

発破掘削時の振動を利用した高精度トンネル切羽前方 探査法の開発

Predicting Geological Conditions Ahead of a Tunnel Face Highly Accurately Using Blasting Vibration Data

塚本耕治* 今泉和俊**

要 旨

トンネル切羽前方の地山状態を予測する TSP 法や HSP 法などの反射法弾性波探査では、切羽近くで計測するため施工を一時中断する必要があること、切羽前方に幅の広い断層破砕帯が存在する場合には実際と予測の反射面位置が大きく異なるなどの問題があった。このようなことから、施工への影響が少なく、事前調査の屈折法探査やトモグラフィ的な解析から求めた地山の弾性波速度を利用して反射面位置の予測精度を向上できる 3 次元トンネル切羽前方探査法を開発した。開発したトンネル切羽前方探査法を地質構造が明らかなトンネル坑口部に適用することにより、従来の方法では予測が難しかった複雑な地質構造の地山や、トンネルが反射面に鋭角で交差する場合でも反射面の位置を精度よく評価することができる。

キーワード：反射法探査、切羽前方探査、発破振動、差分法

1. まえがき

トンネルは地中深くに建設される線状構造物であるため、技術的、経済的な理由からトンネル全長に渡って十分な調査を行うことが難しい状況にある。山岳トンネルの事前調査では、ほとんどの場合に屈折法弾性波探査が行われ、そこで求めた弾性波速度の値に基づいて岩質ごとに地山の状態を大まかに分類し、その分類に対応させて予め用意されている標準設計（標準支保パターン等）を適用して設計を行う。しかし、設計の支保パターンと施工時の支保パターンが異なる場合も多い。

この原因の一つとして、従来の地表から行う弾性波探査では地山深部のトンネル掘削地点まで弾性波が十分に届かないこともあり、探査精度を向上することが難しく弾性波速度を正しく評価できない点が挙げられている。このような場合、施工中にトンネル坑内から行う切羽前方の調査が必要になる。

著者ら¹⁾は、掘削時の発破をトンネルルート上の地表に設置した受振器で計測し、その走時と事前調査の弾性波探査のデータを合わせてトモグラフィ的な解析を行い、切羽前方地山の弾性波速度分布を予測する方法を開発した。弾性波速度分布を精度よく予測するには、受振器の設置数や発振点（発破する位置）の数を増やして波線数を多くする必要があるが、地形条件から必要な受振器を設置することが難しく十分な予測精度を確保できな

いことがある。

このような場合に、トンネル坑内に受振器を設置して切羽前方地山を探索する反射法弾性波探査が有効である。代表的な反射法弾性波探査には TSP 法や HSP 法などがある。しかし、これらの探査法は切羽近くの計測になるため施工を一時中断する必要があること、切羽前方に幅の広い断層破砕帯が存在する場合には実際と予測の反射面位置が大きく異なるなどの問題があった。このようなことから、施工への影響が少ない 3 次元トンネル切羽前方探査法を開発した。開発したトンネル切羽前方探査法には、トンネル坑内のロックボルト頭部に設置した受振器を用いて発破掘削時の振動を自動計測できること、事前調査の屈折法弾性波探査やトモグラフィ的な解析から求めた地山の弾性波速度（以下、 V_p ）を利用して反射面（速度境界面）位置を精度良く予測できるなどの特徴がある。本稿では、開発した探査法の概要、数値解析モデルを用いた探査解析の検証と現場での適用実験の結果について報告する。

2. 発破掘削時の振動を利用した切羽前方探査法

2.1 計測概要

探査の配置を図-1、主な計測機器を表-1に示す。探査は、多点発振—多点受振で行い、切羽後方 45～60m の範囲にある 12 ヶ所のロックボルト頭部に受振器

*技術研究所 **東日本支社

を取り付けて発破振動を計測する。

ロックボルトは、一般的に材質が振動を伝えやすい鉄であることからウェーブガイド（導波棒）としての機能を期待できること、トンネル側壁に新たに削孔して受振器を設置する必要がないことから計測の準備作業を軽減できるなどの利点がある。そのため、受振器の設置は、**図-2**のようにナットに固定加工した受振器をロックボルトに取り付けることにより行った。また、受振器にはロックボルトの軸方向の振動を感度よく計測するため、共振周波数が高い 28Hz の MC 型速度地震計を用いた。また、記録装置は電源が入ると計測ソフトが起動し、事前に設定した計測条件でトリガー待ち状態になる。発破時に発破器からトリガー信号を取り込むと、波形の取り込みを開始し、12kHz のサンプリング周波数で 7 秒間の計測データを収録する。

探査は、トンネル切羽中央部に削孔した探査用の装薬孔に瞬発雷管を使用した少量の爆薬（親ダイ）を挿入しておき、掘削発破時に先行させて発破することにより探査に使用する振動を発生させて行う。

計測した発破振動波形の一例を**図-3**に示す。芯抜き発破の前に瞬発雷管を用いて切羽中央で探査用の小規模な発破を行い、2 段目の芯抜き発破の振動が受振器に到達するまでの振動波形 180ms のうち、切羽前方 100m 程度の地山予測に必要な 100ms の波形データを探査に用いる。10 切羽進行分の発破振動を継続的に収録し、収録データから探査発破の波形データを切り出して、反射法のデータ処理を行う。

2.2 反射法探査のデータ処理

探査終了後、探査装置内のコンピュータに保存した波形データを解析用のコンピュータに転送し、**図-4**に示す手順で波形データ処理を行い、反射波形を抽出する。波形データには、切羽前方の反射面からの反射波の他に、発振点から受振点までの直接波や探査地点後方からの反射波、さらにはノイズ等が含まれている。そのため、データ処理によってこれらを取り除き、反射波を抽出する。この反射波形を用いて、以下のイメージング処理を行い、トンネル切羽前方の反射面の位置を特定する。

2.3 差分法による走時を用いた反射エネルギー評価

イメージング処理には、**図-5**に示すディフラクションスタック法（DS 法）²⁾を用いた。DS 法では、切羽前方および周辺地山を含む 3 次元座標空間に一定間隔で仮想の格子点を設け、発振点から広がった波がその格子点において反射して受振点に戻ると仮定する。1ヶ所の発振点から発生した弾性波がある格子点で反射して受振点に到達する場合、波線理論から地山の V_p に応じて弾性波の伝播経路が求まり、この走時（伝播時間）が発振点から格子点までの走時 (T_S) と受振点から格子点までの走時 (T_R) の合計した走時 (T_S+T_R) として計算できる。この伝播時間から、その格子点に対応する波形トレース

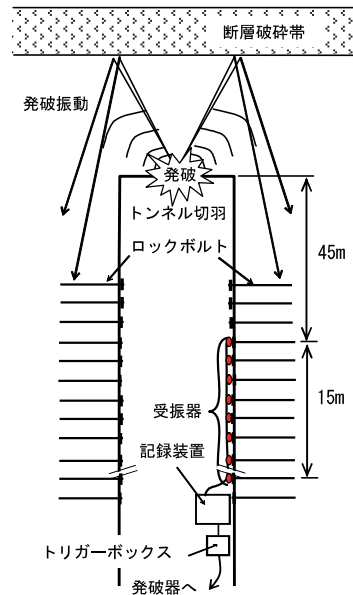


図-1 反射法探査の平面配置

表-1 主な計測機器一覧

機器名称	主な仕様
受振器	可動線輪型 (MC 型) 受振器 共振周波数: 28 (Hz) 感度: 35.4 (V/m/s)
地震波記録装置	入力チャンネル数: 16ch AD 分解能: 24 ビット サンプリング周波数: 12 (kHz)

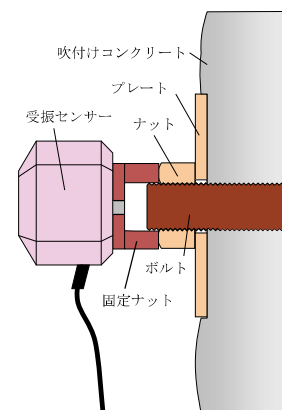


図-2 受振器の設置方法

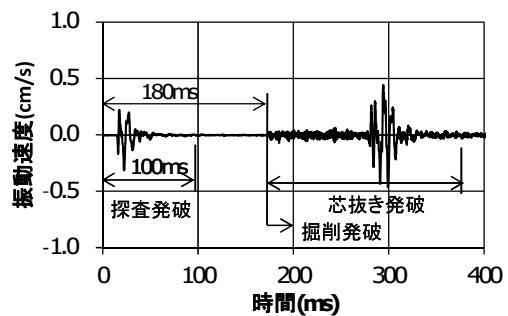


図-3 発破振動波形

上での位置が特定できる。それらの位置での波形振幅（片振幅）を合算した値を無次元化し、反射エネルギー（反射波振幅の 2 乗）を求めて、格子点に与える。もし、ある格子点が実際の反射面に相当すれば、この格子点の反射エネルギーが大きい値を示す。これらの格子点に接する平面を反射面として特定することができる。さらに、反射エネルギーの正負から、境界面前後での物性の変化が分かる。すなわち、反射エネルギーが正の場合には、境界面の前後で物性が硬質から軟質に変化し、負の場合には、軟質から硬質に変化することになる。

従来の方法は、発破した地山区間の V_p のみを用いて反射面の位置を予測するため、切羽前方に V_p の異なる層があると反射面の位置を精度よく求めることができなかった。そこで、屈折法探査やトモグラフィ的解析から得られる地山の V_p を用いて発振点～格子点～受振点の走時を 3 次元の差分法³⁾により計算する。この走時に基づいて DS 法により反射エネルギー分布を求め、反射面位置を予測する。これにより、従来の方法では直線の伝播経路を用いているため、低速度層の層厚が大きくなったり、速度変化が大きくなると予測誤差が増大するのに対し、差分法による走時を用いる方法では速度境界で屈折する伝播経路を考慮できるため、複雑な速度構造でも反射面を精度よく求めることができる。

3. 数値シミュレーションによる探査性能の検証

3.1 目的

数値モデルを用いて差分法による P 波の 3 次元波動伝播現象の数値シミュレーションを行い、計算により求めた波形を用いて反射面を予測し、解析モデルの反射面との比較から、開発した反射法探査の性能を検証する。

3.2 スカラー波動方程式と差分近似

P 波による 3 次元波動伝播現象は、式(1)のスカラー波動方程式で表せる。

$$(1/C^2)\partial^2 U/\partial t^2 = \partial^2 U/\partial x^2 + \partial^2 U/\partial y^2 + \partial^2 U/\partial z^2 \quad (1)$$

ここで、 U は圧力、 C は P 波の V_p である。
また、式(1)を差分近似して、次式を得る。

$$\begin{aligned} (1/C^2)[U(x,y,z,t+\Delta t) - 2U(x,y,z,t) + U(x,y,z,t-\Delta t)]/\Delta t^2 \\ = [U(x+\Delta x,y,z,t) - 2U(x,y,z,t) + U(x-\Delta x,y,z,t)]/\Delta x^2 \\ + [U(x,y+\Delta y,z,t) - 2U(x,y,z,t) + U(x,y-\Delta y,z,t)]/\Delta y^2 \\ + [U(x,y,z+\Delta z,t) - 2U(x,y,z,t) + U(x,y,z-\Delta z,t)]/\Delta z^2 \quad (2) \end{aligned}$$

解析領域内は、 x 方向に $\Delta x = a/L$ 、 y 方向に $\Delta y = b/M$ 、 z 方向に $\Delta z = c/N$ の間隔で格子点に区切られ、離散化される。ただし、 L 、 M 、 N はそれぞれ、 x 方向、 y 方向、 z 方向の分割数である。

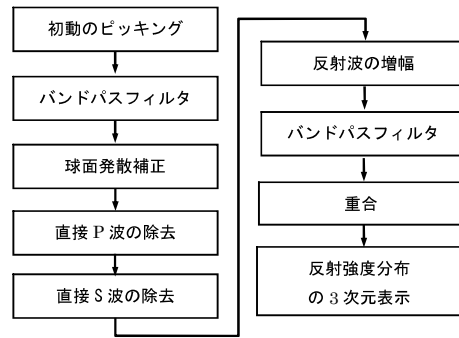


図-4 波形データの処理手順

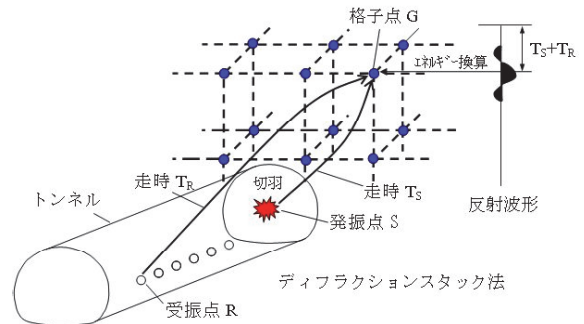


図-5 差分法による走時を用いた反射エネルギー評価法

また、初期条件($t=0$)となる振源には次式の波形を与えた。

$$U(x,y,z,0) = e^{-A^2((x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2)} \quad (3)$$

ここで、 x_0, y_0, z_0 は振源の座標、 A は波形の形を決めるパラメータで、値が小さくなると波長が長くなる。

3.3 計算モデル

数値計算モデルの地層構造外観図を図-6、反射面とトンネルの位置関係を図-7に示す。計算はトンネル断面方向(x)に 100m、トンネル軸方向(y)に 140m、高さ方向(z)に 100m の範囲を解析領域として、格子点間隔がすべての方向で 1m になるように分割数を決めた。

トンネル周辺の V_p が 4.6km/s である地山に層厚 20m の低速度層 ($V_p=3.0\text{km/s}$) がトンネルの切羽から前方 57m の位置でトンネル断面方向に対して水平方向に 30° 、鉛直方向に 60° の角度で交差する 3 次元モデルを用いた。 V_p 差が発生する速度境界面である反射面のうち、切羽側を第 1 反射面、切羽から離れた反射面を第 2 反射面とする。受振点は、幅員 10m のトンネル側壁に切羽から 15~26m 範囲の 1m 間隔に 12 点とした。また、発振点はトンネル切羽から掘削進行方向に 1~25m 範囲の発破 (1m 間隔) に相当する 25 点とした。計算モデル境界での反射波の発生を抑えるため、モデル境界には透過境界条件を与えた。計算の時間ステップは、探査の計測サンプル時間と同じ $80\mu\text{s}$ とした。この時間ステップは差分計算の安定条件を満足している。

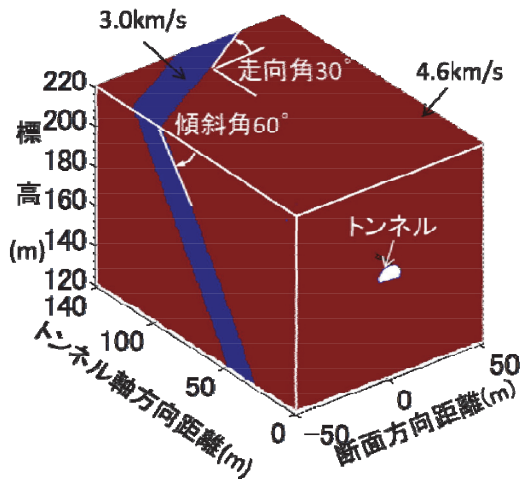


図-6 解析モデルの外観図

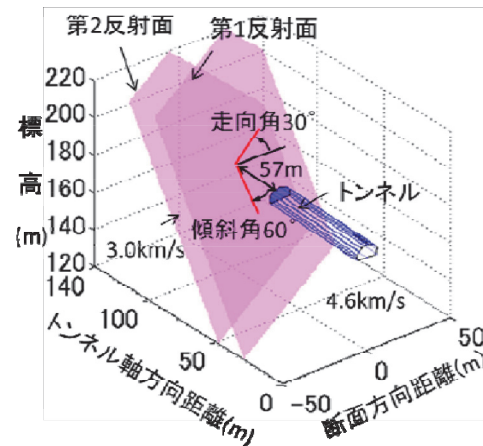


図-7 反射面とトンネル位置の関係

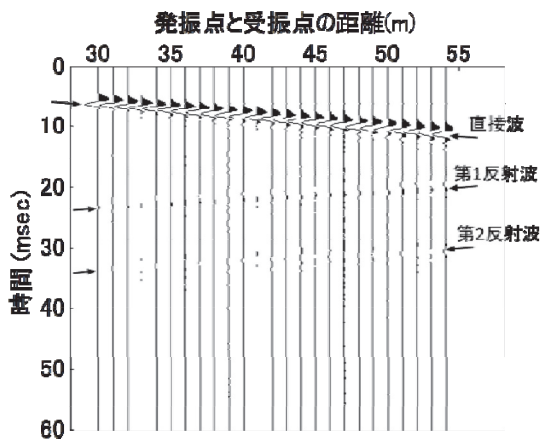


図-8 差分法により計算した波形 (受振点 1)

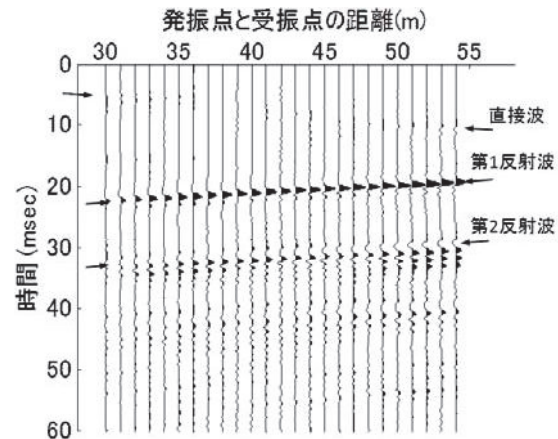


図-9 波形処理後の反射波形 (受振点 1)

3.4 計算波形のデータ処理

波動伝播の数値シミュレーションから求めた発振点に最も近い受振点 1 の計算波形を図-8 に示す。計算波形では、発振点から受振点に直接到達する直接波が確認できるが、切羽前方の反射面からの反射波は距離減衰により振幅が小さくなるため、明瞭に確認できない。

この計算波形を図-4 で示したデータ処理により求めた反射波形を図-9 に示す。直接波が取り除かれ、反射波を明瞭に確認できる。このうち、第1反射波は走時から切羽前方 57m の第1反射面による反射である。一方、第2反射波は直接波と逆位相で伝播しており、第2反射面による反射波である。後続にも振幅が小さい反射波を確認できるが、これらの反射面で重複した反射波であると推察できる。

3.5 反射波のイメージング処理と反射面の特定

計算波形のデータ処理から求めた 120 の反射波形 (12 (受振点数) × 10 (発振点数)) を用いてディフракションスタック法により 3 次元座標空間に反射エネルギーのイメージング処理を行う。

探査区間の伝播速度である直接波の V_p (=4.6km/s)

を用いて求めた反射エネルギーの評価を図-10 に示す。図中には解析モデルの反射面の位置を示す。切羽に近い V_p が 4.6km/s から 3.0km/s に変化する硬質→軟質の第1反射面の予測では反射エネルギーが大きいプロットが反射面付近に集中して正しい位置に評価している。一方、切羽から離れた V_p が 3.0km/s から 4.6km/s に変化する軟質→硬質の第2反射面の予測では解析モデルで設定した位置から前方に 10.6m 離れた位置にプロットが集中し、20m である低速度層の幅を 30.6m と間違った評価をしている。

切羽前方の弾性波速度 V_p を利用し、差分法による走時を用いて反射エネルギーを求めた結果を図-11 に示す。切羽に近い硬質→軟質に変化する第1反射面の予測では、従来の方法と同じ評価になる。一方で、切羽から離れた軟質→硬質に変化する第2反射面の位置付近にプロットが集中して正しい位置に評価している。

以上から、差分法による走時を用いて反射エネルギーを求める方法では、解析モデルの反射面付近に反射エネルギーが集中し、反射面の位置を精度よく評価できることを確認した。

4. 現場での実証実験

4.1 適用現場と周辺の地質状況

滋賀県内の道路トンネルにおいて現場実験を行った。地質は、古生代ペルム期の北鈴鹿層群を基盤岩とし、火成岩（緑色岩類）・チャート・粘板岩が分布する。

実験は、図-12の地質縦断面図に示す終点側坑口から140m手前のトンネル坑内で行った。図中には、事前の屈折法探査による V_p 分布の結果を示す。坑口部にかけての低土被り部は V_p が4.6km/sの C_M から C_H 級岩盤の上部に2.6km/sおよび、1.0km/sの低速度層が存在する。

トンネルと坑口の地質構造位置の関係からトンネル切羽の位置が切羽前方（トンネル軸方向）の反射面よりも切羽上部の反射面に近い場合、切羽上部からの反射波の影響が大きくなると予想される。そのため、実験ではトンネル上部の反射面と反射エネルギー分布の比較からトンネル切羽前方探査法の性能を検証する。

4.2 波形データ処理

切羽から46.2m離れた受振器で計測した切羽進行10m（探査発破10回）分の波形を図-13に示す。探査発破は爆薬量（200g）を使用して行った。その波形形状は同じであり、発破条件が同じであったことがわかる。なお、初動走時から求まる V_p は4.6km/sであり、屈折法による V_p と一致している。

4.3 探査結果

反射面の評価は、図-14のように空間（100m×160m×140m）を1m間隔で離散化した格子点で反射エネルギーを求める。反射エネルギーは、トンネル中心を通る鉛直断面で評価した。図-15は、従来の方法による反射エネルギーの分布であり、図-16は屈折法弾性波探査の V_p を利用して差分法の走時を用いた反射エネルギーの分布である。暖色になるほど硬質から軟質に変化する反射が強くなり、寒色になるほど軟質から硬質に変化する反射が強いことを表している。図中には、屈折法弾性波探査による速度境界面を重ねている。

従来の解析法による反射エネルギーは、発振点と受振点を焦点とする楕円状に分布しており、速度境界と整合していない。これに対して、差分法の走時を用いた反射エネルギーの分布は、トンネル切羽周辺の地表面、上部速度境界面、下部速度境界面などの反射面と整合する分布になっており、 V_p の異なる地山が存在する場合でも反射面を正しい位置に予測できることがわかる。

この結果、従来の方法では予測が難しかったトンネルが反射面に鋭角で交差する場合でも反射面の位置を精度よく評価できることが可能である。

以上から、開発したトンネル切羽前方探査法が複雑な地質構造で、 V_p が変化する地山においても反射面の予測に有効である。

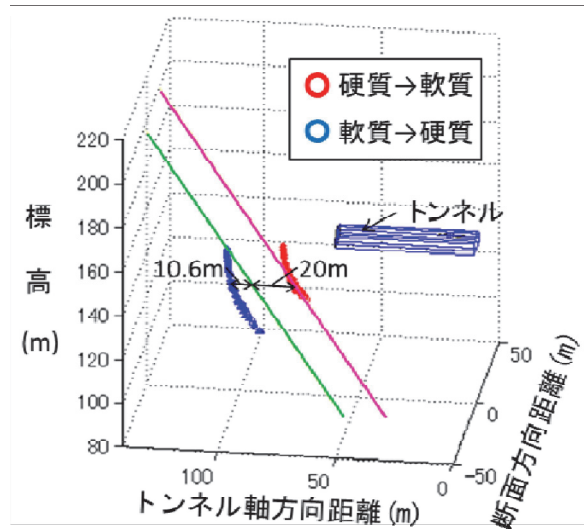


図-10 従来の方法による反射エネルギー評価

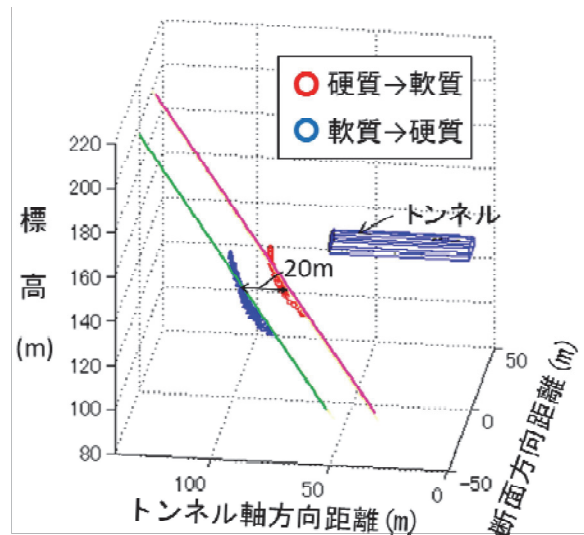


図-11 差分法による走時を用いた反射エネルギー評価

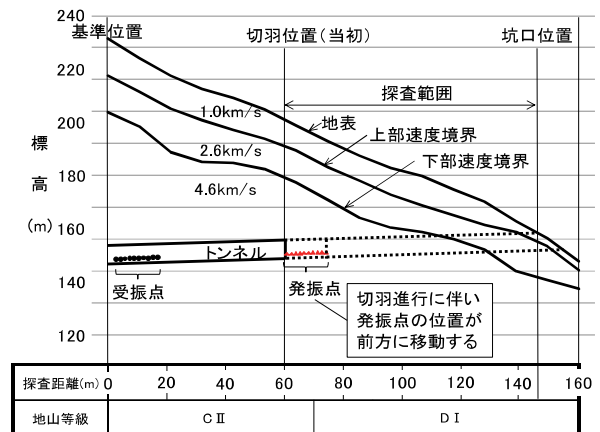


図-12 実験位置と周辺の地質状況

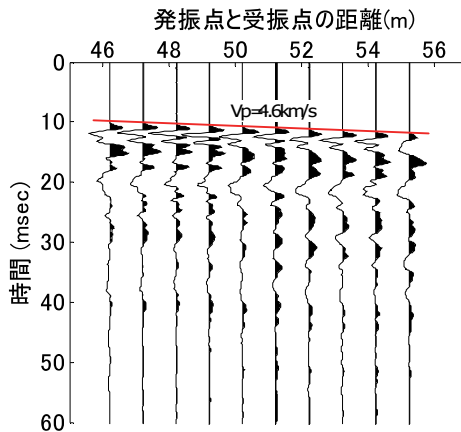


図-13 計測波形

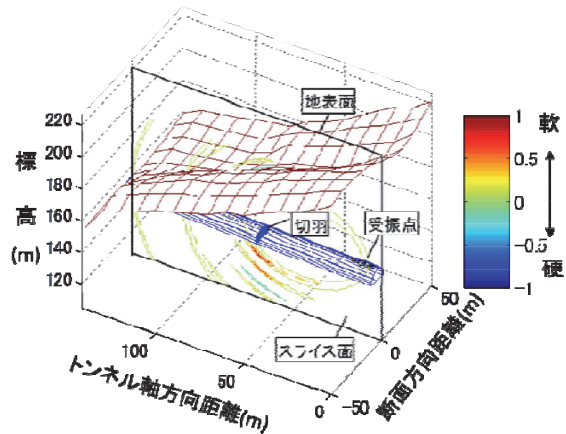


図-14 反射エネルギーの評価断面

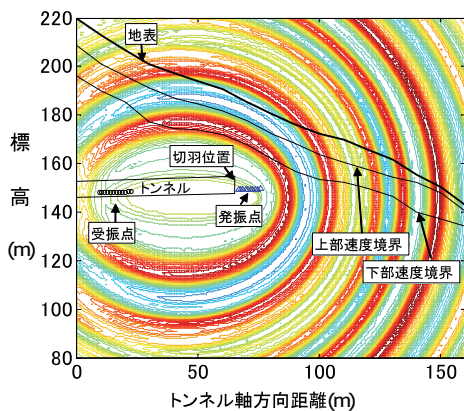


図-15 従来の方法による反射エネルギー分布

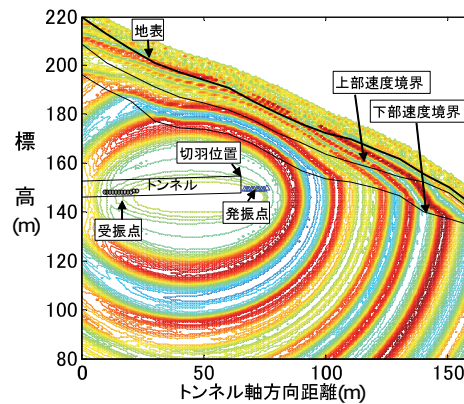


図-16 差分法による走時を用いた反射エネルギー分布

5. 結論

開発したトンネル切羽前方探査法の探査性能を確認するため、数値解析モデルを用いた数値シミュレーションと現場への適用実験を実施し、以下のことを確認した。

- i. 数値解析モデルを用いた数値シミュレーションを行った結果、差分法による走時を用いた反射エネルギーは反射面付近に集中し、反射面の位置を精度よく評価できる
 - ii. 現場の適用実験を行った結果、反射エネルギーはトンネル切羽周辺の地表面、上部速度境界面、下部速度境界面などの反射面と整合する分布になる
- 以上から、従来の探査法では予測することが難しかったトンネルが反射面に鋭角で交差する場合でも切羽前方の反射面の位置を精度よく予測評価できる。

6. あとがき

これまでに、掘削発破の振動を利用して GPS の時刻情報をもとに坑内の発振時刻と地表に設置した受振器の受振時刻から走時を求め、屈折法弾性波探査の計測デー

タと合わせてトモグラフィ解析を行い、切羽前方地山の V_p を求める探査法を開発している。この探査法から求めた V_p を開発した 3次元トンネル切羽前方探査法に適用することにより、信頼性の高い切羽前方地山の把握が可能になる。今後、現場適用を目指して、さらなる切羽前方地山予測の精度向上に取り組んで行くつもりである。

【参考文献】

- 1) 篠原 茂、塚本耕治、浜田 元、「トモグラフィ的解析手法によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測」、トンネル工学報告集、Vol.14、pp.77-82、2004
- 2) 塚本耕治、浜田 元、篠原 茂、寺田道直、「トンネル切羽前方探査における高精度化の検討」、トンネル工学報告集、10、pp.191-196、2000
- 3) J. E. Vidale, Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions、Geophysics、vol.55、No.5、pp.521-526、1990