

# 地山の比抵抗と岩石の一軸圧縮強度の研究

(株)エイトコンサルタント 池田 和正

## 1. はじめに

地質を構造的に把握する一手段として、比抵抗法二次元探査（電気探査）が一般に利用されるようになってきた。それは、例えばある条件下で  $\rho \leq 80 \Omega\text{m}$  は泥質層、 $\rho = 80 \sim 120 \Omega\text{m}$  は砂～砂礫層、 $\rho \geq 1,000 \Omega\text{m}$  は非透水層に属する岩盤に対応するという具合に、比抵抗値が、地質や岩石、あるいはそれらの特別な性状を反映することによるもので、比抵抗パターンは地層分布や地質構造の推定に際し、補助的手段として十分な意味をもつからである。

一方、屈折法の弾性波速度値は、地山の掘削施工性やトンネルの地山区分を、適用する地質を限定することにより、弾性波速度の絶対値を指標として活用する方法が確立されている。しかし、比抵抗値から地山の物性値の評価については、岩石の比抵抗と間隙水の比抵抗及び間隙率との間に成り立つ ARCHIE の式 (ARCHIE, 1942)、間隙の特性評価パラメータとしての比抵抗特性 (KATUBE, 1981)、物理検層結果からの結晶質岩の透水係数を求める方法 (KATUBE・HUME, 1987)、等があるが、比抵抗と力学特性の関係についての研究は少ない。

ここでは、愛媛県南予地方の四万十帯に属する砂岩・泥岩互層地帯で、トンネル機械掘削施工性評価の指標となる一軸強さをトンネル全区間にわたって連続的に推定する目的で電気探査を実施した。その結果を別に求めたボーリングコアの一軸強度と比抵抗値の関係式を利用することによって処理し、地山の一軸圧縮強度を推定しようと試みた。ここで、その手法の一端を報告したい。

## 2. 地質概要

本調査地域の地質は、西南日本外帯の白亜紀・下部四万十層群の砂岩・泥岩互層分布地域であり、愛媛県南予地方の仏像線の南方約10 km に位置している。この付近の四万十層群は、ほかの地域と異なり、多数のアンモナイト・イノセラムスなどの大型化石をふくむ浅海性層であることが知られている。また、同地域の四万十層群は、時代や堆積環境の異なる複数の地塊が断層で接して累層群を形成している。研究対象の地山は、後期白亜紀の宇和島地塊に含まれる。対象トンネルの地質は、図2-3 に示すように砂岩・泥岩の互層からなり、N-S系の複数の断層構造があるものと考えている。

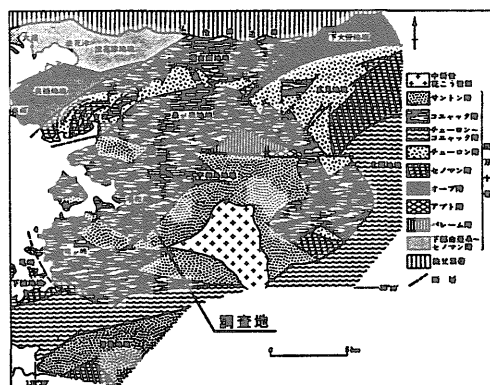
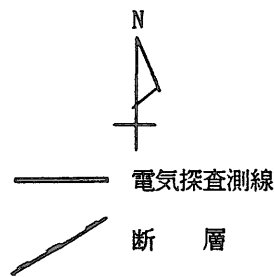


図2-1 愛媛県宇和島地域の地質年代別地質分布図 (寺岡・栗本, 1986)



図2-2 地質平面図



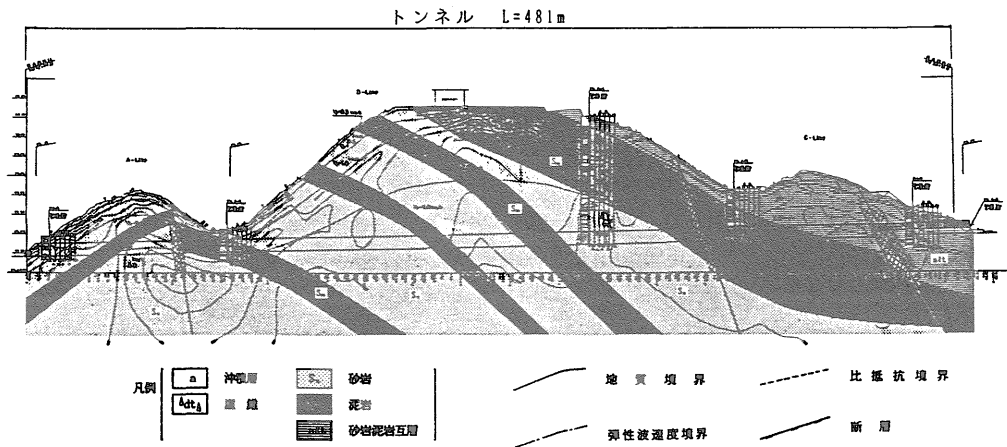


図2-3 地質断面図

### 3. 比抵抗から一軸圧縮強度の推定方法

岩石は、伝導性鉱物、半導体鉱物、絶縁性鉱物の集合体であり、その組成により新鮮な岩石の比抵抗は地質毎に、ある一定の範囲に分布することが知られている。一方、同じ種類の岩石であっても、地盤の比抵抗は、地盤内の岩石の構造、間隙水の比抵抗、乾湿飽和の状態、風化変質作用の程度、導電性の粘土分の影響等により変化する。

岩石や地質を構成している固体粒子は、初生鉱物、岩石の破砕物および、それらの風化生成物などであるが、多くの場合、粒子そのものは絶縁体である。したがって、岩石や地層の比抵抗は、固体粒子の伝導性によるのはわずかで、ほとんどは割目や孔隙を満たしている水の電解質としての作用によることから、間隙率、間隙水の比抵抗及び飽和度が比抵抗の変化に大きく影響していると考えることができる。一方、同じ地質の岩石の間隙率と力学的強度に相関があるとするデータがいくつか公表されている。これらのことから、間隙水の比抵抗と飽和度を固定できる条件のもとでは、間隙率を媒体として、比抵抗から一軸圧縮強度等の地盤の力学強度を推定出来る可能性を考えることが出来る。

#### 3.1 比抵抗と間隙率

地盤の比抵抗は、構成される岩石、間隙率、間隙水の比抵抗および飽和率などにより左右される。ARCHI は、飽和した砂岩コアの比抵抗測定結果から、比抵抗が地層の空隙率の定量に役立つことを実験的に明らかにした。ARCHI の実験式に飽和率と飽和係数を加えて、地層の比抵抗は一般に次式で示される。

$$\rho = a \rho_w \phi^{-m} S_w^{-n} \dots\dots\dots (1)$$

- ここに
- $\rho$  : 地層の比抵抗 ( $\Omega m$ )
  - $\rho_w$  : 間隙水の比抵抗 ( $\Omega m$ )
  - $\phi$  : 間隙率
  - $S_w$  : 飽和率
  - $a$  : 迂回係数 (砂岩  $a = 0.62 \sim 0.81$ , 石灰岩  $a = 1$ )
  - $m$  : 膠着係数 (砂岩  $m = 2 \sim 2.15$ , 石灰岩  $m = 2$ )
  - $n$  : 飽和係数 (ARCH  $n = 2$ , 竹下他  $n = 3$ )

### 3.2 間隙率と一軸圧縮強度

岩石の空隙率と一軸圧縮強度の相関に関する係について、三木<sup>4)</sup>は、自然状態の多数の岩石試験データを基に、堆積岩、火成岩、変成岩のグルーピングを行い、それぞれに幅広い帯状の、相関が認められるとしている。

また、桑原<sup>6)</sup>は、堆積岩、火山岩、火砕岩類、貫入岩類等の岩石試験結果から一軸圧縮強度と有効間隙率の関係を示している。図3-1に桑原の発表データを片対数グラフにプロットしたものを示す。この図から、ややバラツキはあるが、 $q_u$ と $\ln(\phi)$ との間に直線状の相関関係があると考えた。

図3-1の関係を式で表わすと次のようになる。

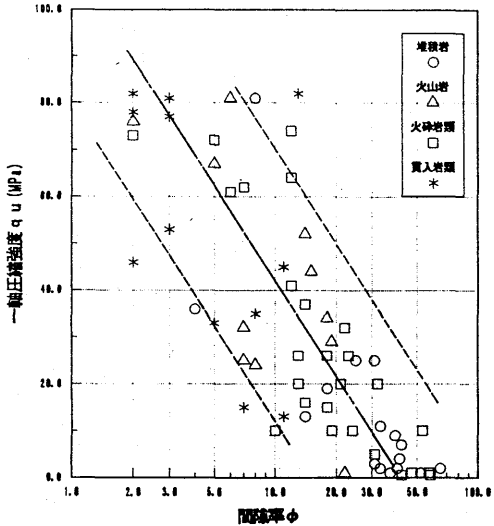


図3-1 一軸圧縮強度と間隙率  
(桑原啓三, 1984を片対数グラフにプロット)

$$q_u = b - c \ln(\phi) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $q_u$  : 岩石の一軸圧縮強度 (MPa)  
 $\phi$  : 間隙率  
 $b, c$  は係数

### 3.3 条件の固定

これまで述べて来た理由から、もし、例えば式(1)における変動量として間隙水の比抵抗、飽和度に固定値を与えるような地質条件下で比抵抗法二次元探査を実施するとすると、変動要素は間隙率のみとなって比抵抗と一軸強度の間には精度の高い相関関係が期待される。

#### ①間隙水の比抵抗の固定

ボーリング孔の地下水の比抵抗測定の結果  $\rho_w = 60 \sim 70 \Omega m$  の範囲にあり、対象地山の地下水の比抵抗は  $\rho_w \approx 65 \Omega m$  程度で一定と考えて良いと判断した。

#### ②飽和率の固定

本調査の対象がトンネルで主要区間が地下水位以深にあるため概ね飽和した地層と考え  $S_w \approx 1.0$  固定とした。

#### ③地質の固定

本地区では砂岩と泥岩の互層で断層等により地質分布が複雑であったが、多めのボーリング調査と地表踏査を丁寧に実施することで地質分布の正確な把握に努めた。

### 3.4 比抵抗と一軸強度

式(1)と式(2)を3.3の条件のもとに書きかえると次式が得られる。

$$q_u = \alpha + \beta \ln(\rho) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\alpha, \beta$  は主に地質により決まる係数

#### 4. 比抵抗から一軸圧縮強度の定量的評価

図4-1 に、サンプルの深度と一軸圧縮強度の関係を示す。この図から、岩石の一軸圧縮強度は、岩石毎に深度にほとんど関係無く一定の上限値を有しているのがわかる。砂岩では約 210 MPa、泥岩では約 80MPaである。また、一軸圧縮強度は、表層ほど強度の低いコアが多く、深くなるにつれて、下限分布値が高くなり、約70 m でほぼ上限値と集束する結果となっている。この深度は、深層風化のおよぶ範囲、本地域の風化殻の深さと関係があるのではないかと考えられ、この深度以深では破砕帯等を除いて、未風化の堅硬な岩盤が分布すると考えられる。

図4-2 に地山の比抵抗と一軸圧縮強度の相関図を示す。この図から岩石ごとのグルーピングが可能であり、なおかつ、 $q_u$  と  $\ln(\rho)$  との間には直線的な相関関係が認められる。なお、この図における多少のバラツキのもつ意味は重要で、今後の研究課題としたい。尚、風化は、岩石の変質による粘土化、空隙率の増大等を伴うが、比抵抗との関わりにおいては、空隙率の影響が大きいと考えている。

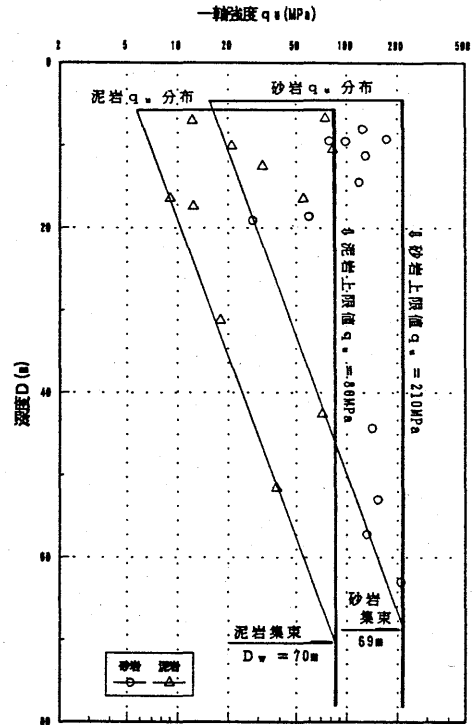


図4-1 深度～一軸圧縮強度相関図

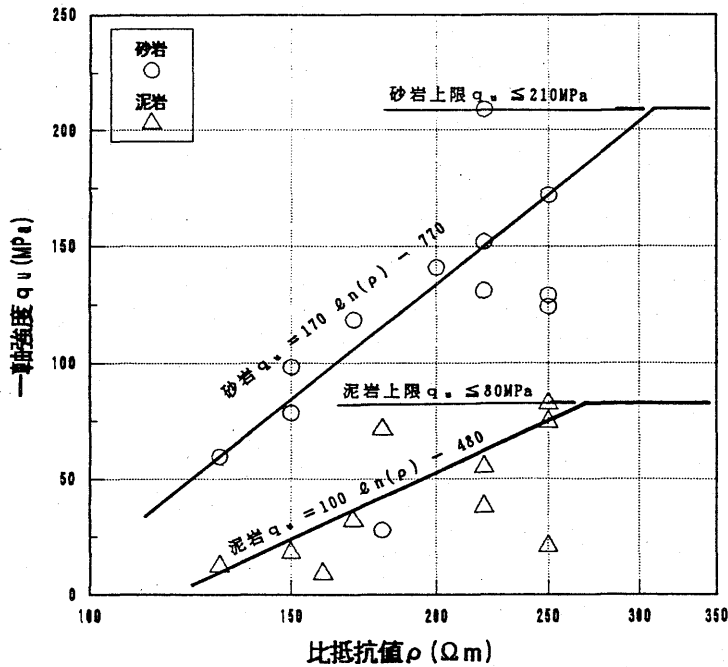


図4-2 比抵抗～一軸圧縮強度相関図

図4-1 に示した各岩石の一軸強度における上限値を考慮し、図4-2 を式(3) にもとずいて数式化すると以下のようなになる。

$$\text{砂岩 } q_u = 170 \ln(\rho) - 770 \quad (\text{MPa}) \quad \text{但し、} q_u \leq 210 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{泥岩 } q_u = 100 \ln(\rho) - 480 \quad (\text{MPa}) \quad \text{但し、} q_u \leq 80 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (5)$$

従って、本現場においては、各岩石毎に、式(4) もしくは式(5) を適用すれば電気探査の比抵抗断面から岩石の一軸圧縮強度が推定可能となると考えた。

## 5. まとめ

- (1) 電気探査の比抵抗断面から、地質、地下水条件を固定することにより、空隙率を媒体として、岩石の一軸圧縮強度を評価することは可能であると考ええる。
- (2) 深度と一軸圧縮強度の分布は、岩石ごとにグルーピングが可能であり、かつ、各岩石によって上限値が存在することを示す。同時に風化殻の議論にも十分適用されるものと見られる。
- (3) 実測による比抵抗と一軸圧縮強度の相関は、泥岩はややバラツクが砂岩の強度の低い部分で高い相関性が得られた。いずれにしてもこのバラツキのもつ意味は重要と考える。

<< 参考文献 >>

- 1) 竹下祐二・井上誠・小野忠正・河野伊一郎(1993) : 不飽和浸透における比抵抗特性に関する検討, 物理探査学会第88回学術講演会論文集, 217-220.
- 2) 千葉昭彦・熊田政弘(1993) : 岩石試料の比抵抗測定について, 物理探査学会第88回学術講演会論文集, 221-226.
- 3) 千葉昭彦・熊田政弘(1994) : 花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定, 物理探査, Vol.47, No.3, 161-172.
- 4) 三木幸蔵(1978) : わかりやすい岩石と岩盤の知識
- 5) 土質工学編(1989) : 岩の調査と試験
- 6) 桑原啓三(1984) : 岩石の圧縮強度とせん断強度による分類の試み, 応用地質特別号, 応用地質学会, P.25
- 7) 寺岡易司・栗本史雄(1986) : 宇和島地域の四万十帯白亜系層序—大型化石と放散虫化石の層序的分布に関連して—, 地質調査所月報, 37, 417-453.
- 8) ARCHIE, G.E. (1942) : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. A. I. M. E., 146, 54-67.
- 9) KATUBE, T. J. (1981) : Pore structure and pore parameters that control the radionuclide transport in crystalline rocks, Proc. Tech. Prog. Int. Powder and Bulk Solids Handling and Processing, Rosemont, 394-409.
- 10) KATUBE, T. J. and HUME, J. P. (1983) : Electrical resistivities of rocks from Chalk River, Proc. Ws. Geophys. Geosci. Res. at Chalk River, 105-114.
- 11) KATUBE, T. J. and HUME, J. P. (1987) : Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs, Geophysics, 52, 342-352.