

フルウェーブインバージョンによるトンネル

切羽前方の高精度イメージング

SEISMIC IMAGING AHEAD OF TUNNEL FACE USING FULL WAVE INVERSION METHOD

高橋 重行*・楠見晴重**・松岡 俊文***・芦田 譲****

Shigeyuki TAKAHASHI, Harushige KUSUMI, Toshihumi MATSUOKA, 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 it is not classified this method can be applied to all rock mass conditions, it is important to research the degree of application of this technique because rock mass that including many fracture zones are existing many location in Japan.

In this paper, the full wave inversion method is applied to the simulation date. This recognized that the seismic imaging ahead of tunnel face using this method is very useful for the investigation of geological condition.

Key Words : seismic imaging, tunnel, full wave inversion method

1. はじめに

トンネル掘削では、事前調査では捉えられなかった地質構造の変化がしばしば見られる。その為トンネルの支保設計を変更せざるを得ないことがあり、切羽前方地山の適切な予測は施工性、経済性、安全性などに多大な恩恵をもたらす。芦田¹⁾²⁾らは等走時面イメージング手法を用いて、現場で得られた波形記録からイメージングを行い、地山の定性的な評価を行っている。本研究ではフルウェーブインバージョンを用いて地山構造の物性値分布の把握など地山の定量的な評価を行うことを目的とする。しかしながらフルウェーブインバージョンは初期モデルを正確に定めなければならないという欠点がある。そこで等走時面イメージング手法によって、地山構造の定性的な把握できているものとして初期モデルを設定する。そしてフルウェーブインバージョンのトンネル切羽前方探査への適用性を検討し、より正確なインバージョンが可能となる手法の手順について提案する。

2. フルウェーブインバージョン³⁾⁴⁾

地下の物性値を数値的に直接求める弾性波トモグラフィでは、初動走時を用いた走時インバージョンが最も一般的な方法である。走時インバージョンは通常、波動の波長が非常に短いという仮定のもとに成立する波線という概念を用いて解析を行っている。この方法は、初動走時データの観測が容易で、データが少なく取り扱いも容

* 学生員 関西大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

** フェロー 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

**** 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

易であることや、初期モデルの影響を受けにくく、安定した解が得られるという長所から、すでに実用化されている。しかし、観測された波形データのうち、初動走時データのみを用いるため、観測された情報の大部分が利用されていないという問題点がある。また、特殊な取り扱いをしない限り、解析可能な範囲は振源と受振器によって囲まれた領域の内部に限られる。分解能は実際に使用した波動の数波長程度であり、比較的低いという短所も見られる。実際、振源・受振点の数や配置と、調査領域の大きさから設定される解析断面上のセルのサイズによって、構造の表現能力が制約を受けるために、セルのサイズ以上の分解能は得られない。

フルウェーブインバージョンは観測波形そのものをデータとし、振幅や後続波などの波形情報も観測量として扱い、物性値分布を求める方法である。従って、反射波や回折波が観測波形に含まれていれば、振源および受振点を配置した領域の外部の構造も検出することが可能である。このため、走時インバージョンと比較して、分解能が高いという長所が見られる。フルウェーブインバージョン手法が実用化されれば、弾性波トモグラフィによる地下構造調査の分解能向上、および物性値評価の精度向上が期待できる。その一方で、初期モデルやノイズの影響を受けやすいといった短所も見られる。

フルウェーブインバージョンは、観測波形と現在の速度モデルに対して計算された理論波形をデータとし、両者の差が小さくなるように速度モデルを修正して物性値分布を求める方法である。すなわち、波動方程式モデリングを用いて受振点での理論波形を計算し、観測波形との差が最小となるように最小二乗法を用いて物性値分布を反復的に求めるものである。フルウェーブインバージョンでは、図-1のように、観測波形と理論波形の振幅の差で誤差を定義している。反復計算を行うことによって誤差関数が小さくなるということは、観測波形と理論波形との差が小さくなり、正しい速度モデルに収束していることを意味している。従って、誤差関数を最小にする速度モデルを求めることがフルウェーブインバージョンの目的である。誤差関数が収束したとみなせるまで反復計算を行い、最終的な速度分布を求める。

3. トンネル切羽前方探査への適用

(1) 差分法⁵⁾

フルウェーブインバージョンの計算を行うにあたり、波動方程式を設定し、さらに計算処理を行う必要がある。

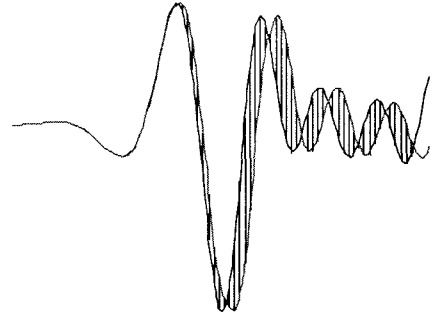


図-1 フルウェーブインバージョン

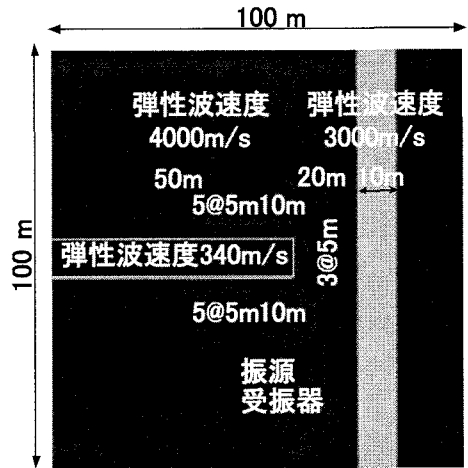


図-2 真の地盤モデル

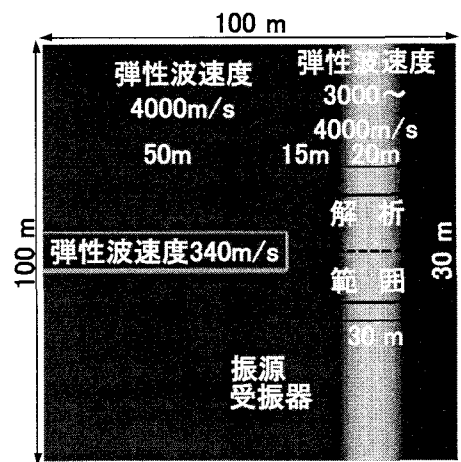


図-3 初期モデル

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。

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

初期条件として本研究では、次式で与えるリックウエ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としている。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としている。

(2) フルウェーブインバージョンによるトンネル切羽前方探査

フルウェーブインバージョンを用いて、掘削中のトンネルを想定した地盤モデルのイメージングを行う。解析を行うにあたって、まず真の地山構造を図-2のように設定する。トンネルの長さは50mで、その切羽面前方20mに弾性波速度3000m/sの低速度帯が存在している。トンネル坑内は大気中の音の伝播速度340m/sとする。受振器はトンネル両側壁に5個ずつ計10個、振源はトンネル切羽面に3個設定した。この時、振源・受振器の数と位置および観測波形のみを既知とし、地山構造は未知とする。

次に図-3のように初期モデルを設定する。また図-5は真の地盤モデル、初期モデルおよびインバージョン結果のトンネル中心軸上の弾性波速度分布を比較している。初期モデルの速度分布が示すように、低速度帯の速度構造は中央部に向かって徐々に速度が低くなるように設

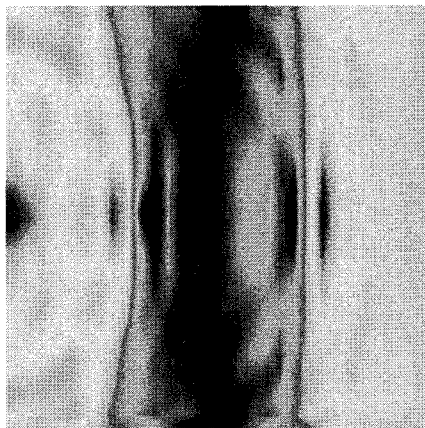


図-4 解析結果（解析範囲内）

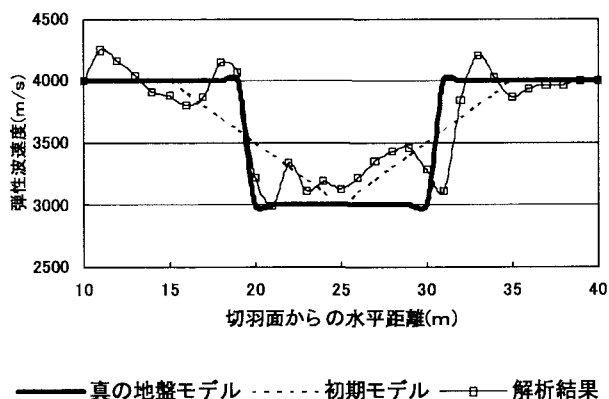


図-5 解析結果 トンネル中心軸上の弾性波速度分布

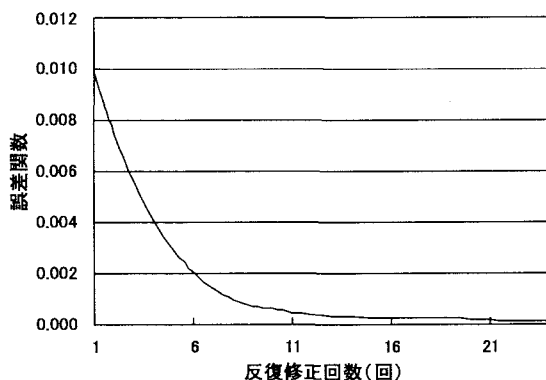


図-6 誤差関数の変化

定した。振源、受振器配置は真の地盤モデルと同設定である。初期モデルは既知とし、このモデルから理論波形を得る。真の地盤モデルから得られた観測波形と初期モデルから得られた理論波形を用いてフルウェーブインバージョンを行い、初期モデルを修正させて誤差を最小にする速度モデルを真の解とした。

図-4 は解析後の領域内における弾性波速度分布を示している。図-4、図-5 から断層破碎帯の幅と弾性波速度の予測が可能となり、トンネル前方探索としては十分な結果が得られたように思われる。しかし低速度帯のばらつきが目立ち、また低速度帯として仮定されていない部分にも速度補正がなされてしまっていることから、不十分な点もまた見受けられた。

4. フルウェーブインバージョンによる精度向上

(1) 誤差収束方法の改善

3 で行った解析で、誤差修正回数に伴う誤差関数の変化を表したものが図-6 である。2 で述べたように観測波形と理論波形との差が小さくなり、正しい速度モデルに収束しているならば、この解析では誤差関数が収束しており図-4 及び図-5 の速度モデルは真の地盤構造を表現していると言える。しかしながら、図-5 が示す低速度帯の弾性波速度分布はばらつきが目立ち、地盤構造を正確に表現できているとはいえない。このように真の地盤モデルとよく似た構造の初期モデルを設定したとしてもこの程度の解析結果を得ることが限界であり、これ以上に観測波形と理論波形との誤差が生じる現場波形の解析では精度の良い結果を得ることは望めない。以上のことから、従来の誤差の収束方法を見直す必要があると考える。

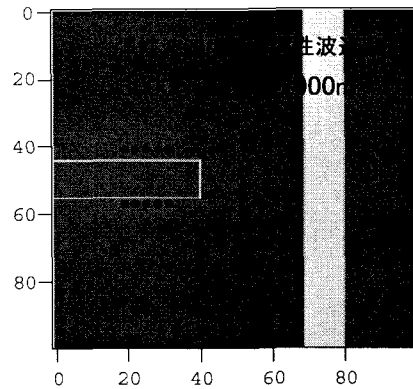


図-7 真の地盤モデル

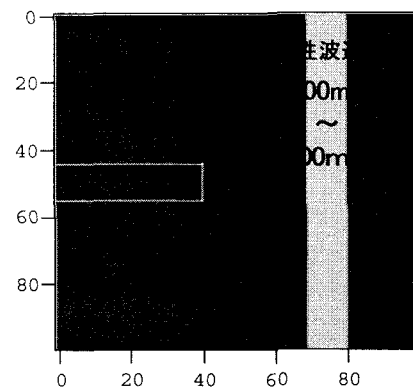


図-8 初期モデル

(2) 低速度帯をパラメータとしたときの誤差収束

ここで図-7、図-8 の地盤モデルを用いて解析を行った。真の地盤モデルは弾性波速度を 3000m/s とし、低速度帯の弾性波速度は 2000m/s とした。震源は切羽面に 1 個設置し、受振器配置はトンネル量側壁 5 個ずつ、計 10 個配置した。トンネルの長さは 40m であり、

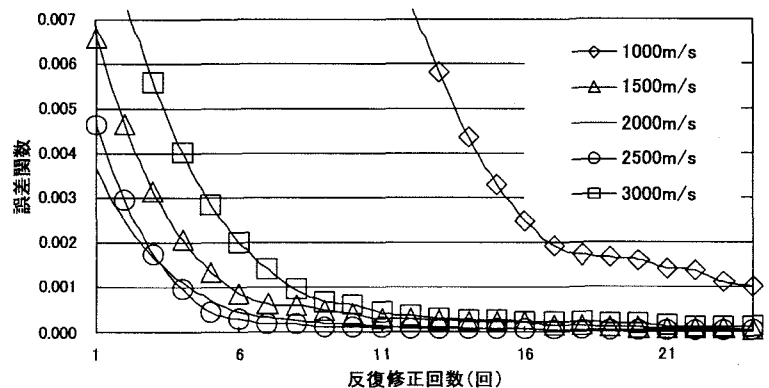


図-9 低速度帯を変化させて解析を行った際の誤差関数の変化

切羽前方 30m に低速度帯が存在する。初期モデルは真の地盤モデルとほぼ同設定で、低速度帯の弾性波速度を $1500\text{m/s} \sim 3000\text{m/s}$ まで 500m/s ずつ変化させて解析を行った。図 - 9 がこれらの解析結果であり、反復修正回数に伴う誤差関数の変化を表したものである。それぞれの曲線は一部を除いてほぼ同値の誤差関数に収束している。従来のフルウェーブインバージョンではこの収束値に着目し、ここで得られた地盤モデルを解としていた。これに対し本研究では、反復修正回数が 1 回目で得られる誤差関数に着目した。図 - 9 から分かるように、一回目の誤差関数は、初期モデルにおける低速度帯の弾性波速度が、真の地盤モデルにおける低速度帯の弾性波速度と近いものほど小さな値が得られている。

このことから、初期モデルの弾性波速度を特定し、観測波形と理論波形との誤差を収束させて真の弾性波速度を求める従来の手法に対し、本研究では初期モデルで設定する低速度帯の弾性波速度を変化させて解析を行い、その中から誤差関数が最小となるモデルの弾性波速度を真の解とする。図 - 10 および図 - 11 に従来の解析の流れと提案した解析の流れを示す。

ここで提案した解析の流れを、シミュレーションモデルを利用して検討を行った。図 - 8、図 - 9 は設定した真の地盤モデル及び初期モデルである。低速度帯の弾性波速度を $1500\text{m/s} \sim 2500\text{m/s}$ まで 100m/s ずつ変化させ、それぞれの弾性波速度で計算される誤差関数を比較する。この結果が図 - 12 である。この図より低速度帯の弾性波速度が 2000m/s の時に誤差関数の最小値が得られていることから、低速度帯の弾性波速度は 2000m/s であることが予測される。これは真の地盤モデルで設定した値と一致しており、この手法によるインバージョンの妥当性が証明された。

5. 考察

本研究では、フルウェーブインバージョン手法がトンネル掘削現場を想定した地盤モデルにおいても適用できるかを目的とし、その問題点の改善を検討した。以下に得られた知見を示す。

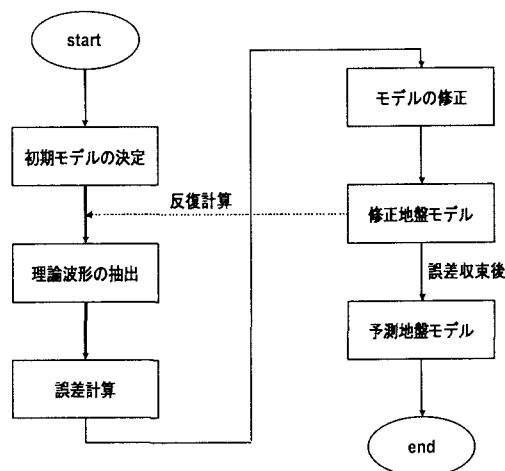


図 - 10 従来の解析の流れ

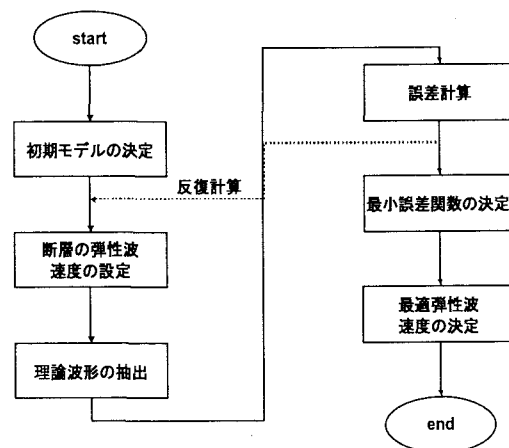


図 - 11 提案する解析の流れ

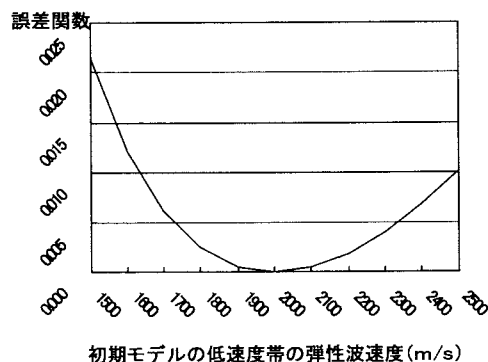


図 - 12 提案した解析によって得られた結果

- 1) フルウェーブインバージョン手法がトンネル切羽前方探査において適用が可能であることが確認された。
- 2) 初期モデルの設定において、任意の速度範囲で低速度帯の弾性波速度を設定し、その誤差が最小となる時の速度が真の弾性波速度であるという方法を提案した。そしてシミュレーションモデルによる解析の結果、低速度帯の弾性波速度を正確に測定することができ、この提案の妥当性が証明された。
- 3) 等走時面イメージング手法を用いて定性的な評価を行い、初期モデルを設定してからフルウェーブインバージョンを用いて低速度帯の定量的な評価を行うことによって、より正確なトンネル切羽前方探査が行えることが確認された。

<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、pp123-129、2001.
- 2) 楠見晴重、芦田譲、松岡俊文、野口哲史、佐野信夫、伊熊俊幸：破碎帯が連続した岩盤におけるトンネル切羽前方探査の適用、土木学会論文集、NO.743、Ⅲ-64、pp229-pp234、2003.
- 3) 渡辺俊樹、上坂進一、佐々宏一：音響波動方程式に基づくフルウェーブインバージョン数値実験（1）一解析手法の評価一、物理探査、Vol.50、No.3、pp209-210、1997.
- 4) 高瀬嗣郎、渡辺俊樹、藪内 聡、松岡俊文、芦田 譲：音響波フルウェーブトモグラフィの実データへの適用、物理探査、Vol.55、No.5、pp.376、2002.
- 5) 常 旭、芦田 譲、佐々宏一：差分法による弾性波探査における波動現象のシミュレーション、水曜会誌、Vol.21、No.3、pp.201-204、1990.