

種々な岩石の比抵抗値に及ぼす飽和度、間隙率の影響とそれを利用した岩盤物性の評価手法

関西大学工学部 正会員 ○楠見 晴重
キンキ地質センター 島中 与一
関西電力 西方卯佐男
ニュージェック 中村 真
関西大学大学院 奥田 善之

1. 緒言

物理探査の中でも電気探査比抵抗法は、最近では、地下水の調査だけでなく、トンネル、大規模地下空洞や斜面の地質調査に用いられている。これは、地盤や、岩盤に直流電流を流して、電位応答を測定し地下の比抵抗値の分布を求めるものである。

岩石の比抵抗値は頁岩などの示す、 $1\Omega\text{m}$ 程度から、新鮮な火成岩類の示す $10^6\Omega\text{m}$ 程度まで非常に幅広い範囲の中にあり、同じ岩相、同じ等級のものであっても比抵抗値が、10 倍程度違うことは珍しいことではない。このため、岩石の比抵抗値のみから地質を定量的に評価することは一般的に難しいと言える。しかし、岩石の比抵抗は、岩石の変質の度合いや、含水率などの僅かな差異を反映するため、比抵抗値の分布が土質性状や岩盤状態に関する有用な情報となる¹⁾。そこで、比抵抗探査結果から岩盤の評価を行うためには、岩盤の比抵抗と、間隙水の比抵抗値や飽和度との関係、岩種ごとの比抵抗と力学的性質との関係、風化や破砕による岩石の比抵抗と力学的性質との関係等について把握する必要がある。

従来の研究では、関根ら^{2),3),4)}は、種々の岩石供試体の比抵抗値と、その力学的性質の関係から岩石の比抵抗値と弾性波伝播速度、一軸圧縮強度との関係には比較的よい相関性があり、岩種によって固有の傾向があることを示した。人工的に作成した亀裂供試体では、比抵抗値と弾性波伝播速度との間に良好な相関性があると述べられ、また、岩石の電気伝導における過剰導電現象は、固体と液体の界面における表面伝導によって説明できることを述べている。さらに、不連続面の割れ目方向、および、不連続面の挟在物の比抵抗値に及ぼす影響について述べている。松井ら^{5),6)}は、泥岩及び、頁岩などや、岩石が変質・風化して粘土鉱物などを含んでいる場合において、岩石の比抵抗値は間隙水の比抵抗より岩石構成物質の比抵抗に大きく影響されるが、新鮮な岩石の場合においては、岩石の構成物質の比抵抗が大きいので、岩石の比抵抗値は間隙水の比抵抗に大きく影響すると述べている。また、岩石供試体の比抵抗測定を行い、間隙水の比抵抗値が岩石の比抵抗値に及ぼす影響、岩石構成物質の比抵抗値、および、膠結係数などを調べるとともに、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、岩石の比抵抗値を弾性波速度に換算でき

る理論式を確立したことを述べている。千葉ら⁷⁾は、花崗岩と凝灰岩の間隙水の比抵抗変化による供試体の比抵抗測定により、高比抵抗間隙水では、花崗岩及び凝灰岩供試体の比抵抗は、比表面積や間隙幅と密接な関係があると述べている。松原ら⁸⁾は、関根らの考察と同様に、岩石の比抵抗値と一軸圧縮強度、超音波伝播速度、および有効間隙率の相関関係は比較的良好である結果が得られ、供試体の比抵抗値は、水分飽和度が減少するにしたがって指数関数的に増加すると述べている。

以上のように岩石供試体の比抵抗特性に関しては、多くの研究者が取り組んでおり、それなりの知見が得られている。しかし、岩種によって、これらの特性がどのように変わるのか、あるいは、不連続面の存在が比抵抗値にどう影響するのかに関しては、まだ不十分なようである。

表-1 インタクト供試体

	岩種	本数	有効間隙率
深成岩	花崗岩 I	21	0.009~0.034
	細粒花崗岩	4	0.009~0.012
	中粒花崗岩	19	0.008~0.023
	閃緑花崗岩	12	0.009~0.018
	斑レイ岩	14	0.004~0.037
半深成岩	輝緑岩	24	0.002~0.124
	ひん岩 I	19	0.001~0.010
	ひん岩 II	7	0.029~0.063
火山	流紋岩 I	13	0.010~0.030
	流紋岩 II	10	0.005~0.011
堆積岩	頁岩	25	0.005~0.022
	塊状頁岩	11	0.002~0.010
	砂岩	12	0.001~0.006
	輝緑凝灰岩 I	26	0.001~0.035
	輝緑凝灰岩 II	10	0.029~0.051
	粘板岩	20	0.001~0.009
	チャート	18	0.002~0.033

Characterization of resistivities for various rocks affected by saturation and porosity and its application for rockmass estimation method : H.Kusumi (Kansai-Univ. Assoc. Prof.), Y.Hatakenaka (Kinki Geological Center Co.Ltd.), U.Nishikata (Kansai Electric Power Co.Ltd.), M.Nakamura (New Jeck Co.Ltd.), Y.Okuda (Graduate School of Kansai-Univ.)

本研究では、17種類の硬岩の部類に属する岩石供試体（インタクト供試体）と、単一の不連続面を有する3種類の岩石供試体を用いて、室内において比抵抗値を測定して、比抵抗値と飽和度、間隙率の関係について検討した。また、単一不連続面を有する供試体では、不連続面間に湿潤させた濾紙を挟み、インタクト供試体と同様な実験を行った。このとき、不連続面に挟んだ濾紙の枚数を変化させて比抵抗値の測定を行った。これらのことから、岩石の比抵抗値に及ぼす飽和度、間隙率、不連続面の開口幅、不連続面の傾斜の影響について考察を行うとともに、岩石の地質学的分類と比抵抗値変化特性との関連性について検討した。また、岩石の飽和度、間隙率を含んだ岩石の比抵抗値を与える実験式を提案し、あるトンネル坑内の岩盤壁面で簡易比抵抗法によって計測された比抵抗値を提案した実験式に適用し、本実験式から実岩盤の物性値を評価できる可能性について検討した。

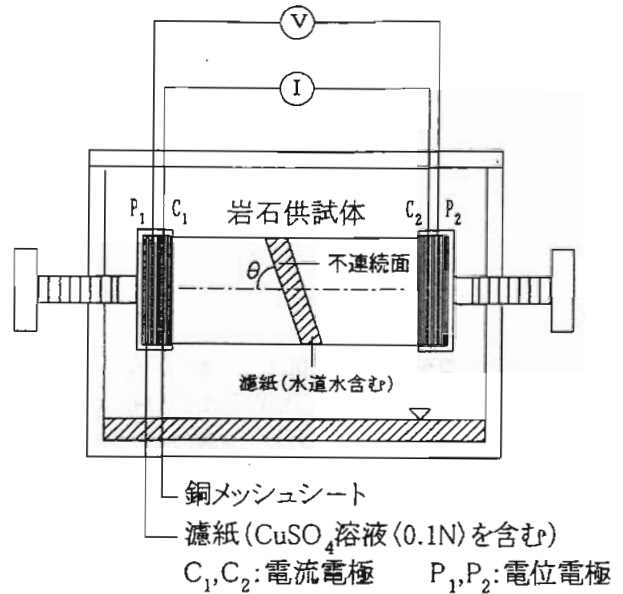


図-1 比抵抗測定装置

2. インタクト供試体の比抵抗特性

2.1 実験概要

実験に用いた岩石供試体は、表-1に示す17種類の硬岩を用いた。それぞれの岩石の有効間隙率はこの表に示すとおりであり、各岩石の一軸圧縮強度は、19.6MPa以上であり⁹⁾、いわゆる硬岩の部類に属するものである。

インタクト供試体とは、ボーリングによって採取したコアをダイヤモンドカッターを用いて、直径50mm、高さ100mmの円柱に成形したものを、不連続面供試体とは、岩石供試体に単一の不連続面を有したもので、分離したコアを合わせて、直径50mm、高さ100mmの円柱に成形したものである。

図-1は比抵抗値の測定方法を示したものである。比抵抗測定はGS法¹⁰⁾を採用している。GS法とは、図-1に示すように、電流電極、電位電極とも80メッシュの銅網を用い、電極や供試体に挟む濾紙に含ませる溶液は0.1NのCuSO₄溶液を用いた。実験は、同種類の岩石供試体すべてを水中に入れて同時に96時間真空脱気法を行い、強制湿潤させた状態、すなわち飽和度1.0の状態から室内に放置し、自然乾燥により異なった含水状態下における比抵抗値の測定を行った。なお比抵抗は式(1)によって求めた。

$$\rho = V/I \cdot A/L \quad (1)$$

ただし、 ρ : 比抵抗値、A: 供試体の断面積

I: 電流、V: 電圧、L: 電位電極間隔

2.2 比抵抗と飽和度、間隙率の関係

図-2、3は、有効間隙率がほぼ同じ各岩石供試体の比抵抗値と飽和度との関係について示したものである。図-2は有効間隙率が約0.011であり、図-3は有効間隙率が約0.006の各岩石供試体を示している。これらの図より、各岩石供試体の比抵抗値と飽和度との関係は飽和度が減少

すると比抵抗値は大きくなっており、飽和度に対する比抵抗値の増加割合は、ほぼ同じ有効間隙率を示す岩石でも各岩種によって異なっている。特に有効間隙率が小さい岩石供試体ほど、飽和度に対する比抵抗値の変化は大きいことが認められる。また、この両者の関係は、この実験結果より非線形性を呈し、次式に示す指数関数で表すことを試みた。

$$\rho = A \cdot S_r^{-B} \quad (2)$$

ただし、 ρ : 比抵抗値、 S_r : 飽和度

A: $S_r=1.0$ 時の比抵抗値(ρ_s)、B: 指数

図-4は、ひん岩I、チャートおよび粘板岩における有効間隙率 ϕ と式(2)中のA値との関係について示したものである。ここで、A値とは完全飽和状態($S_r=1.0$)の比抵抗値を表している。この図より、各岩石とも有効間隙率が大きくなるとA値は小さくなっており、特に有効間隙率の値が小さいところでは、A値の増加は著しい。そして有効間隙率が大きくなるにつれて、A値の減少の程度は低くなる傾向がみられる。また、他の岩種においても、同じ傾向がみられた。これらの関係より、有効間隙率とA値の関係を次式によって近似することが可能である。

$$A = \rho_s = m \cdot \phi^{-n} \quad (3)$$

ただし、 ϕ : 有効間隙率、m: 係数、n: 指数

図-5は、ひん岩と輝緑凝灰岩の有効間隙率とA値の関係について示したものである。これより、ひん岩I、ひん岩IIは、採取地が異なるにもかかわらず、飽和度 $S_r=1.0$ 時の比抵抗値と有効間隙率 ϕ との関係は、一つの式(4)で表されることが認められた。

$$A = 0.06 \cdot \phi^{-2.31} \quad (4)$$

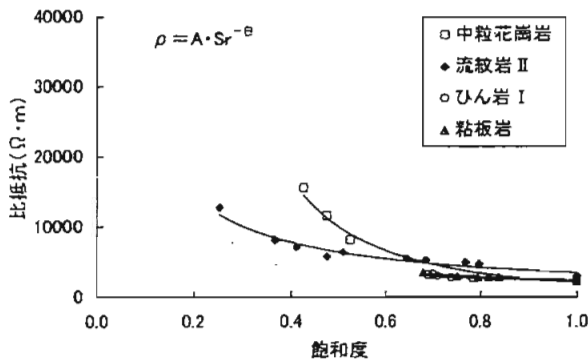


図-2 飽和度と比抵抗値の関係 ($\phi=0.011$)

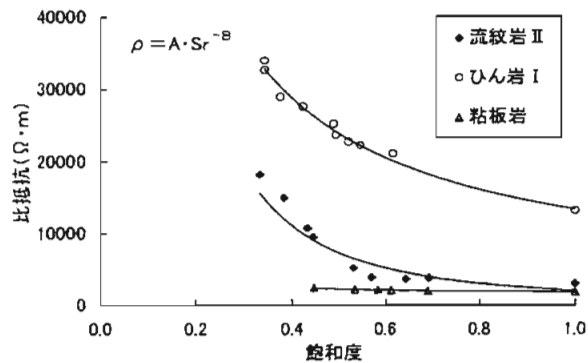


図-3 飽和度と比抵抗値の関係 ($\phi=0.006$)

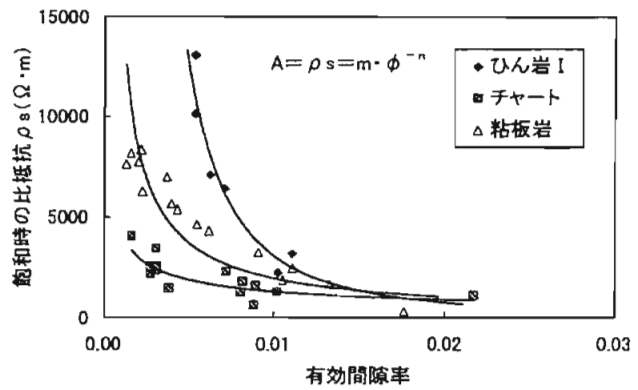


図-4 飽和時の比抵抗 ρ_s と有効間隙率の関係

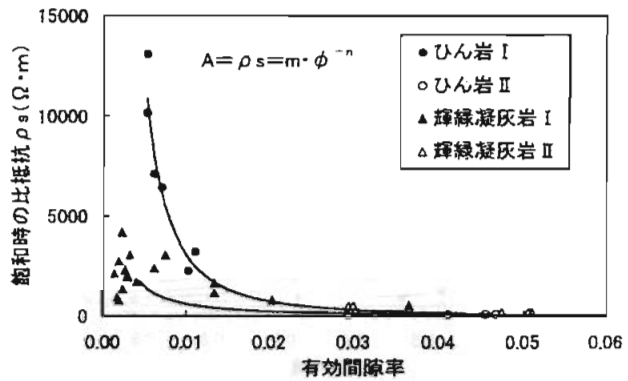


図-5 飽和時の比抵抗 ρ_s と有効間隙率の関係

また、輝緑凝灰岩 I, II についても、多少ばらついているが、ひん岩と同様な傾向がみられる。飽和度 $Sr=1.0$ 時の比抵抗値と有効間隙率 ϕ との関係は、一つの式(5)で表されることが認められた。

$$A=41.02 \cdot \phi^{-0.66} \quad (5)$$

これより、採取地が異なっても岩種が同じであると、飽和度 $Sr=1.0$ 時の比抵抗値と有効間隙率 ϕ との関係は、一つの関係式で表されることが判明した。この傾向は、さらに花崗岩類、流紋岩類に関しても、同様の傾向が得られた。

2.3 地質学的分類による比抵抗値の比較

図-4, 5 で示したように岩石の比抵抗値は有効間隙率に依存していることが明らかとなったが、同じ有効間隙率であるにもかかわらず、岩種によって比抵抗値は大きく異なる。そこで、 $Sr=1.0$ 時の岩石の比抵抗値と有効間隙率の関係を地質学的分類で比較したものを図-6 に示した。この図より、有効間隙率が小さくなるにつれて、岩種による差が顕著に表れている。このことより、有効間隙率が大きい場合は、間隙水の影響が大きく、小さい場合は、間隙水の影響は小さく、岩石の鉱物組成が岩石の比抵抗値に大きな影響を与えているものと考えられる。そこで、岩石の鉱物組成について検討を行う。

堆積岩は火成岩に比べ、比抵抗値が低いことは図-6 を見ても明らかである。堆積岩は地層に含まれている微量の粘土分などが導電性となり²⁾、低い比抵抗値を示したと考

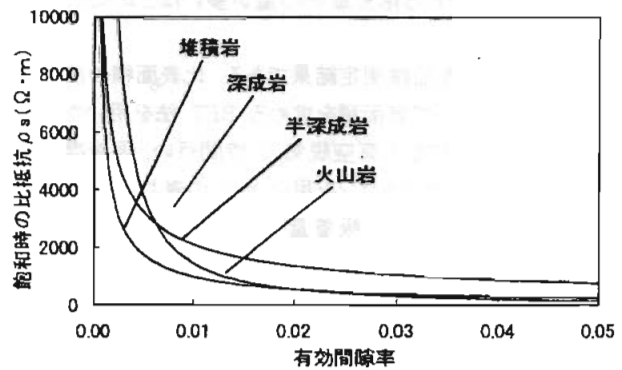


図-6 地質学的分類による比抵抗値と有効間隙率の関係

表-2 岩石の比表面測定結果

岩種	比表面積 (m^2/g)
細粒花崗岩	0
流紋岩	0.14
チャート	0.49
粘板岩	0.35
頁岩	0.80

表-3 単一不連続面を有する供試

岩種	角度(°)	有効間隙率
花崗岩 I	0	0.012
	35	0.012
	45	0.013
	60	0.012
	90	0.012
中粒花崗岩	90	0.020
流紋岩 II	90	0.017

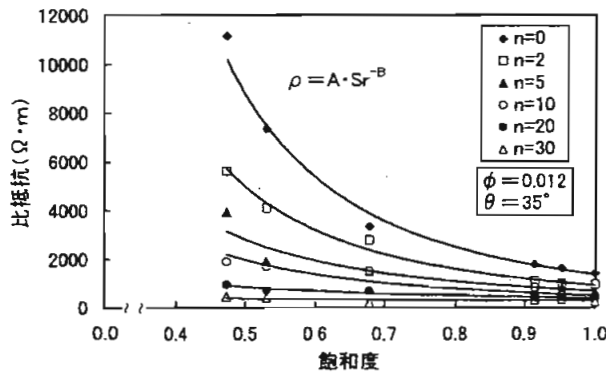


図-7 飽和度と比抵抗値の関係 (花崗岩 I)

えられる。また、含まれる粘土鉱物の量が多いほど比抵抗値が低下する。

表-2 は岩石の比表面積測定結果である。比表面積の測定は、ガス吸着によって表面積を求める BET 法を用いた¹¹⁾。前処理として、200℃で真空脱気 2 時間行い、吸着温度は 77K、吸着ガスはアルゴンを用いた。この表より、深成岩である花崗岩には、ガスの吸着量は、ほとんど 0m²/g であり、火山岩である流紋岩の比表面積は、0.14m²/g であった。また、堆積岩であるチャート、粘板岩、頁岩は、火成岩よりも比表面積は大きな値を示した。このことより、比表面積が岩石の比抵抗値に何らかの影響を及ぼすと考えられるが、その詳細については、十分明かにすることはできなかった。すなわち、このような微小領域での測定が多くの困難を伴うために、定性的に終始せざるを得ないことに起因している。

また、火成岩では深成岩、半深成岩、火山岩と比抵抗値が大きく異なる。深成岩である花崗岩は、石英を多く含み、石英は風化作用に安定な鉱物であり、比抵抗値も高く、非導電性鉱物であることから¹²⁾、同じ火成岩でももともと比抵抗値が高いことが認められた。

以上、飽和度 Sr=1.0 時の比抵抗値と有効間隙率 φ との関係性を岩石の地質学的分類から考察したが、これらは、本実験で用いた岩種から得られた結果である。岩種の数については、多少の問題があると思われるが、ほぼ比抵抗値と有効間隙率との関係は、地質学的分類によって、それぞれ特徴的变化を示すことが認められた。

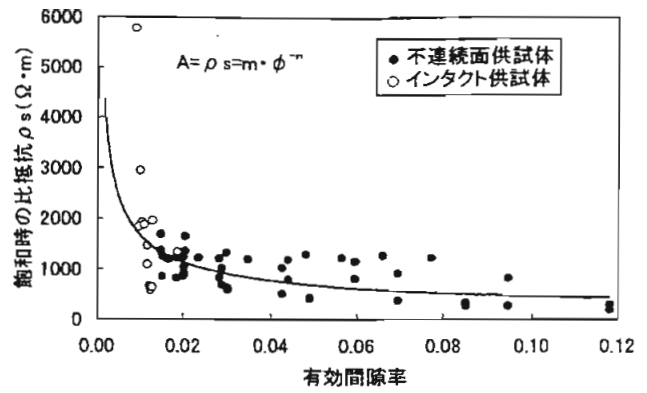


図-8 飽和時の比抵抗と有効間隙率の関係 (花崗岩 I)

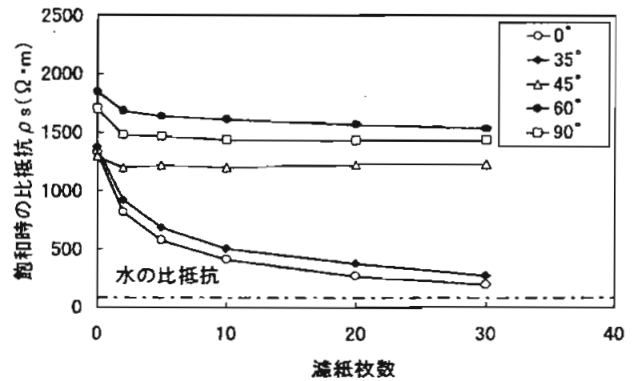


図-9 飽和時の比抵抗と不連続面の濾紙枚数

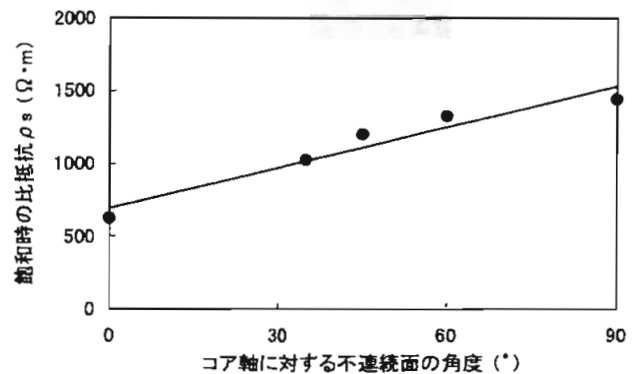


図-10 飽和時の比抵抗とコア軸に対する不連続面角度の関係

3. 単一不連続面を有する供試体の比抵抗特性

3.1 実験概要

実験に用いた岩石供試体は花崗岩 I、中粒花崗岩、および、流紋岩 II で直径 50mm、高さ 100mm の円柱に成形したものを用いた。ただし、この中には、供試体を完全に分断させている単一不連続面を含んでいる。各岩石供試体の有効間隙率、不連続面の角度を表-3 に示す。また、実験方法は、インタクト供試体と同様で、岩石供試体の不連続部分には水を保有するために水を含んだ濾紙を 5 通りの枚数 (n=2, 5, 10, 20, 30) で比抵抗測定を行った。なお、比抵抗値は測定した電位差、電流値に断面積、高さ

を用いてインタクト供試体と同様に、式(1)によって求めた。また、水を含んだ濾紙の比抵抗値は、ほぼ水の比抵抗値と同じ値であった。

3.2 比抵抗と飽和度、間隙率の関係

図-7は、岩石実質部分の有効間隙率0.012、不連続面の角度 $\theta = 35^\circ$ の不連続面を有する花崗岩 I の比抵抗値と飽和度の関係を濾紙の枚数をパラメータとして示したものである。この図より飽和度が減少するにつれて、比抵抗値は増加する傾向がみられ、不連続面に挟んだ濾紙の枚数が少ないほど、飽和度の変化に対する比抵抗値の変化は、大きくなっている。また、不連続面が存在する岩石供試体の比抵抗値と飽和度の関係は、指数関数的であり、インタクト供試体と同様に、式(2)に示す指数関数に近似できた。また、中粒花崗岩、流紋岩 II とも、花崗岩 I と同様の傾向を示した。

図-8は、花崗岩 I における飽和度 $S_r=1.0$ 時の比抵抗値である A 値と有効間隙率の関係を示したものである。ここで、不連続面を有する岩石供試体の有効間隙率 ϕ は、次式で求めた。

$$\phi = (W_2 - W_1 + W_4) / (W_2 - W_3 + W_4) \quad (6)$$

ただし、 W_1 : 岩石実質部分の乾燥重量

W_2 : 岩石実質部分の湿潤重量

W_3 : 岩石実質部分の水中重量

W_4 : 不連続面内の水の重量

また、図中にはインタクト供試体の A 値もプロットした。この図から、不連続面を有する供試体とインタクト供試体の A 値と、式(6)で示した有効間隙率との関係は、式(3)のような 1 つの関数として表すことが認められた。

3.3 不連続面角度と比抵抗値の関係

図-9は、花崗岩 I の飽和度 $S_r=1.0$ 時の比抵抗値と不連続面に挟んだ濾紙の枚数、つまり、開口幅との関係を示したものである。ここで、開口幅とは、濾紙を不連続面間に挟んだ状態で比抵抗値の計測を行っている状態下における、不連続面間の幅である。この図から、コア軸に対する不連続面の角度 θ が小さい 0° 、 30° の供試体は、不連続面に挟んだ濾紙の枚数の増加に伴って比抵抗値が水の比抵抗値に近づいていることがわかる。ここで、本研究で用いた水の比抵抗値は約 $80 \Omega \cdot m$ である。また、コア軸に対して $\theta = 45^\circ$ 、 60° 、 90° の不連続面を有する供試体の比抵抗値は、不連続面に挟んだ濾紙の枚数の増加に伴って、一定値に近づいている。このことから、コア軸に対して大きな角度の不連続面を有する供試体の比抵抗値は、不連続面に挟んだ濾紙の枚数よりも岩石供試体の岩石実質部分の比抵抗値に支配されていることがわかる。図-10は、花崗岩 I の飽和度 $S_r=1.0$ 時の各供試体の比抵抗値とコア軸に対する不連続面の角度の関係を示したものである。岩石の比抵抗値は、有効間隙率に大きく支配されているが、式(6)で示した有効間隙率が約 0.030 の岩石供試体では、供試体内に存在する単一の不連続面の角度が

大きくなるにしたがって、比抵抗値は増加する傾向がみられた。

4. 原位置岩盤への適用

現場の概要¹³⁾は、高さ2.2m、幅2.0、全長が約2400mの既設トンネルで、周辺地質は流紋岩およびこれと同じく中生代白亜紀に生成された花崗岩が主体となる。花崗岩は中粒及び細粒花崗岩から構成されている。既設トンネル地質縦断面図、および、実績湧水量を図-11に示す。実績湧水量は、トンネル施工時に切羽の進行に伴って、上口側で測定した湧水の積算量を示している。

原位置岩盤への適用を検討するために、岩石採取地点の既設トンネルにおいて、切羽から湧水が認められ、飽和状態に近いと思われる測点での簡易比抵抗測定結果と岩級区分の関係を検討した。

トンネル掘削現場の比抵抗は、掘削切羽で電極間隔20cm、4極法の Wenner 配置の簡易比抵抗測定器を用いて測定した。岩盤良好度は電中研式岩級区分⁹⁾と、Q 値による評価法^{14),15)}を改良した地山評価手法を用いて判定した。湧水評価は、表-4に示すように、「滴水・にじみ出る程度を2」、「湧水程度を3」、「少量連続して流れ落ちる状態を4」、「特定の割れ目から集中的に湧水がある状態を5」とした。

表-5は、岩盤良好度と間隙率の関係を示したものである¹⁶⁾。これを用いて、現場で判定した岩級区分と岩盤の良好度から有効間隙率の推定を行った。

表-6は、実際にトンネル坑内の壁面で簡易比抵抗法によって計測した比抵抗値と岩盤を評価したものである。

図-12は流紋岩における室内試験結果と簡易比抵抗測定結果を示したものである。ここで、簡易比抵抗測定によって得られた比抵抗は、表-5により内挿法によって間隙率を求める。この図より、室内試験で得られたインタクト供試体と不連続面供試体の飽和度 $S_r=1.0$ 時の比抵抗値 ρ_s と有効間隙率 ϕ から求めた近似曲線に簡易比抵抗測定結果によく一致していることがわかる。これは、室内試験で得られた比抵抗は、真の比抵抗であり、原位置での比抵抗は見かけの比抵抗との違いがある。しかし、同一岩種でかつ岩盤の亀裂状況が室内試験結果で得られた特性から、原位置岩盤の状況を把握できることが可能であることを示している。また、図中の近似曲線は次式のように表される。

$$\rho_s = 111.19 \cdot \phi^{-0.63} \quad (7)$$

また、トンネル現場の流紋岩は表-1に示す流紋岩 II である。

図-13に示す中粒花崗岩においても、簡易比抵抗測定結果は、室内試験結果より小さい値を示すものの、ほぼ室内試験で求めた近似曲線に簡易比抵抗測定結果がよく一致していることがわかる。この中粒花崗岩は、表-1に示す同じ花崗岩であり、図中の近似曲線は次式のように

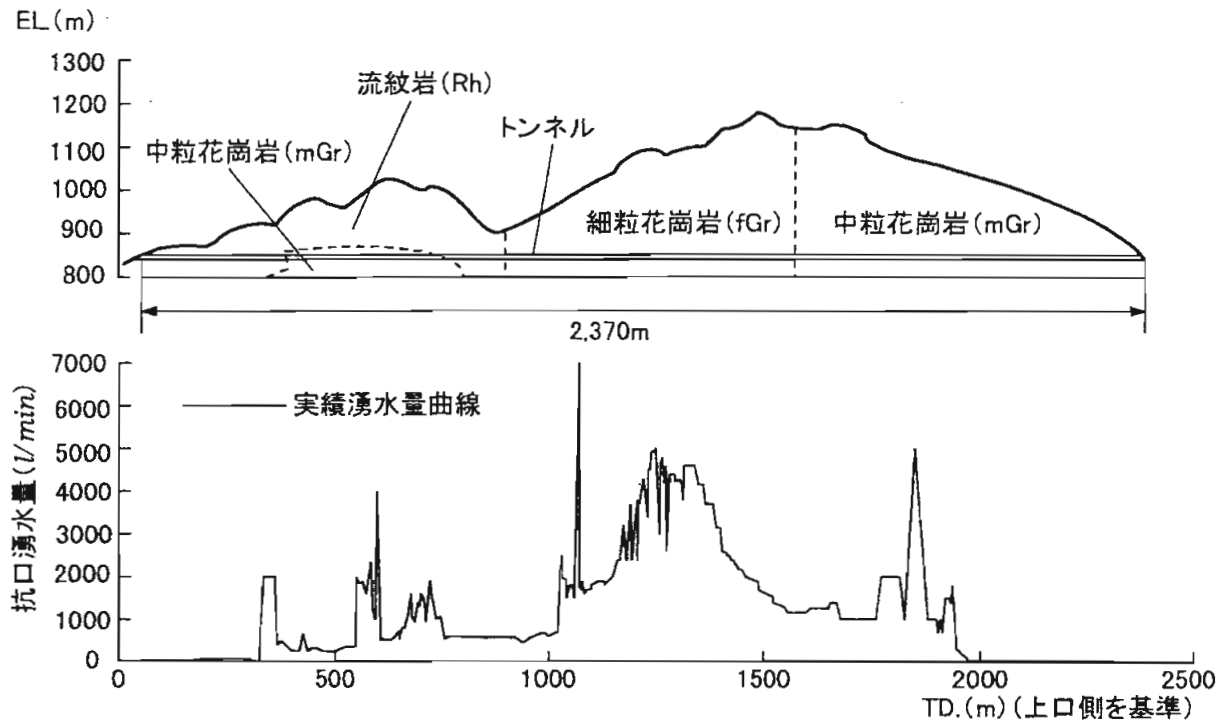


図-11 既設トンネル地質縦断面図および実質湧水量曲線

表-4 湧水評価

滴水・にじみ出る程度	2
湧水程度	3
少量連続して流れ落ちる状態	4
特定の割れ目から集中的に湧水がある状態	5

表-6 岩盤評価と簡易比抵抗測定結果

岩種	TD (m)	岩級区分	岩盤の良好度	ρ_{min} ($\Omega \cdot m$)
Rh	上口トンネル			
	44.4	C _L	35	288
	46.2	C _L	43	731
	48.9	C _L	37	748
	232.4	C _L	58	429
	253.5	C _L	60	356
	325.0	C _L	25	225
	347.0	D	18	58
372.5	C _L	20	20	
mGr	424.4	D	18	94
	452.0	C _L	27	194
	546.0	C _L	52	179
	569.9	C _L	36	67
	596.8	C _M	76	756
	624.0	C _M	67	720
	653.0	C _L	57	217
	1710.5	C _L	61	53
	1814.6	C _L	63	392
	1854.9	C _M	64	56

表-5 各手法による地山の区分対比

岩盤の良好度	間隙率
0~20	0.14以上
20~40	0.07~0.14
40~60	0.035~0.07
60~80	0.035以下
80~100	

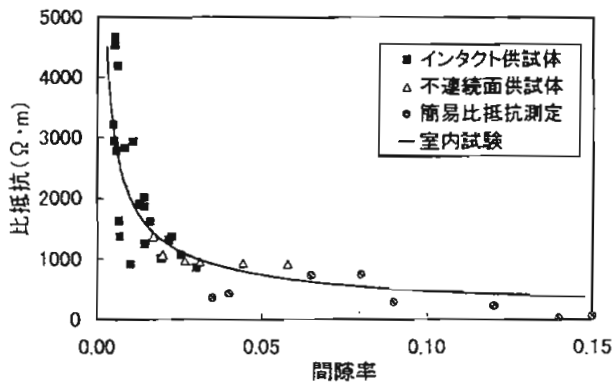


図-12 比抵抗と間隙率の関係 (流紋岩)

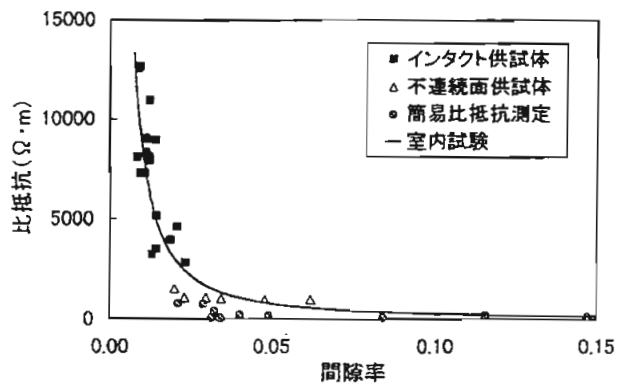


図-13 比抵抗と間隙率の関係 (中粒花崗岩)

$$\rho_s = 9.06 \cdot \phi^{-1.48} \quad (8)$$

以上より、2種類の岩種について検討し、岩盤良好度から推定した有効間隙率に対する簡易比抵抗測定結果は室内試験で求めた近似曲線とよく一致することが認められた。したがって、このことより、室内試験で求めた各岩種の式(3)から、原位置岩盤の見かけ比抵抗値を測定することによって、岩盤の物性値を評価できることが認められた。

5. 結言

本研究は、 intact 岩石供試体と単一の不連続面を有する岩石供試体の比抵抗特性について、主に実験的検討を行った。また、室内試験で得られた結果から提案した実験式を現場での簡易比抵抗結果に適用し、本実験式から実岩盤の物性値を評価できる可能性について検討した。本研究で得られた結果を要約すれば次のようになる。

(1) 不連続面を含まない intact 岩石供試体は、飽和度の変化に対して比抵抗値は、岩種によらず、これらの変化傾向は指数関数として表された。また、有効間隙率に対する完全飽和状態での比抵抗値は、採取地が異なっても、同じ岩種の岩石は、一つの指数関数として表すことができた。さらに、有効間隙率に対する完全飽和状態での比抵抗値は、有効間隙率が小さいところでは、地質学的分類によって顕著な差が認められ、この差は岩石の比表面積に起因していることが認められた。

(2) 単一の不連続面を有する岩石供試体も intact 岩石供試体と同様に、岩石実質部分の飽和度の変化に対して比抵抗値は、岩種によらず、これらの変化傾向は指数関数として表され、 intact 供試体と不連続面供試体の A 値と有効間隙率との関係は1つの指数関数として表すことが認められた。また、単一の不連続面を有する岩石供試体の比抵抗値は、不連続面の影響が大きく、岩石実質部分の飽和度が減少するにつれて、不連続面の開口幅の影響が大きくなっている。さらに、同じ有効間隙率の不連続面供試体の比抵抗値は、コア軸に対する不連続面の角

度に起因していることが認められた。

(3) 簡易比抵抗測定結果は、室内試験で求めた intact 岩石供試体と、単一の不連続面を有する岩石供試体の比抵抗値と有効間隙率の提案式への適合性が認められ、本実験式から実岩盤の物性値を評価できる手法を示した。

参考文献

- 1) 島 祐雅・梶間和彦・神谷英樹: 比抵抗映像法, 古今書院, 1995.
- 2) 関根一郎・西牧 均・石垣和明・原 敏昭・斉藤章: 岩石の比抵抗特性とその力学的性質との関係, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.75-86, 1996.
- 3) 関根一郎・西牧 均・石垣和明・原 敏昭・斉藤章: 岩石比抵抗における表面伝導の影響とそれを考慮した比抵抗と弾性波速度との関係, 土木学会論文集 No.568/III-39, pp.209-219, 1997.
- 4) 関根一郎・西牧 均・石垣和明・原 敏昭・斉藤章: 岩石の比抵抗に対する割れ目とその挟在物の影響, 応用地質, Vol.38, No.4, pp.213-223, 1997.
- 5) 朴 三奎・松井 保: 岩石比抵抗に関する基礎的研究, 物理探査, Vol.51, No.3, pp.201-209, 1998.
- 6) 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, No.547/III-36, pp.117-125, 1996.
- 7) 千葉昭彦・熊田雅弘: 花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定, 物理探査, Vol.47, No.3, pp.161-172, 1994.
- 8) 松原哲也・真下英人: 岩石の比抵抗に関する基礎的実験, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.386-390, 1996.
- 9) 吉中龍之進・桜井春輔・菊池宏吉: 岩盤分類とその適用, 土木工学社, 1989.
- 10) 勝部照雄: 岩石・鉱石の電気化学的過渡現象(II), 物理探査, Vol.22 No.1, pp.21-33, 1969.
- 11) 日本粘土学会編: 粘土ハンドブック第二版, 技報堂出版, 1987.
- 12) 山下明夫: 堆積層の比抵抗に関する研究, 物理探査, Vol.4 No.3, pp.14-23, 1971.

- 13) 岸本修治・谷内信久・庄司 功: 荒谷水力発電所の設計と施工, 電力土木, pp.39-44, 1998.
- 14) Barton N: "Recent Experiences with the Q-System of Tunnel Support Design." Exploration for Rock Engineering, ed. Z.T. Bieniawski, A.A. Balkema, Johannesburg, pp.107-115, 1976.
- 15) Barton N: "Rock mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection using the Q-System." Proc.Symp.Rock Class.Eng.Purp., ASTM Special Technical Publication 984, Philadelphia, pp.59-88, 1988.
- 16) 土質工学会編: 土質基礎工学ライブラリー16, 風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用, 土質工学会, 1979.