

(68) 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

パシフィックコンサルタンツ(株) ○内浦 慎一
都市地下空間活用研究会 正会員 谷口 親平
大阪大学工学部 正会員 松井 保
大阪大学工学部 朴 三奎

Application of a Tunnel Rock Classification Technique by Resistivity-Based High-Density
Prospecting Data

Shinichi Uchiura, Pacific Consultants Co., Ltd.

Shinpei Taniguchi, Urban Underground Space Center of Japan

Tamotsu Matsui, Sam-Gyu Park, Department of Civil Engineering, Osaka University

ABSTRACT

Resistivity-based high-density prospecting method has recently increased to be applied to tunnel, landslide and other ground investigations. Therefore, it is essential to establish rock classification technique by resistivity-based high-density prospecting data.

The authors have already tried to propose a tunnel rock classification technique by elastic wave velocity converted from the resistivity-based high-density prospecting data. In this paper, a case study is described, in which the proposed tunnel rock classification technique is applied to a tunnel in granite rock mass. The designed tunnel support pattern is also compared with the executed one, followed by their reasonable agreement.

1. はじめに

最近、トンネルや地すべりをはじめ種々の地盤調査に高密度電気探査、比抵抗トモグラフィー、MT法などの比抵抗高密度探査¹⁾が実施されるケースが増加している。著者らはすでに比抵抗高密度探査データから得られる比抵抗値を岩盤の弾性波速度に換算する手法を提案し、花崗岩など岩石の比抵抗値が非常に大きい場合にこの手法がトンネル地山区分に適用しうる可能性を示した²⁾。また、岩石が電気伝導性を持っている場合について、比抵抗値を弾性波速度に換算する理論式を比抵抗検層データと速度検層データを用いて確立し、これをもとに堆積岩地層の地山区分に適用する研究³⁾も行われている。

本報告においては、岩石の比抵抗値が非常に大きい花崗岩より構成されるトンネルについて、著者らが提案している地山区分手法を適用した設計・施工例を示し、設計支保パターンと実施支保パターンを対比し、提案する手法の適用性を検証した結果、良好な一致が見られたので報告する。

2. 比抵抗高密度探査データに基づく岩盤の弾性波速度の算出方法

岩盤の比抵抗値 $[R_t]$ は、岩石自体の比抵抗値を無限大と考えると、飽和度 $[Sw]$ ・間隙率(割れ目含む) $[n]$ ・地下水比抵抗値 $[R_w]$ のパラメーターの関数として式(1)のように表わされる。

$$Rt = func(Sw \cdot n \cdot Rw) \quad (1)$$

比抵抗高密度探査より得られる岩盤の比抵抗値は、これらのパラメーターが複合されたものであるため、各パラメーターを次の手順で算出する。

1) 飽和度の算出

岩盤の比抵抗値は、飽和度・間隙率（割れ目含む）・地下水の比抵抗値によって決まり、次式によって求めることができる。

$$Rt = a \cdot Rw \cdot n^m \cdot Sw^{-2} \quad (2)$$

a : 実験定数であり、通常1または1以下の値である。ここに、 $a = 1$ とする。

Rt : 岩盤の真の比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)

Rw : 地下水の比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)

n : 間隙率 (%)

m : 充填指数 (表-1に示すとおり、割れ目の状態・固結度により異なる。)

Sw : 飽和度 (%)

ここで、花崗岩に対して、 $m = -2.0$ とすると、間隙率は次式で表される。

$$n = \frac{1}{Sw} \cdot \sqrt{\frac{Rw}{Rt}} \quad (3)$$

また、間隙率（割れ目含む）と岩盤の弾性波速度・岩石の弾性波速度・地下水の伝播速度との間には次の関係式が成り立つ。

$$\frac{1}{Vp} = \frac{(1-n)}{Vm} + \frac{n}{Vf} \quad (4)$$

式(3)と式(4)を合成すると、式(5)を得る。

$$\frac{1}{Vp} = \frac{1}{Sw} \cdot \sqrt{\frac{Rw}{Rt}} \cdot \left(\frac{1}{Vf} - \frac{1}{Vm} \right) + \frac{1}{Vm} \quad (5)$$

式(5)より、式(6)を得る。

$$Sw = \sqrt{\frac{Rw}{Rt}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{Vf} - \frac{1}{Vm} \right)}{\left(\frac{1}{Vp} - \frac{1}{Vm} \right)} \quad (6)$$

Vp : 岩盤の弾性波速度 (km/sec)

Vm : 岩石の弾性波速度 (km/sec)

Vf : 地下水の伝播速度 (km/sec)

式(6)より飽和度を算出し、これにより、飽和区間と不飽和区間に区分する。

2) 飽和岩盤区間の定量的評価

式(5)より、 $Sw = 100\%$ の場合、岩盤の弾性波速度は次式で表される。

$$Vp = \frac{1}{\sqrt{\frac{Rw}{Rt} \cdot \left(\frac{1}{Vf} - \frac{1}{Vm} \right) + \frac{1}{Vm}}} \quad (7)$$

式(7)より、比抵抗値（岩盤・地下水）と弾性波速度（岩石）を弾性波速度（岩盤）に換算することができる。これより、高弾性波速度層下の低弾性波速度層の弾性波速度を算定することができる。

この弾性波速度をトンネル標準方書（山岳編）の地山分類表の弾性波速度による区分に対比させることにより、地山評価を行う。図-1に花崗岩における比抵抗値と岩盤の弾性波速度の実測例を示す。

表-1 地質と充填指数との関係^{4) 5)}

地 質 名	充填指数 (m)
未 固 結 砂	-1.3 ~ -1.8
砂 岩 ・ ド ロ マ イ ト	-1.7 ~ -2.0
多 孔 質 な 石 灰 岩	-1.7 ~ -2.3
花 崗 岩	-2.0
堅 硬 な 岩 盤	-2.3 以上

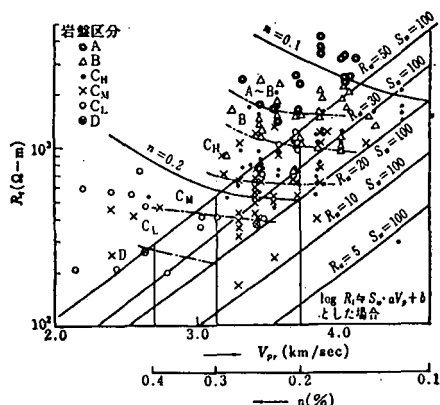


図-1 岩盤区分別比抵抗値と岩盤の弾性波速度との関係⁵⁾

3) 不飽和岩盤区間の定量的評価

式(4)は不飽和の場合、次式で表される。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-n)}{V_m} + \frac{n S_w}{V_f} + \frac{n(1-S_w)}{V_a} \quad (8)$$

V_a : 間隙中の気体の伝播速度 (km/sec)

式(8)より、式(9)を得る。

$$n = \frac{\left(\frac{1}{V_p} - \frac{1}{V_m}\right)}{-\frac{1}{V_m} + \frac{S_w}{V_f} + \frac{(1-S_w)}{V_a}} \quad (9)$$

式(9)に式(6)で算出した飽和度を代入して間隙率を算出し、間隙率によって岩盤区分を推定し、地山評価を行う。表-2に花崗岩における間隙率と岩盤区分の関係を示す。

表-2 花崗岩の間隙率と岩盤区分の関係⁵⁾

岩盤区分	風化変質	割れ目	間隙率 n(%)
D L	極軟 まさ化	砂状～ シルト状	35～43
D M	極軟 まさ化	砂状	20～35
D H	ハンマーでぼろぼろに 砕ける	礫状	14～20
C L	ハンマーで容易に 砕ける	岩片状 ～礫状	10±
C M	ハンマーで容易に 割れる	岩片状	5±
C H	ハンマーで金属 音を発する	短柱状	3±

3. 比抵抗高密度探査から求めた換算弾性波速度による地山区分

対象とするトンネルは、延長約1.2kmの両押し施工であり、掘削が完了した片側約0.6kmの区間について、提案する手法によって地山区分を行った設計支保パターンと実施支保パターンの比較を行うものである。トンネルは全区間花崗岩より構成されており、弾性波探査、比抵抗高密度探査、ボーリング調査および岩石試験が実施された。図-2に探査結果の弾性波速度分布と比抵抗分布を示す。

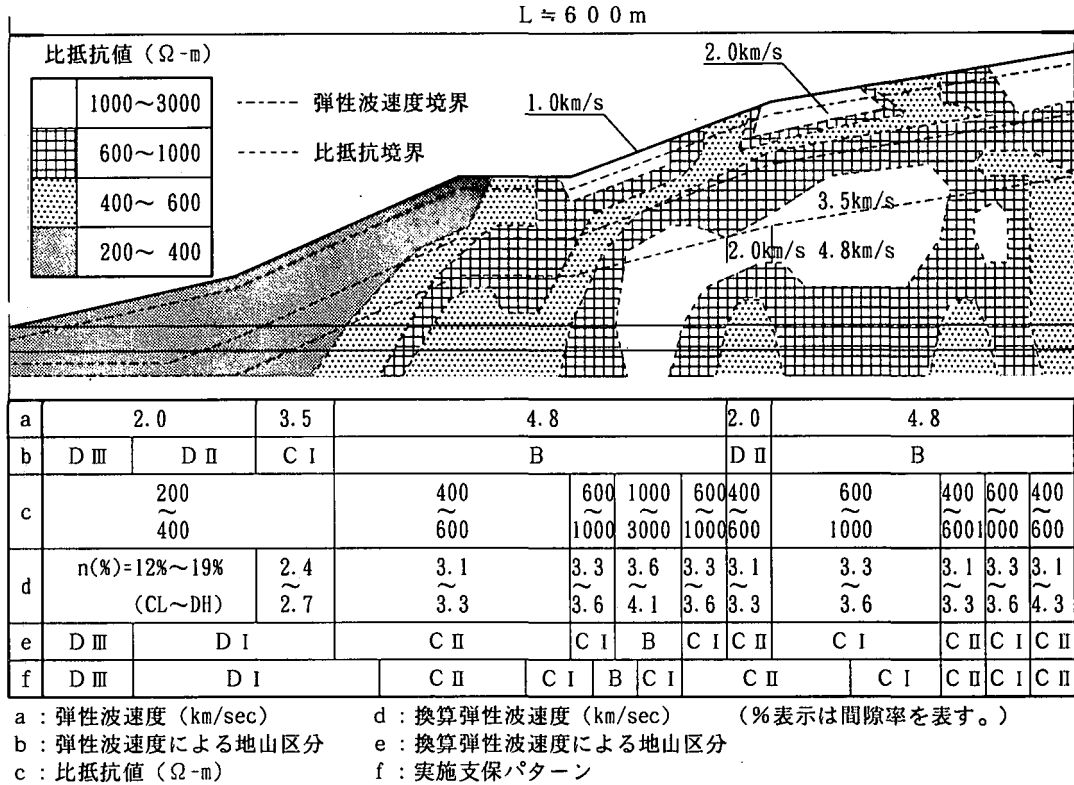


図-2 弾性波速度による地山区分、換算弾性波速度による地山区分および実施支保パターンの比較

この図において、第1層(1.0km/s層)は表土である。以下の第2層(2.0km/s層)～第4層(4.8km/s層)の地山区分を上記の手法に基づいて行う。表-3には計算に用いた条件を示す。Vmはコアの超音波伝播速度試験より得られた値を用い、Rwは深層地下水の一般値を適用している。表-4は算出した換算弾性波速度と間隙率、表-5は換算弾性波速度とボーリングデータを照合して定めた地山区分結果を示す。

図-2に弾性波速度による地山区分、換算弾性波速度による地山区分および実施支保パターンの対比を示す。これによると、2.0km/s層と3.5km/s層の境界付近に地下水位面が存在し、これより下位が飽和帯となっている。2.0km/s層においても飽和度はかなり高く、含水している。また、2.0km/s層は間隙率が12～19%程度であり、CL～DH級の風化層である。3.5km/s層は風化層と基盤岩の移行区間であり、風化作用が進行している。これらの区間には、切羽安定のための補助工法および水抜き工が必要である。4.8km/s層は基盤岩であるが、CⅡ岩種は亀裂が発達しており、亀裂からの湧水が発生するため水抜き工が必要である。CⅠ岩種は亀裂は少ないが、亀裂面沿いに風化が認められる。B岩種は亀裂が少なく、亀裂面も密着し新鮮である。

上記のような想定により、換算弾性波速度による地山区分を行い、その結果、弾性波速度による地山区分に比べ、実施支保パターンと良い一致が見られた。また、DⅠ区間には補助工法としてフォアパイリングが必要に応じ施工されたこと、坑口部および基盤岩の低比抵抗部に水抜きボーリング工が施工されたことにより、切羽の安定が保たれた。

設計時支保パターンと実施支保パターンが相異した部分がある理由については、次のようなことが考えられる。

- ①施工時の支保パターンの変更は一定の連続性を確認した上で実施されるため。
 - ②施工時の岩質評価は評点制によるものの、判定者の主観に左右される場合が多い。
 - ③地下水比抵抗値はトンネル区間を通じて一定ではなかったため、解析と誤差が生じた。
- とくに、③については今後の課題であり、ボーリング孔での実測、切羽での実測等を行っていく必要がある。

表-3 計算に用いた条件

パラメーター	弾性波速度層		
	第2層	第3層	第4層
Vp (km/s)	2.0	3.5	4.8
Vm (km/s)	3.0	4.0	5.0
Vf (km/s)	1.5		
Va (km/s)	0.3		
Rw (Ω-m)	30		

表-4 定量的評価手法による計算結果

Vp (km/s)	Vm (km/s)	Rt (Ω-m)	Sw (%)	n (%)	Vp' (km/s)
2.0	3.0	3000	20.000	7.493	2.000
2.0	3.0	1000	34.641	8.873	2.000
2.0	3.0	600	44.721	10.163	2.000
2.0	3.0	400	54.772	11.884	2.000
2.0	3.0	200	77.459	19.243	2.000
3.5	4.0	3000	100.000	10.000	3.428
3.5	4.0	1000	100.000	17.320	3.103
3.5	4.0	600	100.000	22.360	2.914
3.5	4.0	400	100.000	27.386	2.746
3.5	4.0	200	100.000	38.729	2.430
4.8	5.0	3000	100.000	10.000	4.054
4.8	5.0	1000	100.000	17.320	3.560
4.8	5.0	600	100.000	22.360	3.285
4.8	5.0	400	100.000	27.386	3.050
4.8	5.0	200	100.000	38.729	2.626

表-5 換算弾性波速度による地山区分⁶⁾と比抵抗分布

比抵抗値 (Ω-m)	弾性波速度層		
	第2層	第3層	第4層
	2.0km/s	3.5km/s	4.8km/s
1000～3000	DⅠ	CⅡ	B
600～1000		DⅠ	CⅠ
400～600			CⅡ
200～400			DⅠ

4. おわりに

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を花崗岩地山トンネルの設計に適用し、施工が完了したため、設計支保パターンと実施支保パターンを対比した結果、良い一致が見られた。

比抵抗高密度探査データに基づく地山区分手法は、弾性波探査による地山区分に比べ次のような精度向上を図ることができることを確認した。

- ①飽和度・間隙率・地下水比抵抗等が複合化される比抵抗値を、各要素別に区分するため、比抵抗値の定量的解析が可能となる。また、比抵抗値を弾性波速度に換算することにより、比抵抗高密度探査データをトンネル標準示方書（山岳編）地山分類表に適用させ地山分類ができる。
- ②1次元的な地質情報であるボーリングデータを比抵抗値（弾性波速度に比べて、特に深部において精度向上が期待できる）を介して、トンネルを含む2次元的な地質情報に展開できるため、地山区分の精度が向上する。また、高弾性波速度層下の低弾性波速度層の弾性波速度を求めることができたため、弾性波探査のみでは見落とし易いトンネル坑奥部の地質不良箇所を検出し、地山区分を行うことができる。
- ③断層の位置、形状の把握に有効である。ボーリングによって確認していない断層や弾性波探査で低速度帯として検出されていない断層についても、地山区分を行うことができる。

今回は、岩石の比抵抗値が非常に大きいと考えられる花崗岩について、上記手法の適用性を確認した。今後は、岩石自体が電気伝導度を持っている堆積岩地層について、適用性を確認したい。

参考文献

- 1) 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 1993, 土木学会, 1993.
- 2) 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手法について, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 1994.
- 3) 松井 保, 朴 三奎: 比抵抗高密度探査データによる地山区分手法の研究, 第29回土質工学研究発表会, 1994.
- 4) 土質工学会編: 岩の調査と試験, 1989.
- 5) 土質工学会編: 風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用, 1979.
- 6) 土木学会 : トンネル標準示方書（山岳編）・同解説, 1986.