

# 比抵抗探査結果の評価法に関する考察

清水建設(株) 正会員 西 琢郎・奥野哲夫  
 同上 正会員 宮下国一郎・長谷川誠  
 日本地下石油備蓄(株) 岡本明夫

## 1. はじめに

岩盤の状態を様々な物理探査結果から評価しようとする際、探査結果をどの様にイメージングするかは、結果に対する直感的な印象や物理的解釈を行う上で、かなり重要な役割を果たすと考えられる。しかし、イメージングを行う際、どの様な形式にすれば物理的に理解しやすい図になるかは、特に明確な基準はなく、解析者の経験等に任されているようである。ここでは、比抵抗トモグラフィ結果を例にとり、探査結果である比抵抗値コンター図において、コンター線の境界値をどの様に取りればよいかについて数値モデルによって検討した例を示す。

## 2. 検討モデル

### 1) 順解析用モデル

今回検討したモデルを図1に示す。ここで示すモデルは、実岩盤(花崗岩)における調査結果・構造物配置を若干単純化したものである。モデル中央には幅15m高さ20mの空洞1があり、その上部に幅4m高さ4mの空洞2がある。空洞壁からは長さ4~6mのロックボルトが1.5mピッチで打設され、各ボルトの基部は空洞壁面上のラス網により連結されている。さらに空洞壁周辺の岩盤中には、FEMによる逐次掘削解析から緩み域の分布を想定する。一方、空洞周辺の岩盤中には粘土を挟んだ幅1mの断層が6本存在する。トモグラフィを行うボーリング孔はモデル領域の左右端に設定し、各孔内での電極間隔は2.5m(計104個)とする。

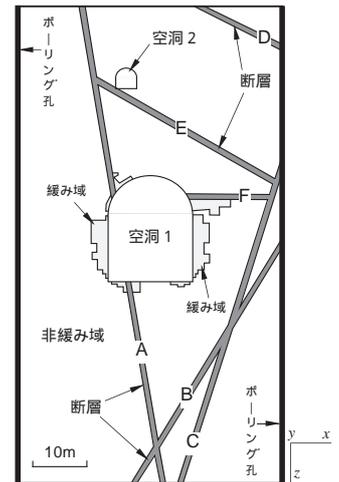


図1 解析に用いたモデル (ロックボルトは省略)

以上のモデルに対して、FEMによる2.5次元解析から各電極での理論電位を求め、得られた理論電位から2極法による見掛け比抵抗値を計算して次のトモ

表1 解析に用いた物性一覧

モデル構成物質	比抵抗値 ( m )
ロックボルト・ラス網	$2 \sim 7 \times 10^{-4}$
空洞1内物質	
空洞2内物質	50
非緩み域内岩盤	3000
緩み域内岩盤	1000
断層(緩み域内)	100 (75)

グラフィ解析への模擬測定データとした。尚、電位計算に際しての各種物性値は、既存資料および電気検層結果から設定した(表1)。また電位計算に際して、ロックボルトおよびラス網は解析断面奥行き方向(y方向)への配置を考慮している。

### 2) トモグラフィ解析結果

トモグラフィ解析では4節点長方形要素からなるFEMメッシュ(節点5029個,要素4876個)を作成し、平滑化拘束条件付き最小2乗法を用いて解の収束計算を行った。得られた比抵抗値分布を図2(a)(b)に示すが、これらは劣決定問題への対処として導入した平滑化の影響を受けたものとなっている。また同図には、比較のため順解析モデルでの断層・緩み域の輪郭も上書きした。

図2(a)はコンター線の境界を10~3000 mの間で8等分割したものである。この図では空洞1周辺から下方に延びる広い低比抵抗ゾーンが現れており、これらは空洞周辺のロックボルト・ラス網やモデル下部で交差する3本の断層に対応するものと見なされる。断層に対応する低比抵抗ゾーンは、順解析モデルと比較すれば若干左下がりの分布を示しているようにも読み取れるが、トモグラフィ解析の結果だけでは判読困難である。そこで、断層等に対応する低比抵抗部を強調するため、10~3000 mの間を対数増分で8分割したものが図2(b)である。この図では低比抵抗ゾーン

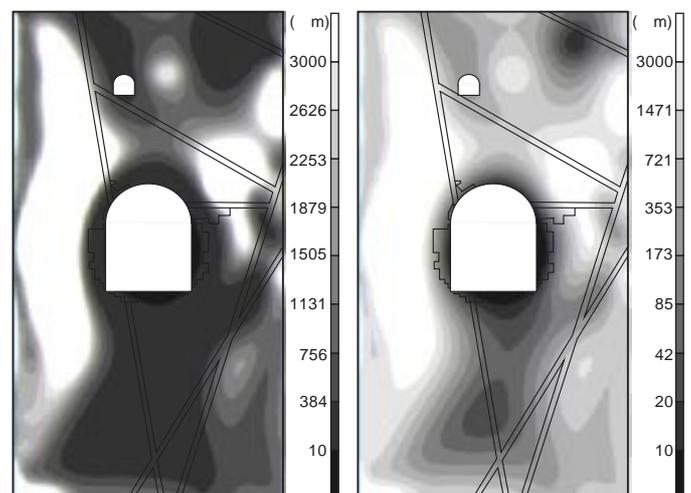


図2 トモグラフィ解析による比抵抗コンター。左(a): 10~3000 を8等分割。右(b): 10~3000 を対数分割。

キーワード: 比抵抗探査, トモグラフィ, 間隙率

の左下がりの分布がやや強調され、A-B断層交差部よりやや上方に低比抵抗値の島状分布が表現されている。その他、モデル右上に断層Dに相当する島状の低比抵抗部が現れている。

### 3. 間隙率換算による低比抵抗部の強調

このように、比抵抗分布を図示する際、コンターの閾値をどのようにとるかで読み取れる情報がかなり変化する。しかし、仮に対数刻みが良いとしてもその物理的意味は明確ではない。そこで比抵抗値を他の物性値に置き換える表現を試みた。岩盤の比抵抗を決める要因は複雑で、単一の物性のみで一意に決まるものではないが、表示の閾値を決める際には物理的意味がより分かりやすいと考えられるためである。

比抵抗値を他の物性に換算するものとしては、次の Archie の式がよく知られている。 $R_r = a \cdot S^{-n} \cdot R_w$  ( $R_r$ : 岩石の比抵抗,  $R_w$ : 間隙水の比抵抗,  $S$ : 飽和度,  $a, m, n$ : 定数) ここで  $a, m, n$  は岩種に依存する実験定数で、今回想定しているトモグラフィー探査では、電極設定用のボーリング孔から採取されるコアを用いて決定することができる。図3(a)にトモグラフィー解析による比抵抗値を Archie の式から間隙率に換算したものを示す。換算にあたっては、筆者らが先に行った既存資料による Archie 式の検討<sup>1)</sup>から得た新鮮な花崗岩の係数 ( $a=1.4, m=1.58$ ) および電気検層時の孔内水比抵抗値 ( $50 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ) を用いた (飽和度は100%と仮定)。また間隙率コンターの境界は、変質したもも含んだ花崗岩盤として通常想定しうる30%までを5%刻みとし、それ以上は10%毎と粗くした。尚、ここでの検討は数値モデル上のものであるため、直接比較可能な間隙率の実測値は存在しない。

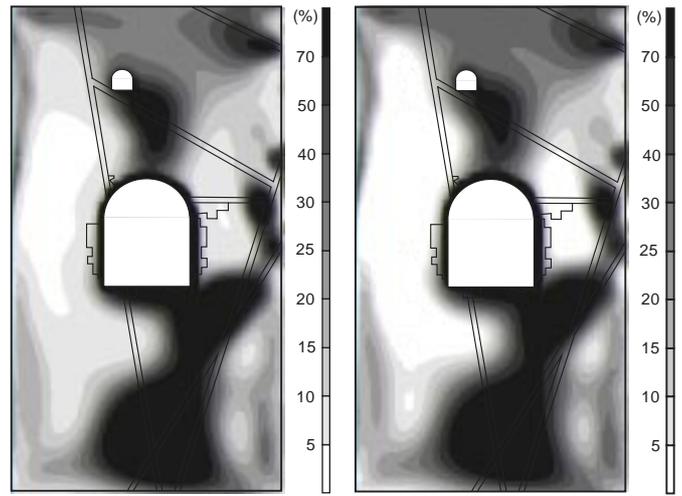


図3 比抵抗値からの換算間隙率分布。左 (a): Archie の式による。右 (b): Bussian の式による。

図3(a)より、モデル下部の低比抵抗ゾーンは間隙率30%以上と花崗岩では想定し難い高間隙ゾーンとして表現されている。またその分布は断層沿いの左下がりの形状と対応しており、断層交差部の島状の高間隙率(低比抵抗)部の位置も順解析モデルにやや近いものとなった。一方、図3(b)は同様の換算を岩石構成物質の導電性を考慮した Bussian の式により行ったものである (但し、定数は松井・朴<sup>2)</sup>による  $a=1, m=2.1$ , 岩石構成物質の比抵抗  $10000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  を用いた)。この結果を図3(a)と比較すると両者はほぼ一致している。これは、ここでの岩石構成物質の比抵抗がかなり高いため、換算式でのこの項がほとんど効いていないためと考えられる。そこで、次の間隙率の補正は Archie の式に基づいて行った。

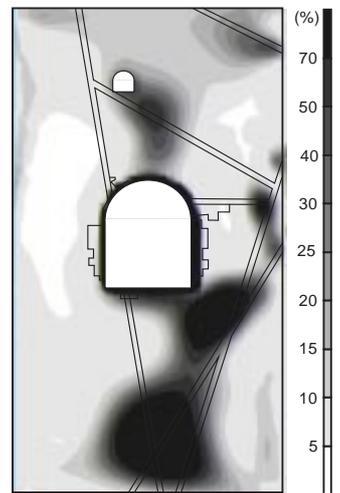


図4 補正換算間隙率分布 (補正部分:  $a = 0.6, m = 1.4$ )

図3(a)では新鮮な花崗岩に対する換算式を用いたにも関わらず、10%以上の高間隙率を示す部分がかなり広く見られる。この結果は、数値解析上の拘束条件である平滑化の影響と判断されるが、実岩盤での探査を行った際に、このような結果からモデルに対応する岩盤構造を読み取ることの工学的意義は高いと思われる。そこで、花崗岩における比抵抗から間隙率への換算が成り立たない部分を強調するため、図3(a)で間隙率10%以上の部分は何らかの変質を被っていると仮定し、変質した花崗岩での係数 ( $a=0.6, m=1.4$ )<sup>1)</sup>を用いて補正を行った (図4)。この補正で高間隙ゾーンとして残る部分は、花崗岩での換算が成り立たない部分であって、花崗岩以外の物性を持つ岩 (ここでは断層) が分布する可能性を示している。これにより図4ではモデル下方の2つの断層交差部に対応する高間隙率ゾーンが強調され、また断層D,E上にも断層の延びの方向に沿った高間隙率部が表現されるようになった。

### 4. まとめ

- 1) 比抵抗探査結果をコンター表示する際、間隙率に変換して表示するとコンター境界の物理的意味が理解しやすく、図示されたコンター形状もモデルとの対応が良い。
- 2) 岩種や変質状況などに対応した換算式の係数を用いることにより、岩盤構造をより強調したイメージングができる可能性がある。

### 参考文献

- 1) 西ほか: 岩盤地下水開発における比抵抗探査結果の評価システムの検討, 土木学会第53会年次講演会概要3A, pp. 834-835, 1998.
- 2) 松井・朴: 比抵抗と弾性波速度による山岳トンネルの定量的評価手法とその適用, 土木学会論文集, No. 547/III-36, pp. 117-125, 1996.