

**投稿論文 (和文報告)**  
**TECHNICAL**  
**REPORT**

# 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

蓮井昭則\*・世一英俊\*\*・北村晴夫\*\*\*・  
中川浩二\*\*\*\*

ボーリング孔間を利用した弾性波トモグラフィ、電磁波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィから岩盤状況を推定し、その推定結果を検証した。その結果、以下のような事が判明した。①弾性波P波速度トモグラフィは岩級区分を定性的に表現している。②電磁波速度トモグラフィにより地層構造を定性的に推定できる。③トモグラフィにより相対的、定性的な岩盤状況の推定が可能である。

**Keywords** : tomography, seismic wave, rader, resistivity

## 1. ま え が き

医学の分野で考案されたCT(コンピュータ・トモグラフィ)を地盤調査の分野に応用し、地盤の内部状況を非破壊で推定しようとする技術(ジオトモグラフィ)に関する研究が近年さかに行われている<sup>1)~4)</sup>。ジオトモグラフィ技術に用いられる探査媒体としては弾性波、電磁波、電流・電圧などがあり、また弾性波、電磁波の場合には伝播速度のみならず、波動伝播に伴う減衰特性も有用な情報として用いられる。

これらの媒体、あるいは特性を用いたジオトモグラフィ技術についてはその基本的特性に関する問題のみならず、原位置地盤の調査や鉋床、地層構造の推定など非常に広い範囲に関する研究が行われている。しかし、一般に、現地計測におけるジオトモグラフィ推定結果に関して、掘削等によって地盤を検証した事例は必ずしも多くない。すなわち、ジオトモグラフィの報告は一方向的な推定にとどまるものが多いと言える。

筆者らは岩盤構造物の施工中におけるジオトモグラフィの利用についての研究を進めている。その中で、ジオトモグラフィ手法により、施工対象の岩盤状況の推定が土木技術者の手により実際にどこまで可能であるかということを実際に把握することは非常に重要なことと考えている。そこで筆者らは、ある対象岩盤の断面について孔間弾性波探査、孔間電磁波探査、電気探査の3つの異なる探査手法を用いた原位置調査を実施し、5つの異なる探査特性(弾性波P波速度、P波初動振幅減衰特性、電磁波速度、電磁波初動振幅減衰特性、比抵抗値)によ

るジオトモグラフィ解析を行った。これらの探査手法、および解析手法は技術的完成度が異なり、そのため各々のトモグラフィから得られる結果には精度的なバラツキがあるものと予想される。それを認識したうえで、これら5種のトモグラフィ結果と計測のために穿孔された探査用ボーリングのコア、および周囲の地盤状況より、総合的な地盤の推定を行った。

一方、この推定断面に沿って実際の地盤状況を知るため高密度の検証ボーリングを行い、コア、およびボアホールテレビカメラによる調査結果からの地盤状況判定を実施した。

その上で、このジオトモグラフィにより総合的に推定された地盤状況がどの程度に実際の地盤状況(高密度ボーリングなどから得られた地盤状況)と一致しているかについて検討を行った。また、ここで対象とした地盤、調査方法の範囲におけるそれぞれのトモグラフィの特性について論じた。

なお、本研究は3つの段階に分かれており、第1段階は土木技術者により行われたジオトモグラフィ結果等による地盤の推定であり、第2段階は地質専門技術者による検証である。第1段階と第2段階は独立して実施し、第3段階において初めて双方の資料をつき合わせた比較検討を行った。

## 2. 調査概要

### (1) 調査地点および地質

#### a) 地質概要

調査地点は山口県宇部市二俣瀬区にある宇部興産(株)採石場で、表土が取り除かれた状態にあり表層は風化が進んでいる。調査地点付近の状況を写真-1に示すが、写真中央部に並ぶ3つのボックスは探査用ボーリングの孔口でほぼ南北方向の一直線上にあり、背後には高さ約4mの露頭面がみられる。露頭面の地質は中生代三畳

\*正会員 工修 (株) 間組技術研究所 主任研究員  
(〒305 茨城県つくば市刈間字西向515-1)

\*\*正会員 工修 (株) 間組技術研究所 研究第一部室長

\*\*\*東建地質調査 (株) 山口出張所所長

\*\*\*\*正会員 工博 山口大学工学部 教授

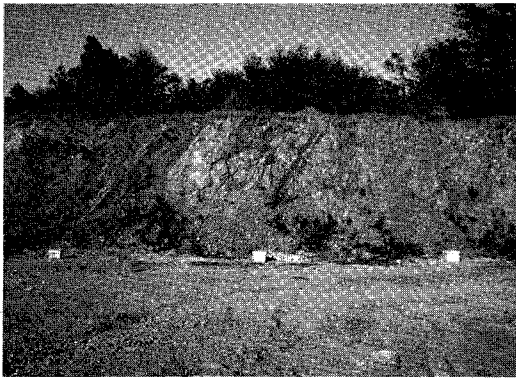


写真-1 調査地点の状況

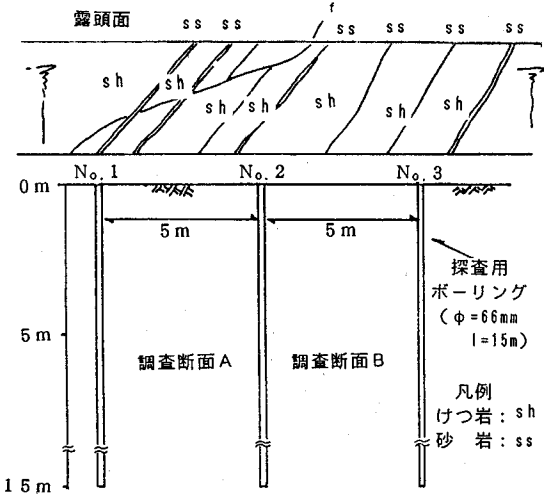


図-1 探査用ボーリング位置

系植生層群に分類される薄い細粒砂岩とけつ岩の互層で構成されている。露頭面での亀裂観察結果と探査用ボーリング孔の位置関係を図-1に示すが、地層の平均的な走向傾斜はN 80° E 45° Nであり、主要節理は層理に沿うもの、斜交、直交するものと多岐にわたっている。なお、地下水位は地表面から深さ約1mにあり、調査期間中の地下水位の変化はほとんど変化がなかった。

b) 探査用ボーリング

鉛直方向の探査用ボーリング孔（孔径φ66mm、孔長15m）を、露頭面から平行に約5m離れた一直線上に等間隔（孔間隔5m）で3孔穿孔した。この孔間隔5m、3孔穿孔という配置は本研究がダムやトンネルといった岩盤構造物の施工中の調査を対象としており、たとえばダム基礎岩盤でのグラウチングパイロット孔間隔は12~15mであることなどを考慮して採用したものである。

ジオトモグラフィ探査用ボーリングから得られたコア（図-2）を田中によるダム基礎岩盤分類により観察し

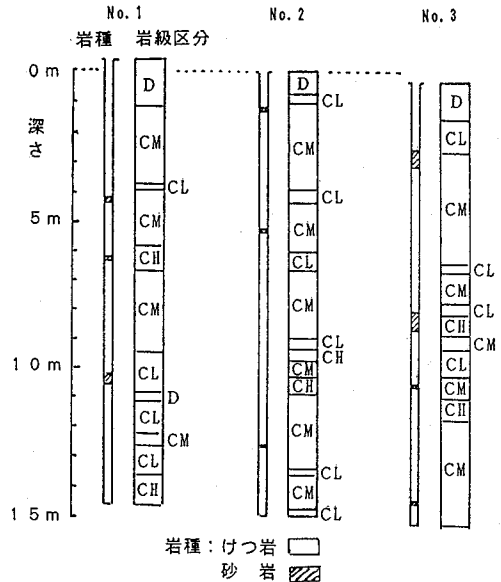


図-2 探査用ボーリングコア

た結果、CL~CM級が大部分を占め一部にD級岩盤が認められた。RQDは全体的に低く全区間の平均は9、RQDがゼロの区間は全体の53%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が必要という状況であった。

c) 調査断面

調査は図-1に示したNo.1孔~No.2孔間を調査断面A、No.2孔~No.3孔間を調査断面Bとする2断面で行われた。

No.1, 2, 3孔ともに孔の上部約2mが塩化ビニールパイプでケーシングされているため、調査はNo.2孔の孔口を基準地表面として深度3m~15mの範囲とした。

(2) 探査方法

原位置岩盤における孔間弾性波探査、電磁波探査、電気探査は調査断面A、Bの両端の2本のボーリング孔を用いたクロスホール法で行った。各探査での測定項目は、弾性波のP波速度とP波初動振幅減衰特性、電磁波の速度と初動振幅減衰特性、そして電気探査については比抵抗である。

a) 孔間弾性波探査

本研究の調査断面は孔間隔が5mと短く、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望ましい。そこで、測定装置として図-3に示すハザマ式孔間弾性波探査システム<sup>9)</sup>を使用した。本システムは繰り返し発振が可能な機械打撃式発振方法を用いて卓越周波数10~15kHzの高周波波動を発振する。一方、受振装置は圧電型加速度計を受振センサとして内蔵し、3Hz~15kHz程度の波動が同一感度で計測可能である。

弾性波の初動振幅は振幅の減衰がすべて粘性によるも

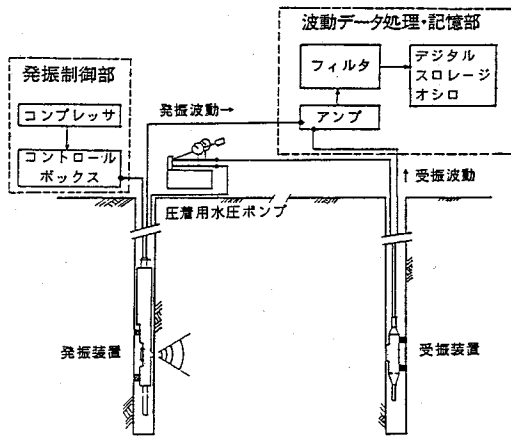
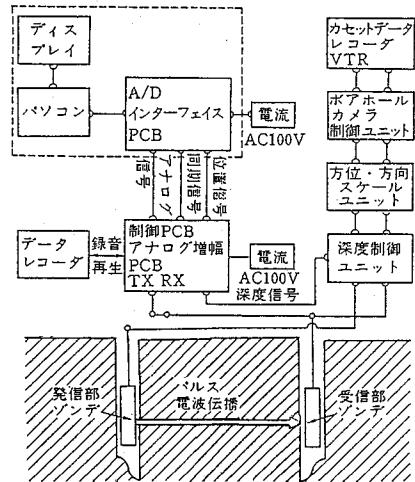


図-3 孔間弾性波探査システム



透過法による探査

図-5 電磁波探査システム

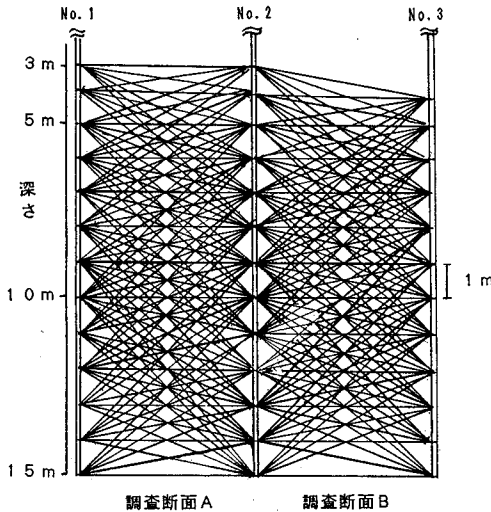


図-4 弾性波の測定波線

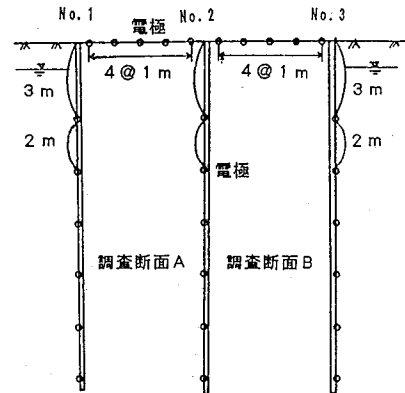


図-6 電気探査における電極配置

のと仮定し、発振・受振波の初期振幅  $A_0$ 、 $A$  と発振点～受振点間の距離  $L$  から振幅比  $(A/A_0)$  および減衰定数  $\alpha$  を式 (1) で定義している。

$$A/A_0 = \exp(-L\alpha) \dots\dots\dots (1)$$

測定は、図-1のNo.2孔に発振装置を挿入し、調査断面Aの調査ではNo.1孔に、調査断面Bの調査ではNo.3孔に受振装置を挿入して行った。測定間隔は基準地表面から深さ3m～15m間を1m間隔とした。図-4に弾性波の測定波線を示す。波線は発振点の深さを基準として高低差が±5m間の受振位置についてのみ設定し、各断面における波線総数は108波線であった。なお、P波速度と振幅のトモグラフィ解析には、発振・受振点間距離が短くかつ構成岩盤に特に大きな力学的不連続性が予測されないため、弾性波の伝播経路を直線と仮定した同時反復法 (SIRT法)<sup>6)</sup>を用いた。

b) 電磁波探査

電磁波探査は、ボーリング孔を利用した透過法による測定が可能な岩盤レーダーシステム ((株) 間組・川崎地質(株)共同開発<sup>7)</sup>) を用いて測定した。発信される電磁波は中心周波数 80 MHz のパルス状波動である。図-5にシステムのブロックダイアグラムを示す。

測定は、孔間弾性波測定と同様にNo.2孔に発信装置を、調査断面AではNo.1孔に、調査断面BではNo.3孔に受信装置を挿入して実施した。なお、電磁波アンテナ長の制約などから、発信・受信点は基準地表面から深さ3m～13m間に1m間隔で設定した。測定波線は孔間弾性波測定の場合(図-4)とほぼ同じである。トモグラフィ解析は電磁波の速度と初動振幅減衰について行い、逆投影法 (BPT法) によって初期モデルを設定し、代数的再生法 (ART法)<sup>8)</sup>により解析した。なお、電磁波振幅の減衰は弾性波波動と同様に式 (1) を用いて粘性による減衰で整理した。

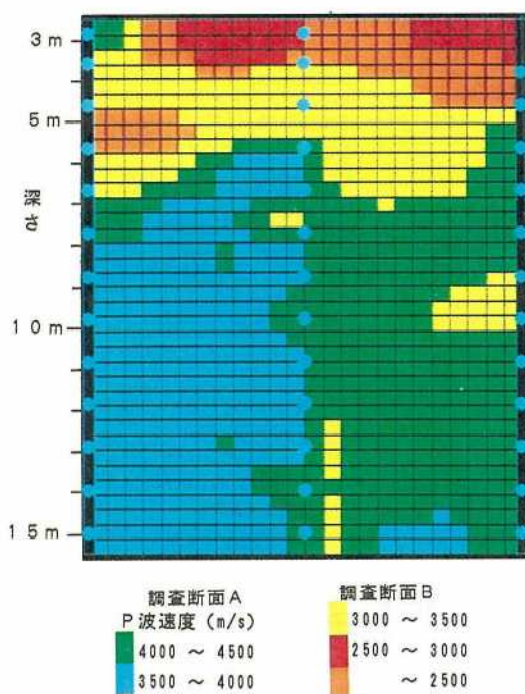


図-7 弾性波 P 波速度のトモグラフィ結果

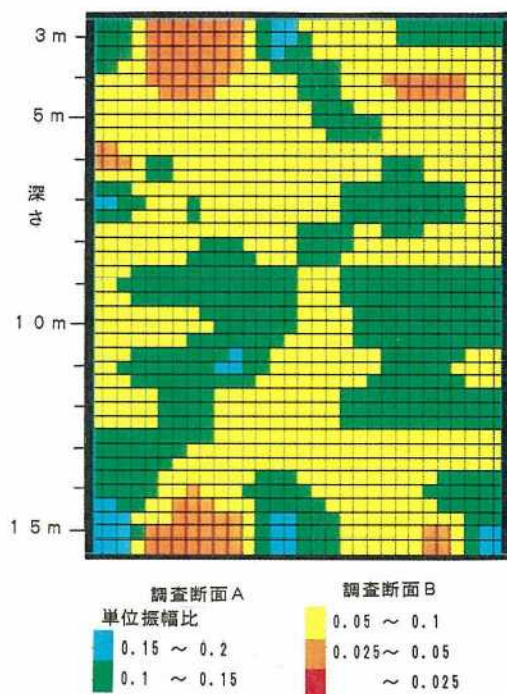


図-8 弾性波 P 波初動振幅減衰のトモグラフィ結果

### c) 電気探査

電気探査は 2 極法電極配置による比抵抗で行った。これは地盤に一对の電流電極を設け人工的に電流を流した場合に発生する地盤の電位を一对の電位電極により測定し、地盤の比抵抗値を測定する方法で、探査には McOHM MELL システム（応用地質（株）製）を用いた。電極は地表面とボーリング孔内に配置し、調査断面 A、B ともに地表面では 1 m 間隔、ボーリング孔内では基準地表面から深さ 3 m～13 間に 2 m 間隔で設置した。図-6 に電極の設置位置を示す。比抵抗値のトモグラフィ解析は、初期モデルを逆投影法（BPI 法）により作成し有限要素法を応用した方法<sup>9)</sup>を用いた。

## 3. 測定結果

### (1) ジオトモグラフィ結果

#### a) 弾性波 P 波速度

弾性波 P 波速度のトモグラフィ結果を図-7 に示す。P 波速度は 2500 m/s～4500 m/s 程度範囲に分布しており、地表面から 3～6 m までは 3500 m/s 以下の領域であり浅い程 P 波速度が低下する傾向にある。また、6 m 以深では P 波速度が 4000 m/s 前後で速度変化の少ない領域が広範囲に分布している。

P 波速度は力学面からみた岩種の違い、地層構造および風化度などに影響を受けるとされる。コア観察結果では 6 m 以浅、以深ともにほぼ同一の岩種であり、調査断面内ではボーリング孔付近と同様の岩盤が連続し

ていると仮定すると、P 波速度分布は風化度などの岩盤状況を反映していると思われる。したがって、弾性波 P 波速度のトモグラフィ結果から以下のような岩盤状況を推定した。

① 地表面から深さ 3～15 m の岩盤は深さ 6 m 付近をおおまかな境界として 2 層構造と捉えた。

② 地表面から 6 m 以深では風化の及んでいない比較的健全な岩盤、深さ 3～6 m 間では地圧の解放などの影響を受けて機械的風化が進み力学的特性が低下した状態の岩盤である。

#### b) 弾性波 P 波初動の振幅

振幅減衰定数  $\alpha$  のトモグラフィ結果を  $\exp(-\alpha)$  の形で表示したものを図-8 に示す。この  $\exp(-\alpha)$  は波動の伝播距離 1 m 間の振幅比を表しており、以後、単位振幅比と呼ぶことにする。

地表面から深さ 3～5 m 間は単位振幅比 0.1 以下、それ以深では 0.1～0.2 程度の分布となっている。地表面近くに減衰の激しい範囲があるが、調査断面内での単位振幅比の分布の幅は小さく弾性波振幅のみ地盤特性の変化は少ないようである。

調査断面 A では単位振幅比 0.15～0.2 の比較的減衰の少ない部分が左下から右上の方向に分布し、それが調査断面 B にも伸びている。調査断面 B でも比較的減衰の少ない部分が左下から右上の方向に分布していることと見ても可能であり、おおむね右上がりの地質構造が推定された。

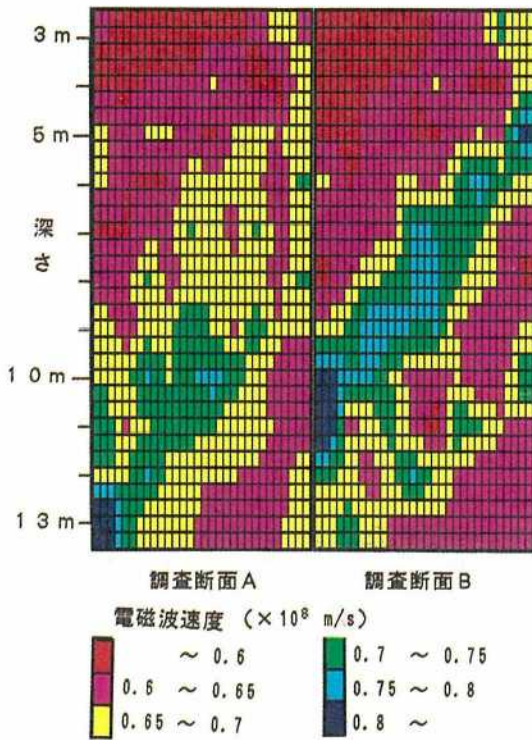


図-9 電磁波速度のトモグラフィ結果

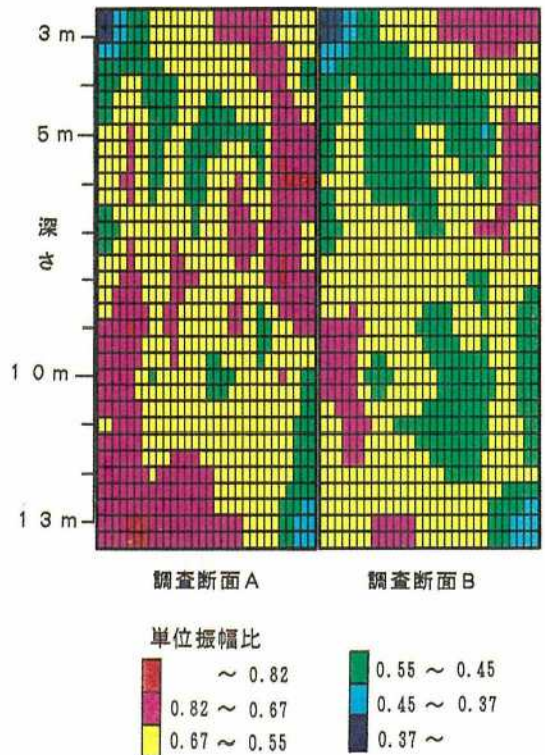


図-10 弾性波初動振幅減衰のトモグラフィ結果

地下空洞の掘削に伴う周辺岩盤の特性変化の調査<sup>10)</sup>では、掘削に伴う亀裂の発生や開口によって振幅の減衰が激しくなることが報告されており、本調査断面においても地質状況が比較的均一に近く、岩片としての風化程度が同様であると仮定すると、岩盤中の亀裂と振幅減衰にある程度の相関性が考えられる。したがって、弾性波振幅トモグラフィ結果から以下のような岩盤状況が推定される。

① 調査断面内では亀裂頻度に関する変化が少なく、探査用ボーリングコア付近の亀裂の状況が調査断面内でも連続している。

② 比較的振幅減衰の小さい部分がA、B両断面を通じて左下から右上方向にかけて分布しており、この部分は亀裂の比較的少ない岩盤と推定される。

c) 電磁波速度

電磁波速度のトモグラフィ結果を図-9に示す。調査断面内の電磁波速度は6~8×10<sup>7</sup> m/sにあり、分布幅は小さい。調査断面Aでは比較的速度の高い部分が左下から右上がりに帯状に分布し、弾性波振幅と似ている。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。

一般に、伝播する媒質が非磁性体と考えると、電磁波速度はその電気的特性によって次式のように表わされ

表-1 調査断面付近の電気的特性

	比誘電率	導電率 (S/m)
岩石(けつ岩)	1.0	0.01
地下水	8.0	0.02

る。

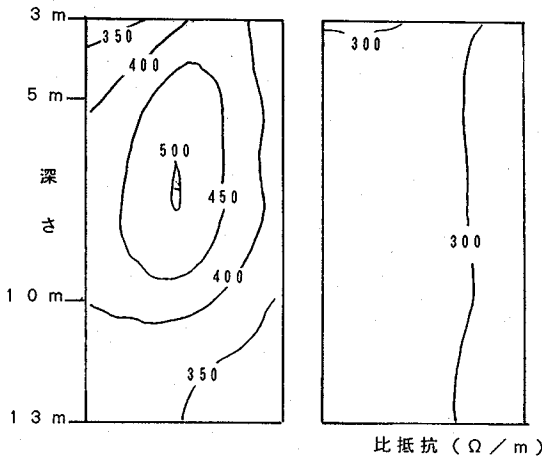
$$V = C / \sqrt{\epsilon r} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、V: 媒質内の電磁波伝播速度 (m/s)

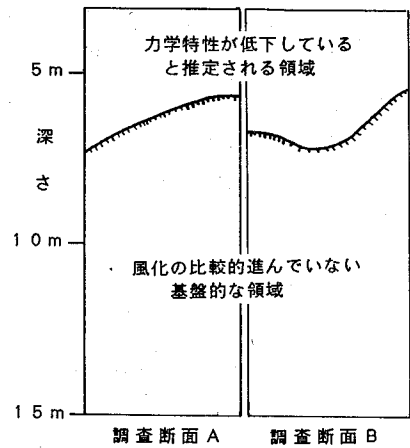
C: 真空中の電磁波速度 (30×10<sup>7</sup> m/s)

$\epsilon r$ : 媒質の比誘電率

したがって、電磁波の伝播速度は経路内の比誘電率の平方根と反比例の関係にある。式(2)を用いて調査断面内の比誘電率を求めると、電磁波速度6×10<sup>7</sup> m/sでは比誘電率が25、同じく7×10<sup>7</sup> m/sでは18程度となり、相対的に比誘電率の小さな部分が左下から右上がりに帯状に分布しているとみることができる。調査断面付近で採取されたけつ岩、および地下水から得られた比誘電率と導電率を表-1に示すが、調査断面が地下水面以下にあり、しかも岩盤は岩石と地下水のみで構成されていると仮定すると、電磁波の伝播経路中に岩石(けつ岩)の比率が高いほど、そこで得られる比誘電率は相対的に小さくなる。したがって、電磁波速度のトモグラフィ結果



図—11 比抵抗トモグラフィ結果



図—12 ジオトモグラフィによる岩級区分的な推定

から以下のような岩盤状況が推定される。

① 左下から右上にかけた地層構造である。

② 亀裂頻度が少ない部分が左下から右上に帯状に分布している。

d) 電磁波初動振幅

電磁波の初動振幅の減衰定数のトモグラフィ結果は弾性波と同様に単位振幅比を用いて図—10に示す。電磁波が媒質中を伝播するとき全ての振幅減衰が粘性に起因しているとする、振幅の減衰は弾性波と同様に式(1)の形で表され、減衰定数 $\alpha$ は導電率 $\sigma$ と比誘電率 $\epsilon_r$ を用いて式(3)で表わされる。この減衰定数 $\alpha$ は導電率に正比例し、比誘電率の平方根に反比例することになり、トモグラフィ結果はそれらの相互関係の分布ともみることできる。

$\sigma/\omega\epsilon_r < 1$  の場合

$$\alpha = 60\pi\sigma/\sqrt{\epsilon_r} \dots \dots \dots (3)$$

ここに $\omega$ :電磁波の角周波数(=2 $\pi f$ : $f$ は周波数)

表—1に示した調査断面付近のけつ岩と地下水の電気的特性を式(3)に代入すると、岩石(けつ岩)における単位振幅比は0.55、同じく地下水では0.66となる。電磁波速度の場合と同様に、調査断面内は岩石と地下水のみで構成されていると仮定すると、岩石の比率の高い場合、電磁波の単位振幅比はわずかであるが小さくなる。調査断面A、Bともに相対的に単位振幅比の小さい範囲が調査断面内の左下と右上に分布しているようである。したがって、電磁波振幅のトモグラフィ結果から以下のような岩盤状況が推定される。

① 比較的亀裂頻度の少ない部分が左下と右上に分布していると考えられるが、決して明瞭であるとは言えない。

e) 比抵抗

比抵抗値によるトモグラフィ結果を図—11に示す。全体として比抵抗は300~500 $\Omega$ m程度と狭い幅のなか

で分布しており、大きな変化はみられない。調査断面Aでは深度7~8m付近に比抵抗が450 $\Omega$ m以上の比較的高い領域がみられ、それを中心に若干右上がりの構造分布となっている。一方、調査断面Bでは、比抵抗が300 $\Omega$ m前後の比較的一様に近い分布となっている。

比抵抗トモグラフィによる調査断面付近の岩盤状況は以下のように推定される。

① 調査断面付近は岩種の異なりや断層など大きな地質的变化がなく、探査用ボーリング付近の状態と同様な岩盤である。

(2) ジオトモグラフィから推定される岩盤状況

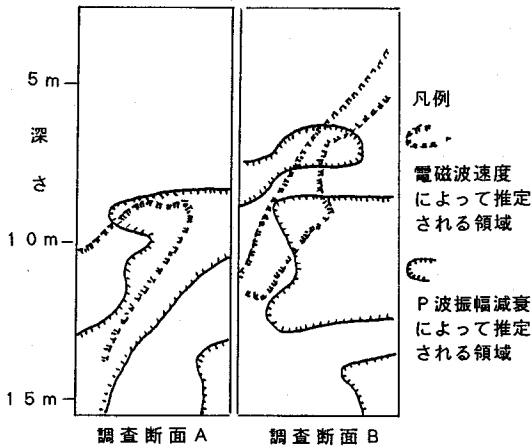
各トモグラフィ結果から個別に推定された内容をまとめ、露頭やコア観察をも参考にした地質構造、岩級区分、そして節理・亀裂など岩盤状況の推定は以下の通りである。

a) 地質構造

P波初動振幅減衰、電磁波速度、電磁波初動振幅減衰および比抵抗値のトモグラフィ結果において、それぞれの特性値の分布範囲(最大値と最小値の差)は小さく調査断面全体でみると地質構造としては変化に乏しい状況と言える。したがって、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、露頭やコアでみられた地質構造(けつ岩と砂岩の互層構造)が連続していると推定された。また、P波初動振幅減衰および電磁波速度のトモグラフィ結果から、調査断面内においても露頭と同様な層構造を形成していると推定された。

b) 岩級区分

P波速度トモグラフィ結果より岩級区分を推定したものを図—12に示す。これによると調査断面内は地表からの深さ6m付近をおおまかな境界として2層構造として捉えられる。したがって、深さ6m以深の岩盤は風化の比較的進んでいない基盤と判断でき、それより上層の深さ3~6mの部分は下層に比べて相対的に力学



図—13 ジオトモグラフィによる亀裂の比較的小さい領域の推定

特性の若干低下している岩盤であると推定される。

c) 節理・亀裂の分布

P波初動振幅減衰および電磁波速度のトモグラフィ結果から亀裂の比較的小さい領域を推定し重ねて示したものを図—13に示す。これによると調査断面 A, Bの左下から右上にかけて1~2条のP波初動振幅減衰の比較的小さい部分,あるいは電磁波速度の比較的小さい部分が連続している。これは、亀裂頻度の比較的小さい岩盤が左下から右上にかけて帯状に分布していると考えられる。

4. 検証調査

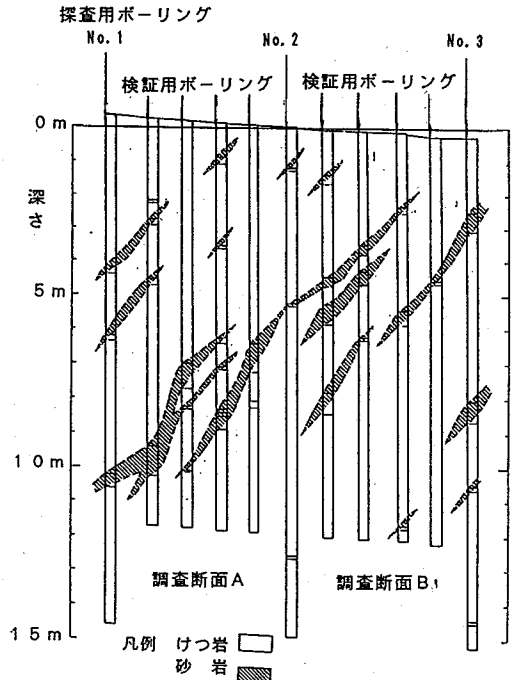
ジオトモグラフィ結果から推定された地質構造, 岩級区分や節理・亀裂の地盤状況を検証するために, 調査断面内に高密度でコアボーリングを行った。検証用のボーリング孔は, 図—1に示した探査用ボーリング(孔間距離5m)の内側に1m間隔で深さ12mまで穿孔し, 調査断面 A, Bの地盤状況を11本のボーリングコアおよびボーリング孔壁の調査で検証した。また, 露頭面で観察される亀裂から亀裂の発達状況についても調査した。

(1) ボーリング等で検証された岩盤状況

a) 地質構造

調査断面の東側切り土面の露頭(写真—1参照), および南西側の地盤面の露頭の観測によると, 地質はけつ岩を主体とし淡灰色砂岩薄層を挟み, 層理面の走向傾斜はEW 50°Nである。ボアホールテレビカメラによる孔壁観察では, 層理面の走向はN 85°E~N 68°W, 傾斜は30°~65°N落ちであり, 平均的走向傾斜はN 80°E, 45°Nである。

これらの地質情報と検証ボーリングおよび探査ボーリング合計11孔のコア観察の結果等を総合した調査断面内の地質状況を以下に示す。また, これを図示したものを



図—14 地質構造の検証結果

が図—14である。

- ① けつ岩, 砂岩のみで構成され, 断層や貫入岩などの大きな地質的变化がない。
- ② 暗灰色のけつ岩を主体とし, 層厚0.1~0.8mの淡灰色の砂岩薄層を10数枚挟む。
- ③ 平均的層理面はN 80°E 45°Nであり, 調査断面内で左下から右上の対角線方向に発達している。
- ④ 砂岩は左下から右上の対角線付近に数枚集中し, 砂岩の帯を構成している。

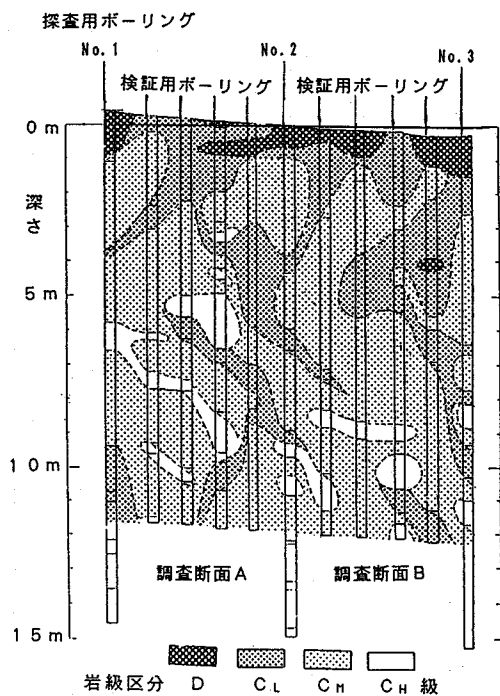
b) 岩級区分

岩級区分の方法は田中の分類<sup>11)</sup>に準拠しつつ, 岩盤評価に客観性を持たせるためにMuller等の主張する岩質(硬さ)と割れ目間隔に着目した評価方法<sup>12)</sup>を採用した。調査断面内の岩盤は区間面積が狭いこともあり比較的变化が少ないので, 割れ目間隔の評価は2cm以下, 2~5cm, 5~10cm, 10cm以上と小さく区分した。

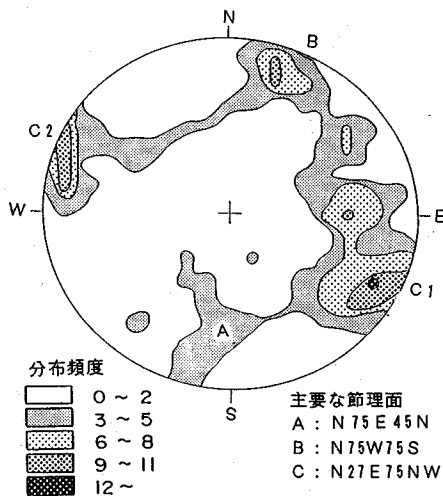
岩級区分の状況は以下の通りである(図—15)。

- ① 岩級は上部で悪く, 下方に向かって良好となる傾向を示す。深度別に岩級区分を試みると以下のようなる。
  - 深さ0~2m間: D~C<sub>L</sub>主体の土砂状
  - 深さ2~6m間: C<sub>L</sub>~C<sub>M</sub>の漸移帯
  - 深さ6m以深: C<sub>M</sub>を主体とし, C<sub>H</sub>, C<sub>L</sub>を伴う比較的健康な岩盤帯
- ② C<sub>L</sub>の分布が層理面に沿う平行な方向と, それに直行する方向の2方向に伸びている。





図一15 岩級区分の検証結果



図一16 露頭で観測された亀裂のシュミットネット

## (2) 節理系の発達状況

露頭で観察された130の節理面のシュミットネットを用いた頻度分布を図一16に示す。その結果、調査断面内の節理面は層理面に平行な節理(A)、層理面に共役な節理(B)、層理面に60°で斜交する節理(C)の3つの節理群にまとめることができた。

## 5. 比較・考察

### (1) ジオトモグラフィ結果と検証結果の比較

ジオトモグラフィ結果から推定された調査断面内(深さ3~15 m)の岩盤状況と検証結果を表一2に示す。

#### a) 地質構造について

検証結果によると岩盤はけつ岩を主体とし砂岩薄層を挟む単純な岩盤構成であり、断層や貫入岩などの大きな地質的变化がない。また、岩級区分でも、 $C_M$ 級岩盤を主体とした変化の少ない状況であり、砂岩薄層の位置や大きさなどの定量的な推定はできていないが、ジオトモグラフィによる推定と検証結果は概略一致していると思われる。

また、電磁波速度トモグラフィにより亀裂の比較的小さいと推定された部分(図一13)は、検証の結果では砂岩層が多く分布する部分(図一14)と一致している。トモグラフィによる推定時点では岩盤がけつ岩と地下水のみによって構成されていると仮定したが、検証の結果、この部分はけつ岩と砂岩の比誘電率の差により生じたものと考えられる。すなわち、電磁波トモグラフィ結果は地質構造(砂岩層の分布)と良い相関関係があると思われる。

#### b) 岩級区分について

検証結果から調査断面内の岩盤は地表からの深さ3~6 m間では $C_L$ から $C_M$ 級岩盤への漸移帯、6 m以深は $C_M$ 級を主体とし一部に $C_H$ 級岩盤を伴う比較的健康な岩盤帯の2層構造に区分できる。弾性波P波速度トモグラフィによる推定においても岩級区分の定量的評価や細かな分布状況までは判別できなかったが、定性的、平均的にみるとジオトモグラフィによる推定と検証結果は一致している。

#### c) 亀裂状況について

層理面と同じ方向に帯状に分布する亀裂頻度の比較的小さいと推定された部分と検証結果の対応を検討した。亀裂頻度の比較的小さいと推定された部分は、P波初動振幅と電磁波速度のトモグラフィ結果に現れているが、そのうち電磁波速度の結果が最も明瞭である。電磁波速度トモグラフィにおける帯状部分は調査断面A、Bともに砂岩薄層の下位に沿うけつ岩部分であり、層理面方向と同じ方向に伸びている。また、帯状部分は $C_L$ 級岩盤を避けてほとんど $C_M$ 、あるいは $C_H$ 級岩盤部分に位置している。電磁波速度トモグラフィでの帯は、検証結果から得られたけつ岩の比較的健康な岩盤に層理方向に沿って分布しており、この部分は調査断面内でも亀裂頻度が比較的小さい部分と判断される。しかし、検証結果から比較的小さい亀裂頻度の少ないとみられる部分の全てを電磁波速度トモグラフィで捉えられているわけではない。

### (2) トモグラフィによる地盤状況推定の可能性

トモグラフィ結果と検証結果を比較すると、P波速度に関しては平均的な岩級区分の状態を、電磁波速度に

表一2 トモグラフィと検証結果の比較

	地質構造	岩級区分	節理・亀裂
弾性波P波速度		<ul style="list-style-type: none"> <li>深さ6mを境とした2層構造</li> <li>6m以深は基盤的存在</li> <li>6m以浅は力学的特性が低下</li> </ul>	
弾性波P波初動振幅	<ul style="list-style-type: none"> <li>おおむね右上がりの地層構造</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂頻度に大きな変化なし</li> <li>相対的に亀裂の少ない部分が左下～右上にかけて存在</li> </ul>
電磁波速度	<ul style="list-style-type: none"> <li>左下から右上への地層構造</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>相対的に亀裂の少ない部分が左下～右上にかけて存在</li> </ul>
電磁波初動振幅			<ul style="list-style-type: none"> <li>相対的に亀裂の少ない部分が左下、中央上方、右上に存在</li> </ul>
比抵抗	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質に大きな変化はない</li> </ul>		
トモグラフィによる総合評価	地質に大きな変化はみられず、左下から右上への地層構造が推定される	深さ6mを境とした2層構造で6m以深は基盤的存在、6m以浅は力学特性が低下と推定	亀裂の状況に大きな変化はみられないが、比較的亀裂の少ない部分が左下～右上にかけて存在
検証結果	げつ岩、砂岩で構成され、断層等の大きな変化はない。平均的層理は左下から右上方向で、対角線位置に砂岩層の帯がある	深さ3～6mはC <sub>L</sub> ～C <sub>H</sub> の漸移帯で深さ6m以深はC <sub>H</sub> 主体の比較的健全な岩盤であり、2層構造とみることもできる	3つの走向傾斜の群が存在する <ul style="list-style-type: none"> <li>層理に平行な群</li> <li>層理に共役な群</li> <li>層理と60°で斜交する群</li> </ul>

については地質構造に関する状態を、比抵抗については全体的な状態を定性的に把握できたと思われる。そして、これらのトモグラフィ結果を総合することにより、本調査断面のように地質状況の変化が乏しい場合でも地質構造や岩級区分など全体的な特徴を定性的に推定することができた。しかし、定量的・具体的に地盤状況や亀裂状況などについて推定することは難しいと判断している。

弾性波P波初動振幅や電磁波初動振幅ではこれらの岩盤中での基礎的な伝播特性が十分に明確にはなっていない。また、電磁波初動振幅のトモグラフィ結果(図一10)と検証による岩級区分(図一15)ではかなり良い相関を示す部分と決して良い相関を示さない部分が混在しており、明瞭な地盤状況を導き出すことができなかった。本調査では振幅減衰の原因として粘性減衰を対象としているが、振動の減衰には粘性減衰のほか波動の3次元的な広がりによる減衰、亀裂面での反射や散乱による減衰など多くの因子が含まれており、トモグラフィで得られた結果がどのような地盤状況を反映しているのか不明瞭である。したがって、トモグラフィ結果を有効に利用するためには精度良く測定する探査方法、正確なトモグラフィ解析方法(アルゴリズム、収束判定など)のほか、弾性波、電磁波、比抵抗調査で得られる特性と地盤

状況を結ぶ基礎的な関係を明確にする必要がある。

弾性波、電磁波、比抵抗トモグラフィはそれぞれに反映できる地盤状況の特徴が異なるため、1つの方法のみによって地盤状況を把握することは難しい。そのため、複数の異なる地盤状況の特徴を反映できるジオトモグラフィ結果により総合的に判断する必要があると思われる。また、ジオトモグラフィ結果を評価、利用する場合には、現段階ではある程度定性的な地盤状況しか表現し得ないということに留意して利用することが必要である。

## 6. あとがき

5つの探査特性(弾性波P波速度、P波初動振幅減衰、電磁波速度、電磁波初動振幅減衰、比抵抗値)によるジオトモグラフィ解析結果から、調査断面内の地盤状況を推定し、調査断面に高密度で穿孔した検証用ボーリングのコアによる地盤状況と比較、検討を行った。その結果、P波速度では岩級区分を、電磁波速度では亀裂頻度の少ない部分を、P波初動振幅減衰と電磁波速度では層理面の方向を定性的に捉えていることなどが分かった。しかし、正確な分布形態の把握や定量的な評価については困難であり、定性的あるいは相対的な評価にとどま

ていることも判明した。

ジオトモグラフィから得た結果(情報)を定量的に評価するためには、地盤中における各特性の伝播特性の把握が必要であるが、実際の地盤中での伝播特性に与える影響は複雑であり、1つの影響因子のみを定量的に評価することは難しい。しかし、基本的な幾つかの伝播特性を定性的にでも把握することができれば、ジオトモグラフィ結果を工学的に評価・利用することは十分意義があると思われる。また、今回は5つの探査特性のトモグラフィ結果から個別に地盤状況を推定したが、今後、各探査特性間の関連性などが明らかになれば、複数のトモグラフィ結果を重ね合わせて推定することも可能になると思われる。

一方、本研究に用いた孔間弾性波探査システムならびに岩盤レーダーシステムは装置上の開発を完成したとはいえ、その使用方法のノウハウを含めた意味での計測技術としては完成の段階にあるとは言えない。また、電気探査は使用マニュアルに従って行ったものであり、細部におけるノウハウがどの程度実現されたかは明らかではない。今回の研究は計測のエキスパートでなくても従事経験の豊富な土木技術者が計測を行うという前提で行っている。したがって、本研究で得られた結果に機器の性能、習熟度や探査手法に関するノウハウのレベル等の問題が含まれていることが予想される。しかし、本研究で得られた成果はここで述べた研究の前提条件の上で非常に有効な情報を与えていると考えられ、今後の施工管理でのジオトモグラフィの利用に大きな参考となるものと思われる。

最後に、本研究にご協力を戴いた宇部興産(株)米田俊一氏、川崎地質(株)登内正治氏、日本基礎技術(株)寺戸康隆氏、ダイヤコンサルタント(株)西田薫氏ならびに山口大学社会建設工学科の学生諸氏に深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) たとえば、戸井田・小淵・升元・青木：サイスマック・トモグラフィの亀裂探査への適用性について、物理探査学会第83回学術講演論文集、pp.122~127, 1990.
- 2) たとえば、石井・加藤・六川・佐藤：電磁波トモグラフィのデータ処理及び解析、物理探査学会第83回学術講演論文集、pp.251~255, 1990.
- 3) たとえば、島裕雅：比抵抗トモグラフィの基礎と応用、物理探査第42巻第6号、pp.442~457, 1989.
- 4) たとえば、下茂・井尻・飯星・橋本・長田：弾性波および電磁波トモグラフィによる花崗岩中の亀裂探査、物理探査第85回学術講演論文集、pp.203~208, 1991.
- 5) 蓮井・世一・山下：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.
- 6) 蓮井・世一・山下：原位置岩盤における孔間弾性波測定結果とその処理について、第7回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.169~174, 1987.
- 7) 向上・北村・塩崎・登内：ポアホール型岩盤レーダーによる現地探査実験結果について、第7回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.163~168, 1987.
- 8) 向上・北村・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、間組研究年報1989年版、pp.199~208, 1989.
- 9) 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回学術講演論文集、pp.206~211, 1989.
- 10) Yoichi, Hasui, Yamashita : Field Measurements on the Behavior of the Rock Surrounding an Underground Cavern During Excavation, Proc. of Int. Symp. on Large Rock Cavern, pp.1099~1110, 1986.
- 11) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門、pp.28~36, 山海堂, 1964.
- 12) MÜLLER, L. : Der Felsbau, Erster Band, pp.246~252, 1963.

(1991.12.26 受付)

## EVALUATION ON GEOLOGICAL CHARACTERISTICS USING SEISMIC, RADAR AND RESISTIVITY TOMOGRAPHY

Akinori HASUI, Hidetoshi YOICHI, Haruo KITAMURA and Koji NAKAGAWA

In-situ investigations were carried out to examine the performance of seismic, radar and resistivity tomography techniques. Geological structures and characteristics of the site were estimated integrating all the tomography results.

Several boreholes were drilled in the tomography sections after the geophysical measurements. The observed results of borehole cores were used to verify the results of tomography analyses.

As the result, the followings were concluded. ① Seismic tomography by primary wave velocity is effective to classify rock mass quality. ② The stratum structure is clearly expressed using the tomography of radar wave velocity. ③ It is important to integrate all the tomography results for the estimation of geological characteristics such as mechanical properties and fracture distribution.