

### (30) 岩盤調査におけるジオトモグラフィーの適用性の検討

国土開発技術研究センター 正会員 ○菅原 捷  
水資源開発公団 神尾重雄  
応用地質株式会社 斎藤秀樹  
応用地質株式会社 島 裕雅

#### A Study on Geotomography Techniques Applied to Rock Investigations

Hayashi Sugawara Japan Institute of Construction Engineering  
Shigeo Kanwo Water Resources Development Public Corporation  
Hideki Saito OYO Corporation  
Hiromasa Shima OYO Corporation

#### Abstract

Seismic and resistivity tomography techniques are examined to apply to the geological investigation at a dam site. The previous geological investigations at the site revealed that the foundation rock consisted of andesite covered with gravels of about 30m in thickness, and that the andesite layer probably contained alteration zones in places.

The seismic tomography result indicates that there exist the low velocity zones in the andesite layer. They are supposed to correspond to alteration zones. The resistivity tomography result indicates that the andesite layer has extremely low resistivity which is believed to be caused by alteration. From these results, we are convinced that each of these two ways of geotomography is effective to detect subsurface geological structure and to determine the distribution of physical properties of rock.

In addition, the results of both seismic and resistivity tomography were interpreted together. The combination of these two ways of geotomography could provide more detailed geotechnical conditions of the ground with accuracy.

#### 1. まえがき

ジオトモグラフィーは、地球物理学的手法を用いて得られるデータから、地盤内部の物性値の分布断面を画像化する技術である。近年コンピュータの発達にともなって大量のデータを短時間に処理できるようになり、多くの研究機関でその開発・実用化が進められている<sup>1)</sup>。ジオトモグラフィーという言葉が使われるようになったのは1979年頃からであり、国内においても1983年頃から研究が始められ<sup>1)</sup>、実際の地質調査への適用も試みられている<sup>2), 3), 4)</sup>。しかし、こうした新しい調査手法を実用的なものとするためには、条件の異なる多くのサイトに適用し、結果の評価と手法の改良を繰り返していく必要がある。本稿では、ジオトモグラフィー技術の実用化研究の一環として実施した火山岩地域での現場実験例について述べ、ジオトモグラフィーの岩盤調査への適用性について検討する。

なお本研究では、地盤の弾性波速度分布を求める弾性波トモグラフィーと比抵抗分布を求める比抵抗トモグラフィーの2種類の手法を利用した。それぞれの手法の適用性を検討するとともに、両者を併用することの有効性についても検討する。

## 2. 調査地概要

調査地は、ダム建設予定地の平坦な河床部である。地質は輝石安山岩熔岩とそれを覆う厚さ30~35mの河床砂礫層からなり、輝石安山岩は熱水変質作用を受けている。変質は、粘土化（モンモリロナイト、セリサイト）の程度と、色調によって灰色化（黄鉄鉱）、白色化（カオリナイト、明ばん石、オパール）などに区分され、その形態は層状、脈~網状および塊状と多岐にわたっている。これまでに実施された各種の地質調査で、変質部の物性や大局的な分布については明らかにされている。しかし、変質部の分布が複雑なので、従来の調査手法ではさらに詳細な分布を把握することは難しい。そこでトモグラフィーによる調査を採用した。

## 3. 調査方法

### (1) ボーリング孔配置

トモグラフィーを実施するために、図-1に示すような3本の鉛直ボーリングを掘削した。それぞれ2本のボーリング孔によって形成される3つの鉛直断面をトモグラフィーの対象断面とした。B1-B2断面（孔間距離67m）、B2-B3断面（孔間距離60m）、B3-B1断面（孔間距離30m）の3断面である。各断面について、2本のボーリング孔中と両孔口を結ぶ直線上の地表部に観測点を配置することとした。これまでに実施した数値実験によれば、ボーリング孔だけでなく地表も利用した方が、解析精度が向上する<sup>5)</sup>。

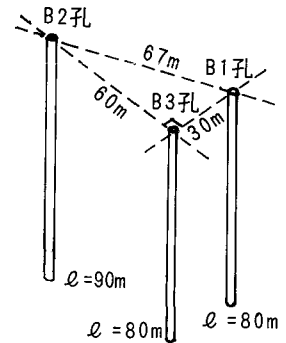


図-1 ボーリング孔配置図

### (2) 弾性波トモグラフィー

地盤内部を透過してきた弾性波の初動走時は、その透過経路沿いの速度値を反映している。そこで、透過経路の異なる多数のデータを収集することにより、地盤内部の各部分の速度値すなわち、速度分布を求めることができる。本実験においては、対象断面をとり囲むように起振点および受振点を配置し、図-2に示すような測定系を用いて測定した。起振点間隔は地表で6m、孔中で4mとし、起振にはダイナマイト（50~100g）を用いた。受振点間隔は地表で6m、孔中で2mとし、固有周波数28Hzの速度型地震計で測定した。B1-B2断面、B2-B3断面、B3-B1断面で得たデータ数は、それぞれ1126、808、535データであった。解析には、弾性波の伝播経路を示す波線の屈折を考慮したレイトレーシングによる理論走時計算と最小二乗法によるモデル修正<sup>6)</sup>を組み合わせた反復法再構成アルゴリズムを使用した。

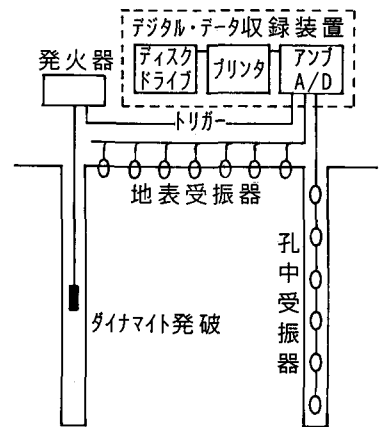


図-2 弾性波トモグラフィー測定系ブロックダイアグラム

### (3) 比抵抗トモグラフィー

比抵抗トモグラフィーは、従来の電気探査と異なり、地表だけでなくボーリング孔中や横坑内にも電極を配置することにより、高精度・高分解能の二次元比抵抗分布断面を画像化する技術である<sup>7)</sup>。比抵抗トモグラフィーの大きな特徴は、電位というポテンシャル量を扱うことであるが、対象断面をとり囲むよ

うに配置した電極の多数の組合せで、地盤の比抵抗分布を反映する電位データを測定するという点では、弾性波トモグラフィーと共通する部分がある。測定は、2本の遠電極と2本の測定用電極を用いる二極法電極配置によって行った。図-3に測定系を示す。実験は、ボーリング孔中と地表に2m間隔で電極を設置しておき、コネクターボックスによる切替で、その内の1本を電流電極、別の1本を電位電極として選り測定するので、その組合せを多数として測定を繰り返す。B1-B2断面、B2-B3断面、B3-B1断面のデータ数は、それぞれ459、420、341データであった。解析には、アルファセンター法による理論電位計算と特異値分解を用いた非線形最小二乗法によるモデル修正を組合せた反復法再構成アルゴリズム<sup>7)</sup>を使用した。

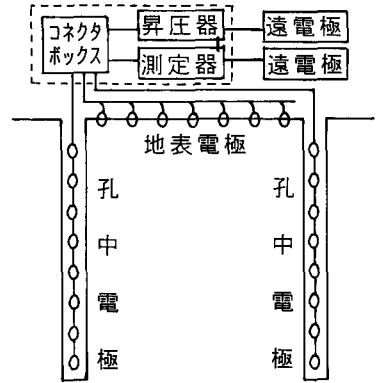


図-3 比抵抗トモグラフィー測定系ブロックダイアグラム

#### 4. 解析結果と解釈

##### (1) 弾性波トモグラフィー

弾性波トモグラフィーの解析結果を図-4に示す。対象とした3断面の弾性波(P波)速度分布断面像を並べて示した。図中に、ボーリングコア観察結果から作成された変質強度区分の柱状図を併せて記した。弾性波トモグラフィー結果は、どの断面も大局的には3層構造を示している。地表付近には2.0km/s以下の層が5~10mの厚さで分布している。中間層は、速度値2.0~2.5km/sで、20~30mの層厚を有する。その下位では、速度が急激に増加し、3.5~4.5km/sの速度値を有しているが、B2孔付近には3.5km/s以下の低速度部が分布している。これら3つの速度層はそれぞれ、地表付近の表土および盛土、河床砂礫層、安山岩層に対応するもので、その境界が速度境界として明瞭に描き出された。さらに、安山岩の変質強度を示す柱状図と対比すると、強~中程度の変質を受けたとされている部分が低速度を示している。このように、弾性波トモグラフィーによって、地質構造および変質部の分布を面的に把握することができた。

##### (2) 比抵抗トモグラフィー

比抵抗トモグラフィーの解析結果を図-5に示す。弾性波トモグラフィー結果と同様に、比抵抗構造は3層に分けることができる。地表付近には600~800Ωm以上の高比抵抗層が0~4mの層厚で分布する。この層は、地下水位以浅の表土および盛土に対応する。中間層は100~600Ωmの比抵抗値を有し、層厚は30~35mである。この層は、河床砂礫層に対応する。最下層は100Ωm以下の低比抵抗層である。この層は安山岩層に対応するが、100Ωm以下という低比抵抗を示すことから、この安山岩層全体が変質を受けていると推定できる。その中でも特に50Ωm以下の低比抵抗を示す部分は、変質にともない生成された低比抵抗鉱物の含有量が多い部分を表わしていると考えられる。このように、比抵抗トモグラフィーによって、地質構造や変質の状況が把握できた。

##### (3) 弾性波および比抵抗トモグラフィーの解析結果を併せた解釈

弾性波トモグラフィーおよび比抵抗トモグラフィーにより、地質構造や安山岩中の変質部の分布状況を把握することができた。両者とも大局的には3層構造を有し、その分布形状もほぼ一致した。しかしながら、両トモグラフィーの解析結果は、弾性波速度と比抵抗値という地盤の持つ異なった物性値の分布を個々に表わしているもので、両者を併せて地質解釈をすればより有効な解釈ができると考えられる。そこで、両トモグラフィー結果を対比し、弾性波速度と比抵抗値にもとづき断面をゾーニングすると、図-6に示すように、6つのグループに分けることができる。

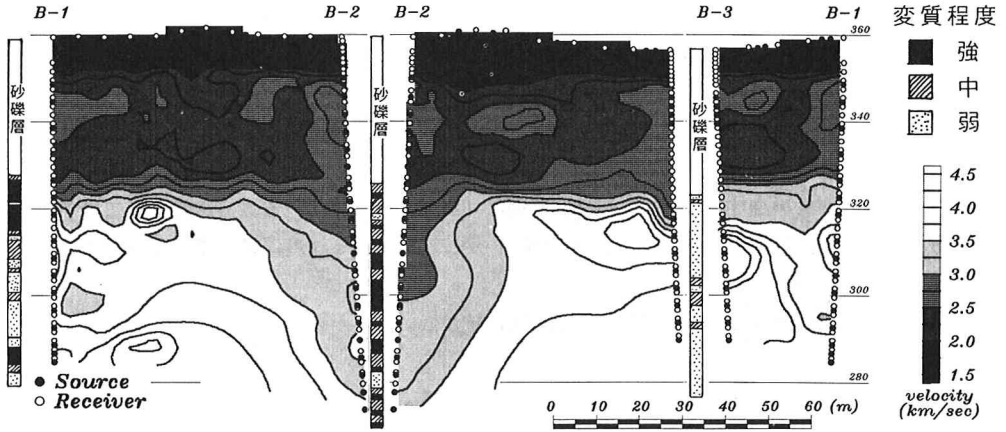


図-4 弾性波トモグラフィー結果図

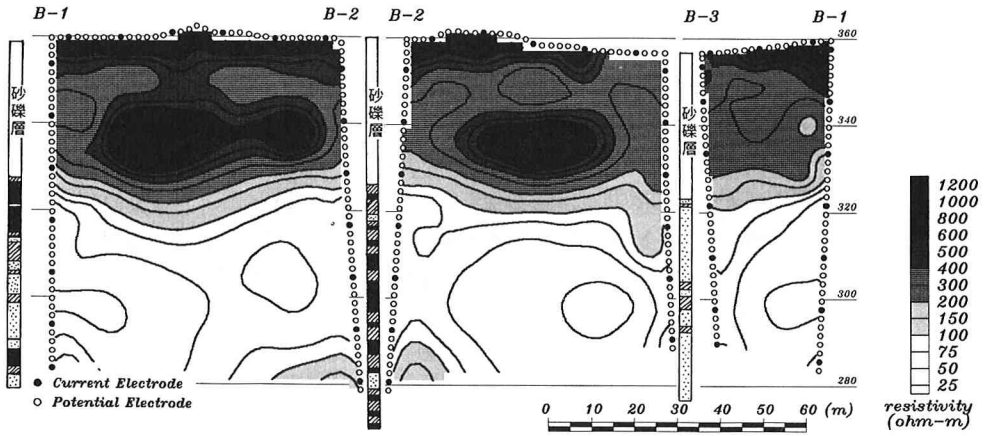


図-5 比抵抗トモグラフィー結果図

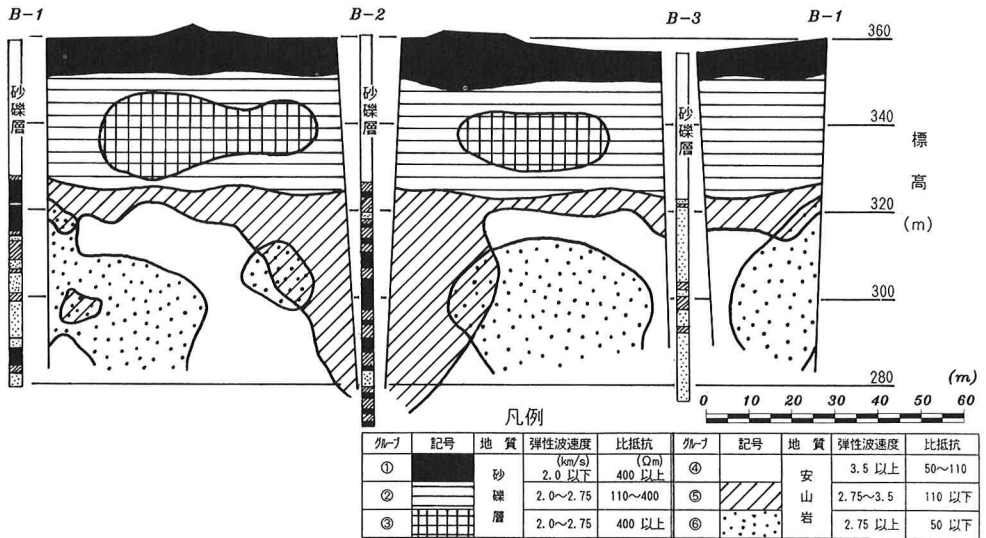


図-6 地質解釈図

各グループの地盤状況は、以下のように推定できる。

- ① 地表付近の低速度・高比抵抗層で、全断面に分布する。地下水位以浅の表土や盛土、現河床堆積物に対応する。
- ② 標高 320~350mにほぼ一定の層厚で分布するもので、旧河床砂礫層に対応する。①とは速度・比抵抗ともに明瞭な境界が見られる。
- ③ 旧河床砂礫層中の高比抵抗部で、B1-B2 断面と B2-B3断面に見られる。速度分布にはその存在は認められない。地質との対応は確認されていないが、比抵抗値と速度値に相関がないなどを考慮すると巨礫の存在が推定される。
- ④ 高速度を示す堅硬な安山岩に対応するが、比抵抗が低いことから、全体に弱い変質を受けているものと考えられる。
- ⑤ 安山岩の最上部とB2孔付近に分布する低速度部である。前者は安山岩の風化、後者は中程度以上の変質により、それぞれ速度が低下したものと考えられる。
- ⑥ 堅硬な安山岩であるが、変質によって特に低比抵抗を示す鉱物を多く含有する部分と考えられる。

## 5. あとがき

ジオトモグラフィーを岩盤調査に適用する目的のひとつは、岩盤内に存在する破砕帯や変質部などのいわゆる弱層部の物性やその分布形状を把握することである。今回の実験では、河床砂礫層が厚く堆積するという条件下で、安山岩中に不規則に分布する変質部の分布形状を断面像として描き出すことができた。このように、ジオトモグラフィーは従来の地表からの探査法やボーリング調査と比べ、より複雑な構造の場合でも、地質の分布を断面的に把握することができる点で優れている。さらに、弾性波速度と比抵抗値という異なった物性値の分布を併せて解釈することによって、地盤状況をより正確に把握できることも確認された。

なお、本研究にあたっては建設省および同土木研究所の御指導・御援助をいただいた。また、「ダム地質調査技術検討委員会」（委員長 小島圭二東大教授）および「地質調査における新しい調査技法の検討委員会」（委員長 芥川真知埼玉大教授）の委員各位に有益な御指導・御助言をいただいた。記して関係各位に謝意を表します。

## <<参考文献>>

- 1) 大友秀夫(1986) : ジオトモグラフィ技術の現況、物理探査、vol. 39、pp. 384-397.
- 2) 菅原 捷・玉田 晟・双木英人(1985) : C T法の地質調査への適用、土と基礎、vol. 33、pp. 53-56.
- 3) Inazaki, T., Jinbo, S., Takahashi, Y. and Watanabe, F. (1987) : Application of Seismic Tomography to Evaluation of Rock Mass Properties, 2nd Symposium on Field Measurements in Geomechanics (ed. S. Sakurai), vol. 1, pp. 347-356.
- 4) 大友秀夫・斎藤秀樹・島 裕雅(1988) : ジオトモグラフィーの数値実験と実測例—弾性波トモグラフィーおよび比抵抗トモグラフィー—、資源・素材` 88『ボーリング技術とポアホールを利用する計測技術の現状』に関する分科研究会資料、pp. 21-24.
- 5) 島 裕雅・斎藤秀樹(1987) : ジオトモグラフィーの岩盤調査への適用性について—数値実験による検討—第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp. 175-180.
- 6) Saito, H. and Ohtomo, H. (1988) : Seismic Ray Tomography Using the Method of Damped Least Squares, Exploration Geophysics, vol. 19, pp. 348-351.
- 7) 島 裕雅・坂山利彦(1986) : 比抵抗トモグラフィーに関する基礎的検討、物理探査学会昭和61年度秋季講演会講演予稿集、pp. 96-97.