

トンネルの地山状態と比抵抗値との関係に関する研究

Study on the relation between ground condition around tunnel and rock resistivity

真下英人¹⁾・石村利明¹⁾・宮川順一¹⁾

Hideto MASHIMO, Toshiaki ISHIMURA, Junichi MIYAGAWA

The adoption of an electrical prospecting, which measures the rock resistivity, has increased as a geological survey of a tunnel. To apply the electrical prospecting to the tunnel rock classification and tunnel support design, it is necessary to clarify the relation between the ground condition and the rock resistivity. In this paper, the authors measured the rock resistivity and physical properties such as pure water, degree of saturation porosity using the core sample. And the authors also investigated the relation between the rock resistivity and the ground condition at the tunnel face.

Key Words : tunnel, geological survey, resistivity

1. はじめに

山岳トンネルの計画・設計にあたっては、掘削の対象とす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、現在では、地表地質調査、弾性波探査、ボーリング試験、地山試料試験等の事前調査を実施し、これらの事前調査結果に基づき地山分類、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などを検知できないなどの問題がある。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、トンネルの事前調査として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である。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把握を行うとともに、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性値、切羽観察結果、地山分類との関係について調査したものである。

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影響するのかの基本的な特性を把握することを目的として現場から岩石のサンプルを採取して各種の試験を行った。

1) 正会員 建設省土木研究所

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条件の現場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、一軸圧縮および陽イオン交換容量の各試験を実施した。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, 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25Ω, 100Ω, 400Ωの3種類の浸透水比抵抗で測定した。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10Ω～450Ωである¹⁾ことからこれを参考として決定した。

各試験方法は、比抵抗試験を除き、地盤工学会の「岩の調査と試験」²⁾に準じて実施した。比抵抗値試験は、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) 浸透水の比抵抗値による岩石の比抵抗値への影響

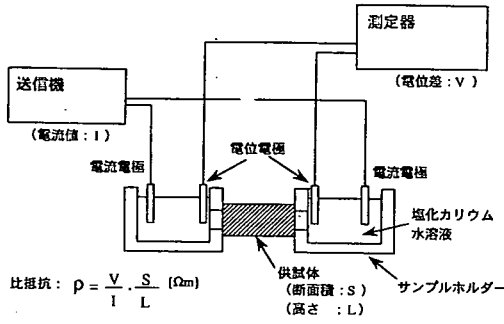
図－2に浸透水の比抵抗値による岩石比抵抗値への影響について示す。これより、凝灰岩、複雲母花崗岩、緑泥片岩ともに浸透水の比抵抗値の変化による顕著な差は認められない。また、千葉ら³⁾によれば浸透水の比抵抗値が数Ω以上の場合には浸透水の比抵抗値の変化によって花崗岩および凝灰岩試料の比抵抗値には影響を与えないことが報告されている。本試験が同一の供試体を用いて浸透水の比抵抗値を変化させた条件でなく、試料固有の違いによる影響も含んでいると考えられるが、上記の結果およびこれまでの報告を考えると、海岸付近で海水などにより浸透されていない通常の地下水程度の比抵抗値であれば、浸透水の比抵抗値が岩石の比抵抗に大きく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

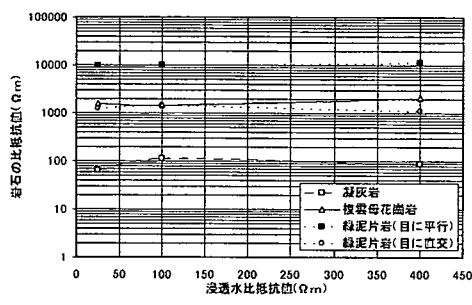
図－3に代表的な岩石の比抵抗値と水分飽和度の関係を示す。これより、岩石の種類によって岩石の比抵抗値が異なるとともに、水分飽和度が高くなると岩石の比抵抗値は小さくなる事が分かる。岩石の比抵抗値と水分飽和度の関係は、他の岩種も同様にいずれの岩石も水分飽和度が減少すると指数関数的に比抵抗値が増加する傾向を示した。また、亀裂の目の方向による影響は、目と平行(供試体の端面が岩石の目に対して平行)の場合が、目と直交(供試体の端面が岩石の目に対して直交)の場合よりも高い値を示す事が分かる。図－4に同一の岩種で有効間隙率が異なる溶結凝灰岩について比抵抗値と水分飽和度の関係を示す。これより、水分飽和度が100%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くなる傾向を示している。しかし、有効間隙率が大きいサンプルでも水分飽和度が小さい場合は、高い比抵抗値を示し、水分飽和度が100%で有効間隙率が小さい場合の比抵抗値と同程度の値を示す事が分かる。したがって、比抵抗値から地山状態を評価する場合には、

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	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
2	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
3	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
4	緑泥片岩 (目と平行)	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
5	緑泥片岩 (目と直交)	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
6	砂岩	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
7	チャート	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
8	石灰岩	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
9	頁岩 (目と平行)	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
10	頁岩 (目と直交)	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
11	花崗岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
12	花崗岩 (目と平行)	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
13	花崗岩 (目と直交)	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
14	カンラン石玄武岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
15	花崗石片麻岩 (目と平行)	静岡県静岡市清水区	中生代
16	花崗石片麻岩 (目と直交)	静岡県静岡市清水区	中生代
17	花崗石片麻岩 (目と直交)	静岡県静岡市清水区	中生代
18	マサ	静岡県静岡市清水区	中生代
19	土砂	静岡県静岡市清水区	中生代
20	行方石凝灰岩花崗岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
21	フズリナ石凝灰岩	静岡県静岡市清水区	中生代白垩紀
22	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
23	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
24	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
25	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
26	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世
27	凝灰岩	静岡県静岡市清水区	新第三紀中新世



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の比抵抗値

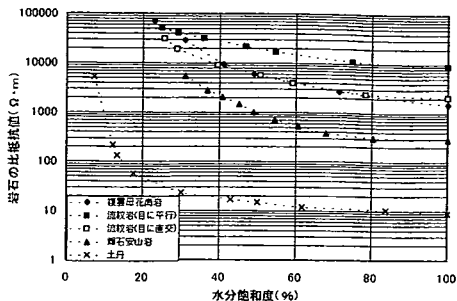


図-3 水分飽和度と比抵抗値の関係 (岩種毎)

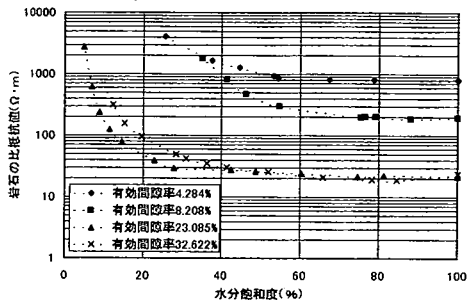


図-4 水分飽和度と比抵抗値の関係 (溶結凝灰岩)

岩石の有効間隙率、水分飽和度がそれぞれ大きくなると比抵抗値が小さくなることを十分考慮する必要がある。

(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。図-4で示した有効間隙率の異なる溶結凝灰岩の結果も各図中に示した。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り、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も大きくなる傾向があり、各関係ともに比較的高い相関係数を示すことが分かる。一般的傾向としては、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、比抵抗値からこれらの物理特性、力学特性がある程度推定することが可能であると考えられる。しかしながら、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ことから、今後、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ことが必要である。また、

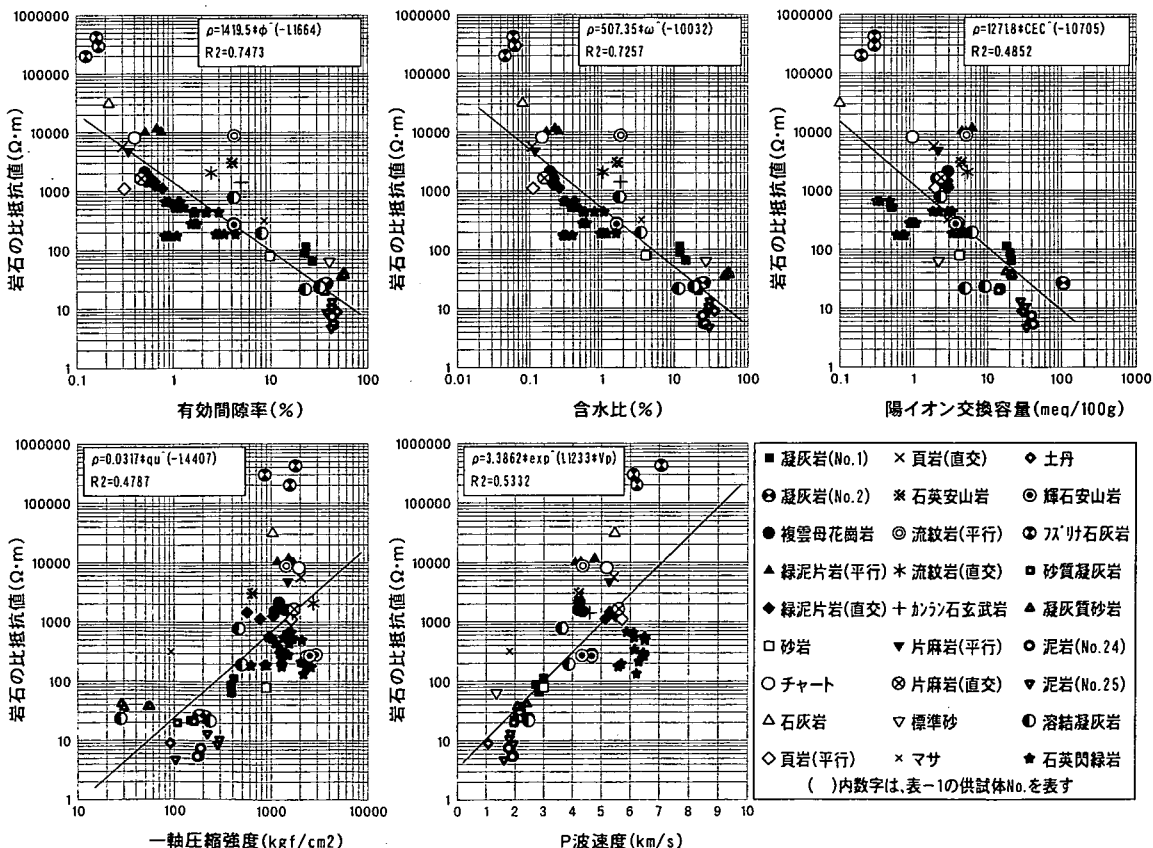


図-5 岩石の比抵抗値と物理的・力学特性の関係

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、岩種が重要な評価要素となるとともに、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に示す石英閃緑岩の地質のAトンネルを対象として、電気探査による事前調査区間の坑口部を含む約250mの最大土被りが約60mの範囲とした。まず、事前調査の比抵抗分布図を参考に比抵抗が異なる6箇所の切羽を選定し、掘削中のトンネルにおいて自然状態における含水比が変化しないように岩塊を採取し、自然状態下におけるコアサンプルとして整形した試料を用いて各種の試験を行った。試験項目は、比抵抗の他、有効間隙率、含水比、飽和度とした。これらのサンプルコアの試験結果と施工実績との関係について調査を行った。また、事前調査に電気探査を用いたトンネルについて、電気探査から得られた比抵抗分布図とトンネル施工時における切羽観察表の各評価項目との関係について分析を行った。さらに、Aトンネルを含む4トンネルについて岩石毎の地山等級と事前調査結果の比抵抗値との関係について整理を行った。

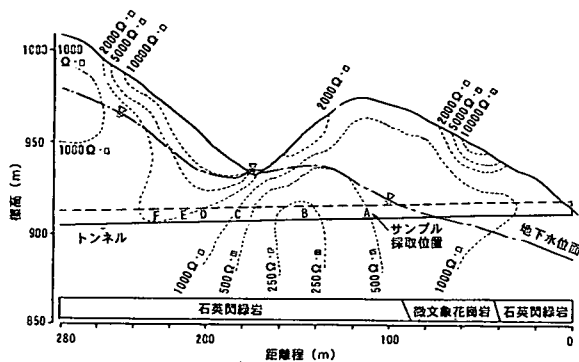


図-6 Aトンネルの比抵抗分布図

3.2 調査結果

(1) コアサンプル試験結果とコア比抵抗値との関係

図-7に切羽から採取したコアサンプルの比抵抗値とAトンネルの事前調査による地山の比抵抗値との関係および各試験結果との関係について示す。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、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。しかし、本結果ではコアサンプルの比抵抗値に比べて地山比抵抗値が高い値を示した。この要因としては、以下のことが考えられる。本調査区域は、比較的土被りが浅い崖錐地域で、かつ地下水位が地表面から数mのところにある。一般に崖錐部の不飽和部分においては高比抵抗値を示すことが明らか¹⁾となっており、トンネル深度程度においても土被りが比較的小さい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。したがって、今後、このような条件下の地山比抵抗値の精度向上のために解析方法の検討が必要であるとともに、解釈・評価を行う際にも注意が必要と考えられる。また、コア比抵抗値と飽和度の関係については飽和度によってコア比抵抗値の値は異なっているが、本現場における飽和度は、約94%以上とほぼ飽和状態と

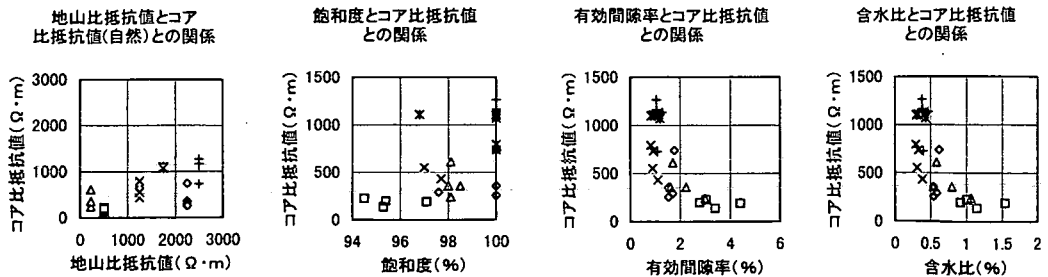


図-7 コアサンプルの各試験結果および地山比抵抗値との関係

なっており、図-3、4に示したように水分飽和度がある程度高い場合は、水分飽和度の影響をあまり受けないことから、コア比抵抗値は他の要因によって変化したものと考えられる。一方、コア比抵抗値と有効間隙率および含水比との関係は、図に示すように有効間隙率、含水比が数パーセント変化すると比抵抗値が急激に変化することが分かる。したがって、飽和状態に近い石英閃緑岩を対象としたAトンネルにおいて、コアの比抵抗値に大きな影響を及ぼした要因としては、有効間隙率の違いが考えられる。

(2) 切羽観察結果と地山比抵抗値との関係

図-8にAトンネル（石英閃緑岩）の事前調査の地山比抵抗値と切羽観察表の各評価項目との関係について示す。各評価ポイントは、表-2に示すように評価ポイントが高くなるほど、地山状態が悪くなることを表している。切羽の状態、素掘面の状態、圧縮強度、風化・変質、割れ目の状態、割れ目の形態、水による劣化は比抵抗値が高くなると評価ポイントが下がる傾向が見られる

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	斜面から岩塊がはげ落ちる	斜面の押し出しを発生させる	斜面は自立せず崩壊する
素掘面の状態	自立	時間がかつと緩み崩壊する	自立困難状態後早期に変質する	掘削に先行して土崩れがおこる
圧縮強度	N/7・打撃はね返る	N/7・打撃で砕ける	軽い打撃で砕ける	N/7・刃先し込む
風化・変質	なし・健全	岩目に沿って変色・強度低下や底層	全体に浸透、強度低下が顕著	土砂状、粘土状、崩壊、当初より未固結
割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1a$	$1a > d \geq 20ca$	$20ca > d \geq 5ca$	$d > 5ca$ 、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	3/4 A方向	柱状	窓状、片状、板状	土砂状、粘土状、崩壊、当初より未固結
湧水	なし、水程度	湧水程度	集中湧水	全面湧水
水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊・流出

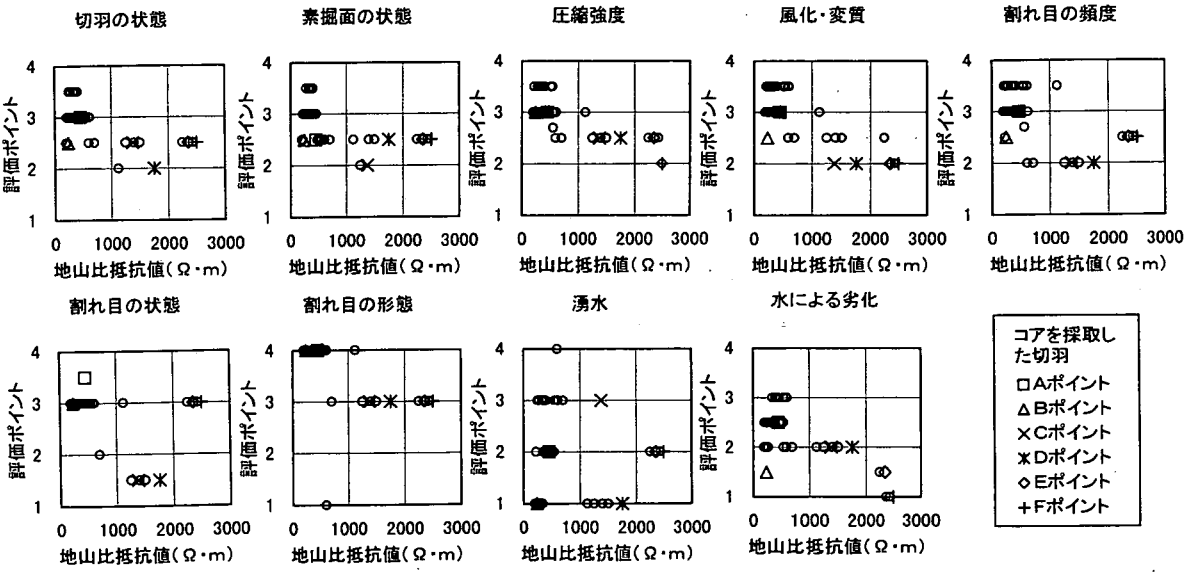


図-8 地山比抵抗値と切羽観察表の評価ポイントの関係

が、湧水など他の評価項目はばらつきが大きく顕著な傾向を見ることはできなかった。前述したようにコアの比抵抗値は間隙率の違いの影響を受けていることが考えられたが、サンプル採取地点での切羽観察表の代表的な項目の評価ポイントとコアサンプルの有効間隙率との関係も図-9に示すように、風化・変質、割れ目に関しては、有効間隙率が高くなると評価ポイントが高くなって、地山状態が悪くなる傾向にある。したがって、地下水位以下の飽和状態のAトンネルでは地山の比抵抗値は有効間隙率の違いの影響を受け、有効間隙率と関係の深い風化・変質の程度、割れ目の頻度・状態とも密接な関係を示したものの考えられる。

個別の地山を対象とした以上の結果から、地山の比抵抗値の解析上の課題点、評価・解釈の考慮すべき事項などがあるものの、施工時における実績との関係は地下水位以下の飽和状態であれば、有効間隙率との関係の深い

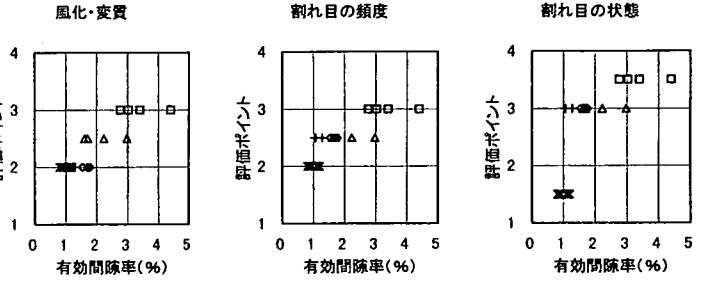
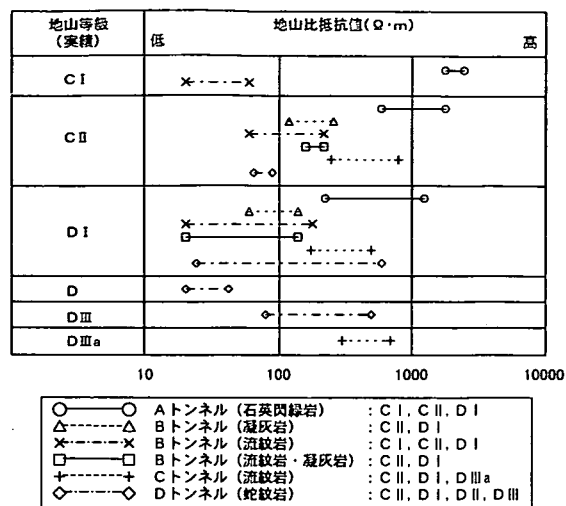


図-9 コアサンプルの有効間隙率と切羽観察表の評価ポイント

風化・変質の程度、割れ目の頻度・状態を知る上で有用な情報を与えることが分かった。今後、他の地盤条件においても実績との整合を図り比抵抗値から地山分類を行うための基礎資料を収集していくことが重要である。

（３）地山等級と地山比抵抗値との関係

図－１０に電気探査を実施した４トンネルについて、地山等級の実績と地山比抵抗値の範囲との関係を示す。石英閃緑岩のＡトンネルでは、地山等級が悪くなるほど地山比抵抗値の範囲が低くなる傾向が見られるが、コアサンプルの試験結果で示したような亀裂の目の方向によって地山比抵抗値が大きく異なる流紋岩が主な岩質となるＢトンネルとＣトンネルでは、同一の地山比抵抗値でも異なった地山等級の評価が行われており、地山等級を決定する際には地山比抵抗値以外の他の情報を考慮する必要がある。今後、地山比抵抗値から地山等級の分類を実施していくためには、岩種毎にどのような条件下の時にどのような切羽観察表の項目と密接な関係を示すのか、また、どの程度の比抵抗値を示すかなどの詳細な検討が必要と考えられる。



図－１０ 地山等級と地山比抵抗値との関係

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。

- 一般の地下水程度の比抵抗に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り、有効間隙率が大きく水分飽和度が小さい比較的地山条件が悪い場合でも高い比抵抗値を示す場合があるため、地山状態を評価する上で注意する必要がある。
- 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時の切羽観察結果の関係は、風化・変質、割れ目の程度、割れ目の形態は比抵抗値が高くなると評価ポイントが下がる傾向があり、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、割れ目の頻度・状態を知る上で有用な情報を与えることが分かった。
- 地山比抵抗値と実績の地山等級の関係は、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は地山等級が悪くなると地山比抵抗値が低くなる傾向があったが、他のトンネルでは同一の地山比抵抗値でも異なった地山等級の評価が行われており、地山等級を決定する際には地山比抵抗値以外の他の情報を考慮する必要がある。

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、梶間、神谷編：「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、熊田：「花崗岩および凝灰岩試料の比抵抗測定」、物理探査、第47巻3号、1994