

# 坑内反射法弾性波探査の複合探査による地質リスク予測方法の開発

清水建設(株) 正会員 ○長谷 陵平 正会員 淡路 動太  
 正会員 吉河 秀郎 正会員 青野 泰久  
 正会員 濱洲 良介 正会員 平野 宏幸

## 1. はじめに

山岳トンネルの高速掘進・安全性確保のためには、トンネル掘削時に坑内から実施する各種の調査法を用いて切羽前方地山のリスク評価を行うことが重要となる。坑内からの調査方法には、ボーリング調査・削孔検層などの直接的な地質調査手法と、反射法探査・電磁波探査などの物理探査手法がある。物理探査手法は、直接的な地質調査の方法と比較して得られる地山情報の精細さには劣るが、短時間に広範囲の地山の不連続面の存在可能性や硬軟状況等を把握できるメリットがある。そこで著者らは、物理探査手法の中でも、2つの坑内反射法弾性波探査を組み合わせることで探査精度を向上させる複合探査手法の開発を行っている<sup>1)2)</sup>。

近年、広く実施されている坑内反射法弾性波探査は、比較的短時間で広範囲の地質状況を三次元的に把握し、切羽前方の地質リスクを評価する手法である。しかし、一般的な坑内反射法弾性波探査では、トンネル坑内に起振源と受振点を設置して、切羽前方を解析領域として設定するため、トンネル軸と広角に交差する反射面は検知可能であるが、トンネル軸と平行な断層や水平に近い地質境界などを検出することは難しく十分に検討されていない。一方、帯水層を付帯するような水平に近い地層が卓越する場合には、こうした地質境界がトンネル周辺のどの位置に分布し、どこで交差するかを事前に把握することが地質リスクを管理する上で重要な課題である。そこで本論では、水平に近い地質境界やその境界周辺で帯水層が問題となるトンネル現場を対象とし、2つの坑内反射法弾性波探査を組み合わせることで、対象となる地質境界を日常の施工サイクルの中でモニターすることで比較的精細に把握する手法について報告する。

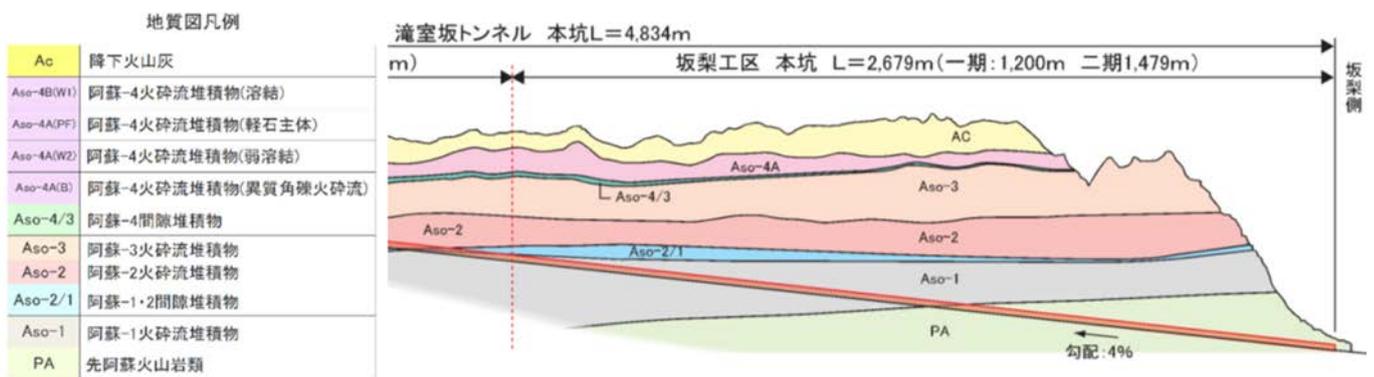


図-1 滝室坂トンネル(坂梨工区)の地質縦断面図

## 2. 地質概要

滝室坂トンネル(坂梨工区)は、全長約4.8kmの滝室坂トンネルの西側工区にあたる(図-1)。トンネルには更新世の先阿蘇火山岩類(PA層)の上に阿蘇1~4の火砕流堆積物(Aso-1~4)と、その間に挟在する間隙堆積物(Aso-2/1:凝灰岩・砂岩, Aso4/3:降下堆積物)がほぼ水平に分布している。Aso-2/1とAso-1の境界部には大規模な帯水層の存在が指摘されている。坂梨工区でのトンネルは約4%の上り勾配となり、各地質境界を下から上に掘削することになるため、トンネル上方の地質境界やトンネルと帯水層の交差位置を正確に捉え、必要な水抜きボーリング等を計画することが重要となる。

キーワード 山岳トンネル, 切羽前方探査, 弾性波探査, 油圧ブレーカ, 地質リスク

連絡先 〒105-8007 東京都中央区京橋2丁目16番1号 清水建設株式会社 TEL03-3561-1111

### 3. 探査手法

組み合わせた2つの坑内反射法弾性波探査は、TSP 303 およびブレーカ探査である。以下にそれぞれの探査手法について記載する。

#### (1) TSP 303

TSP 303 は、トンネル切羽後方の側壁で少量の火薬を用いた発破(発振)を繰返し行って弾性波を発生させ、地質不連続面に反射して戻る波を受振して、記録された波形の解析を行い、反射面の三次元分布を推定するものである。発振は、基本的に24回実施され、発振孔より後方において左右側壁に2本ずつ設置した高感度3軸センサーで受振された波形がレコーダーで記録する。坑内における配置を図-2に示す。TSP 303 は発破を起振源とするため生じる弾性波の振幅が大きく、探査範囲が広がるが、坑壁の削孔、装薬、発破を行うため数時間程度は施工が中断される。

一般的にTSP 303 では、反射面を検知する解析領域を切羽前方に設定し、トンネル軸と広角に交差する反射面を検知対象とするため、水平に近い地質境界を検出することは困難であり、本論で探査対象とする地質に対しては不適切である。そこで、反射波の解析領域をトンネル上方に設定するトンネル上方探査<sup>2)</sup>を適用し、トンネル軸と平行に近い反射面の検知を可能とすることで、トンネル上部に存在する水平に近い地質境界をモニターできるようにした。また、TSP303では3次元探査を行い、 $V_p$ と $V_s$ のそれぞれの速度分布を推定することで、解析対象領域内の動ポアソン比の分布を求めることが可能となる。一般的に $V_p$ は孔隙内の流体の影響を受けて変化するが、S波は流体中を伝わらないので、 $V_s$ は孔隙内の流体の影響を受けにくいことが知られている。すなわち、ある孔隙を持つ地層中に水が満たされると、 $V_p$ は流体を媒介して伝わるようになるので相対的に早くなるが、 $V_s$ は変化せず、見かけ上 $V_p/V_s$ 値が大きくなる。この性質を用いれば、地山中の動ポアソン比 $\sigma$  ( $= \{(V_p/V_s)^2 - 2\} / \{2[(V_p/V_s)^2 - 1]\}$ )の分布を調べることで、地山中の帯水層を検知できる可能性がある。

TSP 303では、トンネル上部の反射面をモニターすることで、水平に近い地質境界の予測を行った。また、削孔検層を実施し、実際に湧水が認められた箇所と動ポアソン比の関係から帯水層の検知可能性について考察を行った。

#### (2) ブレーカ探査

ブレーカ探査は油圧ブレーカによる切羽への打撃時に発生する振動を起振源として反射波の解析を行う手法である。ブレーカ探査システムは、センサー・データロガー・ロックボルトへの取付治具が一体化した受振ユニットと、トリガー部、タブレット PC で構成される。X(:トンネル縦断)、Y(:横断)、Z(:鉛直)方向の3成分受振ユニットが2つ、X方向の単成分を受振する受振ユニットが2つあり、坑内における配置は図-3の通りである。トリガー部は、データ収録の際、4つの受振センサー間の時刻同期を取るために使用する。タブレット PC では、受信ユニット内部の PC にアクセスし、計測条件の設定・データ収録合図・各ユニットのデータ結合等を行うことができる<sup>3)</sup>。ブレーカ探査システムの受振ユニットは無線化されており、ロックボルト頭部のナットに装着するだけでシステムの設置作業が完了する<sup>3)</sup>。また、受信センサーには、単体で三成分の加速度計測が可能な MEMS が組み込まれており、軽量・コンパクトである。そのため、データ計測が重機の

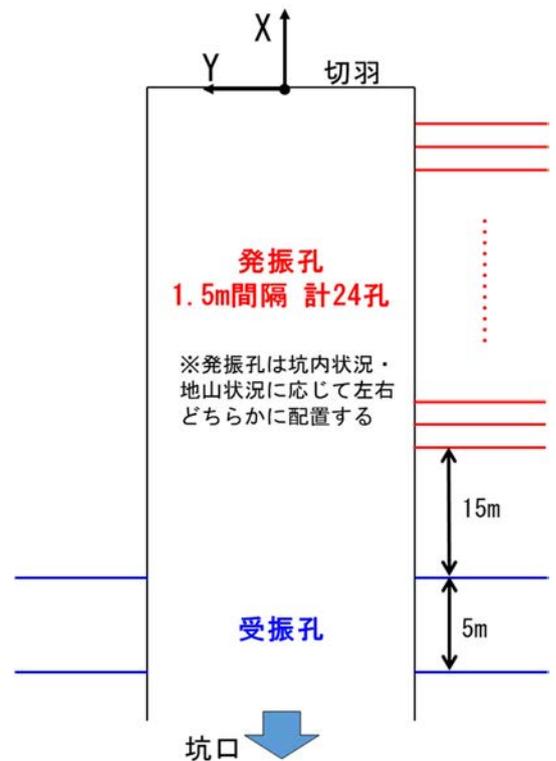


図-2 TSP 303 の測定配置  
(上面図)

オペを除き最低1人で実施可能である。ブレイカ探査は、ブレイカ打撃を起振源とするため、探査可能範囲は狭くなるが、設置から撤収までの時間が比較的短いことから、日常サイクルの中で行われる「コソク作業」時等に実施できるため、切羽施工の休止はほとんどなく、頻繁に探査することが可能である<sup>3)</sup>。

ブレイカ探査データからは、打撃位置から放射状に多数の反射面が認められるため、削孔検層や先進ボーリングなど他の調査が実施されていない場合、1回の探査結果だけでは地山予測に対して意味のある答えを出すことは難しい。一方で、ブレイカ探査の積み重ねにより、掘削に合わせ3度以上の切羽における探査結果から、比較的反射強度の高い反射面が、トンネル内空とその近傍において誤差2~3m程度の範囲で毎回認められる場合、その反射面の位置は、弱層など何かしらの地山変化位置に相当する可能性が高いことが分かってきた<sup>1)</sup>。そこで今回、TSP 303による探査前後で合計7回のブレイカ探査を行い、反射面を検知することで、トンネル上部に存在する水平に近い地質境界を日常的にモニターし、地質境界の予測を行った。

### (3) 複合弾性波探査

探査実施位置が異なるTSP303の広域概査とブレイカ探査の対象を絞った精査を組み合わせることで、効率的に予測精度を高めることが可能となる。検知対象がトンネル軸と平行に近い水平な地質境界面の場合、単一の探査や著しく離れた距離で行われた複数の探査で認められる反射点の位置に多少の誤差があるだけで、反射点から想定される地質境界面の傾斜角が変わり、反射面とトンネルの交差予測位置が大きくずれる。そこで本論では、TSP 303及び、ブレイカ探査データの解析から得られる強反射面が連なる面を地質境界とし、それぞれの反射面位置を近似直線で結ぶことで、対象地質境界面位置の変化を連続的に追跡し、トンネル交差位置の予測を行った。また、TSP 303の解析から得られる動ポアソン比が大きな箇所を帯水層の可能性が高い箇所と仮定して、実際に観察された湧水との相関を考察した。

## 4. 探査結果と考察

### (1) TSP 303 弾性波探査結果

本論では、Aso-1層、Aso-2/1層、Aso-2層を検討対象とする。検討対象とする地層の中で、特にAso-2/1層とAso-1層の境界部には大規模な帯水層の存在が懸念されている。そのため、本坑より掘削が先行している避難坑において、この境界部とトンネルが比較的接近するTD2,100m前後でTSP 303を合計2回実施した。実施されたTSP 303の結果を図-4に示す。図-4上段は、各探査結果の反射面マイグレーション図を示しており、この図から、特に強い反射面の存在を示唆する箇所を×印で抽出し、それらの反射面延長方向を各探査結果間でつなぐことで、地質境界面を想定している。想定された地質境界面はAso-1層中の $R_{Aso1-3}$ 、Aso-2/1層底部に相当する $R_{Aso2/1}$ 、Aso-2層底部に相当する $R_{Aso2}$ である。図-4下段は、各探査結果の動ポアソン比が0.34以上となる箇所を青色で示し、特にポアソン比が高くなる箇所を青丸で抽出している。

Aso-2/1層底部は、強反射点群(R13-3とR13-4の midpoint, R14-3)を繋いで得られる強反射面 $R_{Aso2/1}$ に相当しており、各探査結果において $R_{Aso2/1}$ 付近で動ポアソン比が相対的に高くなる箇所(P13-1, P14-1, P14-2, P14-3)が認められた。そのため、Aso-2/1層底部付近には帯水層等、水が存在する可能性があると考えられる。

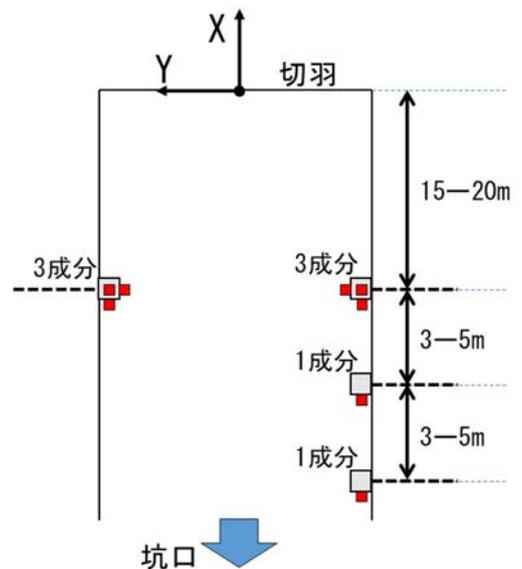


図-3 ブレイカ探査のセンサー配置 (上面図)

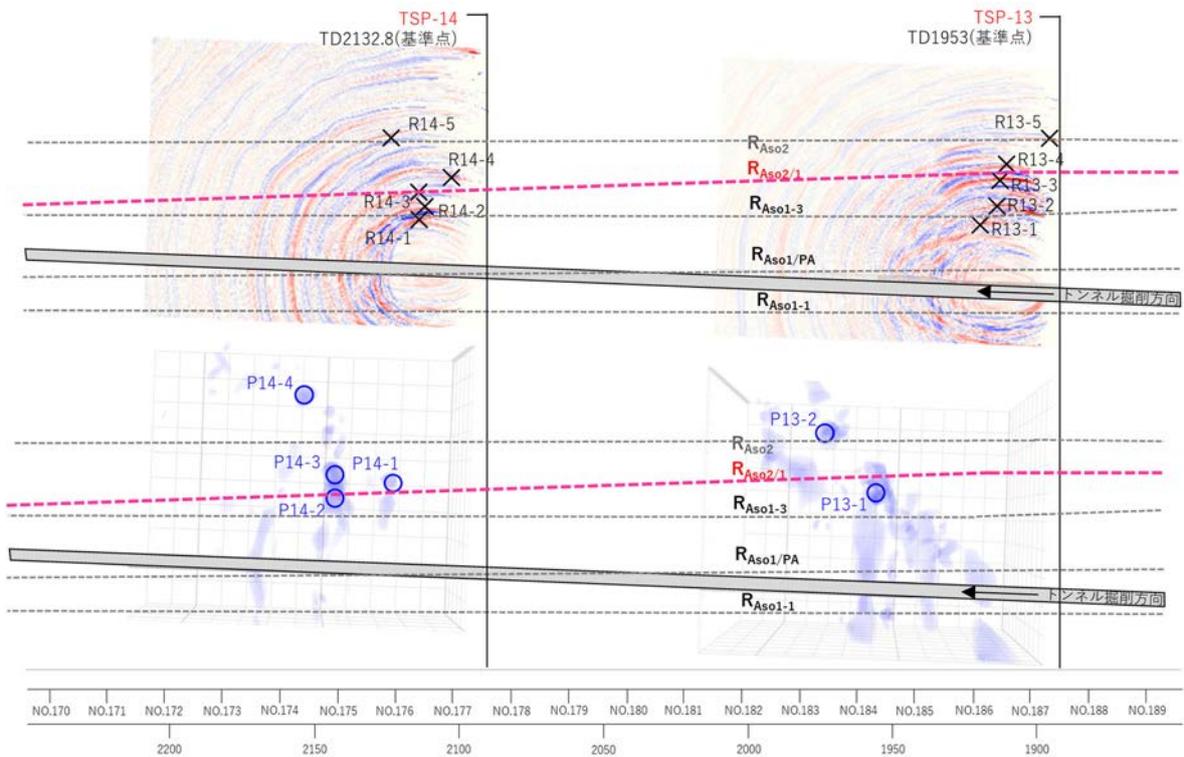


図-4 TD2,100m 近傍の TSP303 による上方探査結果(上:マイグレーション図, 下:動ポアソン比分布図)

(2) ブレーカ探査結果

今回実施した TSP 303 探査の前後で、ブレーカ探査を合計 7 回実施し、放射線状に広がる反射面データを取得した。これらのデータの内、特徴的な反射面（強反射点）をより強調し、その他の反射面を目立たなくすることができれば、技術者間の解釈の差異が減少すると考えられる<sup>3)</sup>。これは物理探査における反射波形の一般的な重合処理とは異なる。ブレーカ探査におけるデータ解析は、起振とそれに対応する受振のデータが 1 セットとして処理される。同一の反射面を含む計測が複数回実施された時、真の岩盤物性境界と想定される反射面が解析できているとすれば、それらをスタッキング（重合処理）することで、その反射面はより強調される。逆に、虚像と考えられる反射面は計測毎に分布がばらつくと考えられるため、振幅値がスタッキングにより相殺されゼロに近づくことになる<sup>3)4)</sup>。

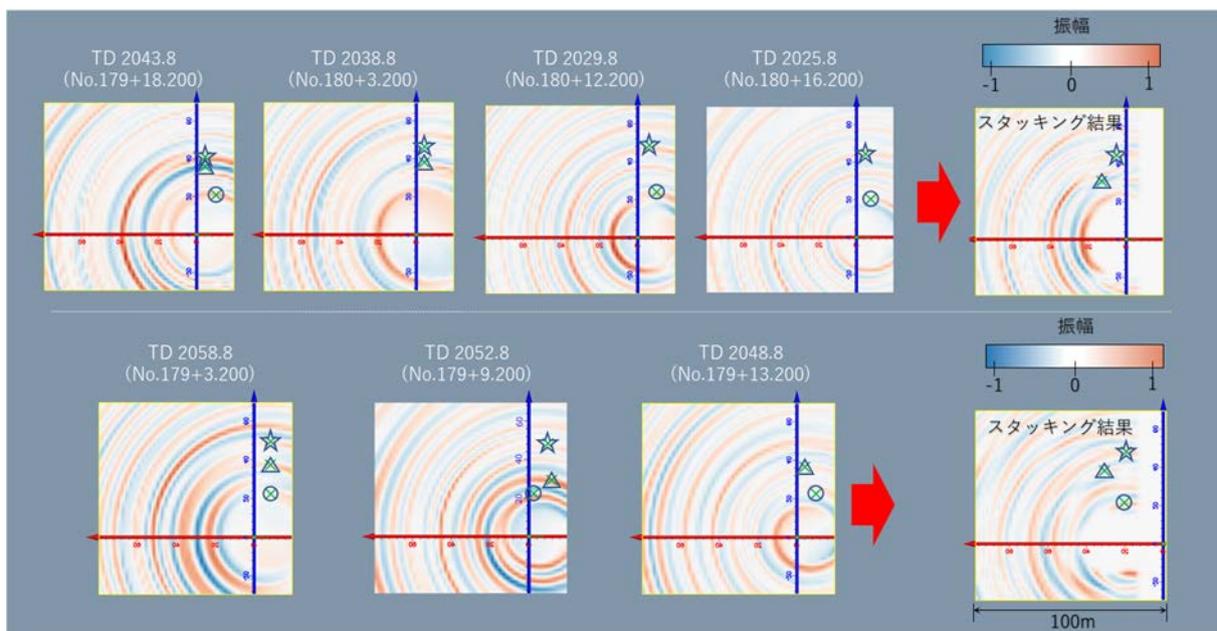


図-5 ブレーカ探査結果の反射面分布とそれらの重合処理結果

図-5 に 7 回のブレーカ探査の反射面分布とそれらのスタッキング結果を示す。図-5 は、特に強い反射面が認められた箇所を×印で抽出し、同じ地質境界面を形成すると考えられる強反射点を同種のマーカー(○, △, ☆印)で囲っている。スタッキング前後の結果から、トンネル掘削面上方 20m, 40m, 45m 付近で強調された反射面は地山中の地質境界面に対応していると考えられる。

当初地質縦断図上にブレーカ探査結果の反射面分布及び、スタッキング結果から抽出された反射面を地質境界面毎に×印を記載し、それらを近似直線で結ぶことで想定した地質境界面(赤色破線)を図-6 に示す。また、比較のため、TSP 303 で想定された地質境界面を図-6 に示す(黒色破線)。TSP 303 で想定された地質境界面の内、Aso-1 層中の強反射面  $R_{Aso1-3}$  及び、Aso-2/1 層底部に相当する強反射面  $R_{Aso2/1}$  については、ブレーカ探査で想定された地質境界面と同様の位置となり、TSP 303 の想定地質境界面の確からしさを確認することができた。一方、Aso-2 層底部に相当する強反射面  $R_{Aso2}$  については、ブレーカ探査で想定された地質境界面が TSP 303 で想定された地質境界面と比べ、一部で若干の相違が認められた。これは、複数回のブレーカ探査により Aso-2 層底部の局所的な地層の硬軟(岩盤密度)の違いを捉えた可能性があり、TSP 303 探査結果を補完していると考えられる。

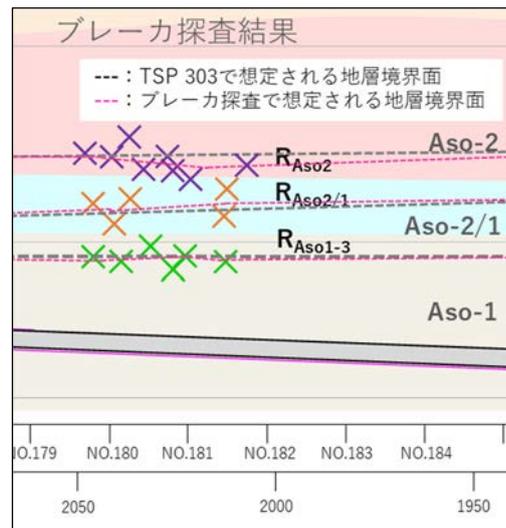


図-6 TSP 303, ブレーカ探査の結果

### (3) 上方の削孔検層の結果

TSP 303 探査の結果、Aso-2/1 層底部に相当する強反射面  $R_{Aso2/1}$  付近において、動ポアソン比が比較的高くなり、水が存在する可能性が示唆された。そのため、帯水層の有無を確認することを目的として、坑内から斜め上方に削孔検層を実施した。その結果、避難坑天端より約 25m 上方、TD2,100m 付近で 25L/min 程度の湧水が認められ、現在も継続して出水している。湧水が認められた位置は Aso-1 層と Aso-2/1 層の当初地質境界部付近(Aso-2/1 層底部)である(図-7)。そのため、Aso-2/1 層底部は広い範囲で帯水層を形成しているか帯水層と繋がる水道が存在していると考えられる。また、湧水が確認された位置は、比較的高い動ポアソン比が確認された強反射面  $R_{Aso2/1}$  の位置と調和的であり、反射面と動ポアソン比を評価することで、帯水層等の水が存在する地層を検知できる可能性があることが確認された。

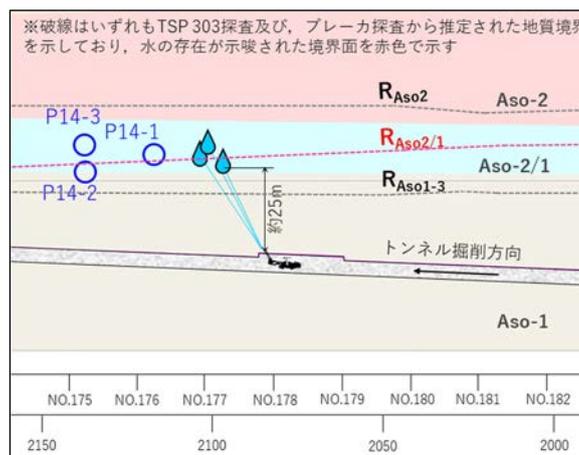


図-7 削孔検層の結果

### (4) 探査結果の考察

図-8 に TSP 303 及び、ブレーカ探査で想定された地質境界面を当初地質縦断図に記載する。図-8 から、トンネル上方には、強反射面  $R_{Aso1-3}$ ,  $R_{Aso2/1}$ ,  $R_{Aso2}$  が存在しており、それら強反射面付近には軟弱層など何かしらの密度境界が存在していることが示唆された。特に、強反射面  $R_{Aso1-3}$ ,  $R_{Aso2/1}$  については、TSP 303 探査結果及び、ブレーカ探査結果から推定された反射面が調和的である。

比較的高い動ポアソン比が確認された Aso-2/1 層底部に相当する強反射面  $R_{Aso2/1}$  付近では、削孔検層の結果、継続した湧水が確認されており、反射面付近の高い動ポアソン比は帯水層若しくは帯水層に繋がる水道の存在等、地層中の水の存在と関連している可能性が高いことが示唆された。Aso-2/1 層底部は、当初地質縦断図ではほぼ水平な層であるが、強反射面  $R_{Aso2/1}$  の挙動から、当初地質縦断図の想定よりも Aso-2/1 層にはある程度傾きがあり、当初の想定より早い段階で大規模な帯水層と交差する可能性がある。今後、TSP 303 探査・

ブレイカ探査等を用いて継続的にモニターすることで、帯水層と交差前の適切な箇所、水抜きボーリング等必要な対策工を講じることが可能であると考えられる。

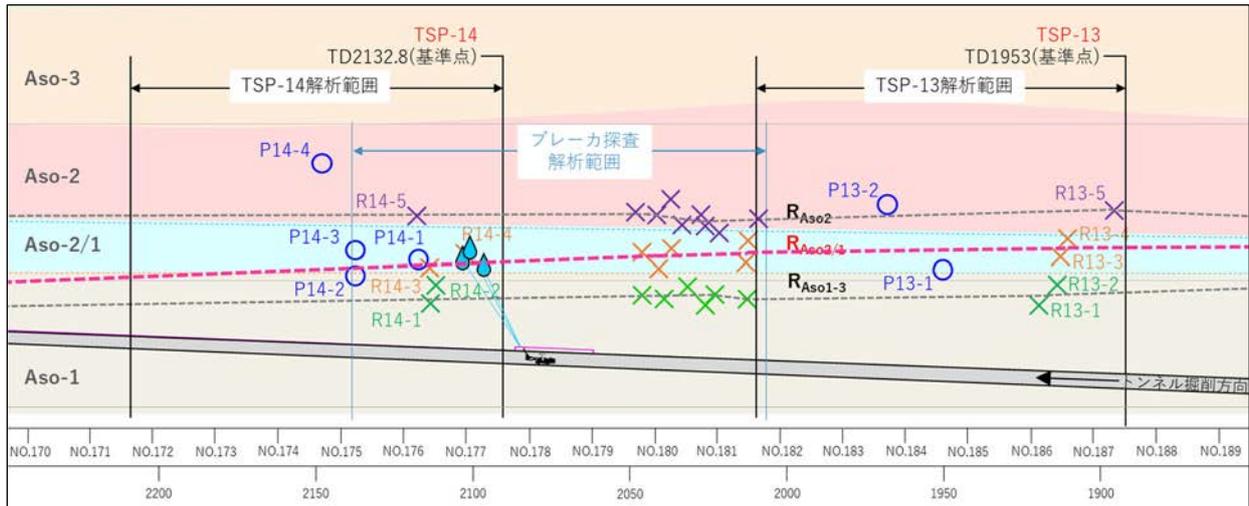


図-8 TD2,100m 近傍の TSP303 及び、ブレイカ探査による上方探査結果

### 5. 複合弾性波探査の意義

TSP 303 探査とブレイカ探査には、探査範囲と地山条件・周辺環境条件の観点から、それぞれ長所と短所がある。それらを組み合わせた複合探査を行うことで合理的に地山予測することが可能となる。本論では、これまで予測が困難であった水平に近い地質境界を対象とし、複合探査を実施することで、単一手法の探査から得られる結果よりも精細に地質境界面を予測することが可能となった。今回、上方の地質境界をモニターするために解析領域を上方に設定したが、モニターする地質の方角に解析領域を合わせることで、地山に内在する地質リスクを合理的に回避できる可能性が高くなると考えられる。

### 6. まとめ

TSP 303 及び、ブレイカ探査による複数回の探査結果で強反射点の近似直線を求めることで、対象境界面位置の変化を連続的に追跡し、これまで予測が困難であったトンネルと低角に交差する水平に近い地質における交差位置の予測精度を飛躍的に向上させることが可能となった。また、動ポアソン比が比較的高くなる箇所をモニターすることで帯水層とトンネルの位置関係が把握できるため、水抜き工実施の時期、方角、延長等の合理的な施工計画が実施可能になると期待される。

今回、滝室坂トンネルにおいて複合弾性波探査を実施し、高い予測精度で地質境界面を想定することができた。今後、複雑な地山条件のトンネル施工において、本手法を用いることで、合理的に地質リスクの回避ができる可能性が高くなるため、より確実な手法となるように、探査実績を集積していく。

### 7. 参考文献

- 1) 吉河秀郎, 青野泰久, 淡路動太, 西琢郎: 複合手法を組み合わせた切羽前方探査システム, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演集, VI-466, 2019.
- 2) 早川泰央, 濱洲良介, 平野宏幸, 吉河秀郎, 淡路動太: 坑内反射法弾性波探査を用いたトンネル上方探査による地質評価手法, 土木学会第 75 回年次学術講演会, 2020.
- 3) 吉河秀郎, 青野泰久: 切羽前方探査システムの効率性・信頼性向上への取り組み, 土木学会第 75 回年次学術講演会, 2020.
- 4) 吉河秀郎, 青野泰久, 淡路動太, 邊見涼, アドザム アズマ, 平野宏幸: トンネル坑内探査システムの効率化と汎用化, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム, 2021.