

比抵抗値を用いたトンネル地山評価に関する研究

Study on evaluation of ground around tunnel by rock resistivity

真弓 英大¹⁾, 真下 英人²⁾, 石村 利明¹⁾

Hidemoto MAYUMI, Hideto MASHIMO, Toshiaki ISHIMURA

It is important to evaluate the ground condition correctly in advance for rational tunnel design. Many kind of methods for ground investigation have been developed, and electrical prospecting has been widely used recently. In this paper the evaluation of rock resistivity obtained by electrical prospecting method and the application of this method to pre-investigation before excavation was examined. It was found that the change of ground condition could be evaluated by examining the relative change of resistivity.

Key Words : tunnel, electrical prospecting, ground investigation, rock resistivity

1. はじめに

山岳トンネルの計画・設計にあたっては、地山状態を事前に把握することが必要であり、地表地質踏査、ボーリング試験、地山試料試験などの事前調査を実施し、その結果に基づき地山分類、支保構造の設計が行われている。近年では、地山の比抵抗値が地山の飽和度や間隙率によって異なることに着目して、事前調査として電気探査を行う事例が増えてきたが、今後トンネルの事前調査として地山比抵抗値を地山分類や支保設計のための指標として活用するためには、地山比抵抗値の評価方法の確立が必要と考えられる。既往の研究¹⁾では、主としてコア供試体を用いてコア比抵抗値とコアの物理特性および力学特性との関係を明らかにするとともに、これらの関係を用いて1本のトンネルで得られた地山比抵抗値の解釈を試みた。

本研究では、事前調査から得られた地山の比抵抗値（以下、地山比抵抗値と呼ぶ）によって、支保パターンの設定に用いる地山等級の分類がどの程度可能か、また、地山比抵抗値は掘削中の切羽の地山状態をどの程度反映しているのか等を把握することを目的として、事前調査として電気探査が適用された14本のトンネルでの施工時の記録を用いて、地山比抵抗値と切羽の地山状態との関係について検討を行った。また、事前調査として実施された地山比抵抗値を用いてトンネルの地山状態を評価するには、コア供試体の比抵抗値の特性が参考とされる場合が多いが、この場合には地山比抵抗値とコア比抵抗値の値が比較的近いことが前提となるため、本研究では地山比抵抗値とコア比抵抗値との関係についても検討を加えた。

2. 検討方法

検討対象とした14本のトンネルの概要を表-1に示す。地山比抵抗値とトンネル施工時における切羽の地山状態との関係は、各トンネル毎に地山比抵抗値が計測された区間を対象に、トンネル掘削前に実施され

1) 正会員 建設省土木研究所

2) 正会員 博士(工) 建設省土木研究所

た地表からの弾性波探査結果、

施工時に採用された地山等級および切羽観察表の各評価項目と地山比抵抗値との対応を図-1のように距離程で整理、グラフ化し、比較検討した。なお、切羽観察表の評価項目は表-2に示すように9つの項目から構成されており、各項目とも評価ポイントが大きくなるほど状態が悪くなっていることを意味している。

表-1 調査対象トンネル

トンネル名	トンネル延長(m)	検討対象延長(m)	主な岩質	採用された地山等級
Aトンネル	1413	1413	粘板岩、砂岩 凝灰岩、チャート	CⅠ, CⅡ, DⅠ, DⅡ, DⅢa
Bトンネル	445	445	砂岩、頁岩 石灰岩、チャート	CⅡ, DⅠ, DⅡ, DⅢa
Cトンネル	695	265	チャート、頁岩 粘板岩	CⅠ, CⅡ, DⅡ, DⅢa
Dトンネル	1120	340	泥岩と砂岩の互層	B, CⅠ, CⅡ, DⅡ, DⅢa
Eトンネル	737	737	熔結凝灰岩	CⅠ, DⅠ, DⅢa
Fトンネル	2413	600	流紋岩、凝灰岩	CⅡ, DⅠ
Gトンネル	242	190	流紋岩	CⅡ, DⅠ, DⅢa
Hトンネル	2370	230	石英閃緑岩	CⅡ, DⅠ, DⅡ, DⅢa
Iトンネル	1055	285	石英閃緑岩	CⅡ, DⅠ, DⅢa
Jトンネル	980	980	花崗岩、安山岩 真砂土、ヒン岩	CⅠ, CⅡ, DⅠ, DⅢa
Kトンネル	220	220	強風化花崗岩	DⅠ, DⅡ, DⅢa
Lトンネル	1706	995	花崗岩	CⅡ, DⅠ, DⅢa
Mトンネル	1030	510	蛇紋岩	DⅠ, DⅡ, DⅢa
Nトンネル	776	500	緑色片岩、黒色片岩	CⅡ, DⅢa

地山比抵抗値とコア比抵抗値の関係については、Cトンネル、Dトンネル、Iトンネル、Lトンネルの4トンネルにおいて、切羽から採取したずりを用いてコア供試体を作成し、コア比抵抗値を求め、コア比抵抗値とコア供試体採取した地点における地山比抵抗値との関係を調べた。コア供試体を作成した切羽の数は、Cトンネルは4断面、Dトンネルは2断面、Iトンネルは6断面、Lトンネルは7断面である。

3 検討結果

3.1 地山比抵抗値とトンネル施工時の地山状態との関係

地山比抵抗値と弾性波速度、地山等級および切羽観察表の各項目との関係に関する定性的な評価を表-3に示す。

堆積岩に関しては、調査対象となったトンネルの多くは、複

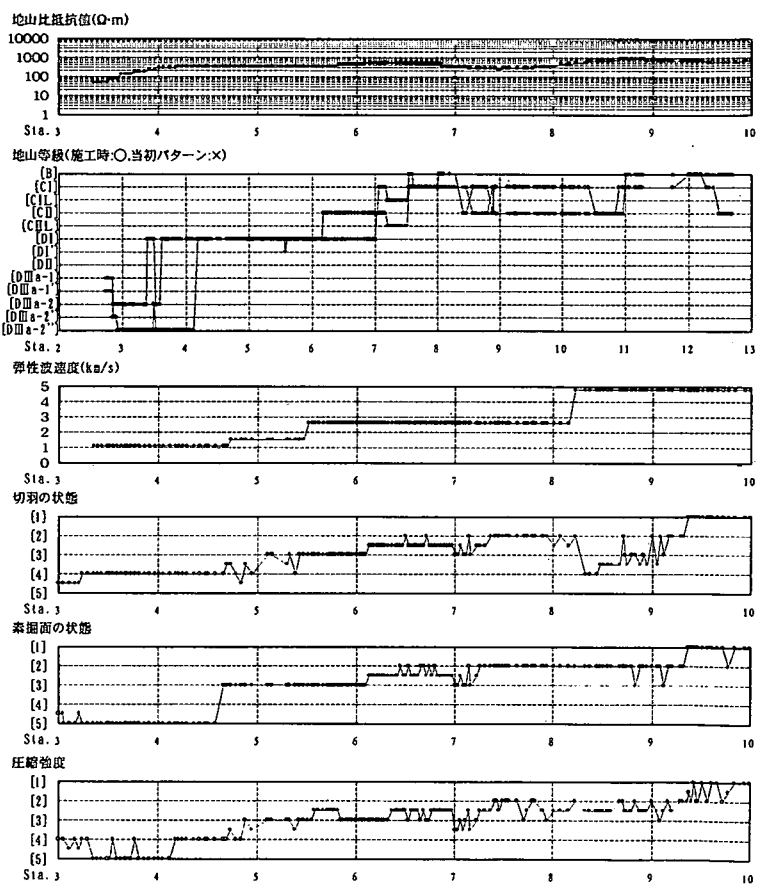


図-1 地山比抵抗値と切羽観察表の関係例

数の岩種で構成されているために各岩種と地山比抵抗値との関係を明確に分離できないこともあるが、粘板岩、頁岩、砂岩は全体的に地山比抵抗値が高くなると地山状態は良くなる傾向が見られる。チャートは地山比抵抗値が高くなると地山状態が悪くなるといった一般的に考えられていることとは逆の傾向を示すところが見られるため、地山比抵抗値の解釈に際しては注意を要する。泥岩と砂岩の互層は地山比抵抗値との対応

は非常に悪いが、地山比抵抗値そのものの大きさが小さいことが地山比抵抗値から地山状態を推定することを難しくしているものと考えられる。熔結凝灰岩は、全体的に対応が良いとは言えないが、地山比抵抗値の相対的な変化と地山状態の相対的な変化が対応するところが部分的に見られた。

火成岩に関しては、石英閃緑岩、花崗岩は全体的に地山比抵抗値が高くなると地山状態は良くなる傾向が見られ、対応は良いといえるが、強風化花崗岩においては一部逆の傾向が見られる。また、流紋岩については地山比抵抗値が高くなると地山状態が良くなる傾向が見られたが、凝灰岩との互層として現れた場合には逆の傾向が認められる。

変成岩に関しては、蛇紋岩、緑色片岩、黒色片岩ともに全体的には地山比抵抗値と地山状態との対応は良いとは言えないが、地山比抵抗値の相対的な変化と地山状態の相対的な変化が対応するところが部分的に見られる。

図-2は各トンネルの事前調査から得られた地山比抵抗値と施工時に採用された地山等級との関係について岩種毎に示したものである。堆積岩に関しては、頁岩、砂岩、泥岩、粘板岩、熔結凝灰岩いずれも地山等級の違いによる地山比抵抗値の差は明確に認められない。チャートは地山比抵抗値が大きくなるとわずかながら、地山等級は悪くなる傾向が見られる。火成岩に関しては花崗岩、石英閃緑岩は地山等級が地山比抵抗値によって比較的明確に区別される結果が得られているが、流紋岩は地山等級の違いによる地山比抵抗値の差は明確に認められない。変成岩に関しては、緑色片岩・黒色片岩は採用された地山等級の種類が限られているために評価はできないが、蛇紋岩はわずかの差であるが地山等級によって地山比抵抗値が取りうる値に差が認められる。

3. 2 コア比抵抗値と地山比抵抗値との関係

図-3～6は、コアを取得したトンネル毎のコア比抵抗値と地山比抵抗値の関係を示したものである。

Cトンネルについては、Sta.306+00の頁岩部においては地山比抵抗値はコア比抵抗値に比較的近い値を示しているが、Sta.301+00、Sta.302+10のチャート部およびSta.304+10の頁岩部においては地山比抵抗値はコア比抵抗値に比較して2～3オーダー低い値を示している。また、断面の違いによる地山比抵抗値とコア比抵抗値の相対的な変化は、Sta.304+10の断面を除くと逆の傾向を示している。

Dトンネルについては、Sta.921+0の断面においてはコア比抵抗値の方が地山比抵抗値よりも若干高い値

表-2 切羽観察表の評価項目と評価ポイント

評価項目	1	2	3	4
切羽の状態	安定	緩面から岩塊が抜け落ちる	緩面の押し出しを生じるあるいは流出する	緩面は自立せず崩れるあるいは流出する
素堀面の状態	自立	時間がたつと緩み肌落ちする	自立困難掘削後早期に支保する	掘削に先行して山を受けておく必要がある
圧縮強度	ハンマー打撃疎ね返る	ハンマー打撃で砕ける	軽い打撃で砕ける	ハンマー刃食い込む
風化・変質	なし・健全	岩目に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、破碎、当初より未固結
割れ目の頻度	間隔 d $\geq$ 1m	1m>d $\geq$ 20cm	20cm>d $\geq$ 5cm	d>5cm、当初より未固結
割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘土を挟む、当初より未固結
割れ目の形態	ランダム方向	柱状	層状、片状、板状	土砂状、細片状、当初より未固結
湧水	なし、水程度	滴水程度	集中湧水	前面湧水
水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊・流出

表-3 地山比抵抗値と弾性波速度・地山等級・切羽観察表との評価

		切羽観察表												
		トンネル名	主な岩種	弾性波速度	地山等級	切羽の状態	素堀面の状態	圧縮強度	風化・変質	割れ目の頻度	割れ目の状態	割れ目の形態	湧水	水による劣化
堆積岩	ATンネル	粘板岩、砂岩、凝灰岩、チャート	×	△	△	△	△	△	△	△	△	×	△	△
	BTンネル	砂岩、頁岩、石灰岩、チャート	△	△	○	○	△	△	△	△	×	×	△	×
	CTンネル	チャート、頁岩、粘板岩	▲	●	▲	▲	▲	×	×	×	▲	×	△	▲
	DTンネル	泥岩と砂岩の互層	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	ETンネル	熔結凝灰岩	△	○	△	×	△	×	×	×	×	×	△	×
火成岩	FTンネル	流紋岩、凝灰岩	×	△	▲	▲	▲	▲	▲	×	▲	▲	×	×
	GTンネル	流紋岩	×	×	○	○	○	○	○	○	×	△	△	△
	HTンネル	石英閃緑岩	△	△	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ITンネル	石英閃緑岩	△	○	○	○	△	△	△	△	×	×	△	○
	JTンネル	花崗岩、安山岩、真砂土、ヒン岩	▲	×	×	×	△	△	△	△	△	△	△	×
	KTンネル	強風化花崗岩	×	△	▲	▲	▲	▲	▲	×	×	×	▲	▲
	LTンネル	花崗岩	△	○	○	○	○	○	○	○	○	—	△	○
変成岩	MTンネル	蛇紋岩	×	△	△	△	×	△	△	×	△	△	△	×
	NTンネル	緑色片岩、黒色片岩	△	×	×	×	△	△	△	△	×	×	○	×

○：地山比抵抗値が大きくなると評価が悪くなる関係が概ね認められた
△：地山比抵抗値が大きくなると評価が悪くなる関係が一部区間で認められた
●：地山比抵抗値が大きくなると評価が悪くなる関係が概ね認められた
▲：地山比抵抗値が大きくなると評価が悪くなる関係が一部区間で認められた
×：認められず

を示しているが、全体的には地山比抵抗値とコア比抵抗値は近い値を示していると言える。しかし、Sta.921+0とSta.921+60の断面を比較するとコア比抵抗値では最大値と最小値とは1オーダー程度の開きが認められたのに対し、地山比抵抗値にはほとんど差が現れておらず、断面の違いによるコア比抵抗値と地山比抵抗値との相対的な変化も逆の傾向を示している。C.Dトンネルは、いずれも前記の地山比抵抗値と切羽状態との関係において良好な関係は認められていないが、このようなコア比抵抗値と地山比抵抗値の相対的な変化が逆の傾向を示すことが反映されたものと考えられる。

Iトンネルについては、Sta.20+36.8の断面をのぞけば各断面ともに地山比抵抗値はコア比抵抗値よりも若干高い値を示す傾向にあるが、断面の違いによる地山比抵抗値とコア比抵抗値の相対的な変化は同じ傾向を示しており、地山比抵抗値とコア比抵抗値の整合性は概ねとれたものとなっている。

Lトンネルについては、Sta.6+90、Sta.7+20の断面を除けばコア比抵抗値は事前調査から得られた地山比抵抗値よりも全体的に大きくなっているが、断面の違いによる地山比抵抗値とコア比抵抗値の相対的な変化は概ね整合している。

以上のように、4つのトンネルで得られたコア比抵抗値と地山比抵抗値との関係からは、一部の断面を除けば地山比抵抗値よりもコア比抵抗値の方が高い値を示す場合が多く、I.Lトンネルのように地山比抵抗値と地山状態の間に比較的良好な関係が認められた場合においても、1オーダー程度の開きが認められる場合があることが分かった。これは、地下水位の位置が事前に分かっていたとしてもコアの特性と地山比抵抗値の絶対値を照らし合わせて地山状態を評価することには限界があることを示唆しており、地山状態の評価は地山比抵抗値の相対的な変化に着目して行うべきと言える。なお、地山比抵抗値とコア比抵抗値との間に開きがみられた原因として考えられるのは、一般的にはコアサンプルは比較的良好な地山部分から採取されることが多いため、コア比抵抗値としては地山比抵抗値よりも高くなったことが推測される。

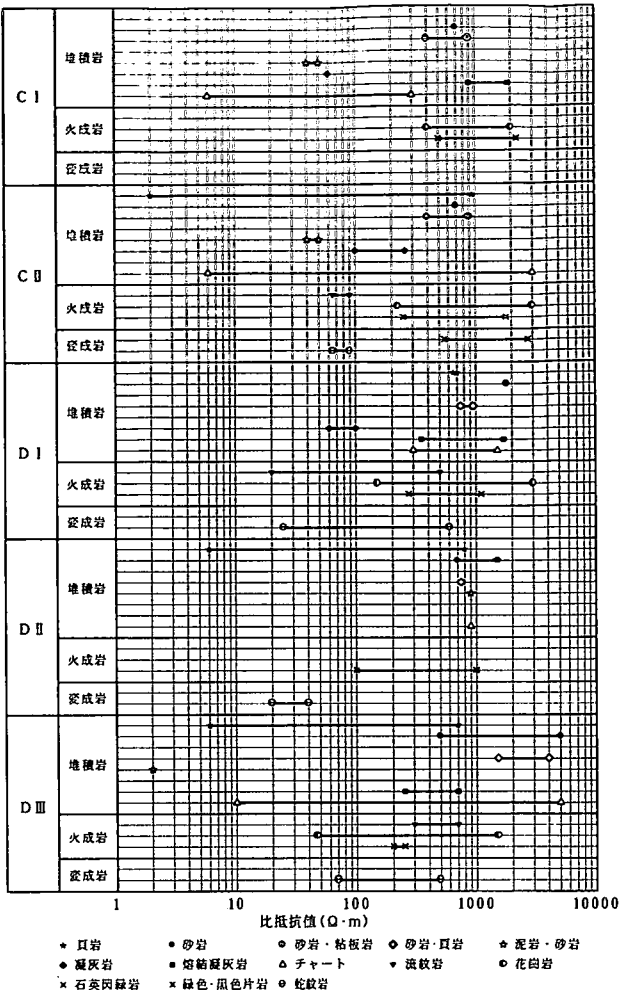


図-2 地山等級と地山比抵抗値の関係

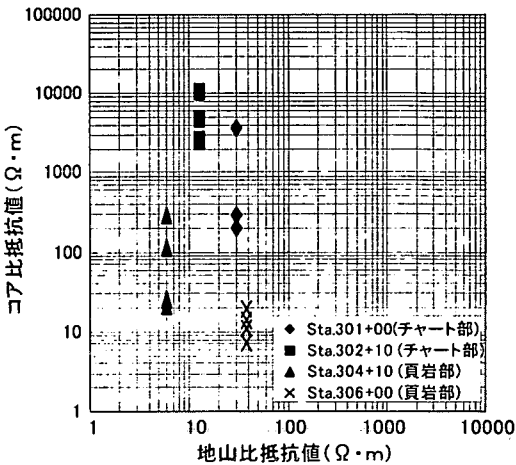


図-3 コア比抵抗値と地山比抵抗値の関係 (Cトンネル)

また、一部コア比抵抗値に比べ地山比抵抗値が高い値を示したが、考えられる要因としては、土被りが少ない地表部分に高比抵抗値を示す箇所がある場合、トンネル深度程度においても地表部分の高比抵抗値による影響により解析結果が実際の比抵抗値に比べて高い比抵抗値を示したことが考えられる。一般に崖錘部の不飽和部分においては高比抵抗値を示す²⁾ことが明らかとなっていることから、特に、比較的土被りが浅い崖錘地域で、かつ地下水位が地表から数mのところにある場合にはこのような傾向が著しく現れるものと考えられる。

4. まとめ

対象数が限られたトンネルでの検討結果ではあるが、地山比抵抗値を用いて地山状態を評価する上で参考となる幾つかの知見が得られた。本研究で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 事前調査から得られた地山比抵抗値と切羽での地山状態との関係については、堆積岩の粘板岩、頁岩、砂岩、火成岩の石英閃緑岩、花崗岩、流紋岩の場合は、地山比抵抗値が高くなると地山状態は良くなる傾向が見られた。これらに対して、堆積岩のチャート、火成岩の流紋岩と凝灰岩の互層、強風化花崗岩の場合は、地山比抵抗値が高いと地山状態が悪くなると言った一般とは逆の傾向が認められた。また、堆積岩の泥岩と砂岩の互層、熔結凝灰岩、変成岩の蛇紋岩、緑色片岩・黒色片岩の場合は地山比抵抗値と地山状態との対応は良いとは言えないが熔結凝灰岩、蛇紋岩、緑色片岩・黒色片岩については地山比抵抗値の相対的な変化に着目すれば、地山状態の相対的な変化を捉えることが可能な場合があることが分かった。

(2) 地山比抵抗値と施工時に採用された地山等級との関係は、堆積岩に関しては、チャートは地山比抵抗値が大きくなるとわずかに地山等級が悪くなる傾向がみられたが、他のものは地山等級による地山比抵抗値の差は明確に認められなかった。火成岩に関しては、花崗岩、石英閃緑岩は地山等級が地山比抵抗値によって比較的明確に区別され、変成岩に関しては、蛇紋岩はわずかではあるが地山等級によって地山比抵抗値が取りうる値に差が認められた。

(3) 地山比抵抗値とコア比抵抗値との関係は、一般的にはコア比抵抗値の方が地山比抵抗値よりも1オーダー程度

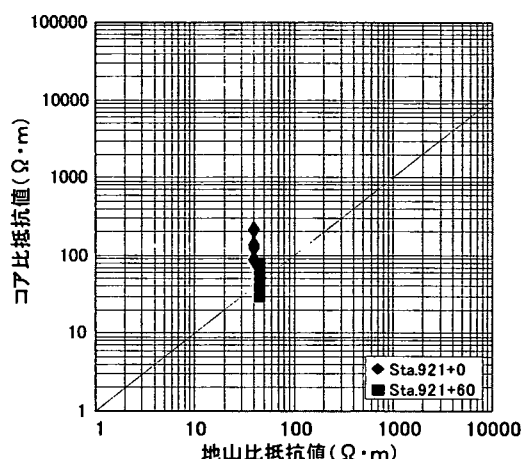


図-4 コア比抵抗値と地山比抵抗値の関係 (Dトンネル)

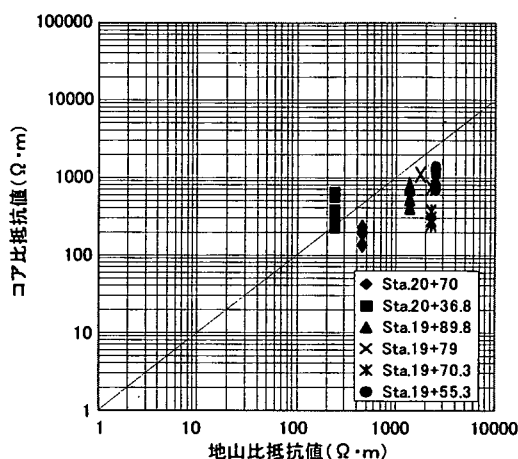


図-5 コア比抵抗値と地山比抵抗値の関係 (Iトンネル)

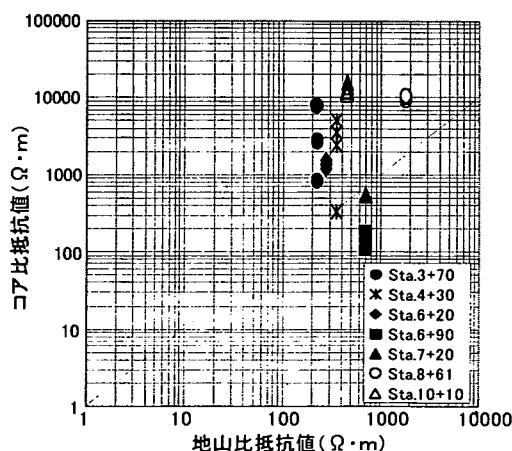


図-6 コア比抵抗値と地山比抵抗値の関係 (Lトンネル)

は大きな値を示す場合が多いが、地表部に高比抵抗値を示す場所がある場合には、地山比抵抗値はコアの比抵抗値よりも高い値を示すことがあることがわかった。したがって、コア比抵抗値の特性を参考にして地山比抵抗値の絶対値から地山状態を評価することには限界があり、地山比抵抗値から地山状態を評価するに際しては地山比抵抗値の相対的な変化に着目すべきと言える。

5. 今後の課題

今回実施した調査の対象トンネルおよび岩種が限られていることから、今後、より多くのトンネルのデータを収集し、より多くの岩種に関して地山比抵抗値と地山状態との関係について検討を加えることが必要である。また、事前調査で得られた地山比抵抗値だけから地山状態を十分な精度で推定することには限界が見られることから、地下水位、弾性波速度等との情報と合わせて地山状態を評価する手法を確立することが必要である。

(参考文献)

- 1) 真下英人・石村利明・宮川順一：「トンネル地山評価と比抵抗値との関係に関する研究」トンネル工学研究論文・報告集第7巻、1997.11
- 2) 島 裕雅・梶間 和彦・神谷 英樹：「比抵抗映像法」、古今書院、1995