

三次元反射法弾性波探査の地上からの地質構造評価への展開

Application of Three-Dimensional Seismic Reflector Tracing Technique for the Survey
of Underground Geological Structure松下 智 昭 升 元 一 彦 長 田 昌 彦¹⁾

要 約

当社では、これまでに弾性波や電磁波を使った非破壊の物理探査手法を現場へ適用してきた。その中で、三次元反射法弾性波探査（TRT）は、トンネル切羽前方の断層や地質境界の分布を三次元的に評価することができるものであり、数多くの実績がある。特に TRT 探査は、非破壊で、かつ発受振位置が任意に選択できるなど汎用性の高い物理探査手法であり、トンネル以外の現場にも適用できる可能性がある。本研究では、TRT 探査の適用範囲の拡大を目指した検討の一環として、石灰岩鉱山の石灰岩ブロックの分布状況を評価することを目的に、地上から TRT 探査を実施した。こうした三次元的な広がりを持つ岩石ブロックに対しては、従来の反射法や表面波探査による二次元的な評価では不十分であり、三次元評価が可能な TRT 探査は有効であると考えたからである。探査の結果、地下数十 m に位置する地質境界を三次元的に捉えられる可能性が示された。

目 次

- I. はじめに
- II. TRT 探査の特徴と適用範囲拡大の可能性
- III. 石灰岩鉱山での適用例
- IV. おわりに

I. はじめに

当社では、これまでに弾性波や電磁波を使った非破壊の物理探査手法を現場へ適用してきた。特に、山岳トンネルでは、安全で合理的な施工のために、切羽前方の地質状況を事前に評価する必要があり、多くの物理探査手法が適用されてきた。その中で、三次元反射法弾性波探査（以下、TRT: Three-dimensional Reflector Tracing）は、切羽前方の断層や地質境界の分布を三次元的に評価することができるため、これまでに数多くの実績がある。特に、TRT 探査は、後述するように、非破壊で汎用性の高い物理探査手法であるため、トンネル以外の現場でも適用できる可能性がある。現在、その特徴を生かした適用範囲の拡大の可能性について検討を進めている。

本稿では、TRT 探査の特徴と適用範囲拡大の可能性について概説した後、トンネル以外の適用事例として、石灰岩鉱山の石灰岩ブロックを対象として実施した地上からの TRT 探査結果について報告する。なお、本研究は、埼玉大学との共同研究の成果である。

II. TRT 探査の特徴と適用範囲拡大の可能性

1. 特 徴

(1) 概 要

TRT 探査は、当社が米国企業と共同で開発した物理探査手法^{1)~4)}で、これまでに山岳トンネルを中心に 100 回以上の探査実績がある。TRT 探査と同じように、弾性波の反射法を利用した物理探査手法として広く利用されている探査には、TSP (Tunnel Seismic Prediction) 探査⁵⁾や HSP (Horizontal Seismic Profile) 探査^{6),7)}があるが、これらの探査では、弾性波の発振に爆薬を使用する、爆薬を装填するための発振孔や受振器を設置するための受振孔を坑壁に削孔する必要がある、発振・受振位置のレイアウトは二次元的で、位置を大幅に変更することができない、などの制約があり汎用性に欠ける。また、出力される結果も、基本的に二次元である。一方でトンネルの切羽前方探査（～150m 程度）に TRT 探査を適用する場合、発振はハンマによる坑壁への打撃で十分であり、必要に応じて爆薬による発破でも探査可能である。受振器は、坑壁に専用の台座を急結セメントで取り付けるだけであり、受振器で計測したデータを収録装置（PC など）へ無線で伝送することも可能である^{8),9)}。また、発振・受振位置は、任意に設定可能であり、基本的に側壁から天端まで三次元的に配置される。三次元的な配置とすることは、二次元的な配置と比べて解析結果に虚像が生じにくく¹⁰⁾、探査精度の向上が期待できる。さらに、出力結果については、視覚的にイメージしやすいように三次元的に図化される。以上のことから、TRT 探査は汎用性の高い物理探査手法であり、さらに探査精度に関して

1) 埼玉大学 Saitama University

キーワード: 三次元反射法弾性波探査, 地質構造, 石灰岩鉱山

Keywords: Three-dimensional Reflector Tracing, underground geological structures, a limestone mine

も、TSP 探査では検出困難であった複雑な地質構造も予測されたという実績も報告されている^{2),3)}。

(2) 原理

TRT 探査の基本概念として、トンネルの切羽前方探査の場合のイメージ図²⁾を Fig. 1 に示す。トンネル坑内で発生した弾性波は、均質媒体中では直進し、弾性波速度と密度の積である音響インピーダンスの異なる地層などの境界面に達すると、反射現象が生じる¹¹⁾。地山の弾性波速度が既知であれば、ある発振点と受振点の間には、記録した反射波の伝搬時間（走時）から、図中に示すような等走時間の楕円を描くことができる。TRT 探査では、一つの発振点に対して、複数の受振点を設けているため、数多くの楕円体を描くことができ、それらが多く重なる箇所を画像化し、反射面（不連続面）として特定している。

実際の計算では、解析領域を等間隔のグリッドで区切り、各節点における反射係数を計算している。反射係数：r は、式(1)に示されるように、媒質 1 と媒質 2 の音響インピーダンスで定義される。

$$r = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \dots \dots \dots (1)$$

ここに ρ_1 , ρ_2 は媒質 1 と媒質 2 の密度、 v_1 , v_2 は媒質 1 と媒質 2 の弾性波速度である。媒質 1 から媒質 2 へ波が伝搬すると仮定した場合、反射係数は、媒質 2 が媒質 1 より硬い場合は正となり、媒質 2 が媒質 1 より軟らかい場合は負となる。また、反射係数の絶対値が大きい箇所を反射面として図化させている。

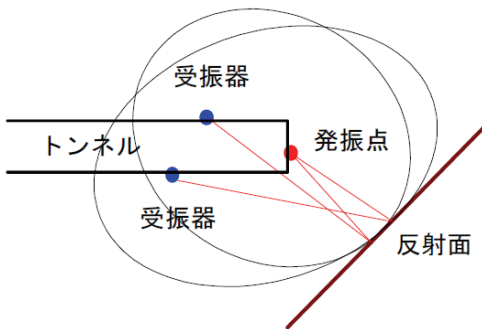


Fig. 1 TRT 探査の基本概念^{2)~4)}
(Basic Concept of TRT)

2. 適用範囲拡大の可能性

前節で述べたように、TRT 探査は削孔などの必要性がない非破壊の物理探査手法で、発振はハンマなどによる打撃で十分であり、また発振や受振位置も任意に設定できることから汎用性の高い探査手法である。これらの特徴を有する TRT 探査は、トンネル現場以外にも適用できる可能性がある。例えば、栗原・升元¹²⁾は、地下水面の位置を調べるために電磁波レーダによる計測を実施しており、水面の三次元分布のイメージングに TRT 探査の解析技術を適用させている。このように、弾性波だけでなく電磁波による計測データに対しても TRT 探査の解析技術は適用可能である。

TRT 探査などの非破壊の物理探査手法の適用範囲や適用限界などを検証しておくことは、近年の放射性廃棄物の地層処分に関して、日本学術会議が暫定保管中に地層処分の地質環境調査・評価技術に

ついて進めるべき研究の中で「岩盤内の割れ目を探す技術-特に非破壊の物理探査-の高度化と適用限界の明示が必要」¹³⁾と報告しているように、重要な課題である。

本章では、弾性波による TRT 探査のトンネル以外の適用事例として、石灰岩鉱山の石灰岩ブロックの分布状況を調べることを目的として地上から実施した TRT 探査の結果について報告する。

III. 石灰岩鉱山での適用事例

1. 探査の背景

地表から地下の地質構造を調べるための一般的な探査手法として、ボーリングや反射波・屈折波を利用した弾性波探査がある。ボーリングは、直接岩盤の性状を確認することができるが、得られる結果は、ある位置（点）での情報であるため、全体の地質構造を評価するためには必然的にボーリング数が増え、探査時間や探査コストが増加する。反射波や屈折波を利用した従来の弾性波探査では、出力される結果が二次元であるため、三次元的な広がりを持つ岩石ブロックに対しては十分な評価が行えない可能性がある。そこで、三次元的な評価が可能な TRT 探査が最も有効な手法であると考え、今回、適用することとした。

2. 調査地域の概要

調査地域の石灰岩鉱山では、石灰岩ブロックが不均質に分布している。Fig. 2 に、鉱山斜面一部の地質平面図 (a) と地質縦断面図 (b, c) を示す。A 断面と B 断面は平行で、50 m 離れている。これまでの地盤調査（地表踏査とボーリング調査）から、石灰岩ブロックの地表面での出現位置や深度が推定されており、Fig. 2b, c に示されるように、調査対象とした石灰岩ブロックの最下面は、A 断面で標高 1410 m 程度、B 断面で標高 1465 m 程度と推定されている。また、Fig. 3 に示す A 断面のボーリング①での速度検層結果から、均質な石灰岩ブロック（岩級区分で B 相当）の弾性波速度は最大で 4,000 m/s 程度であること、下位の石灰岩と泥質岩・凝灰岩の混在する箇所（以下、混在岩部）は石灰岩ブロックよりも岩級が低く、弾性波速度も最大で 3,100 m/s 程度と報告されている。このように、均質な石灰岩ブロックと混在岩部では弾性波速度に差があるため、この境界が弾性波の反射面になる可能性がある。そこで今回の探査では、この境界をターゲットとした。なお本研究では、座標軸を、Fig. 2a の平面図に示すように、斜面の走向方向を x 方向（幅）、それと水平に直交する方向を y 方向（奥行）、鉛直方向を z 方向（高さ）と定義している。

3. 探査方法

山岳トンネルにおける TRT 探査は、切羽付近で発振させた弾性波を切羽後方の坑壁に三次元的に配置した受振器で計測する。今回の探査では、Fig. 2a に示すように、B 断面を中心に、発受振点を地表面に三次元的に展開した。Fig. 4 に計測場所周辺の現地写真を示す。受振点は計 20 箇所、発振点は計 24 箇所である。受振器には速度計（ジオフォン）を使用し、地表面の土砂を取り除き、地盤に直接設置した。特に、石灰岩ブロックの広範囲の分布状況を推定するため、x 軸方向にできる限り間隔を広げて設置した。発振はカケヤによる打撃で行った。

4. 解析方法

解析の流れを Fig. 5²⁾に示す。まず、探査で採取された波形データ

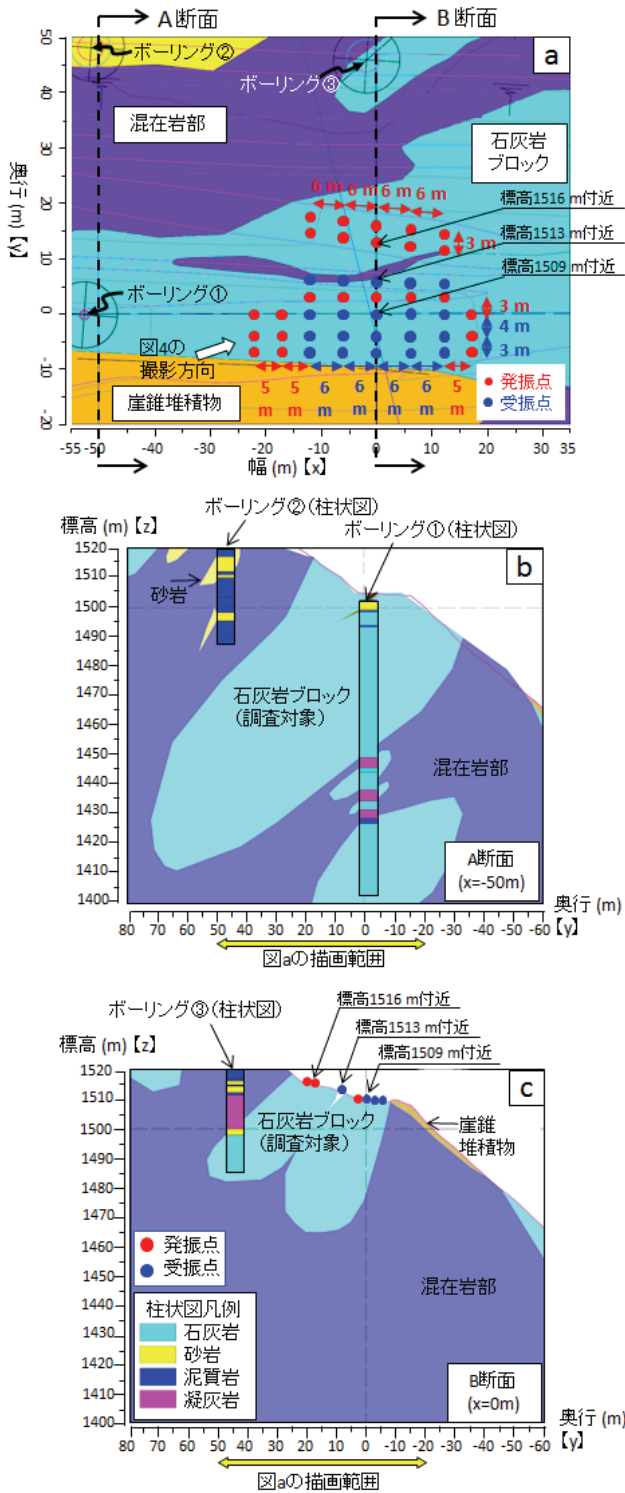


Fig. 2 想定地質図 (a: 平面図, b, c: 縦断面図)

(Geological Map. a: cross sectional view, b and c: longitudinal sectional view)

と各発受振点の座標を解析 PC に取り込み (①), 解析範囲 (解析モデル) の設定 (②) を行う。本研究で設定した解析モデルを Fig. 6 に示す。解析範囲は, A, B の両断面が含まれるように幅を 90 m (x=-55m~35m) とし, A 断面で推定されている石灰岩ブロック全体が含まれるように奥行を 140 m (y=-80m~60m), 高さを 120 m

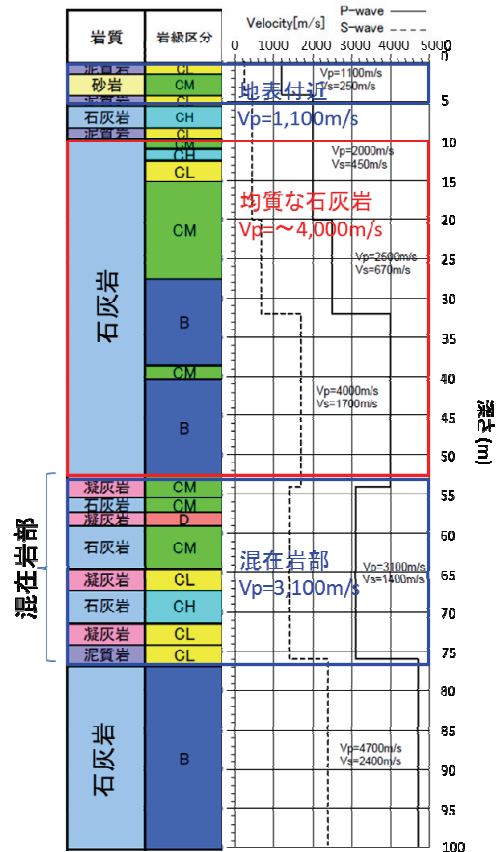


Fig. 3 ボーリング①での速度検層結果 (Result of Velocity Logging in the No.1 Boring)

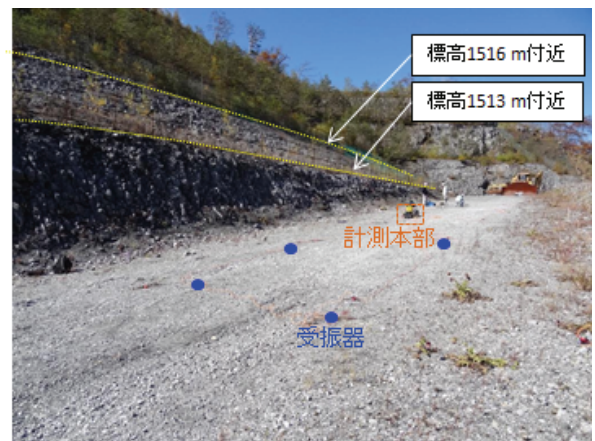


Fig. 4 計測場所周辺の現地写真 (View of Experiment Site)

(z=1400m~1520m) とした。また, 地質縦断面図をもとに, 地表面の形状をできる限り再現したモデル (空気層と地山で構成されるモデル) としている。解析時のメッシュサイズは, 5m に設定した。メッシュサイズは, できるだけ細かくした方が精度の高い解析が可能となるため, 通常, 山岳トンネルでの TRT 探査では 1m に設定されることが多い。しかし, 本研究では, 山岳トンネルの場合よりも解析範囲を広く設定しており, メッシュを細かくすると, 総節点数が解析ソフトで計算可能な上限値を超えてしまうため, 設定可能

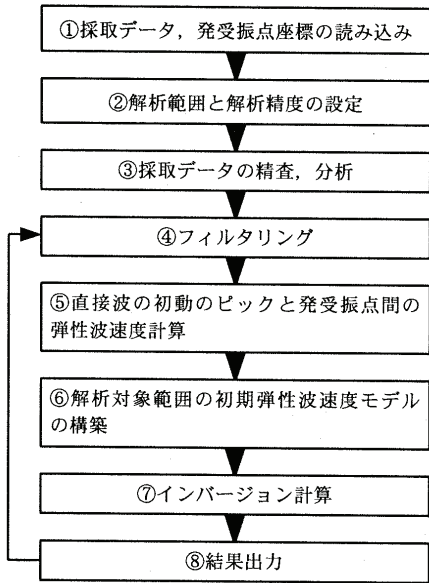


Fig. 5 解析の流れ²⁾
(Data Processing Flow)

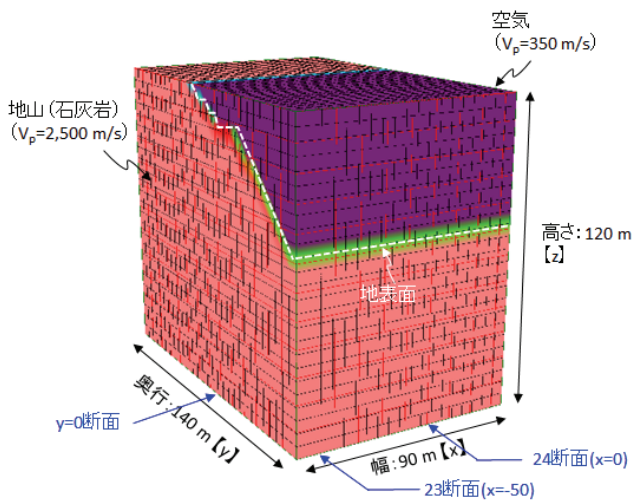


Fig. 6 初期モデル
(Initial Model)

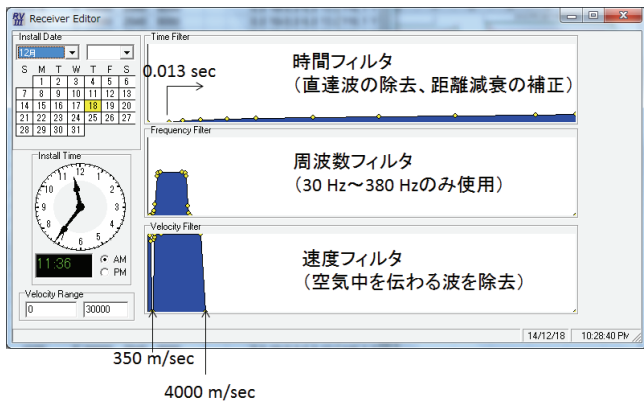


Fig. 7 フィルタリング処理内容
(Filters for Data Processing)

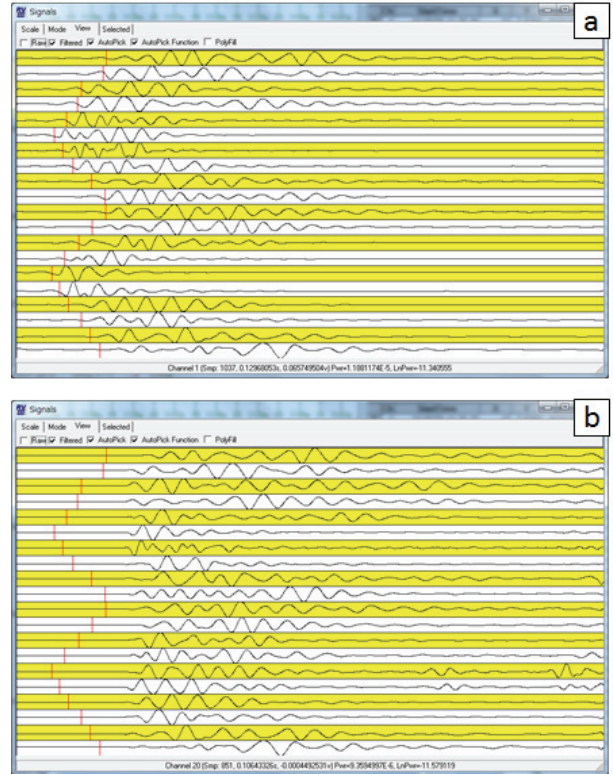


Fig. 8 フィルタリング処理後の波形 (a: 周波数フィルタリング後, b: 周波数+時間フィルタリング後)
(a: Waveforms Applied Frequency Filter, b: Waveforms Applied Frequency and Time Filters)

な最小値として 5m とした。なお、初期モデルに与える地山の弾性波速度は 2,500 m/sec に設定しており、その設定方法は後述する。

次に、探査で得られた波形データを精査し、計測波形の不明瞭なものは、解析用データから排除する (③)。解析に使用する波形データに対しては、適切な反射波を抽出するためのフィルタリング処理を行う (④)。本研究では、Fig. 7 に示すように、次の 3 つのフィルタを適用した。

- 時間フィルタ：波形データから、直達波を除去するため、直達波の伝搬時間よりも前の波形データを消去する。波形データ上の直達波の伝搬時間は、発受振点間距離の最小値 (3m) と後述する地表付近の弾性波速度 (1,000m/sec) から算出される値に、トリガーずれ (0.01sec) を足すことで得られる。
- 周波数フィルタ：ノイズ除去のため、必要な周波数帯を残し、不必要な周波数帯の波を除去する。本研究では、高周波数帯の波をノイズとして除去し、30 Hz~380 Hz の周波数帯の波を解析に用いた。
- 速度フィルタ：空気層を伝わる波 (350m/sec) を除去するとともに、石灰岩の最大弾性波速度：4,000m/sec (Fig. 3 参照) 以上の速度を持つ波も除去する。

Fig. 8 に、周波数フィルタをかけた波形 (a)、周波数と時間フィルタをかけた波形 (b) を示す。フィルタリング処理後、直達波の伝搬速度を求めるために、直達波の初動をピックする (⑤)。本研究では、Fig. 8a の周波数フィルタをかけた波形に対して初動をピック

した。図中の赤線の位置が実際にピックした位置である。直達波の弾性波速度は、ピックした直達波の伝搬時間と発受振間距離から算出可能であり、通常、山岳トンネルの TRT 探査では、このようにして得られた直達波の弾性波速度を初期モデルの地山の弾性波速度と仮定し (⑥)、解析を行う。

以上の解析準備が完了した後、計算を行う (⑦)。結果が出力された後 (⑧)、結果の妥当性を検証し、フィルタリングの値を変更しながら解析を繰り返し行うこともある。

5. 結果

波形データから得られた直達波の伝搬時間 (走時) と発受振間距離の関係を Fig. 9 に示す。図から、直達波の伝搬速度 (データの傾き) を求めると 1,000m/sec 程度となる。この値は、Fig. 3 の速度検層結果の地表付近の弾性波速度 (1,100m/sec) と整合的である。前述したように、通常の TRT 探査では、ここで得られた弾性波速度を初期モデルの地山の値として適用するが、Fig. 3 の速度検層結果からも明らかなように、地山の弾性波速度は深い位置ほど早くなる傾向がある。しかしながら、解析では地山を均質媒体と仮定して計算するため、ここでは地山の弾性波速度として 2,500 m/sec を仮定

した。弾性波速度が変わると出力される反射面の位置も変わるため、ここで仮定した弾性波速度の妥当性については、今後の調査結果や地山の地質分布が明らかとなった時点で検証したいと考えている。なお、初期モデルの空気層については 350 m/sec とした。

解析結果として、Fig. 10 に反射面の三次元分布を示す。図中の反射面の黄と青は、反射係数の正負を表しており、波の伝搬が軟質から硬質の場合は黄-青ペアのブロックとなり、硬質から軟質の場合は青-黄ペアのブロックとなる。さらに詳細に結果を見るため、Fig. 11 に A 断面、B 断面、及び y=40m 断面のコンター図を示す。コンター図は、反射係数の-0.15 から 0.15 までを示している。

図から、A 断面では、ボーリング①の標高 1450 m 付近から図中の左上方向に青色の反射面が確認できる。地表で発振した波が硬質な石灰岩ブロックからやや軟質な混在岩部へ伝搬したこと (反射面は青-黄ペアのブロックとなる) と、ボーリング①の柱状図を合わせて考えると、図中の白色点線が石灰岩ブロックと混在岩部の境界面と推定できる。同様に考えると、B 断面では、標高 1440 m から 1480 m 付近に石灰岩ブロックと混在岩部の境界が推定できる (図中、下の白色点線)。これらの反射面の分布状況について y=40 m 断面で見

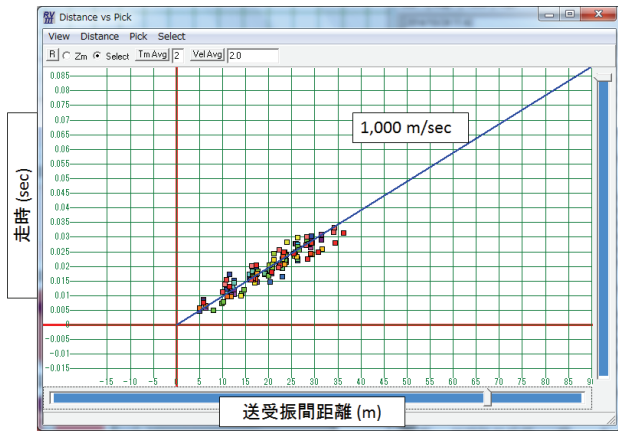


Fig. 9 直達波の伝搬時間と送受振間距離の関係

(Relationship between Distance Source-receiver and Travel Time)

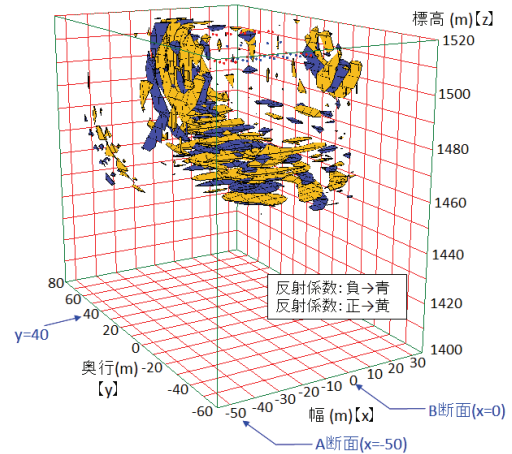


Fig. 10 反射面の三次元分布 (TRT Tefflectogram)

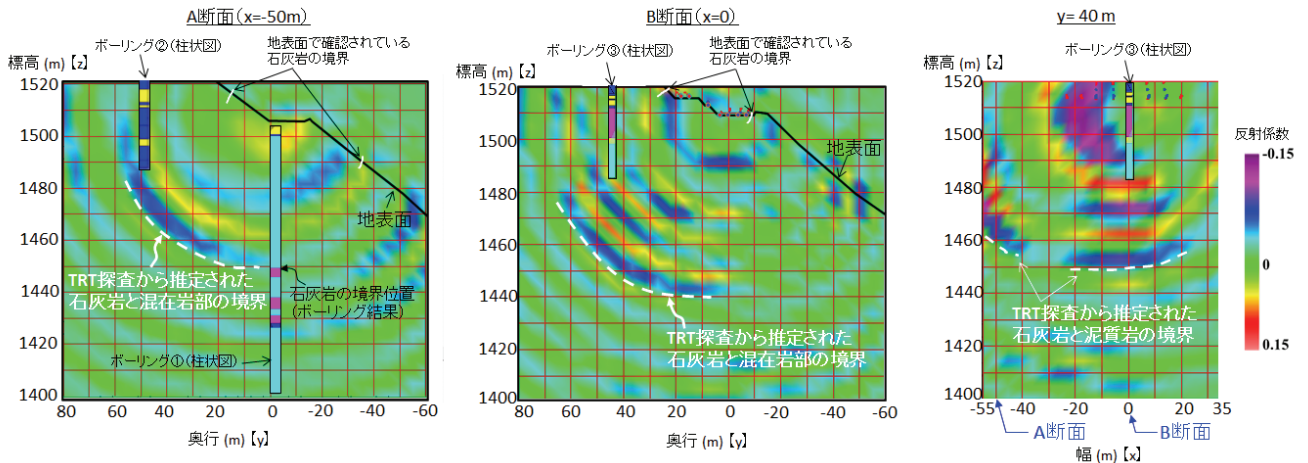


Fig. 11 反射係数のコンター図 (左: A断面, 中: B断面, 右: y=40 m 断面)

(Contour Maps of Reflection Coefficient at A-section (left), B-section (center), and y=40m-section (right))

ると、x 軸方向に連続しておらず(x=-40m~-20m 間で不連続)、別々の石灰岩ブロックの可能性が指摘される。なお、A 断面において、ボーリング①では、標高 1430 m 以深にも石灰岩ブロックが確認されているが、本解析結果では、その境界は明瞭でなかった。その原因として、地山の不均質性により、岩石境界で弾性波（反射波）が減衰した可能性が考えられる。また、B 断面について、標高 1440m 以浅の位置にもいくつかの反射面が確認できる。これらの反射面については、地質境界を表している可能性と多重反射の可能性が考えられ、今後の課題としたい。

6. まとめ

本研究では、石灰岩鉱山における石灰岩ブロックを対象とし、地上から TRT 探査を実施した。その結果、地下数十 m に位置する地質境界を三次元的に捉えられた。今後、ほかの非破壊探査手法も合わせて実施し、精度検証を行う予定である。

IV. おわりに

TRT 探査は、当社が山岳トンネルの切羽前方の地質状況を評価するために開発した非破壊の探査手法であり、これまでに数多くの現場へ適用してきた。特に、TSP 探査や HSP 探査などのほかの物理探査手法と比べて、TRT 探査は非破壊で汎用性が高く、トンネル以外の現場でも適用できる可能性が高い。今後は、高レベル放射性廃棄物の地層処分への展開も検討していく予定である。

参考文献

- 1) 戸井田克ら；反射トモグラフィによるトンネルの 3 次元前方探査技術の開発，鹿島技術研究所年報，2000，pp. 17-18.
- 2) 白鷺卓ら；反射トモグラフィによるトンネル切羽前方の地質予測，鹿島技術研究所年報，2002，pp. 15-22.
- 3) 白鷺卓ら；反射トモグラフィ法を利用したトンネル周辺地質の予測，第 11 回岩の力学国内シンポジウム，2002，F18.
- 4) 山本拓治ら；反射トモグラフィによるトンネル切羽前方の地質探査，土と基礎，Vol. 50，2002，pp. 10-12.
- 5) 稗田肇ら；反射法地震探査による切羽前方予測，第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1995，pp. 505-509.
- 6) トンネル HSP 共同研究会ら；弾性波による切羽前方調査法に関する適用実験，応用地質，Vol. 35，1994，pp. 166-171.
- 7) 伊崎富士ら；トンネル HSP 法の予測精度向上と施工反映過程の検討-掘削実績との比較による-，第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1996，pp. 401-405.
- 8) 横田泰宏ら；無線式三次元反射法弾性波探査技術によるトンネル切羽前方探査，鹿島技術研究所年報，2010，pp. 13-18.
- 9) 横田泰宏ら；無線式トンネル三次元反射法弾性波探査技術の開発，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，2009，pp. 304-309.
- 10) 白鷺卓ら；3次元反射法弾性波探査における最適な受振点配置と利用波動に関する検討，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2004，pp. 157-162.
- 11) 佐々宏一ら；建設・防災技術者のための物理探査，森北出版株式会社，2007，p. 62.
- 12) 栗原啓丞ら；ミニボアホールレーダの開発と地下水挙動の 3次元評価への試み，第 70 回土木学会年次学術講演会講演概要集，2015。（発表予定）
- 13) 日本学術会議・高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ検討委員会；報告「高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討」，2014，p. 12.

Application of Three-Dimensional Seismic Reflector Tracing Technique for the Survey of Underground Geological Structure

Tomoaki Matsushita, Kazuhiko Masumoto and Masahiko Osada¹⁾

Three-dimensional Reflector Tracing (TRT), which was developed by Kajima Corporation, is an effective technique to accurately and simply predict the geological conditions ahead of a tunnel face. This technique does not require a boring for measurement. In addition, receivers and sources of elastic waves can be arranged at arbitrary positions. Therefore, TRT has a possibility of application for various purposes at sites. In this paper, the authors applied TRT for the survey of underground geological structures at a limestone mine where the block of a limestone was ununiformly distributed. The results showed the three-dimensional distribution of the geological boundary of a limestone. Especially, it was revealed that the boundary was at several tens of meters from ground surface.