧

	事前調査手法		施工時調査手法	
	弾性波屈折法	ボーリング調査 (水平・鉛直方向)	TSP/HSP (弾性波反射法, VSP処理)	SSRT (弾性波反射法, VSP処理他)
特 徴	・起震源は発破である。 ・水平速度構造を探索する手法で鉛直構造の把握には不向きである。 ・地山中間部に低速度層が分布するとそれ以深の探索はできない。 ・探索深度は測線延長の1/3～1/5程度と言われている。	・コア採取による地質確認が可能であり、コアの室内試験や原位置試験等で地山の工学的物性を把握できる。	・起震源は発破である。 ・解析手法はVSP処理に限定される。 ・指向性の2成分受振器(TSP)あるいは、3成分受振器(HSP)を用いることで反射面の走向・傾斜(3次元構造)を推定できる。	・起震源として発破、油圧インパクト、パイプロサイズを、現場条件と探索目的に合わせて選択できる。 ・解析手法としてVSP処理による切羽前方と後方強調処理、水平構造解析、トモグラフィ等がある。 ・地山の鉛直反射面構造の探索を基本とする。
適用区間 [坑口部、 沢部等の 低土被り]	・通常、受振点間隔を5～10mで実施する(調査密度高)。 ・水平方向の地山の速度構造の把握に有効である。	・鉛直ボーリングは水平構造の把握に適しており、さらに水平ボーリングを併用すれば、鉛直構造も把握できる。 ・最近、坑口から水平ボーリングが実施されている場合が多い(調査密度高)。	・坑外での発破使用には各種制約がある。 ・TSPは原理的に坑外で探索できない。 ・坑内からの沢部探索では地表面の影響を受けやすい。 ・HSPは坑外からの探索実績がない。	・坑口部(出口側)や低土被り区間で坑内外に探索機器を配置して探索した実績がある。 ・機械震源を用いれば坑外での起震に制約がない。 ・第一屈折波を用いてVSP処理するので坑内での探索において沢部の地表面の影響を受けにくい。
適用区間 [本坑区間 (土被り2D 以上)]	・通常、受振点間隔を10～20mで実施する(調査密度低)。 ・土被りが100m超のトンネルでは路線の弾性波速度の把握が困難となる。	・特殊な目的がある場合に実施される(調査密度低)。 ・土被りが深いと延長が長くなること等から高額となり経済性に劣る。	・適用実績が非常に豊富であり実績が多い。 ・探索深度は100～150m程度である。	・10現場で15回程度の探索実績がある。 ・探索深度は、油圧インパクト起震で150m程度、発破・パイプロサイズ起震で300m程度である。
備 考 (精度等)	・地山弾性波速度は地山分類(等級)における目安として支保構造の設計に用いられている。 ・比抵抗探索もほぼ同様な特性がある。	・限定された地点での調査となることから、調査・試験結果と切羽で観察される地山性状が一致しないケースが散見される。	・探索精度となる最小識別厚さに関して議論がなされていない(原理的にSSRTと同様の精度と考えられる)。	・探索精度となる最小識別厚さは、震源の卓越周波数と地山弾性波速度に依存するが、概ね3m程度である。

(2) SSRTの坑口部探索における課題

トンネル坑口部において、切羽前方予測を目的としてVSP処理に基づく弾性波反射法を坑外から実施した事例は過去に見当たらず、今回、坑口部で坑外から実施したSSRTは国内外で初めての試行となる。

図-3に、坑内におけるSSRT探索機器の標準配置を示す。

坑外では、受振点と発震点を配置する測線直下の表層部に弾性波速度が小さく固結度の低い地層が比較的厚く堆積するケースが多い。また、表層地盤が盛土となっているケースも多い。一般に、このような地山条件における探索では、坑内で実施するSSRTと比較して、①振幅の大きな表面波ノイズの影響を受けること、②高周波の減衰が大きく探索の分解能や探索距離が影響を受けることなどが危惧される。

よって、坑外から実施するSSRTでは、表層地盤の厚さが薄く基盤までの深度が浅い方が有利な条件となる。

図-3に示したように、坑内でのSSRTでは、受振点間隔1.5mで受振器を30～40箇所程度設置し、発震点間隔を3mで探索するので、測線延長はトンネル縦断方向に延長45～60mとなる。また、測線上の受振点や発震点はほぼ標高差のない平地であることが望まれる。

よって、坑口部で坑外から実施するSSRTでは、坑口前面のトンネル縦断方向に延長50m程度の平地が確保され

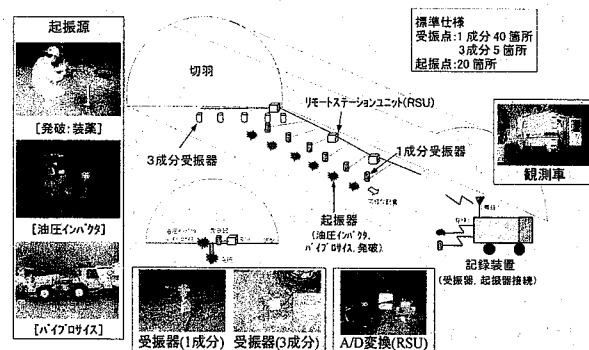


図-3 坑内におけるSSRT探索機器の標準配置概念図

ていることが測定条件となる。さらに、前記①、②の課題に対して、受振点間隔や発震点間隔を通常より密にして探索する方策が考えられる。

3. 適用現場と坑外からのSSRT探索方法

(1) 適用現場の概要と地形・地質概要

国土交通省中部地方整備局発注の三遠南信別所トンネル新設工事（以下、別所トンネルと称す）は、静岡県浜松市北区三ヶ日町の第二東名引佐ICから北上し、長野県飯田市に至る延長約100kmの三遠南信自動車道のうち、最も南側で第二東名から分岐して最初のトンネルとなる。

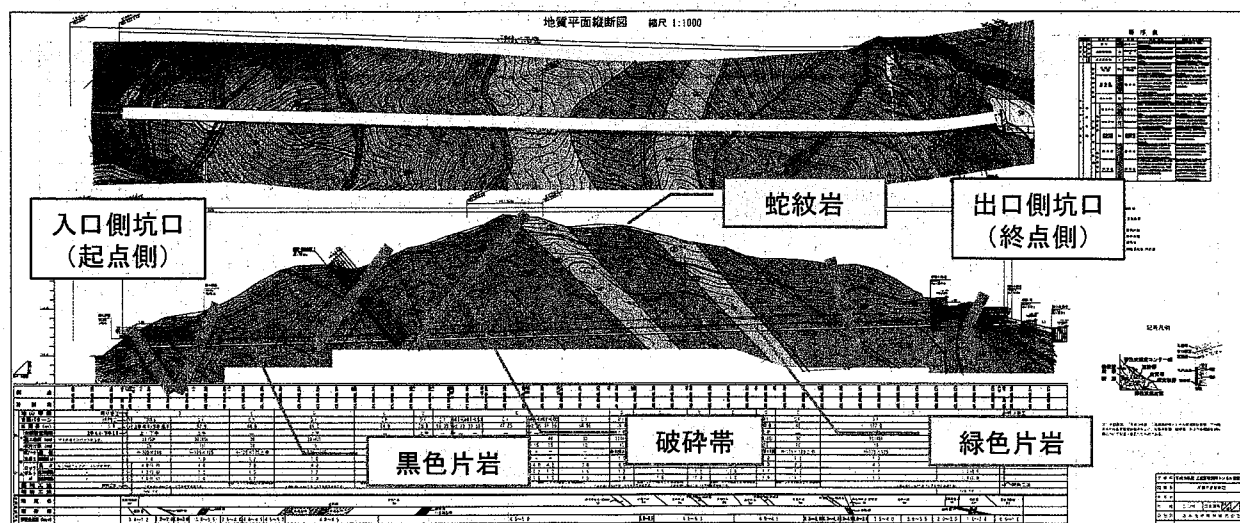


図-4 別所トンネルの地質縦断と平面図

本地域は、静岡県と愛知県の県境をなす城山（標高656.8m）からほぼ東西に延びる標高200～300mの丘陵～山地地形を呈している。本トンネルは中央構造線の南側に位置し、周辺には中生界の三波川・御荷鉾帯と呼ばれる結晶片岩類、蛇紋岩などが帯状に分布している。

別所トンネルは、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-4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（起点側坑口）で、右側が出口側坑口（終点側坑口）である。

結晶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。この破碎帯は結晶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、この破碎帯の確認（その位置や幅等）を的確に捕らえて、設計・施工に反映することを目的とした。また、探査深度は坑口から200m以上を目標として起震源を選択した。

(2) 坑外からのSSRT実施方法

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。

図-5に、造成中の坑口ヤードと坑口の位置関係を示す。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。

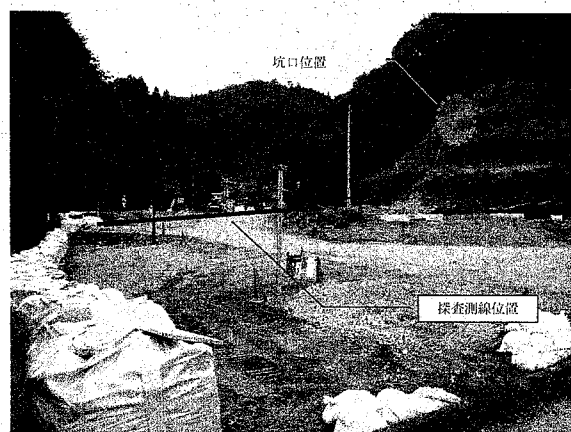


図-5 入口側坑口における造成中の坑口ヤードと坑口位置

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-6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。図-7に、探査状況を平面図と併記して示す。

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。

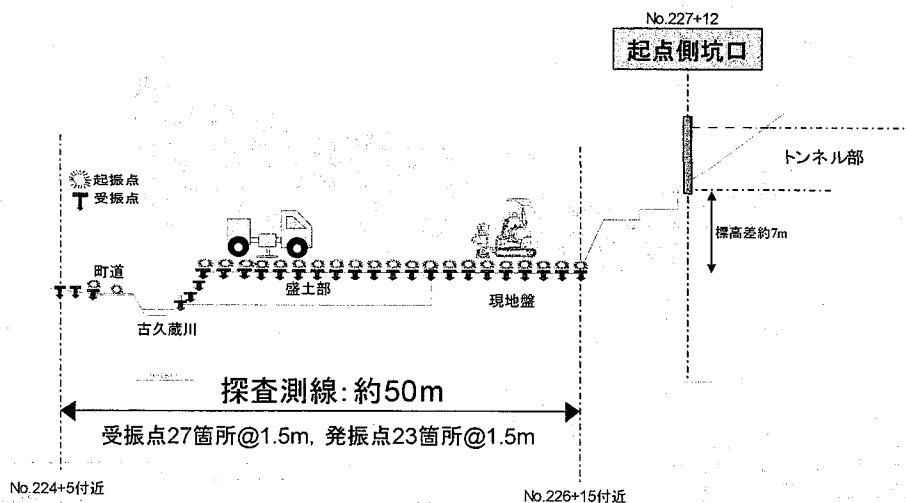


図-6 別所トンネル入口側坑口における坑外からのSSRT探査機器配置状況の概念図



図-7 SSRT探査状況

4. 探査結果と掘削実績の対比

(1) 地山弾性波速度

得られた波形記録には、事前に危惧されたように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た。

屈折法初動解析から、探査測線直下の基盤の弾性波速度は概ね $V_p=3.6\text{km/s}$ であった。事前調査の弾性波屈折法から新鮮部の地山弾性波速度が $V_p=4.0\sim 4.5\text{km/s}$ であることが分かっている。よって、風化作用を受けた基盤の

弾性波速度として得られた $V_p=3.6\text{km/s}$ はほぼ妥当であると考えられる。

一方、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を考慮して $V_p=4.0\text{km/s}$ を採用した。

(2) 坑外からのSSRT探査結果と切羽前方予測

図-8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。結果は、探査測線トンネル側受振器位置を0mとして示している。得られた反射記録から、地形の影響として坑口斜面に相当すると考えられる反射記録が得られたことか

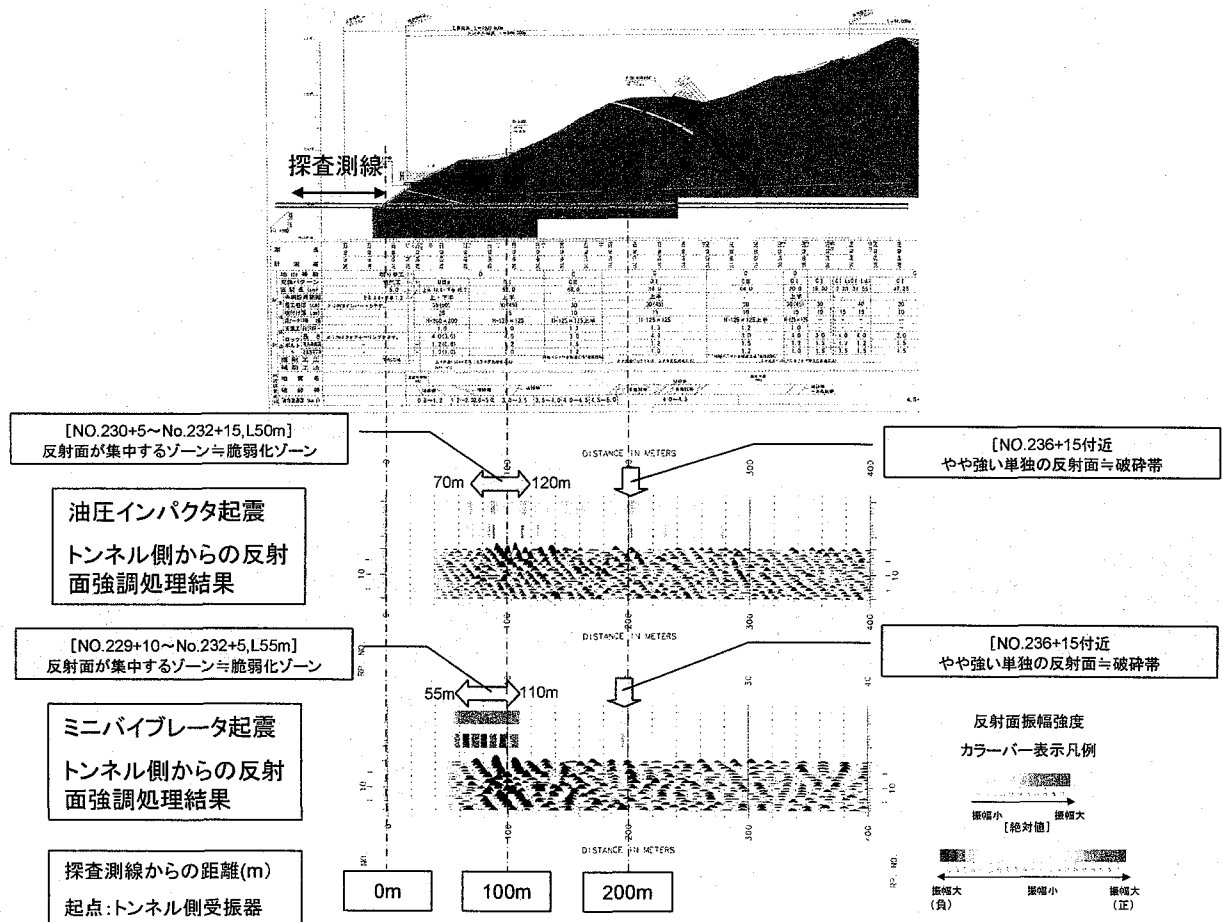


図-8 起震源別の切羽前方探索結果と反射面の抽出

ら、図-8ではこの反射記録を除去して示している。表面波ノイズは波形処理の初期段階で実施す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。両震源の波形記録から、過去に実施した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）がかなり低く、一般論として坑外からのSSRTで得られた反射記録の品質は非常に良好であるとは言いがたいと考えられた。

図-8では、反射面の振幅強度を積算してカラーバーで表現している⁶⁾。この振幅のカラーバー表示から、全体的な反射面強度のコントラストは起震力大きなミニバイブレータで大きく表現され、油圧インパクトはコントラストが小さいことが分かる。しかしながら、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れているものと考えられる。

油圧インパクト起震では、探索測線から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、探索測線から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。

以上の探索結果から、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。

今回の坑外から実施したSSRTの探索深度は、両起震源共に200m程度である。従来、ミニインパクトを起震源とする坑内でのSSRTでは、探索深度300m程度の反射記録⁴⁾が得られていたが今回はその2/3程度であった。坑外からのSSRTで探索深度が浅かった要因としては、探索位置の地盤特性から高周波の減衰が大きかった可能性等が考えられる。

(3) 切羽前方予測結果と掘削実績からの考察

前述の切羽前方予測結果を考慮して、反射面が集中する坑口近傍の土被りの小さい区間に対する補助工法として、土被りをパラメータとして、土被り1.0D以下に対し

て注入式長尺先受け工（AGF）を、1.0～1.5Dに対して注入式ボーリング（PU-IF）を計画した。

最終的な補助工法採用の判断は、切羽観察状況ならびに坑内、地表、地中で実施している計測結果を総合的に勘案して確定する。

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、破碎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、不安定な地山が連続的に露出した。よって、事前調査で破碎帯が2箇所分布すると想定した結果は不的確であったと言える。SSRTではこの強風化帯を50m程度の幅を有する反射面が集中するゾーンとして捕らえており、工学的な評価として脆弱化ゾーンとして評価したので、切羽地質はSSRTでの予測結果とほぼ一致していたと考えられる。

この区間では、坑内変位および地表面・地中変位が大きかったことも考慮して計画通り、注入式長尺鋼管先受け工と注入式ボーリングを施工し、効果的に地山変形を抑制することができた。

その後切羽は、探査測線から120m付近から比較的新鮮で硬質な地山に漸移した。

探査測線から約200m付近では、図-9に示すように緑色片岩が粘土化した幅3～4m程度の破碎帯を確認した。よって、SSRTで得られたやや強い単独の反射面はこの粘土化した破碎帯に相当すると考えられ、SSRT予測結果と一致する。この破碎帯は規模が小さかったことから、特別な施工対応は実施していない。

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。よって、坑外からのSSRTでは表面波ノイズや地形等の影響から、坑内でのSSRTと比較して探査品質が低い反射記録しか取得できなかったが、得られた反射面記録はトンネル切羽前方の地山性状をよく反映していたことが明らかとなった。

5. おわりに

本報では、別所トンネルにおいて掘削開始側の入口側坑口の坑外から、油圧インパクトとミニバイブレータを起震源とするSSRTをトンネル掘削に先立ち実施し、SSRTの坑口周辺地山の評価に対する適用性を検証した結果について述べた。

その結果、坑外から実施したSSRTでは、得られた反射面記録が坑内で実施するSSRTと比較するとその探査品質がやや劣るものの、坑口区間の切羽前方地山の性状をよく反映していることが掘削記録から明らかとなった。



図-9 No.236+15付近(探査測線から約200m)の切羽状況

よって、坑外から実施したSSRTは、坑口部における切羽前方探査手法としても非常に有益であり、SSRTの切羽前方探査に対する適用性が高いことが示されたと言える。ただし、坑外からのSSRTでは坑口ヤード等の条件整備が必要となり、実施できる時期も限定されると考えられる。

一方、本現場ではその後も坑内からSSRTを2回実施し、切羽前方地山を適時予測しながら慎重な施工を続けた。その結果、トンネル全路線の反射面記録を得ることができたのでトンネル地山全線における反射記録の特徴や地山性状および考察については別報で述べることにした⁷⁾。

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振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: 異なる起振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) 丹羽廣海, 村山秀幸, 青山高明, 黒田徹, 東中基倫: トンネル全線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17巻, 2007.11. [投稿中]