

## ◆ 道路特集 ◆

## 電気探査によるトンネル地山評価

石村利明\* 宮川順一\*\* 真下英人\*\*\*

## 1. はじめに

山岳トンネルの計画・設計にあたっては、掘削の対象となる地山状態を十分に把握することが必要となる。このため、事前調査として地表地質調査、弾性波探査、ボーリング試験、地山試料試験等を実施し、これらの結果に基づきトンネルの地山分類、支保構造の設計が行われている。特に、弾性波探査から得られる弾性波速度は、岩種とともに地山分類を行うための重要な指標として用いられているが、地下水の状態や高い速度帯下部の低速度帯の存在を検知できないなどの問題がある。

一方、最近ではこれらを検知できる探査手法として地山の比抵抗を測定する電気探査による事前調査の事例が増加してきた。しかしながら、地山の比抵抗値は、岩種や地山の水分飽和度および有効間隙率などにより異なるため、今後、トンネルの地山分類および支保設計のための指標として活用していくためには、事前調査で得られた地山の比抵抗値の評価方法を確立することが必要となる。本研究は、トンネル事前調査としての電気探査の適用性について検討することを目的として、コアサンプルを用いた岩石の比抵抗値と各物理特性および力学特性との関係について把握するとともに、事前調査から得られた地山の比抵抗値とトンネル施工時に得られた供試体の各物理値、切羽観察結果、地山分類との関係について検討を加えたものである。

## 2. コアサンプルによる岩石の比抵抗値の特性

## 2.1 概要

岩石の比抵抗値は、主に岩石の種類、水分飽和度、有効間隙率、粘土鉱物含有量、地下水比抵抗値により変化すると考えられている。したがって、これ

らの条件が変化することによって同一の岩種においても比抵抗値が変化することとなる。そこで、岩石の比抵抗値にどの要因がどの程度影響するかについての基本的な特性を把握することを目的として現場から採取した岩石のサンプルを用いて各種の試験を行った。

## 2.2 試験方法

試験に用いた供試体は、表-1に示すように27条件の岩種についてそれぞれ直径30mm、高さ60mmのサンプルとした。試験は、比抵抗、超音波伝播速度(P波)、含水率、一軸圧縮強度の各試験を実施した。比抵抗は、粘土鉱物含有量により異なるため、粘土鉱物含有量を把握するための陽イオン交換容量の試験も実施した。比抵抗と超音波伝播速度については、浸透水(現地では地下水に相当)による水分飽和度(供試体内に存在する間隙中の体積に占める水の割合)を100%の他、30%程度までの間の数段階で測定した。また、表-1中の試料No.1,

表-1 試験実施供試体一覧

試料No.	岩石名	産地	年代
1	凝灰岩	静岡県賀茂郡河津町	新第三紀中新世
2	凝灰岩	栃木県宇都宮大谷町	新第三紀中新世
3	複雲母花崗岩	愛知県岡崎市米河内	中生代白亜紀
4	綠泥片岩(目に平行)	埼玉県秩父郡親鼻橋	中生代白亜紀
5	綠泥片岩(目に直交)	埼玉県秩父郡親鼻橋	中生代白亜紀
6	砂岩	静岡県藤枝市鬼岩寺	古第三紀末～新第三紀
7	チャート	群馬県甘樂郡南牧村	古生代二疊紀
8	石灰岩	東京都西多摩郡大久野	古生代二疊紀
9	頁岩(目に平行)	宮城県石巻市井内	古生代二疊紀
10	頁岩(目に直交)	宮城県石巻市井内	古生代二疊紀
11	石英安山岩	宮城県白石市小原	新第三紀中新世
12	流紋岩(目に平行)	長野県長野市塙生	新第三紀中新世
13	流紋岩(目に直交)	長野県長野市塙生	新第三紀中新世
14	カンラン石玄武岩	兵庫県豊岡市玄武洞	新第三紀中新世
15	角閃石片麻岩(目に平行)	岐阜県吉城郡神岡町	古生代
16	角閃石片麻岩(目に直交)	岐阜県吉城郡神岡町	古生代
17	標準砂	-	-
18	マサ	広島県広島市佐伯区	-
19	土丹	神奈川県横浜市	第四紀
20	普通輝石紫蘇輝石安山岩	神奈川県小田原市根府川	第四紀新世
21	フズリナ石灰岩	栃木県安蘇郡葛生町	古生代二疊紀
22	凝灰質砂岩	千葉県安房郡	新第三紀中新世
23	凝灰質砂岩	宮城県鳴瀬町	新第三紀中新世
24	泥岩	茨城県水戸市	新第三紀中新世
25	泥岩	千葉県安房郡	新第三紀中新世
26	溶結凝灰岩	熊本県人吉市	第4紀更新世
27	石英閃綠岩	岐阜県	ジュラ紀～三疊紀

3, 4, 5については、岩石中の浸透水の比抵抗値による影響を確認するため $25\Omega\text{m}$ ,  $100\Omega\text{m}$ ,  $400\Omega\text{m}$ の比抵抗を持つ3種類の浸透水で測定した。なお、浸透水の比抵抗値は、全国の数十箇所の地下水の比抵抗値が概ね $10\sim450\Omega\text{m}$ である<sup>1)</sup>ことからこれらを参考として決定した。

各試験方法は、比抵抗試験を除き、「岩の調査と試験」<sup>2)</sup>に準じて実施した。比抵抗試験は、図-1に示すように供試体を測定装置のサンプルホルダーにはさみ、外側の2本の電流電極間で電流を流し、内側の電位電極で供試体両側の電位差を測定する方法とし、電流値、電位差から図中に示す式を用いて比抵抗値を算出した。

### 2.3 試験結果

#### (1) 浸透水による岩石比抵抗値への影響

図-2に水分飽和度100%における浸透水比抵抗値による岩石比抵抗値への影響について示す。これより、凝灰岩、複雲母花崗岩、緑泥片岩とともに浸透水の比抵抗値の変化による顕著な差は認められない。また、千葉ら<sup>3)</sup>によれば浸透水の比抵抗値が数 $\Omega\text{m}$ 以上の場合には浸透水の比抵抗値の変化によって花崗岩および凝灰岩試料の比抵抗値には影響を与えないことが報告されている。本試

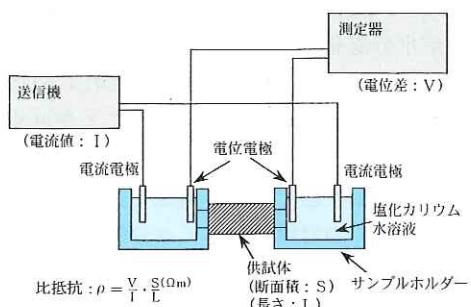


図-1 比抵抗測定装置の概略図

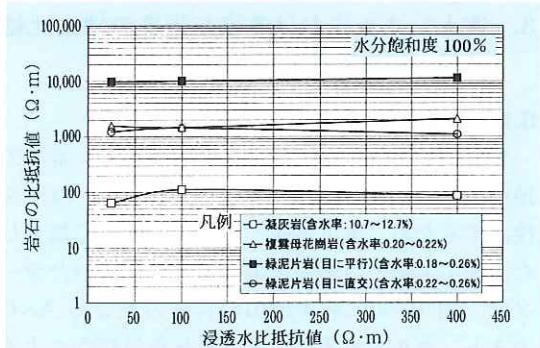


図-2 浸透水比抵抗値と岩石比抵抗

験が同一の供試体を用いて浸透水の比抵抗値を変化させた条件でないため、試料固有の違いによる影響も含んでいると考えられるが、上記の結果およびこれまでの報告を考えると、海岸付近で海水などにより浸透されていない通常の地下水程度の比抵抗値であれば、浸透水の比抵抗値が岩石の比抵抗に大きく影響を与えることはないものと考えられる。

(2) 岩石の比抵抗値と水分飽和度および有効間隙率との関係

図-3に代表的な岩石の比抵抗値と水分飽和度の関係を示す。これより、岩石の種類によって岩石の比抵抗値が異なり、水分飽和度が100~70%であれば変化は少ないものの、さらに小さくなると、岩石の比抵抗値は大きくなることが分かる。岩石の比抵抗値と水分飽和度の関係は、他の岩種も同様にいずれの岩石も水分飽和度が減少すると指數関数的に比抵抗値が増加する傾向を示した。また、亀裂の目の方向による影響は、目と平行(供試体の端面が岩石の目に対して平行)の場合が、目と直交(供試体の端面が岩石の目に対して直交)の場合よりも高い値を示すことが分かる。図-4に同一の岩種で有効間隙率が異なる溶結凝灰

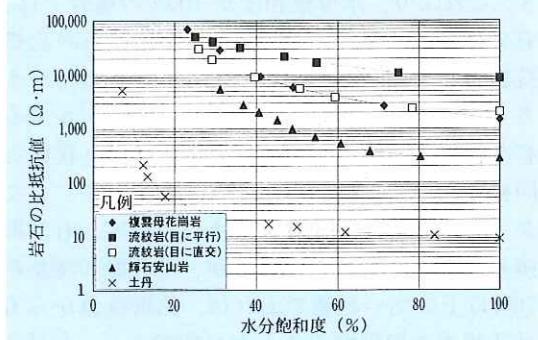


図-3 水分飽和度と比抵抗値(岩種毎)

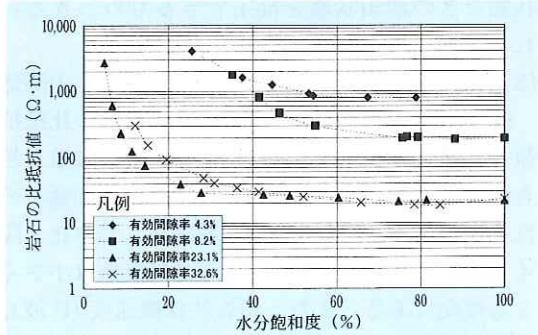


図-4 水分飽和度と比抵抗値(溶結凝灰岩)

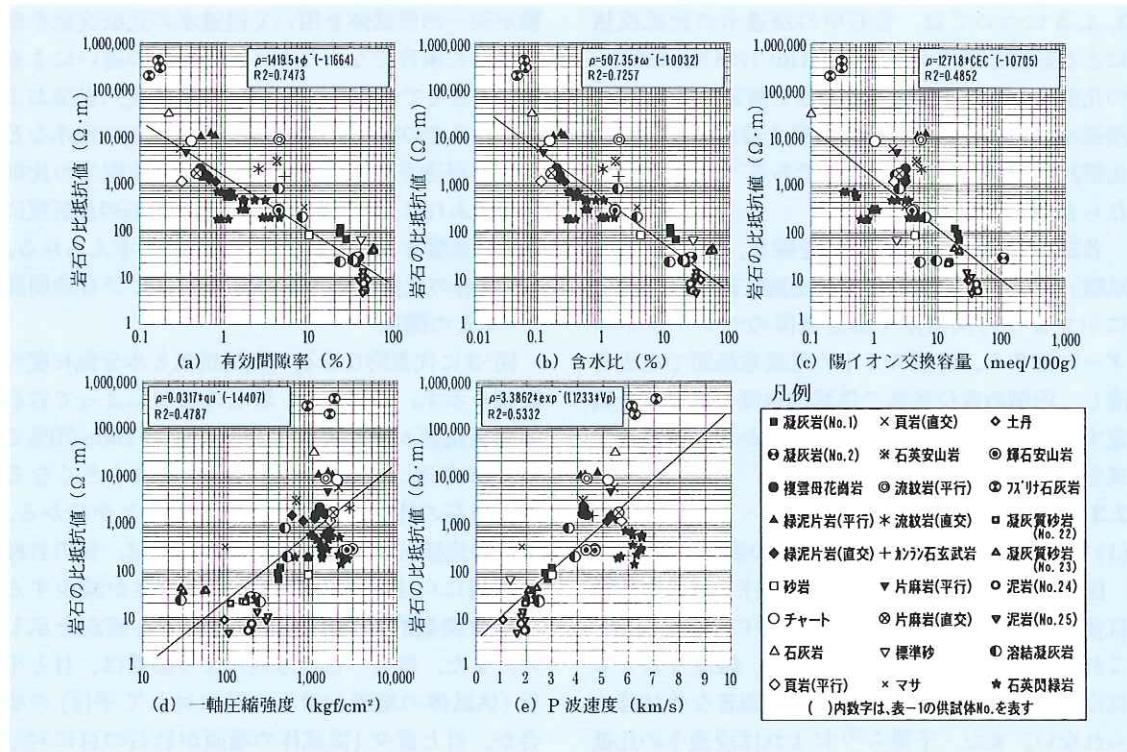


図-5 岩石の比抵抗値と物理的・力学特性の関係

岩について比抵抗値と水分飽和度の関係を示す。これより、水分飽和度が100%の場合では、有効間隙率が大きいサンプルほど岩石の比抵抗値は低い値を示すものの、水分飽和度が小さくなると、有効間隙率が大きいサンプルでも有効間隙率が小さく水分飽和度の高い状態と同様な高い比抵抗値を示すことが分かる。したがって、岩石の比抵抗値は水分飽和度、有効間隙率が大きく影響を与えるが、水分飽和度が約70%以上の高い状態であれば、比抵抗値から有効間隙率を把握することが可能であり、有効間隙率と密接な関係にある風化・変質、割れ目の状態などの地山状態を推定できるものと考えられる。

### (3) 岩石の比抵抗値と物理的・力学的特性との関係

図-5に水分飽和度が100%の時の岩石の比抵抗値と有効間隙率、含水比、陽イオン交換容量、超音波伝播速度(P波)、一軸圧縮強度との関係をそれぞれ示す。これより、有効間隙率、含水比、陽イオン交換容量が大きくなると比抵抗値は小さくなる傾向にある。また、超音波伝播速度(P波)、一軸圧縮強度が大きくなると比抵抗値が大きくなる傾向にある。各関係ともに比較的高い相関係数

を示すことが分かる。先に示したように岩石の比抵抗値は岩種毎で水分飽和度によって大きく異なるものの、調査対象とする区域が地下水位以下で岩石が水分飽和度100%の条件下であれば、一般的な傾向としては、比抵抗値からこれらの物理特性、力学特性をある程度推定することが可能であると考えられる。今後、事前調査で得られた比抵抗値から地山状態を十分な精度で推定するためには、より多くの岩種について水分飽和度、有効間隙率との関係を十分に把握しておくとともに、地下水位、弾性波速度等の情報とも合わせて評価することが重要である。

## 3. 実トンネルにおける事前調査の地山比抵抗値と施工実績との関係

### 3.1 調査方法

事前調査で得られた地山比抵抗値をトンネルの地山分類にどのように反映させれば良いのかを検討するため、施工実績との関係について調査した。施工実績との関係を調べるために用いたデータは、図-6~8に示す地山の岩種の異なるA~Cの3トンネルを対象に、それぞれ電気探査による事前調査区間の2~6箇所のトンネル切羽から、自

然状態下におけるコアサンプルを採取して、比抵抗・有効間隙率・水分飽和度の試験を行い、事前調査による地山比抵抗値と現場コアサンプル試験結果との関係を調査した。また、事前調査による地山比抵抗値とトンネル施工時における切羽観察表の評価項目と地山等級との関係について分析を行った。

### 3.2 調査結果

#### (1) コア比抵抗値と地山比抵抗値および有効間隙率との関係

図-9に切羽から採取したコアサンプルの比抵抗値と事前調査による地山の比抵抗値との関係、コア比抵抗値と有効間隙率の関係を示す。これより、A トンネルの頁岩およびB、C トンネルでは、一部のデータを除いて比較的近似していることから、コア比抵抗値に対するコアの特性を把握することにより、事前調査の地山比抵抗値から地山状態を推定できる可能性があるものと考えられる。一方、A トンネルのチャートは地山比抵抗値とコアサンプルの比抵抗値の整合性が悪いため、事前調査の地山比抵抗値から地山状態を推定するのは難しいと考えられる。ただし、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、比抵抗値としては地山比抵抗値よりも高くなることが予想されること、一般に崖錐部の不飽和部分における地山比抵抗値は高い値を示す傾向があるため、解釈・評価を行う際に十分考慮する必要があると考えられる。また、本現場におけるコアサンプルの水分飽和度は、3 トンネルともにほぼ飽和状態である約 87%以上の結果が得られており、図-3 に示したように水分飽和度が 70%程度以上の場合は、水分飽和度の影響をあまり受けないことから、コア比抵抗値の違いは水分飽和度以外の他の要因によるものと考えられる。一方、コア比抵抗値と有効間隙率の関係は、図-9 に示したようにいずれのトンネルにおいても有効間隙率が小さくなるとコア比抵抗値が増加する傾向を示しており、特に C トンネルにおいては、有効間隙率が

数パーセント変化するとコア比抵抗値が急激に変化していることから、コアの比抵抗値の違いに有効間隙率が大きく影響したものと考えられる。

#### (2) 地山比抵抗値と切羽観察結果・地山等級との関係

図-10 に切羽観察結果の代表的な項目として風

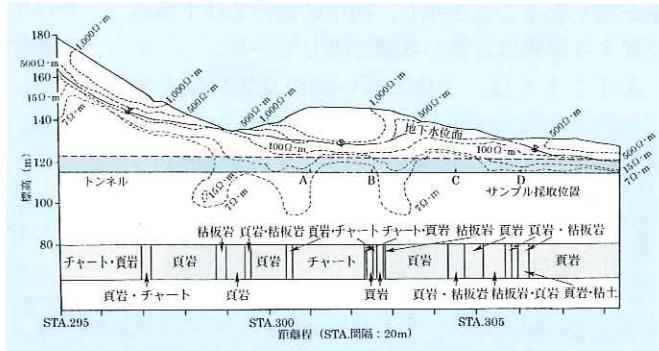


図-6 A トンネルの比抵抗分布図

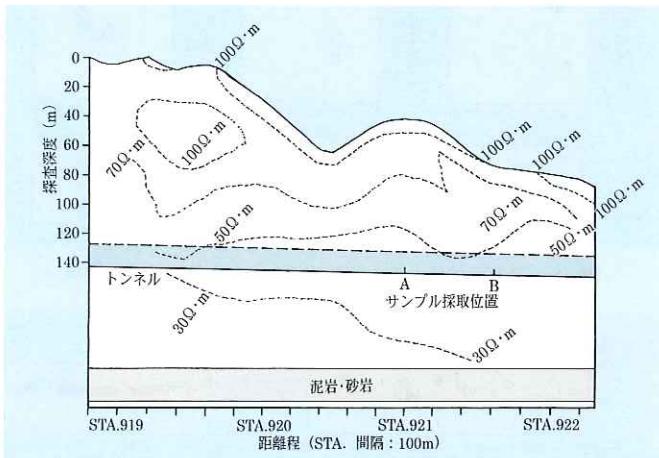


図-7 B トンネルの比抵抗分布図

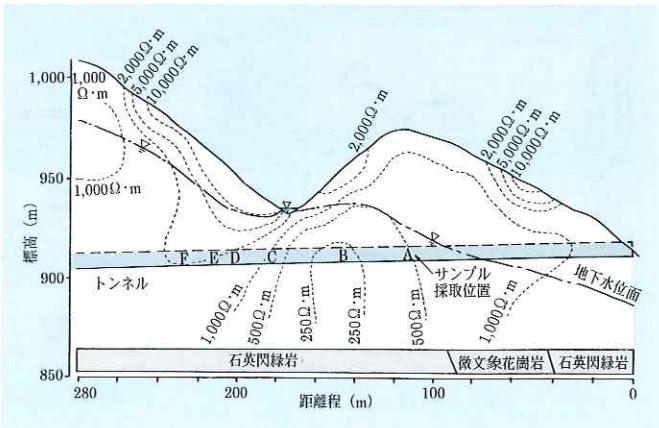


図-8 C トンネルの比抵抗分布図

化・変質および割れ目の状態の評価ポイント・地山等級の推移を距離程で整理したものを示す。なお、図中の黒丸はサンプルコアの採取地点を表し、各評価ポイントは数値が高くなるほど地山状態が悪くなることを表している。また、地山等級はBが比較的堅硬な地山状態で、C、Dの順に地山状態が悪くなることを示し、図中においては下部に位置する等級ほど悪い状態を表している。

Aトンネルは、全体に低い地山比抵抗値を示

し、Sta.300付近、Sta.303付近、Sta.306付近で地山比抵抗値が若干高くなっているが、それに伴う風化・変質、割れ目の状態の評価の変化はみられない。

また、Bトンネルでも全体に低い地山比抵抗値であり、Sta.921+00付近からSta.921+40付近にかけて地山比抵抗値が若干高くなっているが、逆に風化・変質、割れ目の状態は評価が低くなり悪い地山状態を示している。図-9の関係からは、コア比抵抗値と地山比抵抗値が比較的近似していたが、一般に泥岩・頁岩などの地山比抵抗値は他の岩種に比べて低い値となる<sup>1)</sup>ことが知られており、このように地山比抵抗値が低く大きな値の変化を伴わない地山では、地山比抵抗値から地山状態を推定するのは難しいものと考えられる。

一方、Cトンネルでは、地山比抵抗値が大きく変化しており、Sta.19からSta.20の区間では地山比抵抗値が高いと、地山のそれぞれの評価も良くなる傾向を示し、よく整合した結果となっている。このことは、地下水位以下の飽和状態の石英閃緑岩の地山での地山比抵抗値は、有効間隙率の影響を受け、有効間隙率と関係の

図-9 コア比抵抗値と地山比抵抗値および有効間隙率の関係

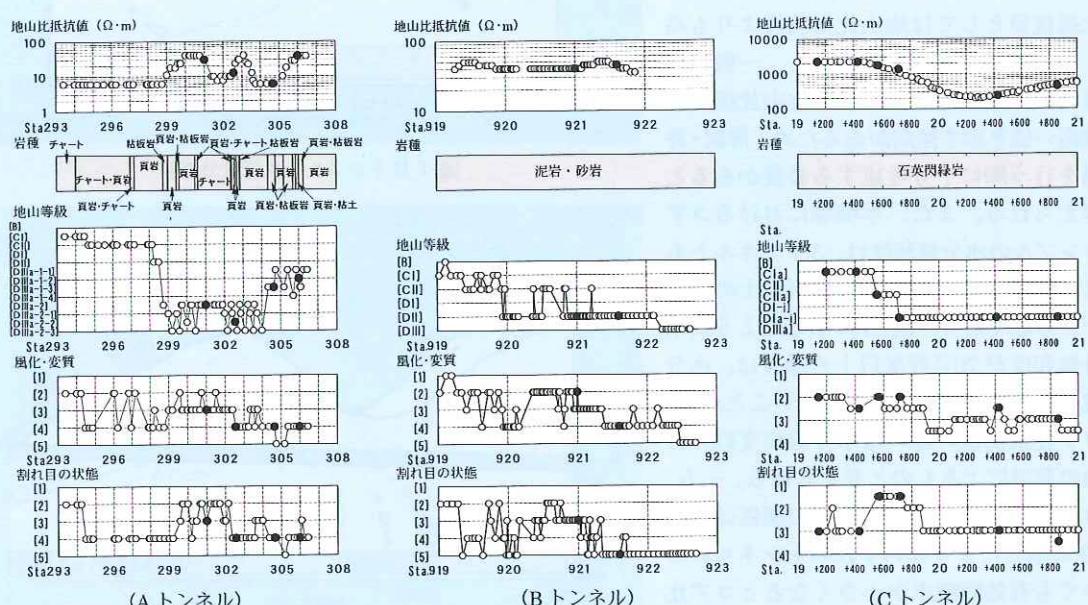


図-10 地山比抵抗値と切羽観察結果および地山等級の関係

深い風化・変質の程度、割れ目の状態とも密接な関係を示したものと考えられる。したがって、このような地山では、地山比抵抗値から地山状態を推定することが可能であると考えられる。なお、湧水と地山比抵抗値との関係は、3トンネルともに顕著な傾向は示さなかった。

地山比抵抗値と地山等級の関係は、A、Bトンネルでは顕著な傾向は示していないが、石英閃緑岩のCトンネルでは、地山等級が悪くなるほど地山比抵抗値が低くなる傾向にあり、地山比抵抗値と地山等級に整合性が認められる。したがって、岩種によっては事前調査の地山比抵抗値から地山等級を分類できる可能性があることが分かった。

#### 4.まとめおよび今後の課題

コアサンプルによる試験結果およびトンネル事前調査から得られた地山比抵抗値とトンネル施工時に得られた供試体の各物性値、切羽観察結果、地山分類との関係の調査結果から以下のことが明らかとなった。

- 一般的地下水程度の比抵抗で浸透された状態の岩石の比抵抗値は、浸透水の比抵抗値の影響をほとんど受けない。
- 調査対象とする区域が地下水位以下で岩石が飽和されていれば、比抵抗値からこれらの物理特性、力学特性をある程度推定することが可能である。
- 同一の岩種でも有効間隙率、水分飽和度によって地山比抵抗値が大きく異なるが、水分飽和度が約70%以上の高い状態であれば、比抵抗値から岩石の有効間隙率を把握できるものと考えられる。

4. 地山比抵抗値が低く大きな値の変化を伴わない泥岩・頁岩などの地山では、地山比抵抗値から風化・変質、割れ目の状態などの地山状態を推定することは難しいものと考えられる。

5. 地下水位以下の飽和状態にある石英閃緑岩のトンネルでの事前調査による地山比抵抗値と実施工時の切羽観察結果の関係から、比抵抗値が低くなると、風化・変質、割れ目の状態の評価が悪くなり、また、地山等級との整合が認められる。したがって、地山比抵抗値は有効間隙率との関係の深い風化・変質の程度、割れ目の状態を知る上で有用な情報を与えるとともに、事前調査の地山比抵抗値から地山等級を分類できる可能性があることが分かった。

今後、事前調査として地山比抵抗値からトンネル地山調査の地山区分を実施するためには、より多くの岩石について水分飽和度、有効間隙率との関係を十分に把握するとともに、種々の地盤条件において実績との関係を確認していくことが重要である。最後に、本研究にあたり貴重な試料およびデータを提供して頂いた関係各機関に謝意を表す。

#### 参考文献

- 島裕雅、梶間和彦、神谷英樹：比抵抗映像法、古今書院、1995。
- (社) 土質工学会：岩の調査と試験、1989。
- 千葉昭彦、熊田政弘：花崗岩および凝灰岩試料の比抵抗測定、物理探査、第47卷、3号、1994。

石村利明\*



建設省土木研究所道路部  
トンネル研究室主任研究員  
Toshiaki ISHIMURA

宮川順一\*\*



建設省関東地方建設局東京国道  
工事事務所  
(前 トンネル研究室研究員)  
Junichi MIYAGAWA

真下英人\*\*\*



建設省土木研究所道路部  
トンネル研究室長、工博  
Dr.Hideto MASHIMO