

トンネル切羽前方探査における受振器配置による重み付け

WEIGHTING FACTOR CONSIDERING RECEIVER LOCATION IN SEISMIC IMAGING AHEAD OF TUNNEL FACE

武川順一*・楠見晴重**・芦田 譲***

Junichi TAKEKAWA, Harushige KUSUMI, Yuzuru ASHIDA

The technology which survey the geological condition of ahead for tunnel face in the mountain tunnel are well known for the seismic imaging ahead of tunnel face. However, when geological boundary ahead of tunnel face is inclined with respect to tunnel axis, it is difficult to survey geological condition ahead of tunnel face.

In this research, study problem like these to obtain more precise estimation. First, numerical simulation was conducted to demonstrate proposed method. And next, we apply this method to field data obtained at tunnel construction site.

Key Words : seismic survey, tunnel, inclined geological boundary

1. はじめに

トンネル切羽前方探査において最も要求されることは、切羽前方に存在する断層破砕帯や弱層部をあらかじめ発見し、経済性や安全性の高い施工を行うことである。

従来の研究より、3成分受振器を用いることによって、1成分受振器を用いるよりも虚像を低減できるようになることが確かめられている¹⁾。しかし、トンネル軸と切羽前方に存在する破砕帯が狭角で交わる場合、その検出は一般には困難となり、虚像の出現は避けられない。もし、このような地質状況に遭遇した場合、切羽の崩落や側壁のせり出しなどが起こる可能性があり、工期や施工性・経済性に悪影響を与える。

そこで、本研究ではこのような断層破砕帯が存在する場合のトンネル切羽前方探査の精度を向上するために、トンネル坑内における左右受振器のイメージング結果の違いに着目し検討を行った。

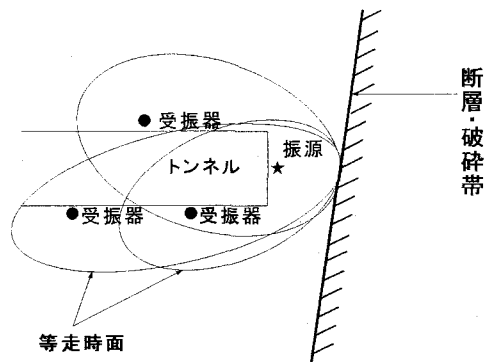


図-1 等走時面による反射点の導出

2. 等走時面手法によるイメージングの概要

本研究では、3成分データを用いた等走時面によるイメージング手法¹⁾によりトンネル切羽前方のイメージングを行った。図-1はイメージング手法の基本概念を示したものである。反射点は振源から受振器までの反射波の

* 学生員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻

** 正会員 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科

*** 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

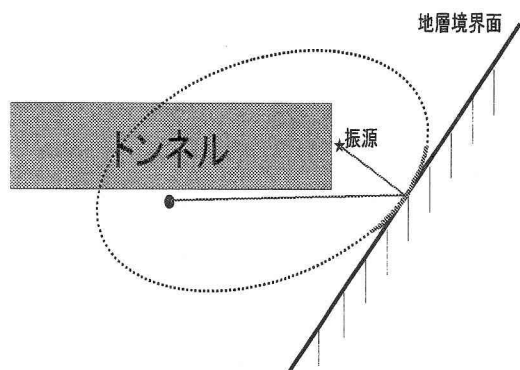


図-2 シミュレーションモデル

走時と切羽前方の弾性波速度との積が一定の軌跡上、つまり振源と受振器を焦点とする楕円体の表面上にあるということを表している。これにより、複数の振源と受振点による記録を組み合わせることで、これら楕円体群の共通接面として反射面を検出することができる。

また、受振データに3成分データを用いることにより反射波の入射方向が特定できるため、図-2に示すようにその方向にのみ重みを付けて振幅の値を与えることにより、虚像を抑え反射面の抽出の精度をあげることができる。

等走時面を用いた反射面の作図方法としては、切羽前方の空間を格子状に区切り、その格子点と描いた等走時面との交点に反射波振幅を与えていくというものである。したがって、真の反射点においてはその格子点上において振幅が足し合わされ、そうでない点においては振幅が足し合わされないで、反射点の抽出の精度を向上させることができる。

3. シミュレーション解析

(1) 差分法

本研究では、左右受振器配置におけるイメージング結果の違いを検討するために、差分法によるシミュレーション解析を行った。

2次元の均質媒質内における波動方程式は以下の式で表される。

$$\frac{1}{V^2(x,z)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここで、 U を媒質内のある時刻における圧力、 V を伝播速度とする。ここで、差分近似を用いることによって(1)式を近

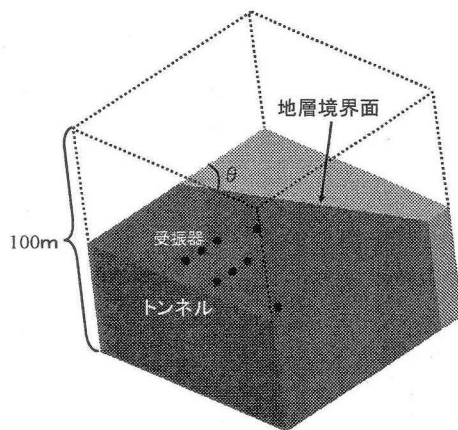


図-3 シミュレーションモデル

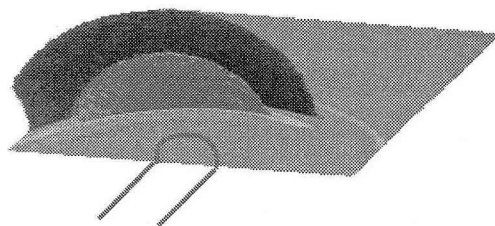


図-4 左側受振器を用いたイメージング結果

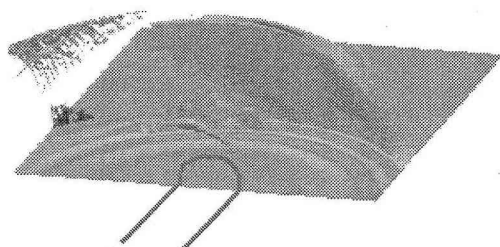


図-5 右側受振器を用いたイメージング結果

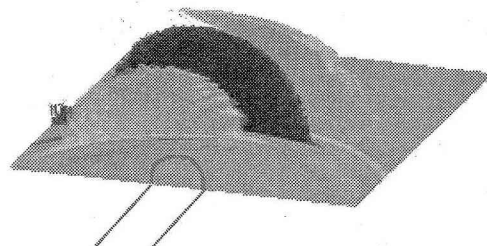


図-6 両側受振器を用いたイメージング結果

似的に解くことができる。例えば、 $U(x, z, t)$ の時間方向の2階偏微分は以下のように近似される。

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} U(x, z, t) \approx \frac{U(x, z, t+\Delta t) - 2 \cdot U(x, z, t) + U(x, z, t-\Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad (2)$$

振源の与え方には初期条件として与える方法と、振源関数として与える方法がある。本研究では、次式で与えるリッカーウェーブレットによって振源を与えた。

$$s(x_0, t) = \{1 - 2(\pi f_0 t)^2\} \exp(1 - \pi f_0 t)^2 \quad (3)$$

また、差分計算では解が収束と安定条件を満たしていることが必要である。解の安定とは、差分近似して解いた解の誤差が時間ステップの増加と共に増大しないことである。解の収束とは、差分近似により解いた解が、時間と空間のステップ幅を限りなく零に近づけたときに微分方程式の解に収束することである。

(2) 傾斜構造におけるシミュレーション

図-3 は、シミュレーションを行った速度モデル構造を示している。一辺 100m の 3 次元モデルでトンネル切羽前方に地層境界面が存在しており、左側に 70° の傾斜を持ってトンネル軸と交わっている。振源はトンネル切羽の中心部分に設置し、受振器は左右の側壁に切羽から 10m の距離から 5m 間隔で 5 個ずつ計 10 個設置した。図-3 に左側受振器のみを用いたイメージング結果を、図-4 に右側受振器のみを用いたイメージング結果をそれぞれ示す。図-3 は地層境界面の傾斜方向と同じ方向に設けられた受振器のデータを用いているので、そのイメージング結果は図-2 の地層境界面を的確に推定できているといえる。しかし、地層境界面の傾斜方向とは逆向きに設置された右側の受振器データを用いた図-4 では、虚像が現れておりそのイメージング結果は地層境界面を推定できているとは言えない。本来の切羽前方探索においては、得られた受振器データをすべて用いて解析を行うため、得られる切羽前方のイメージング結果はこれらを足し合わせた図-5 のようになる。右側受振器のイメージング結果の影響を強く受けているこのイメージング結果からは切羽前方を正確に推定できるとは言えない。この問題を解決するためには、切羽前方の地層境界面の傾いている方向に設置されている受振器のみを使ってイメージングすればいいように思われるが、切羽前方の地層境界面の傾きはわからないのが普通である。よって本研究では、切羽前方の地層境界面の傾斜方向を推定する方法として、左右受振器によるイメージング結果の違いと、3 成分受振器による入射方向の特定により解決することを試みた。

2 章で述べたように、3 成分受振器は反射波の入射方向を特定してその方向にのみ重みを付けることにより、反射面の検出の精度を向上させることができるというものである。よって、切羽前方の格子点上においては反射面の傾斜している方向により多くの振幅値が与えられているはずである。そこで、図-7 に示すように切羽前方の空間を左右の領域に分け、左右それぞれの領域ごとに与えられている振幅値を足し合わせる。そうすると、図中に示すように振幅を足し合わせた値は、地層境界面の傾斜している方向である左側において大きな値を示すことになる。この値をもって、地層境界面の傾斜方向を定量的に把握することを試みた。

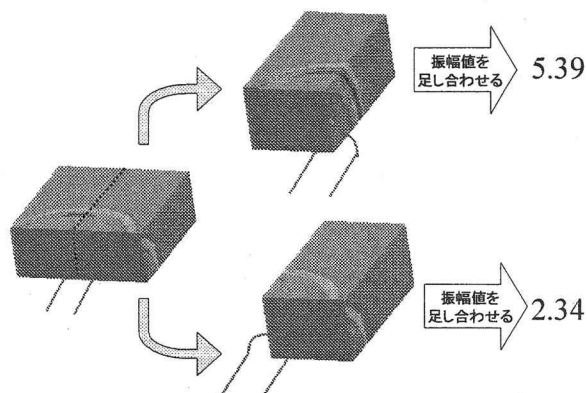


図-7 左右それぞれの領域における振幅値



図-8 虚像を低減させたイメージング結果

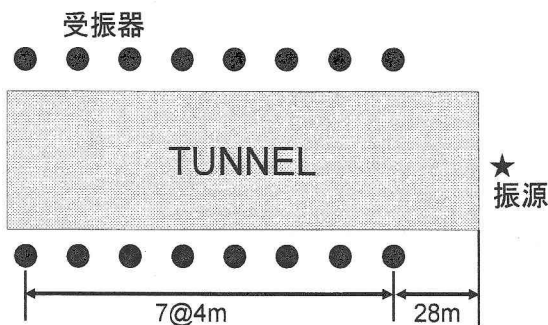


図-9 現場の振源・受振器配置図（現場 a）

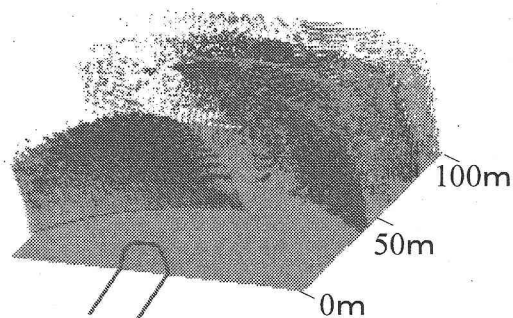


図-10 左側受振器データを用いたイメージング結果

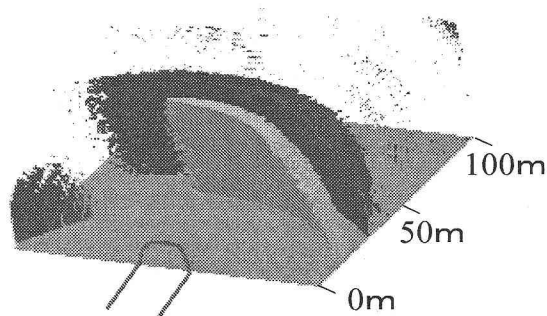


図-11 右側受振器データを用いたイメージング結果

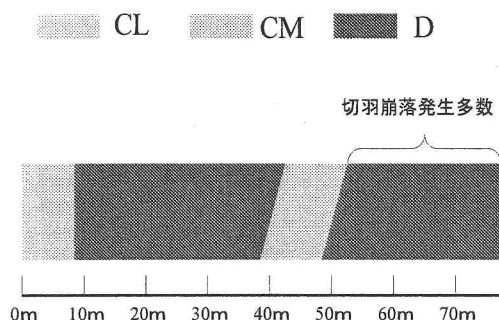


図-12 現場地質概要（現場 a）

具体的には、この左右の振幅値の大小の程度を切羽前方の地層境界面の傾斜の程度とみなし、この二つの値の比の値を重みとしてイメージング結果に反映させる。先程のシミュレーションの場合においては、左右それぞれの振幅値より切羽前方の地層境界面の傾斜方向は左側であるとし、その比の値は0.43となるので、右側受振器によるイメージング結果にこの重みを付けてから加え合わせる。これにより、右側受振器データによって生じる虚像を低減させることが可能になり、切羽前方のより正確なイメージングが可能になる。図-8のイメージング結果からも、虚像が低減されイメージングの精度が向上していることが確認できるので、シミュレーションにより本手法の有効性を示すことができたといえる。

4. 現場データへの適用

切羽前方の地層境界面がトンネル軸に対して傾斜して交わっている場合におけるイメージング精度向上の方法について、前章においてその有効性を示すことができた。よって、次の段階として、この方法が実際の現場で行われた切羽前方探査のデータに対しても適用できるか検討を行った。

(1) 現場 a

現場の振源・受振器配置図を図-9に示す。振源は切羽中央部分に設置された芯抜き用の発破を用いている。受振器は左右の側壁に8個ずつ、計16個設けてある。シミュレーションと同様に左右の受振器ごとのイメージング結果を比較してみると、図-10、図-11のようになる。図-10は左側受振器データを用いたイメージング結果、

図-11 は右側受振器データを用いたイメージング結果である。図-12 に切羽前方の地質状況を、岩級区分を用いて色分けして表す。この地質状況と、図-10、図-11 のイメージング結果を比較すると、図-11 のイメージング結果の方がより切羽前方を適切に推定できていると言える。トンネル軸に対する切羽前方の地層境界面の傾斜方向は、図-12 の地質状況より右側である。よって、トンネル右側側壁に設けた受振器データを用いたイメージング結果のほう

がより精度よく切羽前方をイメージングできるという結果は、シミュレーションと一致するところである。ここで、シミュレーションと同様に解析結果を左右の領域に分け、それぞれの領域における振幅値を足し合わせる。すると、左側の領域における振幅値の合計は 1.95、右側は 2.40 となる。よって、この 2 つの比の値を用いて、左側受振器によるイメージング結果に重みを付けてから左右イメージング結果を加え合わせる。その結果を図-13 に示す。重みを付ける前のイメージング結果は左側受振器データにおいて現れている、切羽前方 50~100m 付近における虚像が強く残っている。しかし、重みを付けてから得られたイメージング結果では、右側受振器におけるイメージングのみが強く現れており、イメージングの精度は向上しているといえる。以上より、この現場においては提案した方法の有効性を示すことができたものと思われる。

(2) 現場 b

現場の振源・受振器配置図を図-14 に示す。振源には先ほどの現場と同様に、芯抜き用の発破を用いている。図-15、図-16 に左側受振器のみを用いたイメージング結果と右側受振器のみを用いたイメージング結果を、図-17 に現場の地質概要を示す。左側の受振器を用いたイメージング結果では、第 1 層目のイメージング結果は非常によく現れているものの、それ以降の層に関しては検出されていない。しかし、右側受振器を用いたイメージング結果では、第 1 層のみではなくそれ以降の層に関してもイメージング結果がよく現れている。

ここで、シミュレーションと同様に重みをつけた後のイメージング結果について検討を行う。図-18 に重みを付ける前と付けた後のイメージング結果を示す。処理前

重み付け前

重み付け後



図-13 イメージング改良結果 (現場 a)

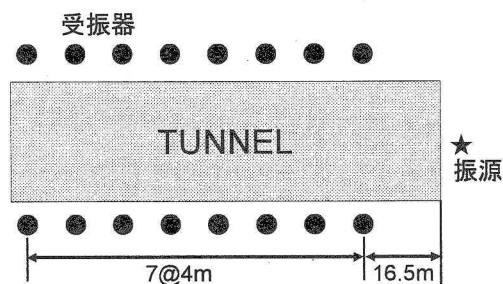


図-14 振源・受振器配置図 (現場 b)

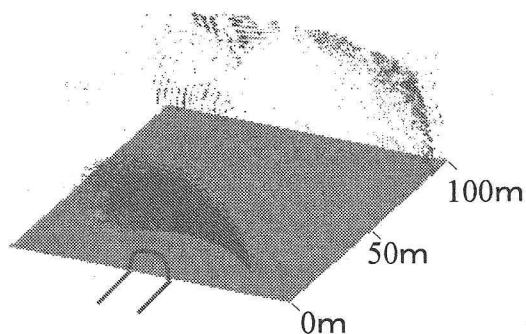


図-15 左側受振器データを用いた結果

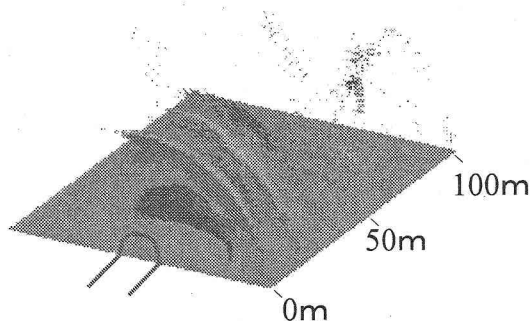


図-16 左側受振器データを用いた結果

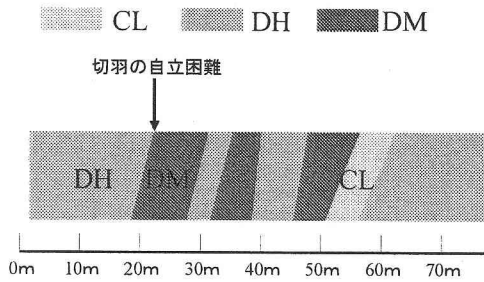


図-17 現場地質概要（現場 b）

の結果では、第1,2層目ははっきりと現れているものの、第3層目以降ははっきりと現れていない。し

かし、処理後の結果では、3層目以降に関しても非常によくイメージングされている。以上より、この現場においても提案した方法の有効性を示すことができた。

5. まとめ

本研究では、切羽前方に存在する地層境界面が、トンネル軸に対して傾斜を持って交わっている場合において生じる虚像について、それをどのようにすれば軽減できるか検討を行った。

初めに、方法の妥当性について検討を行いその有効性を確かめた後、実際の現場において得られたデータに適用した。その結果、本手法を用いる前において生じていた虚像が、本手法を用いることによってほぼ取り除くことができた。よって、本手法が実際の現場においても適用することが可能であるということが確認できた。

<参考文献>

- 1) 芦田譲・松岡俊文・楠見晴重：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、土木学会論文集、No. 680/III-55、pp. 123～129、2001.

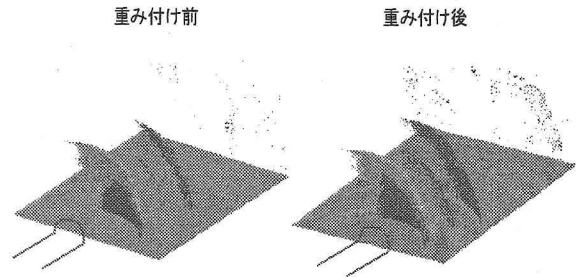


図-18 イメージング改良結果（現場 b）