

# トモグラフィ技術による地盤・岩盤探査の研究（その2）

——層構造地盤における速度解析，減衰解析，および数値シミュレーション——

桑原 徹 上野 孝之 仮谷 幸吉 金田 義行  
奥田 暁 平間 邦興 西林 清茂

## Study on Research Technique of Ground and Rock Mass Properties Utilizing Tomographic Inversion (Part 2)

——Travel Time and Attenuation Tomography and Numerical Simulation in Stratified Layer——

Tohru Kuwahara Takayuki Ueno Kokichi Kariya Yoshiyuki Kaneda  
Satoshi Okuda Kunioki Hiramata Kiyoshige Nishibayashi

### Abstract

Explorations and numerical simulations concerning seismic and radar tomography are discussed in this study. Explorations were carried out at two sites. One was composed of artificial stratified layers including both a cement-grouted sand layer and a sand layer of weathered granite. The other consisted of natural ground of gabbro. Underground structures were distinguished based on velocity and attenuation analyses. Differences of material properties of ground and rock mass were also distinguished by seismic waves and radar waves. Based on results of these analyses, responses of seismic and radar waves were calculated using dynamic response analysis and the Wave Front Tracer Method, with results of inversion then estimated. In this study, the authors performed attenuation tomography as well as travel time tomography, and it was possible to obtain various kinds of information on ground. In addition, the reliability of inversion was enhanced by the reestimation of numerical simulation.

### 概 要

この報告は、サイスミック・トモグラフィとレーダー・トモグラフィに関して、探査および数値シミュレーションについてまとめたものである。探査は、セメント混合土と真砂土からなる層構造模擬地盤と、はんれい岩地山の2箇所で実施した。速度解析と減衰解析の両者で検討した結果、地下構造を明らかにすることができた。また弾性波と電磁波による物性情報の違いについても明らかになった。これらの探査結果を用いて、有限要素法による動的応答解析とウェーブ・フロント・トレーサー法により、弾性波と電磁波の応答に関してシミュレーションし、解析結果の評価を行った。今回速度解析に加えて減衰解析も実施し、さらに解析結果をシミュレーションで再評価することで、多様な地盤情報を得ることが可能となった。

### 1. はじめに

前報告（その1）ではトモグラフィ技術の内、弾性波と電磁波を用いた測定・解析システム、および速度解析について報告した。今回の報告（その2）では、速度解析に加えて減衰解析とそれらの数値シミュレーションについて報告する。探査は層構造模擬地盤およびはんれい岩地山の2箇所で実施した。

トモグラフィ解析は、初動走時および初動振幅の変化から地下の構造を明らかにするものである。振幅は一般に地盤中の物理的状态、すなわち地下水・地盤の空隙率・き裂等に支配される。振幅を用いる減衰解析は、主として力学的特性に対応する速度とは異なる情報を得ることができる。弾性波の減衰は、概念的には均質で強固な岩盤中では小さく、き裂が多い、あるいは軟質な岩盤では

大きいとされている。電磁波の減衰は、特に金属含有量、水分量、セメント含有量に大きく影響され、実験的にはセメント含有量は水分量よりも影響が大きいことが知られている。

速度解析では速度を未知数とし、減衰解析では減衰定数を未知数としており、減衰解析は基本的には速度解析の流れと同様である。解析手法はSIRT, CG, DLST, SVD法の4種類を用いた。

トモグラフィ解析結果の評価については、解析手法の数学的な誤差基準だけでは必ずしも十分とは言えない。今回トモグラフィの解析結果を用いて数値シミュレーションを行うことにより、トモグラフィ解析結果の信頼性の再評価を行うことができた。トモグラフィ探査技術の実用化を進める上で、このような総合的解析システムが重要であると考えられる。

## 2. 減衰解析手法

初動振幅を利用して減衰解析を行う場合、波の減衰特性を表す次式を用いて測定データを処理する必要がある。

$$\alpha r = \ln \frac{A_o \cdot A(\theta)}{A_i \cdot r} \quad \dots\dots(1)$$

$$\alpha = \pi \cdot f / Q \cdot V \quad \dots\dots(2) \quad T = r / V \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 $\alpha$ ：減衰定数、 $r$ ：発振点（送信点）～受振点（受信点）間の距離、 $A_i$ ：受振点（受信点）における測定記録の初動振幅の大きさ、 $A_o$ ：発振点（送信点）での振幅の大きさ（定数）、 $A(\theta)$ ：弾性波ではスパカ震源の放射パターン、電磁波では送受信アンテナの放射パターンの積（放射パターンは放射角と振幅の関係）、 $f$ ：周波数、 $Q$ ：減衰率、 $V$ ：速度、 $T$ ：初動走時

減衰解析に際しては、測定された初動振幅に対して上記の距離補正および放射パターンの補正を行った振幅値を入力データとし、減衰定数  $\alpha$  を求めた。

## 3. 地盤探査

### 3.1 層構造模擬地盤

**3.1.1 層構造模擬地盤の構造** 層構造模擬地盤の構造を図-1に示す。模擬地盤は関東ローム層中に、6m×3m×5mのピットを掘削し、そのうち深度-3～-5mの部分は笠間産の真砂土で密度管理をしながら埋戻しし、深度0～-3mについては真砂土とセメントの混合土とした。計測孔はピット端部にφ100mmの塩ビ管を4箇所設置した。また図-2に土質性状を示す。測定断面は図中の孔間距離6mのNo.1-No.2断面、および孔間距離2.75mのNo.3-No.4断面である。ここでは代表的なNo.3-No.4断面の解析結果について述べる。

**3.1.2 サイスマック・トモグラフィ解析結果** 測定に際しては、発振源としてスパカ、孔内受振装置としてハイドロフォン、地表用受振装置として速度型ジオフォンを用いた。測定・解析条件は表-1に示す。図-3は測定波形記録の一例である。図中の波形記録のトレースは、深度-0.5mから-4.0mまでの、発振点と受振点が同一深度の配置に対応するものである。初動走時は波の最初の立ち下りの時間を、初動振幅は初動の立ち下り部分の片振幅の大きさを読みとっている。これから上部のセメント混合土では、全体として初動が速く振幅も大きいものが多いのに対して、下位の真砂土では初動が著しく遅くなり振幅も小さくなるのが分かる。

写真-1は速度解析および減衰解析の結果である。速度解析および減衰解析は直線波線によるSVD法により行った。速度解析結果によると、セメント混合部分は全体として1.30～1.90 km/sec、真砂土部分は0.40～0.70 km/secであり、両者の境界は1.0 km/sec付近で明瞭に識別出来る。減衰解析結果によると、減衰定数は深度とともに、セメント混合土中および真砂土中で変化をしている。地層境界も減衰定数の変化からみて明らかである。

これらの解析結果を深度ごとに図-3の測定記録と比

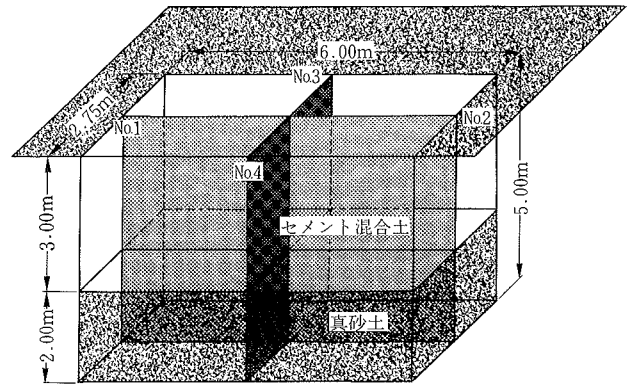


図-1 層構造模擬地盤の構造

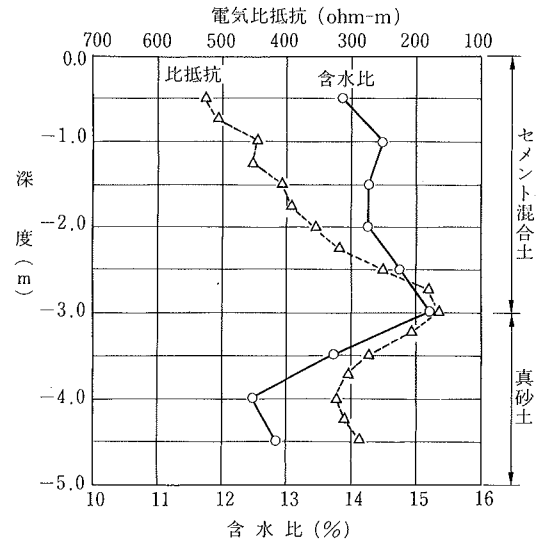


図-2 層構造模擬地盤の土質性状

表-1 層構造模擬地盤におけるサイスマック・トモグラフィの測定・解析条件

測定条件		解析条件	
孔間距離	2.75m	孔間距離	2.75m
測定深度	-0.5～-4.5m	発振点数	9
発振点数	9	受振点数	15
受振点数	15	セルサイズ	0.5m
測定深度間隔	0.5m	セル数	54
波線数	270	解析手法	SVD法

較すると、初動値の大小は速度分布の大小に、振幅値の大小は減衰定数の大小とそれぞれ対応していることが分かる。また解析結果の速度分布と減衰定数分布を比較すると、混合土では深度-2.5m付近の高速度帯が減衰定数の極小部分に、その上下のやや低い速度を含む部分がやや減衰定数の大きい部分に、また深度-0.7m付近の

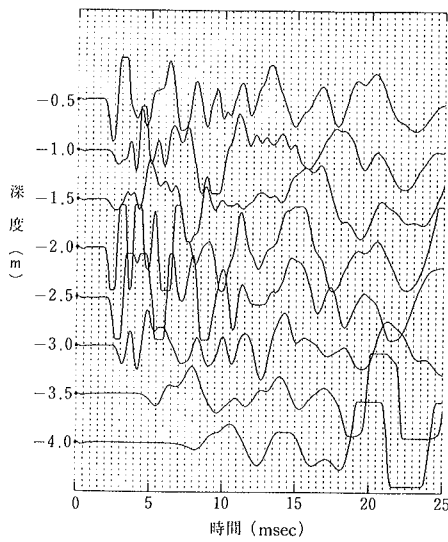


図-3 層構造模擬地盤におけるサイスマック・トモグラフィの測定記録例

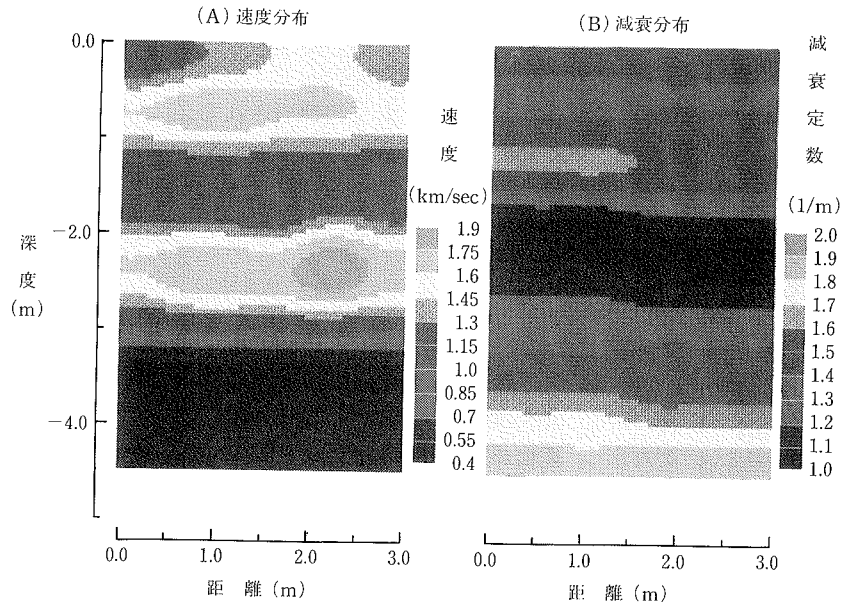


写真-1 層構造模擬地盤におけるサイスマック・トモグラフィの解析結果

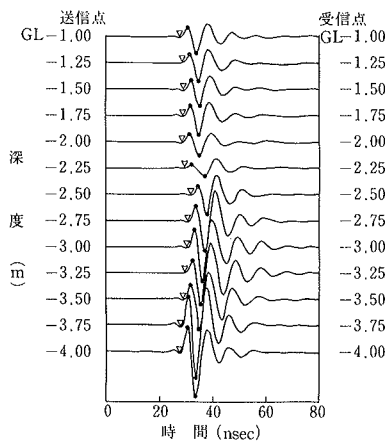


図-4 層構造模擬地盤におけるレーダー・トモグラフィの測定記録例

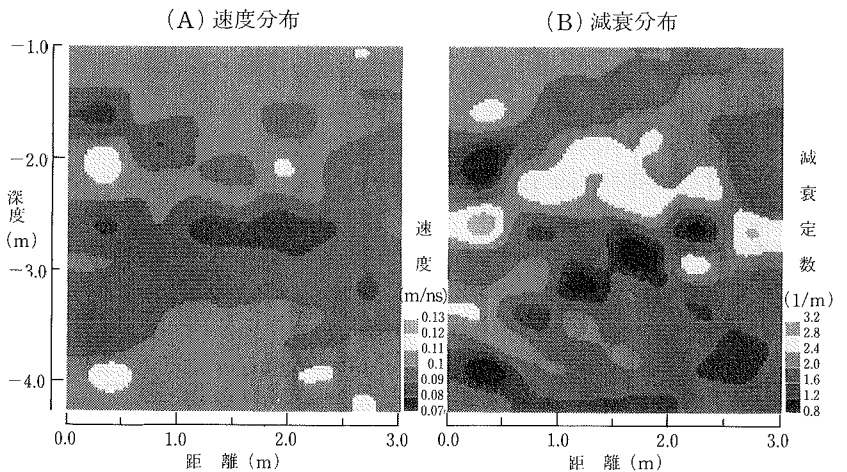


写真-2 層構造模擬地盤におけるレーダー・トモグラフィの解析結果

中速度帯がやや減衰の大きい部分に対応している。真砂土部分では速度の低下に対して減衰定数が大きくなっている。

以上のように速度および減衰定数分布は、地盤の性質の違いによる2層構造を再構成しており、両者の強度的な違いを反映していると考えられる。

**3.1.3 レーダー・トモグラフィ探査結果** 測定には SIR システム (米国 GSS 社) を使用した。測定条件は表-2 に示す。測定により図-4 に示すような波形トレスが得られた。この図は送信アンテナ (長さ 1.37 m) と受信アンテナ (長さ 1.37 m) の中心深度を等しく設置して、GL-1 m から GL-4.25 m まで 0.25 m 間隔で測定した結果である。各送受信点間の電磁波の伝播速度は図

表-2 層構造模擬地盤におけるレーダー・トモグラフィの測定・解析条件

測定条件		解析条件	
孔間距離	2.75 m	孔間距離	2.75 m
測定深度	-1.0~-4.0 m	送信点数	13
送信点数	13	受信点数	13
受信点数	13	セルサイズ	0.25 m
測定深度間隔	0.25 m	セル数	169
波線数	169	解析手法	CG 法

中▽印を付した最初の立ち上がり点として読み取った。初動振幅は受信波形の・印を付した最大最小値の差として読み取った。

走時データを用い、表-2 に示す解析条件で、直線波線による CG 法で解析した速度分布を写真-2 に示す。

速度分布は0.07~0.13 m/nsecの範囲にある。模擬地盤はセメント混合土と無処理の真砂土の2層構造であるが、解析結果は模擬地盤の中間部に低速度帯を挟んで、上下に相対的高速度帯がある3層構造として再構成されている。これからセメントの存在は電磁波の伝搬速度に影響を与えていないことが分かる。

一般に、電磁波の伝播速度は、

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、C：光の速度 (0.3 m/nsec),  $\epsilon_r$ ：比誘電率

すなわち  $\epsilon_r$  が小さいほど速度が大きく、き裂の少ない岩盤ほど  $\epsilon_r$  は小さく、土砂の  $\epsilon_r$  は大きい。また含水比が高いほど  $\epsilon_r$  は大きく、速度が遅くなる。さらに比誘電率はセメント含有量にほとんど影響を受けない。従って、速度分布の構造は含水比の分布に対応する。

従って、中間の低速度帯はこの位置の含水比が高くなっていることを示唆している。これは、トモグラフィ測定時における、図-2に示す含水比の深度分布に対応していると考えられる。

振幅データを用い、表-2に示す解析条件で、直線波線によるCG法で解析した減衰解析結果を写真-2に示す。解析結果はセメント混合土は相対的に減衰が大きく、真砂土は減衰が小さく再構成されている。セメント混合土下部の高減衰帯は高含水比帯の位置よりやや浅い。電磁波の減衰性は地盤の比抵抗値に反比例し、比抵抗値は含水比とセメント含有量に比例する。従って、図-2の測定結果から高減衰帯は含水比よりもセメント含有量に支配されていると考えられる。

3.1.4 考察 模擬地盤の探査結果を見ると、サイスミック・トモグラフィは土質の違いによる2層構造を良く表現しており、レーダー・トモグラフィは金属成分・含水比に支配される地盤性状を良く表していると考えられる。

3.2 はんれい岩地山

3.2.1 はんれい岩地山の構造 測定は図-5に示すような、孔間距離15m、深度-21mの断面で実施した。

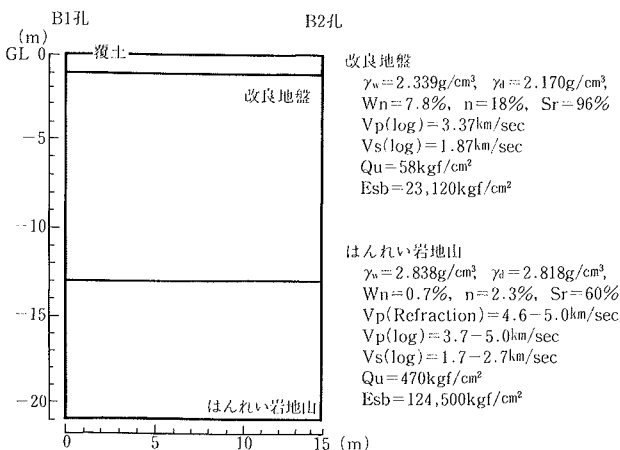


図-5 はんれい岩地山の構造

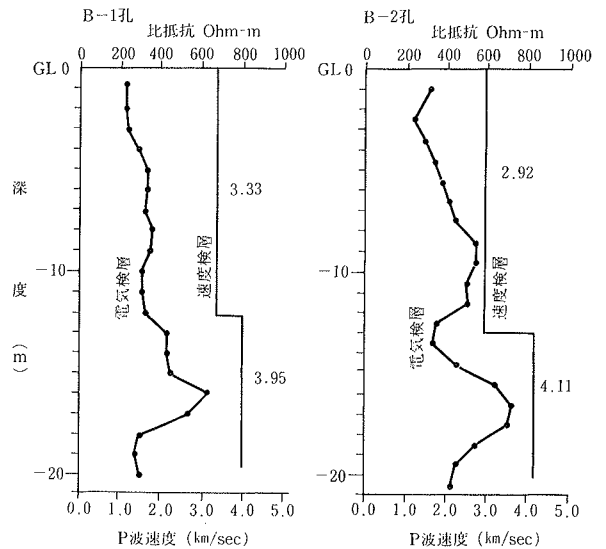


図-6 はんれい岩地山における検層結果

表-3 はんれい岩地山におけるサイスミック・トモグラフィの測定・解析条件

測定条件		解析条件	
孔間距離	15.0m	孔間距離	15.0m
測定深度	-1.5~-20.5m	発振点数	19
発振点数	19	受振点数	19
受振点数	19	セルサイズ	1.0m
測定深度間隔	1.0m	セル数	300
波線数	760	解析手法	SVD法

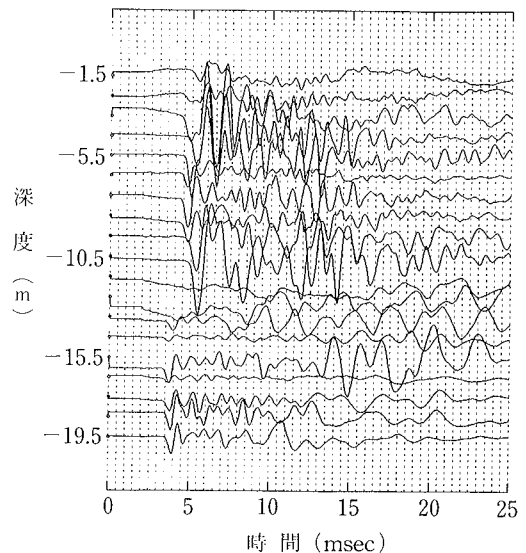


図-7 はんれい岩地山におけるサイスミック・トモグラフィの測定記録例

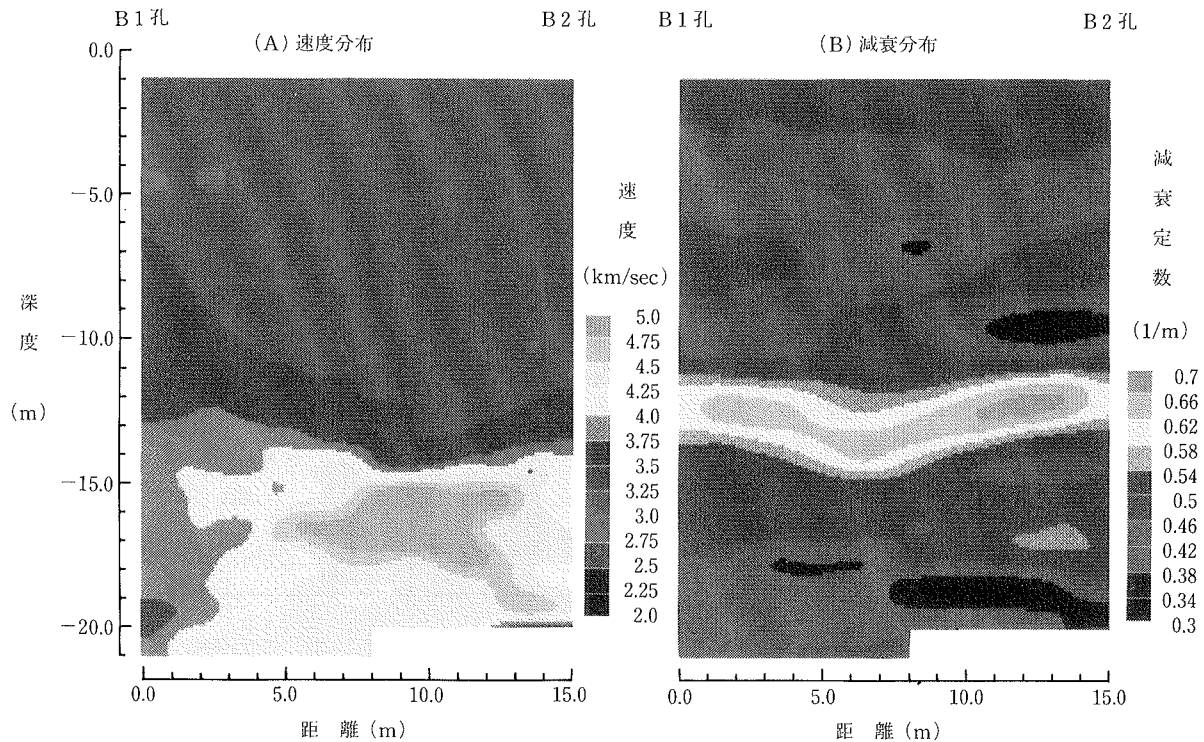


写真-3 はんれい岩地山におけるサイスミック・トモグラフィの解析結果

表層部分に約1mの覆土があるが、深度-13mまではセメント改良地盤、それ以深ははんれい岩地山が分布する2層構造である。また図-5には地盤の主要な物理・力学的特性を示した。図-6は同時に実施した速度検層(P波)と電気検層の結果を示したもので、検層結果は改良地盤とはんれい岩地山との違いを示している。

**3.2.2 サイスミック・トモグラフィ解析結果** 測定に際しては、発振源としてスパーク、受振装置として孔内用のハイドロフォンを用いた。

図-7は測定波形記録の一例であり、深度-1.5mから-19.5mまでの、発振点と受振点が同一深度の配置に対応するものである。初動走時および初動振幅の読み取り方は、層構造模擬地盤の場合と同様である。これから初動ははんれい岩地山のほうが速く、初動振幅は改良地盤で大きく、地山で中、地層境界付近で最小であることが分かる。

写真-3は、SVD法を用い、屈折波線による速度解析と直線波線による減衰解析の結果である。速度解析の結果によると改良地盤と地山の境界は明瞭に識別することができた。改良地盤はほぼ均質な速度分布を示し、2.75~3.75 km/secであった。一方はんれい岩地山は4.0~5.0 km/secの高速帯を示す部分と、3.25~4.25 km/secの中速度帯を示す部分とに分けられた。トモグラフィによる計測孔付近の解析結果は、図-6の検層結果と良い対応を示している。

減衰解析の結果によると、改良地盤と地山のいずれの部分でも、減衰定数の小~中のゾーンが互層状に分布している。しかし全体としては改良地盤と地山でほぼ同様な減衰状態を示していると考えられる。一方改良地盤と

地山の境界部分は著しい減衰帯となっている。

速度分布と減衰定数分布を比較すると、改良地盤では速度分布は中速度帯として一様であるが、減衰定数は深度方向の変化を示す。地山との境界部分では、この境界面で弾性波はかなりの反射・屈折を生じているようで、測定記録である透過波の振幅が、図-7でも見られるようにならかなり減衰している。従って、解析上見られる帯状の減衰部分は、改良地盤と地山の境界すなわち速度境界を表していることになる。またはんれい岩地山では速度の高速帯は概ね減衰の小さい部分に対応している。

以上の点を図-5の試験結果と比較すると、速度分布は一軸圧縮強度と変形係数に対応しており、減衰定数分布は減衰を支配する空隙率・強度・飽和度などが減衰の増減を互いに打ち消し合う形で、結果的にほぼ一様に再現されていると考えられる。

**3.2.3 レーダー・トモグラフィ探査結果** 測定にはRAMACシステムを使用した。測定条件は表-4に示す。測定結果の一例を図-8に示す。この図は送信アンテナ(長さ5.1m)と受信アンテナ(長さ5.4m)の中心深度を等しく設置したときの測定記録を並べたものである。各深度における受信点間の伝播速度および初動振幅は、層構造模擬地盤の場合と同様に読み取った。

走時データを用い、表-4に示す解析条件で、直線波線によるCG法で解析した速度分布を写真-4に示す。

速度解析の結果によると、改良地盤とはんれい岩地山に大きく2分され、はんれい岩地山が相対的に高速帯、すなわち、低含水比であることが分かる。またB2ボーリング孔近傍で約-9mの深度に部分的に高速帯が現れている。この部分は局部的に含水比が低いと解釈できる。

振幅データを用い、表-4 に示す解析条件で、直線波線によるCG法で解析した減衰分布を写真-4 に示す。解析結果は、はんれい岩地山と改良地盤の境界に高減衰帯が存在し、改良地盤の中間 (GL-7.5~-10.5 m) が低減衰帯となることを表している。改良地盤の含水比は、速度分布からみると一部を除いてほぼ一様に近いと考えられる。従って、高減衰性の部分はセメント分が多くなっていると考えられる。このことから、雨水の浸透により改良地盤中のセメント分が溶脱し、下部に徐々に沈積する現象が生じていることが予想される。

3.2.4 考察 はんれい岩地山での解析によると、サイズミック・トモグラフィは速度分布により岩質の違いによる地盤構造を良く再現しているが、減衰特性についてはその支配要因が複雑である。一方、レーダー・トモグラフィは、模擬地盤の場合と同様に、地盤中の金属成分や含水比に支配される諸特性を良く再現していると考えられる。

#### 4. 数値シミュレーション

##### 4.1 サイズミック・トモグラフィのシミュレーション

4.1.1 概要および解析条件 従来サイズミック・トモグラフィの多くは、初動を利用して地下の速度分布を把握することに重点をおいて実施されてきた。しかし、トモグラフィで得られる測定データは伝播してきた波の波形であることから、初動だけでなくその波形の振幅も地下の物性を知る上で、多くの情報を含んでいる。このことから今回以下の手順により、初動から得られる速度解析結果を基に、伝播波形のシミュレーションを行い、観測データの振幅変化とシミュレーションの波形振幅との比較に基づき、サイズミック・トモグラフィの減衰解析とその評価を行った。

- ① 初動による速度構造の解析  
(前出のサイズミック・トモグラフィ解析)

- ② シミュレーションのためのパラメータ設定  
(速度および振幅解析結果の変化から初期モデルの推定)
- ③ 応答解析プログラムを用いたシミュレーション
- ④ シミュレーション結果と観測データとの比較検討
- ⑤ インバージョン結果の解析・評価

表-4 はんれい岩地山におけるレーダー・トモグラフィの測定・解析条件

測定条件		解析条件	
孔間距離	15.0m	孔間距離	15.0m
測定深度	-3.0~-15.0m	送信点数	13
送信点数	13	受信点数	13
受信点数	13	セルサイズ	1.0m
測定深度間隔	1.0m	セル数	169
波線数	169	解析手法	CG法

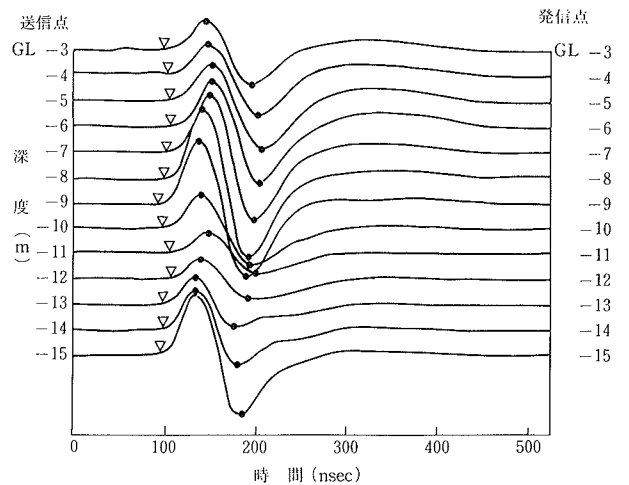


図-8 はんれい岩地山におけるレーダー・トモグラフィの測定記録例

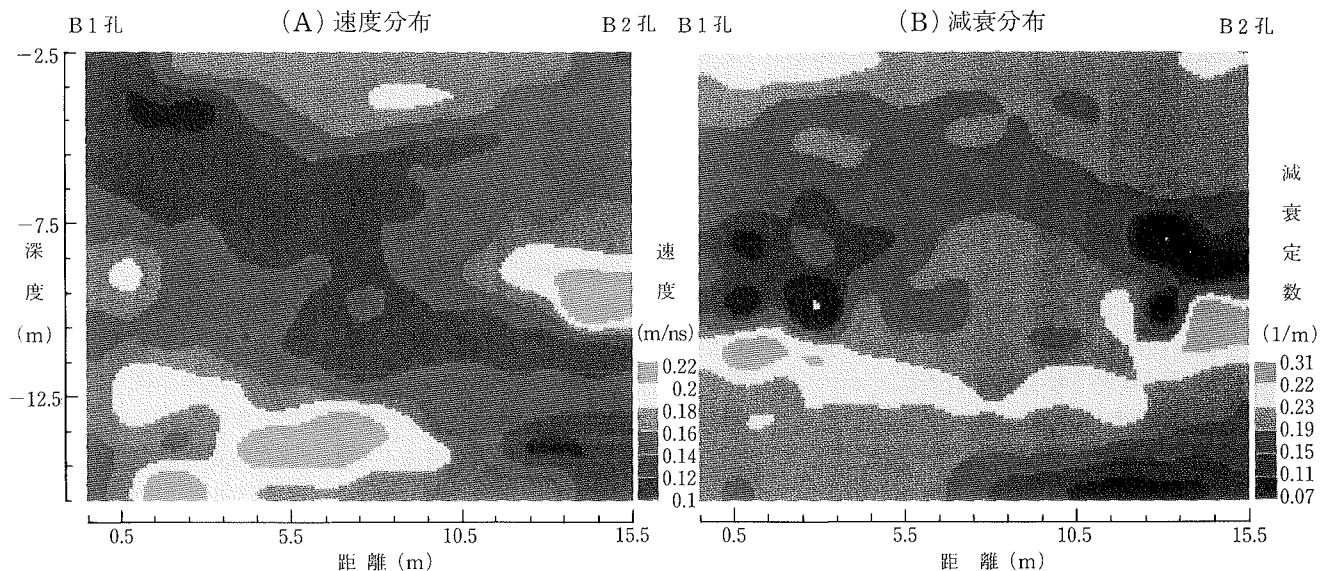


写真-4 はんれい岩地山におけるレーダー・トモグラフィの解析結果

今回トモグラフィのシミュレーションに用いたプログラムは、有限要素法に定式化された運動方程式を用いて、多質点系減衰線形系の振動解析を行うものである。任意節点での加振に対する任意節点での時刻歴応答解析が可能である。この機能を利用してトモグラフィの発振/受振点に対応する節点をそれぞれ加振点/時刻歴応答出力点とした。入力パラメータはボアソン比、密度、せん断弾性係数、およびレーリの減衰定数である。

またシミュレーションによる時刻歴応答は、変位・速度・加速度型での出力が可能であるが、実際のトモグラフィ観測システムでは受振器にハイドロフォン（圧電式素子型）を用いたため、観測波形は加速度型の波形に対応するものとした。

次にトモグラフィで波形の振幅変化による減衰解析を行う場合、震源が孔井内に設置されているため、震源からの波の放射パターン（指向性）の影響を考慮する必要がある。今回のシミュレーションでは、この震源の放射角の違いによる放射パターンの影響を避けるため、発振/受振点の深度が同レベルの場合の時刻歴応答を求め、放射角を同一とした。

また多質点系減衰線形系での減衰マトリックスは、質量マトリックスと剛性マトリックスにそれぞれ係数を乗じた和で表される。トモグラフィの場合では質量マトリックスの項は解析に寄与しないと考えられるので、シミュレーションでは剛性マトリックスの項の係数  $\beta$  を用いて減衰を評価する。

質点系の減衰定数を  $h$  とすると

$$h = \beta \omega_0 / 2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$\omega_0$  は系の固有振動数

次に波の伝播経路上での振幅の減衰を考える。この減衰には、球面発散による幾何学的減衰によるものと、物質が波動エネルギーを吸収し熱エネルギーに変換されるいわゆる内部摩擦等によるものがある。この内部摩擦による減衰を表すパラメータとして  $Q$  値 (quality factor) を用いる。この  $Q$  値は、1 周期あたり振動エネルギーが失われる割合を表しており、(2)式を書き直して(6)式のように表される。

$$Q = f\pi / V\alpha = 1/2h \quad \dots\dots\dots(6)$$

$f$  : 入力波の周波数

(5),(6),(1)式より  $h$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  の関係が求まる。

従って、観測データの振幅変化並びにインバージョンにより  $\alpha$  が推定されれば、波形シミュレーションのためのパラメータ  $\beta$  が設定できる。

実際のトモグラフィ探査では、発振波形の振幅値は未知である。インバージョンにより求められる距離減衰の定数  $\alpha$  は相対的なものである。ただし(1)式より、波の伝播経路/減衰定数  $\alpha$  は異なるが、伝播距離が等しい場合を想定し、それぞれ観測された波形の振幅を  $A_1, A_2$  とすると、

$$A_1 = A_0 \cdot \exp(-\alpha_1 r) / r \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$A_2 = A_0 \cdot \exp(-\alpha_2 r) / r \quad \dots\dots\dots(8)$$

表一5 シミュレーションにおける振幅の補正項

$\beta_2 : (10^{-5})$	36	72	90	100	108
C値	2.93	1.70	1.37	1.27	1.19

が成り立つ。ここで上式で(7)÷(8)から両辺の対数をとると、

$$\ln(A_1/A_2) = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot r \quad \dots\dots\dots(9)$$

よって(9)式は、観測された波形振幅より相対的な減衰定数  $\alpha$  の差 ( $\alpha_2 - \alpha_1$ ) が求まることを示している。しかし実際に(9)式を用いて減衰定数  $\alpha_1, \alpha_2$  を与えて、シミュレートした波形振幅比と ( $\alpha_2 - \alpha_1$ ) との比較を行うと(9)式ではなく、以下の(10)式で表される。

$$\ln(A_1/A_2) = C \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot r \quad \dots\dots\dots(10)$$

ただし、 $C$  はレーリの減衰定数  $\beta$  と入力波の周波数  $f$  に依存した係数となることが明らかになった。表一5 に  $f=500 \text{ Hz}$ ,  $\beta_1=2.5 \times 10^{-5}$  とした時の  $\beta_2$ ,  $C$  の値を示す。 $C$  値は表一5のように変化する。これは地表で発振した場合に、表層条件によりエネルギーの伝播効率が大きく影響される場合と同様である。シミュレーションでも各加振点で同等の入力を行っても、与えた物性の違いに依存して入力時のエネルギーの伝播効率が変化して(7), (8)式での  $A_0$  が異なってくるのが、 $C$  値変化の要因と考えられる。従って、シミュレーションでは  $C$  値の補正を考慮してケーススタディに適用しなければならない。

**4.1.2 シミュレーション結果** 前出のサイズミック・トモグラフィ解析に合わせて、以下の2ケースのシミュレーション結果を示す。

(1) 層構造模擬地盤 このケースでは模擬地盤におけるトモグラフィ実験により、あらかじめ2層構造であることは既知である。速度解析の結果から、第1層および第2層のP波速度は、それぞれ約1,500, 400 m/secである。速度情報ならびに振幅比の解析より、シミュレーションに用いるレーリの減衰定数  $\beta$  を設定する。シミュレーションでは、 $\beta$  を変化させて得られる第1層と第2層を伝播する地震波形の振幅比と、 $\beta$  から(5),(6)式によって求められる減衰定数  $\alpha$  との差の比較によって、最適な  $\alpha, \beta$  を決定した。

シミュレーション波形を図一9 (A) に示す。また表一6 (A) に、観測データから得られる初動振幅比とシミュレーションの振幅比との比較、ならびに求められた減衰定数  $\alpha, h$  を示す。得られた  $h$  はセメント混合土で0.04, 真砂土で0.11である。これらの値はセメント混合土を用いた物性試験結果の  $h=0.02 \sim 0.05$  や砂の  $h=0.05 \sim 0.3$  と比較しても妥当なものと考えられる。

図一10 (A) の振幅比についてはシミュレーションで振幅変化の傾向を捉えているが、地表および孔底付近の深度で波形振幅がシミュレーションと観測値で差が大きい。これは観測データでは発振深度が浅い場合には、発振時

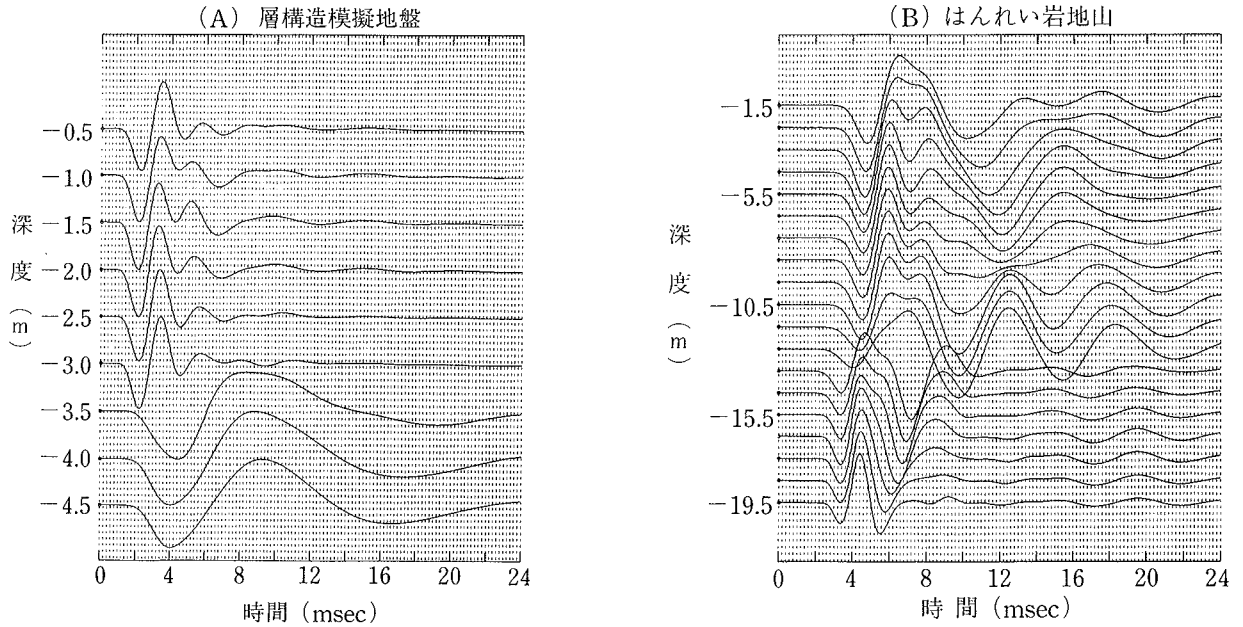


図-9 サイスマック・トモグラフィのシミュレーション結果

表-6 シミュレーションと観測データとの比較検討

(A):層構造模擬地盤

	シミュレーション	データ
減衰定数 $\alpha$	0.80	0.80
第1/2層	0.09/0.89	
減衰定数h	0.04/0.11	
第1/2層		

(B):はんれい岩地山

	シミュレーション	データ
減衰定数 $\alpha$	0.013	0.01
第1/2層	0.021/0.008	
減衰定数h	0.02/0.01	
第1/2層		

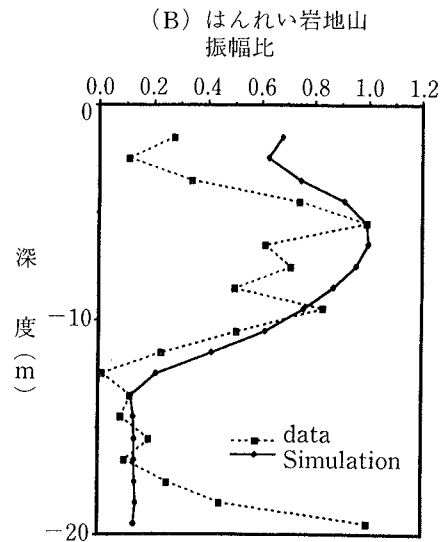
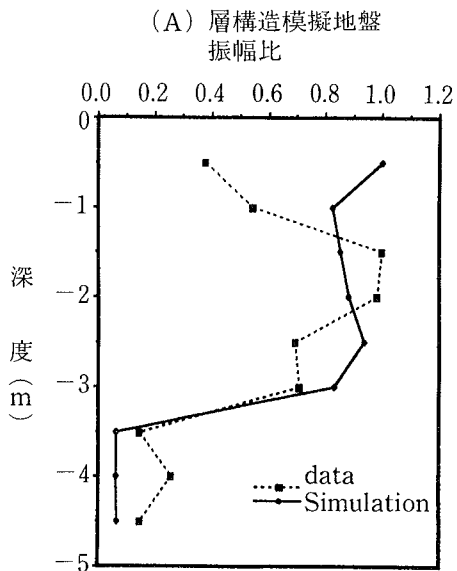


図-10 サイスマック・トモグラフィにおける測定結果とシミュレーション結果との相関性

に震源エネルギーが地表に抜け透過効率が低下した結果、理論振幅より観測値の振幅が小さくなったと考えられる。また孔底付近では反対に発振時に下方への震源エネルギーの損失がないため大きな振幅を持つと考えられる。

(2) はんれい岩地山 これは地山が同様な速度を示していても減衰定数が異なる場合である。第1層および

第2層のP波速度を、それぞれ約3,200, 4,500 m/secとした。

シミュレーションの波形を図-9 (B)に示す。また層構造模擬地盤と同様な解析を行い、減衰定数の解析結果を図-10 (B)、表-6 (B)に示す。図-10 (B)と表-6 (B)から、シミュレーションと観測データとの振幅/



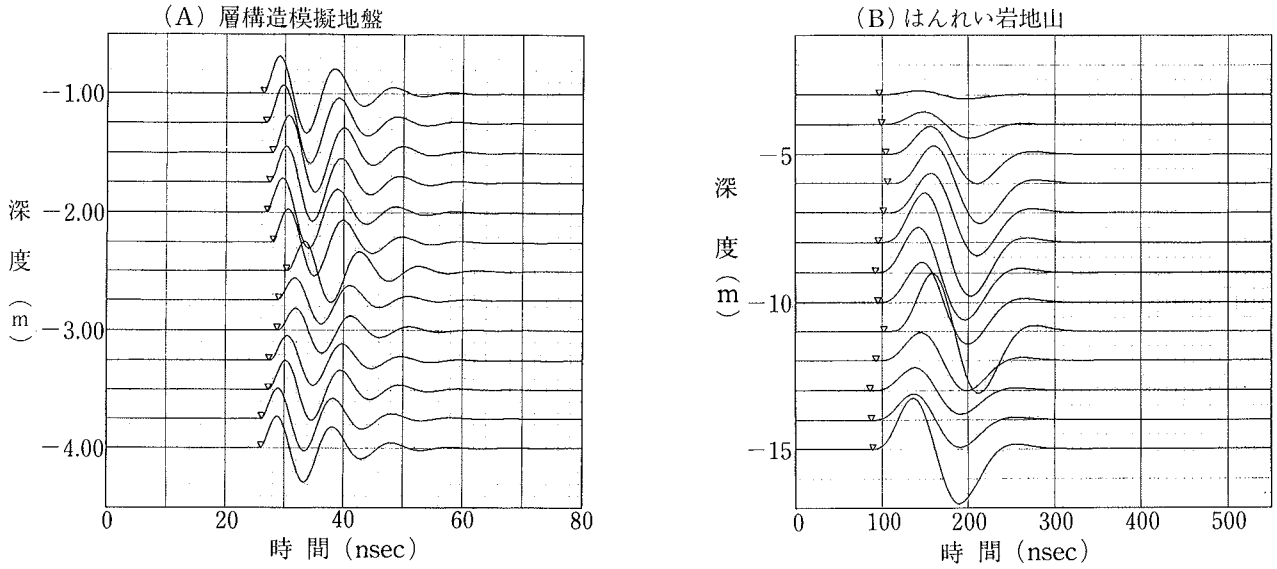


図-11 レーダー・トモグラフィのシミュレーション結果

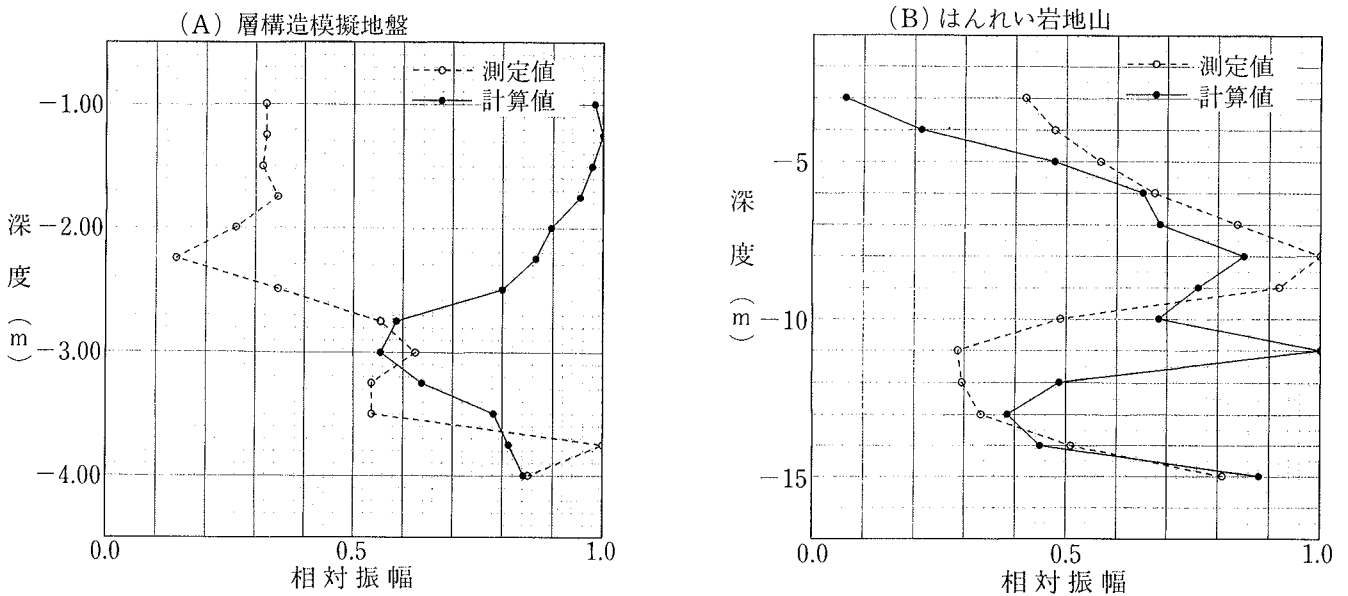


図-12 レーダー・トモグラフィにおける測定結果とシミュレーション結果との相関性

振幅比の比較では良い対応が見られる。

またシミュレーションで得られた減衰定数  $h$  は、改良地盤で0.02、はんれい岩地山で0.01である。これらの  $h$  は、前出の物性試験結果や岩盤での一般的な値  $h=0.005\sim 0.02$  と良く調和している。振幅比も良い対応がみられるが、地表付近や孔底付近の観測データの振幅とシミュレーションとの違いの原因は、模擬地盤と同じである。このことを考慮すれば、振幅変化についてシミュレーションと観測データとで良い対応が得られた。

(3) 考察 以上の2ケースとも放射パターンの影響を避けるために、同深度レベルでの観測データとシミュレーションとの比較を行ったが、同じ放射角の観測データを用いた解析も探査結果をより高精度に評価するために必要となる。波の減衰解析もシミュレーションでの検証により、その解析の高精度化が計れる。シミュレーション

によって得られた減衰定数も物性試験の結果と整合しており、物性値の評価もこれまでの相対的な評価からより絶対的な評価が可能となった。

#### 4.2 レーダー・トモグラフィのシミュレーション

4.2.1 概要および解析条件 レーダー・トモグラフィにおける電磁波の減衰特性は、地下の比抵抗分布に大きく影響されていると考えられる。そこで検証のため、比抵抗分布を使って電磁波の初動振幅をシミュレーションした。

解析は、まず先に得られた速度構造の下で、ウェーブフロント・トレーサー法により初動走時と伝播経路を推定した。次に、測定孔における電気検層で得られた比抵抗分布(図-2および図-8)を用いて減衰構造を適宜仮定し、伝播経路上の減衰効果を計算した。これにより初動付近の相対振幅を再現し、測定値と比較した。

伝播経路の推定に用いたウェーブ・フロント・トレーサー法は、ホイヘンスの原理に基づき、送信点から広がる時々刻々の波面を追跡する方法である。送信点から受信点までを波線で結ぶレイ・トレーシング法に比べると、構造の複雑さに関わらず受信点の設定が任意で、直達・反射・屈折のほかに回折で伝わる特定の位相の走時と伝播経路を安定的に求められる特徴がある。

また、減衰定数  $\alpha$  と比抵抗  $\rho$  の間には、電磁波速度を  $V$ 、比誘電率を  $\epsilon$  とすると、一般に

$$\alpha = 200\pi V / \rho = 60\pi / \rho \sqrt{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(11)$$

の関係が成り立つ。従って、 $V$  と  $\rho$  の分布、または  $\epsilon$  と  $\rho$  の分布から、 $\alpha$  の分布が推定できる。

**4.2.2 シミュレーション結果** 比抵抗分布と速度構造から、探査電磁波の初動振幅をシミュレーションした。ここで推定した減衰特性は、速度構造を介して、含水比に関する情報を含む。セメントの含有量は比誘電率に対して影響しないことから、シミュレーションにおいては考慮していない。

図-11に初動走時、図-12に相対振幅の比較を示す。図-11の図中の逆三角は測定における初動の読み取り時刻を表し、図-12における白丸は測定値、黒丸は計算値を表す。送信器と受信器は同一深度とした。

以下に、結果と考察を述べる。

① 層構造模擬地盤は、セメント混合土(-3m以浅)と真砂土部分(-3m以深)で構成される。セメント混合土に対して真砂土部分の約3倍の減衰を仮定すると、相対振幅のシミュレーションは、測定値にほぼ一致する。この誤差はセメント含有量の影響や孔口からの放射エネルギーの損失などが考えられる。

② 改良地盤における相対振幅のシミュレーションは、改良地盤とはんれい岩地山の境界付近を除けば、測定値に対して良い一致を示した。

③ トモグラフィ解析による減衰定数  $\alpha$  の相対的な差と比抵抗に基づくシミュレーションにおける  $\alpha$  は、おおむね調和し解析結果の妥当性を示している。

④ 電磁波の減衰定数の再構成には、比抵抗分布以外の要因も影響している。それには金属やセメントの含有が挙げられるが、ここで得られた結果はおおむね減衰特性の傾向を捉えている。このことから、物性の違いを取り除いた時のレーダー・トモグラフィの減衰構造は、主たる情報として地盤・岩盤の比抵抗分布を表していると解釈される。

## 5. まとめ

① 今回2箇所の層構造地盤において、サイズミック・トモグラフィとレーダー・トモグラフィ探査を行い、速度解析に加えて減衰解析も実施することが可能となっ

た。

② サイズミック・トモグラフィは、速度解析と減衰解析により岩質の違いによる地盤構造を良く表現することが明らかになった。

③ レーダー・トモグラフィは、速度分布や減衰定数分布により、金属成分や含水量に支配される地盤物性を良く表現している。

④ 以上のようにサイズミック・トモグラフィとレーダー・トモグラフィではその支配要因が異なるので、二つの探査手法を組合わせて、多様な地盤・岩盤の情報を得ることができる。

⑤ 有限要素法による動的応答解析でサイズミック・トモグラフィの解析結果をシミュレーションした。その結果、振幅比、減衰定数  $\alpha$ 、 $h$  の比較検討から、これらの妥当性が明らかになり、定量的な物性評価も可能になった。

⑥ ホイヘンスの原理に基づくウェーブ・フロント・トレーサー法によりレーダー・トモグラフィの解析結果をシミュレーションした。その結果、減衰構造は地盤の比抵抗分布により評価できることが明らかになった。

⑦ 以上により、ジオトモグラフィ探査技術の総合的解析システムを構築する見通しが得られた。

## 参考文献

- 1) 桑原, 上野, 仮谷, 平間, 西林: トモグラフィ技術による地盤・岩盤探査の研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 44, p. 61~70, (1992)
- 2) 石井, 六川, 加藤, 佐藤: ジオトモグラフィにおける初動振幅の利用, 物理探査学会第82回学術講演会論文集, p. 173~177, (1990)
- 3) 渡辺, 佐々: 振幅を用いたトモグラフィによる岩盤データの解析, 物理探査学会第82回学術講演会論文集, p. 178~180, (1990)
- 4) The Society of Exploration Geophysicists of Japan (ed): Geotomography Vol. 1, The first SEGJ International Symposium on Geotomography. 1990, (1991)
- 5) 仮谷, 上野, 西林: レーダー・トモグラフィによる岩盤実験, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第3部, p. 810~811, (1992)
- 6) Olsson, O., et al.: Borehole radar applied to the characterization of hydraulically conductive fracture zones in crystalline rock, Geophysical Prospecting, Vol. 40, p. 109~142, (1992)
- 7) 高橋, 久保田, 永井, 長尾: 電極法による含水率の測定に関する検討結果, 大林組技術研究所報, No. 26, p. 71~75, (1983)
- 8) 酒井, 吉井: 波面を使った走時解析, 地震学会講演予稿集, 1989年度秋季大会, p. 293, (1989)