

(1) 弾性波・電磁波・比抵抗トモグラフィによる地盤状況の推定について

(株)間組技術研究所 ○ 山下 亮
東建地質調査(株) 北村晴夫
(株)ダイヤコンサルタント 西田 薫
山口大学工学部 中川浩二
(株)間組技術研究所 蓮井昭則

Field exploration using seismic, radar and resistivity tomography techniques

Ryo Yamashita, HAZAMA-CORPORATION
Haruo Kitamura, Token Consultant Co. Ltd.
Kaoru Nishida, Dia Consultant Co. Ltd.
Koji Nakagawa, Yamaguchi University
Akinori Hasui, HAZAMA-CORPORATION

Abstract

Three kinds of crosshole geophysical measurements, which were seismic, radar and resistivity measurements, were carried out using the same boreholes drilled in the rock mass of shale. Analysing the measured data with computer tomography techniques, the distributions of five physical properties were obtained, which were resistivity, seismic velocity, attenuation of seismic wave, velocity and attenuation of electromagnetic wave. The structure and the condition of the investigated rock mass are inferred from all the analysis results.

1. まえがき

近年、医学の分野で発展してきたCT(コンピュータ・トモグラフィ)を地盤の分野に応用し、地盤の内部状況を非破壊で推定しようとするジオトモグラフィの研究や原位置での調査がさかんに行われている。また、トモグラフィで用いる探査手法も弾性波探査、電磁波探査、比抵抗探査などが利用されている。しかし、同時期に同じ原位置岩盤で異なる探査手法を用いた調査を実施した例は少ないようである。

筆者らは岩盤構造物の施工中におけるトモグラフィの利用について研究を進めており、その一環として、弾性波、電磁波、比抵抗の3つの異なる探査手法を同時に用いた調査を実施する機会を得た。本文では弾性波P波速度、P波初動振幅、電磁波速度、電磁波振幅、比抵抗の5種のトモグラフィ結果から岩盤状況の推定を試みたので、その成果について報告する。

2. 調査概要

2.1 調査地点および地質

調査地点は山口県宇部市にある採石場で、地質は中生代三畳系の埴生層群に区別され、北側に傾いたけつ岩と薄い砂岩の互層で構成されている。調査地点の平面、および露頭岩盤の状況を図-1に示す。

探査に用いるボーリング孔は、崖から平行に約5m離れた1直線上に3孔設けられ、各孔は孔径 Φ 66mm、孔長15mで鉛直に孔間距離5mで穿孔されている。ボーリングコアの観察状況を図-2に示す。地表およびボーリングコアの観察から岩盤は電中研のダム基礎岩盤分類によればCL~CM級で、節理、層理が発達しRQDはほとんどゼロの状態であり、ボーリング穿孔時には孔壁保護のためにセメンテーションを必

要とした。また、地下水位は地表面から深さ約1mで調査期間中ほとんど変化がなかった。

2. 2 調査断面

調査は図-1に示すように地下水位変動の影響を受けないと思われた地表からの深さ3m~15mの範囲でボーリング孔 No. 1、2および2、3の孔間をそれぞれ調査断面A、Bとして実施した。なお、ボーリング孔間距離はトンネルやダムなどの施工中にゆるみ領域の推定、グラウチング効果の把握などの施工管理的な調査を実施することを研究の最終目標としているため、孔間距離5mという比較的短い距離としている。

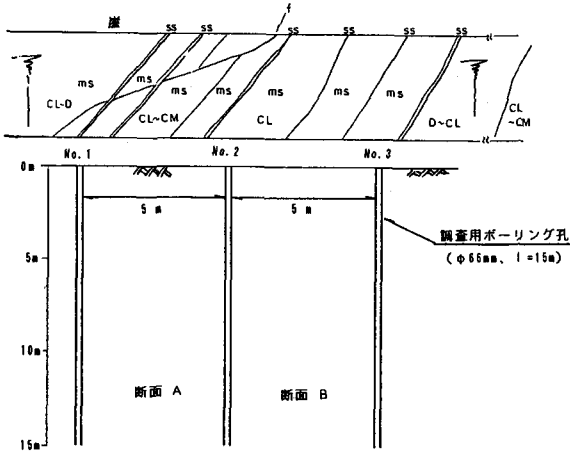


図-1 調査地点概要

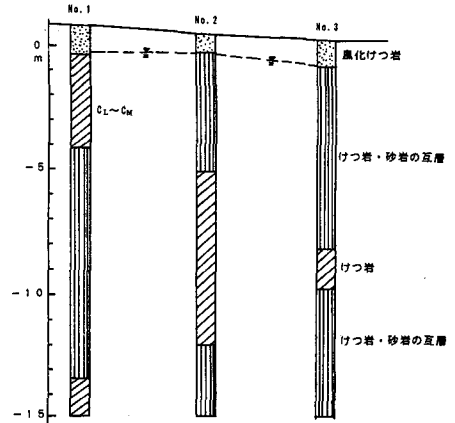


図-2 ボーリングコア観察結果

3. 調査方法

3. 1 孔間弾性波探査

本調査のように孔間距離が5mと短い場合には、測定精度を向上させるためには高周波波動による測定が必要となる。このため測定装置としてこうした目的のために開発されたハザマ式孔間弾性波探査システム(㈩間組開発)¹⁾を用いた。

測定は、No. 2孔を発振孔とし、調査断面AではNo. 1孔を、調査断面BではNo. 3孔を受振孔にして、地表面から深さ3m~15m間に1m間隔で発振・受振点を設けて実施した。図-3に弾性波の測定波線を示すが、各断面における波線総数は108波線であった。なお、P波速度、振幅のトモグラフィ解析は、発振・受振点間の距離が短いため、弾性波の伝播経路を直線と仮定し同時反復法(SIRT法)によって実施した¹⁾。

3. 2 電磁波探査

電磁波探査には、一方のボーリング孔から発信し他方のボーリング孔で受信する透過法の測定が可能な岩盤レーダー探査システム(㈩間組・川崎地質(株)共同開発)²⁾を使用した。発信する電磁波は発信中心周波数80MHzのパルス状である。測定は前述した孔間弾性波測定と同様にNo. 2孔を発信孔とし、調査断面AではNo. 1孔を、調査断面BではNo. 3孔を受信孔にして実施した。発信・受信点は電磁波アンテナの大きさの関係から、地表面から深さ3m~13m間に1m間隔で設置した。電磁波の測線は弾性波の場合とほぼ同様である。なお、電磁波の速度、振幅のトモグラフィ解析は反復法(WART法)で行った。

3. 3 電気探査

電気探査はボーリング孔と地表面に電極を配置する比抵抗法の2極法で行い、測定装置にはMcOHM MELシステム(応用地質(株)製)を用いた。電極の配置例を図-4に示すが、調査断面A、Bともに地表面では

1 m 間隔で、ボーリング孔内では深さ 3 m 地点から 2 m 間隔で設置した。また、比抵抗値のトモグラフィ解析は有限要素法による方法³⁾を用いた。

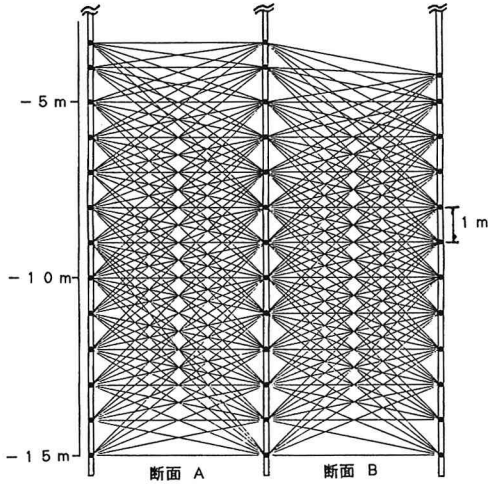


図-3 弾性波測線

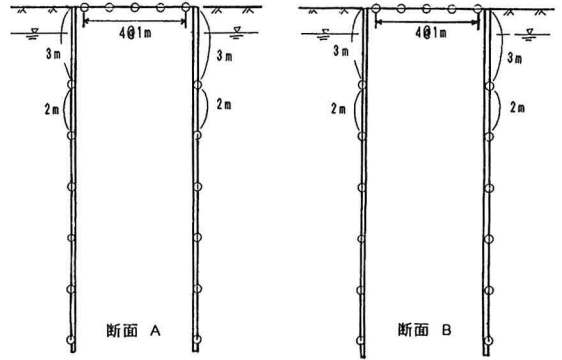


図-4 比抵抗探索における電極配置

4. ジオトモグラフィ解析結果

(1) 弾性波 P 波速度

P 波速度のトモグラフィ解析結果を図-5 に示す。調査断面全体では 2500 m/s ~ 5000 m/s 程度の P 波速度の分布になっている。調査断面 A、B ともに地表面から 3 ~ 6 m までは P 波速度 3500 m/s 以下の領域で、浅くなるほど速度が低下する傾向がある。また、6 m 以深では 4000 m/s 前後の領域が広く分布しており、速度の変化は少ない。このことより地表面から 6 m 以深では地表面の影響の及んでいない比較的健全な岩盤が存在し、深さ 3 ~ 6 m 間では 6 m 以深の岩盤状態から地圧の解放や風化などの影響を受けて力学特性の若干低下した岩盤状態にあると思われる。

(2) 弾性波初動振幅

弾性波の振幅の減衰がすべて粘性によるものと仮定すると、波動がある距離 x を進んだときの振幅減衰の割合 A/A_0 は減衰定数 α を用いて次式のように表される。

$$A/A_0 = \exp(-\alpha x)$$

振幅減衰のトモグラフィ結果を図-6 に示す。図中の数値は振幅の減衰定数を表している。地表面から深さ 3 ~ 5 m 間は 3 以上の比較的減衰の大きな部分であるが、それ以深では 1 ~ 3 の範囲にあり調査断面全体では減衰率の変化は少ない。ここでの結果からは特定の岩盤の構造を反映したような分布は得られておらず、速度のトモグラフィ結果と同様解析領域の上端部の領域以外では岩盤の力学的特性に大きなバラツキは見られないものと判断される。

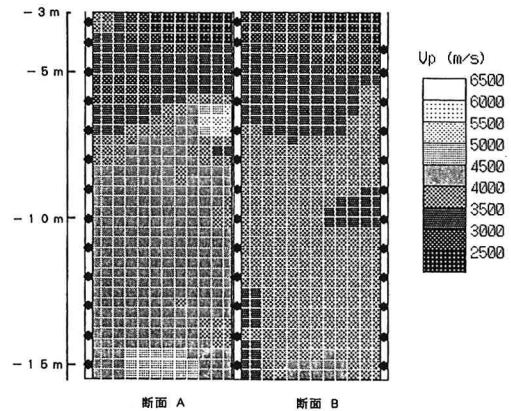


図-5 弾性波速度 (P 波) 分布

(3) 電磁波速度

電磁波速度のトモグラフィ結果を図-7に示すが、調査断面内の電磁波速度は60000~80000 km/sにあり、分布幅は小さい。調査断面Aでは比較的速い部分が高い部分から左下から右上がり帯状に分布し、弾性波振幅と同様な傾向を示している。また、調査断面Bではより明確に帯状の分布がみられ、これらの方向は弾性波振幅と同様に露頭で観測された層構造の方向に一致している。電磁波の速度は理想状態のもとでは伝播経路内の比誘電率の平方根に反比例するため、相対的に比誘電率の小さな部分が左下から右上がり帯状に分布しているともみることができる。

(4) 電磁波振幅

振幅減衰率のトモグラフィ結果を図-8に示す。図中の減衰定数の数値は弾性波波動と同様に粘性減衰を仮定したものであるが、基準となる発信波動の大きさを仮定して解析しているため、相対的な値として評価する必要がある。調査断面Bでは減衰定数の相対的に小さい(減衰の小さい)部分が左下から右上にかけて存在しており、これは同断面での電磁波速度分布の大きなゾーンと一致している。調査断面Aにおいても同じような傾向がみられるが、断面Bほど電磁波速度分布との良い対応は見られない。

(5) 比抵抗

比抵抗によるトモグラフィ結果を図-9に示すが、全体として比抵抗値は300から500Ωm程度の変化の少ない狭い幅のなかで分布している。調査断面Aでは深度7~8m付近に比抵抗値が450以上の比較的高い領域があり、それを中心に右上がりの分布となっている。一方、調査断面Bでは、全体的に比抵抗値が300Ωm前後の比較的低い分布となっている。比抵抗による結果では、弾性波やレーダーの解析結果から見られたような亀裂の方向性を表すような構造は見られない。

5. 地盤状況の推定

5種類のトモグラフィ解析結果から以下のように岩盤状況を推定した。

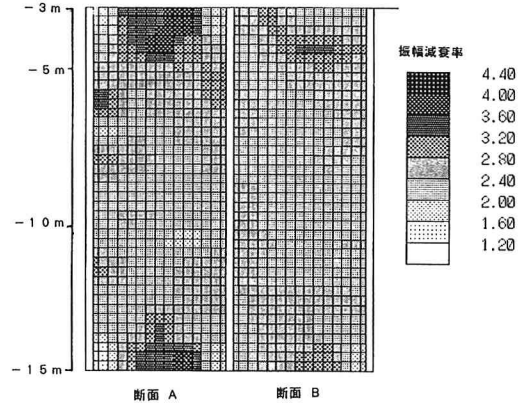


図-6 弾性波振幅の減衰定数分布

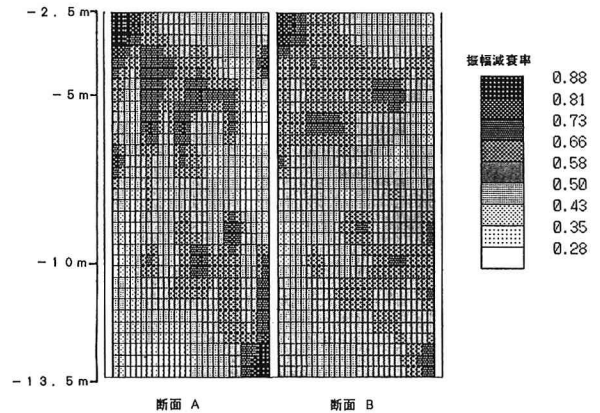


図-7 電磁波速度分布

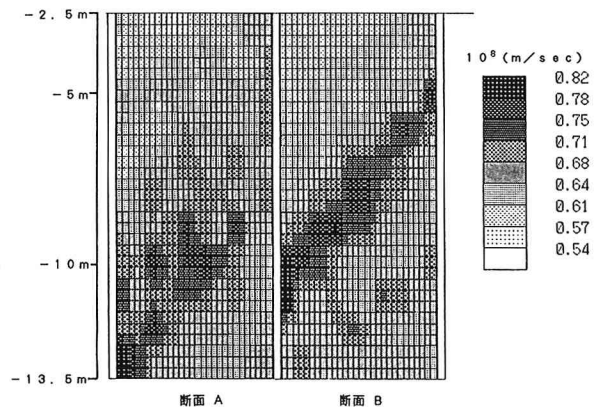


図-8 電磁波振幅の減衰定数分布

①全体的にみると調査断面内でのP波速度（6 m以深）、P波振幅減衰、電磁波速度、比抵抗値など各探査特性値の分布の幅は比較的小さい。これは調査断面内では断層などの極端に岩盤状況が異なる部分がなく、岩種もほぼ一様であることを示している。露頭やボーリングコアでみられたように、調査断面内の岩盤はけつ岩と砂岩の互層構造であるが、けつ岩と砂岩とは物理的特性に大きな差異はないものと推定される。

②P波速度から岩盤の力学特性的にみると、深さ6 m以深の岩盤は風化や地圧の解放の影響

をほとんど受けていない健全な基盤岩に近い状態であり、それより上層の深さ3～6 mの部分は地表面の影響を受けて力学特性の若干低下した岩盤であると推定される。

③電磁波速度分布でみられる帯状の模様は露頭で観測された層構造の方向と一致しており、調査断面内における露頭と同様な層構造、主節理の方向を反映したものと推定される。ただし、ここでは岩盤の等方性を仮定した解析を行っているため、本来異方性である岩盤を等方性として解析したために生じた偽像である可能性もあり、これについては今後の検討課題としたい。

④解析した領域は地下水面下であり、岩盤は水で飽和した状態にあるので電磁波速度の高い部分（比誘電率の小さい）部分は空隙率の少ない部分つまり亀裂密度の小さい部分を表わしていることになる。電磁波速度でみられる帯状の部分は、調査断面内の他の部分に比べて比較的亀裂の少ない部分と推定される。

⑤比抵抗トモグラフィの結果では岩盤の構造を反映していると思われる分布は見られなかった。これは他の手法では波動の伝播経路に沿った情報が測定結果として得られていると考えることができるのに対し、比抵抗法ではポテンシャル場の解析に基づいており伝播経路という考え方が適用できないためであるとも考えられる。

6. あとがき

本調査では弾性波、電磁波、電気（比抵抗）探査を用いて、基礎岩盤の位置、層構造と節理の方向性および亀裂の相対的な多少などの岩盤状況を推定した。それぞれの探査手法はそれぞれの特性に対応するトモグラフィ結果を与えるためどのような情報を得ようとするかによって使い分けられるべきものであるが、本研究ではこれらを総合的に考慮することで複雑な岩盤状況の把握がより正確に行い得たものと考えている。最後に、本研究に御協力を頂いた宇部興産(株)米田俊一氏、山口大学建設工学科坂尾和男氏ならびに学生諸氏に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 世一、蓮井、平井、中川：孔間弾性波測定によるグラウチング前後の改良効果の判定について、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.151-155、1989.
- 2) 北村、向上、塩崎、登内：ポアホール型岩盤レーダーによる探査について（その2）、間組研究年報、pp.71-78、1988.
- 3) 西田、杉本、野口、新村：有限要素法による比抵抗トモグラフィの数値解析（Ⅲ）、物理探査学会第81回学術講演会論文集、pp206-211、1989.

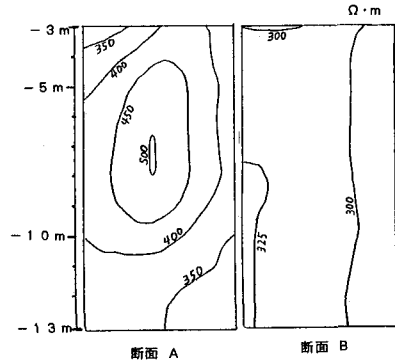


図-9 比抵抗のコンター