

トンネル全線における切羽前方探査の適用

Application of Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT)
on the tunnel entire route

丹羽廣海¹・村山秀幸²・青山高明³・黒田徹⁴・東中基倫⁴

Hiroumi Niwa, Hideyuki Murayama, Takaaki Aoyama, Toru Kuroda
and Motonori Higashinaka

¹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)

E-mail: hiroumi.niwa@fujita.co.jp

²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)

³株式会社フジタ 名古屋支店 別所トンネル作業所 (〒431-2534 静岡県浜松市北区別所 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 1-5-21 茗溪ビルディング)

The authors have developed the Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels (SSRT) to determine geological conditions ahead of tunnel faces. At the Bessho Tunnel, we had applied an improved SSRT survey executed from outside at the tunnel entrance. In consideration of acceptable results of SSRT executed from outside of tunnel, the SSRT survey was executed two more times in this tunnel.

This paper describes the reflection images obtained from the SSRT carried out three times on the Bessho Tunnel entire route. As a result, it was shown that the SSRT survey on the entire route was very profitable to do an evaluation of tunnel geological features from the reflection images.

Key Words : Geological prediction ahead of tunnel faces, Shallow Seismic Reflection survey for tunnels (SSRT), Geological features evaluation of tunnel, Reflection images

1. はじめに

筆者らが開発し適用を進めているトンネル浅層反射法探査 (Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels : 以下 SSRT と称す) は、土被りの小さい区間や、地山弾性波速度の低い地山 (最小 2.4km/s) に適用実績があること、発破以外の起震源を使用することから、地形・地質条件に左右されず、幅広い施工条件に対応できる切羽前方探査手法である¹⁾。

本手法の特徴として、下記のような事項が挙げられる。

- ・起震源に非爆薬の油圧インパクトやバイブロサイスを用いるので市街地や近接施工においても適用可能なこと (発破も利用可能)。
- ・油圧インパクトなどの起震源は機動性に優れていることから精度の高い測定方法である多発震点・多受振点観測を採用できること (条件や探査目的に応じて測定配置を任意に変更可能)。

・地山状況や地形条件に応じた解析手法を採用できること。

・坑口周辺や土被りの小さい区間に適用できること。

三遠南信道路別所トンネル新設工事 (トンネル延長 948m, 以下、別所トンネルと称す) の地山は、地山トラブルの発生頻度が高い三波川結晶片岩類から構成され²⁾、切羽前方地山を予測しながら工事を進めることが安全性および経済性の向上を目指す上で重要となった。

前報では別所トンネルの土被りが小さい坑口区間に対し、坑外から掘削開始側の坑口区間の探査を SSRT で実施した事例について述べ³⁾、坑外から実施する SSRT の有効性について報告した。

本稿では別所トンネルにおいて、坑外からの探査に続いて坑内で実施した 2 回の SSRT 探査による切羽前方予測結果と切羽観察や各種施工データを対比し、予測結果の妥当性を検討した結果について報告する。

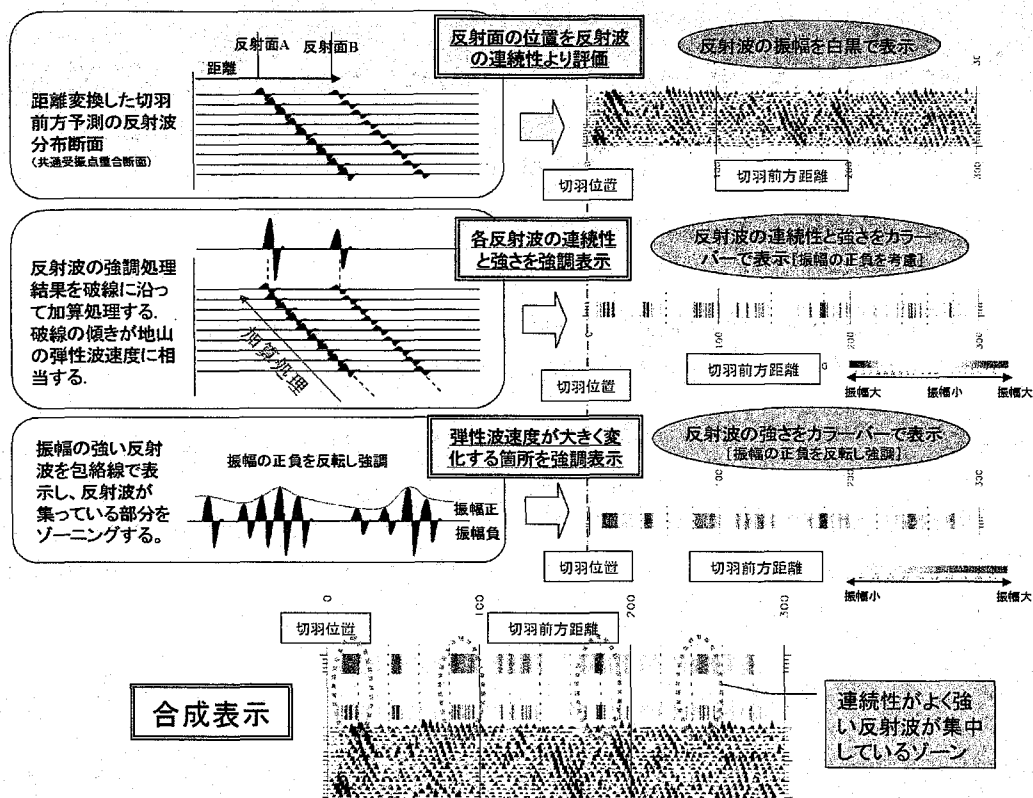


図-1 SSRT で得られた反射波形の表示方法

2. トンネル浅層反射法探査 (SSRT) の概要

SSRT はトンネル坑内で実施する弾性波反射法に相当し、その基本原理 (VSP 処理: Vertical Seismic Profiling) は TSP や HSP と同様である^{4),5)}。一方、TSP や HSP は起震源が発破に限定されるが、SSRT はトンネルの各種条件を考慮して、油圧インパクト、パイプロサイス、発破を起震源として選択できることから様々な現場条件に適用できる手法である。

一般にトンネルの事前調査では弾性波屈折法が広く使用されている。別所トンネルでも事前に地表から高密度弾性波探査がおこなわれている。一方、SSRT や TSP、HSP は施工時に実施される調査である。これらの探査方法の特徴や相違点に関しては前報³⁾で述べたので参照されたい。

SSRT の探査結果は図-1 に示す反射波形として表わされ、切羽前方に反射面がある場合波形は規則的な配列をとる。一般に反射面の集中が見られる箇所には断層破碎帯などがあり、地山脆弱部と評価する場合が多い。このため、探査結果は反射面が集中する箇所を視覚的に分かりやすく表示することを目的として、図-1 に示すような手順で検出された反射波形を振幅の強弱に応じて濃淡を付けたカラーバーで表示することとした。

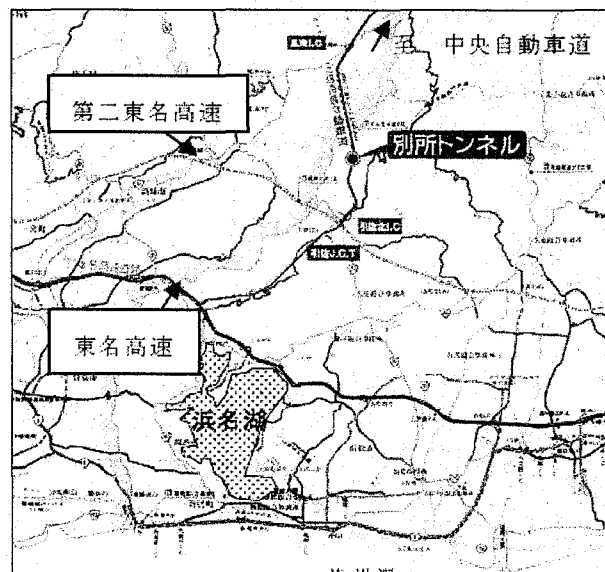


図-2 別所トンネルの位置図

3. SSRT 適用現場の概要と地質的課題

(1) 工事概要

三遠南信自動車道は長野県飯田市から静岡県浜松市三ヶ日町へ至る延長 100km の自動車専用道路で、中央自動車道から建設中の第二東名高速自動車道を通り、東名高速自動車道へと結ぶ道路である。別所

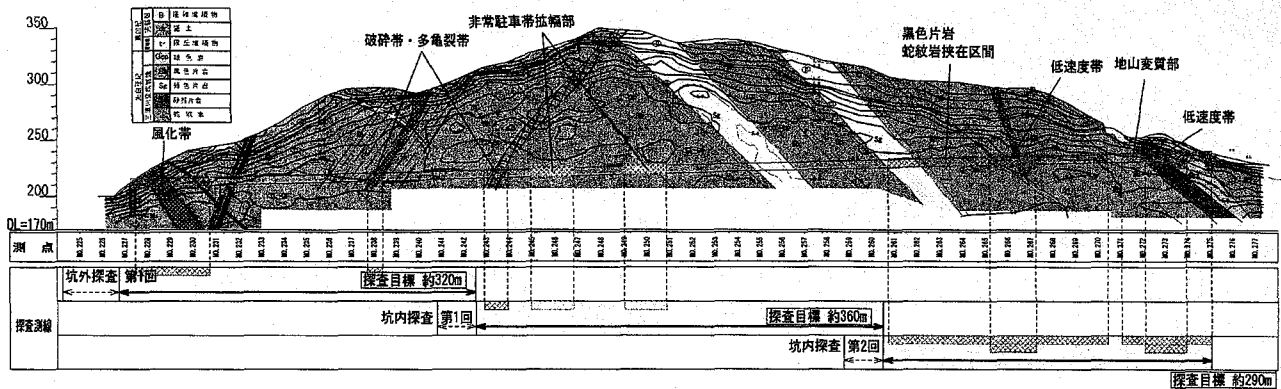


図-3 測線位置と調査ターゲット

トンネルは、第二東名高速自動車道から飯田市方面に入って最初のトンネルとなる延長 948m の山岳トンネルである。図-2 に別所トンネルの位置図を示す。

(2) 地形・地質概要

別所トンネル計画ルートは中央構造線の南側に位置し、三波川変成岩類の分布域にあたる。地山を構成する地質は黒色片岩、緑色片岩などの結晶片岩類を主体とする。

事前におこなわれていた地質調査結果では、トンネル区間起点側に黒色片岩が分布し、中間部から終点側にかけて緑色片岩と蛇紋岩を含む超塩基性岩が出現することが予測されていた。

黒色片岩や緑色片岩など結晶片岩類は、片理面が発達することから脆弱化しやすく、片理面の状態や変質の程度によって切羽の安定が問題となりやすい地質である。また、蛇紋岩は水により劣化を生じやすいことや、膨張性を有することが多く、過去のトンネル掘削において切羽、側壁の押出しや長期的に変位が継続するなどのトラブルを発生した例が知られている²⁾。

一方で事前調査として、坑口部ではボーリング調査がおこなわれているものの、トンネル中間部に関しては地表踏査と地表からの弾性波探査によってトンネル地質が推定されているに過ぎない。このような地質条件から、本トンネルの施工にあたっては掘削に先立ち、あらかじめ切羽前方の地山状態を予測しながら、安全かつ合理的に施工を進めることが求められた。

(3) 前方探査の目的と調査ターゲット

図-3 に当初想定されていた地山状況と探査のターゲットを地質縦断図に示す。

a) 坑外からの探査のターゲット

掘削開始側の入り口側坑外からの SSRT は実績が

ないものの、土被りの小さい坑口部の風化帯の分布規模と、坑口の前約 200m に推定されていた破碎帯・多亀裂帯の検出を目的として、坑口の施工に先立って試行的に SSRT を実施した。

b) 坑内からの第 1 回目探査のターゲット

坑内からおこなった第 1 回目の探査は、トンネル中間部に推定されていた破碎帯・多亀裂帯の地山性状および、掘削断面が大きくなる非常駐車帯拡幅部の地山性状の予測を目的として実施した。

図-3 に示したように当初の想定地質断面図によると、トンネルルートの地質は起点側坑口から黒色片岩が一様に分布し、ちょうどトンネル区間の中央付近から緑色片岩や蛇紋岩を挟在することが想定されていた。しかし、既掘削区間の切羽観察結果では所々に緑色片岩の挟在する区間が確認された。黒色片岩の片理面の状態も一様ではなく剥離性の顕著な区間があり、必ずしも当初想定したとおりの地山状況ではなく、坑口から約 150m にわたって D パターンで施工した。このような地山状況において、掘削断面が大きくなる非常駐車帯拡幅区間は当初 C I パターンで設計されていたため、支保パターンを大幅に見直す必要があると考えられた。

c) 坑内からの第 2 回目探査のターゲット

坑内からおこなった第 2 回目の探査では、中間部に蛇紋岩を挟在するが、ほぼ一様な分布が想定されていた黒色片岩の地山性状、事前の高密度弾性波探査で検出されていた低速度帯 2 箇所の地山性状、および終点側坑口部に分布することが想定されていた蛇紋岩の地山性状の予測を目的として実施した。

この時点における掘削実績から、本トンネルの地山は当初想定されていた黒色片岩優勢の様に近い地山ではなく、緑色片岩、砂質片岩、蛇紋岩などを頻

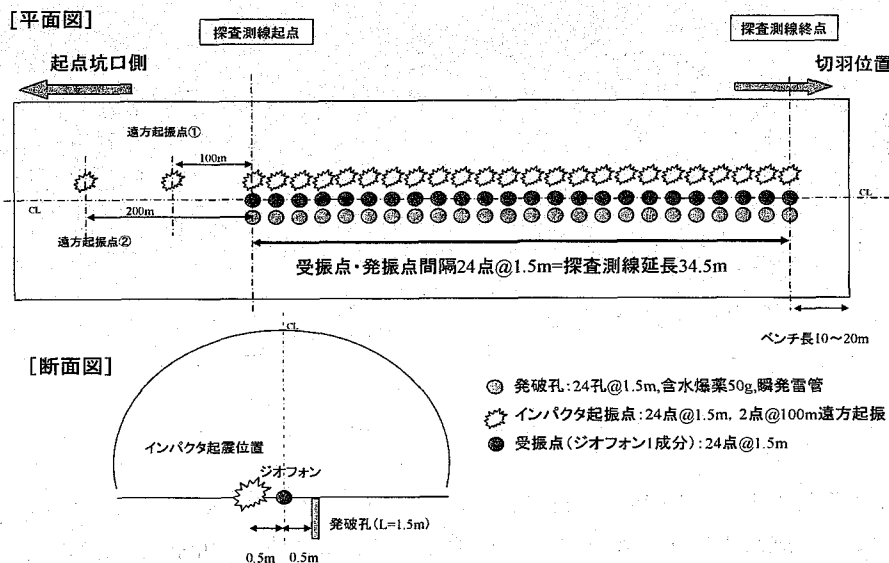


図-4 坑内からのSSRTにおける探索測線展開

繁に挟在し、掘進方向に対して地質変化が激しい地山であることが分かってきた。このような観点から、事前の高密度弾性波探査結果等を見直すと、蛇紋岩の分布規模が想定よりも大規模である可能性や、トンネルルートに2箇所認められる低速度帯に変質や劣化を受けた不良地山が分布する可能性などが懸念された。また、土かぶりが小さい出口側坑口部に当初から想定されていた蛇紋岩分布区間の地山性状を予測することは、坑口対策の検討資料としても有益であると考えられた。

(3) 坑内からのSSRTにおける測線展開

SSRTでは図-4に示すように受振器を掘削底盤に一定間隔に配置し、受振器の近傍を順次発震していく多点発震・多点受振の測定配置を採用する。

坑内での探索測線は、1.5m間隔で受振器を24箇所に配置し、それぞれの受振点から50cm程度離れた位置で発震をおこなった。また、地山の弾性波速度を実測するために、測線の後方100mと後方200mに遠方発震点を設けた。

各受振器はリモートステーションユニット(RSU, 6ch, A/D変換)を経由して記録装置に有線で接続する。発震信号は、油圧インパクトの場合その制御装置から、発破の場合発破器の信号検出器から取得する。

(4) 起震源と受振器の特性

起震源には起震力が大きく前方300m以上の探査に有効な発破と、発破に比べて起震力は劣るが、



写真-1 測線展開および発破による起震状況

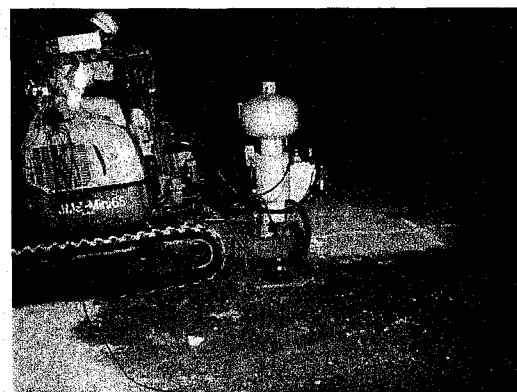


写真-2 ミニインパクトによる起震状況

前方100~150m程度の探査に精度が高い油圧インパクトを併用した。写真-1に測線展開と発破状況、写真-2に油圧インパクトによる起震状況を示す。

受振器は卓越周波数100Hzの上下動1成分受振器を使用した。

(5) 解析方法

SSRT では、VSP 処理により探査測線の切羽側からの反射面を強調処理することができるが、探査測線後方（通常坑口側）からの反射面も強調処理できる。解析にあたっては、切羽前方からの反射面を強調処理すると同時に、切羽後方の既掘削区間における反射面の状況も考慮に入れて切羽前方の反射面の評価を実施した。すなわち、既掘削区間の実績（支保パターン、切羽観察記録、計測結果等）と後方強調による反射面構造を対比して、得られた反射面がどのような地質現象（地層境界や断層等）あるいは、地山の工学的性状（硬軟、破碎帯、風化変質、湧水の有無等）に相当するかを検証することによって、当該地山の特性に応じた反射面の評価が可能となる。

4. 反射面の検出結果

図-5、図-6 に坑内からの第2回目、第3回目の探査結果を示す。探査測線をはさんで右側のバーチャートが切羽前方からの反射波をまとめたもので、左側に示すバーチャートが後方反射波をまとめたものである。

(1) 坑内からの第1回目探査

既掘削区間の後方反射波と切羽前方区間の対比をおこなうことにより、地山不良区間を対比するだけでなく、地山が安定していた区間と同様の傾向を示す区間については安定した地山と予測・評価することができる。

切羽前方の予測結果としては、既掘削区間の CII 地山より良好と考えられる反射構造は捉えられなかった。非常駐車帯拡幅断面付近の区間では、当初設計の CI パターンに相当する地山領域は、現状では確認できないと考えられた。

No.254～No.257 付近は、これまでの掘削区間とは異なり多くの反射面が連続している区間で、地山深部での破碎帯あるいは劣化帯を表している可能性が高く不安定な地山状況が連続する「地山不良区間」と想定した。

No.258～No.260 付近には、インパクト起震で反射面の集中が見られたが、発破では不明瞭であり「要注意区間」という評価にとどめた。

(2) 坑内からの第2回目探査

坑内からの第2回目の探査では次のような箇所には反射面の集中が認められた。

No.260+10～No.262+10 付近に、反射面の連続する

部分が2箇所認められ、探査実施時の地山と同様な亀裂が多い黒色片岩および緑色片岩が引き続き出現する地山と予測した。

No.264～No.267 付近に反射面が連続するため不安定な地山が連続的に出現すると予測した。この区間は事前調査の高密度弾性波探査でも、弾性波速度の落ち込みが見られる区間に相当する。

No.270+10～No.275 付近に反射面が連続するため不安定な地山状況が連続すると予測した。この予測結果は終点側坑口部の追加地質調査結果と良く整合している。

5. 探査結果の評価

(1) 施工時の地山状況と探査結果の対比

探査結果をトンネル掘削時の支保選定の目安となる切羽評価点および、地山の硬軟の指標となる火薬使用量（掘削量 1m^3 あたり）と対比し評価・検証する。図-7 のトンネル縦断面図に探査結果と切羽評価点、火薬使用量をまとめて示す。

a) 坑外からの探査

起点側坑口から約 220m の区間の切羽評価点は 20 点～40 点程度と低く、DIII および DI パターンで施工した。なかでも坑口部の風化帯と、坑口から 150m に出現した破碎帯で切羽評価点 20 点前後と低い。坑口部には反射面の集中が確認され、風化帯に相当する切羽評価点 20 点前後の区間と良く一致する。実際の施工で確認された破碎帯は、探査測線の高さがトンネル路線と異なることと破碎帯の方向性から、探査結果よりやや手前に出現したものの、反射面に対応する破碎帯が確認された。

b) 坑内からの第1回目探査

非常駐車帯用拡幅区間は反射面の分布が少なかったため安定した地山であると予測した。当区間は予測どおり良好な地山が確認され、比較的硬質で切羽評価点も高く CII パターンで施工した。

No.254～No.257 には反射面が集中し「地山不良区間」と予測した。この区間は切羽評価点、火薬使用量ともに低く、支保パターンを CII から DI に変更した箇所と一致する。

No.258～No.260 の反射面集中区間は「要注意区間」と予測し、地山はかなり軟質で火薬を使用せず掘削できた区間に相当する。

上記のように、反射面集中ゾーンを軟質地山と想

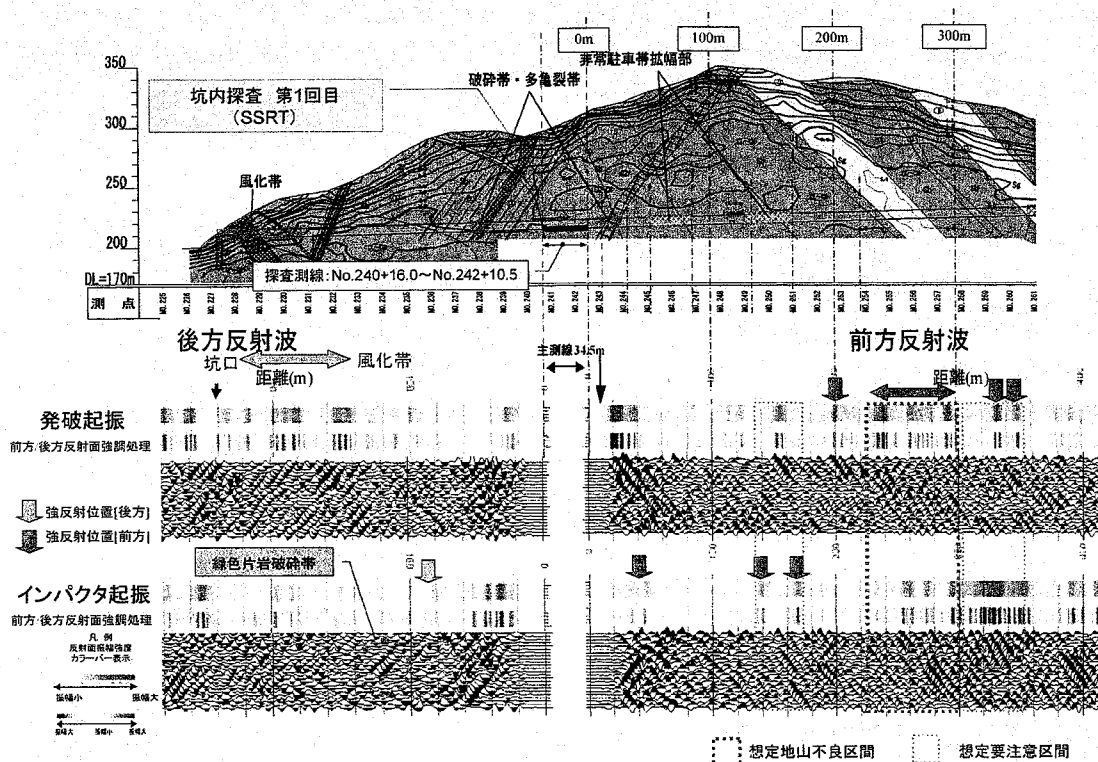


図-5 第1回坑内探査結果縦断面図

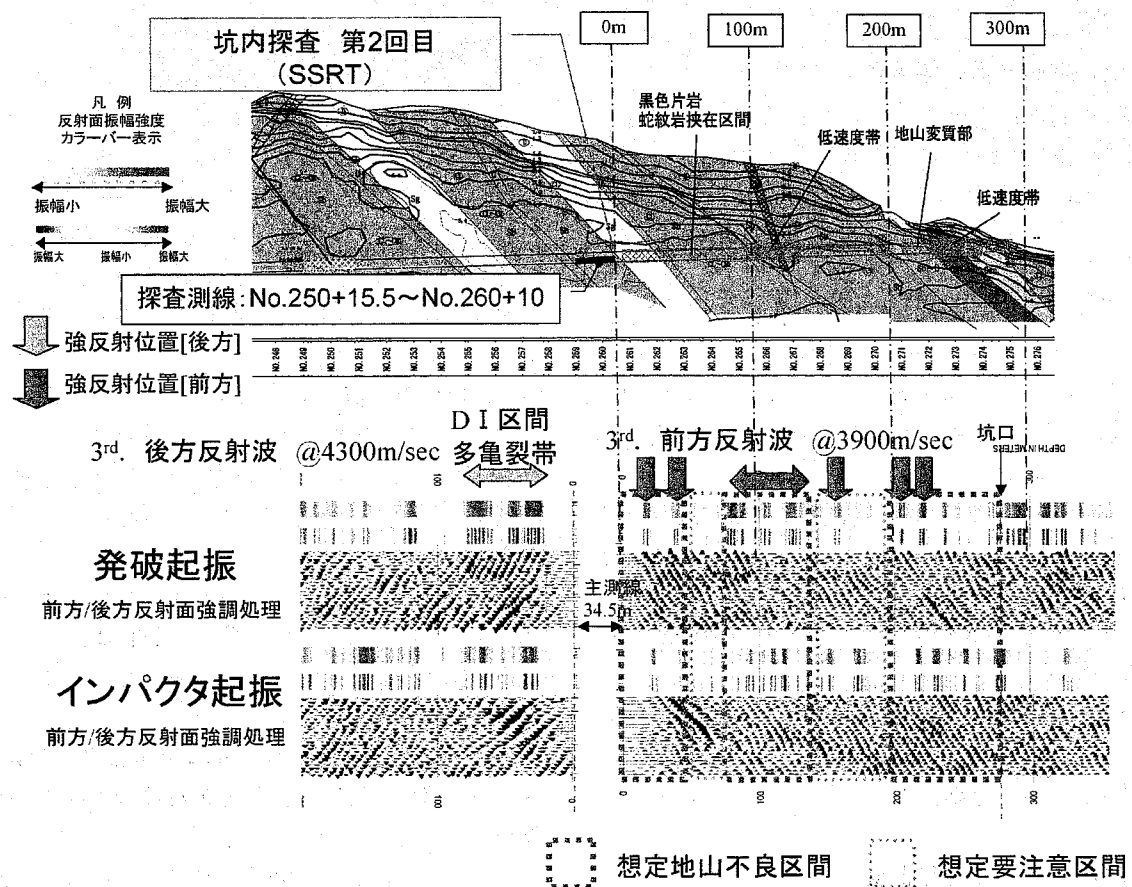


図-6 第2回坑内探査結果縦断面図

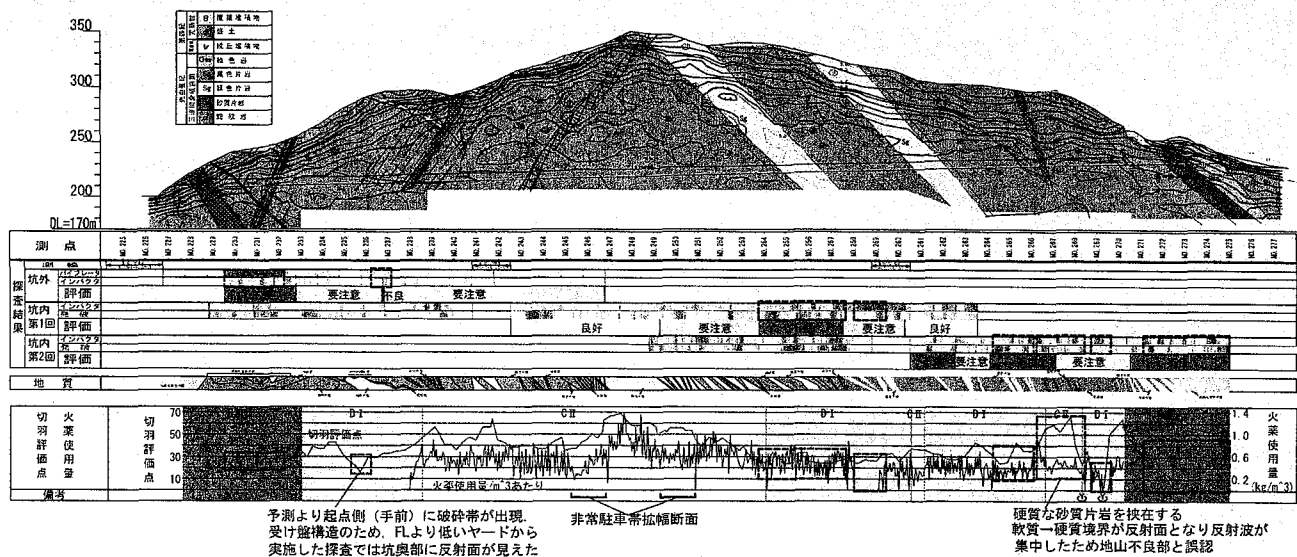


図-7 探査結果と切羽評価点・火薬使用量の対比

定し、施工時にほぼ想定どおり地山脆弱部を確認した。よって、第1回目 SSRT 探査による予測結果は地山の変化と良く整合しており、支保パターン変更の目安として有効であった。

c) 坑内からの第2回目探査

坑内からの2回目の探査をおこなった区間は、結果的に出口側坑口までほとんどの区間が DI～DIII パターンとなったが、反射面の集中区間と切羽評価点、火薬使用量の小さい区間は概ね一致している。

No.260+10～No.262+10 の反射面集中区間は、予測どおり軟質地山が続いた。本区間は一部硬質層が挟在したため CI パターンに変更したがすぐに軟質となり再び DI パターンに戻した区間である。

No.264～No.267 の反射面集中区間は、前後区間に比べて切羽評価点、火薬使用量ともに低く、予測どおり地山不良部が確認されていた。しかし、No.266+6 付近から砂質片岩の挟在があり、比較的硬質な地山に変化したため No.266+12～No.268+6 間は CII パターンに変更して施工した。この砂質片岩分布区間周辺にはいくつか反射面の集中が見られるが、予測とは異なり硬質であった。

要注意区間と予測した区間の中では、No.269～No.270 に規模の小さい反射面集中部が確認されていたが、切羽評価点、火薬使用量ともに大幅に低下した箇所に相当する。ここでは掘削中に滴水程度の湧水があり、亀裂や破砕帯などの地山劣化部に相当すると考えられる。

No.270+15 から出口側坑口にかけて、反射面の集中が認められる。本区間は蛇紋岩化作用を受けて変質した岩石および風化帯に相当する。

(2) 結果評価における課題

No.267～No.269 の砂質片岩分布区間は前後に比べて非常に硬質な砂質片岩が分布していたために反射面が集中したものと考えられる。この区間では軟質な黒色片岩から、比較的硬質な砂質片岩に変化する地層境界に対する反射面を地山不良部と誤認したものと考えられる。

図-8 に起点坑口側の No.267 付近に見られる砂質片岩分布区間の探査結果を拡大して示す。一方、図-9 は地山不良部と誤認した砂質片岩分布区間の探査結果である。探査結果を見直したところ、No.257 付近に砂質片岩が出現しているが、坑内からの第1回目探査の前方反射波と坑内からの第2回目探査の後方反射波に反射面の集中が確認される。この地点では、砂質片岩の岩体の規模が小さく、掘削において火薬量が増えることはなかったため、施工的にはあまり意識することなく通過できたが、本トンネルの地山では砂質片岩のような硬質岩の境界面では反射波が集中するという特徴を有していたと考えられる。

上述のように SSRT で得られる地山の反射波は、地質変化点あるいは変化する区間に集中するので、必ずしも不良地山とその集中ゾーンが一致するわけではない。よって探査結果の解釈を的確におこなうためには、既掘削区間の地山状況と後方反射波を対比することや、出来るだけ多くの探査データを集積したうえで、それぞれの地山特性に合った評価指標を構築してゆくことが有効であると言える。

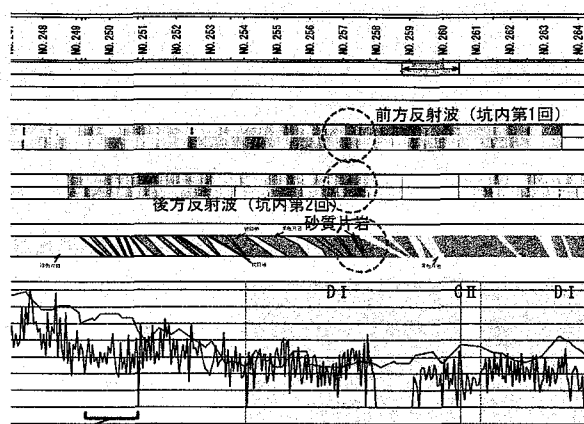


図-8 No. 257 付近，砂質片岩分布域の反射面

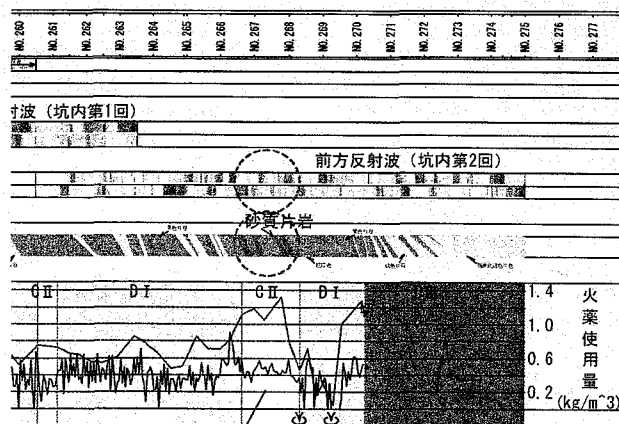


図-9 No. 267 付近，砂質片岩分布域の反射面

6. まとめ

本稿では別所トンネルにおいて，坑外からの探査に続いて坑内で実施した2回のSSRT探査による切羽前方予測結果と切羽観察や各種施工データを対比し，その妥当性を検討した．その成果をまとめると以下の通りである．

- ①本トンネルでは，坑外から実施したSSRTと坑内から2回実施したSSRTにより，延長948mのトンネル全線の反射記録を取得し地山評価を実施した．
- ②切羽前方予測結果は，反射面の集中する箇所を地山不良箇所と評価することにより，概ね施工時の地山状況と整合する結果が得られた．
- ③しかし，軟質な結晶片岩類から硬質な砂質片岩へ変化する境界面でも反射波が集中し，そこを地山不良箇所と誤認した．
- ④それぞれの地山に合った的確な評価指標を確立するためには探査結果と既掘削区間の地山状況の対比によるデータの集積が有効であると言える．

以上より，SSRTをより有効なツールとして活用するためには，個々のトンネルの特性に合った評価

をおこなうことが必要であり，掘削の進行にともなうデータの積み重ねがそのための有効な指標となる．

筆者らは現在日常的にデータを集積する方法として，掘削発破を起震源として利用する日常探査システム（SSRT-D）の開発に取り組んでいる．

参考文献

- 1) 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論文・報告集，第15巻，pp.2227-2234，2005.12.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，2006年制定．
- 3) 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，2007.11. [投稿中]
- 4) 例えば，ジェオフロンテ研究会 新技術相互活用分科会 前方探査 WG:トンネル切羽前方探査技術 技術資料，1997.
- 5) 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・講演会 講演論文集，2000.