

トモグラフィ技術による地盤・岩盤探査の研究（その1）

——空洞模擬地盤と風化安山岩地山の速度分布——

桑原 徹 上野 孝之 仮谷 幸吉
平間 邦興 西林 清茂

Study on Research Technique of Ground and Rock Mass Properties Utilizing Tomographic Inversion (Part 1)

——Velocity Distribution on Artificial Ground with Cavity and In-situ Weathered Rock Mass of Andesite——

Tohru Kuwahara Takayuki Ueno Kokichi Kariya
Kunioki Hirama Kiyoshige Nishibayashi

Abstract

The authors carried out seismic and radar tomography exploration experiments using elastic waves and electro-magnetic waves. Measurement systems used were a sparker-hydrophone-geophone in seismic tomography, and SIR and RAMAC in radar tomography. SIRT, CG, DLST, and SVD methods were used in inversion techniques, and also, analytical accuracy was examined by numerical simulation using crank-shaped model structure of three layers of which the velocity distributions were already known. The first experiment was carried out using artificial ground with a cavity (1×1×1 m) and the existence of the cavity could be reconstructed by inversion. The second one was carried out on an in-situ rock mass of andesite (maximum borehole interval 20 m, and bore-hole depth 32 m), and the results of inversion corresponded well to the character of weathering of andesite according to the various rock tests. The relationships between seismic and radar tomography, and between tomography and rock material properties are also discussed.

概 要

この報告はサイスミック・トモグラフィとレーダー・トモグラフィの実験的研究についてまとめたものである。測定に際しては、サイスミック・トモグラフィはスパーカ・ハイドロフォン・ジオフォンのシステムを用い、レーダー・トモグラフィではSIR, RAMAC システムを利用した。解析手法としては、SIRT, CG, DLST, SVD法の4種類を用いたが、事前にクランク型3層構造モデルに対して数値シミュレーションを行ないそれぞれの解析精度を検討した。実験は人工の空洞模擬地盤と現位置岩盤で実施した。前者は1×1×1 mの空洞を含む3×6×5 mの地盤を対象にした結果、概ね空洞の存在を再構成出来た。後者は最大孔間距離20 m、深度32 mの風化安山岩を対象にし、併せて岩盤試験も実施した結果、トモグラフィの結果が岩盤の風化特性に対応していることが明らかになった。またサイスミック及びレーダー・トモグラフィにおける物性の相違及び物性との関係についても検討した。

1. はじめに

トモグラフィ探査技術は、近年飛躍的な発展をとげつつある調査技術で、ボーリング孔の孔間あるいはトンネルの坑間を利用して、地盤・岩盤特性を解明しようとする技術である。医学分野で発展したX線CTスキャン技術はトモグラフィ技術の代表的なひとつであり、地下を対象としたトモグラフィは特に「ジオトモグラフィ」とも呼ばれる。「トモグラフィ (tomography)」の「トモ (tomo)」はギリシャ語源で「切る」の意味であり、これは文字どおり“地を切って”その構造を知ろうとする技術である。従って、ジオトモグラフィ技術は、放射性廃棄物地層処分・ジオフロント・ジオドームなどの大深度地下空間の開発利用のための高精度の調査技術として注目されている。

トモグラフィの考え方は革新的であり、伝統的な調査手法が「順解析問題」であったのに対して、トモグラフィ

は「逆解析問題」で、逆問題を解く数学的アルゴリズムで技術が構成されている。また測定は孔内で行なうために、従来の調査法に見られる地表からの測定に比べて、原理的には大深度でも高品質の記録が得られ、解析精度が低下しないと言える。

トモグラフィ探査法には弾性波を利用したサイスミック・トモグラフィ、電磁波を利用したレーダー・トモグラフィ、及び地盤の比抵抗値による比抵抗トモグラフィなどがある。この研究ではサイスミック・トモグラフィとレーダー・トモグラフィを対象にした。両者は測定システムと解析結果の評価基準は異なるが、解析手法は共通である。ここではトモグラフィの解析手法と各測定システムの概要、及び模擬地盤・安山岩地山で実施した2種類のトモグラフィの探査結果について述べ、サイスミック・トモグラフィとレーダー・トモグラフィの比較評価を行なった。

2. トモグラフィ解析

2.1 概要

トモグラフィの解析は、図-1、2に示すように、得られた観測波線に対してボーリング孔間の断面をある大きさの格子(セル)に分割し、これらの格子に適当な初期値を与え、この初期モデルを基にして逆解析を行なう。最終結果を求めた後、これを画像化する。

速度の解析にあたっては、観測走時 t 、セル中の波の伝播経路の長さ A 、速度の逆数(スローネス) S 、の関係から、

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1j} \\ A_{12} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{ij} & \dots & A_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_j \end{bmatrix}$$

のマトリックスの連立方程式を解いて速度を求める。

このようなマトリックスの解法上の問題点は、①マトリックスの次元 $[n \times m]$ がきわめて大きくなること、②その一方で波線の通らないセルが多いので0の要素が多い粗行列となること、③またセルの数<観測波線数という未知数と方程式の数の関係、などのような数値計算上の技術にある。実際には代数方程式 $t=AS+\Delta t$ において、 Δt を最小にするような S を求める反復法及び最小自乗法を利用して解を求めることになる。解析は図-3に示した流れによっている。

解析手法にはBPT法(逆投影法)、ART法(代数的再構成法)、SIRT法(同時反復法)、CG法(共役勾配法)、DLST法(ダンプト最小自乗法)、SVD法(特異値分解法)がある。BPT法は観測記録から初期モデルを作成するために利用されるもので、概略的な逆解析手法である。トモグラフィ解析における主要な逆解析手法は大きく反復法(ART, SIRT, CG法)と最小自乗法(DLST, SVD法)に分けられる。

波の伝播経路は、発信点—受信点間を直線的に伝わりと仮定した直線波線と、セルの速度に従って変化する屈折波線とに分かれる。

2.2 再構成法

2.2.1 反復法 ART及びSIRT法は、初期モデルに対して反復計算により速度モデルを逐次補正する。この時速度(スローネス)の補正分を解析のセルを通過する波線長の重み付けにより決めており、ART法は1本の波線ごとに、SIRT法はすべての波線をまとめて同時に補正を行なうという特徴がある。一方CG法は、反復計算の各過程で全体の残差が最小になる方向を捜しながら補正を進めるために収束が極めて速いという特徴がある。

2.2.2 最小自乗法 最小自乗法では、その性格上反復法と異なり、解析すべき速度分布は一度でもとまる。しかし解の精度を確認するために、DLST法では人工ノイズとしてのダンピング係数を、またSVD法では解析に利用する固有値の数を変化させながら、反復計算して観

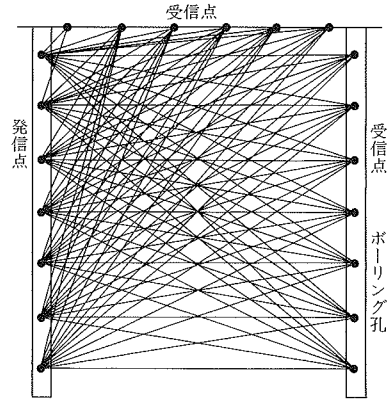


図-1 トモグラフィの測定概要

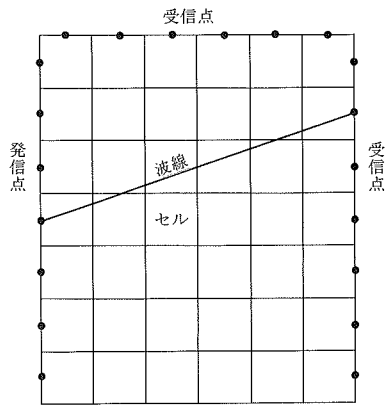


図-2 トモグラフィ解析における領域のセル分割

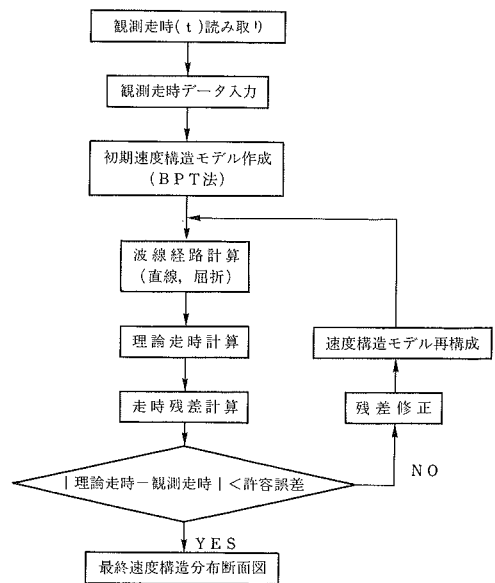


図-3 トモグラフィ解析の流れ図

測走時と理論走時の残差が最小になる速度モデルを捜すという手法をとっている。

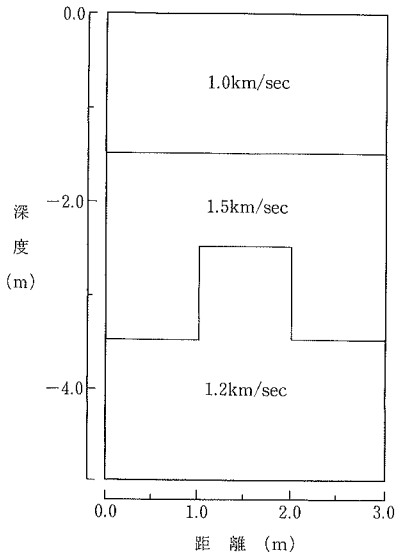


図-4 数値シミュレーションにおけるモデル構造

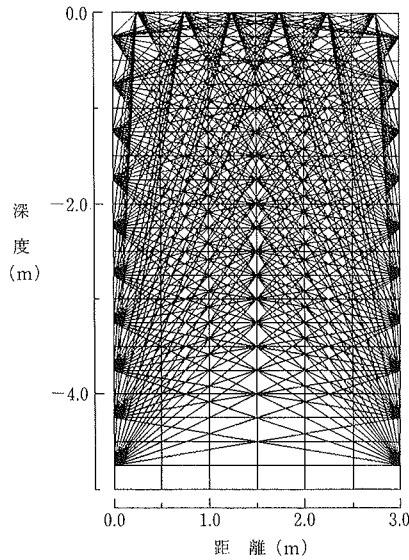


図-5 シミュレーションにおける発振・受振点と直線波線の経路 (CASE-1)

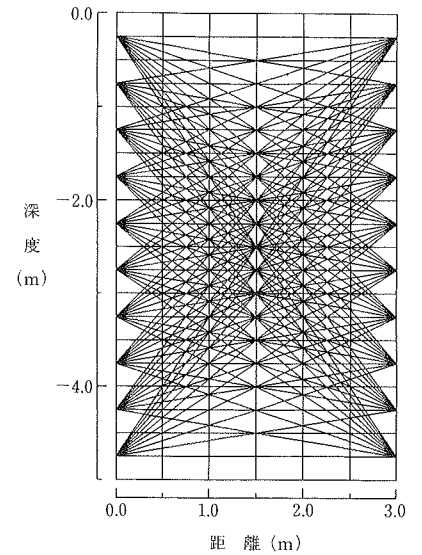


図-6 シミュレーションにおける発振・受振点と直線波線の経路 (CASE-2)

2.3 数値シミュレーション

2.3.1 モデル構造 ここでは既知の速度構造モデルを与えてトモグラフィ解析 (逆解析) を行ない、再現性の検証 (ブラインドテスト) によって解析手法の精度を検討した。すなわち、① 速度構造モデルを作成し、このモデル値に対して理論的に波 (直線波線及び屈折波線) の伝播時間 (初動) を計算する、② この初動を観測記録に見立てて逆解析を行ない、速度構造を求める、③ 当初のモデルと、逆解析により再構成された結果を比較検討し、解析法を評価する。

ここで取り扱う速度構造モデルは図-4 に示すような、長辺 5 m、短辺 3 m のクランク型 3 層の弾性波速度構造モデルである。初動の理論計算は、左辺と右辺に 10 点の発振点と受振点及び上辺に 6 点の受振点を設置した CASE-1 と、左辺と右辺のみに 10 点の発振点と受振点を設置した CASE-2 について実施し、これらを観測走時とした。波線数は CASE-1 で 160、CASE-2 で 100 である。発振点・受振点配置と直線波線及び屈折波線の経路を図-5~図-7 に示す。

2.3.2 再構成結果 ここでは SIRT, CG, DLST, SVD 法の 4 種類の解析手法を用いた。いずれの解法も解析用のセルは 1 辺 50 cm の正方形とした。代表的な例として、直線波線経路を仮定した場合の、CG 法の理論走時と観測走時の差 (走時残差) の最大値とイテレーション (反復計算の回数) の関係を図-8 に示す。イテレーションの回数が増すに従って、走時残差が双曲線的に収束している。走時残差が収束したときのセル速度を用いて画像処理を行なうと、CASE-1 の発振点・受振点配置では写真-1 に示すように、与えたモデルとほぼ同じ速度構造が再構成された。CASE-2 の発振点・受振点配置では写真-2 のように、中央のクランク部の一部に偽像が発生し、完全な再構成像は得られなかった。

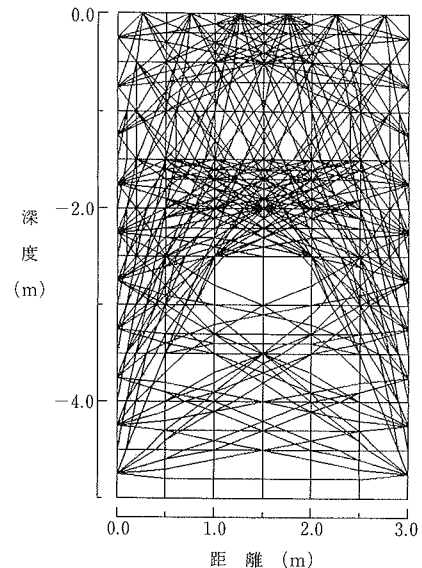


図-7 シミュレーションにおける発振・受振点と屈折波線の経路 (CASE-1)

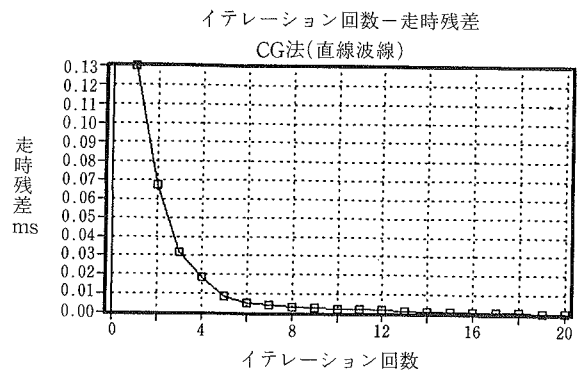


図-8 シミュレーションにおけるイテレーションと走時残差の関係

直線波線の場合、4つの解析手法でほぼ同様の結果が得られ、解析法の精度を確認することができた。一方、発振・受振点の配置によっては正解が得られない場合があることも確認され、実際の探査で解析精度を向上させるためには、発振点・受振点配置の選択が重要なポイントとなることが想定された。

3. 測定装置

3.1 サイスマック・トモグラフィ

測定システムを図-9と表-1に示す。データ収録装置はデジタル浮動小数点方式によりデータを記録し、発振装置はスパークを用い、受振装置はハイドロフォンを中心に構成されている。波の発振装置の条件としては、孔内挿入可能な小口径、非破壊、大きなエネルギーと伝播距離・耐水圧性などが重要である。スパークは高電圧の放電を利用した発振装置である。これは圧縮空気を利用した装置(エアガン)と比べると小口径で取り扱いが容易であり、雷管・火薬のような許可及び設備が不要である。しかし火薬やエアガンに比べエネルギーが小さいので、伝播距離は相対的に小さい。また海外で利用されるスプリングによる機械的打撃方法よりは、日本の亀裂の多い変質した岩盤でも実用性は高いと考えられる。

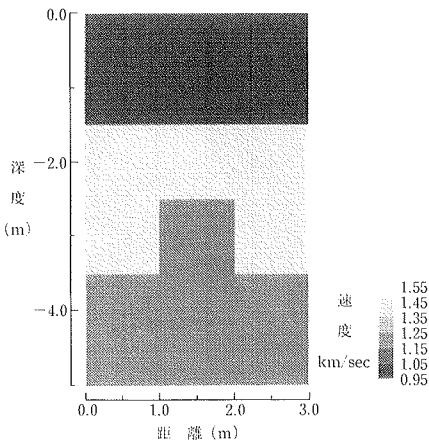


写真-1 CG法による再構成結果 (CASE-1)

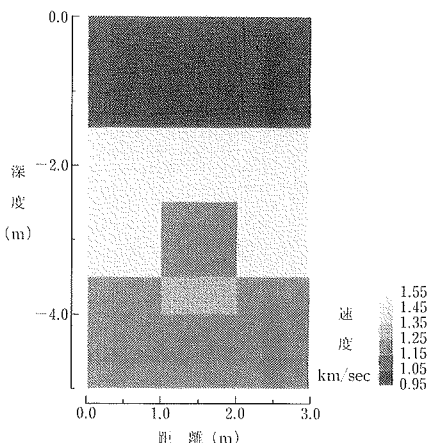


写真-2 CG法による再構成結果 (CASE-2)

孔内用の受振装置は大きくジオフォンとハイドロフォンに分けられる。ジオフォンは速度型あるいは加速度型であり、ハイドロフォンは圧電素子型である。ジオフォンは、多連式で窒素ガスによりパッカーで孔壁に圧着する1~2成分タイプと、1連でサイドアームにより孔壁に圧着し高い測定精度を持つ3成分タイプに分かれる。ハイドロフォンは孔内水が必要であるが、ここで用いたものは最大12連まで接続可能で作業効率も良く測定精度も高い。

3.2 レーダー・トモグラフィ

測定にはSIRシステムとRAMACシステムを使用した。レーダー・トモグラフィ探査システムは図-10に示すように、ボアホール用の一対の送信プローブと受信プローブ、及びコントロールユニットから構成されている。各システムのアンテナの仕様を表-2に示す。

2つのシステムの大きな差異は発信出力と発信周波数である。出力が大きいほど、また発信周波数が小さいほど透過距離(ボーリング孔間距離)を長くできる。しかし、プローブは電磁波の波長の1/2あるいは1/4の長さが必要であるため、発信周波数を小さくするとプローブが長くなり、探査精度が低下する。そこで、小規模の空洞

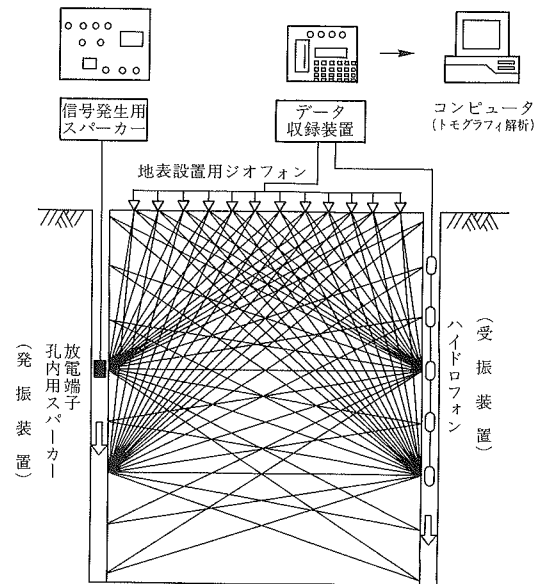


図-9 サイスマック・トモグラフィの測定システム

表-1 サイスマック・トモグラフィ測定システムの仕様

データ収録装置	BISON MODEL 9,012 デジタルフローティング方式, サンプルングタイム 50μsec, 感応周波数 5~1,500Hz
発振器	TELEDYNE MODEL 30,600 スパーク, SOLID STATE SCR SWITCH, 110V, 50Hz, 1,000Jule, 出力 10KV, アークチャップ付
受振器	孔内用 MARKPRODUCT MODEL P-27-12C ハイドロフォン, 圧電素子型, 周波数帯域 3~1,000Hz, 耐水圧1,000m, φ5.08cm, 5連式
	地表用 SANKEI ENG, MODEL SK 008 ジオフォン, 速度型, 固有周波数 28Hz, 2成分, パッカーによる圧着式, φ6.0cm, 4連式
	MARKPRODUCT MODEL L-21 ジオフォン, 速度型, 固有周波数 28Hz, 1成分, 12個

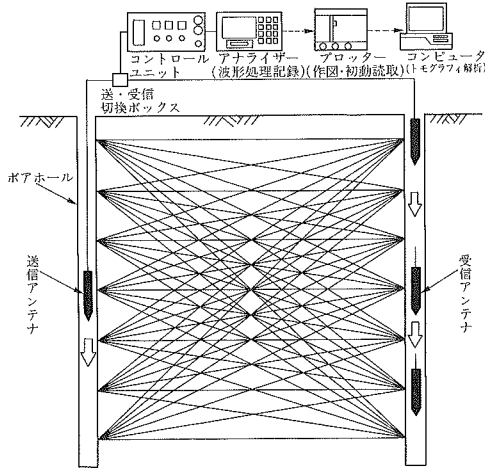


図-10 レーダー・トモグラフィの測定システム

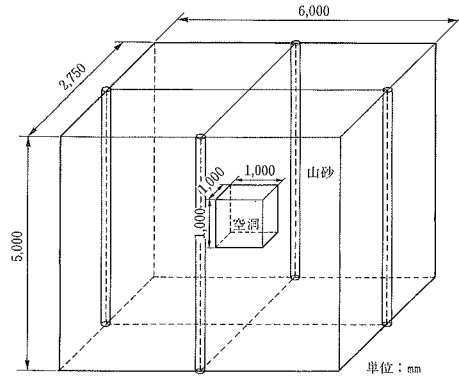


図-11 空洞模擬地盤の構造

表-2 レーダー・トモグラフィ測定システムの仕様

	SIRシステム	RAMACシステム
発信周波数	120MHz	20及び60MHz
発信出力	42W	500W
パルス繰返し周波数	50KHz	43.1KHz
受信周波数帯域	50MHz-1GHz	10-200MHz
発/受信プローブ外径	66mm	48mm
プローブ長さ	発信	1,370mm
	受信	5,100mm
プローブ重量	発信	3.6kgf
	受信	18kgf
ケーブル長さ	60m	1,000m

模擬地盤では SIR システムを、また原位置岩盤での測定には RAMAC システムを使用した。

4. 空洞模擬地盤探査

4.1 地盤条件

ここでは測定・解析システムの性能確認を実地盤で行なうために、関東ローム層にピットを設け、その中央部に木箱で製作した空洞と、ピット端部に $\phi 100$ mm の塩ビ製測定孔を設置した模擬地盤を人工的に造成した。模擬地盤の規模は図-11に示すように、孔間距離は 6 m と 2.75 m、深さは 5 m とし、空洞は 1 辺 1 m の立方体とした。

空洞周辺は密度管理を行ないながら笠間産山砂で埋め戻した。造成後の空洞周辺地盤の物性は、表-3 に示すとおりである。

4.2 測定

4.2.1 サイスマック・トモグラフィ 測定断面は図-11の空洞を含む 6 m 及び 2.75 m の測線の 2 測線である。測定条件は表-4 に示す。振源はスパークを用い、スタッキングは状況に応じて 4~16 回行なった。受振装置は 5 連のハイドロフォンを用いた。測定は次のような手順で実施した。発振用のボーリング孔にスパーク本体からケーブルで接続された放電用端子を挿入し、所定の深度

表-3 模擬地盤の諸物性値

土質	単位体積重量 (gf/cm ³)	含水比 (%)	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	導電率 (ms/m)	比誘電率
笠間産山砂	1.770	12.2	800	1.25	9.8

表-4 模擬地盤におけるサイスマック・トモグラフィの測定条件

孔間距離	2.75 m	6.00 m
発振点数	16	16
受振点数	16	16
測定深度間隔	0.25 m	0.25 m
波線数	256	256

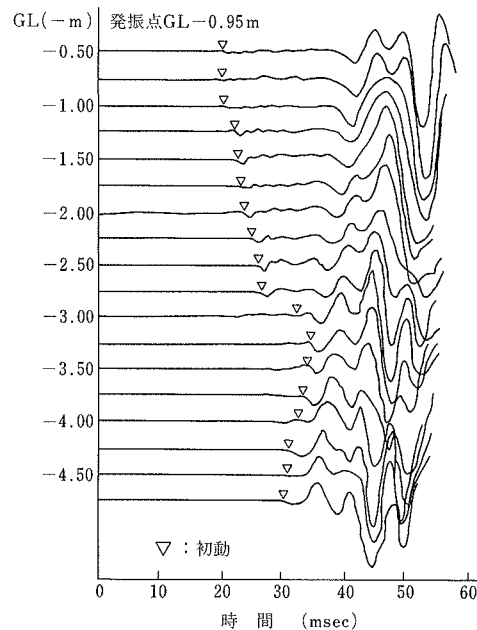


図-12 模擬地盤におけるサイスマック・トモグラフィ測定記録例

に設置した後、受振用のボーリング孔に5個のハイドロフォンを挿入し、設置深度を変えながら測定を行なう。次に放電端子の設置深度を変えて、同様な測定を繰り返す。これらの測定が終了したら、発振・受振用ボーリング孔を交代して、再び同様な測定を繰り返す。

このようにして得られた孔間距離6mの測定記録の一例を図-12に示す。発振点は深度-0.95m、受振点は深度-1.25~-3.50mである。波の初動は記録中「最初の波の立ち上がり」で表され、図中の▽印で示してある。ここでは模擬地盤が軟弱であることも加わって、初動付近の振幅は全体として小さく、一方表面波などの後続波が大きく現れている。

4.2.2 レーダー・トモグラフィ 測定はSIRシステムを用い、以下の手順で行なった。送信プローブと受信プローブは、送信・受信用として別々のボーリング孔に挿入する。測定は受信プローブを所定の深度に設置し、発信プローブを一定間隔毎移動させて行なう。所定深度の受信プローブに対して、各深度における発信プローブの測定が終了すると、受信プローブを次の深度に移動して同様の測定を行なう。この操作を繰り返して各送信・受信点間の受信波形を記録する。ここで測定は表-5に示す条件で実施し、各断面で256波線データを得た。

得られた受信波形の一例を図-13に示す。これは孔間距離2.75mの断面において、発信アンテナの中心深度を

表-5 模擬地盤におけるレーダー・トモグラフィの測定条件

孔間距離	2.75m	6.00m
発信点数	16	16
受信点数	16	16
測定深度間隔	0.25m	0.25m
波線数	256	256

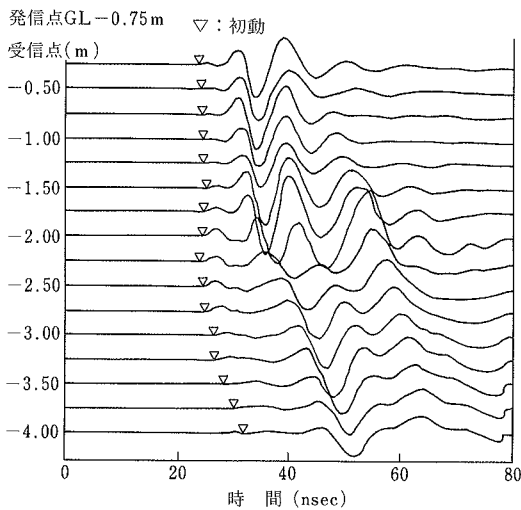


図-13 模擬地盤におけるレーダー・トモグラフィの測定記録例

1.4mに固定し、受信アンテナの中心深度を-0.65mから-4.64mまで0.25m間隔で移動させて測定した受信波形である。受信波形は測定時に100~500回のスタッキングを行ない、ノイズ処理を行なっている。発信点から受信点までの波の到達時間(初動)は、波形記録の▽印を付した「最初の波の立ち上がり」の時間として読みとった。電磁波速度は真空中で30cm/nsecであるが、地中ではおよそ10cm/nsecで伝播している。

4.3 解析結果と考察

解析はSIRT, CG, DLST, SVD法で実施した。代表的な解析結果として直線波線によるCG法とDLST法の結果を写真-3, 4に示す。これらの結果から、空洞はいずれの断面でも概ね妥当な大きさで、またほぼ矩形の形で再構成されていることが分かる。

サイスミック・トモグラフィの場合、弾性波は空洞中をあまり伝わらないので、空洞は周りの地盤に対して相対的な低速度帯となる。レーダー・トモグラフィでは、

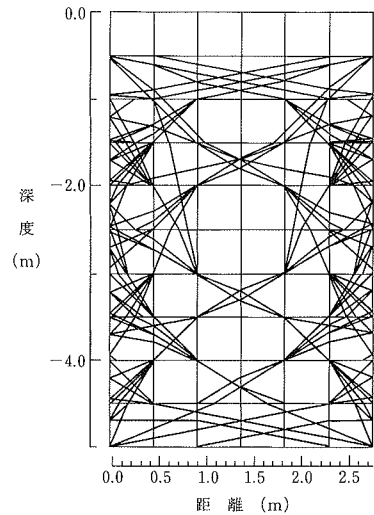


図-14 サイスミック・トモグラフィにおける波線経路

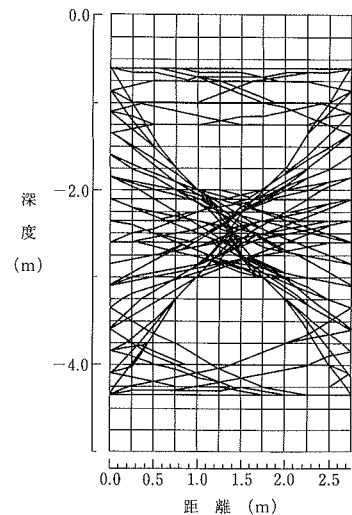


図-15 レーダー・トモグラフィにおける波線経路

電磁波の速度が空洞中で上限の 30 cm/nsec に近づき、地盤中では相対的に遅くなるので、空洞は弾性波とは逆に高速度帯として表現される。従って解析結果は、速度値の分布に関しては正反対となる。屈折波線による解析結果に基づいても図-14, 15のように、波線経路はサイスミック・トモグラフィでは低速度帯の空洞を囲むよう

に通り、レーダー・トモグラフィでは高速度帯である空洞中心部を通過する。このような空洞部分における波線密度の違いは解析結果にも反映しており、空洞部分で波線密度の高いレーダー・トモグラフィの方が、空洞と周辺地盤との速度コントラストが大きく表現されて、空洞部分の再構成が精度良くなされている。

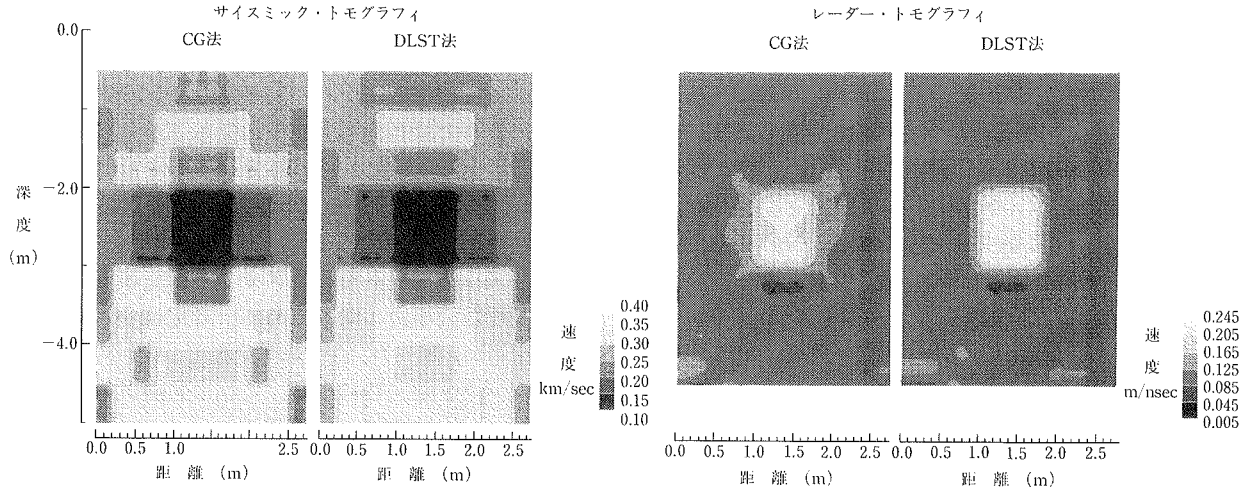


写真-3 模擬地盤・孔間距離 2.75 m の解析結果

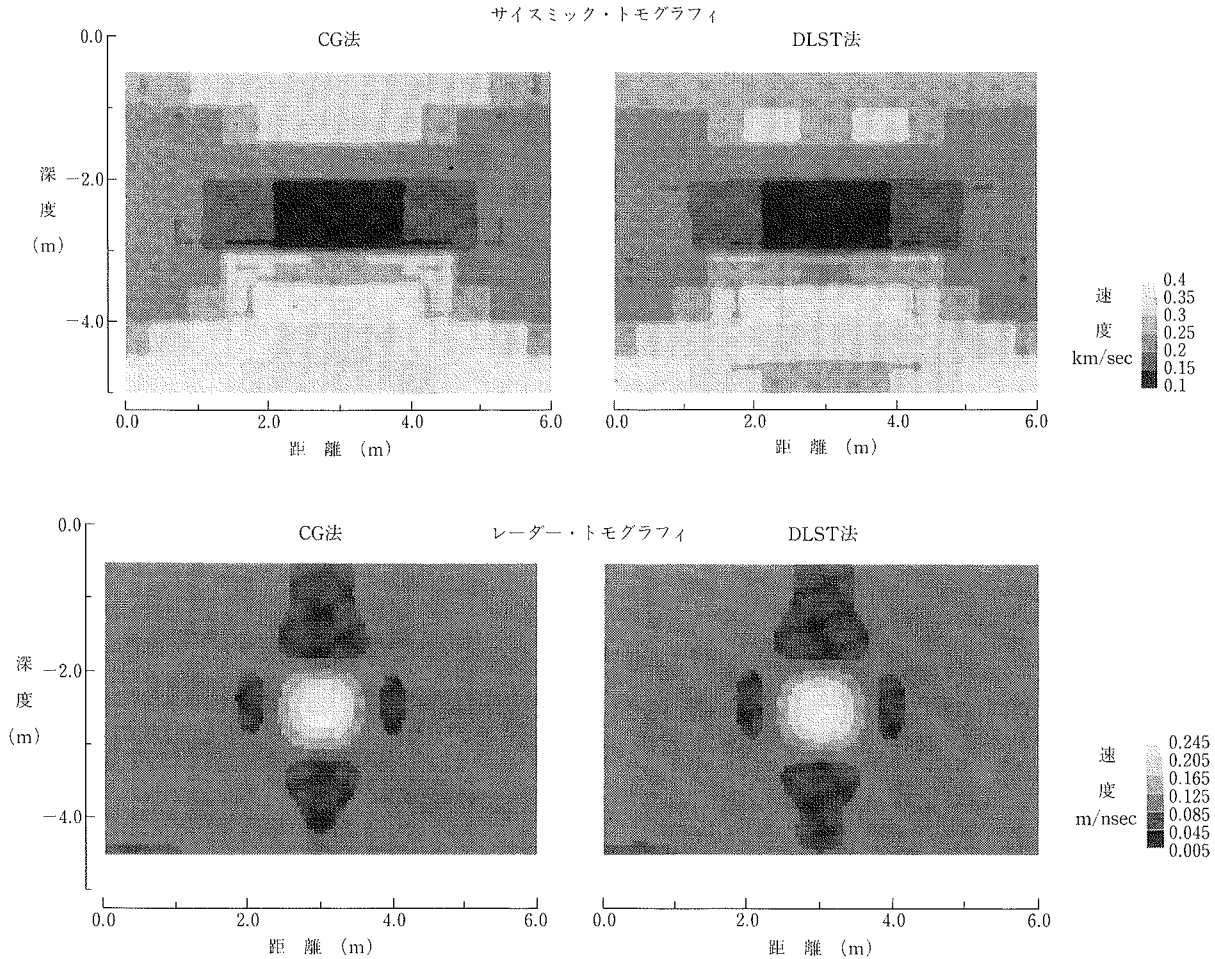


写真-4 模擬地盤・孔間距離 6 m の解析結果

5. 原位置岩盤探査

5.1 探査サイトと地質条件

ここでは図-16に示す長野県・稲荷山トンネル坑口付近の原位置岩盤で行なった測定解析結果について示す。地質条件としては、今回の調査地域は新第三紀グリーンタフ地域の石英安山岩質角礫凝灰岩からなり、表層部分には厚さ1~3mの崩積土がある。地下水位はGL-1~3m程度である。

探査の測線については、図-17に示す2本のボーリング孔No. 1とNo. 3が孔間距離20mの位置にあり、それをボーリング孔No. 2により孔間距離12mと8mの2断面に分割し、合計3断面に対して測定を実施した。探査の対象深度は-32mである。No. 1, No. 3孔では、ボーリングコアの地質観察、RQD測定、ポアホールスキヤシステムによる孔内亀裂調査、コア試料のポイント

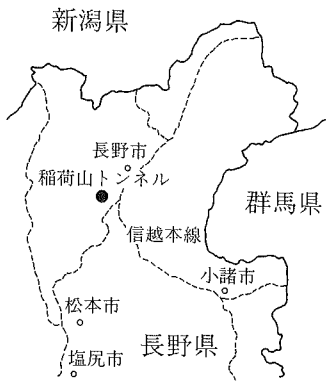


図-16 原位置調査位置図

ロード試験(換算一軸圧縮強度試験)、ルジオン試験、速度検層等を実施しており、代表的な結果を図-17にボーリング柱状図と併せて示す。風化安山岩質凝灰岩の風化度、RQD値、一軸圧縮強度、単位区間あたりの亀裂の幅の大きさ、P波速度などに良い対応が見られた。

5.2 測定

5.2.1 サイスマック・トモグラフィ 測定要領は空洞模擬地盤と同様である。測定条件は表-6に示す。孔間距離20mでスパーカの発振深度-16mにおける、ハイドロフォンの深度-1~32mでの測定記録を図-18に示す。ここでは初動を表す波の立ち下がり(図中▽印)は、深度-5mまでの浅い部分をのぞくと極めて明瞭であった。孔間距離12m, 8mにおいても同様な傾向が認められた。

5.2.2 レーダー・トモグラフィ 測定要領は前述の空洞模擬地盤の場合と同様である。測定はRAMACシステムを用い、表-7に示す条件で測定した。得られた受信波形の一例を図-19に示す。これは発信アンテナの中心深度を-4mに固定し、受信アンテナの中心深度を-1mから-7mまで-1m間隔で移動させて測定した受信波形である。初動は▽印で示される波の立ち上がりの位置で読みとった。孔間距離20mでは減衰が大きく波形が若干乱れがちなため初動が不明瞭な記録もあったが、孔間距離12mでは良好な記録が得られた。

5.3 解析結果と考察

解析は模擬地盤と同様に4種類の方法で実施した。解析結果は、それぞれ差異を含んでいるものの、全体としてはいずれも類似の速度分布構造を示している。ここでは代表的な例としてCG法の結果を示す。写真-5は孔

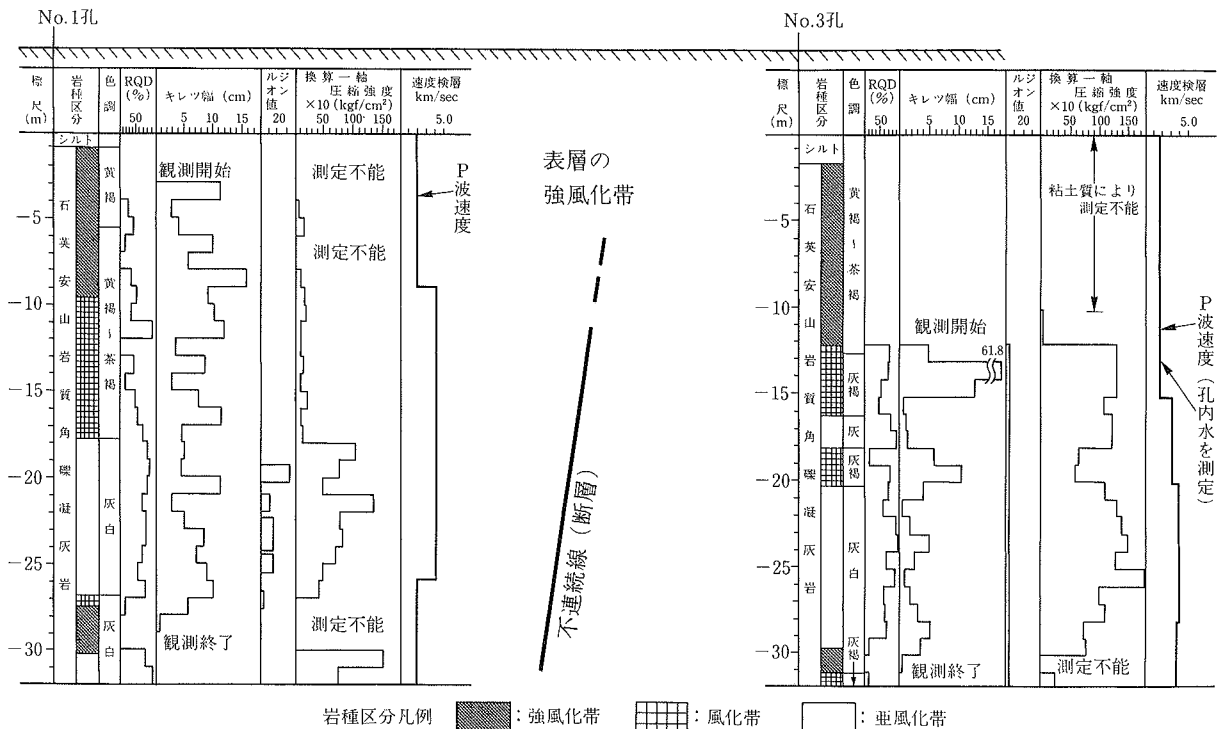
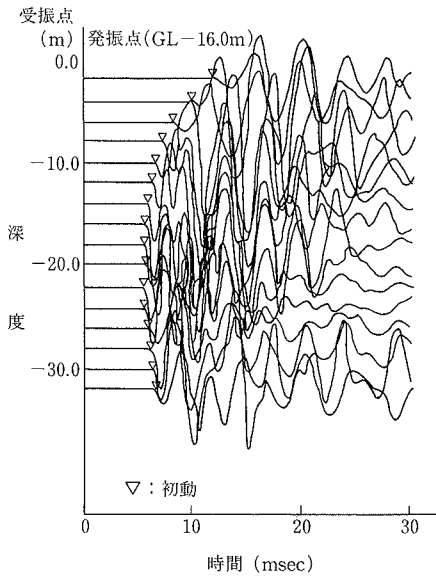


図-17 探査用ボーリング孔の地質柱状図及び岩盤試験結果

表一六 原位置岩盤における
サイスミック・トモグラフィの測定条件

孔間距離	20m	12m	8m
発振点間隔	2m	1m	1m
受振点間隔	1m	1m	1m
発振点数	16	32	32
受振点数	32	15	15
波線数	512	480	480



図一八 原位置岩盤における
サイスミック・トモグラフィの波形記録

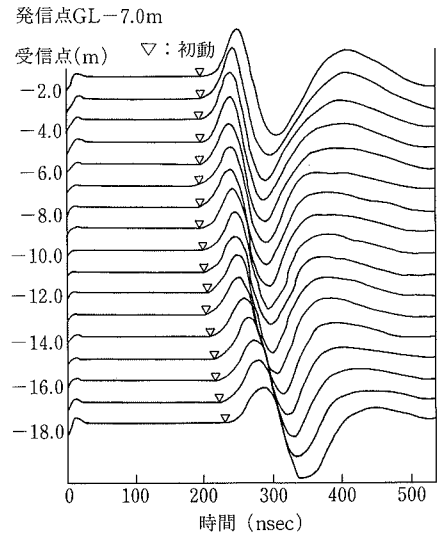
間距離 20 m の結果, 写真一六は孔間距離 12 m と 8 m の結果を合わせたものである。孔間距離 20 m の断面と 8 m, 12 m の断面は本来一致していなければならないが, これらは共通の傾向を持つものの, 類似しているとは必ずしも言い切れない。これらの原因としては, 孔間距離が短くなるに従い初動の読み取り誤差が大きくなること, 距離減衰により S/N 比が低下することが関係していると考えられる。

孔間距離 20 m についてみると, サイスミック・トモグラフィの解析結果は, 表層部・深部での低速度帯, 及び中～深部での中～高速度帯からなる層構造として表現されている。一方レーダー・トモグラフィでは中央部にやや速度の大きい領域があり, その上・下部に速度の遅い領域からなる層構造として表現されている。

サイスミック・トモグラフィでは, 表層部と深部の強風化帯である粘土・土砂化帯 (低 RQD 値, 低一軸圧縮強度値) と, 亀裂の多い風化帯～亜風化帯 (高 RQD 値, 高一軸圧縮強度値) が, それぞれ低速度帯, 中～高速度帯として再構成されている。また各ボーリング孔で実施した速度検層結果ともほぼ一致していた。一方レーダー・トモグラフィでは, 高速度帯は亀裂の多い風化帯～亜風化帯に, 低速度帯は強風化帯の粘土化帯に対応している。電磁波速度は, 一般に岩の電気的特性と相関があるとさ

表一七 原位置岩盤における
レーダー・トモグラフィの測定条件

孔間距離	8m	12m	20m
発信点数	22	22	22
受信点数	24	24	24
測定深度間隔	1m	1m	1m
波線数	427	403	426



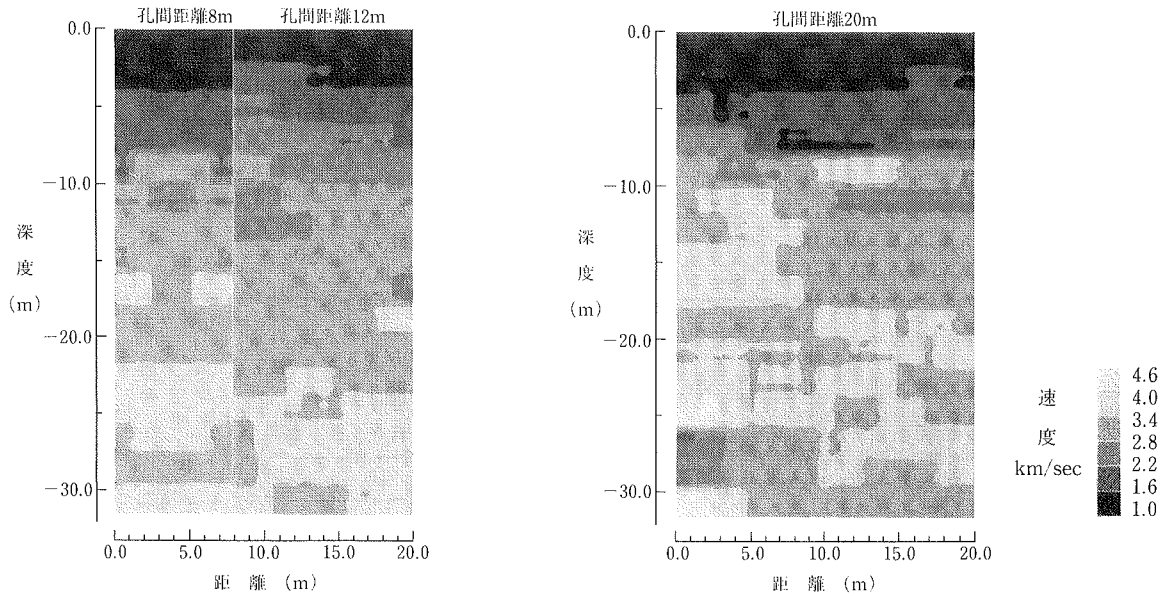
図一九 原位置岩盤における
レーダー・トモグラフィの波形記録

れているが, 今回一軸圧縮強度と相関は認められなかった。従って岩の強度特性との対応については, サイスミック・トモグラフィの結果とは一致していない。

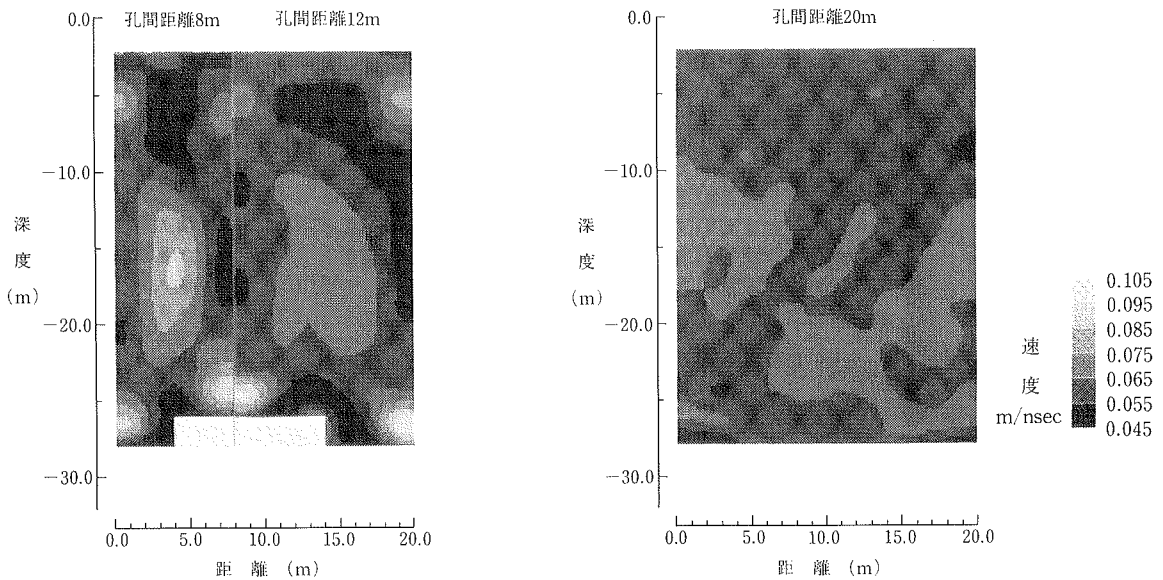
これらの結果は岩盤構造の変化, すなわち上部より下部への「強風化帯, 風化帯, 亜風化帯, 強風化帯」の変化を表現していると考えられる。またボーリング No. 1 孔と No. 3 孔とでは風化特性の深度分布が異なっていることが判断できる。すなわち No. 1 孔側は大きな RQD 値と一軸圧縮強度及び小さなキレツ幅で特徴づけられる「風化帯」が深い位置で現れるのに対して, No. 3 孔側ではこのような「風化帯」が浅い位置で現れるばかりでなく, 一軸圧縮強度自体がかなり大きいという特徴がある。トモグラフィ解析で得られた速度分布は, サイスミック及びレーダー・トモグラフィのいずれにおいても孔間距離 20 m の図中でほぼ中央部に急傾斜で延びる速度不連続線が認められ, 岩盤物性の不連続性に対応するものと考えられる。すなわちトモグラフィ解析結果と岩盤試験結果から図一七のような断層の存在が推定される。

6. まとめ

① 今回の実験では, サイスミック・トモグラフィの測定では主にスパーカ・ハイドロフォンシステムで, またレーダー・トモグラフィの測定については SIR・



写真一五 原位置岩盤におけるサイスミック・トモグラフィの解析結果（CG法）



写真一六 原位置岩盤におけるレーダー・トモグラフィの解析結果（CG法）

RAMAC システムで対応することが出来た。地盤の減衰性に対応する測定システムを用いることが必要である。

② トモグラフィ解析については、数値シミュレーション及び模擬地盤・原位置岩盤の測定データに対して4種類の解析手法を用い、精度と特性評価を行なった結果、良好な再現性が得られた。

③ トモグラフィ解析による速度分布は岩盤の強度・風化特性と対応していることが分かった。また断層と思われる岩盤中の不連続面を推定することが出来た。しかしサイスミック及びレーダー・トモグラフィでは周波数特性等の相違により対応する物性が異なるので、解析結果と岩盤物性に係わるそれぞれの対応について、さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 上野, 他: レーダー・トモグラフィ探査実験, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第3部, p.1118~1119, (1990)
- 2) 桑原, 他: サイスミック・トモグラフィによる岩盤調査, 土木学会・地下空間利用シンポジウム1990, p.103~108, (1990)
- 3) Kuwahara, T., et al., Application of seismic tomography to site characterization in civil engineering, 物理探査学会, ジオトモグラフィ国際シンポジウム, p.107~112, (1990)