

音響トモグラフィ・比抵抗トモグラフィ法による 坑道周辺岩盤の水理特性評価

ESTIMATION OF EXCAVATION DISTURBED ZONE IN ROCKS AROUND CAVERNS USING RESISTIVITY TOMOGRAPHY AND ACOUSTIC TOMOGRAPHY

鈴木浩一*・中田英二*・南将行**・日比野悦久**・谷智之***・榊原淳一****

Koichi SUZUKI, Eiji NAKATA, Masayuki MINAMI, Etsuhisa HIBINO,

Tomonori TANI, and Jyunichi SAKAKIBARA

The objective of this study is to estimate the distribution of an Excavation Disturbed Zone (EDZ) around caverns or tunnels, which are excavated about 500m deep in pre-Tertiary hard sedimentary rocks. We conducted resistivity tomography and acoustic tomography using two boreholes drilled 5m in length horizontally from the wall side of the caverns in pre-Tertiary conglomerate. We detected low resistivity and low acoustic wave velocity zone around the wall of caverns. These profiles were verified by the results of permeability tests and evaporation tests performed at the same boreholes. These anomaly zones matched high permeability zone caused by open fractures.

Key Words: resistivity tomography, acoustic tomography, excavation disturbed zone, cavern

1. はじめに

地下空洞の掘削に際しては、周辺岩盤の挙動を把握し空洞の力学的な安定性や透水性を評価・確認することが重要である。調査対象の空洞を挟んで掘削前後に弾性波トモグラフィ法を行い、岩盤掘削に伴うゆるみ域を捉えた事例(二宮ほか, 1989)¹⁾や、弾性波・比抵抗・電磁波トモグラフィを行い、ゆるみ域と含水状況の変化を把握した例が報告されている(桑原ほか, 1995)²⁾。しかし、ゆるみに伴う比抵抗・弾性波速度の変化から、岩盤の工学的な物理特性との相関性を評価した事例はあまり報告されていない。本論文では、先第三紀堆積岩中の地下空洞の掘削に伴うゆるみ域を可視化することを目的に、坑道測壁からの水平孔を利用した音響トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィ法を行った。また、空洞壁面に円周状に測線を設置し、空洞掘削後1年および2年経過時点で高密度電気探査法の測定を行った。さらに、同じ水平孔で実施した短区間透水試験・蒸発量試験の結果、および採取したコア試料による室内試験結果を総合的に解釈し、探査結果より空洞周辺岩盤のゆるみ域を評価できる可能性について検討した。

2. 調査地点の概要

物理探査法を実施した地点は、山岳地帯の地山被り約500mに掘削した地下空洞である。試験箇所(A地点)の地質は、白亜紀の粗粒砂岩・礫岩の巨礫よりなる新鮮な混在岩層で間隙率は1%以下の極めて硬質な堆積岩である。地下坑道測壁より掘削した2本の水平孔(長さ5m, 孔間距離60cm)を利用して、音響トモグラフィ法および比抵抗トモグラフィ法を実施した(図-1(a))。試験箇所(B地点)は、TBM工法により掘削したトンネル(直径2.6m)で、主として頁岩よりなる硬質な堆積岩である。トンネル壁面の円周方向に設置した測線において高

* 正会員 (財)電力中央研究所 地圏環境部, ***正会員 (株)東電設計

** 正会員 (株)東京電力 土木建設部, ****正会員 (株)川鉄シビル

密度電気探査法を行った(図-1(b))。

3. 測定・解析方法

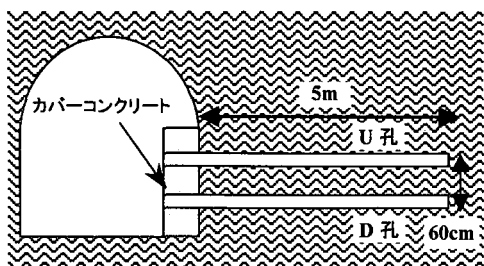
(1) 音響トモグラフィ法：本手法は圧電式の孔内発信器(ピエゾ震源)と多連の受振器(ハイドロフォン)を2本の計測孔に挿入して、孔間を伝播する音響波の速度や減衰率を計測して速度構造や間隙率の分布を求める探査技術である。従来の弾性波トモグラフィ法と異なる点は、発震信号に Pseudo Random Binary Sequence Code (PBRs コード)を用いており、出力の小さい孔内発震器でも数 10kHz の周波数の波を数 10m～数 100m 到達させた計測を行うことが可能である。PBRs コードとは、任意の周波数に対し(図-2(a))、ある所定のコード数(図-2(b))だけ正弦波を正負反転させて連続的に発震することにより任意の周波数を制御でき、発振信号と受信信号の自己相関関数を計算することによりパルス状の伝播波形を得ることができる(図-2(c))。同手法は A 地点で適用し、計測孔(U 孔, D 孔)は水で飽和するように孔口に塩ビパイプを設置し、D 孔に発信機、U 孔に受振機を挿入した。測点は壁面より 0～2m 区間は 10cm 間隔、2～4m は 20cm 間隔で配置した。解析では速度断面・減衰率断面だけでなく、地盤の間隙率や透水係数の空間分布まで求めることが可能である。地盤間隙内の流体挙動原理である Biot 理論(Biot, 1956)³⁾や Squirt Flow 理論(Dvorkin, et. al, 1994)⁴⁾などを地盤の種類により使い分ける必要がある(図-3(a),(b))。本地点は硬質な堆積岩であるため Squirt Flow 理論を用いた解析を実施した。本理論は図-3(b)で示すように、粒子間に存在する間隙水が音響波によりにじみ出る現象(Squirt Flow)を利用し、速度の分散現象を生じる周波数特性(図-3(c))から速度変曲点を求め、式(Eq.2)により地盤の透水係数が計算できる。本実験ではこの分散が生じると考えられる 15kHz～78kHz の周波数を使用した。

(2) 比抵抗トモグラフィ法および高密度電気探査法：比抵抗トモグラフィ法の測点配置は A 地点の音響トモグラフィ法と同様である。電極配置は二極法配置により行い、遠電極は水平孔より約 100m 離れた地点に設置した。B 地点のトンネル壁面を取り囲む円周方向の測線沿いに床面を除く壁面に 25cm 間隔で電極を設置した(図-1(b))。電流電極対(C1, C2)と電位電極対(P1, P2)を移動させる dipole-dipole 法により電極隔離係数 n (電流電極 C_1C_2 あるいは電位電極 P_1P_2 の間隔を a とした場合、 C_1C_2 と P_1P_2 間の距離は na)は 10 まで測定を行った。計測時期は、掘削後 1 年および 2 年経過時の 2 回である。電極は導電性ゲルによる非分極電極(ジオゲル電極；応用地質製)を壁面に 25cm 間隔で貼り付けた。測定は電中研式自動測定装置(鈴木ほか, 1992)⁵⁾を使用し、0.4 秒周期の矩形波を送信して計測した。解析は有限要素法による平滑化制約条件付き最小二乗法を使用した(佐々木, 1988)⁶⁾。

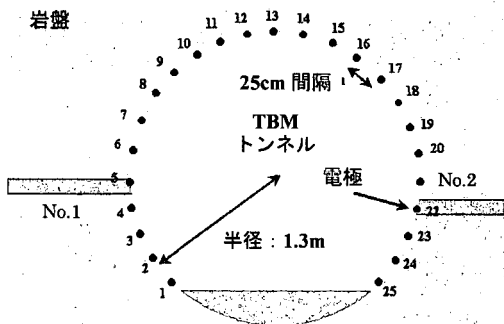
(3) 電気検層：測線より 1m 横方向に移動した壁面に 2 箇所(No.1 および No.2 孔)掘削した 2m 長のボーリング内で行った。長さ 2m の塩ビパイプ(φ20mm)の先端部 4 個所に 10cm 間隔で電線を幅 2cm で巻きつけた電極を使用し、各孔内で 10cm ごとに引き抜きながら Wenner 配置で計測を行った。以上、各地点で使用した計測装置の概略の仕様を表-1 に示す。

4. 解析結果および考察

(1) A 地点：周波数 31kHz の速度と減衰率の解析断面を図-4(a), (b)に示す。横軸はカバーコンクリート表面からの距離(これより KC.)を示す。速度(P 波)は 4.2～4.9km/s の範囲を示し、硬質な堆積岩としては妥当な値である。空洞壁面に接する 1m 区間(KC.0.5～1.5m)は相対的に低速度になっている。減衰率は 0.1～0.4dB/m/kHz を示し、孔内に残存していた空気の影響でボーリング孔沿いの断面周辺部が大きくなっている。換算した間隙率および透水係数断面(図-4(c), (d))では、間隙率は 0.02～0.15 の範囲を示し、速度断面と同様に空洞壁面 1m の区間は大きくなっている。換算した透水係数は 10^{-9} cm/s オーダーを示し、壁面 1m の区間は相対的に大きい。比抵抗断面図(図-5)でも同様の傾向があり、岩盤比抵抗は 1000～5000Ωm を示すが、壁面近



(a)測線及び計測孔のレイアウト(A 地点)



(b)測点配置(B 地点)

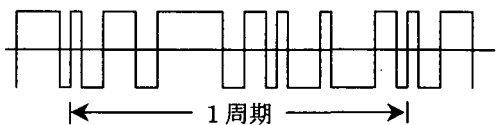
図-1 調査地点の測線・ボーリング配置図

表-1 測定装置の主な仕様

1)音響トモグラフィ	
ピエゾ発信器	φ 44mm×1200mm (ITC 社製)
受振器	φ 20mm×24ch 川鉄製)
PC	4ch 同時計測 (Pentium800)
FFT アライザ	小野測器製
2)比抵抗トモグラフィ	
比抵抗計測器	電圧:400Vp-p, 電流:1~200mA 分解能:20μV, 送信周期:3.5 秒 Mc-ohm-21 (応用地質製)
孔内電極	20ch, 10cm 間隔 (アスシステム製)
3)高密度電気探査(電中研製)	
送信器	電圧:400Vp-p, 電流:1~800mA 送信周期:0.2~1.6 秒(切替え)
受信器	利得:-30dB~60dB, A/D:12bite
電極自動切替器	60ch, 任意の四極法対応可
PC	EPSON-PC-286LE
電極	非分極電極 (シオグル応用地質製)
4)電気検層	
測定器	電流:10μA~1mA Mini-ohm(応用地質製)
電極ケーブル	4ch, 10cm 間隔



(a)クロック周波数

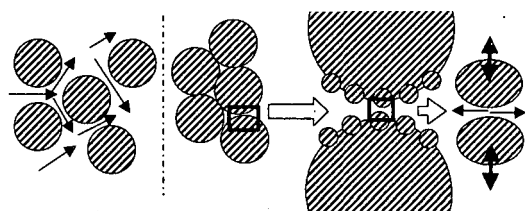


(b)PBRS コード(0 と 1 の連続信号)
正弦波の位相を 0 で反転, 1 で元に戻す



(c)発震信号の自己相関関数を計算(パルスに戻す)

図-2 周波数を制御して周波数特性を計測する原理



土粒子の間を水分子
が移動(振動)する

土粒子の振動により水分子
が押し出される(Squirt flow)



Biot Mech.



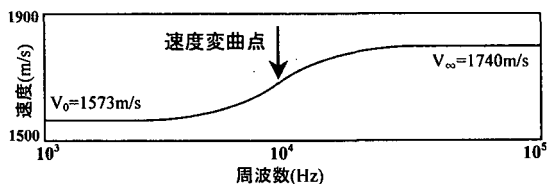
Squirt Flow Mech.(にじみだし理論)

$$2\pi f\beta \cong \frac{\mu\phi}{k\rho f} \quad (\text{Eq.1})$$

(a)未固結の地盤

$$2\pi f_s \cong \frac{Kfk}{\mu\phi R^2} \quad (\text{Eq.2})$$

(b)緻密な固結地盤



(c)地盤の周波数特性(「速い波」と「遅い波」を分離)

図-3 BISQ モデルの概念 (Dvorkin et al, 1993)

k は透水係数, f_β は Biot 理論による速度変曲点の周波数, f_s は Squirt flow 理論による速度変曲点の周波数, ϕ は間隙率, ρf は流体密度, R は Squirt flow 長, μ は流体の粘性係数

傍は 1000 Ω m 以下の低比抵抗となっている。

音響・比抵抗トモグラフィによる解析断面と計測孔内(U 孔, D 孔)で確認した割れ目分布とを対比した結果を図-6 に示す。音響トモグラフィは 31kHz による速度断面を示す。比抵抗および速度が相対的に低い部分と割れ目位置が整合する部分を点線で示す。特に、坑壁より 50cm(KC.0.5~1.0m)の割れ目密度が比較的大きい領域は、比抵抗と速度とも明瞭に低くなっている。

短区間透水試験と蒸発量試験結果(南ほか, 2002)⁷⁾と対比したものを図-7 に示す。図-7(a)は U 孔での透水試験と蒸発量試験, 図-7(d)は D 孔での結果である。坑壁より 50cm の領域(点線楕円)は U 孔, D 孔とも 10^{-4} cm/s オーダーと突出して透水係数が大きく、割れ目は開口性を有するものと考えられる。蒸発量は両孔ともこの坑壁近傍部で大きく、低比抵抗・低速度領域(図-7(b), (c)中の点線楕円)および間隙率が大きく透水係数が高い区間(図-4(c), (d))と整合している。これ以外では、透水係数はそれほど顕著に大きくはないものの、割れ目の存在する位置と低比抵抗・低速度部が対応する箇所を矢印で示す。

(2) B 地点: トンネル掘削後 1 年および 2 年経過後に計測した比抵抗断面図を図-8(a), (b)に示す。ボーリング位置を軸方向に投影して表示した。比抵抗断面図は 316~63,100 Ω m を対数スケールで色分けし、赤色系は低比抵抗、青色系は高比抵抗を示す。丸印は解析時に分割したセルの中心座標の位置を示す。比抵抗は 300~3,980 Ω m を示し、1 回目の比抵抗断面ではトンネル坑壁より数 10cm の領域は全周方向に 500 Ω m 以下の低比抵抗部が存在していたが、2 回目計測時は不明瞭になり 1,500~2,000 Ω m と高く変化している。

1 回目計測時の比抵抗 ρ_1 を基準にして 2 回目計測時の比抵抗 ρ_2 の変化率 $\Delta\rho$ を次式で計算し、-50%~450% で表示した結果を図-8(c)に示す。

$$\Delta\rho = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1 \times 100 \quad (1)$$

変化率 200%以上の領域が坑壁面より厚さ数 10cm で坑壁全方向に存在している。

電気検層結果(No.1 孔)およびコア試料(No.1, 2 孔)による室内試験結果, コア観察(No.1 孔)による割れ目の位置を図-9(a)に示す。孔壁面より 1m までの領域は 1,300~2,000 Ω m, それより奥は 2,000~3,000 Ω m とやや高い比抵抗となっており、石英脈に起因すると思われる割れ目が多い区間とほぼ整合している。コア試料は No.1 孔より 8 個, No.2 孔より 6 個の試料を採取し ϕ 98mm, 長さ 2cm に整形した。これらを個別の容器に同量の蒸留水(200ml)で浸し、真空ポンプにより 2 日間脱気した飽和状態の比抵抗を計測した。脱気完了後の試料を浸した蒸留水と試料内の間隙水の比抵抗は同一とみなした。また、全試料を 60℃で 5 日間乾燥させ、飽和重量と乾燥重量の差を試料体積で除算して間隙率を求めた。

飽和試料の比抵抗は 600~1,000 Ω m で電気検層による値より全般的に低い。この要因としては、現地の岩盤は飽和状態ではない、あるいは、コアを採取したことによる応力開放で、岩石マトリックスの間隙率が大きくなり、含水率が現地の状態より大きくなったことが推定される。間隙水比抵抗は 60~300 Ω m の範囲を示し、孔口付近は低くなっている。間隙率は 0.9~1.7%の範囲を示し、孔口付近がやや大きく比抵抗と負の相関性が認められる(図 9(b))。

5. 議論

A, B 両地点における比抵抗分布の変化について、以下の Archie の式(1942)に基づき考察する。

$$\rho = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_w \quad (2)$$

ここで、 ϕ は間隙率、 S は飽和度、 ρ_w は間隙水比抵抗、 a, m, n は岩種による定数である。

同じ岩種の比抵抗が低くなる要因としては、①掘削に伴い坑壁周辺部の岩盤がゆるみ、割れ目幅もしくは

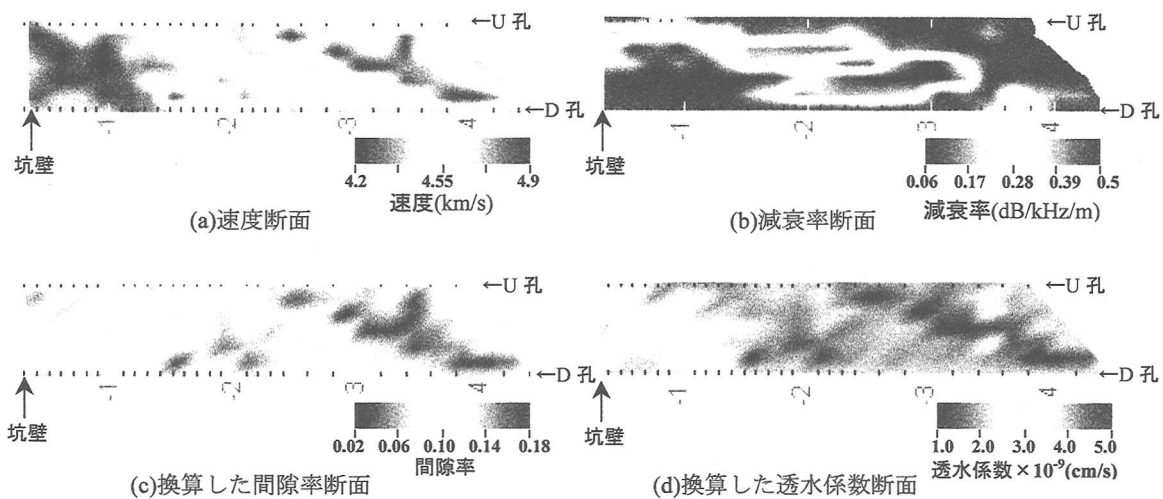


図-4 音響トモグラフィ法による速度・減衰率・換算した間隙率・換算した透水係数断面

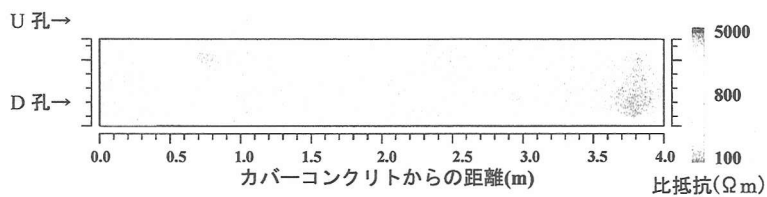


図-5 比抵抗トモグラフィ法による比抵抗断面

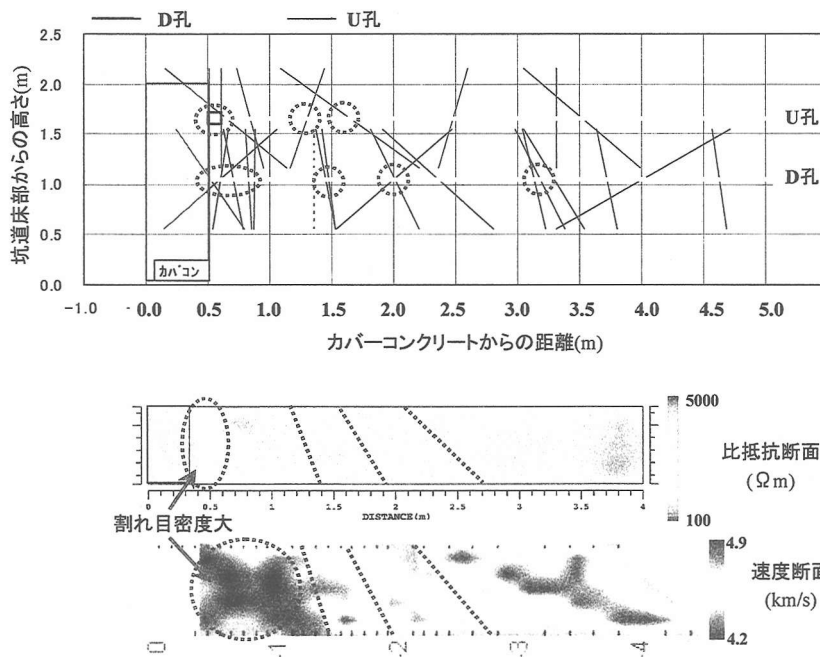


図-6 音響・比抵抗トモグラフィ解析結果と割れ目分布との対比

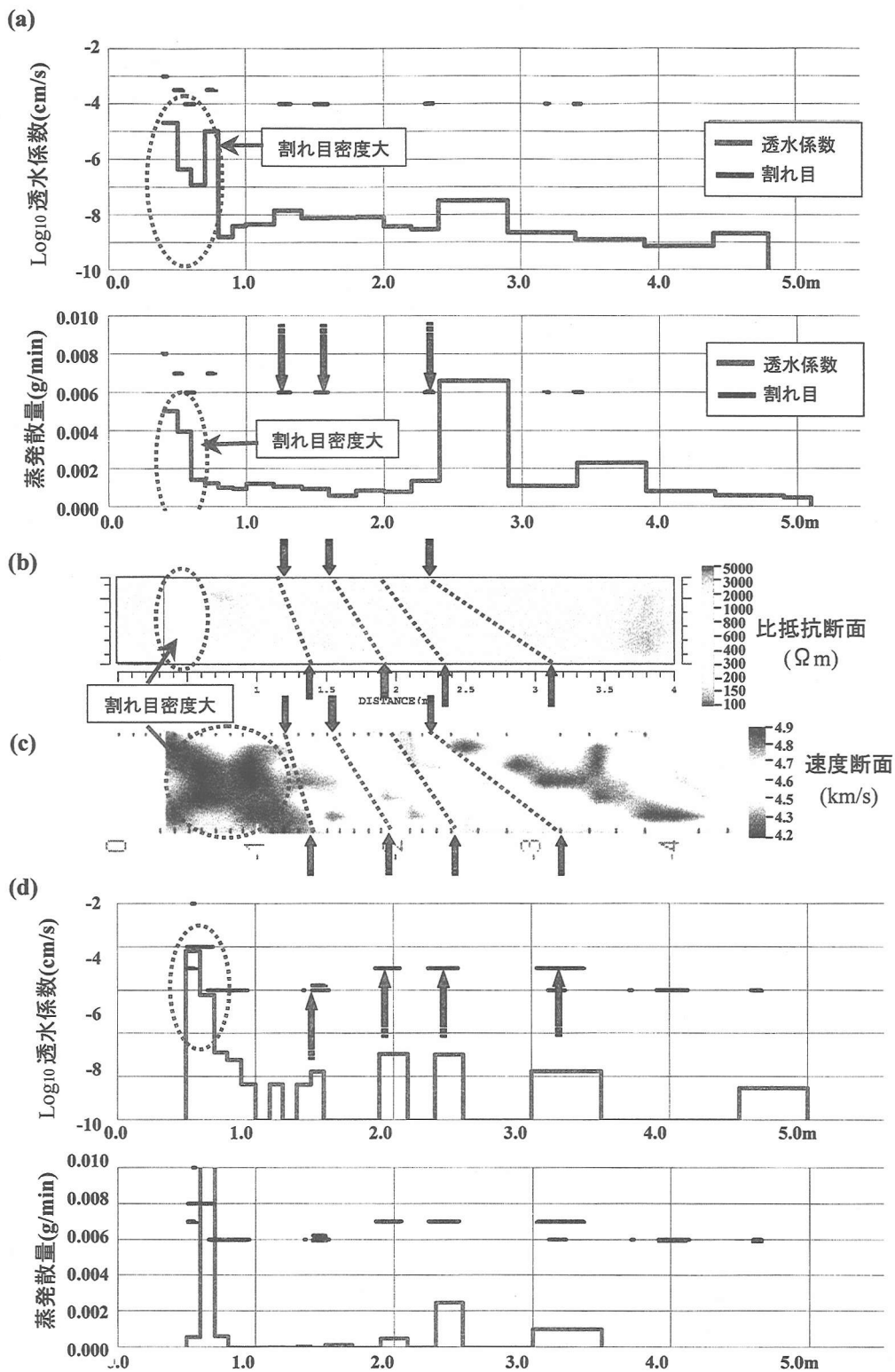


図-7 短区間透水試験・蒸発量試験と音響・比抵抗トモグラフィ結果との対比

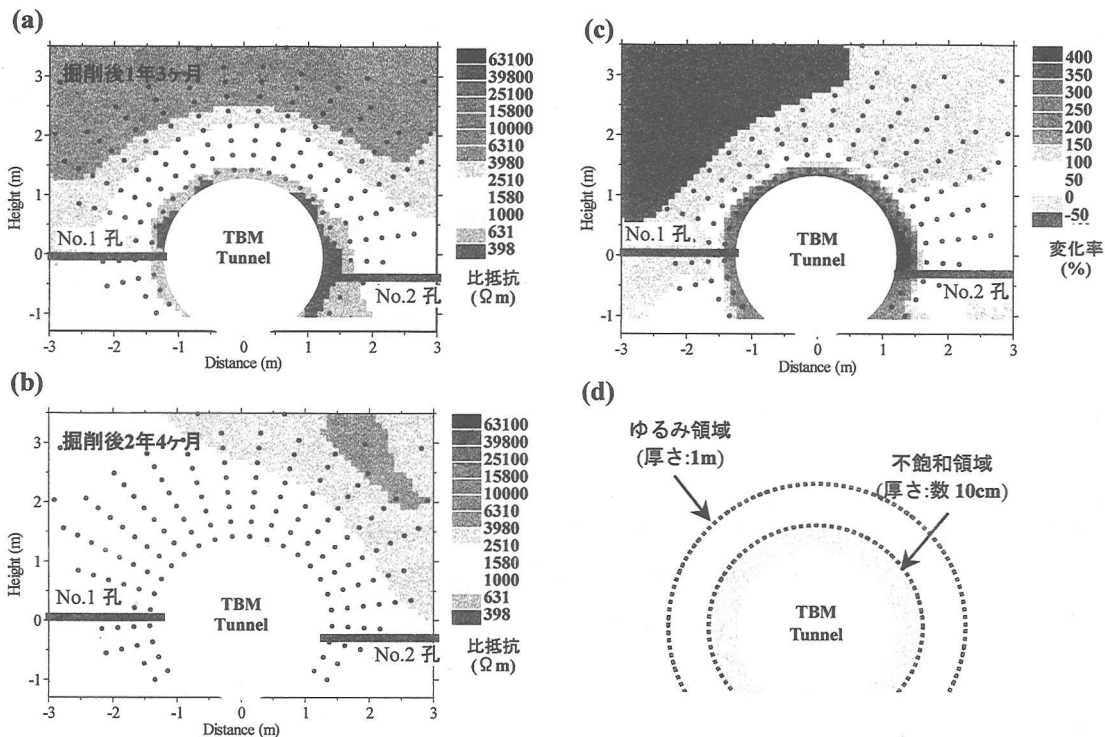


図-8 高密度電気探査法による解析結果 (B 地点)

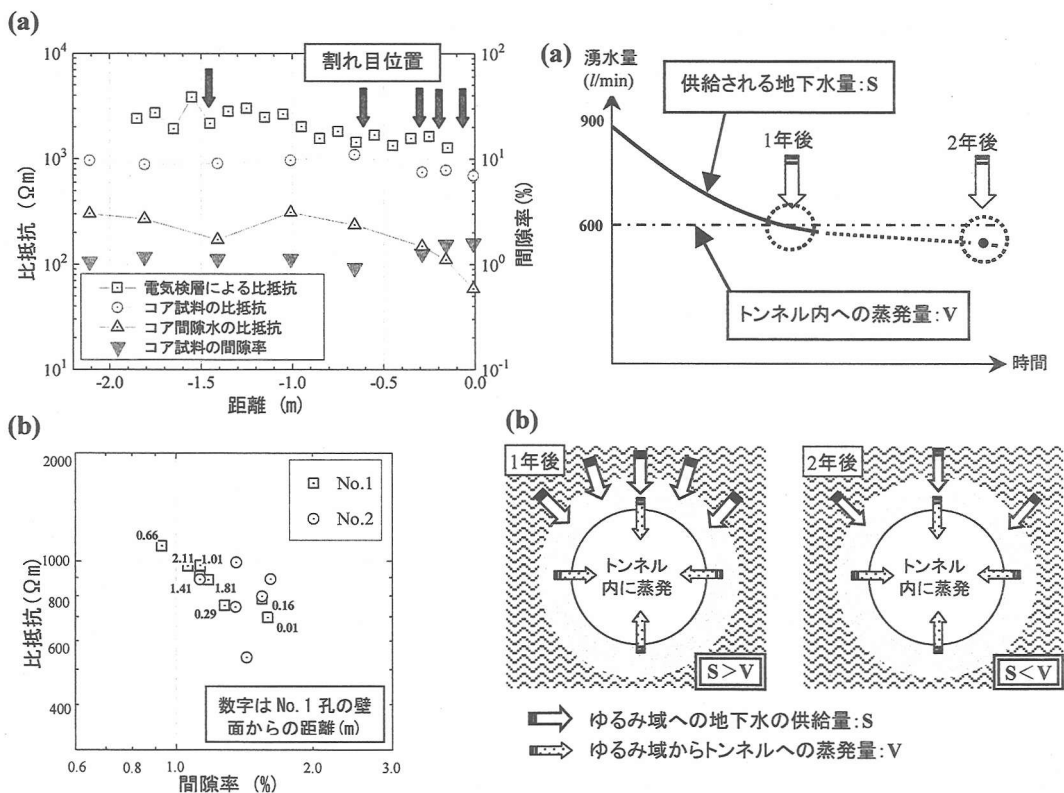


図-9 電気検層(No.1 孔)及びボーリングコア試料(No.1, 2 孔)による室内試験結果

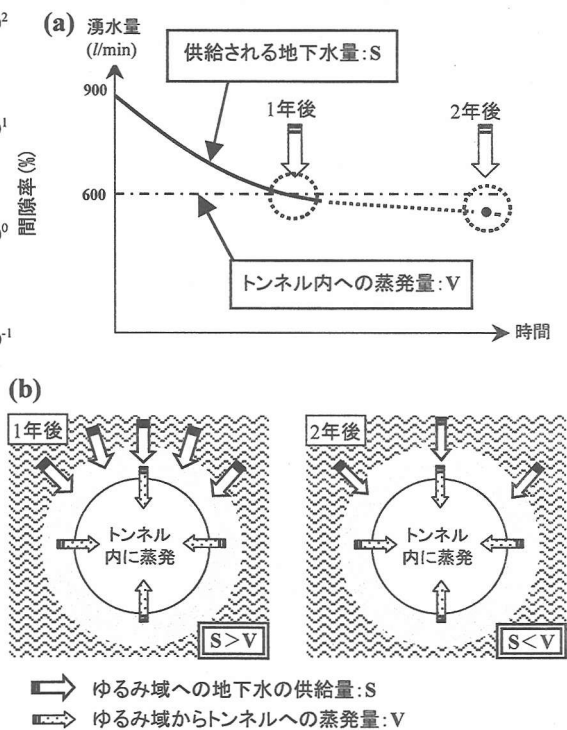


図-10 比抵抗断面とトンネル湧水量より推定される地下水挙動

岩石マトリックス中の間隙率が大きくなり、周囲岩盤から地下水が供給され含水率が増大する。②間隙率は変化しないが、坑道周辺から地下水が供給され飽和状態が保たれると同時に、坑壁面よりトンネルに間隙水が蒸発し壁面近傍の間隙水のみ塩分濃度が次第に大きくなる。の2つが想定される。また、比抵抗が大きくなる要因としては、③割れ目幅またはマトリックス中の間隙率が小さくなり、岩盤の含水率が低下する。④間隙率の変化はないが、岩盤周囲からの間隙水の供給がなく、壁面近傍の間隙水が蒸発して含水率が小さくなる。の2つが想定される。

A 地点は坑道掘削後 5, 6 年が経過しており、計測時の壁面は乾燥しており壁面近傍の岩盤の飽和度は小さいものと考えられる。音響トモグラフィ法によりとらえられた坑道壁面より 1m の低速度部は、透水試験・蒸発量試験結果により“水みち”と考えられる割れ目密度の多い領域と整合していることより、掘削に伴うゆるみ域の空間分布をとらえたものと考えられる。一方、比抵抗トモグラフィ法では壁面より数 10cm の区間だけが低比抵抗部(カバーコンクリート部の影響と推測)となり、速度分布と整合していない。これは、透水試験と蒸発量試験結果より算出した U 孔での飽和度分布(南ほか, 2002)⁷⁾を考慮すると、壁面に近いほど飽和度が低下するため、坑壁より数 10m から 1m の領域の比抵抗は高くなったと考えられる。

B 地点において、各測線とも坑壁面数 10cm の領域が 1 回目に対し、2 回目の計測時の方が大きく変化した原因として次のように推測される。1 回目計測時(掘削後 1 年 3 ヶ月)は、掘削により坑壁面約 1m までの領域がゆるみ、割れ目幅とマトリックス中の間隙が大きくなり、周囲の岩盤から間隙水が供給され含水率が増大した結果、比抵抗が低下した。特に、孔壁面数 10cm の領域は、壁面からの蒸発でイオン濃度が大きくなり間隙水比抵抗が低下し、顕著に低比抵抗になったと推測される。一方、2 回目計測時(掘削後 2 年 4 ヶ月)は周囲岩盤からの間隙水の供給よりも、壁面からの間隙水の蒸発が優勢となり、坑壁より数 10cm の領域の含水率が低下した結果、比抵抗が増大したものと考えられる(図-8(d))。ここで、トンネル出口での全湧水量の経時変化(図-10(a))を見ると、掘削直後の約 900l/min から 1 年後には約 600l/min となり、2 年目(約 550l/min)まで緩やかに減少があったと考えられる。測線近傍の地山からの地下水の供給がこの湧水量変化と対応し、トンネル壁面からの蒸発量はほぼ一定とみなすと、掘削 1 年後までは地下水の供給量より壁面からの蒸発量が小さかったが、掘削 2 年後には壁面からの蒸発量の方が地下水の供給量より大きくなったものと推定できる。

今後の課題として、B 地点において引き続き高密度電気探査法を行い、比抵抗分布の変化を定期的に観測する。また、測線近傍に掘削した水平孔において短区間透水試験・蒸発量試験により岩盤内の飽和度を算出し、比抵抗変化の要因を検証する予定である。

謝辞: 比抵抗トモグラフィ法の現地計測および解析は(株)ダイヤコンサルタントの山田直之氏に多大なる協力をいただいた。比抵抗トモグラフィ・電気検層用孔内電極ケーブルの製作はアスクシステムの水津彰氏に協力いただいた。高密度電気探査法の解析は(株)DCC の高橋健吾氏に、コア試料による室内試験は(株)CRS の谷口友規氏・吉岡信幸氏に協力を頂いた。以上の方々に厚く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 二宮康郎・杉原弘造・伊藤克夫・亀村勝美・青木智幸(1989): ジオトモグラフィによる地下空間周囲の緩み領域の評価について, 第 21 回岩盤力学に関するシンポジウム, 151-155.
- 2) 桑原徹・金田義行・平間邦典・玉井昭雄(1995): 大規模地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価(その 2)―弾性波・電磁波・比抵抗による空洞解析と岩盤緩み評価―, 大林組技術研究所報, 51, 33-38.
- 3) Biot, M.A. (1956): Generalized theory of acoustic propagation in porous diaaipative media, The journal of the acoustical society of America, 34, 9, 1634-1645.
- 4) Dvorkin, J., Hoekasema, R.N., and Nur, A. (1994): The squirt flow mechanism: Macroscopic description, Geophysics, 59, 428-438.
- 5) 鈴木浩一・城森明・東義則(1992): 比抵抗法簡易自動測定装置の開発, 第 87 回物理探査学会講演論文集, 161-164.
- 6) 佐々木裕(1988): 比抵抗法 2 次元インバージョンの改良, 物理探査, 41, 111-115.
- 7) 南将行ほか(2002): 短区間透水試験・蒸発量試験による坑道周辺岩盤の水理特性評価, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集(投稿中).