

3次元孔間弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価

EVALUATION OF GROUTING EFFECT BY 3-DIMENSIONAL SEISMIC CROSS-HOLE TOMOGRAPHY

山本拓治*・白鷺 卓*・富田 諭**・青木謙治***

Takuji YAMAMOTO, Suguru SHIRASAGI, Satoshi TOMITA and Kenji AOKI

It is essential to grasp the geological conditions around tunnels that are concerned about critical water inflow for planning appropriate and efficient grouting for water tightness. Thus, we have developed the new 3-dimensional seismic cross-hole tomography.

This paper presents the features of the 3-dimensional seismic cross-hole tomography and an application result to an actual site.

Consequently, we could verify that this system is useful to evaluate 3 dimensionally the geological conditions in detail.

Key Words: Seismic wave, Tomography, Grouting

1. はじめに

一般に、現在行われている弾性波トモグラフィとは、探査媒体として地震波(弾性波)を利用し、地下の地質状態を孔間、あるいは孔と地表面の間で再現する探査技術のことである。しかし、2次元での評価を前提としているため、地下構造が3次元的に大きく変化している場合、2次元での評価が不適當であることもある。さらに、3次元構造の影響を受けにくい断面を設定し、2次元の弾性波トモグラフィを適用する必要があることも、弾性波トモグラフィの適用範囲を制限する一つの要因になっていた。また、地下空洞やダムにおける地質不良部の詳細把握、埋設物の詳細把握に関して、費用対効果という意味で十分な精度を提供できない場合も多い。測定や解析に多くの時間を要し、結果的に大変高価な探査法になってしまうのも問題である。孔間トモグラフィは、複数本のボーリング孔を必要とするが、探査のためのボーリングが探査費用を大きく押し上げるとともに、追加ボーリングを実施したら、トモグラフィが必要なくなるケースもある。

そこで我々は、弾性波トモグラフィの適用範囲の拡大と探査精度の向上を目的とし、迅速な測定や解析が行える3次元孔間弾性波トモグラフィシステムを開発し、実現場において適用試験を実施した。その結果、測定のための特別なボーリング孔を設けることなく、注入用のボーリング孔を利用して、迅速に探査領域の地質状況を3次元的に予測することができ、コア観察や透水試験結果との整合性も高いことを確認することができた。また、止水対策として実施したセメントグラウト注入後にも探査を実施し、セメントグラウト効果の評価法としても有効であることを確認したので、本システムの概要とともに報告する。

2. 3次元孔間弾性波トモグラフィシステムの概要

2次元の弾性波トモグラフィでは、2次元の速度構造を前提としているため、対象断面と垂直方向には速度変化がないという仮定のもとで、解析を行っている。しかし実際には、解析対象断面の外にも高速度層が存在する場合が多く、その場合高速度層からの屈折波が初動として観測される(図-1)。また、従来の弾性波トモグラフィでは、振源および受振点の設置に制約があること、孔の位置等

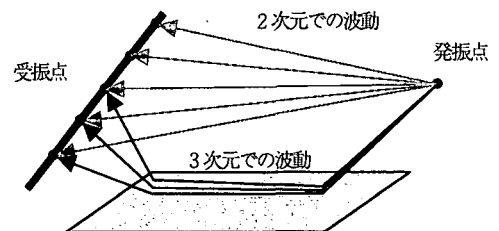


図-1 2次元と3次元での弾性波の伝達経路¹⁾

* 正会員 鹿島 技術研究所 土木技術研究部
** 正会員 大成基礎設計株式会社
*** 正会員 工学博士 京都大学大学院 工学研究科

の測定データに誤差が含まれていることなどから、精度のよい安定した解を得ることができない場合もあり、解の任意性を減少させるためには、既知の情報を利用したり、制約を与えながら解を得る必要があった²⁾。そのため、本システムにおける解析では、eikonal 方程式（波動方程式の有限差分近似）を改良した式を用い、各波線のスローネス（Slowness）の修正量に重みをつけて平均し、各格子のスローネスの修正量を求める修正 SIRT（反復的再構成法）³⁾を利用した。また、計算によって得られた弾性波の伝播経路が計測された伝播経路に適合するまで反復計算を行った。

計測された弾性波の、ある格子を通る波動は、次式で表される。

$$t_L = \oint_{Ray} \frac{1}{V} dL \quad (\text{式-1})$$

ここで、 t_L は発受振器間の走時、 L は伝播経路の距離、 V は弾性波速度である。また、一般に、弾性波の伝播経路は直線ではなく、むしろ地層間の密度差により大きく曲折している。そのため、本システムでは伝播経路は次の速度モデルに従うものとした。

$$S_{i+i} = S_i + \sum_c \frac{t_m - t_c}{L_c} Gauss_R (Min_D [P_n, L]) \quad (\text{式-2})$$

ここで、 S_i は各節点におけるスローネス、 t_c 、 L_c は計算された波動の走時と距離、 $Gauss_R$ はガウスの確率分布、 Min_D はある格子 P_n と波動 L との距離である。

解析は、図-2 に示すフローに沿って実行される⁴⁾。

まず、解析範囲と解析精度を設定し、メッシュの作成を行う。解析精度は格子間隔に左右されるため、本解析では解析精度と計算条件等を総合的に判断し、1.0m 間隔のメッシュとした (①)。

次に、採取された波形すべてについて、適切な波形を抽出し、ノイズを除去するためにフィルタリングを行う (②)。フィルタリングは、主に必要な周波数帯を強調し、不必要な周波数帯をカットすることと、減衰した波形を復元する

ことの2種類を施す。採取された生波形とフィルタリング処理後の波形を図-3 に示す。そして、採取された波形の直接波の初動をピックし、発受振点間の地山弾性波速度を計算し (③)、解析対象範囲の初期弾性波速度モデルの構築を行う。求められた地山弾性波速度を利用して、図-4 のような初期弾性波速度モデルを構築する。この際、事前地質調査結果等から地層境界や断層等の顕著な特徴（位置、弾性波速度）が予測されている場合、その情報も盛り込むことで、さらに精度の高い探査が可能となる (④)。

この初期弾性波速度モデルを用い、発受振点間の波形を計算する。この結果は、測定された波形に近づくまで、繰り返し計算される (⑤)。計算結果は3次元データとして出力され (⑥)、必要があれば諸条件を再設定し、再解析を実施する。

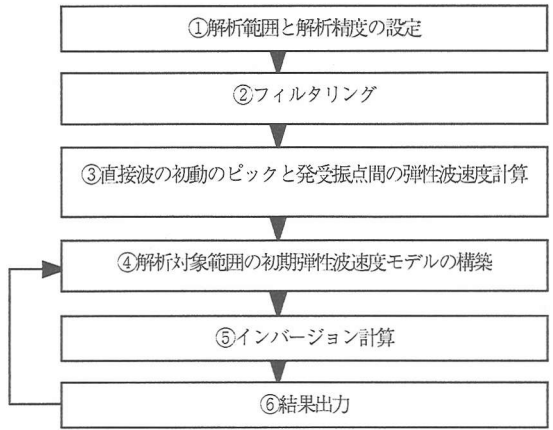


図-2 解析の流れ

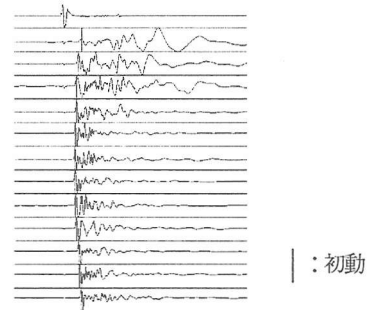


図-3 採取された波形（フィルタリング処理後）

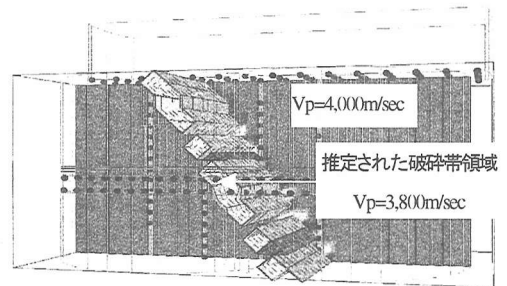


図-4 初期弾性波速度モデル

3. 3次元弾性波トモグラフィシステムの適用結果の分析

3. 1 探査概要および探査目的⁵⁾

事前地質調査結果や調査ボーリング結果より、立坑周辺には主に凝灰角礫岩が分布しており、所々に流紋岩が貫入している。凝灰角礫岩及び流紋岩は概ね $C_M \sim C_H$ 級で硬質だが、亀裂とその周辺は風化変質を受け、軟弱化している。また、幅 1.0m 弱の比較的高角度な断層 F-1 の存在が確認されている。このように、対象領域は複雑な地質状況であることが予想され、2次元のトモグラフィでは、立坑周辺の詳細な地質予測が困難であると考えられた。さらに、工事では直径 13m、深度 20m の立坑を 2 本掘削するが、これら立坑は地下水位以下での掘削となり、施工時には恒常的な湧水だけでなく、予期せぬ突発湧水の可能性も懸念されたため、事前に立坑周辺を止水注入により地山改良する必要があるかどうかを検討する必要がある。そこで、これらの問題を解決する手法として、3次元孔間弾性波トモグラフィシステムの適用を提案し、システムの適用試験を行った。本システムは、2次元弾性波トモグラフィでは対応が難しかった複雑な地質の3次元構造にも対応し、パイロット孔やチェックボーリング孔などを利用できるため、探査のための特別な削孔は不要であるという経済的な利点を持っている。さらに、全く同じ発振振点構成ではなくても、対象領域内であれば、注入前後における地質状況の比較がある程度可能であるという長所も持っている。

そこで、調査ボーリング孔 ($L=32.0m$)、パイロット注入孔 ($L=24.0m$) を利用して、止水注入前に3次元弾性波孔間トモグラフィを実施し、それらを総合的に評価することで、立坑周辺の地質状態を3次元的に予測した。また、その結果をもとに地質不良部を重点的に止水注入した後、チェックボーリング孔 ($L=32.0m$) を利用して再度弾性波トモグラフィを実施し、注入前の地質状態がどの程度改良されているのかを確認した。図-4に探査対象範囲の予想地質図を、図-5に事前調査ボーリング孔 (調査No.1~4) におけるルジオンマップを示す。

3. 2 測定方法

受振孔と発振孔およびハンマー打撃点の位置は図-4に示すとおりである。ハイドロフォンを調査ボーリング孔受振孔に挿入し、周囲のパイロット孔 No.1~7 (止水注入後は No.8~14) のそれぞれにおいて、発破により 2.0m 間隔で 10~12 点起振した。また、立坑上盤の 18 点 (H1a~H4e) をハンマーで起振し、その波形も記録・解析した。受振孔に挿入するハイドロフォンは全長約 25m で、2m 毎に受振センサー (加速度計) が 12 個埋め込まれているチューブ状のものである。

発振は、発振孔に雷管を挿入して、孔底から 2m 毎に 12 回の発破を繰り返した。さらに、孔内にハイドロフォンを挿入し

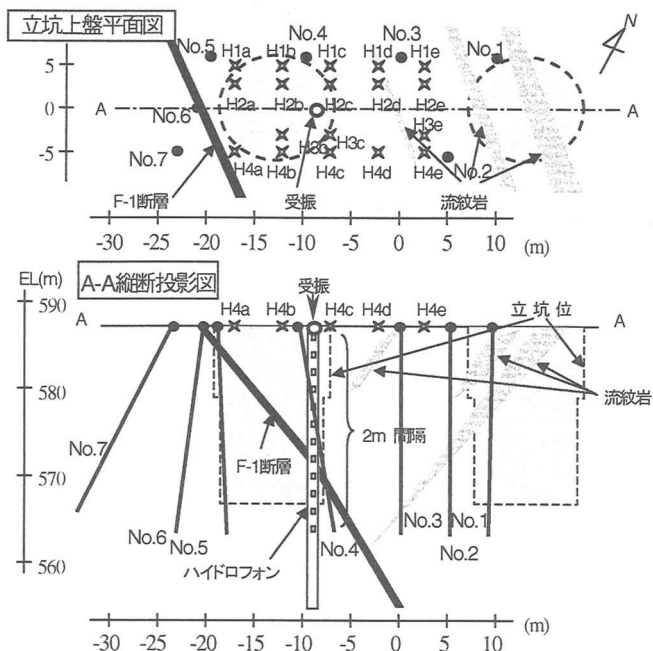


図-4 発受振点配置と概略地質分布

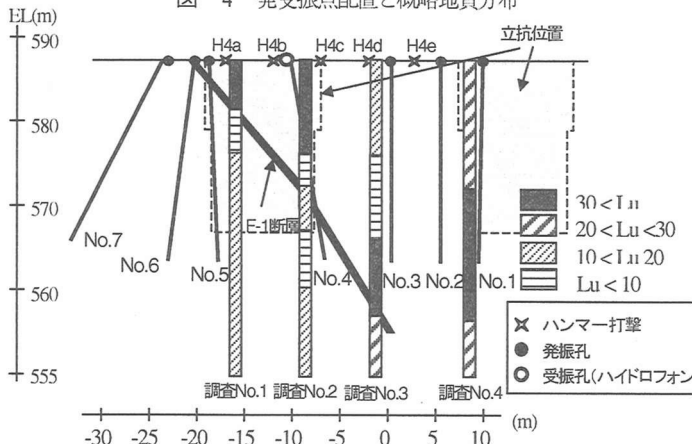


図-5 事前調査ボーリング孔のルジオンマップ

たまま、路盤上をハンマー打撃することにより発振した。発振孔や受振孔には、66mm で削孔された調査用のパイロット孔、チェック孔を用いた。探査に要した時間は6時間、解析に要した時間は3日間であった。

3. 3 探査結果

止水注入前に実施した3次元弾性波トモグラフィの結果と地質との比較を図-6、8、10、12、14に、止水注入後に実施した3次元弾性波孔間トモグラフィの結果と地質との比較を図-7、9、11、13、15に示す。

今回は施工上の都合により、止水注入前後で設置した発受振孔が異なるため、比較精度については若干劣るが、各波線経路

⊕ 受振孔 ○ 発振点(ハンマー打撃点) No.1~7 (注入前)、8~14 (注入後) : 発振孔

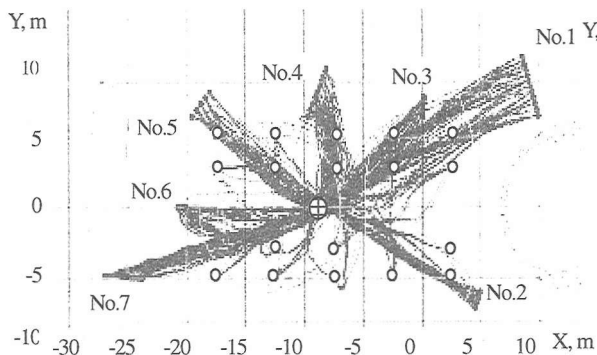


図-6 止水注入前の解析波線経路図 (平面投影図)

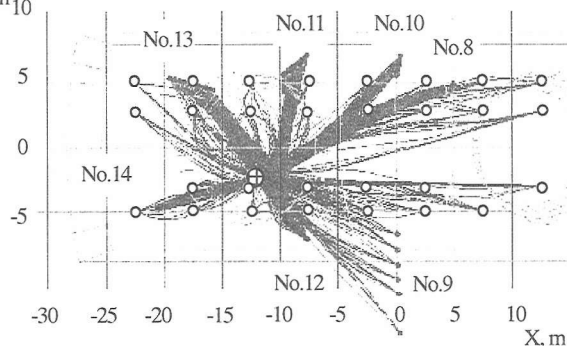


図-7 止水注入後の解析波線経路図 (平面投影図)

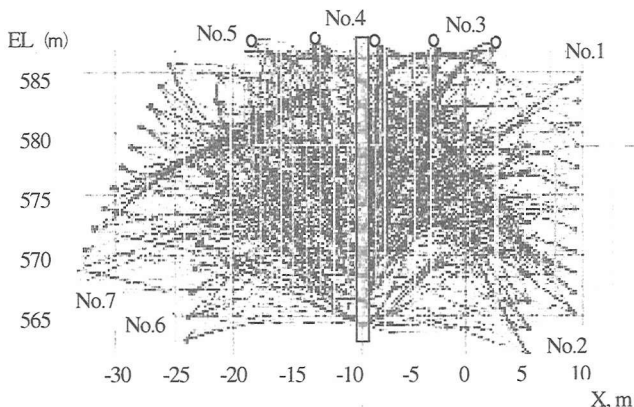


図-8 止水注入前の解析波線経路図 (縦断投影図)

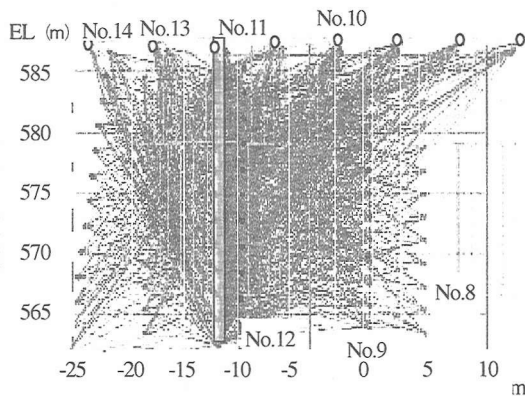
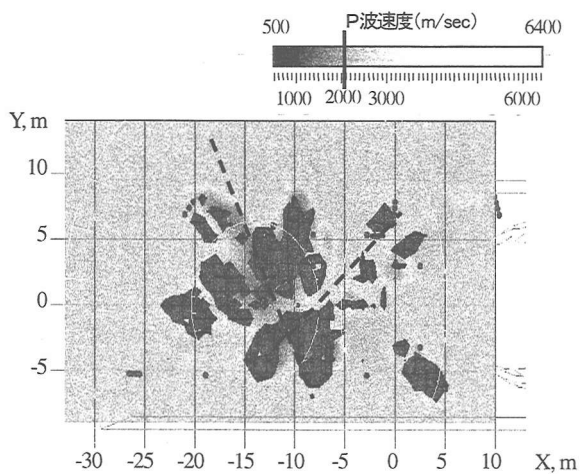


図-9 止水注入後の解析波線経路図 (縦断投影図)

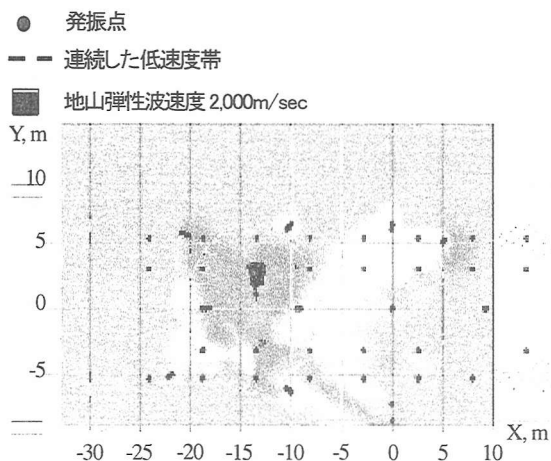
図を見る限り、双方で重なる部分が多いことから、比較しても大きな問題はないと思われる。結果出力は凡例にあるように500m/sec~6,400m/secのP波速度の分布で表されており、ブロック状に表現された部分は地山弾性波速度が2,000m/sec以下の部分である。

始めに、止水注入前に実施した3次元弾性波トモグラフィ結果を検証する。図-10、12、14より、地山弾性波速度2,000m/sec以下の領域は、2系統の連続した低速度帯として出現し、主に立坑予定位置内の上部に分布していることがわかった。その他、左側の立坑のEL585m付近は特に弾性波速度が低いこともわかった。この調査を、調査ボーリング4本の結果から記載された地質平面図と比較すると、左上から右下に連続する低速度域は予測されたF-1断層に整合的である。また、地質縦断図からは、右上から左下に連続する低速度帯は流紋岩の貫入方向に整合的であることがわかる。

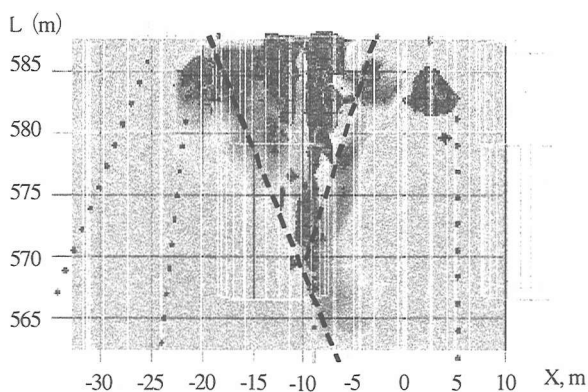
ルジオンマップとの比較では、検出された低速度域は図-5に示される調査ボーリングNo.1及びNo.2で観測された高透水域($L_u > 30$)の分布にほぼ整合的である。また、調査ボーリングNo.3の高透水域までは探査範囲が及ばなかったものの、EL565m付近の低速度域が連続している可能性がある。



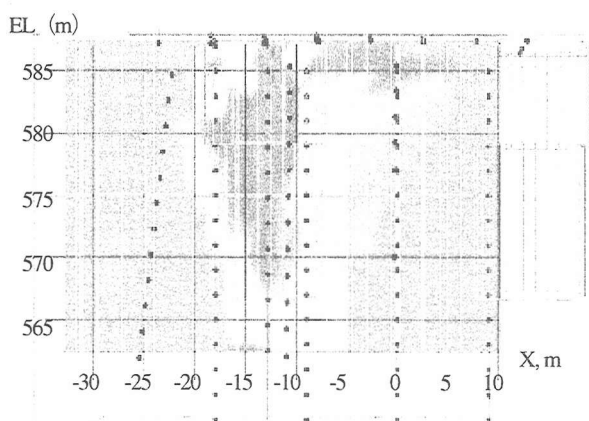
図一 10 止水注入前の地質状態 (EL580mの平面図)



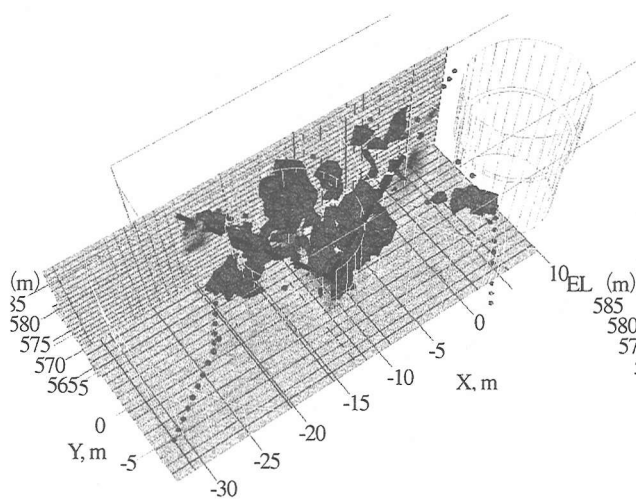
図一 11 止水注入後の地質状態 (EL580mの平面図)



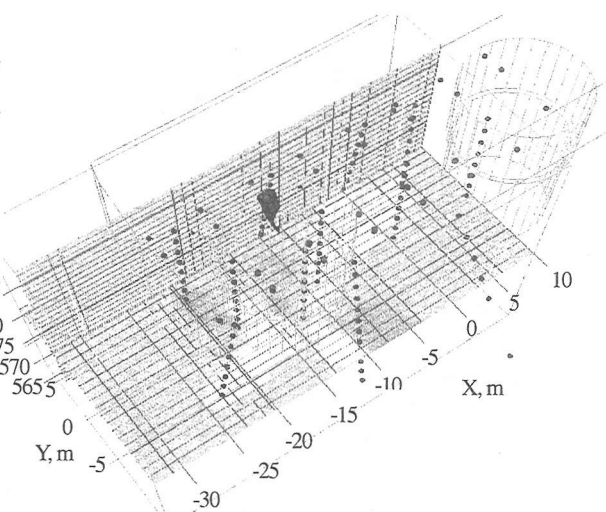
図一 12 止水注入前の地質状態 (Y=0の縦断面図)



図一 13 止水注入後の地質状態 (Y=0の縦断面図)



図一 14 止水注入前の地質状態 (3次元俯瞰図)



図一 15 止水注入後の地質状態 (3次元俯瞰図)

次に、止水注入後に実施した3次元弾性波孔間トモグラフィ結果を見てみると、地山弾性波速度2,000m/sec以下のブロックがほとんど消滅し、全体にほとんど均一な地質状況となっていることがわかる。

地質図との比較では、F-1 断層に整合して存在が予測された低速度域がほとんど消滅し、流紋岩の貫入方向に整合して存在が予測された低速度域も消滅している。また、注入を実施していない立坑内部の掘削部に相当する部分については低速度の部分が残っているものの、立坑周辺のグラウト孔からのリークや孔埋め注入の影響により、未注入部分も多少改良されていることがわかった。この結果は波線経路図にも見られ、注入前は低速度帯の存在によって屈折した波線が見られるのに対し、注入後はほぼ直線的な波線へと変化し、セメントグラウトの注入によって均質な地質へと改善されていることが確認された。

ルジオンマップとの比較では、調査ボーリング No.1 及び No.2 の上部で観測された高透水域 ($L_v > 30$) は大幅に改良され、その地山弾性波速度は4,700~5,200m/secという結果が得られた。

4. おわりに

今回我々は、2次元弾性波トモグラフィが持つ問題点を解決する3次元孔間弾性波トモグラフィシステムの有効性検証を目的とし、直径約13m、深度20mの立坑を2本掘削する工事に本システムの適用を試みた。探査では、コスト低減のため、水位観測用の既存の調査ボーリング孔を受振孔とし、セメントグラウト注入用に削孔されたボーリング孔内と地表面に発振点を設けることで、探査用の特別な追加ボーリングを行わずに実施した。また、トモグラフィ結果と調査ボーリング結果による地質分布と透水試験結果によるルジオンマップを止水注入前後で比較・検討することにより、止水注入によるグラウト効果の評価が可能かどうかの検討を行った。また、2次元のトモグラフィ結果では予測不可能である3次元の波線経路図を得ることができ、3次元孔間トモグラフィの精度の高さを検証できた。

その結果、3次元表示では、比較的少ない7断面の探査パネルと、18点の地表発振によるVSPの結果を解析・出力した結果にもかかわらず、複雑に分布する低速度層の位置を精度よく3次元的に捕らえることができ、ルジオン値の高い高透水ゾーンについても、その連続性を把握できたことから、本システムの有効性が確認された。

さらに、止水注入前後の弾性波トモグラフィ結果の比較により、止水注入前に存在していた低速度帯や高透水ゾーンがほとんど消滅し、屈折していた波線経路がほぼ直線へと変化したことから、セメントグラウトの注入により地質状況が改善されていることが確認された。このように、特別なボーリングを行うことなく、セメントグラウト注入前後に3次元孔間弾性波トモグラフィを実施することにより、地山の弾性波速度の変化を把握することができることから、セメントグラウト注入効果の判定に有効な手法であることが立証された。

しかし、鋼管を使用している孔の利用ができないことや、孔内が水で満たされている必要があるため、水のたまらない孔での適用には問題があるなど、現場への適用を制限する諸問題も残っている。適用範囲の拡大を目指すためには、これらの問題は今後の検討課題である。今後は、ダム基礎グラウトの効果判定や地下空洞のグラウト効果判定等に積極的に活用し、3次元トモグラフィの適用分野の拡大に努めていきたいと考えている。また、比抵抗トモグラフィも含めて、合理的かつより精度の高いグラウト効果の判定手法の確立について、検討していく所存である。

【 参考文献 】

- 1) 斉藤秀樹 (1992) : サイスマットトモグラフィの3次元への拡張の試み、物理探査学会第86回学術講演会論文集
- 2) 渡部俊樹・藤本顕治・佐々宏一 (1992) : 弾性波トモグラフィの逆解析における波線の選択の効果について、物理探査学会第86回学術講演会論文集
- 3) Three-Dimensional Tomographic Imaging of Geologic Structure in Exploratory Studies Facility, by K. Hanna, J. Descour, D. Conover, and B. Hockstra. 38th Rock Mechanics Symposium, Washington, D.C., July 2001.
- 4) Seismic Tomography Applied to Site Characterization, by D. R. Hanson, K. Y. Harnay, and D. M. Neil. Geo-Denver 2000 Conference, Denver, CO, August 2000. Imaging Old Mine Works, by J. Strid and D. R. Hanson. KDOT-FHWA Mine Reclamation Workshop, Kansas City, MO, April 2000.
- 5) 白鷺卓・山本拓治・住田 徹・西岡和則・青木謙治 (2002) : 弾性波トモグラフィによる立坑周辺地質の3次元探査結果、第57回土木学会年次学術講演会