

(7) 原位置弾性波探査による岩盤ピラー内の速度構造調査

大成建設(株)	○ 岩野政浩	下茂道人
同上	青木智幸	田中重明
同上	川上純	本間直樹
同上	亀村勝美	

1. はじめに

近年、大規模化、大深度化している地下構造物の建設においては、対象とするサイトの広範囲の地質構造を平面的又は立体的に把握する事が重要である。ジオトモグラフィー法は、このような要求に応える技術の一つとして現在注目されており、各方面で研究開発が進められている^{1),2)}。ジオトモグラフィー法が今後一般的な岩盤調査技術として確立されるためには、計測技術の改良、データの評価手法、調査精度の評価に関するデータの蓄積等が更に必要であると考えられる。このような認識の基に、我々は栃木県にあるドロマイト鉱山における直径約40mの岩盤ピラーを対象とした地質調査並びに弾性波探査を実施するとともに、新たな速度構造解析アルゴリズムの開発を進めてきた。岩盤ピラーを調査対象として選んだのは、岩盤壁面全周からあらゆる方向に走査線を設定できるため、ジオトモグラフィー法の精度を確認する上では理想的な条件であると考えられるからである。本報告では、原位置調査でこれまでに得られたいくつかの知見、および測定データを用いた岩盤内の速度構造解析結果について述べる。

2. 地質概要^{3),4)}

調査地は足尾山地内に位置し、地質層序は中・古生代の堆積岩類からなる足尾層群に属する。図-1に示すように調査地点を構成する地質は、下位から下部石灰岩層、中部ドロマイト層、上部石灰岩層に区分される鍋山層と呼ばれる二疊系である。地質構造は、葛生町を中心に南西にひらく半バズン構造であり、さらに低角度の衝上断層を伴う複雑な覆瓦構造を形成していると言われている。対象岩盤は半バズン構造の南東翼に位置し、中部ドロマイト層に区分される。その性状は、灰色～灰青色のほとんど新鮮な塊状岩盤を呈しているが、一部には石灰岩を角れき状に含む所もあり、必ずしも均質な岩盤ではない。調査を実施した岩盤ピラーには不規則に亀裂が多数発達するが、その連続性は乏しい。多くの亀裂は、面が融合した面無し亀裂であるが、一部には赤粘土を薄く介在する亀裂もみられる。ピラー壁面の岩盤スケッチの一部を図-2に示す。壁面上の岩盤の一部は亀裂の組み合わせにより浮いた状況にある。

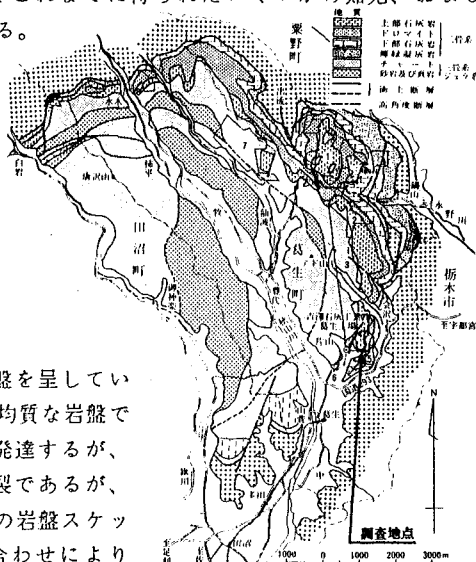


図-1 岩相及び調査地点

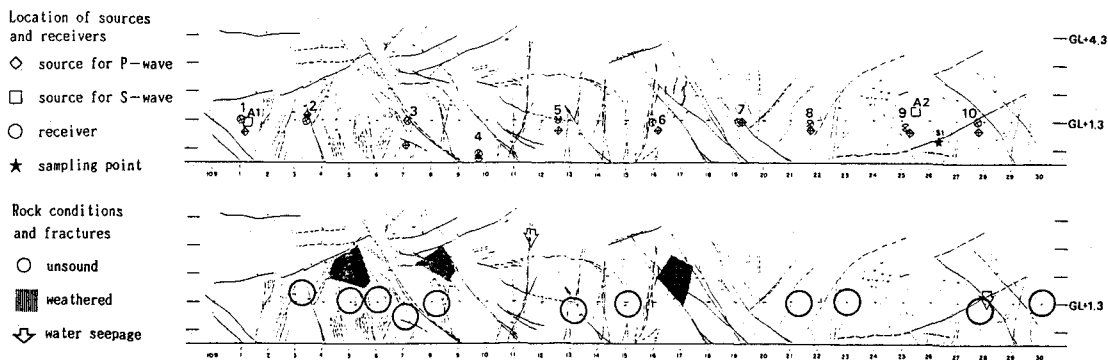


図-2 岩盤ピラー壁面の岩盤スケッチ及び発振・受振点配置図

3. 試験概要

図-3に調査地点の概要(水平断面図)を示す。受振点及び発振点は、ハンマー打撃及び目視観察により、岩盤が浮いていると思われることや、割れ目の集中している場所はなるべく避け、ピラー周上、約3m間隔に配置した(図-2中にその一部を付記した)。このようにしてピラー全周(約109m)に設置された受振・発振点の総数は、それぞれ36点である。これらの受振・発振点の座標は、試験に先立ち岩盤ピラーを取り囲む坑道内に設置した基準点より測量し、正確に求めた。

図-4に受振・発振点の設置状況を示す。受振点は、所定の位置にオールアンカーを打ち、プレートを取り付け、これに速度計($f_0=28\text{Hz}$)をゴムひもで固定した。発振点は、壁面の凹凸を水中硬化型エポキシ樹脂で充填し、厚さ10mmの鉄板を2本のオールアンカーで壁面に固定した。弾性波(P波)の発振は、この鉄板をハンマーで打撃することにより行った。尚、この際のトリガーとしては、鉄板の端に磁石で取り付けた加速度計の振動出力を用いる方法が正確であった。計測装置としては、応用地質(株)製のMc-SEIS 1300(12CH)を用い、受振子としては、12連の速度計を用いた。本システムでは、一つの発振点に対して1セットで12点の受信が可能であるため、3セット分の受振子の移動により岩盤ピラー全周(36点)の計測が完了する。各測線の弾性波の初動走時はチャート紙に書き出した計測記録から読み取った。

以上のようにして計測したP波の測線の総数は812本であった。これらのデータのうち、①初動が不明瞭で、立ち上がりの読み取りにかなりの誤差を含むと思われるもの、②同一測線の往復の計測データがかなり異なるもの、③測線長が短く壁面近傍のゆるみ域だけを捕えていると考えられるもの、④発振点あるいは受振点が設置された岩盤が明らかに浮いているもの、については、ピラー内部の速度構造を再構成する上で不適当なデータと判断し、その後の解析には用いなかった。これらのデータを省いた理由は、①②については、読み取り誤差が大きい、③④は、弾性波速度が局所的な物性に大きく支配されているものと考えられたためである。以上の手順で抽出した測線の総数は651本となった。これらのデータについて、測点間の直線距離と伝播時間の関係を図-5に示す。図に示すようにすべてのデータは、ほぼ直線的な分布を示し、明らかな異常値は認められない。次節に述べる速度構造解析においては以上のようにして作成したデータセットを用いた。

4. 速度構造解析

4.1 解析手法

従来のジオトモグラフィー解析手法においては、対象とする領域をセルに分割し、各セルに測定値を最も良好に説明しうる物性値が割り当てられる。このような手法においては、弾性波走査線の屈折、回折は、セル境界面でのみ考慮され、また、速度値の空間分布は設定したセルの配置に依存する。そこで、今回、我々は、空間内の速度構造を連続的な関数として求める方法を考案した。本手法は、弾性波による初動走時から、速度構造を再構成する点では従来の手法と変わらないが、波動伝播経路を変分法を基に算定する点に特徴がある。この様な手法を採用することにより、セル分割に伴う誤差の導入を低減することができると考えた。図-6に、その解析アルゴリズムを示す。

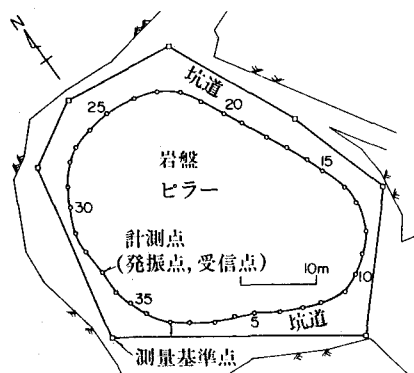


図-3 調査地点(計測点の配置)

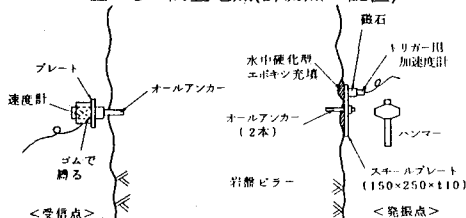


図-4 P波の発振及び受振装置

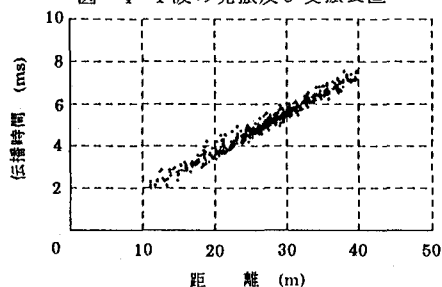


図-5 測点間の直線距離と伝播時間の関係

[スローネス分布の表示] スローネスとは、単位波線長当りの伝播時間であり、弾性波速度の逆数である。本手法では、解析領域として、図-7に示すような調査領域を含む矩形($a_0 \leq x \leq a_1, b_0 \leq y \leq b_1$)を設定し、これを $N_x \times N_y$ の小領域に分割する。解析領域内のスローネス分布 $F(x, y)$ は、座標の関数とし、以下のように与える。

$$F(x, y) = \sum_{i=-N}^{N-1} \sum_{j=-N}^{N-1} a_{ij} f_N\left(\frac{x-a_0}{D_x} - i\right) f_N\left(\frac{y-b_0}{D_y} - j\right) \quad (1)$$

基底関数 f_N としては、 $[0, N+1]$ で定義されたBスプライン関数を用いた。なお、 N は次数、 D_x, D_y は小領域の長さを示す。

ここで、 N_x, N_y を固定すれば、スローネス分布を求めることは、式(1)の係数 a_{ij} を求めることと等価になる。

[波線および理論走時の決定法] スローネス分布 $F(x, y)$ が与えられれば、図-7に示すように、発振点 S 、受振点 R 間の波線を C とすると、最小走時を与える波線は、次の汎関数 $T(C)$ を極小にするものとして選定される。

$$T(C) = \int_{u_0}^{u_1} F(x, y) \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} du \quad (2)$$

上式において、変数 u は積分パラメータである。ここで、

$$\phi = F(x, y) \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (3)$$

なる変数変換を行うと Euler の公式より、

$$\ddot{x} - \dot{y}\dot{x} = (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)(F_x \dot{y} - F_y \dot{x})/F \quad (4)$$

なる2階の微分方程式を得る。さらに、時間 t をパラメータとして、波線 C の方向 θ を導入すれば、波線 C の位置を決定する方程式として次式を得る。

$$x_t = \cos \theta / F, \quad y_t = \sin \theta / F, \quad \theta_t = (F_y \cos \theta - F_x \sin \theta) / F^2 \quad (5)$$

(5) 式を初期条件 (x_0, y_0, θ_0) のもとで前進差分展開すれば、発振点より生じる全ての波線及び波面群が決定できる。理論走時は、このようにして決定された各波線上のスローネスを線積分することにより算定される。

[スローネス分布の再構成] ジオトモグラフィー法においては、対象領域全体にわたって、理論走時と観測走時の差をなるべく小さくするようにスローネス分布を再構成する必要がある。このための手法は、これまで種々提案されているが、ここでは、解を安定に求める方法として、ラブラシアンフィルターを用いた平滑化制限付き最小二乗法を用いた。

4.2 解析結果

上記に述べたジオトモグラフィー解析手法を用いて、今回取得した651本の原位置弾性波探査データから、岩盤ピラー内の速度構造を解析した結果(スプライン次数、 $N=2$)を図-8に示す。図中(a)は、全波線図、(b)は、再構成した速度構造断面図である。本計算における繰り返し計算回数は5回であった。図-8(b)において、断面内の平均P波速度は5.35km/sであり、5.0km/s以下の遅い領域は、主としてピラー壁面に沿って分布している。最低速度は、測点29の壁面付近で現れ、P波速度4.2km/sである。岩盤ピラー内部の速度構造を見ると、P波速度が5.8km/sを越える2つの明瞭な領域が現れ、4.8~5.4 km/s程度のやや速度の遅い領域がピラー中央のN-E方向(図中a-a'で示す。)に存在している。

5. 考察

現時点では、ボーリング調査を実施していないため上に示した解析結果の精度について詳細に議論することはできないが、これまで壁面において実施した岩盤調査結果をもとに考察を行う。ハンマー打撃や地質

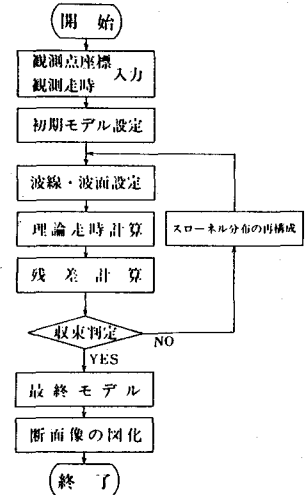


図-6 解析アルゴリズム

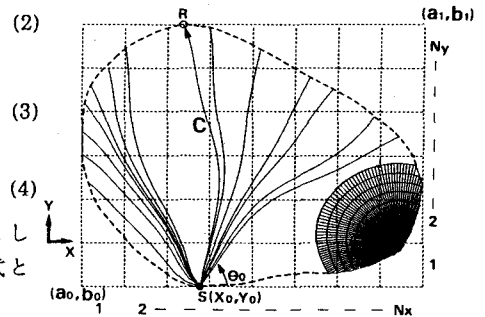


図-7 解析概要図

観察により作成した岩盤状況図(図-2にその一部を示した。)において岩盤が風化していたり、亀裂の多い部分(測点2~3、5~6、8~11、18~20、29~34)は、図-8(b)において、すべて低速度領域として評価されており、地質観察データと非常によく対応がみられる。なかでも、4.5km/s以下の特に速度の遅い部分は、測点番号が、9から11の間及び29から33の間に現れているが、この部分は、ハンマー打撃による調査により、他の部分に比べて明らかに軟らかいと判定された。また、岩盤調査で非常に硬いと判定された部分(35~1、26~28)も、6km/s近い速度の高い部分として表現されている。ピラー内部の速度分布については、壁面において得られる地質情報のみからその妥当性を議論できないため、今回は、その妥当性について大まかな判断を下すため、既に著者らが提案した⁵⁾弾性波速度から岩盤内の亀裂分布を定量的に評価するためのクラックテンソルを算定した。ジオトモグラフィー法が一般に、岩盤の局所的な不均質性と等方性を仮定しているのに対して、クラックテンソルによる評価は均質性と異方性を仮定しているため両者の結果は同レベルで比較できないが、後者の手法においては、岩盤内の平均的な弾性波速度の方向分布を知ることができる。図-9に種々のテンソル量の計算結果を示す。これらのテンソルの主軸方向は、図-8(b)に示した $a-a'$ およびその直交方向と調和的である。これは、 $a-a'$ 方向の連続した低速度帯の存在によりこれと直交する方向の弾性波速度が平均的にみると遅くなるためであると解釈することができる。しかし、ピラー内部の岩盤情報が得られていない現段階では、結果の妥当性について断定的な結論を下すことはできない。

6. 結語

ジオトモグラフィー法が、一般的な岩盤調査技術として確立されるためには、測定技術、データ解析技術の向上とシステム化、並びに原位置測定データの蓄積が不可欠である。今回、我々が実施した岩盤ピラーを対象とした弾性波探査は、このような背景の基に実施された。今後、ボーリング等により、ピラーの内部構造を実際に調査し、今回予測された速度構造の精度について詳細な検討を継続する予定である。

7. 謝辞

今回の原位置試験の実施に当り、多大の御協力を頂いた吉沢石灰工業(株)殿に深甚の謝意を表します。
参考文献)

- 1) 大伴秀夫: ジオトモグラフィー技術の現況、物理探査第39巻、pp.384-397, 1986
- 2) 稲崎、高橋、吉田: 地質断面法、物理探査学会春季講演会予稿集、pp.18-21, 1984
- 3) 日本の地質「関東地方」編集委員会編: 日本の地質3、関東地方、共立出版、1986
- 4) 吉澤石灰工業(株): 大叶鉱山探鉱部概要、1986
- 5) 岩野、亀村、小田: 弾性波速度分布とクラックテンソル、第22回土質工学研究発表会、pp.939-942, 1987

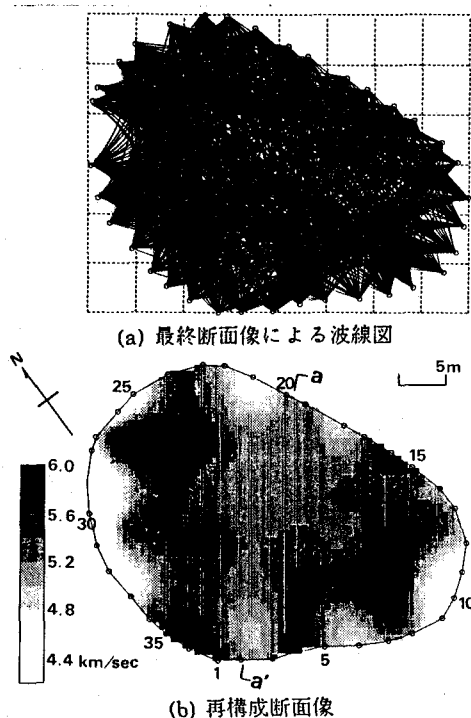


図-8 ジオトモグラフィーによる解析結果

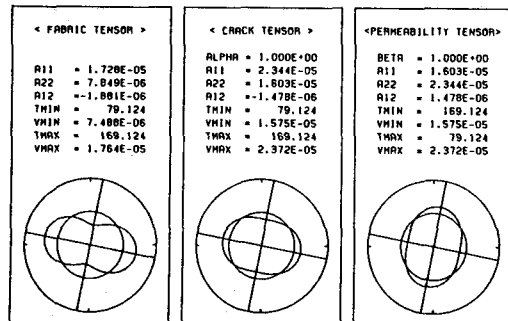


図-9 弾性波探査による各種テンソルの形状

(7) Estimation of Velocity Profile of Rock Pillar
using

In-situ Seismic Geotomography Data

by

Masahiro Iwano, Michito Shimo, Tomoyuki Aoki
Shigeaki Tanaka, Jun Kawakami, Naoki Homma and Katsumi Kamemura

Taisei Corporation

abstract

For large-scale underground structures, such as rock oil tanks, Nuclear waste repositories etc., it is very important to obtain the information on spatial distribution of geological features of the site a priori.

Geotomography is expected to be one of the powerful tools for this purposes and nowadays a great amount of efforts have been made by many researchers and engineers. However, it seems that more and more improvement is needed before this technique is accepted to be a standard geological exploration technique, especially in the aspects of improvement of instrumentations, data analysis and estimation of accuracy of obtained results.

On the purpose of making contribution toward the improvement of this useful technology, the authors have executed in-situ seismic geotomography test using rock pillar of about 40m in diameter in the dolomite mine located in Tochigi prefecture.

The obtained travel time data of 651 scanning lines was used to reconstruct the elastic velocity profile in the pillar using the new inversion method which employs the continuous velocity distribution function instead of dividing the analysis area into cells with constant velocity.

The velocity profile obtained by this new method was consistent with the rock quality conditions observed by geological survey of the wall of the rock pillar. The principle axis of "crack tensor" also can be reasonably explained by the heterogenetic velocity distribution in the rock pillar.

Further study including borehole exploration will be continued for more detailed and direct estimation of the accuracy of the calculated velocity profile by the proposed inversion technique.