

# 弾性波の3成分受振による トンネル切羽前方の高精度イメージング

芦田 譲<sup>1</sup>・松岡俊文<sup>2</sup>・楠見晴重<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学大学院助教授 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

本論文では、3成分受振による弾性波を用いた、トンネル切羽前方の等走時面によるイメージング技術を提案する。切羽前方の地層境界からの反射波を3成分受振器で受振し、等走時面を用いたイメージングの際に波の到来方向に応じた重み付けを行うことで、偽像の発生を防ぎ切羽前方の地山状況を高精度で再構成することが可能となる。本手法を、実際のトンネル掘削現場におけるデータに適用したところ、トンネル掘削後の壁面観察結果と整合性のある結果が得られた。

**Key Words** : tunnel, seismic imaging, looking ahead, 3 components receiver

## 1. はじめに

トンネル掘削において、事前に切羽前方の地山状況を把握することは、突発的な切羽崩壊事故を未然に防ぎ、順調な施工を可能にするとともに、強いては安全で経済的な工事へとつながることから重要なことである。しかし、通常の事前調査において多用されている地表からの屈折弾性波探査による断層や破碎帯などの情報は精度面において不十分である。また、坑内で行われている水平ボーリング調査は費用がかかり、調査中は掘削作業を一時中断しなければならず、工期に影響を及ぼすため充分には実施されていないのが現状である。さらに、超大断面トンネルにおいてはTBMの導入により、事前の切羽の詳細な前方予測が重要となってきた。

本研究では反射面イメージングの解析手法として開発された等走時面を用いたアルゴリズムを用い、切羽前方の地山状況を3次元画像化することにより、高精度で把握することを試みる。さらに、3成分受振器を用いた弾性波記録を用いることにより解析精度の向上を目指す。そして、実際に掘削作業中の道路トンネル建設現場で、段発発破を振源として取得したデータを用いて、1成分受振器記録と3成分受振器記録の解析結果を比較することにより、3成分受振器を用いた解析の有効性についても検討する。

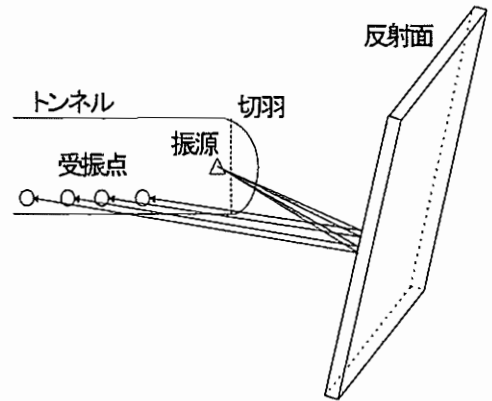


図-1 切羽前方探査概念図

## 2. 解析手法

トンネル切羽弾性波探査では、図-1のようにトンネル内に設置した振源から弾性波を発生させ、切羽前方の地層境界からの反射波を、やはりトンネル内に設置した受振器で記録する。一般に行われている弾性波探査においては、受振器で得られる情報は時間変化に対して、地動に応じた振幅値として表される。しかし、切羽前方の反

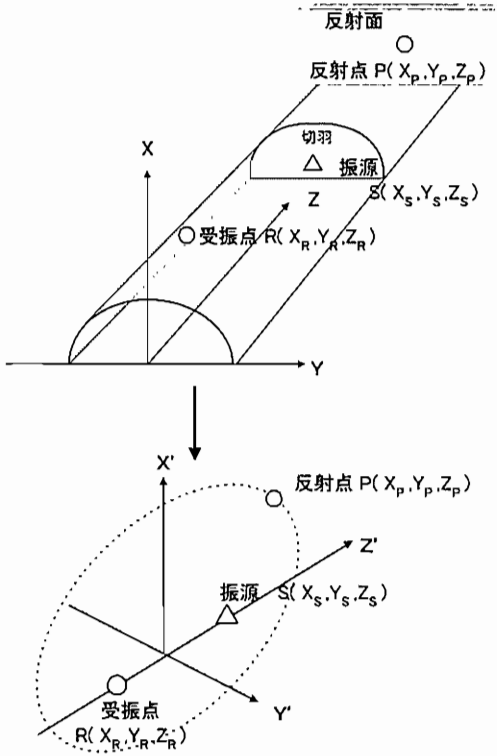


図-2 座標変換

射面の位置を推定するには、切羽からの距離に対して振幅値の変化を用いて切羽前方の地山状況をイメージングする必要がある。石油・天然ガス探査で多用される反射法地震探査における中核的な技術である CMP 重合法の適用は、トンネル切羽前方探査では実際上不可能である<sup>1)</sup>。そこで本研究では、等走時面を利用したイメージング技術を用いる。

(1) 等走時面によるイメージング

図-2 は振源と受振点の midpoint が原点となり、かつ振源と受振点と同じ座標軸上となるような座標変換を示すものである。変換後の座標系において、振源-反射点-受振点までの距離を  $L_r$ 、記録から読み取った、振源-反射点-受振点間の伝播に要した時間である走時を  $T_r$ 、反射面までの弾性波平均速度を  $V$  とすると、 $L_r$  は式(1)で与えられる。

$$L_w = V \cdot T_r \quad (1)$$

また、 $L_r$  は振源-反射点-受振点までの距離であることから、反射点、振源、受振点の座標を、それぞれ  $P(X_p, Y_p, Z_p)$ 、

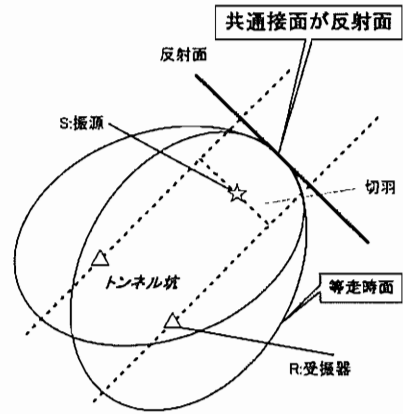


図-3 柵面群の共通界面による反射面のイメージング

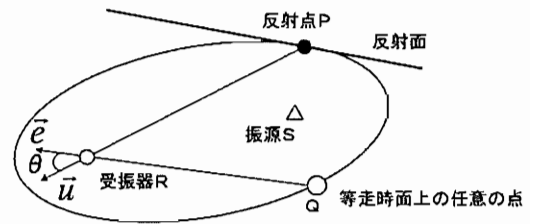


図-4 波の到達方向の検出方法

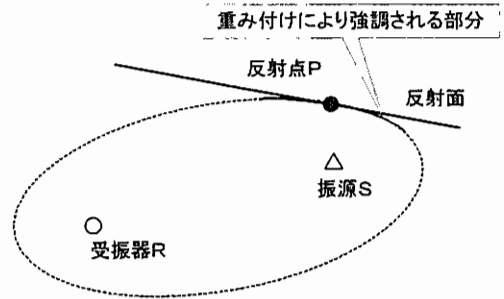


図-5 波の到達方向の利用による反射面の強調

$S(X_s, Y_s, Z_s)$ 、 $R(X_r, Y_r, Z_r)$  とすると、式(2)のようにも表される。

$$L_w = \sqrt{(X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2 + (Z_p - Z_s)^2} + \sqrt{(X_p - Y_r)^2 + (Z_p - Y_r)^2 + (Z_p - Y_r)^2} \quad (2)$$

この式(2)を変形すると、最終的に式(3)が得られる<sup>2)</sup>。

$$\frac{X_P^2}{L_{WP}^2 - 4Z_S^2} + \frac{Y_P^2}{L_{WP}^2 - 4Z_S^2} + \frac{Z_P^2}{L_{WP}^2} = \frac{1}{4} \quad (3)$$

式(3)は振源S、受振点Rを焦点とする楕円体の方程式である。したがって、反射点Pは振源Sと受振点Rからの距離の和が一定である点の軌跡であると言い換えることができる。いま、速度として平均速度を用いると、振源と受振点からの距離の和が一定ということは、走時が一定であるといえる。このとき、反射点Pは等走時間上の点になる。

直接波より求めたV、受振点で得られる走時 $T_R$ 、振源の座標を与えると、式(3)より振源と受振点の一つの組に対して一つの等走時面を表す楕円体が得られる。図-3に示すように振源と複数の受振点の組に対して、複数の楕円体を描けば、その楕円体群の共通接面が反射面となる。

## (2) 反射面の自動作図法

等走時面を描くにあたっては、反射波の走時を与えなければならない。しかし、反射波の走時の読みとりには、多くの時間と労力を要し、またS/N比が悪い記録では読みとり段階での誤差が問題となる。そこで本研究では、反射波の走時の読みとりを行わないで反射面を自動的に描く方法として自動作図法を用いる<sup>1)</sup>。ここで、自動作図法について概説する。

- 1) 調査地域を立方格子に区切る。
- 2) 一つの振源と受振点のペアにおいて、弾性波伝播速度、振源と受振点の位置を与え、記録上のある時間に対して式(3)で規定される楕円体を描く。
- 3) 楕円体と立方格子との交点にもっとも近い格子点に、記録上のその時間の振幅値に反射波の到来方向に応じた重み付けを行った値を加える。
- 4) 2)と3)の操作を全ての振源と受振点のペアの記録に対して行う。

この方法により、反射面となるべき共通接面の点には同位相で振幅値がたし合わされ、大きな振幅値が与えられる。また、そうでない点では異なる位相で振幅値がたし合わされることから、打ち消しあい大きな振幅とはならない。したがって、この操作により共通接面の点が強調され、反射面が描けることになる。

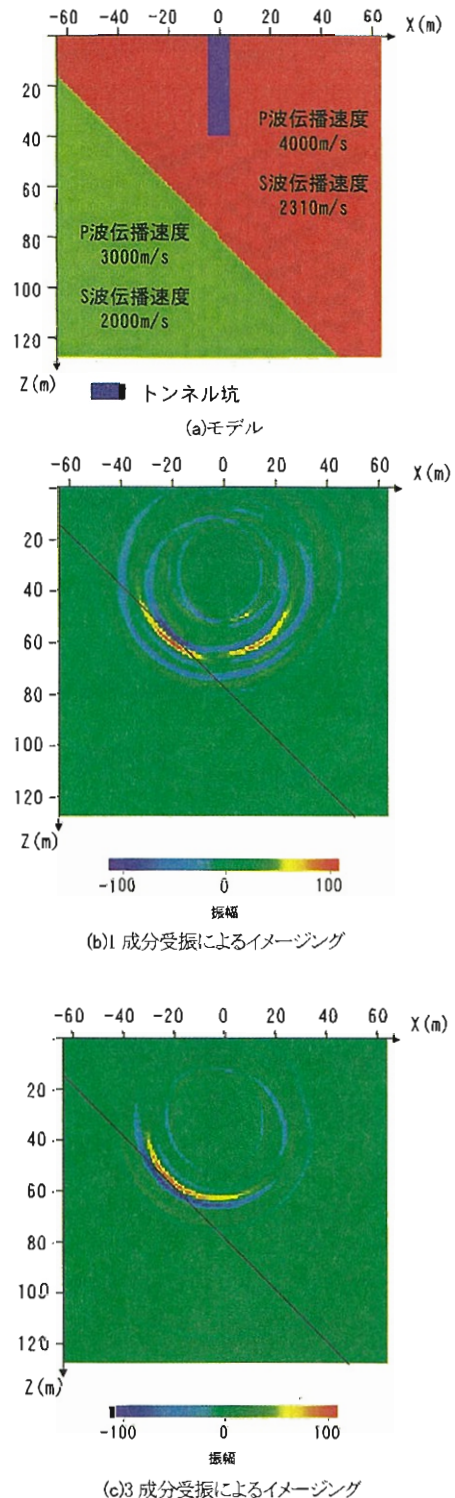
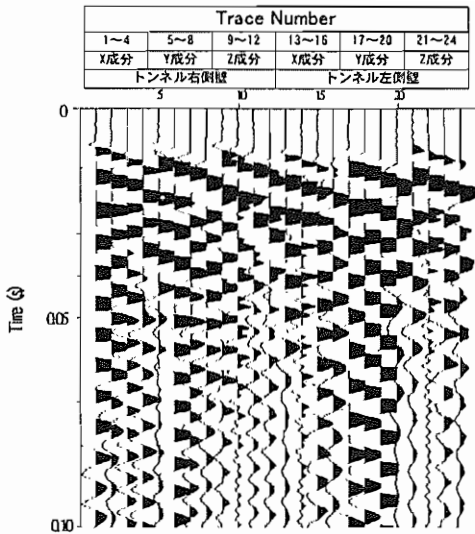
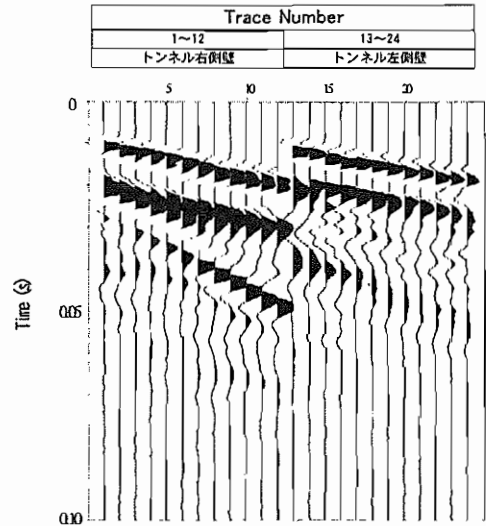


図-6 1成分と3成分受振によるイメージングの相違



(a)3成分記録



(b)1成分記録

図-7 現場記録

### 3. 重み付け

1成分受振器記録を用いたイメージングでは、1方向から伝播する波の振幅値のみを使ってイメージングを行うため、反射波の入射方向がわからない。そのため、真の反射面ではなく虚像が生まれる場合がある。また、トンネル軸方向以外の情報も含まれている可能性がある。これらの問題を解決するために、3成分受振器で記録をとることを考える。3軸方向からの記録から、受振点で観測された波の入射方向を推定することで、等走時間上の反射点周辺付近のみの振幅値を強調することが可能となる。

図-4は弾性波記録上のある走時 $t$ に対する等走時間を示す。走時 $t$ に入射してきた波を、受振器で記録した振幅値を成分とするベクトルを $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ で表す。また、等走時間上の任意の点 $Q$ から受振点への方向の単位ベクトルを $\vec{e} = (e_x, e_y, e_z)$ とする。二つのベクトルのなす角を、 $\cos \theta = \vec{e} \cdot \vec{u} / |\vec{e}| \cdot |\vec{u}|$ として求める。次に走時 $t$ の振幅値が $A$ ならば、等走時間上に $A \cos \theta$ を与える。この方法によると、図-4の点 $Q$ が反射点と一致するならば、 $\theta$ は0度であり、点 $Q$ に与える振幅値は $A$ となり、等走時間上の反射点ではない点には $A \cos \theta (< A)$ を与えるため、図-5に示すように真の反射点およびその周辺だけを強調でき、イメージング時における虚像を低減することができる。

1成分データに対する、3成分データの優位性を検証するために、弾性波シミュレーションを行った。図-6(a)

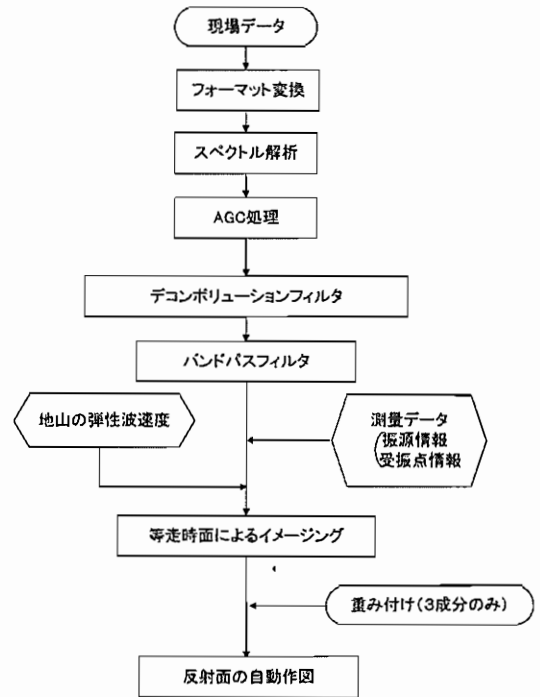


図-8 データ処理の流れ図

に示すモデルを用い、振源を切羽、1成分と3成分の受振器を左右壁面に、1成分受振器は側壁に垂直に、3成分受振器はx-方向をトンネル側壁方向に、y-方向を側壁に垂直に、z-方向を床面に垂直になるように切羽から4

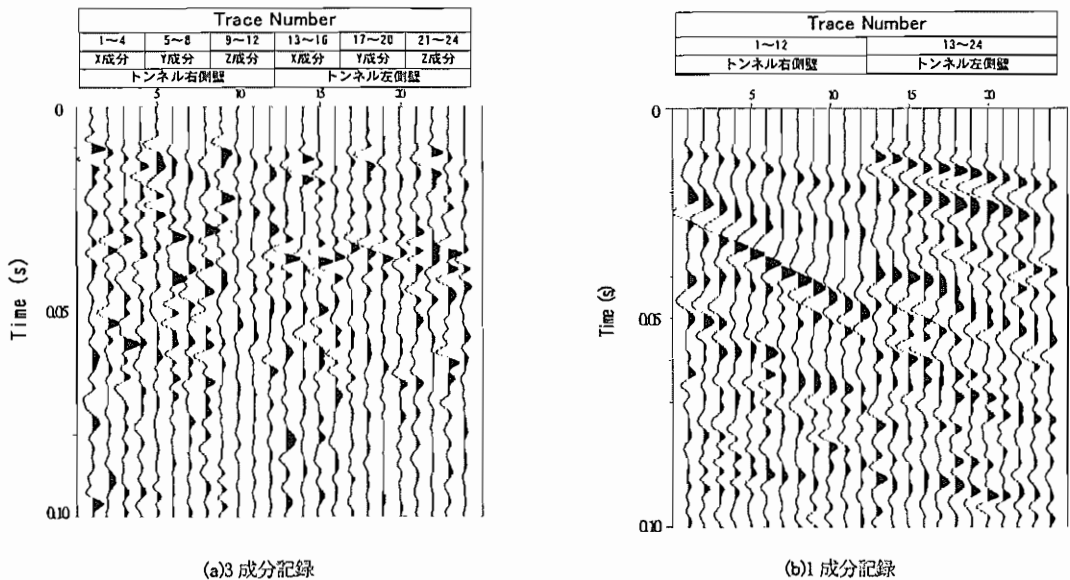


図-9 データ処理後の記録

m離して3m間隔で5個ずつ設置し、運動方程式をフーリエ変換を用いて近似するシミュレーションアルゴリズムにより、1成分と3成分の合成地震記録を作成した<sup>9)</sup>。図-6(b), (c)は、それぞれ1成分および3成分データを用いたイメージング結果である。図-6(b), (c)を比べると、1成分データの(b)では偽像が現れ切羽前方の反射面は正確には現れていないが、3成分データを用いた(c)では偽像がなくなり、反射面が強調された結果、それが正確に再構成されており、高精度なイメージング結果が得られていることがわかる。

#### 4. 現場記録への適用

##### (1) 測定状況

トンネルの左右壁面にそれぞれ1成分受振器(固有周波数:40Hz)を切羽後方33.5mから3m間隔で側壁に垂直に12個ずつ、3成分受振器(固有周波数:28Hz)を切羽後方33.5mから6m間隔で4個ずつ、x-方向をトンネル側壁方向に、y-方向を側壁に垂直に、z-方向を床面に垂直になるように設置し、振源として段発発破を用いた。図-7(a)は3成分受振器の現場記録であり、(b)は1成分受振器による現場記録を示す。図-7の(a)と(b)とを比較すると、3成分受振器記録では、ある周期で繰り返すリング状の波が認められる。これは、ボルトおよび速乾性セメントで同じようにトンネル壁面に密着させたにも拘わらず、3成分受振器は1成分受振器に比べて重量が

重いために受振器自体が振動したためによるノイズと考えられる。

##### (2) 処理・解析手順

3成分および1成分受振器記録を用い、データ処理および等走時間によるイメージングを行う。図-8は処理・解析手順のフローチャートを示す。地山の速度構造が均一であると仮定して、記録上で直接波の初動走時を読みとり、弾性波伝播速度は3660m/sとする。デコンボリューションフィルタには、地層の非弾性により伸長した波形をインパルスに短縮し、分解能を向上させるホワイトニングデコンボリューションと、記録中に含まれる周期性を持つ繰り返し現象を、その周期性を利用して予測し、元の記録から差し引くことにより繰り返し現象を除去する予測デコンボリューションがある。バンドパスフィルタとは、スペクトル解析の結果から信号成分と雑音成分との周波数成分の違いを把握して、雑音成分を除去するフィルタである。さらに、AGC処理とは、球面発散、透過損失、吸収効果により減衰した波形の振幅値を補正する処理である。

図-7(a)にみられた3成分受振器の振動による繰り返し現象を除去するために予測デコンボリューションをかけた結果を図-9(a)に示す。図-7(a)と比べると繰り返し現象が除去されているのがわかる。図-9(b)はデータ処理後の1成分記録である。図-9の記録を用いて等走時間の利用によるイメージングを行う。

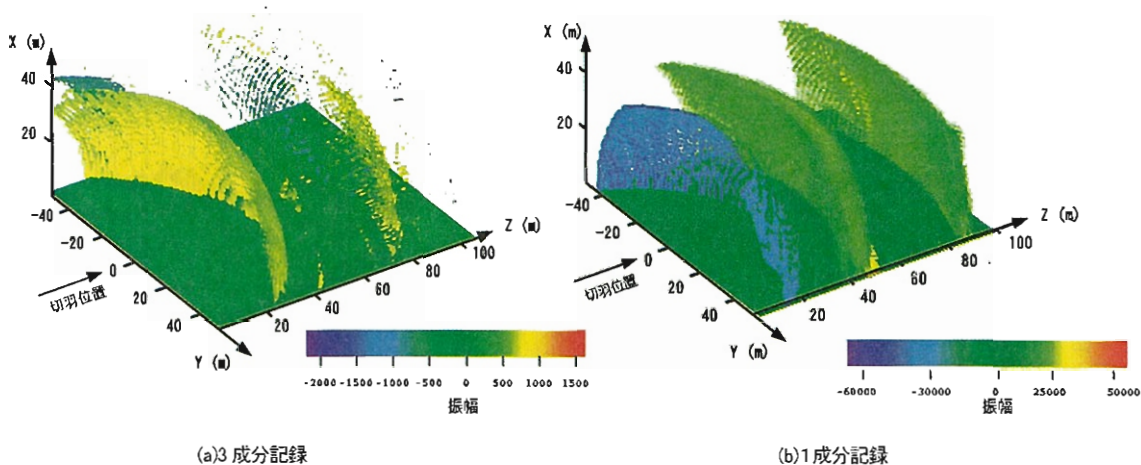


図-10 イメージング結果

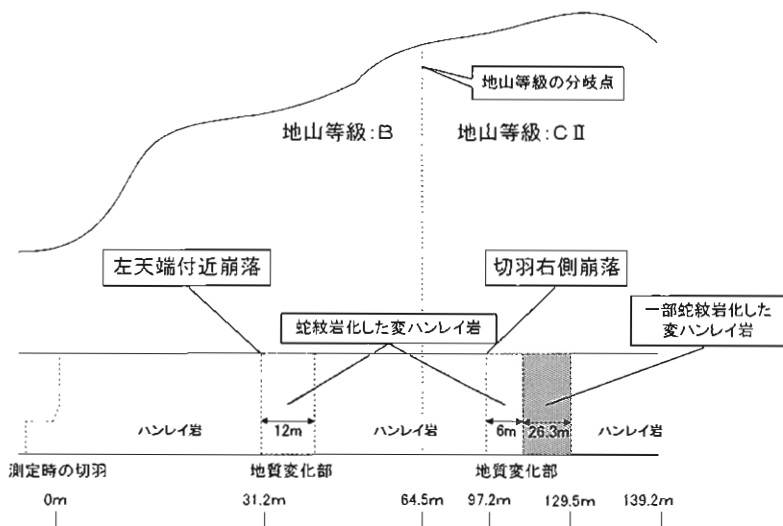


図-11 トンネル掘削後の壁面観察結果

### (3) 解析結果

図-10(a)は3成分受振器記録の解析結果を、図-10(b)は1成分受振器記録の解析結果を示す。また、図-11は現場の地質状況断面図を示す。図-10(a)、(b)と図-11を比較すると、切羽前方約30mの左天端付近崩落および95m付近の切羽右側崩落を惹起したと考えられるハンレイ岩から蛇紋岩化した変ハンレイ岩への地質変化部、また約65m付近の地山等級BからCIIへの変化部に対応する反射面が図-10(a)、(b)に認められる。図-10(a)と(b)の比較では、図-11では約30mの左天端付近崩落および約95mの切羽右側崩落という反射面の方向性に関する情報が得られていることは特筆に値する。さらに、3成分データによるイメージング結果における振幅値は、前述の自動作図法から反射係数の相対的な大小関係を表していると

考えられる。また、本調査で用いた記録装置では、図-9の記録における初動からもわかるように、圧縮波(押しの波)を負の極性として表現している。反射面前後の弾性波伝播速度と密度を、それぞれ $\rho_1, V_1, \rho_2, V_2$ とし、弾性波の進行方向を距離軸の正にとると、反射係数の値 $r$ は式(4)となる。

$$r = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2) \quad (4)$$

したがって、高音響インピーダンスから低音響インピーダンスの層に波が入ると反射係数は負となり、波の押し、引き関係は逆になり波の極性も反転する。図-10(a)の30、65、90m付近に見られる3個所の反射面は、高音響インピーダンスから低音響インピーダンスへの変化であり、

負の反射係数を持つ。したがって、振源から出た負の極性を持つ押し波は、反射面で引き波となり極性が反転し、その振幅は正の極性を示すことになる。このことは図-10(a)の3成分データを用いたイメージング結果における3個の反射波振幅の極性と一致している。図-11に見られる地質変化部の終端における反射面からの反射波は、その厚さが周波数および弾性波伝播速度から規定される波長の1/4という分解能の限界を超えることから、前端部からの反射波と重なり合い、分離は不可能である。要するに、イメージング結果における反射波の振幅値およびその極性から、反射面の音響インピーダンスの変化の度合いと硬・軟の変化に関する情報が得られることになる。

以上の結果、反射面の正確な位置、反射係数の大小関係の情報および反射波の極性からの音響インピーダンスの変化に対する情報から、3成分データの利用により1成分データに比べて、より高精度なイメージング結果が得られると結論できる。

## 5. まとめ

本論文においては、3成分受振器でトンネル切羽前方の地層境界からの反射波を受振し、反射波の到来方向を検知し、等走時面を描くときに反射波の振幅値に到来方

向に応じた重み付けを行うことにより、高精度で地山状況を把握するイメージング技術を提案した。その手法を実際のトンネル掘削現場において取得したデータに適用した結果、トンネル掘削後の壁面観察結果と良好な一致が得られた。

今後の課題としては、トンネル側壁に設置する3成分の受振器の数を増加させ、よりS/N比の向上したイメージング結果を得る等の工夫が必要である。

**謝辞**：現場におけるデータ取得にあたって、種々協力頂きました日本道路公団大阪建設局坂山安男調査役はじめ工事現場の関係者の方々に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 芦田 謙, 佐々宏一: 坑井間反射法地震探査データの深度変換, 物理探査, Vol. 46, No. 3, pp. 167-174, 物理探査学会, 1993.
- 2) 広岡 知, 芦田 謙, 佐々宏一: 等走時面の利用によるオフセット VSP データの深度変換, 物理探査, Vol. 44, No. 5, pp. 266-274, 物理探査学会, 1991.
- 3) 村山靖彦, 芦田 謙, 佐々宏一: フーリエ変換による地震波動現象のシミュレーション(1) —計算理論と計算方法—, 物理探査, Vol. 44, No. 1, pp. 18-26, 物理探査学会, 1991.

(2000. 4. 12 受付)

## SEISMIC IMAGING TECHNIQUE OF LOOKING AHEAD OF TUNNEL FACE BY USE OF 3 COMPONENTS RECEIVERS

Yuzuru ASHIDA, Toshifumi MATSUOKA and Harushige KUSUMI

In the present paper, an accurate imaging technique for looking ahead of tunnel face by use of 3 components receivers is proposed.

The reconstruction procedures of geological structure are as follows.

- 1) To receive the reflected waves from the geological boundaries by use of 3 components receivers.
- 2) To detect the incident direction of reflected waves.
- 3) To perform imaging by use of equi-travel time planes using the weight according to incident direction in order to decrease the generation of false image.

The proposed technique was applied to the actual field data. Consequently, the imaging results showed a good agreement with the observation report after completion of tunnel.