

三次元孔間弾性波トモグラフィによる セメントグラウトの改良効果の評価

小泉 悠*・山本 拓治・白鷺 卓・横田 泰宏

鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）
*E-mail: koizumyu@kajima.com

わが国では、止水や空洞充填、地盤強化を目的とした注入工法がよく用いられる。しかし、注入による改良効果は地盤の状態に左右されやすいことから、改良効果の確認方法の確立が長年の課題とされてきた。これに対して著者らは、セメントグラウトの改良効果の評価する上で、三次元孔間弾性波トモグラフィを有効な手法と考え、探査システムの高度化を進めてきた。本論文では、注入の前後で三次元孔間弾性波トモグラフィを実施した3つの事例について考察し、解析により得られるP波またはS波速度分布の変化により、セメントグラウトの改良効果が評価できることを明らかにした。

Key Words : seismic wave, threes-dimensional tomography, grouting

1. はじめに

わが国では、岩盤から砂礫・粘性土に至る地盤の各種掘削工事において、止水や空洞充填、地盤強化を目的とした注入工法がよく用いられる。注入材は、注入目的および対象地盤に対する注入材の浸透性を考慮して選定されるが、セメント系のグラウトによる懸濁液型注入材と、水ガラス系の薬液等による溶液型注入材に大別される。注入工法は、高圧噴射攪拌工法や凍結工法等のその他の主な地盤改良工法に比較して、設備が小規模で済み、狭い場所や低い空間中でも施工が可能といった点で利点を有する。一方で、注入による改良効果は地盤状態に左右されやすく、例えば、亀裂や、砂層と粘性土層の層境に

注入材が流出することで、有意な改良効果が得られない場合もある。そのため、通常、チェックボーリング等により改良効果の確認が行われる。その他の改良効果の確認方法として主だったものを表-1に示す。表-1において、掘削による確認は、試験施工等の場合を除き実施は難しく、チェックボーリングや標準貫入試験は一次元的な情報しか得られない。原位置での透水試験は、止水を目的とする場合、有効な確認方法ではあるが、注入材の面的、三次元的な分布情報は得られない。これらの既往の手法に対して、筆者らは、注入による改良効果を三次元的に可視化し、評価することが可能と考えられる三次元孔間弾性波トモグラフィシステムの開発を進めてきた²⁾。本論文では、次章で三次元孔間弾性波トモグラフィの概要

表-1 改良効果の確認方法と実施頻度¹⁾

区分	項目	評価指標	効果確認の目的		
			止水	地盤強化	注入材分布
目視による確認	掘削による確認 着色材を散布する方法	出来型	○	○	◎
		出来型	○	○	◎
土質調査による確認 (原位置)	チェックボーリング 標準貫入試験 透水試験	試料の状態、コア採取率、RQD		◎	◎
		N値 透水係数	◎		
土質調査による確認 (室内)	力学試験 透水試験	一軸圧縮強さ等		◎	
		透水係数	○		
物理調査による確認	弾性波探査・PS検層 電気探査・電気検層	P波／S波速度			△
		比抵抗			△

◎：よく用いられる ○：比較的によく用いられる △：まれに用いられる

を述べた後、同システムを適用し、注入前後でのP波またはS波速度分布を比較、考察することで、セメントグラウトの改良効果の評価を行った3つの事例について述べる。

2. 三次元孔間弾性波トモグラフィの概要

二次元の孔間弾性波トモグラフィは、二次元の世界速度構造を前提としており、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、図-1 に示すように、高速度層からの屈折波が初動として観測される。また、従来の孔間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⁴⁾。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、格子ごとのスローネスの修正量を求める修正 SIRT（反復的再構成法）⁵⁾を利用した。また、計算によって得られる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、反復計算を行うこととした。

解析は、図-2 に示すフローに沿って実行される⁶⁾。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、解析精度、計算条件等を考慮して、解析ごとに適切なメッシュ間隔を選択する必要がある（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の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、減衰した波形を復元することの両目的を満たすべく行う。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する（③）。続いて、この地山弾性波速度を利用し、初期弾性波速度モデルを構築する。この際、事前の地質調査結果等から地層境界や断層等の特徴（位置、弾性波速度）が予測されている場合、その情報を盛り込むことで、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。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）。計算結果は三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。

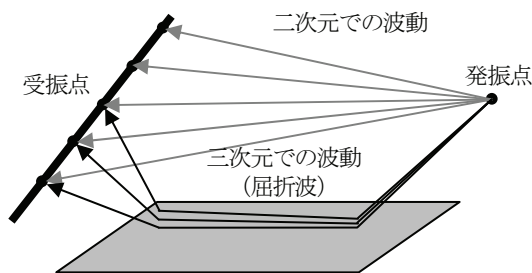


図-1 二次元と三次元での弾性波の伝達経路の差異³⁾

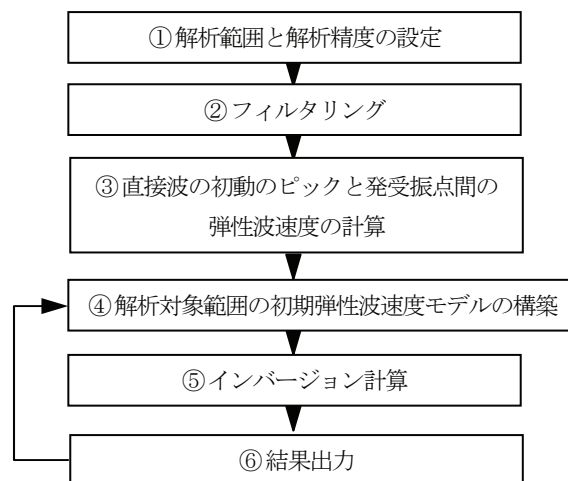


図-2 解析のフロー⁶⁾

3. 三次元孔間弾性波トモグラフィの適用事例と考察

本章では、開発した三次元孔間弾性波トモグラフィシステムを注入の前後で適用することにより、セメントグラウトの改良効果の評価を行った3つの事例について述べる。なお、事例Aは第32回岩盤力学に関するシンポジウムにて既に発表した内容であるが、事例BおよびCと対比するため、新たな知見を加えて概説する。

(1) 事例 A

事例Aで対象とした調査領域の平面図および断面図を図-3に示す²⁾。事例Aでは、直径13m、深度20mの2本の立坑の掘削工事が行われた。調査ボーリング等の事前の地質調査により、立坑周辺には主に凝灰角礫岩が分布し、流紋岩の貫入および幅約1mのF-1断層の存在が確認された。凝灰角礫岩および流紋岩は、大部分がCM級と硬質ではあるが、断層とその周辺は風化変質し、軟弱化していた。また、地下水位以下での掘削作業において、施工時の恒常的な湧水および突発湧水の発生が懸念されたことから、軟弱部の止水と地盤改良を目的としたセメント系のグラウトの注入が、2本の立坑周辺に対して行われ

た．注入前のルジオン値は50～100Luであり，改良目標ルジオン値は10Luであった．

事例Aでは，グラウトの改良止水効果を評価するために，注入前後で三次元孔間弾性波トモグラフィを実施した．図-3に示すボーリング孔No.1～7中から発破により起振した波を，受振用のボーリング孔に挿入したハイドロフォンを用いて受振した．発受振点間隔はともに2.0mとした．また，地表の20点からハンマーを用いて追加の発振を行った．

解析により得られた注入前のP波速度分布の俯瞰図および平面図（EL580m），断面図（Y=0m）を図-4に，注入後のP波速度分布を同様に図-5に示す．調査領域におけるP波速度は500～6400m/sの範囲で分布し，P波速度が2000m/s以下の低速度領域を青色のブロックで表示した．

図-4は，注入前の解析結果であり，P波速度が2000m/s以下となる2本の低速度帯が検出された．これらを事前の地質調査結果と比較した結果，左上から右下に連続する低速度帯はF-1断層に，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することが分かった．こ

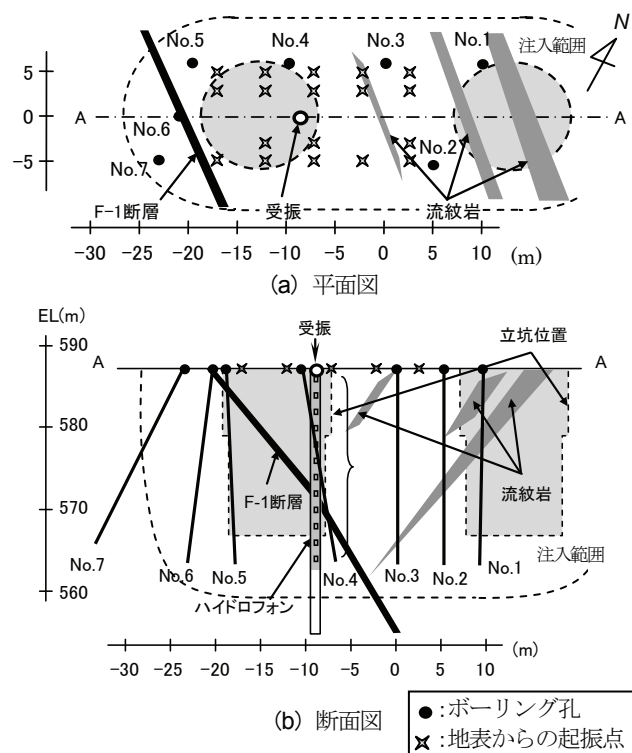


図-3 事例Aの調査領域の平面図および断面図

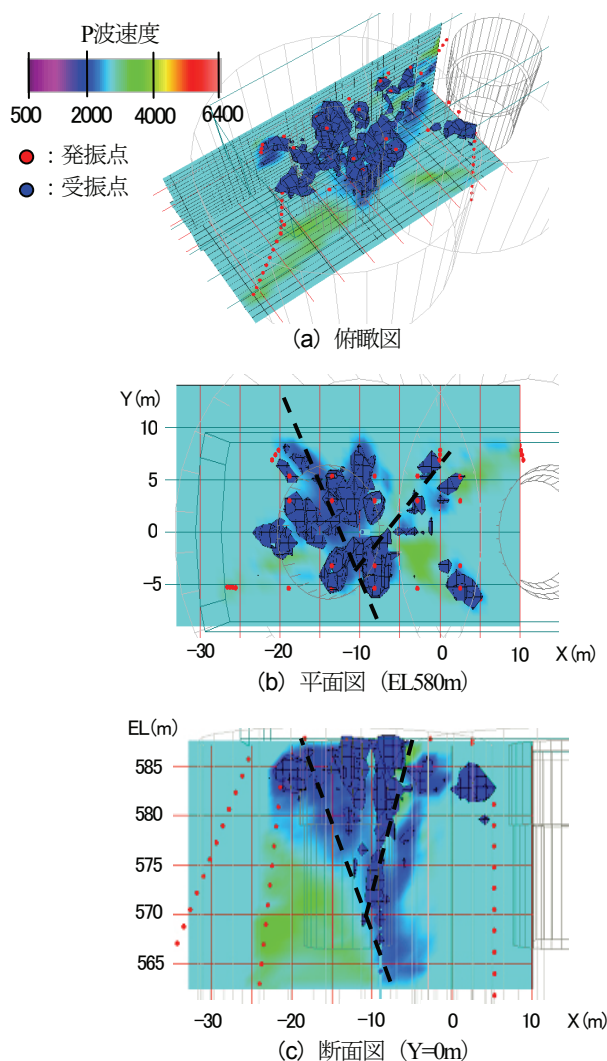


図-4 注入前のP波速度分布

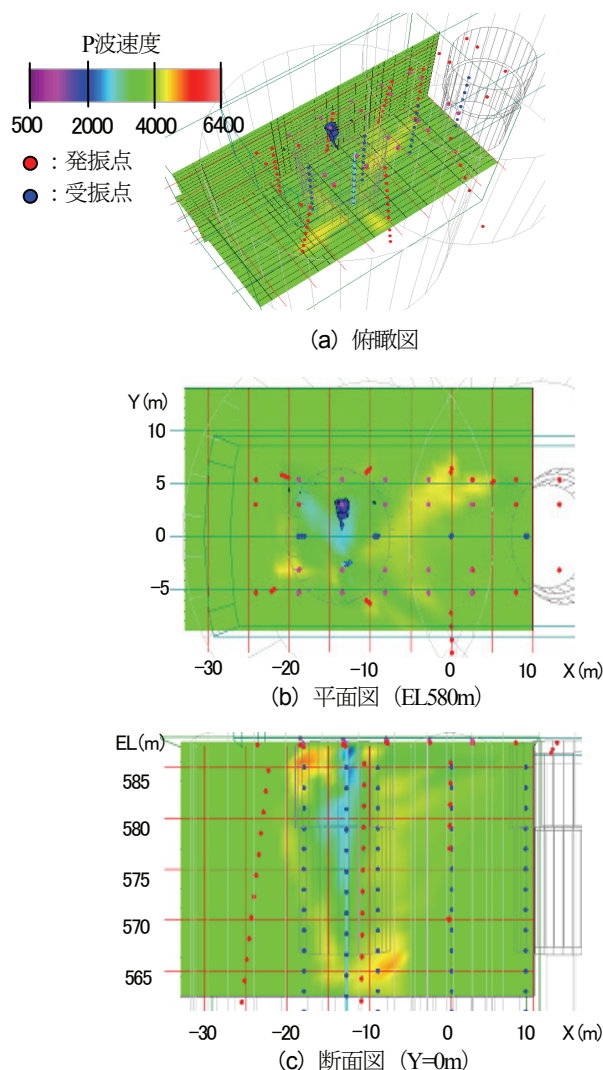


図-5 注入後のP波速度分布

れより、2本の低速度帯は、それぞれ、断層および流紋岩の貫入による亀裂や風化変質の影響を受けた領域と考えられる。

次に、図-4および図-5から注入前後でのP波速度の分布を比較すると、注入の実施に伴い、P波速度が2000m/s以下であった領域がほとんど消失したことが分かる。そして、低速度帯のP波速度は少なくとも2800m/s程度まで上昇しており、断層および流紋岩の貫入の影響を受けた軟弱部がグラウトにより均質に改良されたものと考えられる。

以上のことから、三次元孔間弾性波トモグラフィの実施により、調査領域の地質状態およびグラウトの改良効果が三次元的に可視化され、P波速度分布の変化により改良効果が評価できたと言える。

(2) 事例 B

事例Bは、段丘堆積物中に掘削された既設の坑道（現在は未使用）上部に存在する空洞へのグラウト充填効果を評価するために、注入前後で二次元孔間弾性波トモグラフィを実施した結果である。図-6は調査領域の断面図である。この図に示すボーリング孔Bに挿入した超磁歪式発振器（Erema社製）より起振した波を、ボーリング孔Aに挿入したハイドロフォンを用いて受振した。発受振点間隔はともに0.5mとした。

解析により得られた注入前のP波速度分布を図-7に、注入後のP波速度分布を図-8に示す。まず、注入前の解析結果より、調査領域はP波速度が700～1000m/sとなる領域IおよびIII、P波速度が1000～1600m/sと比較的速い領域IIの3つに区分された。調査ボーリングおよび孔内カメラを用いた観察結果から、調査領域の上方より下方へ、

未固結の砂礫層、比較的良好に締まった砂層、旧坑道の崩落に伴うゆるみ域と推定される層が分布することが確認されており、領域I、II、IIIはそれぞれに対応するものと考えられる。また、深度21～23m付近で確認された空洞であるが、図-7においても深度22m付近、ボーリング孔Bに近い領域でP波速度が900m/sを下回る低速度帯が認められ、空洞に相当するものと考えられる。

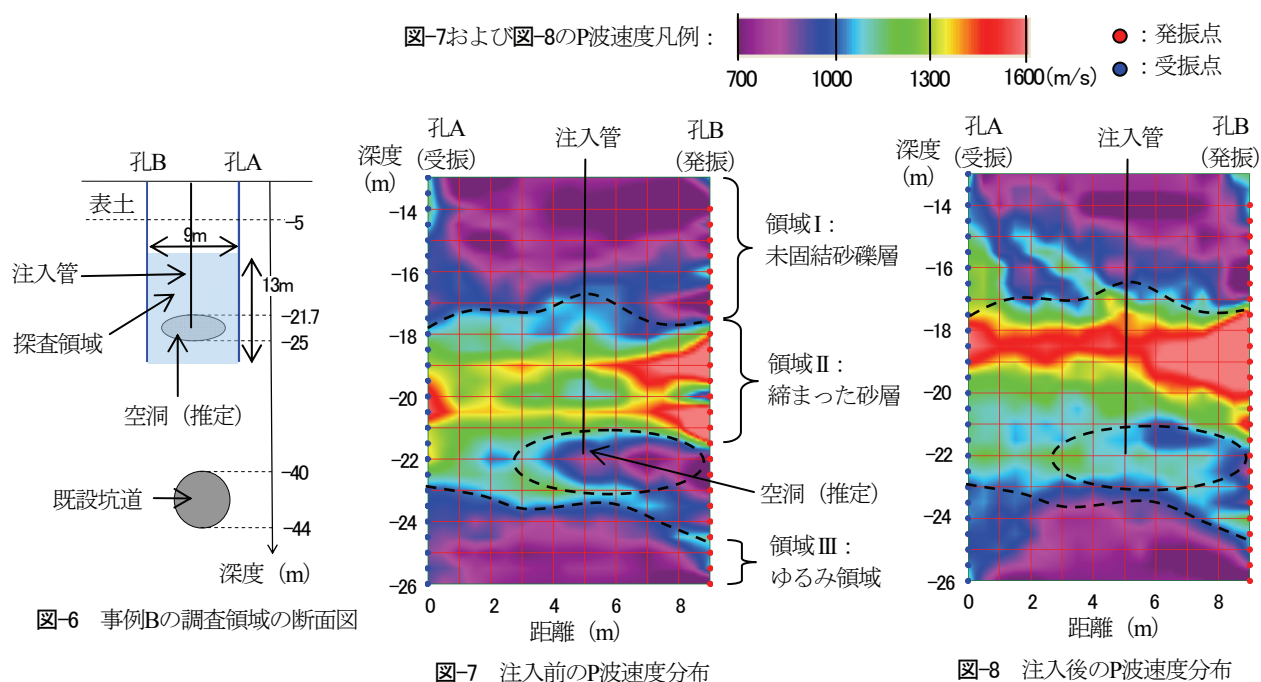
次に、図-7および図-8から注入前後でのP波速度の分布を比較すると、注入の実施に伴い、深度22m付近、ボーリング孔Bに近い領域で存在した低速度帯が消失したことが分かる。そして、低速度帯のP波速度は少なくとも1000m/s程度に上昇しており、空洞がグラウトにより充填されたものと考えられる。また、もともとP波速度が比較的高かった領域IIでも、P波速度が1500m/s程度となる領域が拡大しており、領域IIIにもグラウトが一部浸透していた可能性が示唆される。

以上より、事例Bは、事例Aに対してP波速度が比較的小さい地盤での探査事例であるが、超磁歪式発振器を使用することによって、精度よく地質状況を推定できた。また、注入前後のグラウトによる地山の改良効果が面的に可視化され、P波速度分布の変化により改良効果が評価できたと言える。

(3) 事例 C

事例Cで対象とした調査領域の平面図および断面図を図-11に示す。事例Cでは、地盤強化を目的とした注入の試験施工が行われた。直径2mの球状の改良体の作製が計画され、砂州性堆積物からなる砂地盤内にセメント系のグラウトの注入が行われた。

ここでは、改良体の出来型を物理探査手法により評価



するために、注入後、掘削による確認を行う前に、S波による三次元孔間弾性波トモグラフィを実施した。S波に着目する理由として、対象地盤は図-9に示すように飽和しており、このような場合P波が間隙水中を伝播することで、精度よい探査が不可能となること、また砂地盤の改良効果は、従来、S波の速度検層により評価されることが多いことが挙げられる。

図-9に示す発振孔（注入時は注入孔として使用）に挿入した超磁歪式発振器（Etrema社製）より発振した波を、ボーリング孔A～Dに挿入した速度計により受振した。ここではS波の発受振を行うため、超磁歪発振器の振動部位を、図-10に示すように空気圧を与えることで孔壁に圧着できる構造へと改良して使用した。速度計も同様に、空気圧により孔壁に圧着可能なもので、発受振点間隔はともに1.0mとした。

解析により得られた注入後のS波速度分布の俯瞰図および平面図（GL-3m）、断面図（Y=0m）を図-11に示す。同図では、S波速度が350m/s以上となる領域を黄色のブロックで表示した。図-11より、改良体作製の計画領域とほぼ同位置となる、深度2.5～4.5m、注入孔からの半径1m内の範囲で、S波速度が300m/s以上となる比較的

高速度の領域が検出された。そして、探査後に掘削により確認した改良体の出来型を図-12に示すが、図-11および図-12の比較から、両者の形状がよく一致することが分かった。

以上、事例Cは密な砂地山でのセメントグラウトの改良効果を三次元孔間弾性波トモグラフィにより確認した事例である。砂地盤の改良効果は、従来、S波の速度検層により評価されることが多いため、本探査においてはS波を用いたトモグラフィ手法を開発し適用した。別途実施した速度検層結果とも整合しているとともに、三次元的に可視化されたS波速度が大きい領域と、掘削により確認された改良体出来型との対比は良好であることから、探査精度と実用性の高さを検証することができた。

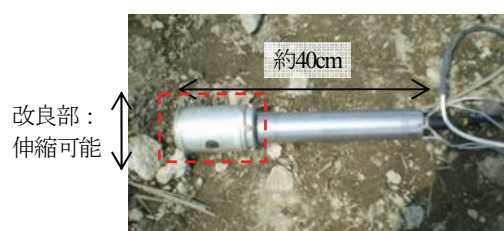


図-10 改良した超磁歪式発振器

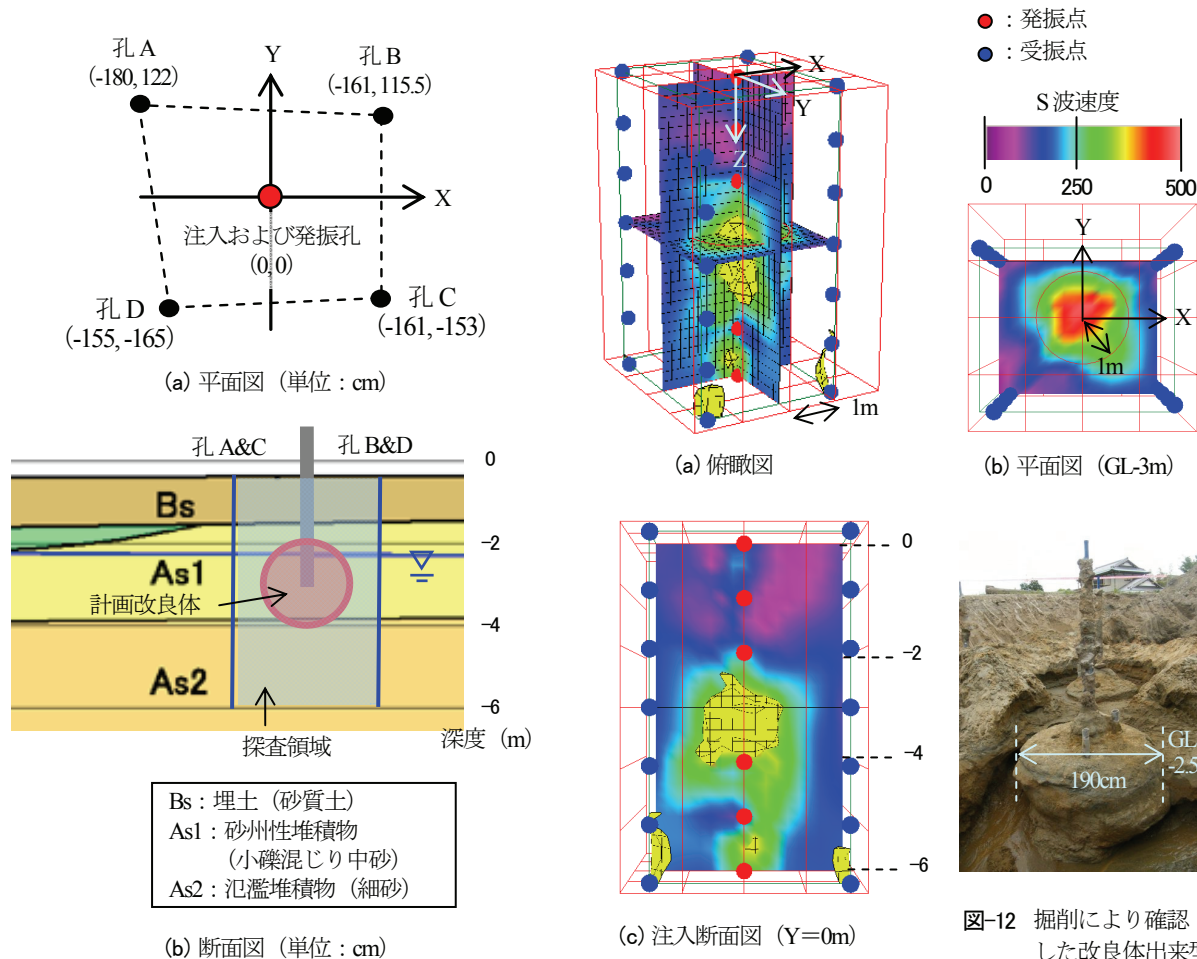


図-9 事例Cの調査領域の平面図および断面図

図-11 注入後のS波速度分布図

4. おわりに

著者らは、止水や空洞充填、地盤強化を目的として行われるグラウトの注入効果を評価する上で、三次元孔間弾性波トモグラフィを有効な手法と考え、探査機器やソフトの高度化を進めてきた。本論文では、地質条件がそれぞれ異なる場所で、三次元孔間弾性波トモグラフィを実施した3事例を取り上げ、P波またはS波速度の変化に着目することで、セメントグラウトの改良効果を評価、考察した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 弾性波速度が大きい岩盤地山において、立坑掘削に伴う止水注入が行われた事例Aでは、注入前の探査結果から、P波速度が2000m/sを下回る2本の低速度帯が検出され、これらは断層および流紋岩の貫入に伴う亀裂または軟弱部と整合していた。セメントグラウトの注入後、これらの低速度帯におけるP波速度は少なくとも2800m/s程度にまで上昇しており、注入による亀裂および軟弱部の充填改良効果が評価できた。
- (2) 土砂地山に発生した空洞の充填目的で注入が行われた事例Bでは、注入前の探査結果から、空洞の推定位置付近で、P波速度が900m/sを下回る低速度帯が検出された。セメントグラウトの注入後、この低速度帯のP波速度は1000～1100m/sにまで上昇しており、注入による空洞の充填効果が評価できた。
- (3) 砂地山において、地盤強化を目的とした注入の試験施工が行われた事例Cでは、S波による3次元トモグラフィシステムを開発し適用した。その結果、セメントグラウト注入後の探査で、改良体作製の計画域とほぼ同じ位置で、計画注入域とほぼ同等の改良体の存在が確認できた。また、改良体のS波速度は速度検層の結果とよく一致し、さらに探査後に周

辺を掘削して確認した結果、改良体の位置および形状ともよく整合した。

以上、本研究で開発した三次元孔間トモグラフィシステムは、複雑な地質構造を三次元的に推定すること、およびセメントグラウトの注入効果を定量的に評価する手法として有効であることを確認した。

今後は、積極的に実務に展開するとともに、適用事例を通じて、システムの改良をおこなっていく所存である。また、今回の事例は透水係数や間隙率が大きく、比較的注入量の多いケースであったため、今後はより注入率の小さい場合についての検証や、比抵抗トモグラフィ等の他の探査との比較や併用も検討し、改良効果の確認手法として確立していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本鉄道施設協会編：注入の設計施工指針，pp.65，1987.
- 2) 山本拓治，白鷺卓，富田諭，青木謙治：3次元弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.203-208，2003.
- 3) 斉藤秀樹：サイスミックトモグラフィの3次元への拡張の試み，物理探査学会第86回学術講演論文集，pp.94-97，1992.
- 4) 渡部俊樹，藤本顕治，佐々宏一：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回学術講演論文集，pp.83-87，1992.
- 5) Hanna, K., Descour, J., Conover, D. and Hoekstra, B.: Three-Dimensional Tomographic Imaging of Geologic Structure in Exploratory Studies Facility, 38th Rock Mechanics Symposium, 01-0583, 2001.
- 6) Hanson, D. R., Haramy, K. Y. and Neil, D. M.: Seismic Tomography Applied to Site Characterization, Geo-Denver 2000 Conference, pp.65-79, 2000.

EVALUATION OF GROUTING EFFECT USING THREE-DIMENSIONAL SEISMIC TOMOGRAPHY

Yu KOIZUMI, Takuji YAMAMOTO, Suguru SHIRASAGI and Yasuhiro YOKOTA

Grouting method has been employed for dewatering, filling voids and ground stabilization. The purpose of this paper is to evaluate the effect of grouting, using the three-dimensional seismic wave tomography system, which we have developed. The authors have studied the change in the velocity models of seismic wave between the original and grouted ground in three projects, where weak layers in rock mass, voids in sedimentary soft rock and sand deposit were grouted, respectively. As a result, it was found that the tomography system can be applied to the various grounds of which the primary wave velocity exceeded 5000m/s and secondary wave velocity fell below 500m/s to evaluate the effect of grouting.