

比抵抗高密度探査結果による山岳トンネルの地山分類手法

ROCK MASS CLASSIFICATION TECHNIQUE OF MOUNTAIN TUNNEL BY RESISTIVITY-BASED HIGH-DENSITY PROSPECTING DATA

松井 保*・朴 三奎**・上出定幸***

Tamotsu MATSUI, Sam Gyu PARK, Sadayuki KAMIDE

This paper presents rock mass classification technique by resistivity-based high-density prospecting data in the mountain tunnel. In the proposed technique, seismic wave velocity based on resistivity is converted by using the theoretical relation between electrical resistivity and seismic wave velocity which is the function of porosity. The authors carry out rock mass classification by quantitative evaluation of ground resistivity basing on resistivity measurement results of cores collected on cutting face of roadway tunnel site. Furthermore, the applicability of the proposed technique is discussed, by comparing estimated support patterns with actually performed ones.

Keywords : rock mass classification, resistivity, seismic wave velocity, roadway tunnel

1. まえがき

山岳トンネルの場合、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地盤調査が行われているが、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。最近、従来のトンネルの事前地盤調査の欠点を克服するために、比抵抗高密度探査を実施するケースが増加しており、この探査結果から得られる地下の比抵抗分布の意味を解釈して、弾性波速度からは把握できない種々の地盤性状を推定する手段として用いられている。

しかしながら、地盤の比抵抗は主に岩種、間隙率、水飽和度、地層水の比抵抗、粘土含有量などによって変化するため、地盤評価を行う際に解釈者の能力や主観的な判断によって解釈結果が実際の地盤状況と大きく異なる場合もあり、解釈結果が道路や鉄道トンネルの事前設計段階に必要な地山分類と結びつけることは難しい。こうした中、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確立が求められる。

筆者らは、既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、鉄道トンネルにおいて提案した手法の適用性を確認した¹⁾。本論文では、筆者らが提案した手法をもとに、実際の道路トンネルの掘削現場の切羽面から採取したコアの比抵抗測定結果に基づいて、地山比抵抗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検討する。

2. 岩石の比抵抗測定

2・1 岩石供試体及び測定方法

比抵抗測定に用いた岩石供試体は、道路トンネルの掘削現場の切羽面で採取された花崗岩供試体5個である。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 大阪大学受託研究員 梶谷エンジニア株式会社

***正会員 梶谷エンジニア株式会社

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 ρ 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。

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

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

比抵抗測定方法は千葉・熊田²⁾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せる溶液は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は純水及び濃度の異なるNaCl溶液33, 150, 200, 500, 2,000, 5,000, 10,000, 20,000, 32,500, 55,000ppmの10種類を用意した。

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。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・2 測定結果及び考察

水で飽和された砂岩層については，岩盤の比抵抗 R_o ，間隙水の比抵抗 R_w 及び間隙率 n との間に，Archieの式³⁾として式(4)と式(5)で表される関係が認められている。

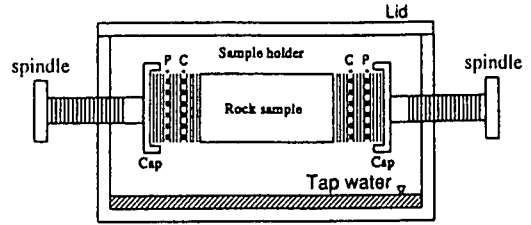
$$R_o = F R_w \quad (4)$$

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

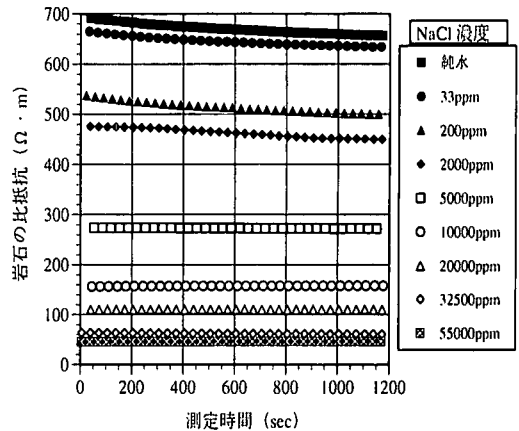
ここで， a は実験定数であり，経験的に0.6～3.5の値である。 m は膠結係数と称し，間隙の幾何学的形態の

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	4.97	9.44	2.69	1.04
B	"	4.97	9.59	2.71	0.65
C	"	4.97	9.55	2.70	0.87
D	"	4.97	7.80	2.63	2.46
E	"	4.99	9.10	2.65	2.61



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

影響，固結の度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のみ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。その理由は，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を有するからである⁴⁾。

図-3は花崗岩供試体CとDの比抵抗測定結果とArchieの式より求めた計算値を比較したものである。この図によると，いずれの供試体でも間隙水の比抵抗が大きくなると，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。

Bussian⁵⁾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，岩石構成物質が導電性を持っている場合には，次式が適用できる。

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

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～∞の間の値となる。式(6)において，岩石構成物質の比抵抗が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。

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，

$$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{R_w} n^m \frac{1 - m \frac{R_w}{R_r} + \frac{m(m-1)}{2!} \left(\frac{R_w}{R_r} \right)^2 - \dots}{1 - m \frac{R_o}{R_r} + \frac{m(m-1)}{2!} \left(\frac{R_o}{R_r} \right)^2 - \dots} \quad (8)$$

となる。式(8)を $1/R_o$ と $1/R_w$ に関する1次関数に整理すると，次式のように表される。

$$\frac{1}{R_o} \cong \frac{1}{R_w} n^m + m \frac{1}{R_r} (1 - n^m) \quad (9)$$

式(9)に基づけば，縦軸に $1/R_o$ ，横軸に $1/R_w$ を取って測定値をプロットし，最小二乗法で回帰直線を求めると，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(9)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。Archieの式より求めた m 値は，岩石構成物質の比抵抗がほぼ無視できるように供試体の間隙を比抵抗値が $0.1 \Omega \cdot m$ の溶液に飽和させて測定した比抵抗

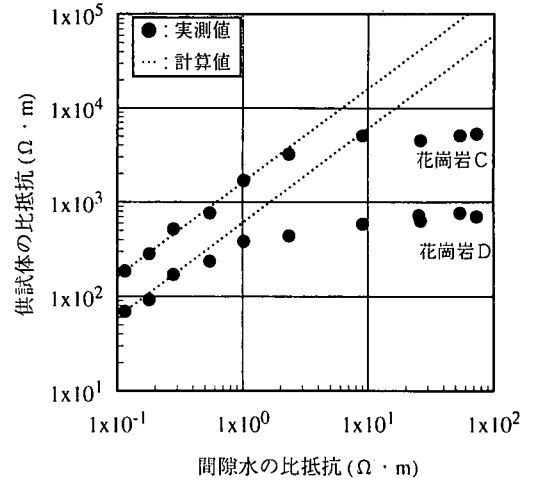
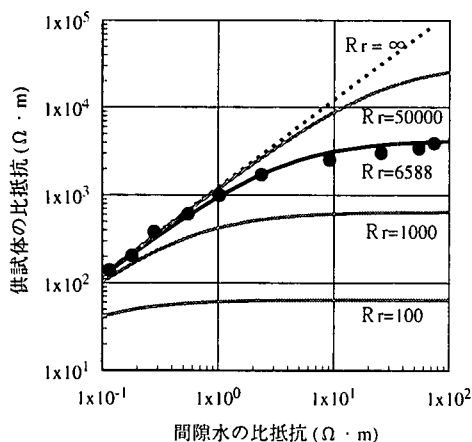


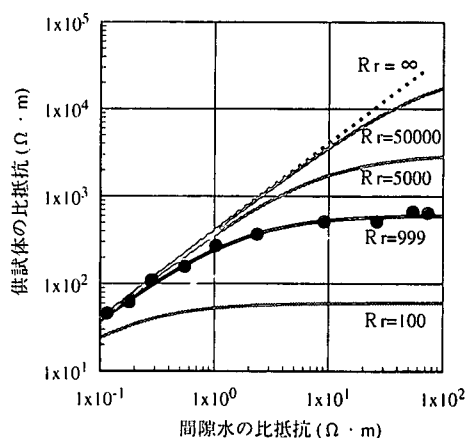
図-3 花崗岩供試体の比抵抗実測値と Archie の式より求めた計算値との比較

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 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($\Omega \cdot m$)	並列回路モデルより求めた R_r 値($\Omega \cdot m$)	$R_w=54.4 \Omega \cdot m$ 時測定比抵抗($\Omega \cdot m$)
A	1.56	1.57	6,588	4,232	3,401
B	1.48	1.49	12,962	8,739	4,137
C	1.56	1.56	12,194	7,844	3,553
D	1.73	1.75	1,248	723	766
E	1.65	1.66	999	609	671



(a) ●：花崗岩供試体Aの実測値
—：Bussianの式より求めた計算値



(b) ●：花崗岩供試体Eの実測値
—：Bussianの式より求めた計算値

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

抗から求めており、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 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より少し高く、 $R_w < R_0 < R_r$ の関係が認められる。一方、Patnode・Wyllie 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3分の2程度である。

図－4 は花崗岩供試体の測定比抵抗と Bussian の式より求めた計算値を比較したものである。両図とも、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値が10～200 $\Omega \cdot m$ 範囲に分布しているが、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供試体の比抵抗変化はあまり見られない。

以上の花崗岩供試体の比抵抗測定結果から、既に提案されている Archie の式と Bussian の式に基づいて岩石比抵抗に影響を及ぼす要因について検討した結果、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。またこの式は、元々泥質砂岩のように導電性物質が含まれている地層に適用した経験式であるが、新鮮な花崗岩や風化した花崗岩が分布する岩盤にも適用可能であると考えられる¹¹⁾。

3. 岩石・地層の弾性波速度

Wyllie ら⁶⁾によると、水で飽和されている地層の弾性波速度 V_p は、

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-n)}{V_m} + \frac{n}{V_f} \quad (10)$$

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。

表－３ 計算に用いた条件

パラメータ	トンネルルートの弾性波速度分布									
地山の弾性波速度 V _p (km/sec)	2.0～2.1	2.4	3.2	3.4	3.8	4.0	4.4	4.6	4.8	5.0
コアの弾性波速度 V _m (km/sec)	3.2	3.4	4.0	4.1	4.5	4.6	4.8	4.9	5.0	5.2
地層水の弾性波速度 V _f (km/sec)	1.5	地層水の比抵抗 R _w (Ω・m)				70.0	膠結係数 m		1.7	
岩石構成物質の比抵抗 R _r (Ω・m)	地山比抵抗値が 600 Ω・m 未満の場合：1,000 地山比抵抗値が 600 Ω・m 以上の場合：5,000									

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、式(6)を間隙率に対して整理すれば、次式が得られる。

$$n = \alpha (R_o)^{-1/m} - \beta (R_o)^{(m-1)/m} \quad (11)$$

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。

また、Bussian の式(11)を式(10)に代入して整理すると、

$$\frac{1}{V_p} = A (R_o)^{-1/m} + B (R_o)^{(m-1)/m} + C \quad (12)$$

となる。ここに、 $A = \alpha (1/V_f - 1/V_m)$ 、

$B = \beta (1/V_m - 1/V_f)$ 、 $C = 1/V_m$ である。

式(12)より地層の比抵抗を弾性波速度に換算することができる。

５．地山比抵抗の定量的評価による地山区分及び考察

対象トンネル付近の地質は、中生代白亜紀中期に進入した領家花崗岩類の石英閃緑岩で、新鮮岩、変質岩、カククラサイトおよび破碎帯に大別される。これらは西北西～東南東方向の断層破碎帯によって規制され、平面的には帯状～レンズ状に分布する。

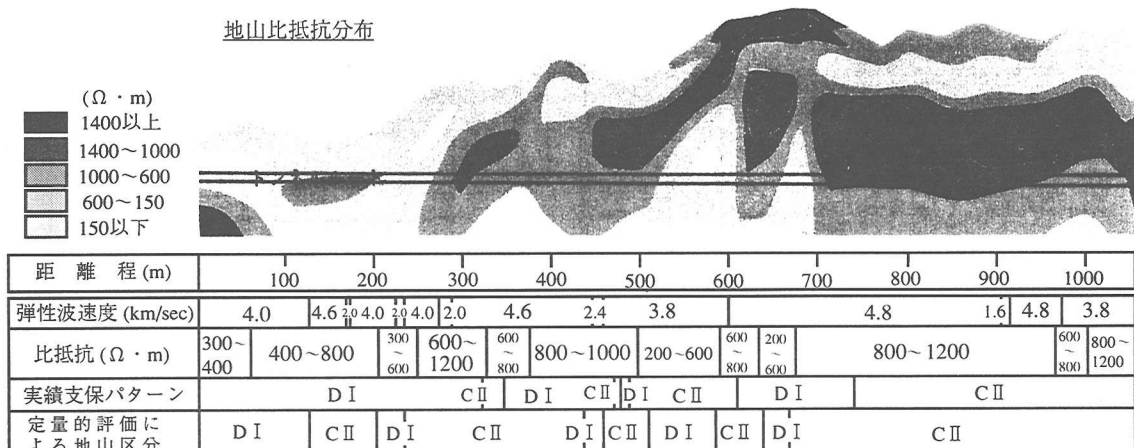
トンネルの定量的評価区間は、水で飽和されている花崗岩層を対象として、比抵抗高密度探査結果から地山の換算弾性波速度を求める。表－３に計算条件を示す。その中で、 V_m はコアの超音波伝播速度測定より求めた値であり、 R_w はトンネル坑内湧水の比抵抗測定から求めた値である。 m はコアの比抵抗測定結果に基づいて与えた値である。本調査区間の地山比抵抗が幅広く分布するためトンネルルート沿いの水平ボーリングコアの岩級と地山比抵抗を比較し、地山比抵抗値が 600 $\Omega \cdot m$ 以上と未満の区間に分けて、切羽面から採取したコアの比抵抗測定結果に基づいてそれぞれの R_r 値を与えた。地山比抵抗値が 600 $\Omega \cdot m$ 以上の R_r 値は、表－２の供試体 A、B、C の比抵抗測定結果より Bussian の式から求めた R_r 値を平均すると、10,000 $\Omega \cdot m$ 以上になるが、岩石の亀裂よりも地山の亀裂がはるかに大きいことを考慮して測定値中の最小値に近い値として 5,000 $\Omega \cdot m$ と設定した。また、地山比抵抗値が 600 $\Omega \cdot m$ 未満の R_r 値は、供試体 C、D の比抵抗測定結果に基づいて 1,000 $\Omega \cdot m$ と設定した。表－４は地山比抵抗値が 600 $\Omega \cdot m$ 未満の場合について上記の計算条件のもとで求めた換算弾性波速度(V_p')の計算例である。また、表－５はトンネルルート上の弾性波速度と比抵抗から求めた換算弾性波速度による地山区分例である。

表－４ 換算弾性波速度の計算例

V_p (km/sec)	V_m (km/sec)	R_o ($\Omega \cdot m$)	V_p' (km/sec)	地山等級
3.8	4.5	600	3.6	C I
3.8	4.5	550	3.5	C II
		500	3.4	
		450	3.2	
3.8	4.5	400	3.1	D I
		350	2.9	
		300	2.7	
3.8	4.5	250	2.6	D II
		200	2.3	
		150	2.0	
		100	1.8	

表－５ 換算弾性波速度による地山区分例

比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	トンネルルートの弾性波速度分布 (km/sec)				
	2.0	3.8	4.0	4.8	
600	D I	C I	C I	C I	
550		C II			C I
500			C II		
450				C II	
400	C II				
350		D I	D I		
300					D I
250					
200	D II	D II		D II	



図ー5 対象トンネルにおける実績支保パターンと地山比抵抗の定量的評価による地山区分との比較

図ー5は対象トンネルの地山比抵抗分布と、実績支保パターンと地山比抵抗の定量的評価による地山区分を比較したものである。この図によると、トンネルルート沿いの弾性波速度は1.6~4.8km/secの範囲で分布し、地山比抵抗値は200~1200 $\Omega \cdot m$ の範囲で分布している。全体的な比抵抗分布は高比抵抗や低比抵抗を示す様々なゾーンが分布している。これらの比抵抗の違いは亀裂や断層・破砕帯に伴う間隙率、粘土含有率、体積含水率及び岩質などの違いを表している。

トンネル実績支保パターンと比抵抗高密度探査結果の定量的評価による地山区分を比較すると、両者ともD I~C II等級に区分されている。局所的には距離程130~200 m, 230~320 m, 350~440 m, 610~640 m, 670~750 mの区間のように、実績支保パターンの方が定量的評価による地山区分より1ランク低く評価されている。これは、トンネル坑内の湧水などのために施工時の安全性を考慮し、1ランク低く評価されたと考えられる。また、距離程500~590 m区間では、地山比抵抗値が600~200 $\Omega \cdot m$ の範囲に分布し、事前地質調査段階では坑内湧水が予想された区間である。しかしながら、本調査区間のトンネル掘削前に既に掘削が完了した反対側境界からの水抜きボーリングによる地下水位の低下の影響で坑内湧水量が減少されたため実績支保パターンが定量的評価による地山区分よりも1ランク高く評価されたと考えられる。

6. まとめ

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ことができる。これをもとに、実際の道路トンネルの掘削現場の切羽面から採取したコアの比抵抗測定結果に基づいて地山比抵抗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適用性を検討した。その結果、一部区間ではトンネル坑内の湧水などのために施工時の安全性を考慮し、実績パターンの方が1ランク低く評価されているが、全体的には地山がD I~C II等級に区分されており、両者がほぼ対応している。

7. 参考文献

- 1) 松井保, 朴三奎: 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, 土木学会論文集, 掲載予定中。
- 2) 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.
- 3) 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, 1964.
- 4) 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.
- 5) Bussian, A.E.: Electrical conductance in a porous medium, Geophysics 48, pp.1258~1268, 1983.
- 6) Wyllie, M.R., Gregory, A.R. and Gardner, L.W.: Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, Geophysics 21, pp.41~70, 1956.