

トンネルトモグラフィにおける走時・フルウェーブ解析の数値実験

大林組 正会員 ○桑原 徹, 奥澤康一
日本地下探査 非会員 山田信人, 佐藤 礼

1. はじめに

トンネルトモグラフィは、トンネル坑内での起震、トンネルルート上の地上に設置された受振器で観測を行う弾性波探査である。トンネルトモグラフィの目的は断層破碎帯、風化変質帯、帯水層などの低速度層の検出であるが、弾性波の伝播が高速度帯を優先し低速度帯を通過し難いこと、トモグラフィ解析自体の特性や偽像の発生などから、必要な精度が得られていない場合がある。本報告では、前方探査の観点から問題となる地質構造をモデル化し、一般的に行われている初動走時（波の伝播時間）に基づく走時トモグラフィと近年進歩の著しい全波形情報に基づくフルウェーブトモグラフィ（図-1）の両面から、数値解析によりトンネルトモグラフィの課題と可能性を検討した。

2. 速度構造モデル

数値解析のための速度構造モデル（図-2 左側上段：TRUE MODEL）は、トンネル延長 2km、土被り 475～325m とし、速度が深度と共に増加する中で、表層の風化層、トンネル天端上方の水平低速度層（帯水層）、高角度でトンネルと交差する断層破碎帯、トンネル上方のブロック状の低速度部を組み込んだ。

3. トモグラフィ解析の方法

本報告では、走時トモグラフィ解析の 1 ケース、フルウェーブトモグラフィ解析の 2 ケースを取り扱う。

- (1) 走時トモグラフィ：アイコナール方程式を用いた走時計算と最小二乗法を用いた通常の走時トモグラフィであるが、各種のオプション機能により偽像の発生などが最小限に抑えられている¹⁾。
- (2) 音響波動方程式によるフルウェーブトモグラフィ：音響波動方程式を用いたアジョイントステート法²⁾により、P 波速度と密度を解析する。S 波速度は解析対象外である。
- (3) 弾性波動方程式フルウェーブトモグラフィ：弾性波動方程式を用いたアジョイントステート法²⁾により、P 波速度、S 波速度、密度を解析する。解析に必要な震源関数は、トンネル空間を入力した速度モデルを用いてスペクトル要素法³⁾で計算した波形と、有限差分法で計算した波形を比較検討することにより求める。

4. トモグラフィ解析の条件

今回は数値シミュレーションによる走時およびフルウェーブトモグラフィの解析手法の検討、ソフトウェアの検証が目的であるので、起震・受振配置などの測定配置（地表受振点間隔 10m、地表および坑内 1000m までの起振点間隔 20m）は、実際の現場測定を模擬したものではない。

トンネル掘削は図-2（トンネル位置：左側上段 TRUE MODEL 中の白線）の左側から右側へと進行し、図の中央部の断層破碎帯（距離 1000m）の手前までの測定で、トンネルトモグラフィ解析を行った。

5. 解析結果と考察

走時トモグラフィ（DWT）を図-2 の左中段に、音響フルウェーブトモグラフィ（FWI 1）を図-2 の左下段に、弾性フルウェーブトモグラフィ（FWI 2）を図-2 の右側に示す。

キーワード 切羽前方探査、トンネルトモグラフィ、走時トモグラフィ、フルウェーブトモグラフィ
連絡先

〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640

(株) 大林組 技術研究所 地盤技術研究部 TEL 042-495-1015

〒273-0033 千葉県船橋市本郷町 658-2

(株) 日本地下探査 事業本部 地盤調査部

TEL 047-300-0613

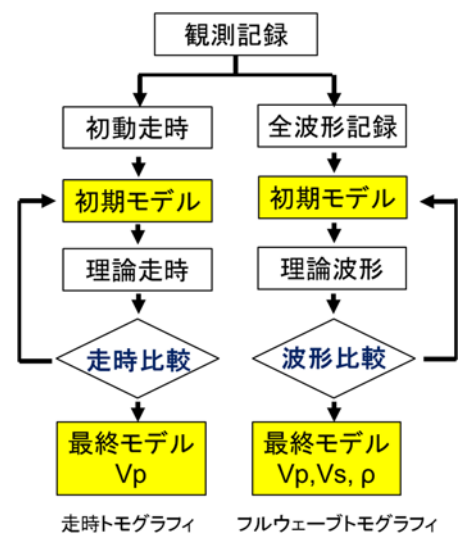


図-1 トモグラフィ解析の流れ

- (1) 解析コスト、難易度は DWT, FWI1, FWI2 の順に上がり, DWT から FWI1 へ, FWI1 から FWI2 へのステップアップには, 理論面や計算機の処理能力など, 技術的にもハードルが高い.
- (2) DWT では従来の解析に比べると偽像が著しく低減されたが, 水平低速度層の再現性には課題を残した.
- (3) FWI1, FWI2 では細部の相違はあるものの, 概ね同様な再現性を示し, 水平低速度層も含めて TRUE MODEL の解析的課題をほぼ再現できた. 全波形情報の解析の効果と考えられる.
- (4) FWI2 において同一周波数での解析結果を比べると, 再現性は密度, P 波, S 波の順に向上する. 密度には観測記録がないのでいたしかたないが, 参考程度の結果であった. S 波は相対的に波長が短いので P 波よりも高い分解能(解析精度)を示している.
- (5) FWI における反復計算は低周波 10Hz から 40Hz まで順次行った. P 波の解析精度は周波数が高くなるほど向上するが, 14Hz で概ね収束している.

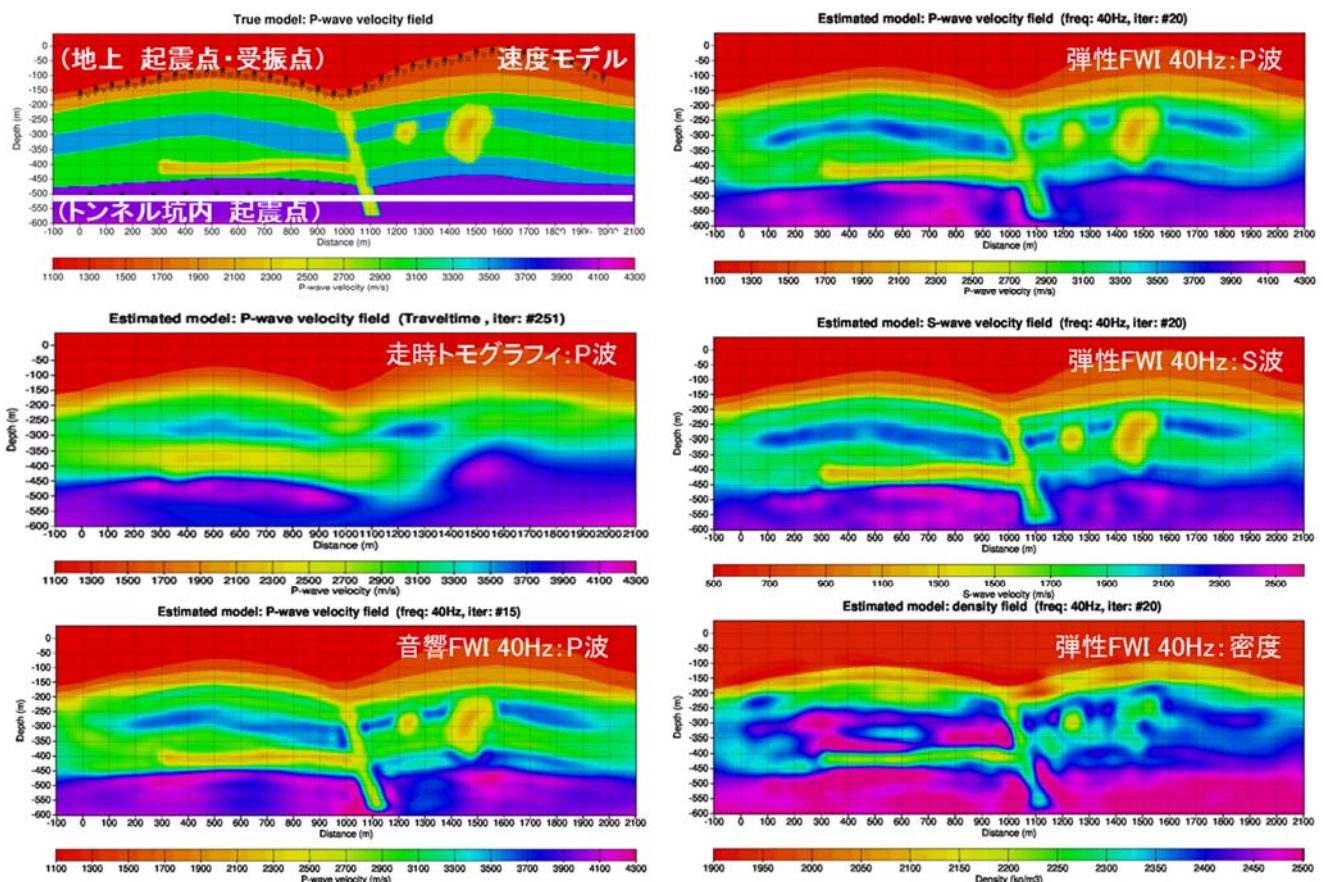
6. おわりに

数値シミュレーションによるフルウェーブトモグラフィの解析手法の検討を行い, その有効性と課題を確認した. 今後は実測定における観測ノイズの処理方法, 最適な観測配置, 加速度計の周波数特性の検討などが必要である.

Dr. Christophe Barnes (Université de Cergy Pontoise, GIM-Labs) の御協力に対して, 記してお礼申し上げます.

参考文献

- 1) C. Barnes, et al.: Diving wave tomography, SEG Tech. Prog. Expand. Abs., pp. 3953-3957, (2011), 2) A. Tarantola: Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. GEOPHYSICS, Vol. 49, No. 8, 1984.8, pp. 1259-1266., 3) D. Komatitsch and J. Tromp: Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation Geophys. J. Int. Vol. 139, pp. 806-822, 1999



左側上段: 速度モデル, 左側中段: 走時トモグラフィ, 左側下段: 音響フルウェーブトモグラフィ

右側 (上・中・下段): 震源関数による弾性フルウェーブトモグラフィ

図-2 速度構造モデルとトモグラフィ・シミュレーション