

(29) モルタルブロックを用いたジオトモグラフィーの基礎実験

大成建設㈱ 正会員 ○服部 弘通・川上 純  
正会員 下茂 道人・青木 智幸  
正会員 田中 重明・亀村 勝美

Laboratory Experiment on Geotomography using Cement Mortar Block

Hiromichi Hattori, Jun Kawakami, Michito Shimo  
Tomoyuki Aoki, Shigeaki Tanaka and Katsumi Kamemura  
Taisei Corporation

Abstract

A series of laboratory measurements had been conducted to investigate the feasibility of the seismic tomography technique. The main purpose of this experiment is to investigate how the accuracy of the reconstructed velocity profile depends on the degree of velocity contrast in the field. The initial arrival time of the seismic wave was measured along the 324 scan lines on the cement mortar block of 50×50×3cm in which simulated low velocity zone was casted. The velocity ratio between these two zones were  $V_2/V_1=0.89, 0.78$  and  $0.53$ , respectively.

The results show that when the velocity contrast is large ( $V_2/V_1=0.53$ ), the calculated velocity profile by inversion is heavily distorted from the original profile. This is thought to be due to mainly two reasons. One is the measurement error which is caused by the fact that the first arrival waves passing near the low velocity zone are mainly diffraction waves showing very low signals on the measured data. The other reason is the fact that the only few wave can transmit through the low velocity zone so that relatively small information on this zone is available. It is recommended to take these problems into consideration when one would conduct field geotomography survey.

1. はじめに

ジオトモグラフィー技術は、従来の弾性波探査に比べ、地下の地質構造や物性の分布をより詳細に調査できるため、地下構造物の建設に当たっての事前調査や施工時の岩盤状態の監視等に威力を発揮するものと期待され、各方面で研究が行われている。最近では、ISRMの指針<sup>1)</sup>ができるまでとなっており、ほぼ実用段階に到っていると考えられる。

しかし、実際のフィールドに適用し、さらに結果の信頼性を向上させるには、まだいくつかの問題点が残されている。<sup>2)</sup> 特に、現在良く行われている初動走時を用いる方法では、

- (1) 計測点の幾何学的配置が解析結果に与える影響
- (2) 断面内のセルの分割法
- (3) 初動の読み取り精度の影響
- (4) 速度コントラストが大きい場合の解析精度
- (5) 速度分布の修正方法

等の検討が必要と考えられる。

そこで、筆者等は上記の問題点のうち、特に速度コントラストに注目し、モルタルを用いた室内実験で、実際の波動の伝播現象を把握しながら、それに付随する上記の(3)、(5)の点について検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2. 1 実験モデル

実験に用いたモデルは、モルタルで作成した。その形状は図-1に示すように、50cm×50cmの大きさで内部に10cm×30cmの低速度帯を含む、厚さ3cmの板状のものである。低速度帯は貧配合のモルタルで作成した。

モデルは、低速度帯の形状及び配置は同じで、その速度を表-1のように3種類変化させたものと、初動走時の読み取り精度を検計するために、低速度帯のない均質モデルの合計4種類について実験を行った。

### 2. 2 計測方法

発振点は1辺当たり3点設け、計12点である。受振点は5cm 間隔に設け、計36点である。したがって、波線数は全部で324本となる。震源には、固有振動数140kHzの圧電素子を用い、受振センサーには、100kHz～1.5MHzの間で平坦な特性を持つ圧電素子を用いた。受振センサーからの波形は、ウェーブメモリで0.2  $\mu\text{sec}$  毎にサンプリングし、記録紙上で初動走時を読み取った。

なお、このモデルは、現場実験において50m の領域を1kHz前後の振動数を用いて調査する場合の1/100 程度の縮尺を想定している。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 初動走時の計測誤差

図-2はモデル1, 3, 4における、計測走時と理論走時との差の分布を示したものである。モデル1, 3では、標準偏差で約1  $\mu\text{sec}$  (約1%)、最大2  $\mu\text{sec}$  以内におさまっておりかなり良い精度で読み取りが行われていることが分かる。

一方モデル4では、上記の誤差の他に、最大14  $\mu\text{sec}$  とかなり大きな誤差が含まれている。この誤差のほとんどは、低速度帯を通過または回折した波線データに含まれている。

図-3はモデル4における、発振点23の理論波線を示したもので、その場合に計測された実際の波形を図-4に示した。低速度帯の後ろの測点1～7では、回折波及び透過波が初動走時となるが、両者ともそのエネルギーが小さいため、初動走時の読み取りに誤差が生じている。

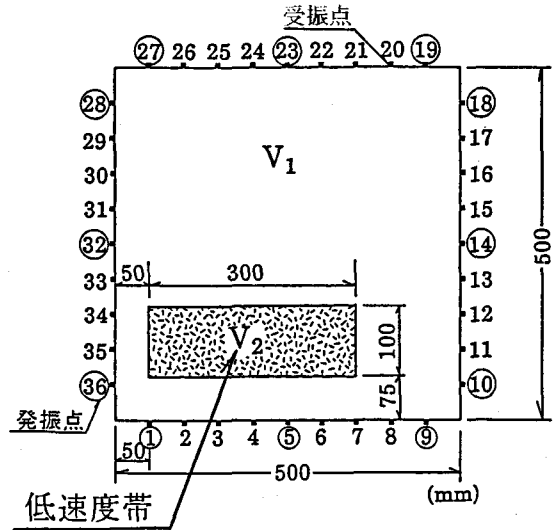


図-1 室内実験用モデル

表-1 室内実験用モデルの弾性波速度

|                      | モデル1 | モデル2 | モデル3 | モデル4 |
|----------------------|------|------|------|------|
| $V_1(\text{km/sec})$ | 4.15 | 4.29 | 4.26 | 4.25 |
| $V_2(\text{km/sec})$ | —    | 3.82 | 3.32 | 2.27 |
| $V_2/V_1$            | 1.00 | 0.89 | 0.78 | 0.53 |

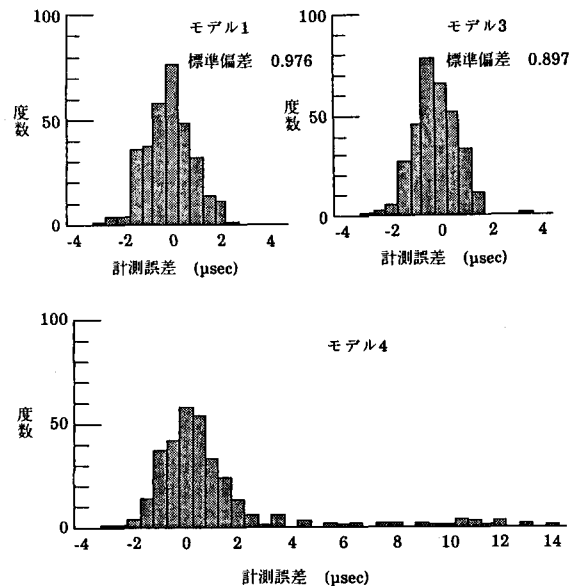


図-2 初動走時の計測誤差

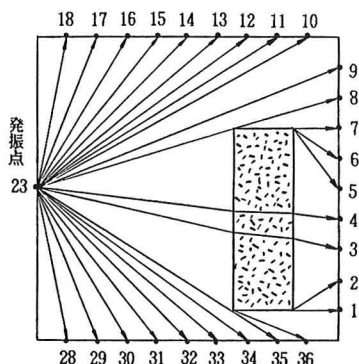


図-3 発振点23の理論波線 (モデル4)

以上のように、速度コントラストが大きくなると、初動走時の計測データ自体にかなりの誤差が含まれてくる可能性があることが分かる。

### 3. 2 解析結果

解析は、筆者等が開発したプログラム<sup>3)</sup>を用いて行った。このプログラムは、解析領域内のスローネス分布を、複数のスプライン関数を重ね合わせた連続関数でモデル化し、波動の屈折を考慮できるものである。

#### (1) 速度コントラストが小さい場合

図-5、図-6は、それぞれモデル2 ( $V_2/V_1=0.89$ ) とモデル3 ( $V_2/V_1=0.78$ ) の速度再構成結果である。低速度帯の周囲にゴーストが現れているが、ほぼ実際の速度分布を再現できている。

また、図-7はモデル3について、データに誤差のない理論走時データを用いて再構成を行った結果である。

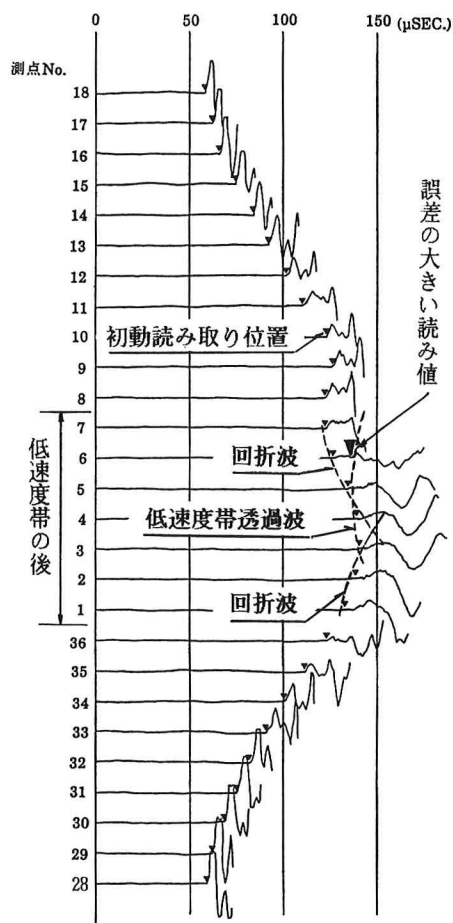


図-4 発振点23の計測波形 (モデル4)

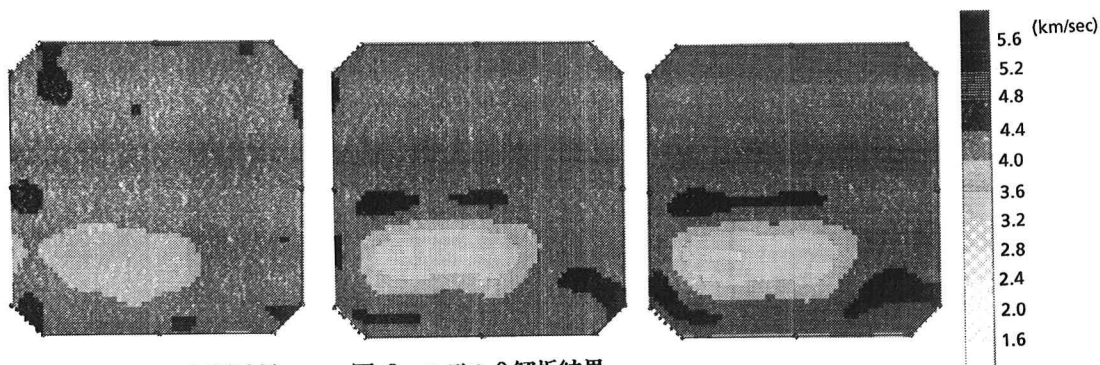


図-5 モデル2解析結果

〔実測データ使用〕  
 $V_2/V_1=0.89$

図-6 モデル3解析結果

〔実測データ使用〕  
 $V_2/V_1=0.78$

図-7 モデル3解析結果

〔理論走時使用〕  
 $V_2/V_1=0.78$

この結果は、実際の計測データを用いた結果（図-6）とはほぼ一致しており、今回の実測データに含まれている1%程度の誤差は、ほとんど再構成結果に影響していないことが分かる。

再構成図を見ると、全体的に低速度帯の角が丸みを帯びた形になっているが、この理由は、以下のように考えられる。すなわち、実際の波線の経路を考えてみると、低速度帯の角に入射した波動は、入射角が小さいと再び低速度帯から高速度帯に出る時に、臨界角以上となり全反射してしまい、角から出なくなってしまう。すなわち、低速度帯の角から入射し、角へ抜ける波線経路はほとんどない。したがって、低速度帯では波線密度は相対的に小さいが、特に角の部分は波線密度が非常に小さくなり、再構成結果に誤差を生じるものと理解される。

## (2) 速度コントラストが大きい場合

図-8は速度コントラストが大きい場合のモデル4 ( $V2/V1=0.53$ ) について、全計測データを用いて解析した結果である。モデルに対してかなり像がひずんでおり、解析精度が悪くなっている。

これは、速度コントラストが大きいいため、波線の回折が激しく、低速度帯を通過する波線の数が極端に少なくなっているのが原因と考えられるが、その他に既に記したようにモデル4の実測データには、かなり大きな誤差が含まれていることも、原因の一つであると考えられる。

そこで、このようにデータに大きな誤差を含んでいる場合の解析方法として、解析に用いるデータを吟味しながら収束計算を行う方法を試みた。すなわち、収束計算の途中で、再構成した速度分布を用いて計算した走時と実データとを比較し、その差が大きいものは除外して解析を進める方法である。そして、徐々に誤差の大きなデータを取り込みながら使用するデータを増やし、収束計算を進めて行く。

この方法で解析した再構成結果とその時の波線図を図-9に示す。この場合は、324本のデータの内、その91%に当たる294本のデータを使用している。

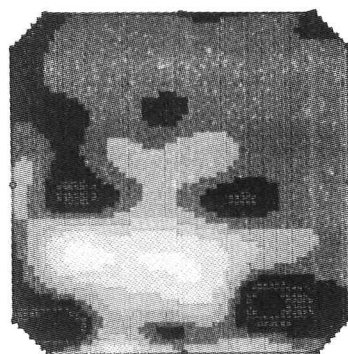


図-8 モデル4の解析結果

〔実測データ使用〕  
 $V2/V1=0.53$

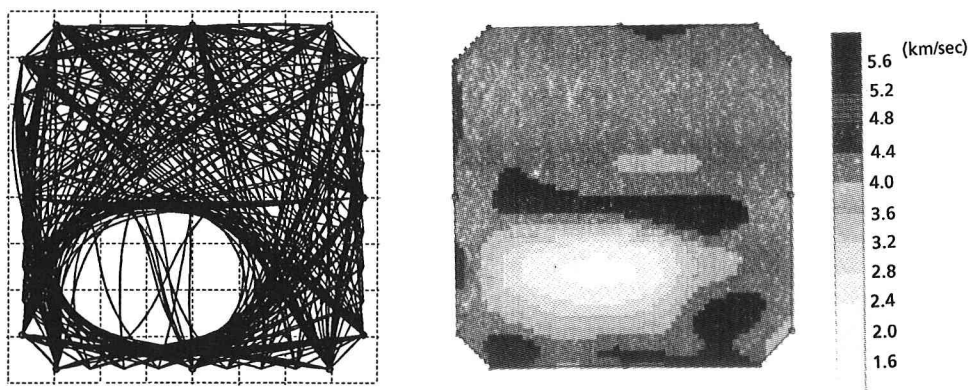


図-9 モデル4の波線図と解析結果

(実測データ使用、波線数制限、 $V2/V1=0.53$ )

図-8の全データを使用した場合に比べ、かなり改善されているのが分かる。

また図-10 はモデル4について、理論走時を使用して解析した結果である。この図と比較して、図-9の解析結果は、ほぼ同程度の結果を与えており、使用する波線数を制限しながら解析を進めて行く方法が有効であることが分かる。

モデル4 の実際の波線を計算してみると、低速度帯を通過して初動走時を与える波線は6本である。図-10 の波線図では5本となっており、ほぼ妥当な解析を行っていると言える。

なお、理論走時を用いた解析結果でも低速度帯の部分で精度が悪くなっているが、これは既に記したように、速度コントラストが大きくなるに従い、波線密度の分布が不均一となり、特に低速度帯の周辺で精度が悪くなったためと考えられる。

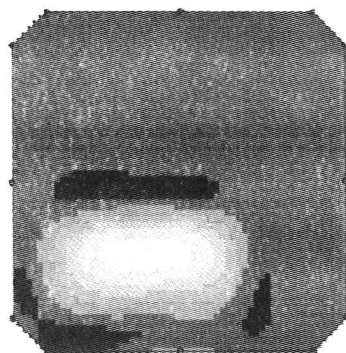
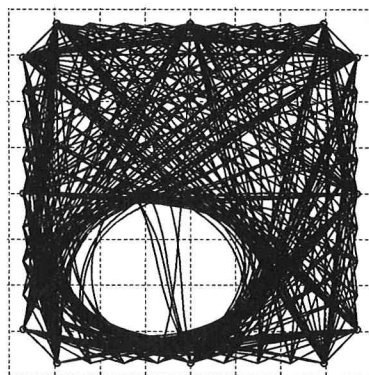


図-10 モデル4の解析結果

〔理論走時使用〕  
 $V2/V1=0.53$ 〕

#### 4. まとめ

モルタルで作成したモデルを用いて室内実験を行い、特に計測データの精度及び速度コントラストの影響について検討を行った。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 速度コントラストが0.8 程度までなら、ほぼ良い再構成像が得られるが、0.5 となると再構成像はかなり精度が悪くなり、解析結果の解釈に注意が必要である。

これは、低速度帯の後ろでは、初動走時は主に回折波となり、この場合は振幅が小さくなり、読み取り精度が悪くなることと、実際に低速度帯では、波線密度が少なくなることの2つの理由による。

- (2) 計測データに大きな誤差を含んでいる場合は、全データを用いて解析を行うと、再構成図はかなり精度が悪くなる。この様な場合の解析方法として、収束計算の途中でデータを吟味しながら、使用するデータ数を制限して、計算を進めていく方法は有力である。

なお、今回用いたモデルは、解析にとってかなり不利な条件であり、実際の地下構造の場合は、より解析し易いものであると考えられるが、フィールドへの適用に当たっては、上記の現象に充分注意してデータの吟味及び結果の解釈を行うことが必要と考える。

#### 参考文献

- 1) International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.6, 1988
- 2) 大友秀夫：ジオトモグラフィ技術の現状，物理探査，Vol.29, No.6, 1986
- 3) 岩野政浩他：原位置弾性波探査による岩盤ピラー内の速度構造調査，第20回岩盤力学シンポジウム 1988