

(89) 地質断面法—岩盤内弾性波速度の面的評価法—

建設省土木研究所
日本物理探鉱(株)

○稲崎富士
高橋幸夫

1. はじめに

岩盤内部の地質構造、特に断層破砕帯や強風化部、変質部などのいわゆる“弱層”の空間的分布を把握することは岩盤の工学的評価をより正確にする上で重要である。この把握には、従来、調査坑やボーリング掘削による直接的確認、地質学的方法による間接的な推定などが適用されてきた。これらの方法は、しかし、不規則に分布する“弱層”の確認には有効ではない。たとえば、火山岩地域における変質帯の分布を地質学的手法あるいはボーリングによって把握することは困難である。

上記のような“弱層”は通常、低速度層として特徴づけられる。したがって、岩盤内の弾性波速度構造を調べることによって、“弱層”の空間的分布を客観的に評価しうる。また弾性波速度値は、トンネル地山、ダム基礎岩盤の良好度の定量的判定示標として一般に利用されているので、その構造の把握は空間的な岩盤の工学的評価を可能にする。

弾性波速度構造の探査・解析手法として最も良く使われている方法は屈折法探査である。しかし、この方法では、岩盤内奥部の探査には限界がある。また、扇射法探査と称される方法が用いられることがある。同法は、調査区間をはさんで設置された振源—受振点群間の透過波より速度構造を求めるものであるが、解析方法の未成熟から空間的な速度構造を評価しうるには至っていなかった。それに対し筆者等は、扇射法探査を高密度で実施し、観測データをいわゆる逆問題として解き、空間的な弾性波速度分布を再生する手法を独自に開発し、これを地質断面法と称した¹。以下に、その概要と岩盤調査への適用例について報告する。

2. 地質断面法

地質断面法は、医療分野で利用されているCTスキャナの手法を応用したものである。しかし、その直接的な応用はできない。なぜならば、CTではX線を利用し、その吸収量の人体組織による違いに基づいて断面像を再生するのに対し、本法では弾性波あるいは電磁波を利用し岩盤内の速度分布による走時の変化に基づいて構造を再生するからである。しかし両法とも、観測値は波線に沿っての物性値の線積分で表されることは同一である。したがって、限られた方位からの観測値によらざるをえないという点、および岩盤内で波線が屈折することについて配慮すれば、同様の手順での解析が可能となる。

弾性波を利用する場合は、一般に弾性波トモグラフィと称されている。しかし、基本的には超音波・電磁波も利用することができる。また解析結果は岩盤の断面像を与えるので、筆者等はこれをGeotomography²に対応させて地質断面法と総称している。

3. 解析法の概要

地質断面法は、速度分布と観測値である走時との相互変換をおこなう解析システムである。

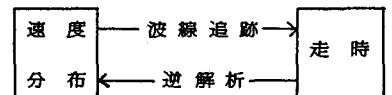
観測値である走時 t は、媒質のスローネス(速度の逆数) n の波線 地質断面法の構成
に沿っての線積分として表わされる。

$$t = \int n \, ds \quad \dots (1)$$

積分の経路すなわち波線が既知であるならば、(1)式は線形変換式

$$t = R n \quad \dots (2)$$

と表わすことができる。Rは波線の経路に関する演算子で、通常、ラドン変換と称されるものである。波線追跡とはこのラドン変換Rを求めることであり、逆解析は逆変換 R^{-1} を求めること、すなわち n を求める



ことである。だが、弾性波や電磁波の場合、波線の屈折のため上記の線形性が成り立たない。しかしながら、(2)式を離散的な関係式に置き換えて、反復的方法を用いて n を逐次近似的に求めていけば、近似の各段階では線形性が成立していると仮定することができる。すなわち、この処理過程は以下のように表される。

- 1) 直線波線の R を用いて (2)式を解き初期速度分布を求める。
- 2) その速度分布 (n) に対応する波線経路分布 R を求める。
- 3) (2)式で t を求め、観測値との誤差が一定値以下なら終了する。
- 4) 新たに R を求めなおし (2)式を解き速度分布を求める。
- 5) 2) に戻る。

1) の過程では直線波線を想定しているので、CTで開発された手法を用いることができる。筆者等は、モデル解析によって速度コントラストの大きい場合にはBPT (逆投影法) が効果的であるという結論を得た。BPTは、多数の投影データから空間的分布を再生する最も簡単な方法である。

あるセル i のスローネス n_i は、波線 j がセルを切る長さを δ_{ji} とすると、波線 j の平均スローネスを δ_{ji} で重みづけて平均をとることによって求められる。

$$n_i = 1 / \{ 1 / \sum_j \delta_{ji} \cdot \sum_j (\delta_{ji} \cdot \sum_j \delta_{ji} / t_j) \} \quad \dots\dots (3)$$

2) はいわゆる Ray Tracing の過程である。この解析には従来、解析的シミュレーションとも言える方法が採用されていた。すなわち、波線の満足すべき微分方程式である波線方程式を初期値問題あるいは境界値問題として解くことにより波線を追跡し、最小時間を与える波線を選び出すという方法である。一方、離散的に分布する点を結ぶあらゆる経路のうち、最短のものを選び出す問題は、「最短路問題」としてネットワーク理論では良く知られている。筆者等は、この方法の拡張とも言える、「爆発法」と称する離散的なシミュレーション法をあらたに考案した。爆発法では、図-1に示されるように領域内に一線に節点を設定し、限られた方向にのみ波線を走査して各セルのスローネスから走時を計算する。各節点において発振・走査・走時計算を繰り返し、最短経路と最小走時を求める。

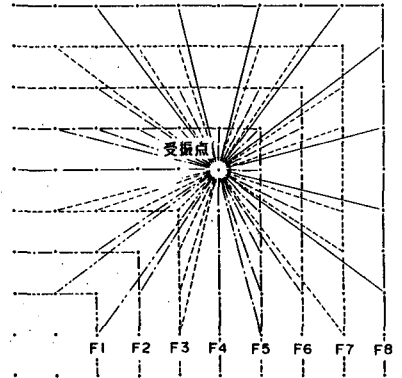


図-1 爆発法における発振・波線追跡

4) は反復的な逆解析の過程である。通常、観測値 t には誤差がつきものである。また、反復的過程においては R も近似的なものであることを考慮すると、(2)式は次のように改められる。

$$t = R n + e \quad \dots\dots (4)$$

ここで e は誤差のベクトルである。(4)式を解くにあたって、解を安定的に求めうる方法としてSCLST (平滑化制限付最小二乗法) を採用した。SCLSTによって、(4)式は以下のように定式化される。

$$(R^T R + \beta C^T C) n = R^T t \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 β はラグランジュの未定係数の逆数で、また C はラプラシアンフィルターを表すものである。

4. モデル解析

一般にCTでは、X線が直進すること、対象とする物体内の任意の点であらゆる方向からの投影データが得られることから一意解を有している。それに対し、地質断面法ではこの条件が充足されず、また誤差を含むことから一意解が保証されない。この

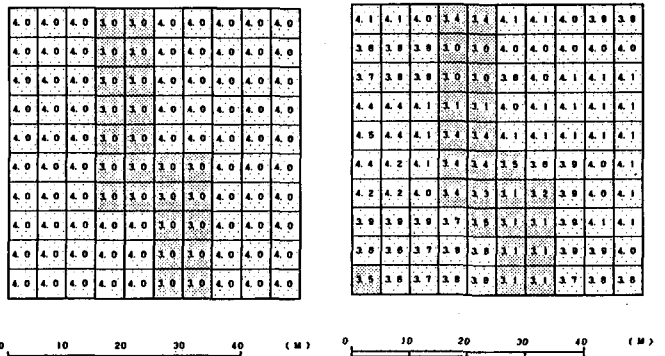


図-2 岩盤モデル 原構造(左)と再生結果(右)

ため、予めいろいろなモデルを想定してその適用性を検討しておく必要がある。そこで低速度層をはさむ岩盤を想定し、いくつかのモデルに対して本法の再現性等の検討を行なった。

図-2、3は、4km/sec層中に3km/secのクランク型の低速度層をはさむモデルの再生結果で、解析領域は50m×50m、上下辺に各々等間隔で12点の受発振点を設定し、144本の波線データにたいして解析を行なった。再生像のセルの大きさは5m×5mとした。図-2は、再生結果において低速度層の輪郭がやや甘くなっているものの、ほぼ原構造が再生されていることを示している。また図-3では、波線経路のパターンが良く一致していることが示されている。図-4は、反復過程における走時残差の収束の様子を示したものである。 β の変更のためにいく分凹凸が見られるものの、9回の反復によって残差は0.08msecにまで改良されている。この値は、理論走時の1%以下に対応するものである。モデル解析の結果から、速度コントラストの大きな場合、再生度はやや低下するものの、地質断面法によって原構造をほぼ再現できることが明らかにされた。また再現性の向上に、受発振点配置の仕方が影響することが認められたので現地調査に当たっては、対象領域を取り囲むような形態を選択することが求められる。

現地での観測データには、様々な要因から誤差が含まれていると予想される。そこで、誤差の再現性に対する影響について検討した。その結果、速度コントラストが大きくない場合、誤差を考慮したSCLSTによっても数%の誤差で再現性が大きく低下することが認められた。このことは、現地観測データに対する補正を入念に行なうべきことを示唆している。

5. 岩盤調査への適用

あるダムサイトの横坑間で実施された扇射法の測定データにたいして地質断面法を適用した。解析に使用したデータは、ほぼ同一の平面内にあるとみなすことのできる測線間の観測値で、解析面一面当りのデータ数は200~300程度である。受発振点の三次元的分布による解析平面からのずれは投影によって補正し、波線はある平面上を伝播すると仮定した。解析領域は40m×80m程度でこれを4m×4mのセルに分割して再生した。

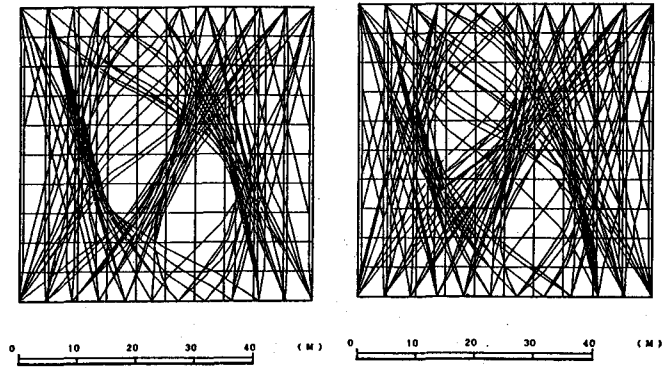


図-3 波線図 理論波線(左)と再生波線(右)

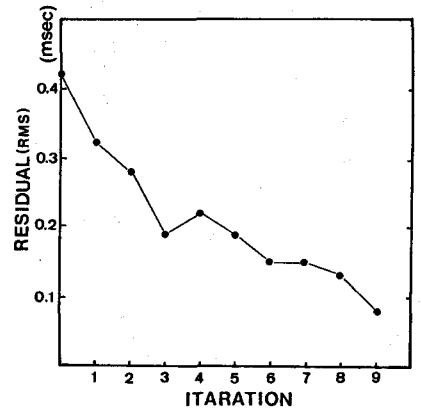


図-4 走時残差の反復による収束

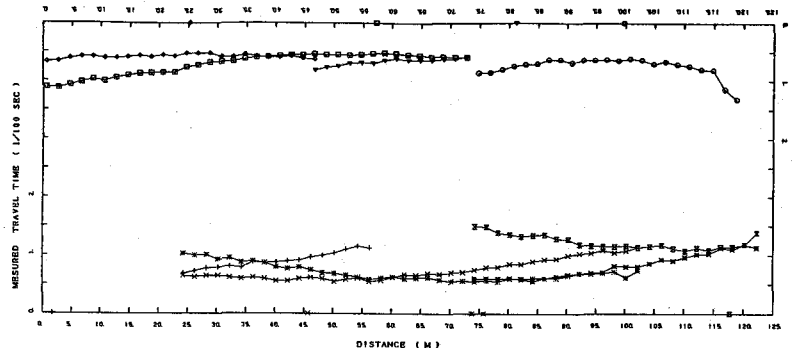


図-5 横坑間観測走時

図-5は、左岸側河床部のAL 2-1坑間の補正後の観測走時を示したものである。補正は、受発振点近傍のゆるみと全体的な走時シフトによる遅れにたいして行なった。

補正済み走時にたいして地質断面法解析を実施した結果を図-6、7に示す。走時残差は一部で2msecを超えているものの、全体では0.05msec (rms)と観測走時と計算走時はかなりよく一致している。

図-7の速度分布は、地山内部で $V_p = 5.5 \text{ km/sec}$ 程度と良好な値を示し、地表部(右側)では 2.5 km/sec 以下と低い値を示している。ダムサイトの地質は、白亜紀のカコウ岩類からなり、NE系およびNW系のほぼ鉛直に近い割れ目系が発達している。図-7の領域

においては、分解能と解析精度の問題から、これらの割れ目系は直接には再生されていない。そこで、再生速度構造に対して2次微分をかけて急変部の抽出を試みた。それによると、一部に再生時の歪みによると考えられるものがあるものの、速度急変部は、割れ目集中部・断層の出現位置とそのトレンドに整合的である。また再生された速度構造は、構内観察等によって推定された岩盤区分図と概ね対応している。

6. まとめ

岩盤を想定したモデル解析の結果は、地質断面法が原速度構造をほぼ忠実に再生できることを示している。構造分解能は、観測精度・解析精度と対象領域との関係から、弾性波を用いる場合は概ね $2\text{m} \times 2\text{m}$ 程度が限界であると見積られる。したがって、数10cmオーダーの断層・割れ目系の直接的な検出は困難である。しかし、速度急変部の抽出等によってこれらの存在を推定することは可能である。また、波形情報に着目した弱層部の検出の検討が期待される。さらに、MHzレベルの電磁波・超音波を用いることによって分解能を飛躍的に向上させることが可能である。

現岩盤にたいする適用結果は、再生速度構造が推定地質構造と良く対応することを示しており、同法が、地質(速度)構造の面的な調査に有効であることを示している。

参考文献

- 1) 例えば 稲崎富士・高橋幸夫・吉田武志(1984);地質断面法による岩盤調査,昭和59年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会分科研究会資料,C,pp1-4,日本鉱業会
- 2) 例えば Dailey,W.D. et al (1982); Geotomography in Oil Shale, J.G.R.,pp5507-5515

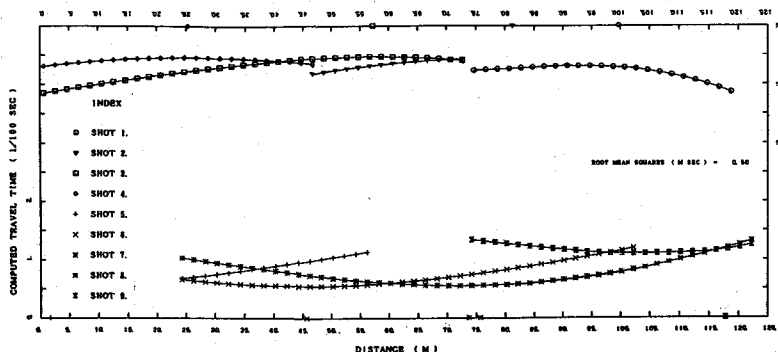


図-6 計算走時

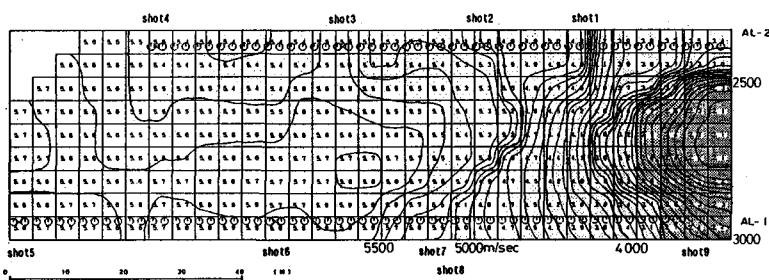


図-7 横坑間速度分布再生結果

(89) Geotomography --- A New Method for Estimation of the 2-dimensional
Distribution of Seismic Velocity in Rock Mass

INAZAKI Tomio* and TAKAHASHI Yukio**

* Public Works Research Institute, ** Nippon Geophysical
Prospecting Co., Ltd.

ABSTRACT

A tomographic method is described for estimating the 2-dimensional distribution of seismic velocity in rock mass. With this method, detailed images of in situ seismic velocity in the regions between pairs of adits or between surface and subsurface can be reconstructed. The velocity distribution is calculated from traveltimes obtained from dense fan-shooting data, and displayed as the 2-dimensional picture.

The geotomography (geophysical tomography) involves an iterated process of foregoing ray tracing named " explosion method " and velocity reconstruction as an inversion. The iterative technique of geotomography has been modified from that used in medical X-ray tomography taking account of the effect of ray bending and the restricted pattern of measuring geometry.

The performance of the reconstruction algorithm is examined using artificial model data and it is then applied to the field seismic data collected by fan-shooting between adits of a dam site.

Model calculations have revealed that the algorithm fairly reconstruct the original structure. The geotomograph for the field data is consistent with the inferred map of classified rock mass, and suggests that geotomography may be useful in mapping the characteristics of rock mass.