

# S波を用いた反射法弾性波探査と時間領域電磁探査の山岳トンネルにおける適用性

丹羽 廣海<sup>1</sup>・村山 秀幸<sup>2</sup>・岡崎 健治<sup>3</sup>・大日向 昭彦<sup>4</sup>・伊東 佳彦<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

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

<sup>2</sup>正会員 工博 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 (同上)

<sup>3</sup>正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

<sup>4</sup>(独) 土木研究所 寒地土木研究所 (同上)

<sup>5</sup>正会員 工博 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (同上)

領家帯片麻岩類を主体とする山岳トンネルにて、S波を使用した反射法弾性波探査と時間領域電磁探査を先進ボーリングと併用して適用した。それぞれの探査手法について施工中のトンネル調査方法としての適用性を検証するとともに、測定原理の異なるそれぞれの物理探査の結果の整合性を検証した。探査結果と先進ボーリング結果、切羽観察結果を対比したところ、全体としては概ね整合性が認められるとともに有意な結果が得られ、これらの探査手法の有効性が確認された。反射法弾性波探査は地山の密実さに関する変化を、時間領域電磁探査は岩種や岩層の変化を表すのに有効であった。ただし、施工時には顕著な湧水が認められず地下水調査としての適用性検証にあたっては不明な点が残った。

**Key Words :** *Geological prediction ahead of tunnel face, Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels(SSRT),S-wave, Time domain electromagnetic method (TDEM)*

## 1. はじめに

山岳トンネルの調査・設計段階で得られる地質情報は、種々の制約から多くの不確実性を含んでいるため、施工段階に確認される地質条件に合わせて設計や施工法を合理的に修正することが、工事の安全性と経済性を確保する上で重要となる。近年では、施工中に実施する切羽前方探査が各種示方書<sup>1)</sup>や技術指針<sup>2)</sup>に記載され、設計段階における限定的な地質情報を施工時に補完しようとする適用事例が増えてきている。トンネル切羽前方探査手法のうち、先進ボーリングは直接地質の状態を観察できること、トンネル掘削前に地下水を排除する効果も併せ持つことから、多くのトンネルで適用され実績の多い手法である。しかし、先進ボーリングで得られるのはボーリング孔の周辺の情報に限られ、必ずしも切羽全体の地質を表すものではない点や、ボーリング孔が水みちに当たらずに裂か水の存在を見落とすことがある点などが問題となる。一方で、弾性波探査や電磁探査は、数cmオーダーの地質構造等を把握するほどの分解能は無いものの、ある程度の広がりを持った範囲に対する物性を評価する

方法であると考えられ、マクロな地質情報を把握するためには適用性が高い方法であると考えられる。弾性波のうちS波は、P波と比較して振幅が大きくエネルギーが高いことから減衰しづらく、P波が固体、液体、気体(音波)を伝播するのに対して、S波は固体のみを伝播する。一方、電磁探査で得られる比抵抗特性は地層の含水比や地下水状況と良い相関があることが知られている。以上の特性から、S波および電磁波を使用した探査は、トンネル切羽前方の地下水状況を把握するための調査手法として期待できる。

本稿では、全線に対して先進ボーリングが計画されていた片麻岩類を主体とする山岳トンネルで、S波を使用した反射法弾性波探査と、時間領域電磁探査を併用しておこなった事例について報告する。また、各探査手法について、施工中におけるトンネル調査方法としての適用性を検証するとともに、先進ボーリング結果および施工時の切羽観察結果と対比することによって探査結果を評価し、測定原理の異なる物理探査の整合性について検証した。

## 2. 適用現場の概要

適用現場は、愛知県蒲郡市に位置する国道 23 号蒲郡バイパスの神ノ郷トンネル（国土交通省中部地方整備局名四国道事務所発注、延長 373m、内空断面積 63m<sup>2</sup>、最大土かぶり約 60m）である。付近の地質は西南日本内帯の領家帯に属し主として領家変成岩類が分布する<sup>3)</sup>。領家変成岩類は、美濃帯堆積岩コンプレックスの泥岩、砂岩およびチャートなどを原岩とし、地下 10 数 km において高い温度および圧力を受け形成された岩石（変成岩）である。この変成岩が形成された時期は約 1 億～約 6 千万年前とされており、地質年代区分では中生代ジュラ紀～白亜紀前期に相当する。本工区周辺ではこの領家変成岩類のうち砂質片麻岩および泥質片麻岩が分布する。

本トンネルでは施工中の調査として、全線に対する先進ボーリングが計画されていた。

## 3. 調査方法

### (1) S波を用いた反射法弾性波探査

弾性波探査は、VSP 処理に基づくトンネル浅層反射法探査<sup>4)</sup>（Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels, 以下 SSRT と称す。）を採用した。S 波用震源としては、SSRT で通常 P 波の震源としても使用している油圧インパクトを使用した。写真-1 に示すように、本震源は、ベースプレートの打撃角度を左右で鉛直から 35° まで傾けることができ、ベースプレートを傾斜方向から打撃することにより、せん断波を地盤に伝播させやすい構造となっている。S 波の受振器には、S 波専用で筐体を加工した卓越周波数 30Hz の水平動ジオフォンを採用した。P 波の受振器には分解能向上を目的として卓越周波数 100Hz の上下動ジオフォンを採用した。また、振動記録装置は、多チャンネル地震探鉱機（G-DAPS Light）を使用した。発震信号（TB）は油圧インパクト側から探鉱器に有線で送信し、総チャンネル数 72ch、サンプリング間隔 0.5 ミリ秒、データ長 2 秒として記録した。

本調査では、トンネル坑内に展開した測線で P 波および S 波の発震、受振をおこない、切羽前方の反射面分布を求めた<sup>5)</sup>。



(a) 左からの打撃状況

(b) 右からの打撃状況

写真-1 油圧インパクトによる S波発震状況

### (2) 時間領域電磁探査

電磁探査は、時間領域電磁探査法<sup>6)</sup>（Time domain electromagnetic method, 以下 TDEM と称す。）を採用した。従来の TDEM は、ヘリを利用した地表ソース型の手法で、広域でアクセスの難しい山岳地帯での調査、火山活動の観測等に活用されているが、本調査では小型化され人肩での測定が可能になった機材を用いて実施した。測定は、写真-2 に示すように地上部の測線上において、地盤に電流送信した際の誘導磁場で生じる二次磁場を人肩で背負った機材で測定した。

本調査では、トンネルの計画位置とその両側（測線間隔 40m、測定間隔 10m）で縦断方向に順次測定を行った。TDEM は、信号源として両端を地表に設置した線状ケーブル（本調査では、ケーブル長 350m、センターから 150m の箇所）に設置）から時間変動電流を地盤に送信し、その電流の通電と遮断後の磁場応答を測定・解析することで地盤の比抵抗構造を推定する方法である。測定では、地上部の測線上において、地盤に電流送信した際の誘導磁場で生じる二次磁場を人肩で背負った機材で測定した。解析では、測点箇所の鉛直磁場の過渡応答曲線をもとに、その構成周波数に応じた水平多層構造の一次元の比抵抗分布を求め、仮定した初期モデルとの整合性を非線形最小二乗法によって計算することで、最適な比抵抗構造を作成した。この測定地点における一次元の比抵抗構造を、測線ごとに配置・補間することで地山の比抵抗分布を求めた<sup>7)</sup>。



(a) 人肩による機材運搬状況



(b) 測定状況

写真-2 時間領域電磁探査法（TDEM）の測定状況

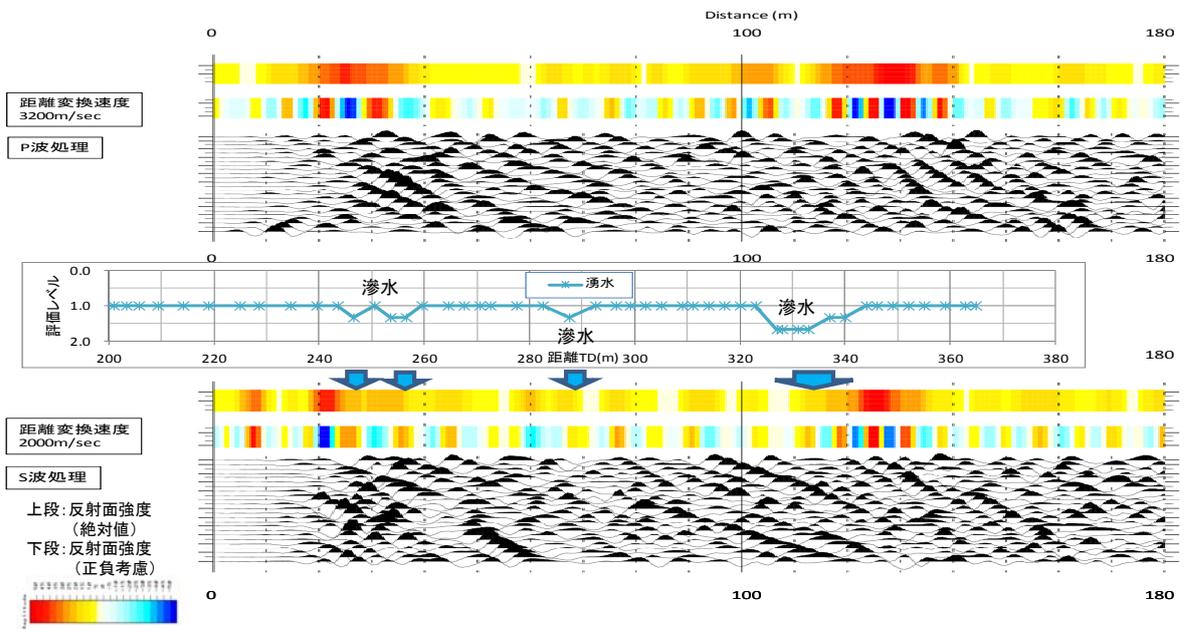


図-1 P波およびS波による反射法弾性波探査結果

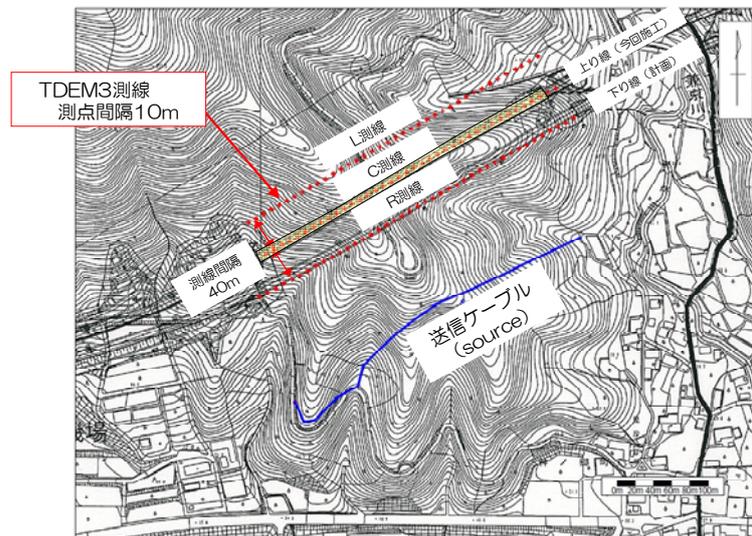


図-2 TDEM測線配置図

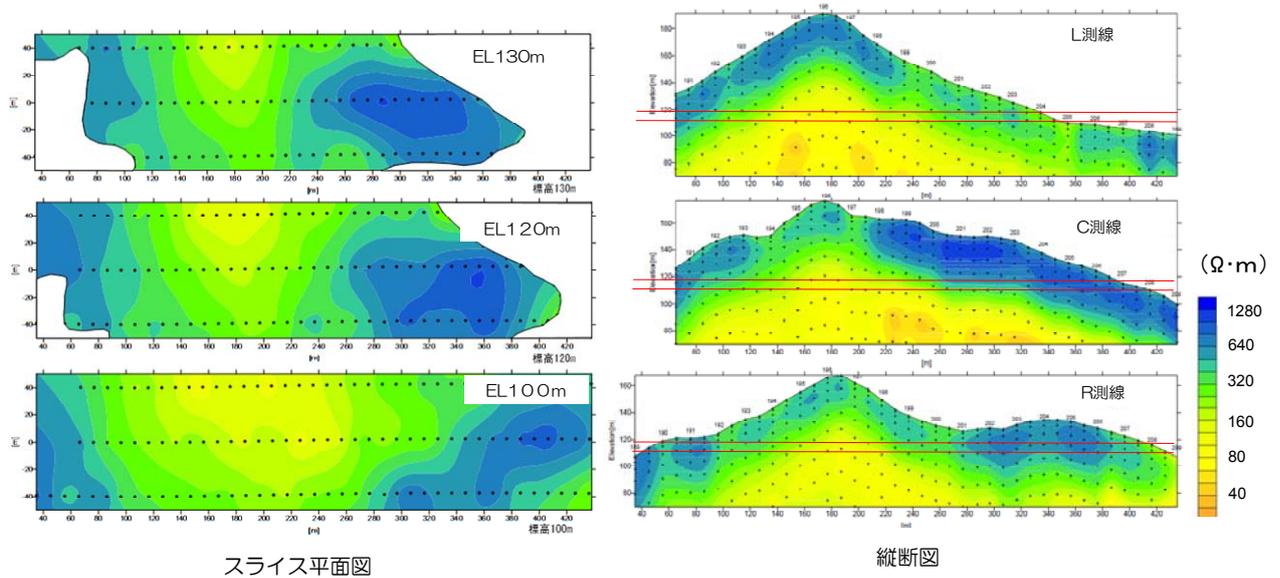


図-3 TDEMによる比抵抗分布図

## 4. 調査結果

### (1) 反射法弾性波探査結果

図-1は、上段にP波による反射法弾性波探査（SSRT）結果、下段にS波を用いた反射法弾性波探査結果を並べて示した縦断面図である。図より、S波による反射面は、P波よりコントラストがやや小さいが、2区間に反射面が集中する箇所が確認できP波結果とよく整合する。一方、本トンネルでは湧水はほとんど確認されなかったが、図に切羽で滲水があった箇所を明示した。S波を用いた探査結果では、滲水箇所と反射面記録に相関性は見られなかった。

### (2) 時間領域電磁探査結果

図-2にTDEMの測線配置、図-3に結果を示す。図より、比抵抗分布は深部ほど低い傾向が3測線ともに認められる。一般に固結度の低い地層ほど比抵抗が低いため、比抵抗分布は深部に向かって高くなるのが一般的だが、本調査結果は逆の傾向を示している。表-1に、付近の露頭で実施した4極法による砂質片麻岩の比抵抗値の実測結果および、調査ボーリング孔で実施された電気検層結果に基づくその他の岩種の比抵抗値を示す。表より、泥質片麻岩では砂質片麻岩に比べて1~2オーダー低い傾向があることが明らかとなった。比抵抗値が深部に向かって高くなる原因については、既報<sup>7)</sup>にて考察を述べているが、深部で泥質片麻岩の混在部分が多いため比抵抗値が低下していることが主な原因と考えた。

## 5. 施工実績との対比

図-4に先進ボーリング結果を記載したトンネル縦断面図、切羽観察結果に基づく実績の地質縦断面図、実績支保パターンおよび切羽評価点、反射法弾性波探査結果、TDEM結果を並べて示した。トンネル縦断面図には、先進ボーリングでコアが砂状~礫状となって採取された区間を併記した。地質縦断面図には小規模破碎帯、泥質片麻岩の挟在が確認された区間および坑口部の風化帯の分布を併記した。

### (1) 反射法弾性波探査結果と施工実績の対比

図より、反射法弾性波探査において反射面の集中が見られる2区間は、実績の地質縦断面図における小規模破碎帯（T.D.235~245m）および、風化帯（T.D.345~375m）におおむね相当する。この区間付近は先進ボーリングにおけるコアが砂状~礫状となった区間とも一致する。よって、破碎帯に伴う亀裂が密に発達した地山または風化帯に伴う土砂化や粘土化した地山に、反射面が集中して

表-1 岩種、風化状態別の比抵抗値

岩種	比抵抗(Ωm)	測定方法
砂質片麻岩(露頭・強風化)	100~150	4極法
砂質片麻岩(露頭・弱風化)	3,500~4,500	4極法
珪質片麻岩(孔内・新鮮部)	300~1,000	電気検層
砂質片麻岩(孔内・新鮮部)	250~800	電気検層
泥質片麻岩(孔内・新鮮部)	10~200	電気検層
花崗岩	200~40,000	参考値 <sup>8)</sup>

確認されたものと考えられる。

以上より、反射法弾性波探査では、破碎帯に伴う亀裂の間隔や状態、または風化帯に伴う土砂化や粘土化などの、密実さに関する変化を良く表した結果が得られたと考えられる。

なお、P波記録ではS波記録に比べて反射面集中区間の幅が広く検出される傾向にある。また、起点側の反射面集中区間は、P波記録では一連の幅の広い区間として現れているのに対して、S波記録では図中にEvent-1-1、Event-1-2として示したように2箇所に分れて現れている。このようにP波記録とS波記録を対比すると、全体的な傾向は類似しているものの若干異なる結果となった。現時点ではこの原因については不明確であるが、P波およびS波の伝播特性の違いや卓越周波数に起因する分解能の違いを反映している可能性があると考えられるため、今後の検討課題としたい。

### (2) 時間領域電磁探査結果と施工実績の対比

TDEMの結果より表層部に着目すると、実績の地質縦断面図における風化帯（T.D.345~375m）に相当する部分の比抵抗値は、それほど大きな変化ではないものの比較的低くなっており、施工実績と調和的な結果が得られている。一方で、小規模破碎帯（T.D.30~45m, T.D.235~245m）に相当する位置は漸移的な比抵抗値の変化区間に相当するものの、地山状況の変化を明瞭に示唆するほどの比抵抗値の変化は確認されていない。しかし、本探査結果で特徴的な地山深部に確認される低比抵抗ゾーンの分布は、実績の地質縦断面図における泥質片麻岩挟在区間と非常に調和的である。

以上より、TDEMでは、岩種や岩相の変化を良く表した結果が得られたと考えられる。

なお、S波を用いた反射法弾性波探査およびTDEMにより、切羽前方の地下水状況に関する情報が得られる可能性を期待したが、実際の施工時には滲水程度の地下水は確認されたが顕著な湧水は認められず、地下水調査としての適用性については十分に検証ができずに不明な点が残った。

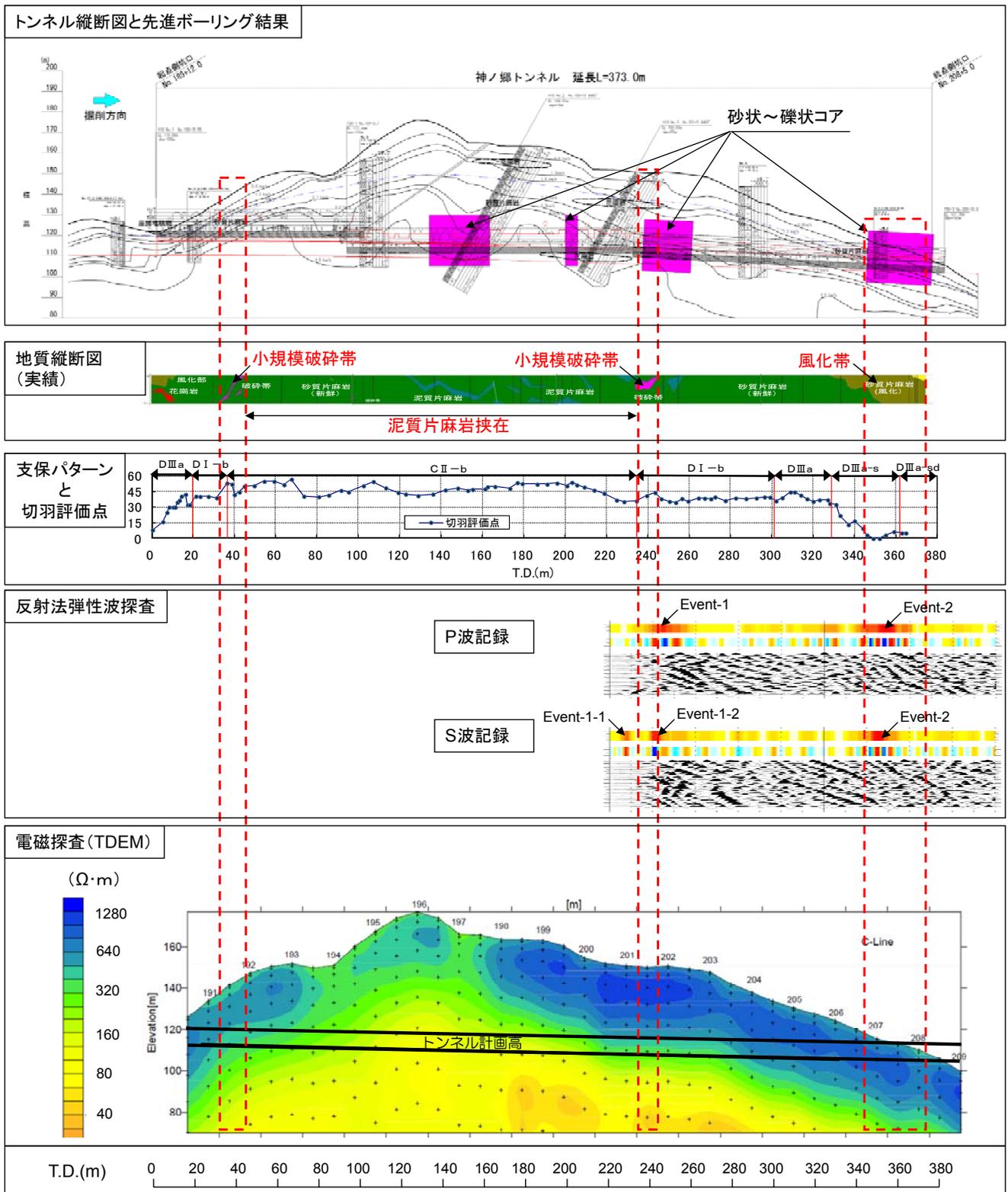


図-4 施工実績と各種調査結果の対比

## 6. おわりに

S波を使用した反射法弾性波探査と、時間領域電磁探査を併用しておこない、先進ボーリング結果および、施工時に確認された実際の地山状況との対比をおこなった。施工実績と対比した結果から、それぞれの探査手法のト

ンネル調査方法としての適用性を検証し、測定原理の異なる物理探査の結果の整合性を検証し、次のような知見を得た。

- S波を使用した反射法弾性波探査と時間領域電磁探査 (TDEM) とともに、有意な結果が得られトンネル施工中の調査方法としての適用性が確認できた。

- ・反射法弾性波探査は、亀裂の間隔や状態または風化帯に伴う土砂化などの密実さに関する変化を表すのに有効である。
- ・時間領域電磁探査 (TDEM) は、岩種や岩相の変化を表すのに有効である。
- ・施工時には顕著な湧水が確認されず、両手法の地下水調査としての適用性を検証するまでには至らなかった。今後は片麻岩以外の地質からなるトンネルにおいても現場実験をおこないデータの蓄積を図るとともに、地下水調査としての適用性について検証してゆきたい。

**謝辞：**反射法弾性波探査の実施および解析にあたっては株式会社地球科学総合研究所の石川浩司氏、藤原明氏をはじめとする関係者の方々にご指導およびご協力を賜りました。また、現場実験にあたっては国土交通省中部地方整備局名四国道事務所に多大なるご協力を賜りました。ここに深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針, pp.69-80, 2009.
- 3) 中島礼, 堀常東, 宮崎一博, 西岡芳晴：豊橋および田原地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 113p, 2008.
- 4) 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, 土木学会第31回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.22-28, 2001.
- 5) 村山秀幸, 鈴木信行, 丹羽廣海, 石川浩司, 藤原明：P波とS波による切羽前方探査と先進ボーリング結果の比較検討, 第13回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.701-706, 2013.
- 6) 城森明：地盤における正弦波の応答とTDEM法の解析, 物理探査学会第85回論文集, pp.355-359, 1991.
- 7) 岡崎健治, 大日向昭彦, 伊東佳彦, 村山秀幸, 鈴木信行, 丹羽廣海：片麻岩トンネル地山への時間領域電磁探査法の適用と地質検証, 物理探査学会第127回論文集, pp.94-97, 2012.
- 8) 物理探査学会：TEM法, 新版物理探査適用の手引き-土木物理探査マニュアル2008-, 235-248, 2008.

(2013.9.2 受付)

## APPLICABILITY OF SEISMIC REFLECTION SURVEY USING S-WAVE AND TIME DOMAIN ELECTROMAGNETIC METHOD FOR TUNNELS

Hiroumi NIWA Hideyuki MURAYAMA Kenji OKAZAKI Akihiko OBINATA and Yoshihiko ITO

We applied seismic reflection survey using S-wave and time domain electromagnetic method comparing with advanced drilling in a mountain tunnel consisted of Ryoke gneiss. This paper reviews the applicability of each methods for investigation method under tunnel construction. And this paper also reviews the coherency of both methods which have different measuring principle. In comparing the results of both investigation and actual geological condition, useful and coherent result was obtained. According to this result, it is useful to carry out seismic reflection survey using S-wave and time domain electromagnetic method for tunnel. Although, we expected to obtain the information of groundwater, but significant result could not obtained since there was little ground water in actual tunnel excavating.