

比抵抗と弾性波速度による山岳トンネル地山の定量的評価手法とその適用性

松井 保¹・朴 三奎²

¹正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

²学生会員 理修 大阪大学大学院 工学研究科博士後期課程土木工学専攻 (〒565 吹田市山田丘2-1)

最近、山岳トンネルの地盤調査に比抵抗高密度探査が実施されるケースが増加し、地山比抵抗の定量的評価に基づくトンネルの地山区分手法の必要性が高まっている。本論文では花崗岩供試体の比抵抗測定を行い、岩石の比抵抗へ及ぼす間隙水の比抵抗、岩石構成物質の比抵抗及び膠結係数の影響を調べるとともに、岩石の比抵抗と弾性波速度がそれぞれ間隙率と一義的な関係にあることを用いて、地山比抵抗を弾性波速度に換算する手法を提案した。筆者らの提案手法に対して、新鮮な花崗岩地層及び砂岩、頁岩と礫岩の互層からなる堆積岩地層において、比抵抗検層データと速度検層データを用いて検証した。さらに、実際の鉄道トンネルにおいて比抵抗と弾性波速度の定量的評価による地山区分を行い、実績支保パターンと比較することによってその適用性を確認した。

Key Words : resistivity, seismic wave velocity, tunnel, rock mass classification

1. まえがき

山岳トンネルの事前地盤調査としては、通常、地表地質踏査、弾性波探査屈折法、ボーリング調査などによって行われている。しかし、トンネルの地山区分、複雑な地質構造や地下水の性状把握を予め十分な精度で実施するには、問題が残ることが多い。むしろ、これまでは、予め実施される地盤調査には全面的に頼らず、トンネル掘削とともに切羽周囲の地山性状を調査する技術・手法が開発されてきている。従来の設計段階におけるトンネルの地山分類の等級を決定するための地山評価の指標は、岩石種別と弾性波速度を主体として、ボーリングコア及び地質状態などを用いてきたが、軟岩の場合では地山の良否による速度差が小さいので、硬岩に比べて地山の評価が容易ではない。このため、軟岩に対して地山強度比を分類指標に用いているが、地山強度比もボーリングコアの一軸圧縮強度を用いているので、点のデータになるという欠点がある。また、弾性波探査屈折法から得られる弾性波速度は、本来、地山の平均的な弾性波速度値を求めるものであり、例えば地山弾性波速度の大きい速度層が低速層の上位に位置する場合などについても解析上の限界がある¹⁾。これらの欠点より、トンネルを実際に施工した場合、地山の状態が着工前の予想とは異なって施工段階になって支保・施工法に変更が生じることが多い。

このような従来のトンネルの設計段階における地山分類の問題点を克服するためには、トンネル全長にわたって精度よく地盤調査を行い、設計に必要な情報を得ることが必要である。

最近注目を集めている比抵抗高密度探査²⁾ (電気探査及び電磁探査) は、大量のデータを用い、数値解析によって2次元あるは3次元の比抵抗構造を再構成する手法が導入され、トンネルの地盤調査において実施されるケースが増加している。また、筆者らは地山の比抵抗分布状態とともに既存の地盤調査手法によるデータも合わせて検討することによって、地山分類、地質構造や地下水状況の把握に有効であることを報告した³⁾。しかし、地山比抵抗は、岩石の種類、間隙率、水飽和率、間隙水の比抵抗、粘土含有量などによって変化するため、弾性波速度に比較して地山の定量的評価が容易ではなく、その解釈は定性的に行われるのが現状である。

筆者らはすでに、岩石の比抵抗と弾性波速度がそれぞれ間隙率と一義的な関係にあることを用いて、岩石の比抵抗を弾性波速度に換算する手法を提案し、新鮮な花崗岩などの岩石構成物質の比抵抗が無限度に近い場合には、この手法がトンネル地山区分に適用しうる可能性を報告した^{4), 5)}。

本論文では、花崗岩供試体の比抵抗測定を行い、岩石の比抵抗値を左右する要因を調べると共に、すでに提案した地山の定量的評価手法を検討する。さらに、新鮮な花崗岩以外にも地山比抵抗を弾性波速度に換算

する手法を提案し、この手法をもとに実際のトンネルにおける地山比抵抗と弾性波速度の定量的評価による地山区分を行い、その適用性について検討する。

2. 岩石の比抵抗測定

(1) 岩石供試体及び比抵抗測定法

比抵抗測定に用いた岩石供試体は深層地質調査のために行ったボーリングコアから採取した中生代白亜紀の佛国寺貫入岩体(韓国産)の花崗岩8個である⁶⁾。表-1に花崗岩供試体の形状、サイズ、密度及び間隙率を示す。なお、表-1に示した間隙率 n と密度 γ は、真空デシケータ内の水道水に供試体を漬けてデシケータ内を真空にした状態で72時間以上浸した強制湿潤状態での空中重量 W_a 及び水中重量 W_w と、乾燥炉内で48時間以上110℃で加熱乾燥させた強制乾燥状態での空中重量 W_d から、式(1)と式(2)を用いて算出した。

$$\gamma = W_a / (W_a - W_w) \quad (1)$$

$$n = (W_a - W_d) / (W_a - W_w) \quad (2)$$

比抵抗測定法は千葉・熊田(1994)⁷⁾が提案した供試体全体を使って比抵抗を測定するGS社(Geoscience社)式サンプルホルダを用いている。電流電極、電位電極とも80メッシュの銅網を用い、電極や供試体の間に挟む濾紙に含まれる溶液は0.1NのNaCl溶液を用いた。

供試体の比抵抗を求める際には、円柱の断面積及び供試体軸方向に平行な電流が測定区間の長さにも流れた時の軸方向の電位差を測定し、式(3)より比抵抗を算出した。

$$R_o = \frac{S}{\ell} \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

ここに、 R_o は岩石の比抵抗($\Omega \cdot m$)、 S は円柱の断面積(m^2)、 ℓ は測定区間の長さ(m)、 I は軸方向に平行な電流(A)、 ΔV は軸方向の電位差(V)である。

各供試体を飽和させるのに用いた間隙水の比抵抗は純水及び濃度の異なるNaCl溶液と併せて9種類である。NaCl溶液は67,167, 500, 2,000, 5,000, 10,000, 20,000, 32,500 ppmの8種類の濃度を用意した。岩石供試体を飽和させる際には、まず、乾燥した供試体と3ℓの浸漬液を各々のデシケータに入れ、供試体の予備減圧と浸漬液に溶け込んだ空気を脱気させる。供試体の予備減圧を行うとともに浸漬液の脱気が完了した後、デシケータ内が真空状態のまま浸漬液を供試体が入ったデシケータに移し、72時間以上真空ポンプによって吸引し強制飽和させた。間隙水の比抵抗は、供試体を浸して

表-1 比抵抗測定に用いた花崗岩供試体

供試体	形状	直径 (cm)	長さ (cm)	密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)
A	円柱形	4.77	9.76	2.63	2.59
B	〃	4.69	9.79	2.62	0.99
C	〃	4.72	9.34	2.66	5.24
D	〃	4.76	9.51	2.62	2.20
E	〃	4.76	9.63	2.63	1.23
F	〃	4.75	9.75	2.68	3.81
G	〃	4.76	9.62	2.63	2.03
H	〃	4.75	9.10	2.61	2.58

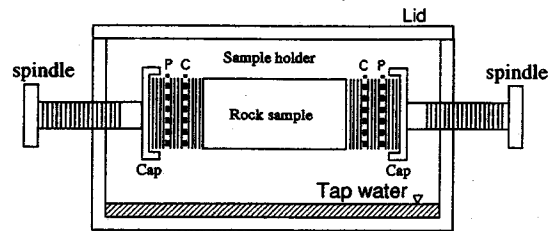


図-1 比抵抗測定容器(千葉・熊田, 1994)

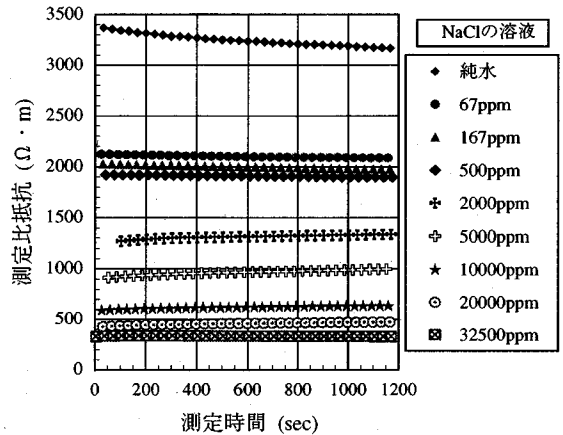


図-2 測定中の比抵抗の経時変化

いた溶液の比抵抗に等しいと見なし、間隙を飽和させた直後の溶液の比抵抗値とした。

比抵抗測定を行う際の比抵抗の経時変化を防止するため、測定中の供試体表面からの乾燥をできるだけ抑制できるようにアクリル製箱型測定容器(図-1)を製作し、測定容器底部には水道水を張り、上部に蓋をして容器を密閉し、測定中の供試体表面の乾燥を防いだ。

図-2は供試体の測定中の比抵抗の経時変化を示している。比抵抗は各NaCl溶液の濃度によって経時的に微増あるいは微減しているが、これは電極と供試体の間

に挟む濾紙に含ませた0.1NのNaCl溶液の影響で供試体の浸漬液が0.1NのNaCl溶液より濃度が大きい場合は比抵抗が経時的に微増し、濃度が小さい場合は比抵抗が経時的に微減する傾向が見られる。なお、供試体の比抵抗測定は20分間行い、その平均値を求めて岩石の比抵抗値とした。

(2) 比抵抗測定結果及び考察

水で飽和された砂岩層については、岩石の比抵抗 R_o 、間隙水の比抵抗 R_w 及び間隙率 n との間に、Archieの式(Archie, 1942)⁸⁾として式(4)と式(5)で表される関係が認められている。

$$R_o = F R_w \quad (4)$$

$$F = \left(\frac{R_o}{R_w} \right) = a n^{-m} \quad (5)$$

ここで、 a は実験定数であり、経験的に0.6~3.5の値である。 m は膠結係数(cementation factor)と称し、間隙の幾何学的形態の影響、固結の割合によって異なるが、経験的に1.4~2.2の値をとる。 F は地層比抵抗係数と呼ばれる。Archieの式は石油を胚胎するような多孔質の砂岩などを対象にする経験式であり、地層の電気伝導が間隙水だけに依存している場合に適用できる。しかし、粘土を多く含む地層などに対しては適用できない(Klein and Sill, 1982)⁹⁾。理由は、間隙水自体のイオン伝導のほかに地層に含まれている微粒の粘土分などが導電性になるからである(Patnode and Wyllie, 1950; Bussian, 1983)^{10), 11)}。

図-3は花崗岩供試体の比抵抗測定結果とArchieの式より求めた比抵抗値とを比較したものである。供試体AとCの間隙率は各々2.59%と5.24%である。供試体Cは供試体Aに比べて全体的に構成鉱物に変質されているために比抵抗が低く、間隙水の比抵抗の増加に伴う岩石の比抵抗の増加幅が小さい。両供試体とも間隙水の比抵抗が $0.2 \Omega \cdot m$ 以上からは測定比抵抗とArchieの式より求めた計算値が合わない。これは、新鮮な花崗岩においても岩石の比抵抗が間隙水の比抵抗のみに依存していないことを示している。千葉・熊田(1994)⁷⁾も粘土分がほとんど含まれていない花崗岩においても、粘土分を含む凝灰岩と同じように、間隙水の比抵抗が海水の比抵抗以下の領域でなければ、Archieの式を満足しないことを報告している。

Bussian (1983)¹¹⁾によると、水で飽和された“Clay sands”のような異質物質が混ざっている場合、すなわち、岩石構成物質が電気伝導性を持っている場合には、次式が適用できる。

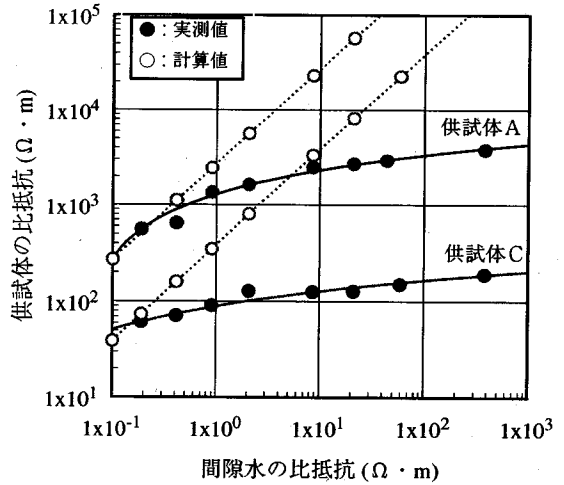


図-3 花崗岩供試体の比抵抗実測値とArchieの式より求めた計算値との比較

$$\frac{1}{R_o} = n^m \left(\frac{1 - \frac{R_w}{R_r}}{1 - \frac{R_o}{R_r}} \right)^m \frac{1}{R_w} \quad (6)$$

ここに、 R_r は岩石構成物質の比抵抗であり、岩石構成物質によって $0 \sim \infty$ の間の値となる。式(6)において、岩石構成物質の比抵抗は無限大に近づくとき、すなわち $R_r \rightarrow \infty$ になると、

$$\lim_{R_r \rightarrow \infty} \left(\frac{R_w}{R_o} \right) = n^m \quad (7)$$

となり、 $a=1$ とすれば、式(5)と一致する。また、泥質層のように岩石構成物質が高電導体となる場合、すなわち $R_r \rightarrow 0$ になると、

$$\lim_{R_r \rightarrow 0} \left(\frac{R_w}{R_o} \right) = n^{m/(1-m)} \quad (8)$$

となる。

一方、一般の地層では $R_w < R_o < R_r$ の関係があり、式(6)を2項式に展開すれば、

$$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{R_w} n^m \frac{1 - m \frac{R_w}{R_r} + \frac{m(m-1)}{2!} \left(\frac{R_w}{R_r} \right)^2 - \dots}{1 - m \frac{R_o}{R_r} + \frac{m(m-1)}{2!} \left(\frac{R_o}{R_r} \right)^2 - \dots} \quad (9)$$

表-2 花崗岩供試体の膠結係数mと岩石構成物質の比抵抗値R_r

供試体	Archieの式より求めたm値	Bussianの式より求めたm値	Bussianの式より求めたR _r 値(Ω・m)	並列回路モデルより求めたR _r 値(Ω・m)	R _w =380Ω・m時測定比抵抗値(Ω・m)
A	2.16	2.19	5,688	2,634	4,149
B	1.78	1.79	7,339	4,117	7,037
C	2.02	2.12	274	136	190
D	2.07	2.17	2,245	1,084	2,051
E	2.01	2.02	10,561	5,252	10,217
F	2.07	2.09	2,031	982	1,872
G	2.08	2.12	3,821	1,835	3,249
H	1.94	1.96	2,535	1,306	2,096

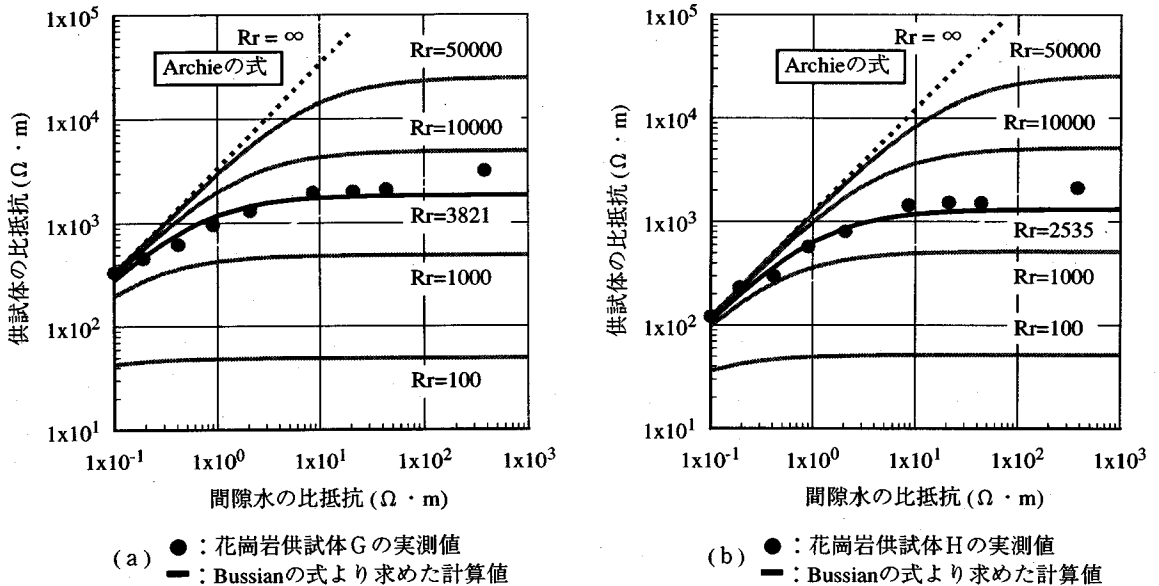


図-4 花崗岩供試体の比抵抗実測値とBussianの式より求めた計算値との比較

となる。式(9)を $1/R_o$ 及び $1/R_w$ に関する1次関数に整理すると、次式のように表される。

$$\frac{1}{R_o} \cong \frac{1}{R_w} n^m + m \frac{1}{R_r} (1-n^m) \quad (10)$$

式(10)に基づけば、横軸に $1/R_o$ 、縦軸に $1/R_w$ を取って測定値をプロットし、最小二乗法で帰直線を求めると、直線の傾きが n^m 、切片が $m(1-n^m)/R_r$ として得られる。表-2は花崗岩供試体の測定比抵抗から式(5)と式(10)を用いて求めた膠結係数と岩石構成物質の比抵抗を示している。膠結係数 m については、岩石構成物質の比抵抗がほぼ無視できるように間隙水の比抵抗を $0.1 \Omega \cdot m$ にして測定した飽和供試体の比抵抗からArchieの式より求めた値がBussianの式より求めた値より小さい。また、岩石構成物質の比抵抗はArchieの式より求めた m を

用いてBussianの式から求めた値が純水により飽和させた供試体の測定比抵抗値より少し高く、 $R_w < R_o < R_r$ の関係が認められる。しかし、一本のボーリングコアから採取した岩石でも間隙率や構成鉱物、風化・変質の程度によって大きく異なる値を示している。一方、Patnode・Wyllie(1950)¹⁰⁾が泥質層に対して提案した液相の比抵抗と導電性粒子の比抵抗との並列回路モデルに従って求めた R_r は、Bussianの式より求めた値の約半分くらいである。

図-4は花崗岩供試体の測定比抵抗値とBussianの式より求めた比抵抗値を比較したものである。図(a)の花崗岩供試体Gの間隙率と膠結係数は各々の2.03%と2.08であり、岩石構成物質の比抵抗値は3,821 $\Omega \cdot m$ である。また、図(b)の花崗岩供試体Hの間隙率と膠結係数は各々の2.58%と1.94であり、岩石構成物質の比抵抗値は2,535 $\Omega \cdot m$ である。両図とも、純水により飽和させて

測定した比抵抗値を除けば、測定比抵抗とBussianの式より求めた計算値がほぼ一致している。また、一般地層水の比抵抗が10~140 Ω・mの範囲¹²⁾に分布しているが、比抵抗測定結果によると、この範囲の間隙水の比抵抗変化による岩石の比抵抗変化はあまり見られない。図中に、岩石構成物質の比抵抗を無限大にした場合のArchieの式を点線で示すが、測定比抵抗値とは合わない。また、岩石構成物質の比抵抗が0に近づく場合は岩石の比抵抗値は間隙水の比抵抗値の変化にあまり関係なく、一定値になっている。

図-5は間隙水の電導度と測定した供試体の電導度をプロットし、最小二乗法で回帰直線を求めて示したものである。全体的に供試体の間隙率が大きいほど直線の傾きが大きい傾向が見られる。すなわち、間隙水の電導度の変化による岩石の電導度の変化幅が大きい。

以上の花崗岩供試体の比抵抗測定結果から新鮮な花崗岩や風化した花崗岩にも岩石構成物の比抵抗を考慮したBussianの式が適用可能であると考えられる。

3. 岩石・地層の弾性波速度

Wyllieら(1956)¹³⁾によると、水で飽和されている地層の弾性波速度 V_p は、

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-n)}{V_m} + \frac{n}{V_f} \quad (11)$$

として表される。ここに、 V_m は岩石構成物質の弾性波速度、 V_f は岩石内に含まれている水の弾性波速度、 n は間隙率である。

式(11)を弾性波が地層中の距離1mを通過する時間 t に変換すれば、

$$t = n t_f + (1-n) t_m \quad (12)$$

として表される。ここに、 t_f は弾性波が岩石内に含まれる水中を通過する時間、 t_m は岩石構成物質中の通過時間である。

4. 地層の比抵抗に基づく換算弾性波速度の算出方法

地層の比抵抗と弾性波速度がそれぞれ間隙率と一義的な関係にあることを用いて、地層の比抵抗を弾性波速度に換算することができる。そこで、 $a=1$ として式(5)を間隙率に対して整理すれば、次式が得られる。

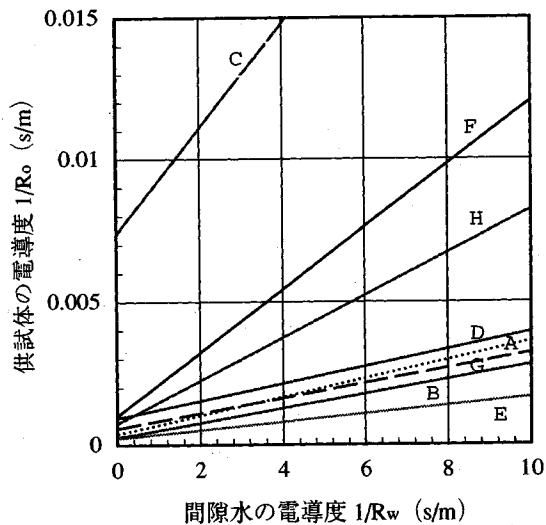


図-5 各花崗岩供試体の間隙水の電導度と岩石の電導度との関係

表-3 計算に用いた条件 (比抵抗検層)

パラメータ	計算値	
	花崗岩地層	堆積岩地層
岩石構成物質の比抵抗 R_r (Ω・m)	10,561	3,000
地層水の比抵抗 R_w (Ω・m)	62.0	20.0
岩石構成物質の弾性波速度 V_m (km/sec)	4.92	5.51
地層水の弾性波速度 V_f (km/sec)	1.5	1.5
膠結係数 m	2.1	1.9

$$n = \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{1/m} \quad (13)$$

また、式(6)を間隙率に対して整理すると、

$$n = \alpha (R_0)^{-1/m} - \beta (R_0)^{(m-1)/m} \quad (14)$$

となる。ここに、 $\alpha = (R_w)^{1/m} R_r / (R_r - R_w)$ 、 $\beta = (R_w)^{1/m} / (R_r - R_w)$ である。

まず、Archieの式(13)を式(12)に代入して整理すると、次式が得られる。

$$t = \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{1/m} t_f + \left\{ 1 - \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{1/m} \right\} t_m \quad (15)$$

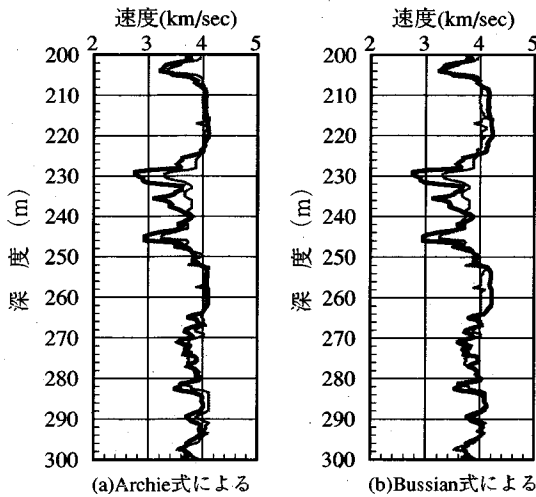


図-6 花崗岩地層における換算速度と測定速度との比較

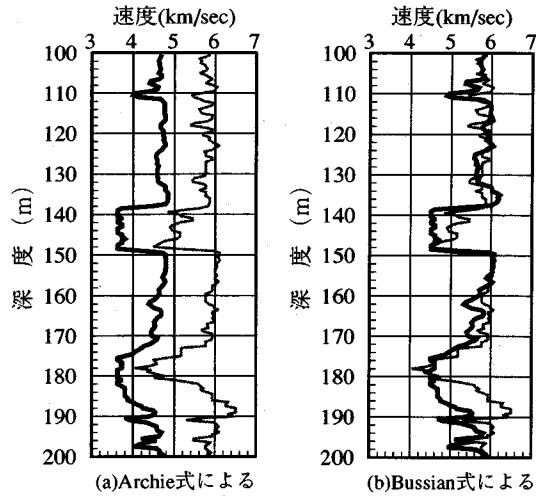


図-7 堆積岩地層における換算速度と測定速度との比較

また、Bussianの式(14)を式(12)に代入して整理すると、

$$t = A (R_o)^{-1/m} + B (R_o)^{(m-1)/m} + C \quad (16)$$

となる。ここに、 $A = \alpha(t_f - t_m)$ 、 $B = \beta(t_m - t_f)$ 、 $C = t_m$ である。

式(15)と式(16)よりそれぞれ地層の比抵抗を弾性波速度に換算することができるが、式(15)と式(16)の根本的な相異点は岩石構成物質の比抵抗を無限大にするか有限値にするかである。つまり、岩石構成物質の比抵抗を無限大にしたものがArchieの式(15)であり、岩石構成物質の比抵抗を有限値にしたものがBussianの式(16)である。

5. 比抵抗検層データから求めた換算速度と速度検層結果との比較

深層基礎地質調査を行うため深さ400mのボーリングを実施し、ジオロガー3400及びジオロガー3500 (OYO社製) を使って7種類の物理検層を行った。その中で比抵抗検層は2極法で2種類の電極間隔 (25-100cm, 50-100cm) を用いて測定を行った。また、速度検層は、孔内に小型の発振源と2つの受振器が設置されたゾンデを入れ、その間の音波の伝播時間を測定して速度を求める方法を用いた。

水で飽和されている新鮮な花崗岩地層と堆積岩地層を対象として、式(15)と式(16)に基づいて比抵抗検層データから地層の換算速度を求める。表-3は花崗岩地層と堆積岩地層のそれぞれの計算条件を示す。その中で、

岩石構成物質の弾性波速度 V_m は新鮮なコアの超音波伝播速度測定より求めた値であり、地層水の比抵抗 R_w は比抵抗検層データから求めた値である。地層水の弾性波速度 V_f は一般値を適用しており、膠結係数 m は花崗岩及び堆積岩コアの比抵抗測定結果より求めた値である。また、岩石構成物質の比抵抗 R_r は、花崗岩の場合は式(10)を用いて求めた値であり、堆積岩の場合は比抵抗検層データから換算した速度と速度検層データとの間の残差が最小になるように最小二乗法で求めている。

図-6は新鮮な花崗岩地層において比抵抗検層による換算速度と速度検層による測定速度を比較したものである。図(a)はArchieの式(15)を用いて換算速度を求めたものであり、図(b)はBussianの式(16)を用いて換算速度を求めたものである。両図とも換算速度と測定速度がほぼ一致しており、それらの相関係数はいずれも0.84である。これらの図から分かるように新鮮な花崗岩の場合は、岩石構成物質自体の比抵抗がかなり高いために、両式とも同じ結果を示していると考えられる。

図-7は砂岩、頁岩及び礫岩の互層からなる堆積岩地層において換算速度と測定速度を比較したものである。図(a)と図(b)はそれぞれArchieの式とBussianの式を用いて換算速度を求めたものである。図(a)では、換算速度と測定速度がかなり離れている。これに対して、図(b)では、換算速度と測定速度がほぼ一致しており、この相関係数は0.72である。以上の結果より、堆積岩地層においてはBussianの式が優れており、その岩石の比抵抗は間隙率と間隙水の比抵抗の外に、岩石の中に含まれている微粒の粘土分などの導電性物質の比抵抗の影響

表-4 計算に用いた条件 (トンネル)

パラメータ	トンネルルート上の弾性波速度分布				
地山の弾性波速度 V_p (km/sec)	2.4 - 2.5	2.6 - 2.7	2.8	3.2	3.4
コアの弾性波速度 V_p (km/sec)	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0
地層水の弾性波速度 V_p (km/sec)	1.5	地層水の比抵抗 R_w ($\Omega \cdot m$)		20.0	
岩石構成物質の比抵抗 R_r ($\Omega \cdot m$)	520.0	膠結係数 m		1.9	

表-5 比抵抗分布に対する換算速度による地山区分

比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)	トンネルルート上の弾性波速度 (km/sec)				
	2.4 - 2.5	2.6 - 2.7	2.8	3.2	3.4
230以上	III	III	III	III	III
220	II	III	III	III	III
210		III	III	III	III
200		III	III	III	III
190		III	III	III	III
180	II	II	II	II	II
170	I	II	II	II	II
160		II	II	II	II
150	I	II	II	II	II
140		II	II	II	II
130	I	II	II	II	II
120		II	II	II	II
110	I	II	II	II	II
100		II	II	II	II
90	I	II	II	II	II
80		II	II	II	II

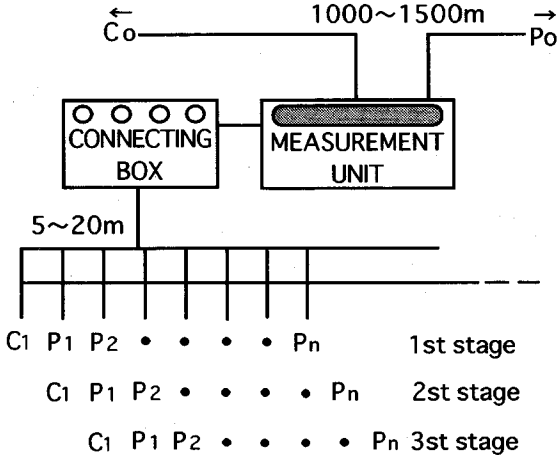


図-8 電極配列の概要

を受けていることが推察される。

6. トンネル地山の定量的評価

上述した新鮮な花崗岩地層と堆積岩地層において、比抵抗検層データから換算した速度と速度検層データを比較した結果に基づいて、Bussianの式(14)とWyllieの式(12)を用いて実際のトンネルにおける地山比抵抗と弾性波速度の定量的評価による地山区分と適用性を検討する。

対象トンネルは延長が715mの鉄道トンネルである。トンネルルート沿いの地質¹⁴⁾は、新第三紀の中新世～鮮新世において二上山の火山活動時期に堆積した二上層群に属する原川累層と定ヶ城累層が分布している。トンネル坑口付近の原川累層は、主に礫岩からなるが、泥岩・砂岩・泥流堆積物を伴う。本層は全体的に風化が進んでいて脆弱な岩質であり、堆積後隆起して南東方向の傾斜を示す。定ヶ城累層の寺山火山岩は原川累層などを覆う溶岩流であり、岩石の特徴としては粒径等に若干の変化が見られる程度で、全体としてはほぼ同様の黒雲母石英安山岩で構成されている。トンネルルートと直交する方向の破碎帯・風化帯が幾条が存在する。

トンネルにおいて実施した比抵抗高密度探査は比抵抗法の2極法によって測定を行った。測定方法は、McOHM-21 (OYO社製) を使って、図-8に示すように測線上に一定間隔で設置する電極系 (C_1 と $P_1P_2 \dots P_n$) と測線から十分離れた地点に遠電極 (C_o と P_o) を設け、測線沿いの電流電極 (C_1) と遠電流電極 (C_o) の間に電流を流し、測線沿いの電位電極 ($P_1P_2 \dots P_n$) と遠電位電極 (P_o) の間の電位差を測定する。

以後、順次電極系を移動させ探査対象領域のデータを得る。本探査では電極の設置間隔は5mであり、最大電極間隔は100mとした。

地山の定量的評価区間はトンネル両坑口部分を除き、水で飽和されている区間を式(16)に基づいて比抵抗高密度探査データから地層の換算弾性波速度を求める。

表-4は計算に用いた条件を示す。その中で、コアの弾性波速度 V_m はコアの超音波伝播速度測定より求めた値であり、地層水の比抵抗 R_w はトンネル坑内の湧水の比抵抗値である。岩石構成物質の比抵抗 R_r は $R_w < R_r < R_r$ の関係から地山比抵抗より少し高い値を用いている。また、膠結係数 m はトンネル切羽岩質状態を考慮して一般値を適用した。

表-5は表-4の計算条件のもとで定量的評価手法による計算結果に基づいて作成した地山比抵抗分布に対する換算弾性波速度による地山区分を示す。これは鉄道トンネルの地山分類基準¹⁵⁾に従って、地山比抵抗から換算した弾性波速度が2.5km/sec以下はI等級、2.5～3.0km/secはII等級、3.0km/sec以上はIII等級として分類している。

図-9は地山比抵抗と定量的評価による地山区分及

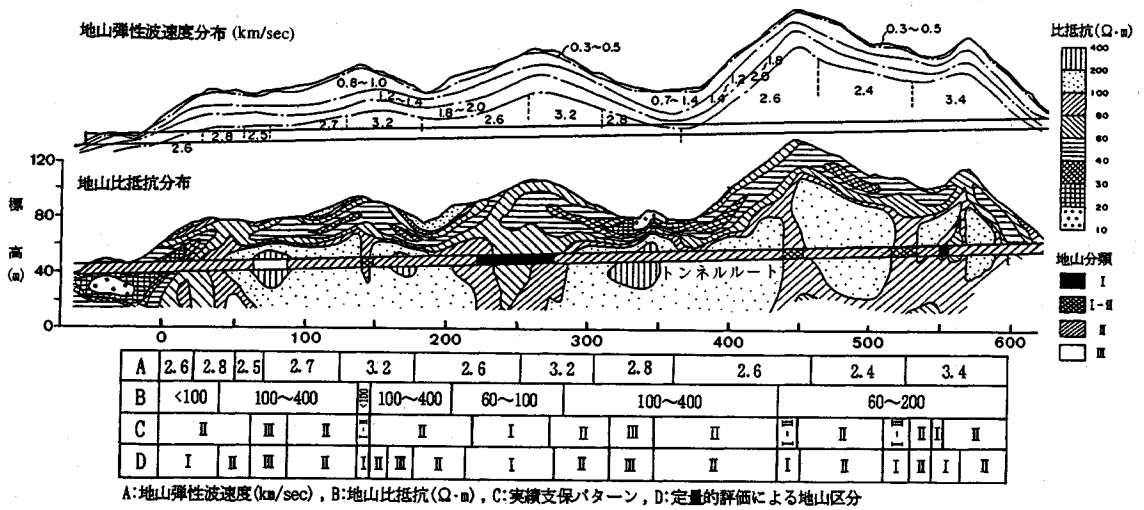


図-9 地山比抵抗と定量的評価による地山区分及び実績支保パターンとの比較

び実績支保パターンとの対比を示す。この図において、トンネルルート沿いの弾性波速度は2.4~3.4km/secの範囲で、比抵抗は60~400 Ω・mの範囲で分布している。実績支保パターンと提案する手法による地山区分はI等級~III等級で分類されているが、全体を通して、定量的評価による地山区分と実績支保パターンとの間にほぼ良い一致が見られる。ただし、比抵抗が200 Ω・m以上に分布する距離程160~180m区間では、提案する手法による地山等級が実績支保パターンより1ランク高く評価されている。

7. 結論

本研究は比抵抗と弾性波速度による山岳トンネル地山の定量的評価手法を提案したものである。花崗岩供試体の比抵抗測定を行い、間隙水の比抵抗が岩石の比抵抗へ及ぼす影響、岩石構成物質の比抵抗及び膠結係数などを調べるとともに、岩石の比抵抗と弾性波速度がそれぞれ間隙率と一義的な関係にあることを用いて、岩石の比抵抗を弾性波速度に換算できる理論式を確立した。これを新鮮な花崗岩地層と砂岩、頁岩及び礫岩の互層となっている堆積岩地層において比抵抗検層データと速度検層データを用いて検証した。さらに、実際の鉄道トンネルにおける比抵抗と弾性波速度の定量的評価による地山区分を行って実績支保パターンと比較し、その適用性について検討を行った。この研究から得られた結果を要約すれば次のようである。

(1) 花崗岩供試体の比抵抗は一般地層水の比抵抗分布範囲(10~140 Ω・m)内では間隙水の比抵抗変化に大き

く依存せず、岩石の比抵抗変化はあまり見られなかった。

(2) 新鮮な花崗岩や風化・変質した花崗岩でも、岩石の比抵抗は間隙水のものに依存せず、岩石構成物質の比抵抗を考慮したBussianの式が適用可能であった。また、Bussianの式より求めた岩石構成物質の比抵抗 R_r は純水により飽和させて測定した岩石の比抵抗より少し高く、 $R_w < R_o < R_r$ の関係が認められた。

(3) 比抵抗検層データから求めた換算速度と速度検層データを比較した結果、新鮮な花崗岩地層の場合には、岩石構成物質の比抵抗が高いためにArchieの式(15)とBussianの式(16)ともほぼ同じ結果を示した。しかし、砂岩、頁岩及び礫岩の互層からなる堆積岩地層においては、岩石構成物質の比抵抗を考慮したBussianの式(16)を用いた方がArchieの式(15)より良い結果が得られた。これらの結果より、地山比抵抗から弾性波速度を換算する際は、岩石構成物質の比抵抗を考慮する必要があることが分かった。

(4) 筆者らが提案する手法をもとに、実際の鉄道トンネルにおける比抵抗と弾性波速度の定量的評価による地山区分を行い、実績支保パターンを比較した結果、良い一致が見られた。従って、提案した定量的評価による地山区分手法の適用性が確認された。

謝辞: 本研究を遂行するあたり、岩石比抵抗測定システム製作と測定方法について適切な助言をいただいた(株)住友金属鉱山の千葉昭彦氏に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会編：トンネルにおける調査・計測の評価と利用，pp.6～7，1987.
- 2) 松井保：比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用，物理探査，Vol.48，No.6，pp.530～538，1995.
- 3) 松井保：高密度電気探査技術とトンネル地盤調査への適用性，地下空間利用シンポジウム，土木学会，pp.37～48，1993.
- 4) 内浦慎一，谷口親平，松井保，朴三奎：比抵抗高密度探査結果の定量的評価によるトンネル地山区分について，第9回岩盤力学国内シンポジウム講演論文集，pp.671～676，1994.
- 5) 内浦慎一，谷口親平，松井保，朴三奎：比抵抗高密度探査データに基づくトンネル地山区分手法と適用性，第26回岩盤力学シンポジウム講演論文集，pp.326～330，1995.
- 6) 朴三奎，松井保，中川要之助，中西博次：比抵抗高密度探査と物理検層による地山区分に関する研究，応用地質，平成6年度研究発表会，pp.127～130，1994.
- 7) 千葉昭彦，熊田政弘：花崗岩及び凝灰岩供試体の比抵抗測定，物理探査，Vol.47，No.3，pp.162～172，1994.
- 8) Archie, G.E. : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans, A.I.M.E.*, Vol.146, pp.55～67, 1942.
- 9) Klein, D. J. and Sill, W. R. : Electrical properties of artificial clay-bearing sandstones, *Geophysics*, Vol.47, pp.1593～1601, 1982.
- 10) Patnode, G.E and Wyllie, M.R.J. : The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation, *Trans, A.I.M.E.*, Vol.189, pp.47～52, 1950.
- 11) Bussian, A.E. : Electrical conductance in a porous medium, *Geophysics*, Vol.48, pp.1258～1268, 1983.
- 12) 島裕雅，梶間和彦，神谷英樹：比抵抗映像法，古今書院，pp.118，1995.
- 13) Wyllie, M.R., Gregory, A.R. and Gardner, L.W. : Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, Vol.21, pp.41～70., 1956.
- 14) 河合綱昌，中屋賀雄，青木 亘：新しい電気探査法（比抵抗映像法）による大阪線新玉手山トンネル地質調査について，近鉄技報，Vol.23，pp.133～142，1992.
- 15) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説，1986.

(1995. 10. 11 受付)

A TUNNEL ROCK MASS CLASSIFICATION TECHNIQUE AND ITS APPLICABILITY USING RESISTIVITY AND SEISMIC WAVE VELOCITY

Tamotsu MATSUI and Sam Gyu PARK

Resistivity-based high-density prospecting methods have recently increased to be applied to tunnel, landslide and other ground investigations. Therefore, it is essential to establish the rock classification technique by resistivity-based high-density prospecting data. In this paper, the authors try to propose a tunnel rock classification technique, in which the converted seismic wave velocity based on resistivity-based high-density prospecting data can be used for classifying tunnel rock mass. Furthermore, the applicability of the proposed tunnel rock classification technique is discussed, by comparing estimated support patterns with actually performed ones.