

数値実験による トンネル走時トモグラフィの再現性評価

奥澤 康一^{1*}・三宅 由洋¹・山田 信人²・佐藤 礼²・桑原 徹³

¹大林組 技術研究所地盤技術研究部（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

²日本地下探査 事業本部地盤調査部（〒273-0033 千葉県船橋市本郷町658-2）

³桑原徹技術士事務所（207-0022 東京都東大和市桜が丘3-44-37）

*E-mail: okuzawa.koichi@obayashi.co.jp

トンネルトモグラフィによる前方探査について、近年の難工事として報告されている2つの施工事例に見られる地質構造をモデル化し、数値実験に基づきトモグラフィ解析の課題を検討した。走時トモグラフィの解析手法には、通常のアイコナール方程式と最小二乗法に加えて、相関距離概念の導入や偽像軽減などの各種機能が付加されており、インバージョン解析の総合的な再現性向上がなされている。

数値実験の結果、高角度断層と深部熱水変質帯に相当する低速度帯には偽像の発生もなく十分な再現性が確認できたが、トンネル天端上方の帯水層に相当する水平低速度層の再現性は不十分であった。後者に関しては、トンネル坑内の受振点追加によりトンネル天端上方の波線が密となり十分な再現性が得られた。

Key Words : *geological prediction ahead of the tunnel face, tunnel tomography, travel time tomography, numerical experiments, low-velocity layer*

1. はじめに

山岳トンネルにおいて、切羽前方の地山状況を的確に予測することは、切羽の崩壊や地山の変状を未然に防止し、安全で合理的な施工、工程の確保、短工期の急速施工を行う上で不可欠である。前方探査技術としては、先進ボーリング調査（ノンコアボーリングによる削孔検層、中尺～長尺ボーリングなど）や弾性波探査（TSPなどの反射法、TSWD、トモグラフィなど）がある。

トンネルトモグラフィは、トンネル掘削中にトンネル坑内で起震（ハンマー打撃、専用発破、掘削時発破）し、トンネルライン上の地表部に多数設置された受振器によりトモグラフィ測定を行い、設計時の屈折法弾性波探査結果を初期モデルとして、これら施工中の観測記録に基づき弾性波速度（P波速度）分布の解析が行われている。実用的な観点からは、2次元測定解析が一般的である。

トモグラフィ解析の中心は波線追跡計算（レイトレーシング）とインバージョン解析（いわゆるトモグラフィ解析）である。波線追跡計算はホイヘンスの原理あるいはその改良版、アイコナール方程式による差分近似により行われている。インバージョン解析は、過去には様々な手法が提案されていたが、概ね各種の最小二乗法（ILST）と同時反復再構成法（SIRT）に集約されている。

実際に運用されている解析プログラムの詳細に関しては明らかではないが、全体としては孔間弾性波トモグラフィの応用として発展、あるいはトモグラフィ的手法を用いた屈折法弾性波探査解析法の拡張版として構成されているようである。

したがって、既往のトモグラフィ解析技術の課題としては、①層構造でない不均質構造、および高角度で傾斜する地質構造の検出精度が低下、②「深度とともに地山速度は増大」の前提に合わない速度逆転層、および層厚が十分でないブラインド層の検出が困難、③低速度帯には波が伝搬しにくい、脆弱層や空洞の検出精度が低下、④起震点～受振点と平行する層構造は検出しにくいなどが予想される^{1,2)}。

トンネルトモグラフィの探査対象としては、①小土被り区間（切羽の安定性確保、地上の重要施設への対応として地盤沈下の抑制）、②大規模な地すべり土塊、③断層破碎帯の精査、④土被りの大きい地山の精査などが考えられる。したがって、脆弱部に代表されるような低速度帯の再現性が最も重要と判断される。

解析技術の現状をみると、最近に至っても上に述べた課題の解決について必ずしも有効な手段がとられているとも言えないようで、前方探査としてのトンネルトモグラフィの再現性について改めて確認しておく必要がある。

と考えられる。本報告では、数値実験を利用してトンネルトモグラフィの再現性に関して検討をおこなった。

2. 走時トモグラフィの数値実験手法

(1) トモグラフィ解析手法

本研究ではDiving wave tomography³⁾⁴⁾（以下、DWTと略す）を用いてトンネルトモグラフィの精度向上と性能評価を試みた。DWTにおいても波線経路計算はアイコナール方程式による差分法、インバージョン解析は最小二乗法であるが、①初動走時の自動読み取りと信頼度の付加、および信頼度の高い読み取りデータに大きな重み付けを与える解析処理、②相関距離の概念の導入、③波線入射角と波線密度の重み付けによる偽像（特に円形状の低速度部偽像）の軽減などの各種機能が付加されている。これらの相乗効果によりインバージョン解析の再現性向上を目指している。

(2) 数値実験の流れ

今回はすべて数値実験でトモグラフィ解析を行うために、通常の調査観測データを利用したトモグラフィ解析とは若干異なる点がある（表-1）。調査観測データがあ

る場合は観測波形から初動（初動走時、伝搬時間）を読み取るが、今回は速度構造モデルに基づき数値解析で初動を求める。方法としては、粘弾性波形シミュレーションによって波形自体を計算する場合と、アイコナール方程式を用いて波線追跡を行いながら走時計算を行う場合がある。ここでは、後者の方法を用いている。

したがって、数値実験による再現性評価は、①速度構造モデルの作成、②アイコナール方程式による理論走時計算（観測波形からの初動読取に相当）、③最小二乗法によるインバージョン解析の流れで実施した。

表-1 観測記録と数値実験によるトモグラフィ解析の違い

	現場測定	数値実験
入力条件： 初動走時	観測波形から読取	既知の速度構造モデルから理論計算
初期モデル	孔間トモグラフィ：BPT法 （簡易インバージョン解析） トンネルトモグラフィ：設計 時屈折法採査結果	任意（事前調査総合モデル）
インバージョン 解析	理論波線経路 観測走時と理論走時の初動時間の差が最小になるように、 速度構造各セルの速度補正を行う（最小二乗法など）	

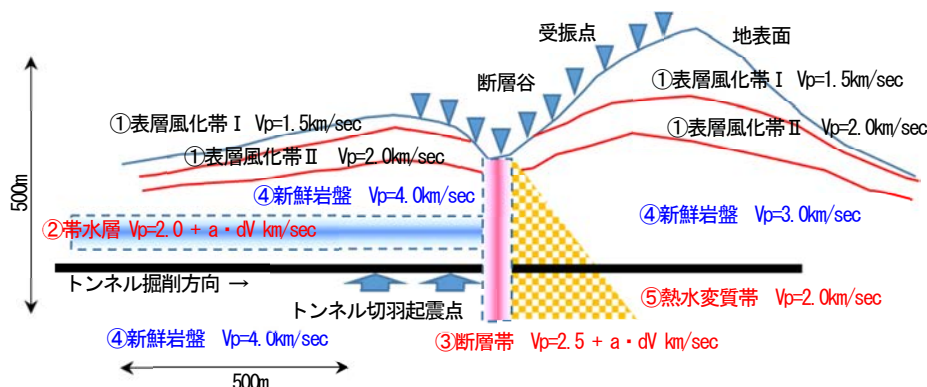


図-1 地下構造、速度構造モデルの概念図

表-2 起震点、受振点配置一覧表（速度構造モデル1）

速度モデル	1			
データセット	1	2	3	4
起震点配置	地表	地表 + 坑内900mまで	地表 + 坑内1500mまで	地表 + 坑内2000mまで
起震点間隔	20m	20m	20m	20m
起震点数	101	147	177	202
受振点配置	地表	地表	地表	地表
受振点間隔	10m	10m	10m	10m
受振点数	201	201	201	201
波形計算の有無	×	×	×	×
走時計算の方法	直接計算	直接計算	直接計算	直接計算
信頼度付加	×	×	×	×

(3) 地下構造モデル

速度構造モデルは近年における難工事として報告されている2つの施工事例^{3,9)}の地質構造をモデル化した(図-1)。すなわち、トンネル天端上方の大規模帯水層からなる低速度帯と断層破碎帯からの大量湧水を生じた地山⁹⁾(図-1の左側部分)および断層と熱水変質帯からなる地下深部における大規模な脆弱地山⁹⁾(図-1の右側部分)の地質状況と前方探査的な課題を踏まえて、検証用の地下構造モデルとした。

以上から、地下構造モデルの主な構成は、①表層風化帯(2層)、②大規模帯水層からなる水平な低速度帯、③断層地形を伴う高角度断層、④通常の新鮮岩盤、⑤深部の熱水変質帯からなる。また、亀裂集中帯(帯水層)や断層破碎帯と周辺の岩盤との明確な境界はないので、速度は最も遅い中心部から徐々に速度が増加していくイメージとした⁷⁾。図-1の中で示した式における a は、低速度層中心部からの距離を示す。

(4) 速度構造モデル

図-1をもとに作成した数値実験用の速度構造モデル1を図-2に示す。速度構造モデルはトンネル延長2000m、土被り最大500mとして作成した。トモグラフィ解析の図(図-2～図-9)における縦軸(深度)、横軸(距離)は解析上の座標系であり、標高やトンネル距離程を示すものではない。同様に、トモグラフィ解析各断面図において、地表面より上方は疑似中空として扱っている。トンネルの位置は深度500mのトンネル坑内起振点*の直線的配列で、また地表面は深度100～150m付近に設置した起震点*および受振点▽の曲線的な配列で示す。

数値実験における主な着目点は、距離0～950m、深度350m～400m付近に水平方向に存在する低速度帯(②帯水層)、距離1000m付近に存在する鉛直方向の高角度断層(③断層帯)とこの断層に隣接するように存在する三角形形状の低速度帯(⑤熱水変質帯)である。

3. 走時トモグラフィの数値実験結果

(1) 初期モデル

今回の初期モデル(図-3)は、一般的な山岳部で想定される深度の増加に伴って速度が増加する傾向を反映した以外には、速度構造モデル(図-2)の構造を反映したものとはしていない。これは、解析者が地質情報についての知見を持っていないという状態を想定し、解析結果の検討をなるべく公平な状態で行うためのものである。

(2) 起震点受振点配置と解析ケース

起震点～受振点配置の一覧表(速度構造モデル1)を表-2に示す。受振点は地表のみとし、起震点配置を、①地表のみ、②地表+トンネル坑内900mまで、③地表+トンネル坑内1500mまで、④地表+トンネル坑内2000mまでの4ケースについて解析・検討を行った。

地表部の受振点間隔が10m、受振点総数が201カ所、地表部およびトンネル坑内での起震点間隔は20m、地上部での起震点総数が101カ所、坑内での最大の起震点総数が101カ所となる。このような多数の起震点受振点配置は実際の調査を考えると現実的ではないが、本数値実験の目的はトモグラフィの性能評価であるために、このような起震点受振点配置とした。

以下の図-3～図-9においても起震点は*、受振点は▽で示す。これらの図において、速度分布図においては起震点、受振点は1/2に間引いて表示している。波線図においてはすべての起震点、受振点を表示している。

(3) 地表受振・地表起震のみを用いた解析

図-4に地表受振・地表起震のみを用いた解析結果および波線図を示す。

本解析は、設計時事前調査として行われる屈折法弾性波探査に相当している。本解析では地表起震しか用いていないため、波線は地表付近に集中しており、深部までは届いていない。その波線の分布範囲は、弾性波探査の測定可能深度が測線長の1/10程度と言われる通り、地表から深度200mまでの範囲に集中している。当結果は、深部まで波線が届いていないことから、断層及び三角形の熱水変質帯などの低速度帯を明瞭にイメージしているとは言い難いが、その存在は示唆している。一方で、表層風化帯と深部の岩盤境界は正確にイメージしているほか、得られたP波の速度値は正確なものである。

(4) 地表受振・坑内900mまでの起震を用いた解析結果

図-5に地表起震点に加え、坑内起震を900mまで用いた解析結果および波線図を示す。これは断層の手前での前方探査を意味している。

図-5から断層の存在する付近から熱水変質帯の存在を明確に示唆しているほか、熱水変質の低速度帯が水平方向に広がりを持っていることが明瞭に判断できる。広がりについては三角形の形を明瞭に示すには至っていないが、およそ1400mまで続いていることがわかる。一方で、深度375m付近に水平方向に連続する低速度の帯水層については明確にはイメージされていない。

(5) 地表受振・坑内1500mまでの起震を用いた解析結果

図-6に地表起震点に加え、坑内起震を1500mまで用いた解析結果および波線図を示す。これは熱水変質帯が終了した時点までの起震を解析に用いることにより、低速

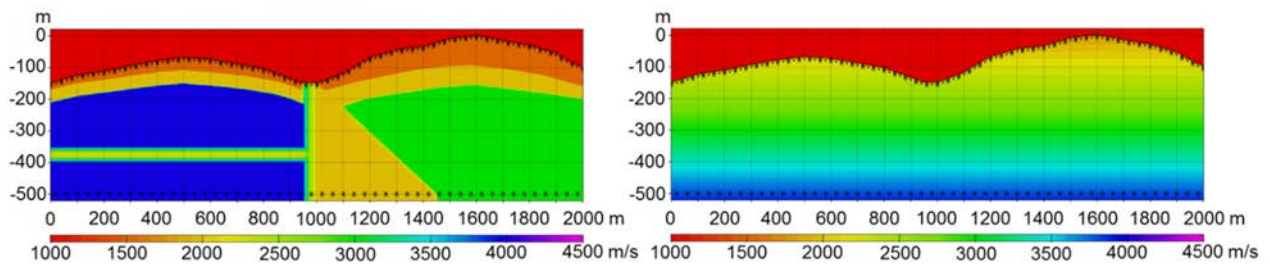


図-2 速度構造モデル1

図-3 トモグラフィの初期モデル（速度断面）

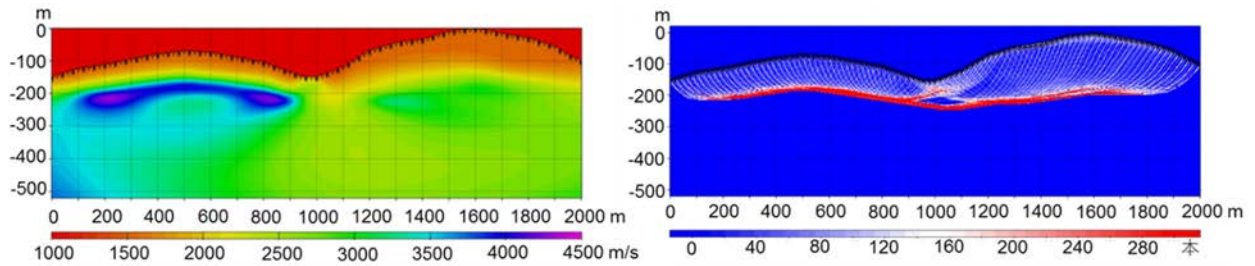


図-4 地表起震・地表受振のみを用いた解析結果
(地上からのトモグラフィ解析を利用した屈折法探索：速度断面および波線分布)

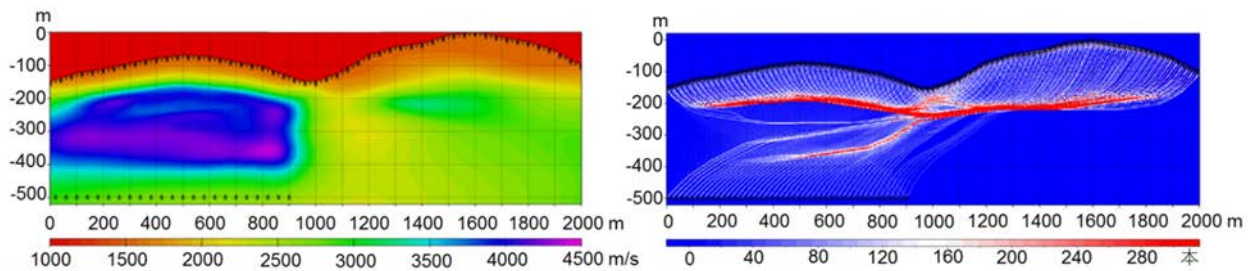


図-5 地表受振・坑内900mまでの起震を用いた解析結果
(掘削が断層の手前まで進んだ状態でのトモグラフィ：速度断面および波線分布)

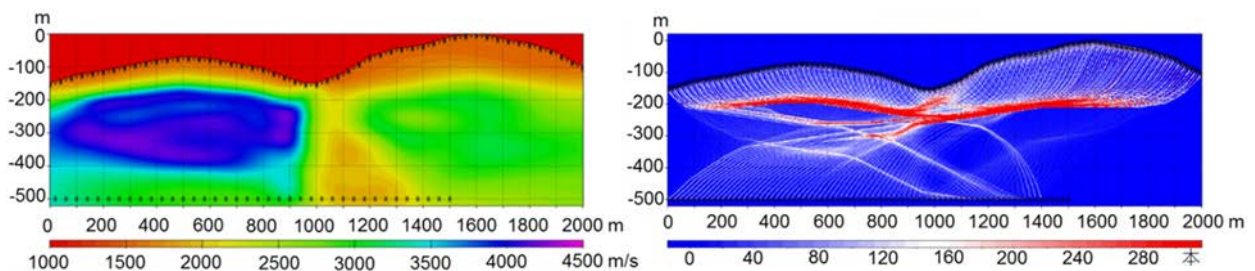


図-6 地表受振・坑内1500mまでの起震を用いた解析結果
(掘削が熱水変質帯を抜けた状態でのトモグラフィ：速度断面および波線分布)

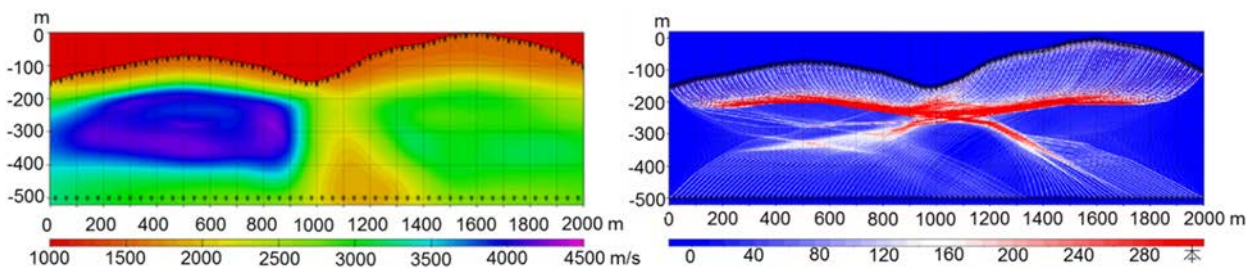


図-7 地表受振・トンネル終端部まで起震を用いた解析結果（速度断面および波線分布）

度帯の終端を明瞭に判断できるかを確認することとした。図-6から明らかに三角形の低速度帯が明瞭に検出されている。一方で、水平方向の低速度帯については、起震位置を1500mまで延ばしても結果に変化はなくイメージされていない。これは掘進距離が1500mまで増えても、低速度部を通る波線が増加しないためと考えられる。

(6) トンネル終端部まで起震を用いた解析結果

図-7に地表起震のほか坑内起震についても掘進距離2000mのトンネル終端部まで行った解析結果および波線図を示す。全体として深度1500mまで用いた結果と大差のない結果で、水平方向の低速度帯以外の低速度帯、地表付近の地層境界等が良好に検出されている。

アイコンナール方程式を用いた走時計算などによるインバージョン解析では、しばしば波線密度の相違による偽像の発生が問題となる。すなわち、波線密度の低いところが主に低速度帯として検出され、意図せぬ形で脆弱部と判断されるものである。今回の各ケースにおいては、このような円形状の偽像はほとんど認められなかった。

4. 水平低速度層の再現性改善

第3章で述べたように、距離0～950m、深度350～400m付近に存在する水平方向の低速度帯（図-2）については、明確に検出できたとは言いがたい。図-7を見ても深度200～400m付近の高速度帯の下方、すなわちトンネル天端上方には相対的に速度の低い部分が深度400m以深に存在する結果にとどまり、これが当初設定した速度構造モデル1における水平低速度帯を示すものであるかの判断が難しい。

そこで、当初の速度構造モデル1からこの水平方向の低速度帯を除いた速度構造モデル2で数値実験を行い、高速度帯の下方（トンネル天端上方）に存在する“低速度部”が何を反映するものなのかを検討した。

解析結果を図-8に示す。起震配置は1500mまで（断層および熱水変質帯を掘削完了した時点）とした。図-8と図-6を比較してみると、当初のモデル1から水平方向の低速度帯を省いたモデル2で数値実験を行っても、トンネル天端上方の“低速度部”はほぼ同じような状態で再現されていることがわかる。この結果から、この“低速度部”は、速度構造モデルにおける水平方向の低速度帯を反映したのではなく、解析に依存する一種の偽像であることがわかる。この“低速度部”の速度は初期モデルの速度（図-3）に近いことから、トンネル付近は波線が疎であることも加わり、初期モデルの影響が色濃く残った結果であると考えられる。

次に、トンネル天端上方の波線が疎であることを理由としてこのような偽像が生じているのであれば、トンネル坑内に受振点を配置した場合には再現性が改善されるはずである。そこで、当初の速度モデル1に対してトンネル坑内にも地表面と同様に10mピッチで受振器を配置し、起震配置を全区間とした数値実験を行った。結果を図-9に示す。図-7と比較してみると、トンネル坑内に受振器を配置した結果、トンネル近傍の偽像は低減され、水平方向の低速度帯は深度400～450m付近に、本来の位置からはややずれてはいるものの、存在自体は明確に再現されている。

波線分布からも、低速度部が複雑に絡み合った場合はこのような坑内受振点の設置も非常に有効であることが見て取れるが、弾性波速度が深度と共に増大するような単純な地質条件では、上方から屈折してくる波線よりも

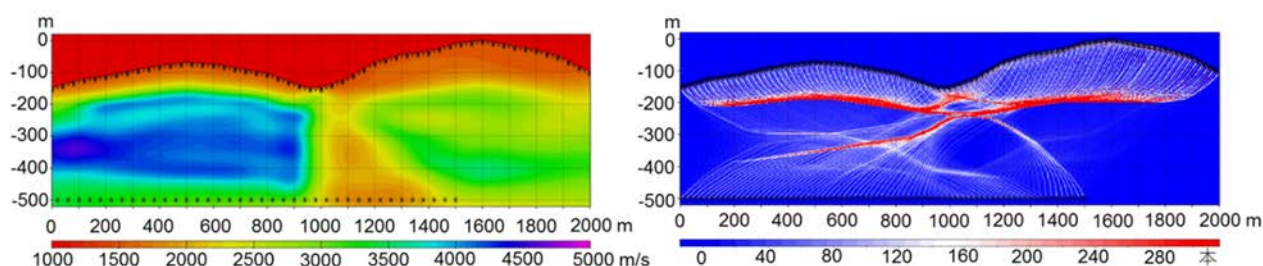


図-8 速度構造モデル2（速度モデル1から水平低速度層を削除）に基づいた地表受振・坑内1500mまでの起震を用いた解析結果（掘削が熱水変質帯を抜けた状態でのトモグラフィ：速度断面および波線分布）

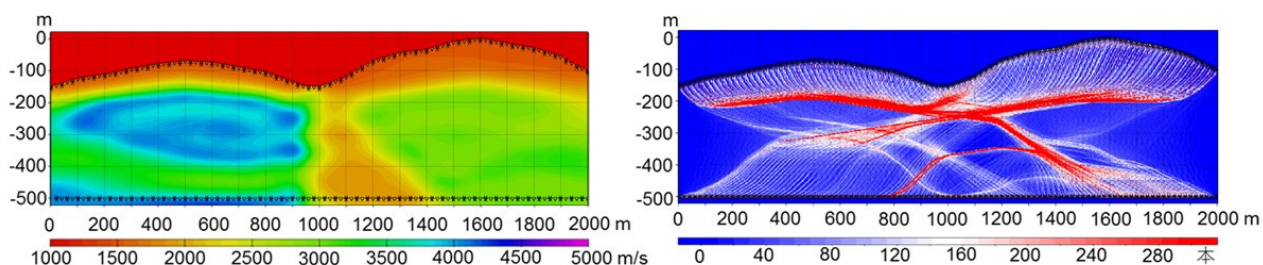


図-9 速度構造モデル1に基づいた地表受振・トンネル終端まで坑内起震および受振を用いた解析結果（速度断面および波線分布）

トンネル坑道付近の直達波の走時の方が早くなるので、あまり効果はないと考えられる。

以上から、トンネル天端上方の“低速度部”は、速度モデルにおける水平方向の低速度帯を反映したのではなく、解析に依存する一種の偽像であることが確認できた。このような起震点、受振点と平行する速度構造の変化はトモグラフィ解析では再現しにくいことが報告されており²⁾、以上の問題はDWTの固有の問題ではなく、屈折法弾性波探査やトモグラフィにおける一般的な課題である。

5. まとめ

本報告では、トンネルトモグラフィによる前方探査について、近年の難工事として報告されている2つの施工事例に見られる地質構造、すなわち、①断層と熱水変質帯からなる地下深部における大規模な脆弱地山、②トンネル天端上方の大規模帯水層からなる低速度帯と断層破碎帯からの大量湧水をモデル化し、数値実験に基づき解析手法の課題を検討した。

数値実験用の速度構造モデルはトンネル延長2000m、土被り最大500mとして作成した。トンネルトモグラフィ解析は、切羽の進行に伴い3か所で実施した。その結果、高角度断層と深部熱水変質帯に相当する低速度帯には偽像の発生も認められず、十分な再現性が確認できた。一方、トンネル天端上方の帯水層に相当する水平低速度層の再現性は不十分であった。

水平低速度層の再現性についてさらに数値実験を行ったところ、トンネル天端上方の波線が疎であるためにこのような偽像が生じていると考えられ、トンネル坑内に受振点を追加することにより十分な再現性が得られた。これは屈折法弾性波探査やトモグラフィにおける一般的な課題である。

今回利用した走時トモグラフィの解析手法は、一般的な波線経路計算とインバージョン解析に加えて、①相関

距離の概念の導入、②波線入射角と波線密度の重み付けによる偽像の軽減などの機能が付加されている。これらの機能によるインバージョン解析の再現性の向上が、複雑な地質・速度構造モデルによる数値実験でも確認できた。実際の観測データに対しては、③初動走時の自動読み取りと信頼度の付加、④信頼度の高い読み取りデータが解析時に大きな重み付けを与えるような関連処理も加わるので、解析の信頼性向上にさらに寄与するものと考えられる。これらの機能活用により、トンネルトモグラフィの飛躍的な精度向上に今後取り組みたい。

謝辞：本研究に関しては、Dr. Christophe Bames (Université de Cergy Pontoise および GIM-Labs 社) の御協力に対して、記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 物理探査学会標準化検討委員会：新版物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル2008，第2章屈折法地震探査（弾性波探査），pp.19-65, 2008.
- 2) 大友秀夫，斎藤秀樹：サイスミックトモグラフィの数値実験，土木学会第41回年次学術講演会，III-339, pp. 677-678, 1986.11.
- 3) Christophe Bames, Constantin Gereu, Francis Clement, and Jean - Marc Mougenot: Diving wave tomography: A robust method for velocity estimation in a foothills geological context. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*: pp. 3953-3957, 2011.
- 4) 佐藤 礼，山田信人，土家輝光：「HD（高精細）トモグラフィ」の導入と適用例，物理探査学会第138回（平成30年度春季）学術講演会講演論文集，pp.5-8, 2018.5.
- 5) 樋上尚子，森川武浩，西本和生，實松茂幸：予期せぬ異常湧水に挑む—国道482号 蘇武トンネル日高工区—，トンネルと地下，Vol.33, No.1, p.17 - 28, 2002.
- 6) 佐野信夫，川北真嗣，森山 守：飛驒トンネル開通記念特集—計画と地質調査—，トンネルと地下，Vol.39, No.11, p.793 - 802, 2008.
- 7) 吉田英一：地層処分サイト特性調査における断層の考え方について，日本応用地質学会研究発表会講演論文集，平成27年度，pp. 25-26, 2015.

NUMERICAL EXPERIMENTS FOR TUNNEL TOMOGRAPHY USING TRAVEL TIME TOMOGRAPHY

Koichi OKUZAWA, Yoshihiro Miyake, Nobuto YAMADA, Rei SATO and Toru KUWAHARA

We carried out a numerical study of travel time inversion for surface-to-tunnel seismic tomography for the geological prediction ahead of the tunnel face. The geophysical model for tunnel ground includes complicated low velocity zones such as fault zone, hydrothermal zone and horizontal aquifer zone. Seismic waves generated by some sources on ground surface and blasting on tunnel face are received on ground surface. We obtained accurate images both of fault zone and hydrothermal zone, however, we needed additional receivers in the tunnel for the accurate images of horizontal aquifer zone above the tunnel.