

(69) 比抵抗トモグラフィによる 水理地質構造の異方性評価について

鹿島技術研究所 正会員 ○戸井田 克
鹿島技術研究所 正会員 升元 一彦
鹿島技術研究所 正会員 日比谷 啓介

Evaluation of Hydrogeological Structure for the Anisotropic rock mass by Resistivity Tomography

Masaru TOIDA, Kajima Technical Research Institute
Kazuhiko MASUMOTO, Kajima Technical Research Institute
Keisuke HIBIYA, Kajima Technical Research Institute

Abstract

A new geotomography technique - resistivity tomography is under examination as a prospecting technique for investigating hydrogeological conditions of rock mass. Authors have executed in situ resistivity tomography experiments for the various conditions of hydrogeological structures of rock mass.

This paper discuss the results of in situ resistivity tomography tests conducted in sedimentary rock mass to identify the anisotropy of hydrogeological structures. Resistivity loggings were also applied in the boreholes which are used for the resistivity tomography test.

These results help interpret the evaluation of resistivity tomography. It is concluded the synthetic evaluation of resistivity tomography results is quite useful for interpreting the hydrogeological structure of anisotropic rock mass.

1. はじめに

近年、岩盤空洞の利用が大規模化、大深度化の方向に進むのに伴い、建設対象となる岩盤内部の地質状況や亀裂分布状況だけでなく、地下水の賦存状態に関するより詳細な情報の必要性が増大している。ジオトモグラフィ（比抵抗、弾性波、電磁波）は、このニーズに応える物理探査技術として注目されており、筆者らは複数のトモグラフィ手法の組合わせによる岩盤の地下構造探査が有効であるとの観点から研究を進めている^{1), 2)}。特に、比抵抗トモグラフィについては比較的広い領域を対象とした水理地質構造評価に適しているとの知見を原位置試験結果から得ている。³⁾

今回、同一岩盤サイトで、水みちとなる破砕帯や地層境界に直交する断面と平行する断面の2断面において比抵抗トモグラフィ測定を行った結果、主に層理や破砕帯の存在に起因する水理地質構造の異方性を比抵抗分布から評価できる見通しが得られたのでここに報告する。

2. 原位置試験の概要

2.1 試験位置の水理地質構造

試験位置は図-1の平面図に示されるとおり、3孔のボーリング孔の孔間となる2断面、すなわちA孔～B孔間断面及びB孔～C孔間断面が比抵抗トモグラフィによる水理地質構造評価対象である（以下、2つの断面を各々AB断面ならびにBC断面と称する）。図-1中に示した3孔のボーリング孔は、いずれも土被り300～500mに位置するトンネル内から鉛直下向きにコアボーリングされたものである。試験位置の岩盤は全体として堅硬であり、具体的な地質構造は図-1中に示したように走向がAB断面方向の泥岩と砂岩泥岩互層から構成されるほぼ整層構造である。

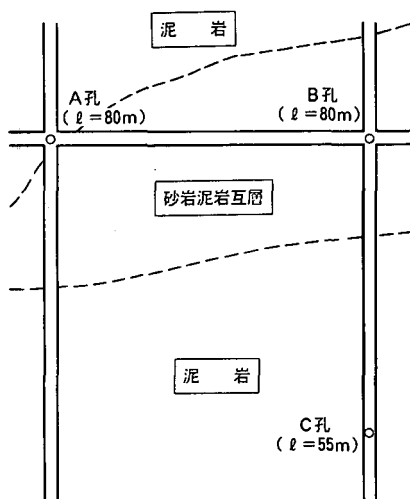


図-1 調査位置の平面図

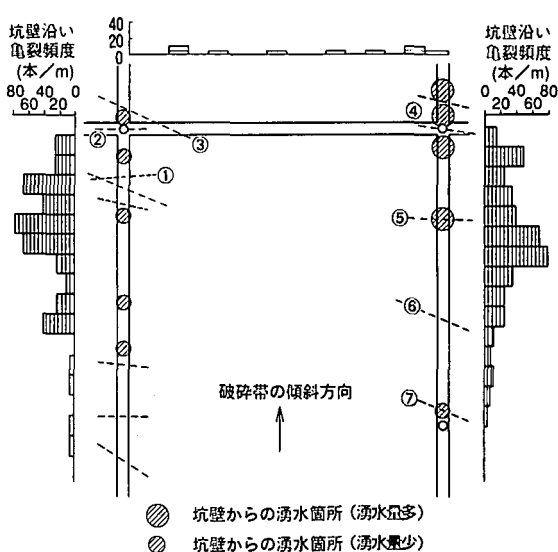


図-2 調査位置の亀裂分布及び湧水状況

また、測定位置付近のトンネル壁面の亀裂分布状況や湧水状況を整理したものが図-2であり、これらより水理地質的特徴をA B断面とB C断面を対比する形で以下に列挙する。

- 地層の走向方向であるA B断面のトンネル坑壁ではほとんど亀裂が見られないのに対し、走向と直交するB C断面の坑壁では亀裂が卓越し、さらにA B断面にほぼ平行な破砕帯もいくつか存在している。
- 多くの破砕帯や地層境界付近に湧水が認められることから、破砕帯や地層境界を横切るB C断面のほうがA B断面よりも地下水の賦存量が多いと思われる。

以上のトンネル坑壁沿いの地質観察結果と共に、A、B、C 3孔のボーリングコアの観察結果から想定されるA B断面およびB C断面の地質構造を図-3に示す。さらに、これらの地質状況資料にトンネル坑壁付近で実施した原位置での弾性波速度測定結果も勘案して、A B断面及びB C断面の水理地質構造を以下のように推定した。なお、坑壁沿いの弾性波速度測定結果は、A B断面で4.9～5.6km/sec、B C断面で4.5～5.0 km/secであった。

- ① A B断面は砂岩泥岩互層が泥岩層よりも卓越して分布しており、破砕帯や亀裂は存在するものの測定方向が層理にほぼ平行であることから亀裂頻度は0～10本/mと小さく、断面全体にわたっての破砕帯等の連続性も認められない。したがって、測定断面が層理面や破砕帯を横切らないために原位置弾性波速度はB C断面よりも大きくなっていると思われる。また、坑壁やボーリング削孔時の湧水も比較的少なかったことから大きい水みちはないと判断された。
- ② B C断面はA B断面と同様に砂岩泥岩互層が卓越しているが、層理や破砕帯と交差する方向であるために坑壁の亀裂頻度は5～50本/mと大きく、連続した破砕帯も断面内に多く見られる。したがって、これらの層理や破砕帯等を横切るために原位置弾性波速度は層理に平行方向なA B断面よりも小さい値を示していると考えられる。また、坑壁やボーリング削孔時に湧水が認められたことから水みちが多く存在するものと予想された。
- ③ すなわち、A B断面が層理や亀裂・破砕帯と平行方向であるために水みちとほとんど交差していないのに対してB C断面は層理や亀裂・破砕帯と直交する方向であり、水みちと数多く交差していることが予測できる。したがって、A B断面とB C断面では水理地質特性がかなり異なると考えられる。

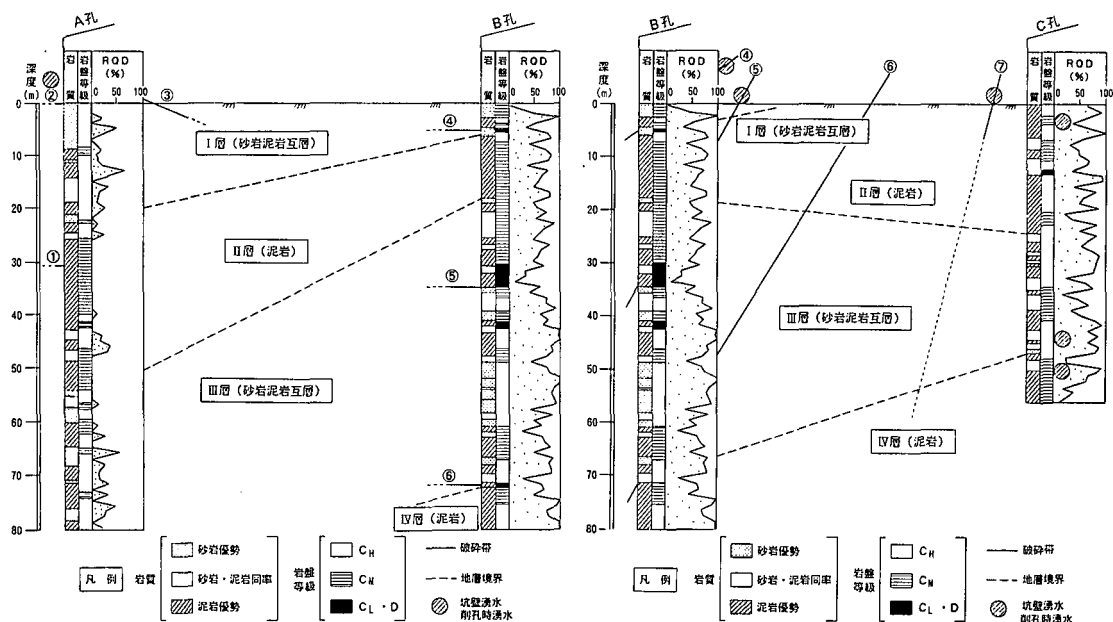


図-3 AB断面及びBC断面の地質構造

2.2 原位置試験方法

前項で推定した水理地質構造の異方性について検討するために、比抵抗トモグラフィを主体とする原位置試験を実施した。比抵抗トモグラフィは、電流電極（2本）、電位電極（2本）のそれぞれ的一方を遠電極にとる2極法配置で行った。測定電極は、図-4に示すようにA、B、Cの各ボーリング孔内に2.5m間隔で設置した。電極数はAB断面で54、BC断面では46であった。また、比抵抗測定結果に大きな影響を及ぼす2つの遠電極の設置位置については、できるだけ測定地点から離すことが望ましかったためにA、B、Cのボーリング孔から約2km離れたトンネルの坑口付近とした。

また、比抵抗トモグラフィ測定に先立って3本のボーリング孔を利用した比抵抗検層を行い、比抵抗と岩種・岩級並びに破砕帯の有無等とを対比した。比抵抗検層については、電極間隔を0.25mと1mにするノルマル法での測定を行った。

3. 試験結果

本項では、比抵抗トモグラフィ測定結果と、これに先立って実施した比抵抗検層結果について述べる。なお、これらの測定時にはA、B、Cいずれのボーリング孔からも2~10ℓ/分程度の湧水（C、B、Aの順に多い）が認められ、その電気伝導度はいずれも140μS/cm程度であった。

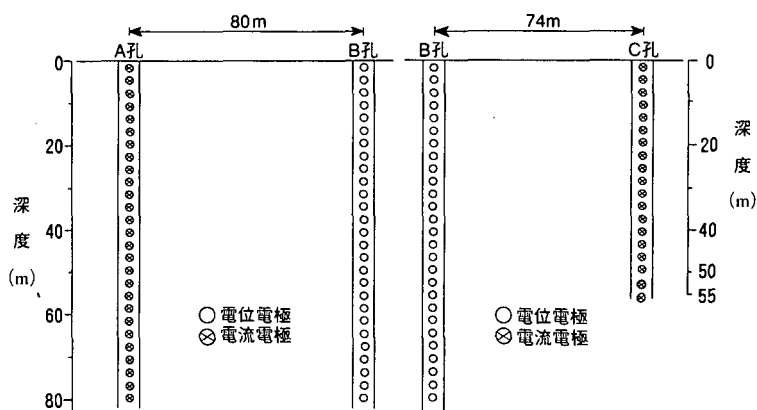


図-4 比抵抗トモグラフィ測定方法

3.1 比抵抗検層結果

比抵抗検層結果の見掛け比抵抗は、後述のトモグラフィ測定結果と共に図-6に示してある。比抵抗検層ではある一定の電流を流した時の電位差のみを測定するため、実際に岩盤中に流れている電流の値を測定できないので見掛け比抵抗と表す。全体として砂岩泥岩互層の占める割合が多い順、すなわちB孔、A孔、C孔の順に見掛け比抵抗値が大きくなっている。この傾向は、図-5として示した見掛け比抵抗と岩種の関係において砂岩泥岩互層の方が泥岩よりも見掛け比抵抗が大きくなることから確認できる。また、図中に黒塗りで示したB孔の破碎帯部では砂岩泥岩互層がやや卓越しているにもかかわらず、0.25m及び1.0mのどちらの電極間隔でも見掛け比抵抗が小さくなっている。

このように、比抵抗検層結果からは砂岩泥岩互層より泥岩の方が見掛け比抵抗が小さく、破碎帯の存在が認められる部分での見掛け比抵抗も小さくなることがわかった。

3.2 比抵抗トモグラフィ測定結果

AB断面及びBC断面の比抵抗トモグラフィ測定結果の比抵抗分布を図-6に示す。比抵抗トモグラフィ測定では実際に岩盤中に流れた電流と電位差の値を測定し、これらから岩盤の真の比抵抗を求めている。この図より、AB断面およびBC断面の特徴を列挙すると以下のとおりである。

- ① AB断面では、A孔浅部（0～20m）とB孔深部（70～80m）に、 $40\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗ゾーンとこれを覆う $40\sim 80\Omega\cdot\text{m}$ の比抵抗ゾーンがあり、これ以外は $70\Omega\cdot\text{m}$ 以上の比較的高い比抵抗となっている。2つの低比抵抗ゾーンについては、各々③破碎帯と⑥破碎帯の存在が現れているものと解釈できる。すなわち、図-2～3に示したようにAB断面には①から⑥までの破碎帯が存在しているが、③と⑥の破碎帯のみがAB断面を横切っているために、トモグラフィ測定では比較的広い範囲にわたって小さい比抵抗が検出されたと思われる。また、浅部の泥岩層と深部の砂岩泥岩互層の比抵抗を比較すると深部の砂岩泥岩互層のほうが高いようであり、比抵抗検層結果と整合している。
- ② BC断面では、AB断面に比べて全体に比抵抗値が小さく、特にB孔浅部で $10\Omega\cdot\text{m}$ 以下のゾーンが見られるが、B孔の50mからC孔の20mを結ぶラインを境界として深部の比抵抗が高くなる傾向にある。B孔浅部の低比抵抗ゾーンは、図-2～3にみられるトンネル坑壁に湧水が多く破碎帯が密集している部分に一致しており、深部の比抵抗が大きい部分は主に砂岩泥岩互層に対応していると考えられる。

3.3 水理地質構造の異方性について

ここでは、事前のトンネル坑壁やコアの観察に基づいて推定したAB断面及びBC断面の水理地質構造と実測した比抵抗トモグラフィ測定結果並びに比抵抗検層結果とを対比した考察結果を述べる。

- ① AB断面とBC断面では、層序はほぼ整層構造で泥岩と砂岩泥岩互層の構成割合（3：7）も同程度であるのに、BC断面の方が比抵抗が小さい。これは、水みちとなる地層境界や破碎帯がAB断面よりもBC断面を多く横切っているためと考えられる。
- ② AB断面については、地層境界や破碎帯が測定断面を横切っていないためにあまり帯水しておらず、全体的に高い比抵抗を示したと考えられる。しかし、比抵抗トモグラフィの測定方向に対してある程度の角度を持って交差する破碎帯（③、⑥）は低比抵抗ゾーンとして検出されることがわかった。

4. おわりに

本論文では、岩種の構成や堆積方向が同様でありながら破碎帯等の分布が異なる2断面を対象として比抵抗トモグラフィ測定を実施し、水理地質構造の異方性について検討した。その結果、水みちとなる破碎帯や地層境界部を横切る測線では岩盤全体の比抵抗が小さくなり、水みちの部分は特に低比抵抗ゾーンとして検出され、一方、破碎帯や地層境界部を横切らない測線では岩盤の比抵抗が比較的高く検出されることがわかった。

今後、比抵抗トモグラフィを使用したより高精度な水理地質構造評価のためには、室内・原位置での比抵抗による岩盤構造の検出性能の確認や、他のトモグラフィ技術との組み合わせによる総合的な地下構造評価手法の研究が必要と考えられる。

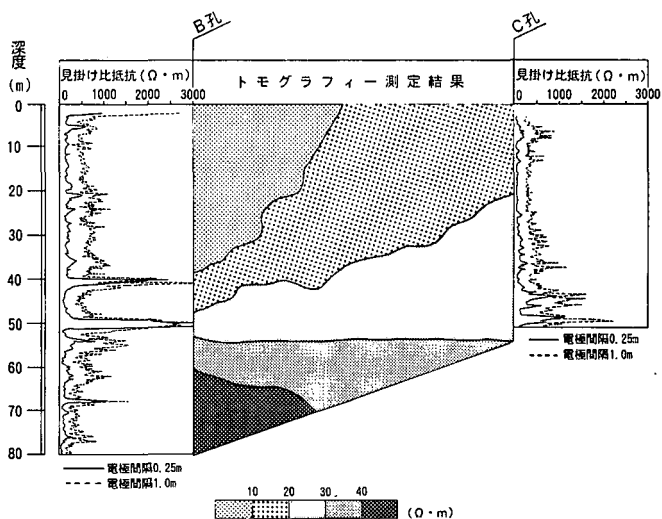
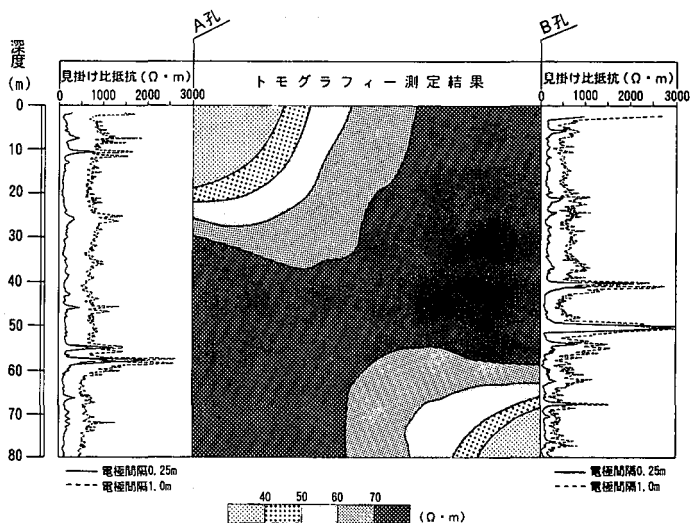
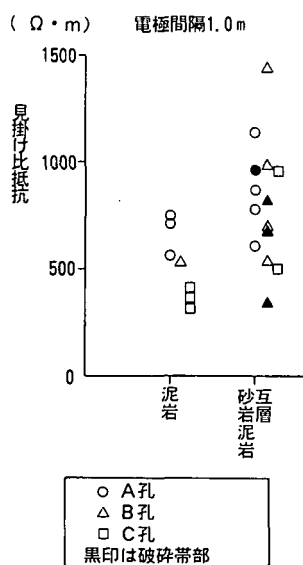
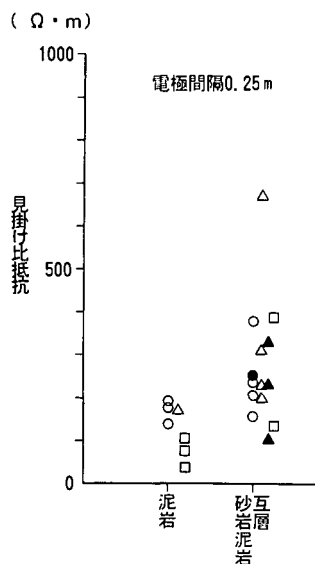


図-5 岩種と見掛け比抵抗値の関係

図-6 比抵抗トモグラフィー測定結果
(A B断面及びB C断面)

参考文献

- 1) 日比谷啓介、稲生道裕、升元一彦：電磁波トモグラフィによる岩盤の含水状態評価について、第25回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp. 256～260、1993
- 2) 戸井田克、小淵考晃、升元一彦、青木謙治：サイスミ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回学術講演会論文集、pp. 122～127、1990
- 3) 戸井田克、日比谷啓介、稲葉武史、稲生道裕、升元一彦：比抵抗トモグラフィによる岩盤の水理地質構造評価について、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp. 331～336、1994