

反射トモグラフィによるトンネル切羽前方の地質予測

Imaging Geological Conditions Ahead of a Tunnel Face Using Reflection Tomography

白 鷺 卓
山 本 拓 治

要 約

反射トモグラフィ“TRT”(True Reflection Tomography)は、弾性波の反射波を利用したトンネルの切羽前方探査手法である。筆者らが米国企業と共同開発し、1999年に現場に適用して以来、これまでに国内で27件にものぼる適用実績を積み重ねてきた。その結果、弾性波を利用した従来の方法より、合理性の面でも優位であり、その探査結果の精度も高いことを確認している。ここでは、反射トモグラフィの測定手法および解析手法について従来の方法と比較しながら概説し、さらに、実際に四つの現場に適用して得られたトンネル切羽前方及び周辺の地質予測結果を、ボーリングコア、坑壁観察結果、削孔検層結果と照査した。また、同地点でTSP(Tunnel Seismic Prediction)も実施して、探査結果を比較したところ、今回開発した反射トモグラフィによるトンネル切羽前方探査手法の方が、周辺の地質状況を3次的に把握でき、精度も高く、より実用性が高いことを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 反射トモグラフィの概要
- III. 現場適用結果
- IV. まとめ
- V. おわりに

I. はじめに

山岳トンネル工事において、これまでに実施されてきた各種切羽前方探査手法の中で、弾性波の反射波を利用したものにはTSP(Tunnel Seismic Prediction)やHSP(Horizontal Seismic Profile)があるが、これらは地質状況によっては測定精度に若干の問題があるといわれている。また、広い空間に伝播していく弾性波を利用しているにも関わらず、評価結果は2次元に留まる上、トンネル測線上の反射面しか出力されない。測定方法についても、特別な発破作業が必要なため、切羽の掘削作業のないときに測定を行わなければならないばかりか、準備に要する時間もかかっていた。

筆者らが1999年に米国企業と共同で開発し、日本ですでに30件にものぼる適用実績のある反射トモグラフィ“TRT”(True Reflection Tomography)は、探査のための特別な発破を設ける必要がなく、通常のトンネル掘削作業での発破、ブレーカ、TBM等から発生する振動を利用できるため、準備に要する時間は受振器の設置のみであり、測定時に切羽作業を止める必要もない。また、評価結果は3次元であり、探査範囲は任意に設定できるため、トンネル周辺の地質評価も可能である。

本報文では、反射トモグラフィの測定手法および解析手法についてTSPと比較しながら概説し、さらに、実際に四つの現場に適用して得られたトンネル切羽前方および周辺の地質予測結果を、ボー

リングコア、坑壁観察結果、削孔検層結果と照査した。また、同地点でTSPも実施して、探査結果を比較したところ、当サイトののような複雑な地質状況を呈するトンネルでは、反射トモグラフィの方が予測精度が高いことを確認した。

II. 反射トモグラフィの概要¹⁾

反射トモグラフィの基本的概念は、Fig.1に示すとおりである。地山の弾性波速度が既知であれば、ある発振点とそれぞれの受振点の間には、記録した反射波の伝播時間(走時)から、図のような楕円体(等走時面)を描くことができる。本システムでは、Fig.2に示すように10点の受振器を3次的に配置しているので、探査対象空間内には、それぞれの発受振点の組み合わせにより、無数の楕円体が3次的に描かれることになる。これら楕円体の最も良く接する部分を反射面として画像化している。

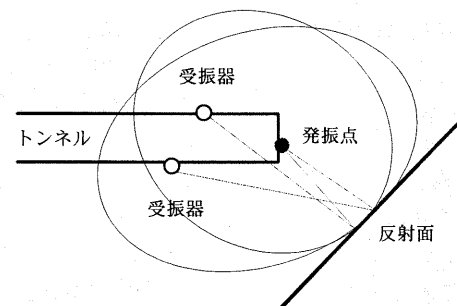


Fig.1 Concept of the TRT

1. 測定手法

探査精度、探査コスト、準備作業の迅速化、探査深度を総合的に判断した結果、発受振点配置をFig.2に示すように設定している。

キーワード：トンネル、弾性波、反射波、トモグラフィ、断層

原則的には、発振点は周方向に4点、軸方向に2m間隔で3～5列とし、受振点は周方向に2点または3点を軸方向に5m間隔で5列、計10点設置する。ただし、この配置は、現場の状況や地山弾性波速度によって適宜変更することは可能である。このとき、発受振点の位置（座標）は解析の際に必要であるから、測定と同時に測量しておく。受振センサーは加速度計を使用し、専用の台座に取り付け、台座をトンネル壁面に圧着する。発振源は通常ハンマー打撃とする。その他、発破、ブレーカやTBMの掘削振動も利用可能であるが、解析には主にS波を利用するため、S波をよく発する振源が望ましい。一方、従来手法のTSPでは、左右どちらかの側壁に1m置きに24箇所の発破孔(L=1.0m)、その15m後方の左右側壁にL=2.5mの受振孔を削孔し、受振センサーを埋め込む必要があるため、準備だけで約半日以上かかる。

切羽周辺の不連続面からの反射波を加速度計で受振し、アンプにより増幅させたあとデータ記録装置(サイスマグラフ)に記録する。記録されたデータを解析用PCにダウンロードし、専用ソフトで解析する。現場での測定に要する時間は4時間程度である。

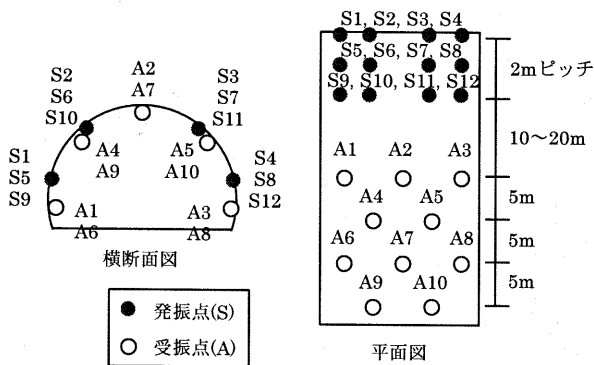


Fig.2 Standard Array of Sources and Receivers

2. 解析手法

具体的な解析の流れを Fig.3 に示す。まず、現場で採取された波形データを記録装置(サイスマグラフ)から解析用PCにダウンロードする。また、すべての発受振点の座標を読み込む(①)。次に、解析対象範囲と解析精度を設定する。解析対象範囲は、基本的には探査したい範囲と一致するが、採取波形の品質によっては、信頼の高い精度を確保するために対象範囲を縮小する場合もある。解析精度は範囲内の節点数に依存し、通常は、1m 間隔でメッシュを作成する(②)。

次に、採取された波形すべてについて、その形状やS/N比を精査し(③)、適切な反射波を抽出、あるいはノイズを除去するためにフィルタリングを行う(④)。フィルタリングでは、主に必要な周波数帯を残し、不必要な周波数帯をカットする処理を施す(Fig.4)。採取された生波形とフィルタリング処理後の波形を Fig.5 に示す。

そして、採取された波形の直接波の初動をピックし、発受振点間の地山弾性波速度を計算する(⑤)。求められた地山弾性波速度を利用して、Fig.6 のような解析対象範囲の初期弾性波速度モデルを構築する。この際、事前地質調査結果等から地層境界や断層等の顕著な特徴(位置、規模、弾性波速度)が予測されている場合、その情報も盛り込むことで、さらに精度の高い探査が可能となる(⑥)。

⑥で得られた初期弾性波速度モデル上において、処理された波形から反射面の位置をインバージョン計算する(⑦)。トモグラフィと呼ぶ所以はこのためである。

不連続面の位置は各接点において計算されている反射係数(式(1))によって判別される。例えば、媒質1から媒質2に弾性波が伝播する時、反射係数が負の場合は、媒質2は媒質1より軟らかく、反射係数が正の場合は、媒質2は媒質1より硬いことを意味している。また、その絶対値が大きいほど、両媒質の変化が著しいことを示す。

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \dots (1)$$

R: 反射係数

ρ_1, ρ_2 : 媒質1, 2の密度

V_1, V_2 : 媒質1, 2の弾性波速度

$\rho_1 V_1, \rho_2 V_2$: 媒質1, 2の音響インピーダンス

計算結果は、あらゆる位置における断面図やあらゆる角度から見ることができる3次元俯瞰図として出力できる。また、結果の質によっては、再びフィルタリングによる波形処理を検討することも必要である(⑧)。以上、データの入力から解析結果の出力までに要する時間は約24時間である。

一方、TSPではこのようなインバージョン計算は行われていない。また、解析手順はほとんどルーチン化されているため、初心者にも扱いやすいが、フィルタリング処理において融通がきかず、重要な波形をカットしている恐れがあるため、精度に若干の不安が残る。

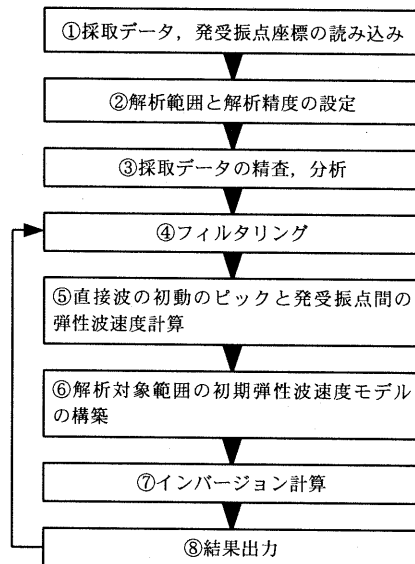


Fig.3 Flow of the Processing of the TRT

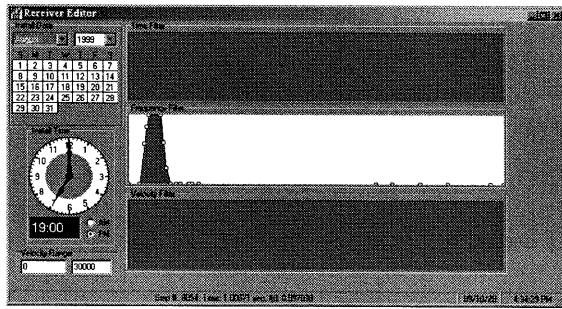


Fig.4 Window for Setting up Filters

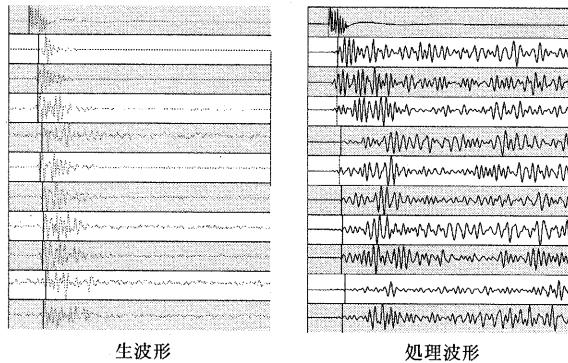


Fig.5 Recorded Signals

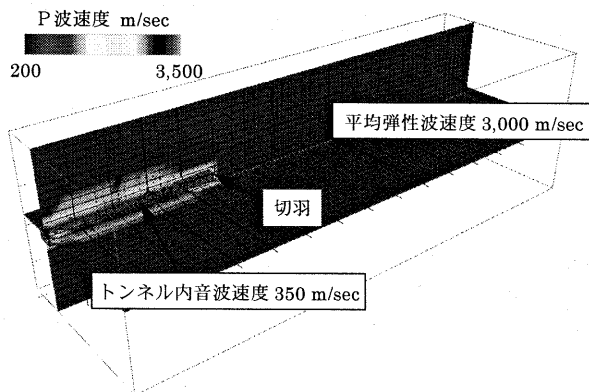


Fig.6 Forward Model of Seismic Velocity

III. 現場適用結果

1. Aトンネルにおける適用結果²⁾

(1) 現場概要

本現場周辺の地質は、秩父帯に属する粘板岩が主に分布し、石灰岩も一部に見られる。ともに硬質だが、粘板岩は節理が発達している。地質構造は、巨視的にはほぼ東西方向の走向、北 30° ~ 60° の傾斜だが、激しく褶曲を受けている。特に、石灰岩の分布する向斜軸付近をトンネルが通過するため、周辺からの集水と石灰岩中の空洞のたまり水や地下河川からの大量出水が当初から非常に懸念されていた。

そして、切羽がTD1700mにおいて、切羽の左側から毎分20t強もの突発湧水が発生した。切羽の地質は粘板岩であったが、その直後に実施した水平調査ボーリング(2本)より、切羽の先10m付近から断層を挟んで石灰岩が分布していることがわかった。これは事

前地質調査により予測されていた位置よりも160m手前であった。

湧水対策工を立てる上で、粘板岩と石灰岩を隔てる断層分布と、石灰岩分布および出水箇所を予測することが急務であったが、水平調査ボーリング2本の結果のみでは不十分であったため、広範囲を3次元で精度よく、かつ迅速に探査が可能な反射トモグラフィを併せて実施し、空間的な地質状態の把握を試みた。また、従来手法と比較するためにTSPも実施した。

(2) 反射トモグラフィ測定方法

今回の反射トモグラフィの発振振点配置をFig.7に示す。発振点を12点、受振点を10点設置した。発振はすべてハンマーにより各点につき5回以上打撃し、合計62個のデータ(波形)を採取した。

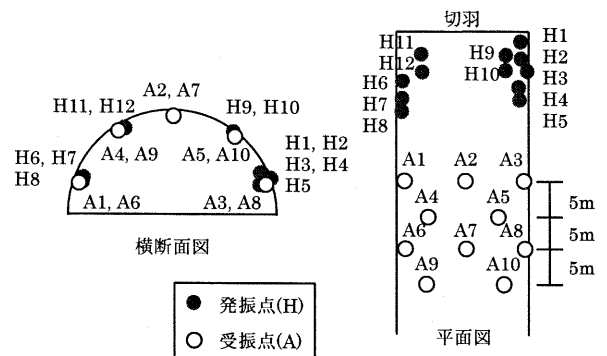


Fig.7 TRT Array of Sources and Sensors at A Tunnel

(3) TSP測定方法

今回のTSPの発振振点配置をFig.8に示す。発振点は左側壁に24点、受振点は左右に2点設置した。発振はすべて発破により、各点につき1回、合計24個のデータ(波形)を採取した。

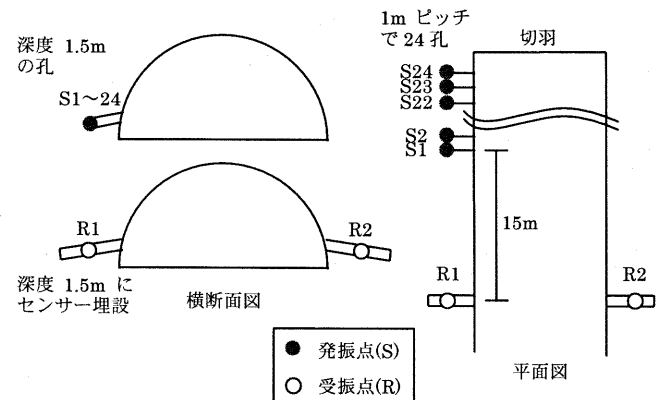


Fig.8 TSP Array of Sources and Sensors at A Tunnel

(4) 探査結果

Fig.9に水平調査ボーリング、反射トモグラフィ、TSPの結果を比較して示す。

まず、本坑からの水平調査ボーリングより、切羽左側付近に破碎部、深度約10m地点に粘板岩と石灰岩の地質境界があることがわかった。これより、粘板岩と石灰岩は破碎帯を挟んで分布していると考えられる。一方、反射トモグラフィ結果では、切羽付近の破碎部と地質境界付近に顕著な黒い影(地質懸念箇所①、②)が出現して

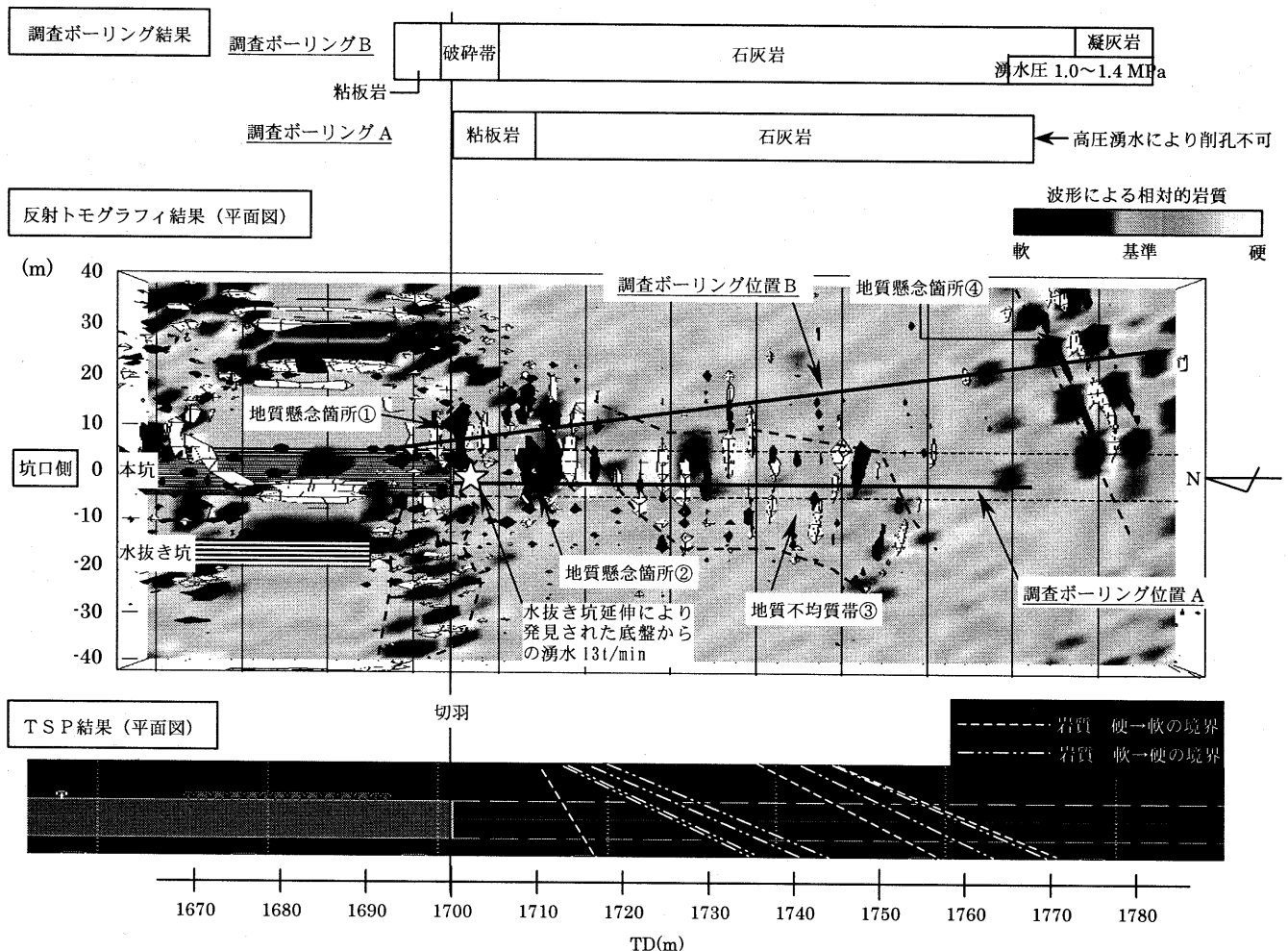


Fig.9 Comparison of the Results of the Boring, the Result of the TRT and the Result of the TSP at A Tunnel

おり、地山状態と整合している。また、影の広がりから、破碎部の幅は約 2m 程度であると予測した。TSP 結果では、地層境界付近の脆弱な破碎帯（軟）から石灰岩（硬）への移り変わりを検出した。

また、本坑からの水平調査ボーリングでは認められなかったが、反射トモグラフィ結果では、図中の点線で示すような地質の複雑に変化する帯状の領域（地質不均質帯③）が予測された。この領域が、探査時現在の切羽の出水原因となっている水みちであると推測した。TSP 結果では、結果出力上、帯状には出現しないが、密集した反射面が検出された。

さらに、本坑からの水平調査ボーリングAでは、深度 67.5m 地点で高圧の大量湧水により削孔を断念しており、また、水平調査ボーリングBでは、深度 65m 地点以降、湧水圧が 1.0~1.3MPa の区間と深度 70m 地点で石灰岩から凝灰岩に変化する地層境界を確認した。一方、反射トモグラフィ結果では、若干のずれはあるものの、同地点において顕著な影が出現しており、地山状態に整合している。ボーリング結果を鑑みると、石灰岩と凝灰岩の地層境界が水みちとなっている可能性が高く、反射トモグラフィ結果と合わせると、その走向はトンネル左から右に伸びていると予測できる。TSP 結果では、この境界を検出することはできなかった。

本トンネルは、大量出水以来、水抜き坑の掘削、水抜きボーリングの削孔、止水注入工などの湧水対策で、本坑の掘削が進行してい

ないため、反射トモグラフィによる探査結果の妥当性をいまだ確認していないが、延伸した水抜き坑の掘削実績から、本坑の TD1702~1708m にあたる水抜き坑の底盤から高圧の湧水（毎分 13t）を確認しており、これについても、反射トモグラフィ結果と整合していると思われる（Fig.9 中☆印）。

2. Bトンネルにおける適用結果

(1) 現場概要

本現場では 30m の離隔で上り線と下り線のトンネルを平行して掘削している。周辺には広く硬質な花こう岩が分布しているが、所々に風化変質した真砂帯を挟み、その走向はほぼ東西方向である。これまでの掘削実績から、この真砂帯が水みちとなっていることがわかっており、その規模が大きい場合には、大量の湧水とともに真砂が流出し、切羽や天端の崩壊が起こる可能性が懸念されていたため、この位置とその規模および上り線への連続性を予測することを目的として、下り線トンネルから反射トモグラフィを実施した。

(2) 反射トモグラフィ測定方法

今回の反射トモグラフィの発受振点配置を Fig.10 に示す。発振点を 11 点、受振点を 10 点設置した。発振はすべてハンマーにより、各点につき 5 回以上打撃し、合計 69 個のデータ（波形）を採取した。

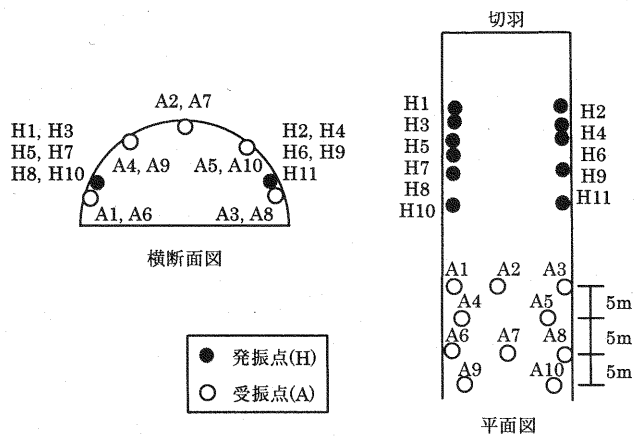


Fig.10 TRT Array of Sources and Sensors at B Tunnel

(3) 探査結果

Fig.11に反射トモグラフィ結果と掘削後に得られた地質平面図お

よび実施支保パターンを比較して示す。

反射トモグラフィ結果から、五つの地質懸念箇所（帯）を抽出した。地質懸念帯①は上り線の 576+00 付近から下り線の 574+15 付近に向かって、ほぼ東西方向に伸びる比較的大きな連続性のもの、地質懸念帯②は下り線の 574+05 付近から分布する局所的なもの、地質懸念帯③は上り線 572+10 から下り線 572+00 付近に連続するもの、地質懸念帯④⑤は上り線 573+12 および 572+18 に出現した局所的なものであった。この結果とこれまでの掘削実績から認識されていた当現場に分布する花こう岩の特徴（硬質だが所々に真砂帯を挟む）から、これらの地質懸念箇所（帯）を真砂帯あるいは粘土が挟在する節理密集帯と予測した。

ここで、掘削後の切羽観察により描かれた地質平面図と実施支保パターンを含めて概観すると、地質懸念帯①では上り線、下り線ともに強く風化を受け粘土化、土砂化し、切羽の自立性に乏しい箇所を確認した。懸念帯①の走向も実際の地質分布に整合していた。また、反射トモグラフィ結果から当該箇所の地質が大きく懸念された

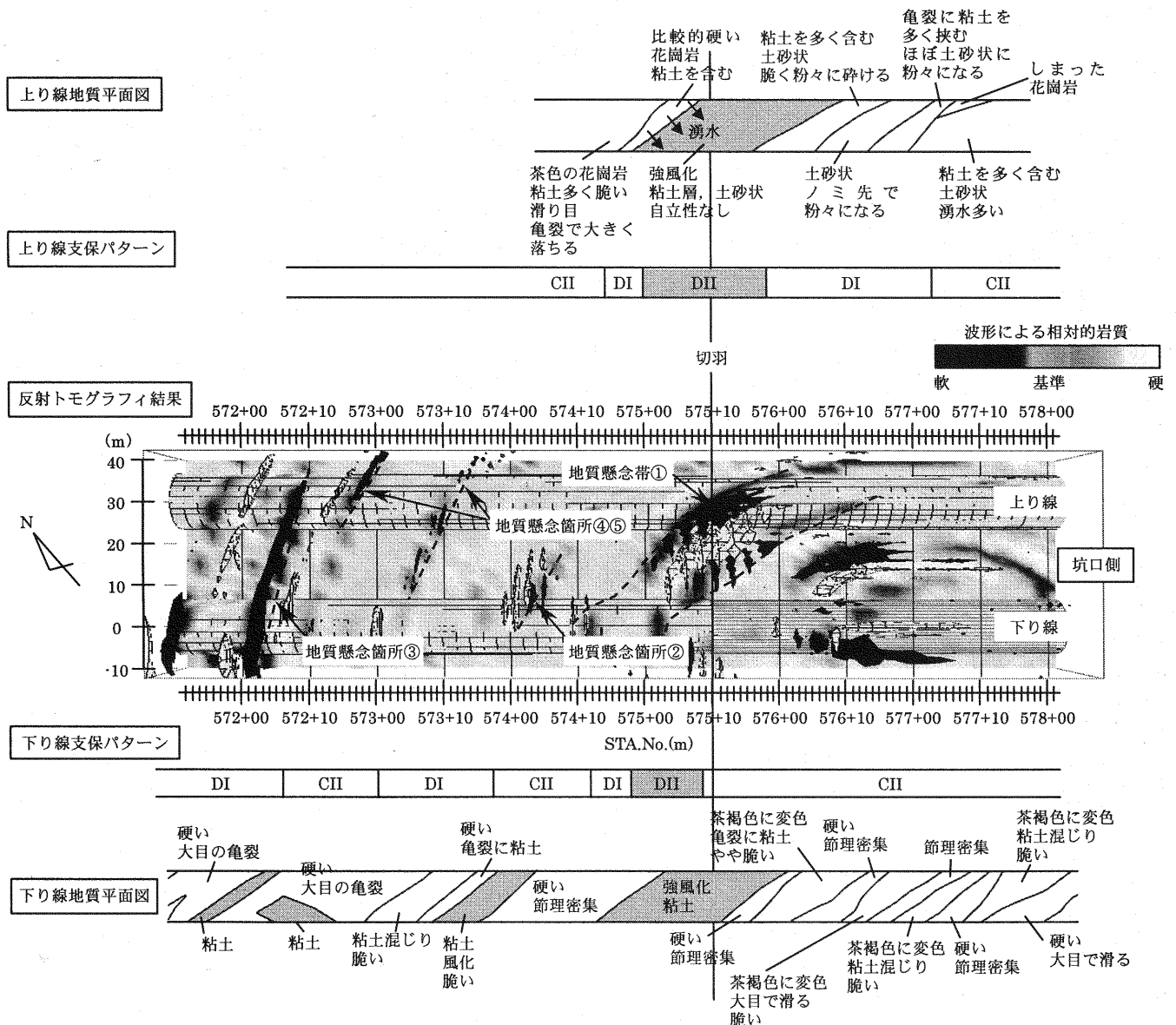


Fig.11 Comparison of the Geological Map, the Support Pattern and the Result of the TRT at B Tunnel

ため、上り線、下り線ともにあらかじめAGFによる補助工法(DII)が検討されていたが、実際掘削したところ、トンネル掘削に支障をきたす規模の地質脆弱帯が出現したため、予定どおりAGFを採用し、迅速かつ安全に掘削することができた。また、地質懸念箇所②は、風化を受けて粘土化した地質脆弱帯を検出していたと考えられる。支保パターンについては、若干位置がずれるがCIIからDIに変更されている。さらに、地質懸念箇所③では粘土帯を検出していたと考えられる。地質懸念箇所④⑤については、下り線にそれにあたる地質脆弱帯が見られなかったことから、下り線への連続性はなく、上り線に局所的に分布するものと考えている。

3. Cトンネルにおける適用結果³⁾

(1) 現場概要

当現場付近には、第四紀の安山岩とそれを角礫として含む凝灰角礫岩、その上位には礫層が分布しており、既存資料の地表踏査結果や弾性波探査解析結果では、1049+00付近においてこの礫層の下端が計画トンネルの天端付近に分布するものと予想されていた(Fig.12)。この礫層は未固結である上、多くの地下水を賦存しているため、突発湧水やそれに伴う土砂流出等、TBM施工上、重大な影響を及ぼす可能性があった。したがって、当初はTBMによるトンネル掘削が計画されていたが、場合によっては当該区間の掘削工法を変更することも視野に入れて計画されていた。

一方、本トンネル掘削に先駆けて、その下方約20m、側方約30mにパイロット坑が平行してTBMにより掘削されており、その掘削実績から、パイロット坑には当該礫層が出現しなかったことはわかっている。また、地上からのボーリング調査には制約があり、離れた位置で1本しか実施できない現状であった。そこで、礫層の下端境界の位置を的確に把握し、施工方法を事前に検討するために、反射トモグラフィを適用した。

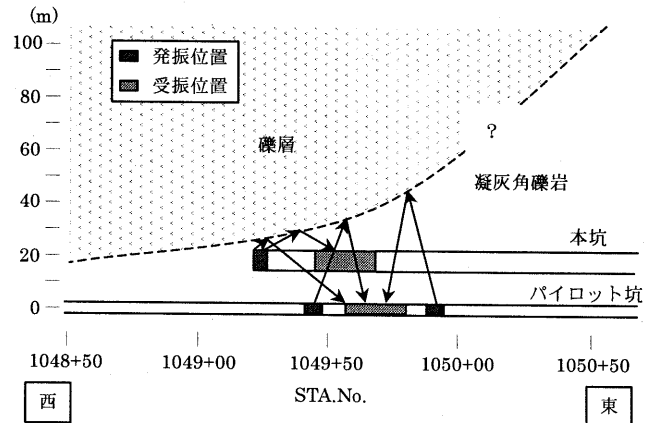


Fig.12 Summary of the Survey-Required Area at C Tunnel

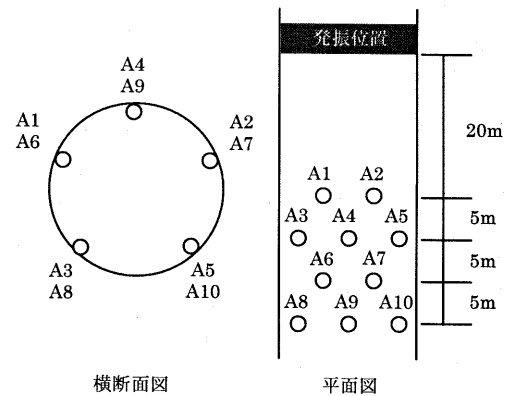


Fig.13 Array of the Sensors at C Tunnel

(2) 反射トモグラフィ測定方法

今回の反射トモグラフィの受振点配置を Fig.13 に示す。発振はハ

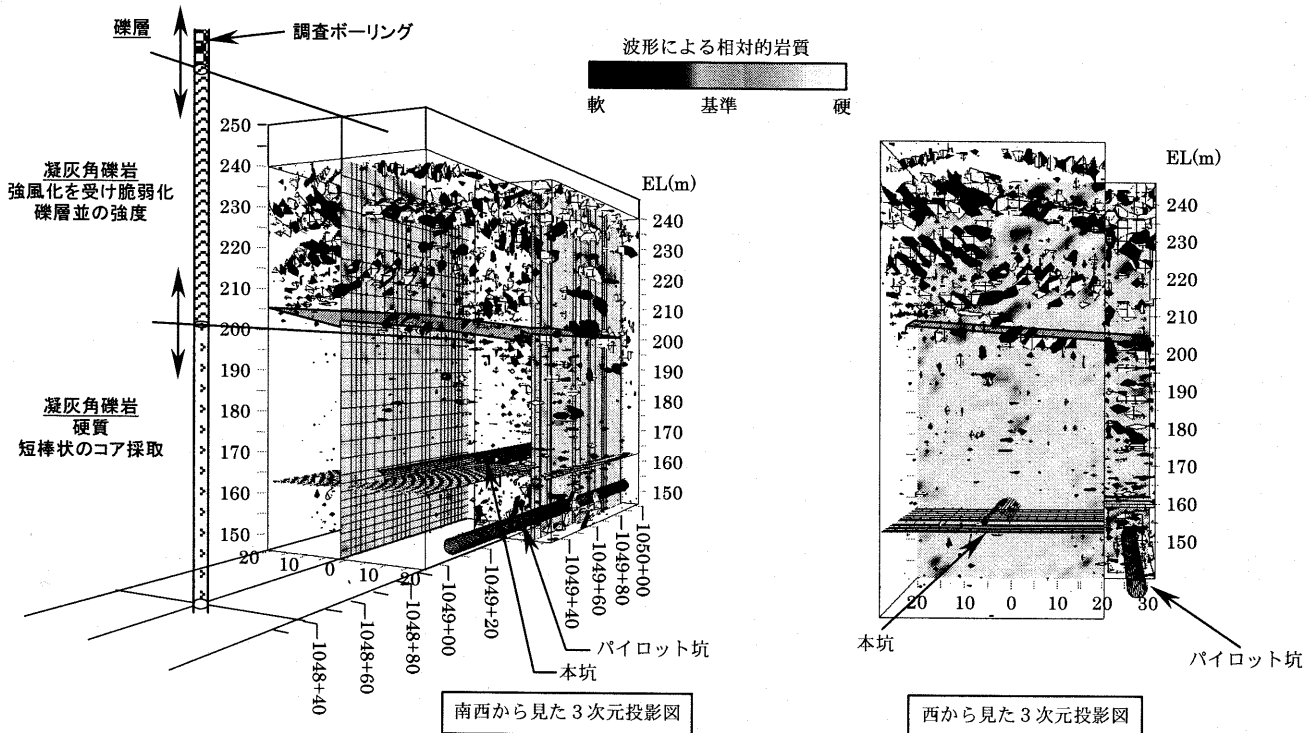


Fig.14 Comparison of the Results of the TRT with the Result of the Boring Core at C Tunnel

ンマーによる坑壁打撃の振動と、TBMの掘削振動を利用した。

(3) 探査結果

トンネル上部の未固結で非常に脆弱な礫層と凝灰角礫岩層の境界の出現位置を予測する目的で実施された反射トモグラフィ結果をFig.14に示す。探査可能範囲は、TBM掘進方向に80m、トンネル上方に80mであった。この結果から、EL200m付近より上部に、細かな影が多数見られる。つまり、EL200m付近に礫層と凝灰角礫岩の層境があると予測できる。また、その境界は、走向NNE-SSW、傾斜20°E程度であり、将来的にTBM導坑に上位の礫層が出現することはないと予測できる。

一方、1048+40において探査実施後に実施された鉛直ボーリングのコア観察によると、礫層と凝灰角礫岩の層境はEL250mであった。予測結果とは50mの差があるが、コア観察結果から、層境周辺の凝灰角礫岩上部には上位の礫層と岩質の似た、風化を受け脆弱化した凝灰角礫岩が確認されており、またEL200~250m間には、部分的に岩片状、礫状に破碎された凝灰角礫岩も確認されている。EL200m以深のコアは、比較的硬質で短棒状である。脆弱化した凝灰角礫岩と上位の礫層の間で、強度および弾性波速度に大きなコントラストがないことから、反射トモグラフィによって予測された境界EL200mは、地層境界というよりは、むしろ脆弱で破碎質の凝灰角礫岩と比較的硬質な凝灰角礫岩の地質境界を捉えたと考えられる。

当該探査範囲については、すでに掘削が完了しているが、凝灰角礫岩の上位の礫層が出現しなかったことから、反射トモグラフィによる探査結果が妥当であったことを確認することができた。

4. Dトンネルにおける適用結果

(1) 現場概要

今回適用した現場は、本坑に平行して調査坑が約1.0km先行して掘削されているトンネルで、探査時現在の切羽までは石灰岩が主に分布していた。事前地質調査（地表踏査、地表弾性波探査）では、

付近に比較的大きな断層が予測されており、掘削時に大きな支障になることが懸念された。そこで、その断層の有無と本坑への連続性を把握することを目的として、反射トモグラフィを調査坑より実施した。同時に、探査時切羽から削孔検層を実施し、予測精度の向上を図った。

(2) 反射トモグラフィ測定方法

今回の反射トモグラフィの発受振点配置をFig.15に示す。発振点を11点、受振点を10点設置した。発振はすべてハンマーにより、各点につき5回以上打撃し、合計128個のデータ（波形）を採取した。

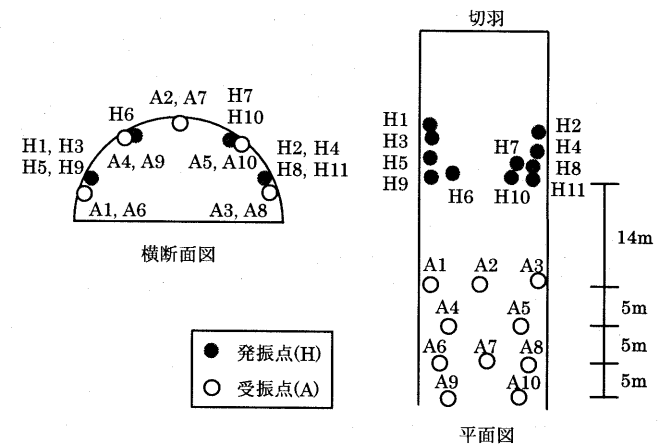


Fig.15 TRT Array of Sources and Sensors at D Tunnel

(3) 探査結果

Fig.16に反射トモグラフィによるトンネルの切羽前方探査の結果と削孔検層結果、実際に掘削した後の地質観察結果を比較した。

反射トモグラフィ結果において、ブロック状の影が密集して出現

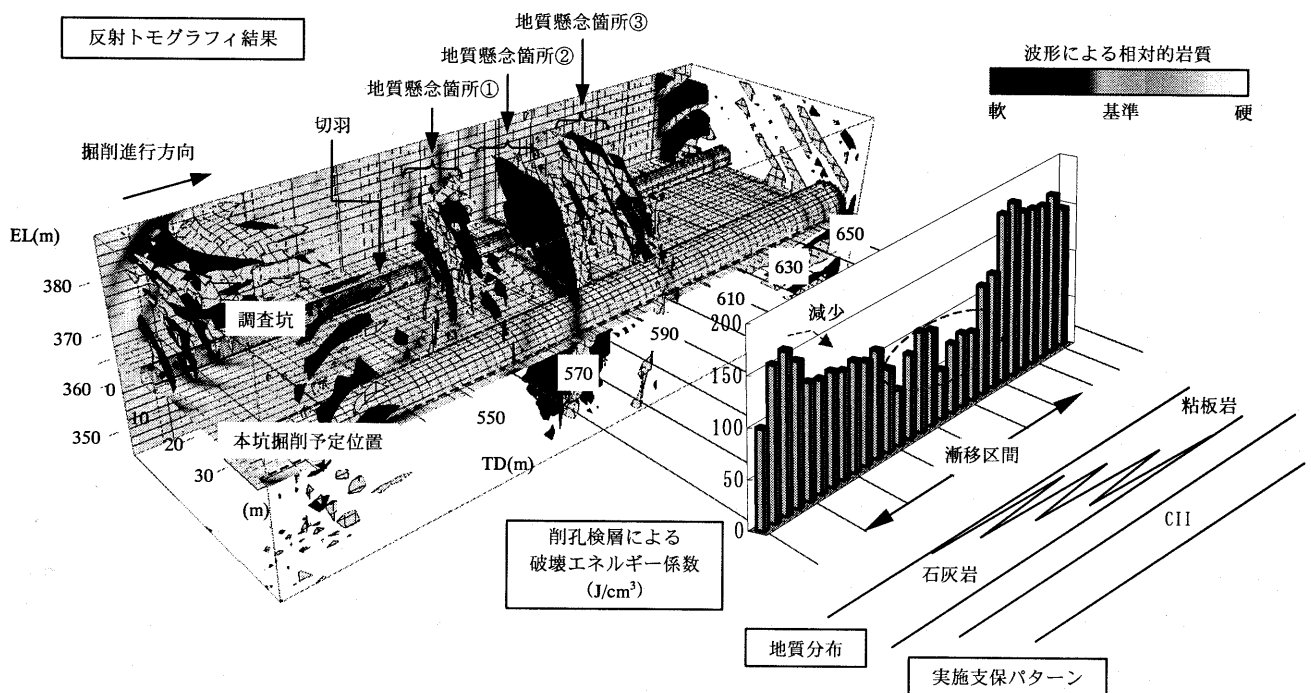


Fig.16 Comparison of the Result of the TRT, the Result of the Drill Logging and the Geological Map

している①TD570m 付近, ②TD595m 付近, ③TD610m 付近を地質懸念箇所として抽出した。黒い影が手前に出現している場合は硬→軟の不連続面, 灰色の影が手前に出現している場合は軟→硬を示すことから, 地質懸念箇所①は地質が硬→軟に変化する境界, 地質懸念箇所②③は幅約 15m の地質脆弱帯であると予測した。また, TD650m 以降に見られる大きな影はノイズによる偽像で, 地質懸念箇所③以降は堅硬な岩であると予測した。さらに, 本坑への連続性について, 地質懸念箇所①にはさほど明瞭な連続性は認められないが, 地質懸念箇所②③は調査坑での出現 TD の約 15m 手前の位置に連続していると予測した。ここで, 各探査結果と地質観察結果を Fig.16 に基づいて比較したものを Table 1 に示す。

Table 1 に示すように, 反射トモグラフィによる地質懸念箇所の位置は削孔検層結果と若干ずれるものの, 削孔検層における破壊エネルギー係数の増減に整合的であるといえる。また, 地質観察結果と比較すると, 石灰岩に粘板岩層が徐々に指交し始める TD570m 付近から完全に粘板岩に移行する TD630m まで, 風化変質を受けて粘土化した薄層が発達していることやそれ以降の粘板岩は均質で, 節理が発達するものの密着・安定していたことによく調和していたことがわかった。

また, この反射トモグラフィ結果から, 局所的な不良部は認められるが, 少なくとも前方 100m 内に, 事前地質調査で指摘されたような大きな断層はないと判断していたが, 実際も, 小規模に脆弱化した地質境界以外に大きな断層はなく, 支保パターンの変更も必要なかったことから, 反射トモグラフィの精度の高さを確認することができた。

Table 1 Comparison of the Result of the TRT, the Drill Logging and the Geological Condition

TD(m)	反射トモグラフィ	削孔検層	地質観察結果
570	硬→軟 (紫→黄)	150→100 J/cm ³	漸移区間入口
595~610	硬→軟 (紫→黄)	100→50 J/cm ³	特に粘土の薄層発達
630	軟→硬 (黄→紫)	50→150 J/cm ³	完全に硬質な粘板岩

IV. まとめ

A トンネルにおいては, 反射トモグラフィとあわせて従来手法である TSP も同じ探査対象範囲内で実施し, 調査ボーリング結果と比較した。その結果, 測定面では, 受振センサーを地中に埋め込まなくても高い精度で反射波をとらえることができたことや, 発振に発破のような強い振源を利用しなくても, S 波を利用したり高精度の加速度計を用いることにより, 高い分解能の反射波をとらえることができることを確認した。また, 地質状態が複雑な場合, TSP には問題があるが, 反射トモグラフィは比較的高い精度を確保でき

ることがわかった。

B トンネルにおいては, 反射トモグラフィ単独での前方探査であるが, 花こう岩内の所々に存在の予測された真砂・粘土帯の位置を正確に把握することができ, その結果, 迅速に補助工法の適用を決定し, 合理的な施工を実現することができた。本トンネルでの適用結果から, 花こう岩のような比較的硬質で均質な地山内に存在する真砂・粘土帯のような非常に軟質な不連続面を検出するのに, 反射トモグラフィが非常に適していることを確認することができた。

C トンネルにおいては, やはり反射トモグラフィ単独での探査であったが, 目的の礫層の位置を正確に把握することができただけでなく, その探査方向を広く 3 次元的に確保し, トンネル上方への探査も可能であることを確認することができた。また, 発振源として, TBM の掘削振動を利用しても, 精度の高い探査を実現することができるとも確認した。

D トンネルにおいては, 反射トモグラフィとあわせて削孔検層を実施した。これらの探査結果が非常に整合的であったことから, 反射トモグラフィにより, 広い範囲の地山状態を探索し, その概略を把握した後, 懸念される箇所については重ねて削孔検層を実施することで, より正確な不連続面の位置や規模, さらにその物性値(強度)を把握するという一つの前方探査システムを提案することができると考えている。

V. おわりに

以上, 反射トモグラフィのシステム概要の説明と, その現場適用結果を報告した。1999 年に開発されて以来, 反射トモグラフィは 12 現場において適用され, 27 回の実績を積み上げており, その実用性と探査精度の高さが非常に支持されている。今後は, 本システムの単独使用による探査精度の更なる向上と地山物性値の把握, トンネル切羽前方の速度分布の把握が可能となるシステムを目指して, 鋭意開発していく所存である。

参考文献

- 1) 山本拓治, 白鷺卓, 西岡和則, 青木謙治; 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, No.7, (2002), pp. 10-12.
- 2) 白鷺卓, 山本拓治, 西岡和則, 青木謙治; 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, 岩の力学国内シンポジウム, (2002), F18.
- 3) 白鷺卓, 山本拓治, 佐藤淳, 本庄竹志, 西岡和則; 反射トモグラフィ“TRT”の現場適用結果, 第 56 回年次学術講演会講演論文集, (2001), III-B014.