

岩石の比抵抗特性と地質要因に関する 室内試験と考察

藤井誠¹・西田薫²・石黒幸文³・雷興林⁴・西野健三⁵

¹工修 中部電力株式会社 (〒461-8680 名古屋市東区東新町 1)

²正会員 埼玉大学大学院理工学研究科, (株)グイコンタクト (〒330-8660 埼玉県大宮市吉野町 2-272-3)

³正会員 工修 中部電力株式会社 (〒461-8680 名古屋市東区東新町 1)

⁴理博 工業技術院地質調査所 (〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-3)

⁵正会員 工博 中部電力株式会社 (〒461-8680 名古屋市東区東新町 1)

岩石の比抵抗と地質要因、含水量などとの関係について明らかにし、電気探査結果から地山の岩盤状況を評価する際の基礎資料を得ることを目的として、ボーリングコアおよび立方体供試体を用いて室内試験を実施した。その結果、岩石の比抵抗は岩種、有効間隙率および飽和度によってほぼ決定されること、岩石中の亀裂などの不連続面の方向、含水状態および介在物が比抵抗に大きな影響を与えることがわかった。また、広く知られている砂岩等に対するアーチーの式を適用して、通常の地下水の比抵抗範囲 20~100 Ω・m における岩石の比抵抗を評価するパラメータを求めたほか、飽和状態の比抵抗と有効間隙率との関係、比抵抗と飽和度および含水比との関係、不連続面が地山比抵抗に与える影響などの検討を行った。

Key Words : electrical resistivity, discontinuities, water saturation, water content, electrical exploration

1. まえがき

近年になってトンネルやダム的基础岩盤調査に比抵抗探査が適用される事例が多くなってきている。これは、地山比抵抗が断層や破碎帯の存在、また岩盤の亀裂の発達程度、地下水の分布状況を推定する上できわめて有益な情報を提供すること、弾性波探査でうまく解析出来ない例えば浅部に高速度層がある地質構造などでも有効な探査結果が得られることが広く知られてきたためである。これらの調査が比較的容易になった背景には、多チャンネルの測定器の開発によって大量のデータが効率的に取得できるようになったこと、計算機による逆解析手法の開発¹⁾²⁾が実用的レベルに達したことなど、最近の急速な技術的発展が重要な役割を果たしてきたと考えられる。

トンネルの場合には現在のように弾性波速度だけを主要な指標として用いるのではなく、比抵抗も補足的な指標として用いる設計・施工のための地山分類の試みもあらわれはじめている³⁾⁴⁾。また、そのほかの土木地質分野における比抵抗に関する研究には、地山中の地下水流動

状況の把握⁵⁾⁶⁾⁷⁾、地盤改良の効果判定⁸⁾⁹⁾を目的とした研究などが行われている。

比抵抗探査を積極的に地山の工学的評価に利用するためには比抵抗値の評価方法を確立することが必要と考えられる¹⁰⁾。そのために、地山の比抵抗を解釈するための基礎的な知識を、室内試験によって得ようという研究が行われるようになった¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。

本研究においては含水状態が岩種、風化程度の異なる種々の岩石の比抵抗に与える影響についてボーリングコアを用いて調べたほか、亀裂性岩盤における不連続面が比抵抗値に与える影響について人工的な不連続面を含む立方体供試体を用いた室内試験を行って検討を加えた。従来の研究においては、含水量および間隙水の比抵抗が岩石比抵抗に及ぼす影響などについての研究が主なものであり、亀裂などの不連続面が比抵抗に及ぼす影響についての研究は、関根らの研究¹⁷⁾があるほかはほとんどない。関根らは割裂によって生じた分離面を有する円柱状供試体の比抵抗について分離面の方向と測定方向との関係、分離面に粘土を介在した場合の影響等に

ついて実験を行っている。

表-1 試験に用いたボーリングコア供試体一覧表

岩種	風化程度	亀裂の有無	供試体数
花崗岩	新鮮	無	2
	新鮮	有	2
	風化	無	2
	風化	有	2
流紋岩	新鮮	無	2
	新鮮	有	2
	風化	無	2
	風化	有	2
砂岩	新鮮	無	2
	新鮮	有	2
	風化	無	2
	風化	有	2
頁岩	新鮮	無	1
	新鮮	有	1
	風化	有	2
変質流紋岩	弱変質	無	2
	弱変質	有	1
変質安山岩	弱変質	無	2
合計			33

2. 試験方法

(1) 試験の概要

室内試験は、ボーリングコアを用いた試験と立方体供試体を用いた試験の2種類を実施した。

a) ボーリングコアを用いた試験

岩種、風化の程度、亀裂の有無等の地質的条件および含水状態が比抵抗に及ぼす影響を定量的に明らかにする目的でボーリングコアを用いて室内試験を実施した。用いたボーリングコアは同じ調査地点で実施された多くのボーリング調査によって採取されたものである。岩種は、花崗岩、流紋岩、砂岩、頁岩、変質流紋岩、変質安山岩の6岩種であり、各岩種とも原則として風化程度（肉眼判定による新鮮岩と風化岩の2区分）、亀裂の有無（肉眼判定による2区分）によってコアを分類してサンプリングを行ったが、頁岩、変質流紋岩、変質安山岩については該当する試料数が少ないこともあって全ての分類の試料は採取できなかった。

試料を採取した地層は中生代ジュラ紀～白亜紀に属する。表-1に、試験に用いたボーリングコア供試体の一覧表を示す。ボーリングコア供試体の風化程度、亀裂の有無は肉眼観察による判別によった簡易的なものである。また、供試体の形状と亀裂の方向性との関係については特に考慮していない。

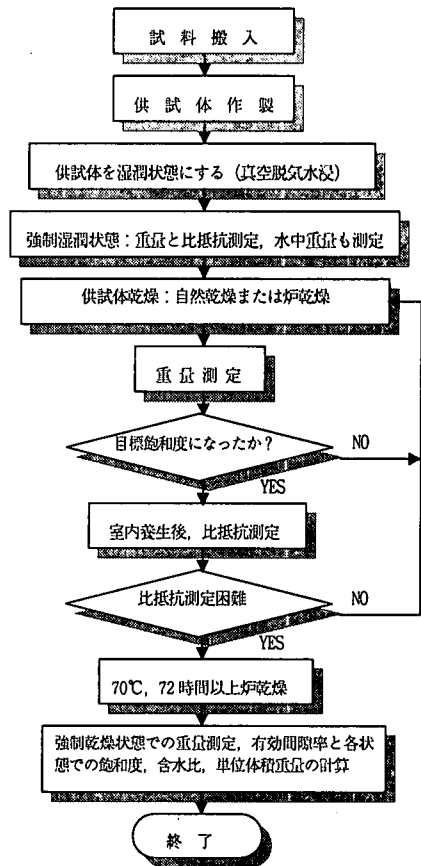


図-1 ボーリングコアを用いた試験手順

図-1にはボーリングコアを用いた試験の手順を示す。ボーリングコア供試体は外径が約50mmであり、長さ100mmを目安に整形をし、両側の端面は平面研削盤で平滑に仕上げた。整形した供試体を水道水（比抵抗 $67\Omega\cdot\text{m}$ ）に水浸したまま真空デシケータ内で48時間以上、気泡が出なくなるまで脱気した後、さらに室内で24時間水浸したまま放置し、この状態を強制湿潤状態とした。

強制湿潤状態で比抵抗を測定した後、室内自然乾燥によって含水状態を変化させながら比抵抗変化を測定した。水分飽和度を下げていく過程で、供試体を室内に放置しておく急速な乾燥によって試料内の含水状態が不均質になる恐れがある。そこで供試体内の含水状態を均質にさせるために、室温 23°C 下の密封したプラスチックケース内で時間をかけて乾燥させた。室温下の速やかな乾燥が困難になった時点（飽和度およそ30～40%以下）でプラスチックケースごと供試体を30～60℃の温度に設定した乾燥炉中に入れ、炉乾燥させた。適当な時間が経過したらケースを乾燥炉から取り出し供試体の温度が室温まで下がるのを待って測定を行った。

表-2 試験に用いた立方体供試体一覧表

岩種	試料番号	風化程度	亀裂の有無
花崗岩	802	やや変質	無
	804	新鮮	無
流紋岩	812	風化	無
	813	新鮮	無

含水量の低下によって比抵抗測定が困難になった時点で、最後に供試体を70℃の乾燥炉中で72時間以上乾燥させ、重量変化が認められなくなった状態を強制乾燥状態とし、供試体重量を測定した。強制乾燥状態の比抵抗は非常に大きかったため、測定不能であった。なお、有効間隙率、飽和度、含水比、体積含水率は次式によって求めた。

$$\text{有効間隙率 } \phi = (W_s - W_d) / (W_s - W_w) \times 100 (\%)$$

$$\text{飽和度 } S = (W - W_d) / (W_s - W_d) \times 100 (\%)$$

$$\text{含水比 } \omega = (W - W_d) / W_d \times 100 (\%)$$

$$\text{体積含水率 } \theta_v = (W - W_d) / (W_s - W_w) \times 100 (\%)$$

ここに W_s : 強制湿潤状態の空中重量 kgf (9.8N)

W_w : 強制湿潤状態の水中重量 kgf (9.8N)

W : 供試体の重量 kgf (9.8N)

W_d : 強制乾燥状態の空中重量 kgf (9.8N)

b) 立方体供試体を用いた試験

不連続面の有無と数、不連続面の介在物、不連続面の方向と比抵抗測定方向が比抵抗に及ぼす影響を定量的に明らかにする目的で、採取した岩石ブロックから縦横とも約5cm、厚さ約1cmの岩石スライスを作製し、これを積み重ねて人工的な不連続面を有する立方体供試体を作製した。表-2に試験に用いた立方体供試体の一覧表を示す。採取した試料はボーリングコア試料と同一の地層からのものである。

不連続面の数については岩石スライスを3枚重ねて不連続面を2面構成した場合と岩石スライスを4枚重ねて不連続面を3面構成した場合の2ケースを採用した。不連続面の介在物は含水濾紙を2枚および4枚重ねた場合と含水ベントナイトをシート状に調整した場合の3ケースを採用した。不連続面の方向と比抵抗測定方向の関係については不連続面に平行に測定する場合と不連続面に垂直に測定する場合の2ケースについて比較した。

濾紙1枚の厚みは乾燥状態で約0.25mm、含水状態で約0.5mm、含水ベントナイトのシート厚さは約3mmとした。また、全ての測定は岩石スライスの比抵抗が含水状態によって変化をしないように岩石スライスを飽和状態に保ったまま行った。

立方体供試体は新鮮花崗岩、変質花崗岩、新鮮流紋岩、風化流紋岩の4種類を用意し各立方体供試体について以下の測定を行った。

① 新鮮花崗岩について、不連続面の数2ケース、介

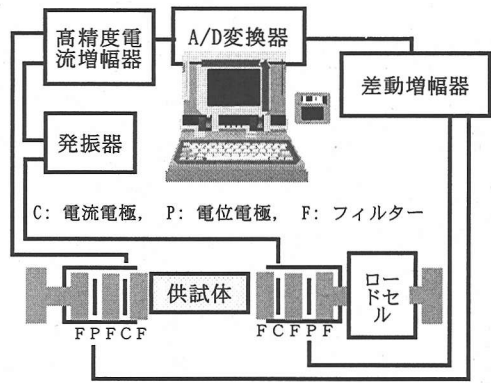


図-2 比抵抗の測定システム

在物3ケース、測定方向2ケースの組み合わせ、計12ケース。

② 変質花崗岩、風化流紋岩について、不連続面の介在物3ケース、測定方向2ケースの組み合わせ、計6ケース。

③ 新鮮流紋岩について、不連続面の含水状態の影響試験を、不連続面2面、濾紙4枚の含水状態を重量測定による飽和度換算で約0、10、20、60、100%の5ケースについて実施した。ここで、濾紙の含水状態を表す飽和度は炉乾燥によって重量変化がなくなった状態を0%、水道水(既述67Ω・m)の水浸から取り出した直後の状態を100%として、重量差を比例配分して求めた概略の数値である。

(2) 比抵抗の測定方法

岩石供試体の比抵抗測定方法については遠藤ら¹⁸⁾、西澤・高倉¹⁹⁾、佐々木ら²⁰⁾、千葉・熊田¹⁴⁾、伊関¹⁵⁾、関根ら¹¹⁾¹²⁾による多くの方法があるが、研究者によって少しずつ測定方法が異なる。土質材料の比抵抗測定に関しては日本鉄道施設協会²¹⁾の測定要領があるものの、岩石試料の比抵抗測定方法に関しては一般的な方法が規定されていないのが現状である。

筆者らは、西澤・高倉¹⁹⁾の測定システムを採用し、千葉・熊田¹⁴⁾によるサンプルホルダーを製作して測定を行った。図-2には比抵抗測定システムの構成図を示した。電圧増幅器の入カインピーダンスは10⁹Ω以上、岩石供試体に流れる電流は10⁻⁵~10⁻⁶A程度で、測定電圧は1V程度であるので十分高精度の測定ができる。

測定には、現地で電気探査を実施する場合に良く利用される周波数を考慮して、0.5 Hzの正弦波信号を用い、50 Hzのサンプリング周波数で2周期分の波形データを記録し、測定電流I(A)および岩石供試体の両端に発生した電圧V(V)を読みとった。供試体の比抵抗ρは次式から求めた。

表-3 ボーリングコアを用いた試験結果一覧表

岩種	肉眼判定による岩質	有効間隙率 %	飽和状態の含水比 %	密度		飽和状態の比抵抗 ρ_{sat} $\Omega \cdot m$	比抵抗~有効間隙率(端数表示)の関係・回帰曲線			比抵抗~飽和度の関係 回帰曲線		
				湿潤 g/cm^3	乾燥 g/cm^3		a	膠結係数 m	相関係数 R	飽和指数 n	後述の式(4)による ρ_s	相関係数 R
花崗岩	新鮮, 亀裂無	2.56	1.00	2.572	2.546	5150	0.034	2.01	0.911	2.63	3801	0.983
	新鮮, 亀裂無	2.15	0.84	2.573	2.551	7027				2.22	5031	0.979
	新鮮, 亀裂有	1.86	0.73	2.576	2.557	7514				2.34	5718	0.984
	新鮮, 亀裂有	1.67	0.65	2.579	2.563	7277				2.05	5280	0.984
	風化, 亀裂無	2.81	1.09	2.594	2.566	1355				2.47	1081	0.996
	風化, 亀裂無	4.49	1.78	2.576	2.531	1031				2.35	624	0.983
	風化, 亀裂有	3.98	1.58	2.553	2.514	1698				2.43	1128	0.992
	風化, 亀裂有	4.78	1.90	2.558	2.511	1194				2.03	724	0.978
流紋岩	新鮮, 亀裂無	3.00	1.16	2.611	2.581	2274	0.094	1.54	0.856	2.03	1503	0.978
	新鮮, 亀裂無	3.34	1.30	2.613	2.579	809				1.86	470	0.957
	新鮮, 亀裂有	6.02	2.39	2.580	2.520	286				1.76	201	0.975
	新鮮, 亀裂有	7.17	2.88	2.560	2.488	319				1.95	236	0.983
	風化, 亀裂無	7.80	3.19	2.523	2.445	511				1.48	308	0.956
	風化, 亀裂無	7.98	3.32	2.486	2.407	420				1.55	224	0.957
	風化, 亀裂有	9.03	3.72	2.517	2.427	182				1.73	112	0.977
	風化, 亀裂有	8.63	3.57	2.504	2.418	333				1.69	177	0.962
砂岩	新鮮, 亀裂無	0.52	0.19	2.666	2.661	2824	0.976	0.73	0.907	1.88	2700	0.995
	新鮮, 亀裂無	0.77	0.29	2.669	2.662	2023				2.12	1547	0.991
	新鮮, 亀裂有	1.27	0.48	2.500	2.637	1450				2.04	1161	0.984
	新鮮, 亀裂有	0.72	0.27	2.664	2.657	2040				2.15	1950	0.985
	強風化, 亀裂無	13.28	5.84	2.407	2.274	277				1.87	221	0.981
	風化, 亀裂無	1.36	0.51	2.667	2.653	1057				2.19	954	0.993
	風化, 亀裂有	1.40	0.53	2.656	2.642	3437				2.19	3112	0.995
	風化, 亀裂有	4.40	1.72	2.602	2.558	542				1.92	429	0.949
頁岩	新鮮, 亀裂無	1.59	0.59	2.690	2.674	387	0.029	1.49	0.899	2.35	399	0.991
	新鮮, 亀裂有	0.96	0.36	2.663	2.654	3561				2.22	3143	0.996
	風化, 亀裂有	5.86	2.29	2.613	2.540	137				2.94	186	0.992
	風化, 亀裂有	4.61	1.79	2.627	2.581	238				2.69	384	0.988
変質流紋岩	弱変質, 亀裂無	3.44	1.33	2.627	2.593	289	0.051	1.37	0.958	2.29	250	0.994
	弱変質, 亀裂無	6.90	2.79	2.540	2.471	177				1.68	138	0.972
	弱変質, 亀裂有	6.76	2.72	2.555	2.487	155				1.54	168	0.991
変質安山岩	弱変質, 亀裂無	11.72	4.84	2.537	2.419	66				2.17	78	0.978
	弱変質, 亀裂有	12.34	5.14	2.523	2.399	48				2.45	56	0.991

供試体の比抵抗 $\rho (\Omega \cdot m) = R \cdot S / L$

ここに R: 供試体の電気抵抗 (=V / I ; Ω)

S: 供試体断面積 (m^2)

L: 供試体の長さ (m)

供試体を固定する軸にはロードセルがついており、約 50kPa の圧力で電極を両端面に圧着して測定を行った。また、測定中の供試体の乾燥を防ぐために、千葉ら¹⁴⁾ になって、供試体固定装置は底面に水を張ったアクリル製の箱に収納した。

3. 試験結果

(1) ボーリングコアを用いた試験

表-3 に、各供試体ごとに、有効間隙率、飽和状態の含水比、湿潤密度、乾燥密度、飽和状態の比抵抗測定値、 ρ_{sat} を一覧表にして示した。表-3 から風化岩は新鮮岩に比べて、有効間隙率が大きく、飽和状態の比抵抗が小さいことがわかる。

岩種別に飽和状態の比抵抗(飽和比抵抗)と有効間隙率との関係を両対数グラフにプロットして図-3 に示す。

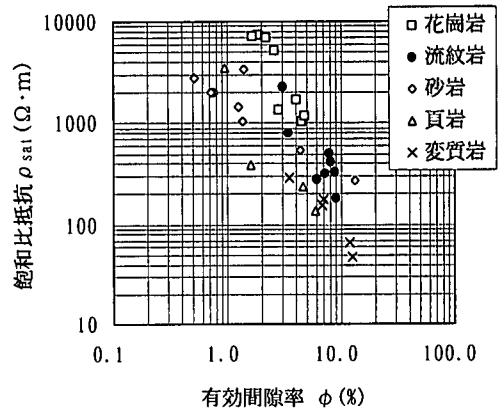


図-3 飽和比抵抗と有効間隙率との関係

飽和比抵抗と有効間隙率の間には密接な関係が認められる。有効間隙率が大きい供試体は飽和比抵抗が小さく、有効間隙率が小さい供試体は飽和比抵抗が大きい。この関係は全岩種について明瞭に認められる。飽和比抵抗を岩種別に見ると、花崗岩が最も大きく、砂岩、流紋岩、頁岩、変質岩(以下、変質流紋岩と変質安山岩はまとめて

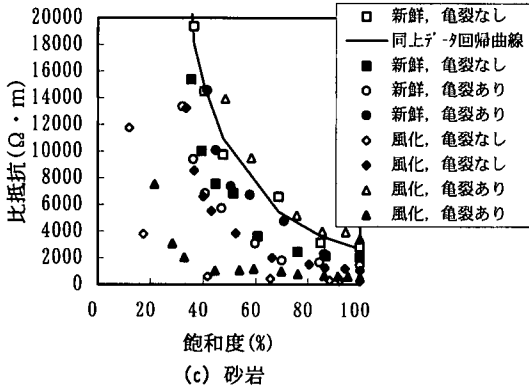
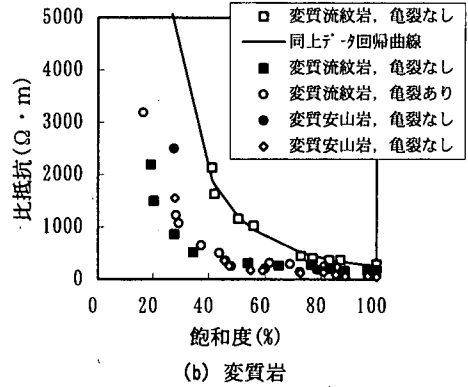
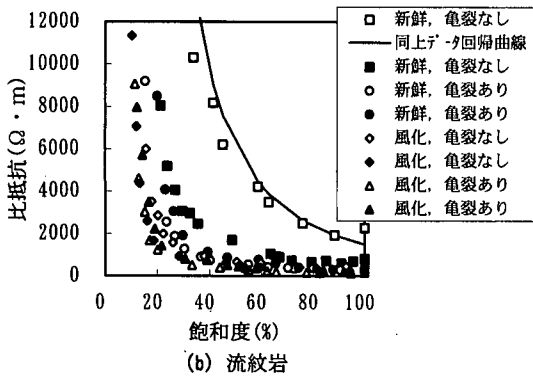
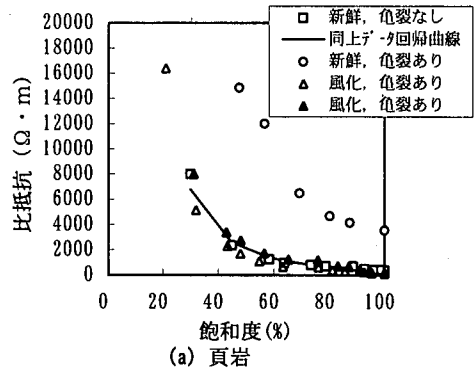
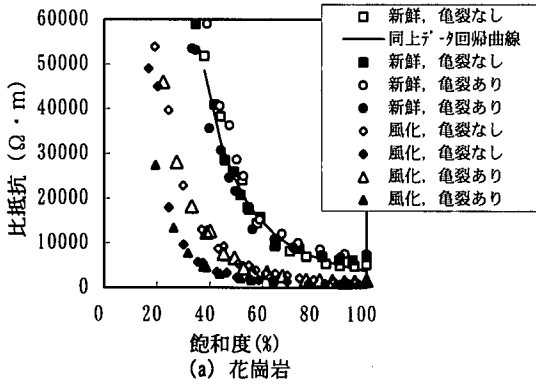


図-5 比抵抗と飽和度との関係 (頁岩・変質岩)

図-4 比抵抗と飽和度との関係 (花崗岩・流紋岩・砂岩)

て示す)の順に小さくなる傾向があり、岩種ごとにまとまった関係があることがわかる。

各岩種ごとに得られた比抵抗と飽和度との関係を図-4および図-5に示す。いずれの供試体についても飽和度の減少に伴って比抵抗が指数関数的に増加する傾向が認められる。

ポーリングコアから肉眼で判定した亀裂の有無の影響については、今回の試験結果からは亀裂の有無と供試体の比抵抗との関連性は認められない。今回対象としたコアの亀裂がいずれも密着したものであったこと、供試

体の長軸方向(測定方向)に斜交する面のものが多かったことの両者が、比抵抗に影響を与えなかった原因である可能性がある。したがって、コアの密着亀裂が比抵抗に与える影響を評価するには亀裂面の方向性についても考慮する必要があると考えられる¹⁷⁾。

(2) 立方体供試体を用いた試験

立方体供試体を用いた試験結果を図-6に示す。図-6からは次のことが読みとれる。

- ① 不連続面に平行な方向と不連続面に垂直な方向(図-6(a)参照)では前者の方が比抵抗が小さい。この傾向は新鮮岩において顕著であり、岩石自体の比抵抗が小さい変質花崗岩と風化流紋岩では、介在物が粘土の場合以外はその差は顕著ではない。
- ② 不連続面に平行な方向の測定では濾紙2枚、濾紙4枚、粘土の順に、不連続面介在物の厚みがあり、不連続面介在物の比抵抗が小さいほど供試体全体の比抵抗が小さい。
- ③ 不連続面に垂直な方向の測定では、粘土でやや小さい値を示す場合があるが、濾紙2枚と4枚とでは比抵抗に大きな違いは認められない。

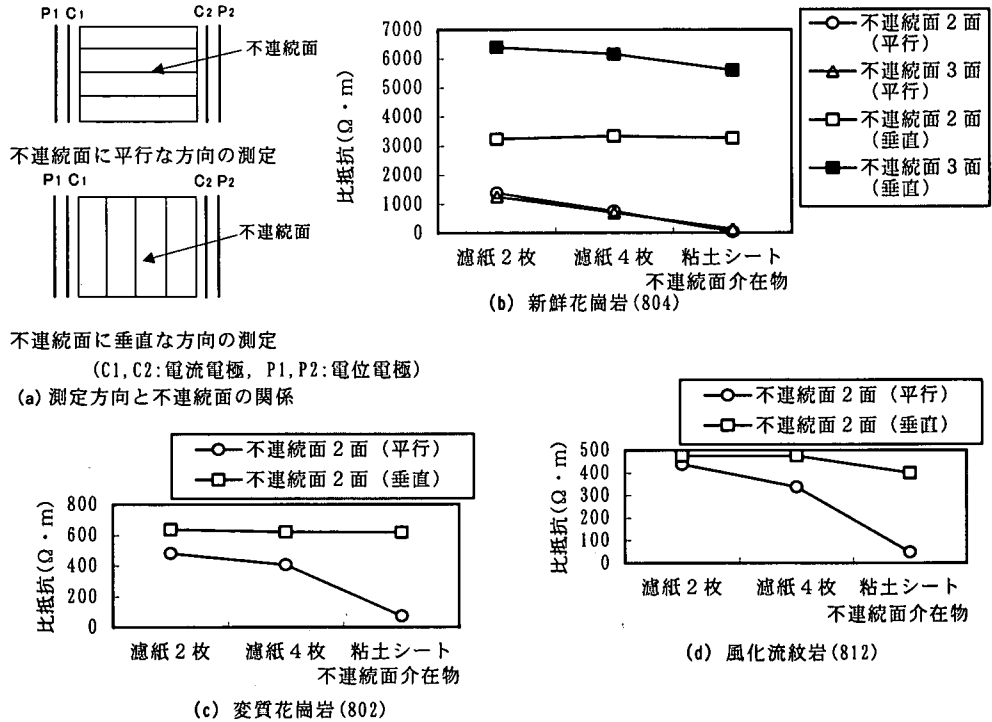


図-6 不連続面の性質および測定方向と比抵抗との関係

不連続面に挟んだ濾紙の含水状態が比抵抗に与える影響を調べた試験の結果を図-7 に示す。濾紙の飽和度が大きいほど濾紙の比抵抗は小さく、また、乾燥した濾紙は絶縁体に近いものと考えられる。濾紙の飽和度を変化させることにより亀裂などの不連続面の含水状態が地山比抵抗に及ぼす影響を検討できる。試験結果から次のことがわかる。

- ① 測定方向に係わらず、濾紙の飽和度は供試体の比抵抗に影響を与えている。
- ② 不連続面に平行な測定方向に比べて、不連続面に垂直な測定方向の場合が、いずれの含水状態においても比抵抗は全般に大きく、濾紙飽和度による比抵抗の変化の程度も大きい。
- ③ 濾紙飽和度が 0% の場合には不連続面に垂直な方向の測定は不能であった。

ここに示した結果は、不連続面と測定方向の関係、また、不連続面の含水状態や介在物の存在が比抵抗に大きな影響を及ぼすことを示している。このことは、主として亀裂性岩盤の場合には現地での地山比抵抗の異方性の測定や不連続面を含まないボーリングコアの比抵抗測定を同時に行うことによって、地山比抵抗から亀裂の優勢な方向や亀裂の状態等の評価がある程度可能になることを示すものである。

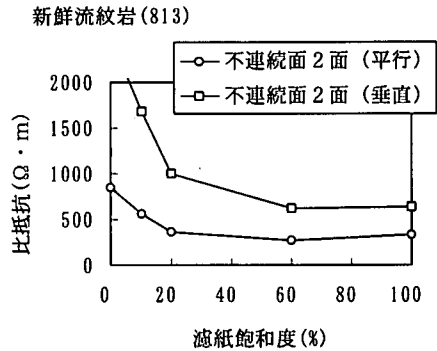


図-7 不連続面に挟んだ濾紙の飽和度と比抵抗との関係

4. 考察

(1) 既往の研究成果とアーチー式の適用

Archie²²⁾は粘土分を含まない砂岩コアを用いた実験から次式を提案し、アーチーの式と呼ばれて広く知られている。

$$F = \rho_o / \rho_w = a / \phi^m \quad (1)$$

$$S^n = F \rho_w / \rho \quad (2)$$

これらの式は一般化されて次の形でも良く知られている。

$$\rho = a \rho_w \phi^{-m} S^{-n} \quad (3)$$

ここで、 F は地層比抵抗係数 (formation factor), ρ_o は間隙水で飽和した状態の地層比抵抗, ρ_w は間隙水の比抵抗 (アーチーは海水程度の塩分濃度を有する間隙水を対象とし, NaCl 20,000~100,000mg/l ヲカ濃度溶液を用いた), ρ は地層の比抵抗, S は飽和度, ϕ は有効間隙率, a, m, n は定数である. a は迂回率係数 (tortuosity factor)^{13),14)}, m は膠結係数 (cementation factor), n は飽和指数 (saturation exponent) と呼ばれることがある. 砂岩では通常 $0.5 \leq a \leq 2.5, 1.3 \leq m \leq 2.5, n=2$ であるが粘土のような導電性鉱物を多く含む場合は単純には適用できないといわれている^{2),14)}.

図-3 に示した各岩種ごとの飽和比抵抗と有効間隙率との関係に式 (1) を適用すれば a と m を求めることができる. また、図-4 および図-5 に示した各供試体ごとの比抵抗と飽和度との関係に式 (1) および式 (2) から導かれる式 (4) を適用すれば n を求めることができる.

$$\rho = \rho_o \cdot S^{-n} \quad (4)$$

アーチー式(1)は、間隙水の比抵抗 ρ_w に対して地層比抵抗係数 F が一定であり、間隙水の比抵抗とともに飽和状態の比抵抗 ρ が変化することを記述している. しかし、その後の研究によって、間隙水の比抵抗が大きくなるとともに、飽和状態の比抵抗がアーチー式に従わないで一定値に近づく現象があることがわかってきた. この現象を Patnode and Wyllie²³⁾ は泥質岩について認めたが、千葉・熊田¹⁴⁾、関根ら¹¹⁾、朴・松井¹⁶⁾ は粘土分を含まない岩石についても認め、孔隙表面における電気二重層による表面伝導現象のためと考えている^{11),14),16)}.

千葉・熊田¹⁴⁾によれば花崗閃緑岩、凝灰岩試料について、間隙水の比抵抗 ρ_w が $10 \Omega \cdot m$ 程度以上では、 ρ_w による飽和比抵抗の変化は小さい. 関根ら¹¹⁾ の花崗岩、閃緑岩、安山岩、角閃岩、頁岩、熔結凝灰岩、凝灰岩、泥岩試料、また花崗岩、閃緑岩を加熱処理した人工亀裂性供試体を用いた実験によれば、岩石の場合には間隙水の比抵抗 ρ_w が $5 \Omega \cdot m$ 以上、人工亀裂性供試体の場合には $25 \Omega \cdot m$ 以上では、 ρ_w による供試体の飽和比抵抗変化は小さい. 朴・松井¹⁶⁾によれば花崗岩、砂岩、頁岩、火山円礫岩、安山岩、蛇紋岩の6試料について、一般の地下水が示す比抵抗 $20 \sim 80 \Omega \cdot m$ 程度の範囲では、間隙水の比抵抗 ρ_w による飽和比抵抗の変化は小さい.

今回の試験で用いた間隙水は、比抵抗が $67 \Omega \cdot m$ であることから、アーチー式(1)の地層比抵抗係数 F は間隙水の比抵抗によって変化する範囲にある. この場合には地層比抵抗係数 F は Fa と表示され、式(1)は次の(1)のように書き表される. Fa は見掛けの地層比抵抗係数¹³⁾と呼ばれている.

$$Fa = \rho_o / \rho_w = a / \phi^m \quad (1')$$

式(1')を図-3 のデータに適用し、最小二乗法を用いて岩

種別に a, m を求めた結果を表-3 中に示した. また、式 (4) を図-4、図-5 に示したデータに適用し、同じく最小二乗法を用いて供試体別に n, ρ_o を求めた結果を表-3 中に示した. 計算で求めた相関係数も表-3 中に示したが、いずれの計算においても高い相関係数を示していることがわかる. ここで求めたパラメータの適合性を見るために、図-4、図-5 中の最初のデータ系列に対して回帰曲線を図中に示した.

ここで求めたパラメータ a, m は、間隙水の比抵抗によって変化するので、直ちに既往研究に見られるアーチー式のパラメータとの比較はできない. しかし、既述のように、千葉・熊田の実験結果からは $10 \Omega \cdot m$ 程度以上、関根らの実験では $5 \Omega \cdot m$ 以上、朴・松井の実験では $20 \sim 80 \Omega \cdot m$ の範囲 (これ以上の比抵抗範囲の計測は行っていない) の間隙水に対して、飽和状態の比抵抗の変化は小さいことがわかっているので、表-3 に示したパラメータは少なくとも間隙水の比抵抗が $20 \Omega \cdot m$ 程度以上の範囲において岩石の比抵抗を評価する上での適用性を有しているといつて良い. すなわち、式(1)において ρ_w を $67 \Omega \cdot m$ に固定して求めた ρ_o は飽和比抵抗の近似値を与えるものと考えて良い. 土木分野においては、海水程度に低い比抵抗 ($0.25 \sim 0.3 \Omega \cdot m$ ^{23),25)} の地下水を対象として電気探査を実施することはまれであるので、通常の地下水 (比抵抗 $20 \sim 100 \Omega \cdot m$ ^{24),26)} を間隙水とする場合の岩石の比抵抗に関するデータの蓄積が必要と考えられる.

パラメータ n については、従来は2とされることが多かった²⁾が、表-3 中の n は $1.48 \sim 2.94$ の範囲にあり、平均的には花崗岩、頁岩、砂岩が2より大きく、流紋岩が2より小さい傾向を示し、岩種による差が認められる.

(2) 有効間隙率及び含水状態と比抵抗との関係

関根ら¹¹⁾ は26種の岩石について飽和状態の比抵抗と有効間隙率との関係を調べている. 間隙水の比抵抗値 $80 \Omega \cdot m$ は今回の実験とほぼ同じ条件であり、図-3 に示した今回の結果とほぼ同様な関係を得ている.

岩石試料の含水状態を表す指標として飽和度と含水比について、飽和状態の比抵抗に対する比抵抗比 (比抵抗/飽和比抵抗) との関係調べた. 図-8 に全岩種についての比抵抗/飽和比抵抗と飽和度との関係を、図-9 に同じく比抵抗/飽和状態の比抵抗と含水比との関係を示した.

図-8 および図-9 から、ほとんどの供試体では飽和度60%程度以上、含水比1~2% (含水比に乾燥密度を乗じた体積含水率では2~5%) 以上の範囲においては比抵抗は飽和状態の比抵抗に対して3倍程度以内の範囲にあることがわかる. このことは関根ら¹¹⁾もほぼ同じ結果を得ている. 有効間隙率の異なる供試体間で間隙水

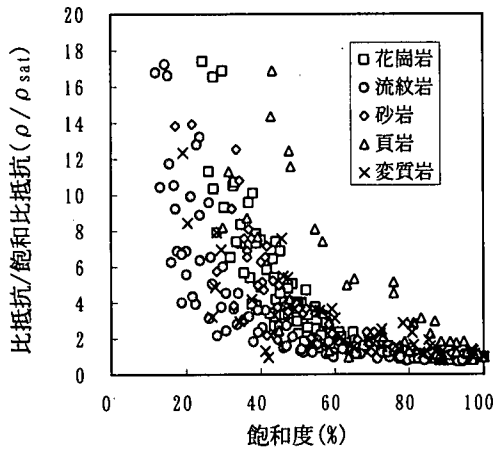


図-8 比抵抗/飽和比抵抗と飽和度との関係 (全岩種)

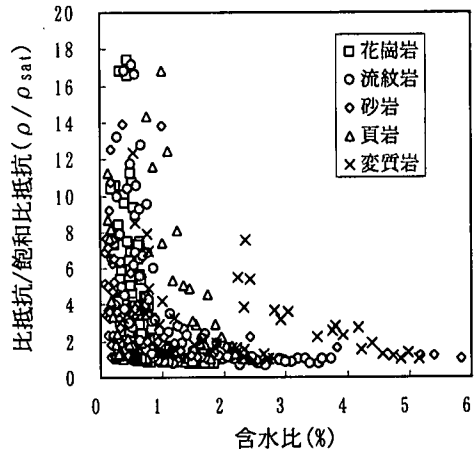


図-9 比抵抗/飽和比抵抗と含水比との関係 (全岩種)

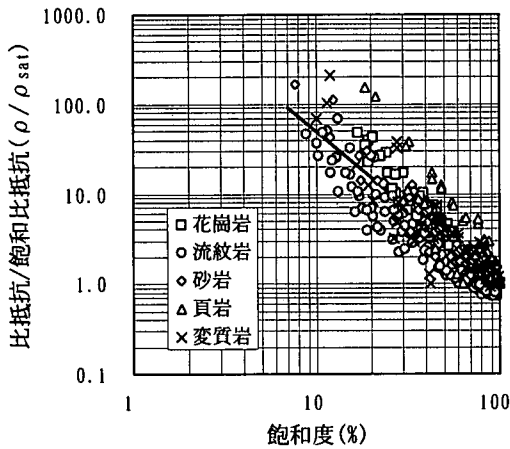


図-10 比抵抗/飽和比抵抗と飽和度との関係 (全岩種)

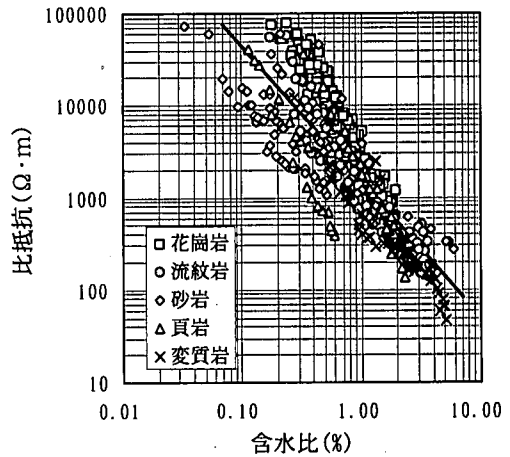


図-11 比抵抗と含水比との関係 (全岩種)

の量を比較する場合の指標としては有効間隙率と含水比の関数 (飽和度=含水比×乾燥密度/有効間隙率) である飽和度よりは有効間隙率に独立な含水比の方がより適切と考えられる。含水比の図を見ると変質岩の一部 (変質安山岩の2供試体) を除いて、含水比1~2%付近以下の領域で比抵抗/飽和比抵抗が急激に増加する現象が認められる。変質安山岩は含水比2.5%付近のやや大きな含水比から比抵抗/飽和比抵抗が増加する傾向を示しており、これは供試体の有効間隙率が11.7、12.3%と大きいことと関係があるのかもしれないが詳細は不明である。比抵抗が急激に増加する含水比1~2%付近は表面伝導効果をもたらすと考えられる固相表面の吸着水の占める含水量を示しているように思われる。吸着水の水膜の厚さを0.025 μm 程度²⁰⁾と見積もれば、固相・液相界面の、単位重量あたりの比表面積を1 m^2/g 程度と仮定するとほぼ同じ程度の含水比を与えるが、比表面積は岩石によ

って3桁も変わる¹²⁾ので今後の検討課題である。

図-10には比抵抗/飽和比抵抗と飽和度との関係を、図-11には比抵抗と含水比との関係をいずれも両対数グラフ上で示した。

これらの関係図から岩石の比抵抗 $\rho(\Omega\cdot\text{m})$ を表す以下の回帰式 (図中に直線で示す) を得た。

$$\rho = 2751 \cdot \rho_{\text{sat}} \cdot S^{-1.74} \quad (\text{相関係数 } R=0.89) \quad (5)$$

ρ_{sat} : 飽和状態の比抵抗測定値

S : 飽和度 (%)

$$\rho = 1509 \cdot \omega^{-1.48} \quad (R=0.82) \quad (6)$$

ω : 含水比 (%)

図-10 および図-11は供試体によるばらつきがあることを示しているため、回帰式(5)、(6)は今回用いた全供試体についての平均的な傾向を表す式と見なすことが適当である。式(5)、(6)をそれぞれ比抵抗から飽和度、含水比を求める推定式と見なした場合の、飽和度、含水

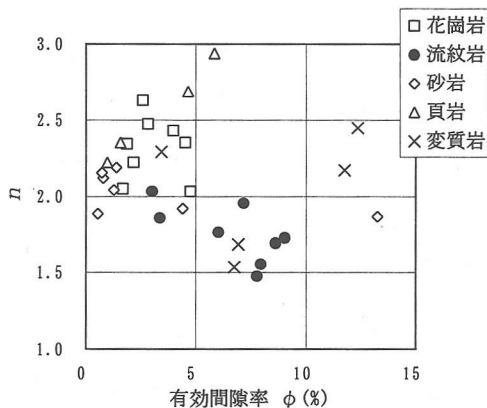


図-12 飽和指数と有効間隙率との関係

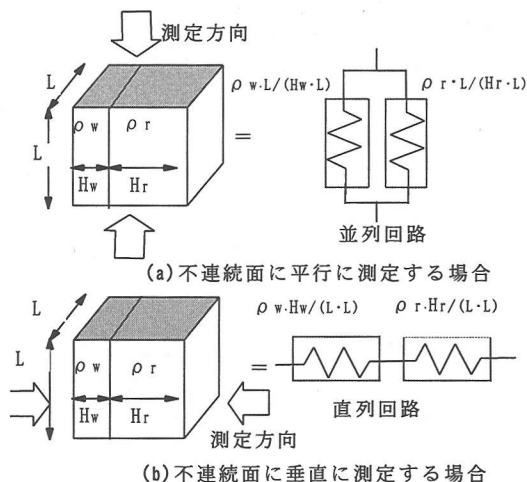


図-13 比抵抗等価モデル

比の標準誤差はそれぞれ、13.2%、0.66%と計算される。

関根ら¹³⁾は比抵抗80Ω・mの間隙水と深成岩、火山岩、堆積岩および花崗岩、閃緑岩を加熱処理した人工亀裂性供試体を用い、体積含水率が1%以上のデータについて比抵抗と体積含水率の関係式(7)を求めている。

$$\rho = 11570 \cdot \theta_v^{-1.6} \quad (\theta_v \text{ は} \%) \quad (7)$$

今回のデータを体積含水率について表すと式(8)が得られる。

$$\rho = 6164 \cdot \theta_v^{-1.53} \quad (R=0.83) \quad (8)$$

θ_v : 体積含水率 (%)

式(7)と式(8)を比べると、同じ体積含水率に対して、式(7)の方がやや大きめの比抵抗を与えることがわかる。式(7)は加熱処理した人工亀裂性供試体のデータを含んでおり、亀裂の成因あるいは形状が比抵抗と体積含水率の関係に影響している可能性が考えられる。

伊関¹⁵⁾は比抵抗100Ω・mの間隙水を用いて、堆積岩、火成岩、変成岩から数種類づつの合計9供試体について比抵抗と含水比との関係を調べ、比抵抗は平均的には含水比の1.1乗に反比例するとし、岩種によって多少の差があることを指摘している。今回の試験では砂岩供試体についての結果が伊関に似た結果を与えている。今回の試験結果のうち、砂岩供試体だけについて、比抵抗と含水比の関係を求めると式(9)が得られる。

$$\rho = 1349 \cdot \omega^{-1.01} \quad (R=0.82) \quad (9)$$

ω : 含水比 (%)

アーチー式を与えるパラメータ n (飽和指数) については、これまで間隙水の比抵抗による変化が議論された報告を見ない。また、 m ほど岩種による違いが問題にされることも少なく、通常は2とされることが多い²⁷⁾。そこで今回得られたパラメータ n について、有効間隙率と

の関係を図-12にプロットして見た。

図-12から n の分布を見ると、砂岩は有効間隙率0.52~13.28%の幅広い範囲に対して1.9~2.2の範囲にあり、ほぼ一定であるのに対し、流紋岩は有効間隙率の増加とともに小さくなる傾向を示している。花崗岩は有効間隙率が1.67~4.78%、 n が2.0~2.6の範囲に比較的小さくまとまって分布する傾向を示している。頁岩と変質岩は供試体数が少ないが、頁岩では有効間隙率の増加とともに、 n が増加する傾向を示して流紋岩とは逆の傾向にある。変質岩では有効間隙率、 n ともに大きくばらついていて、このように、全岩種に共通する明瞭な傾向は今回の試験結果からは得られなかった。また、各岩種ごとの傾向も明瞭でないことは供試体数が少ないことも原因があると考えられるので、今後データの蓄積が必要と考えられる。

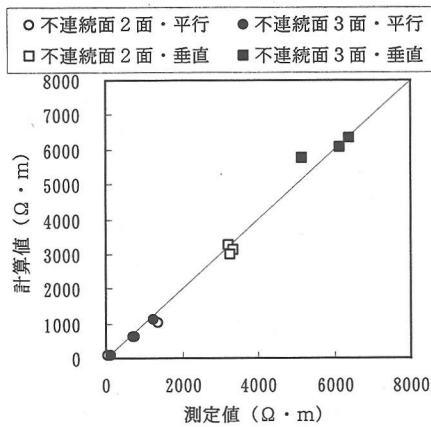
伊関¹⁵⁾の実験結果(間隙水の比抵抗100Ω・m)は、堆積岩などで有効間隙率が大きい岩石では飽和指数 n は小さな値をとる傾向にあることを示している。この現象は間隙率が大きい岩石ほど、含水を減らした時の比抵抗の増加程度が相対的に小さいことを意味しており、比表面積に起因する表面伝導現象と密接な関連性があることを予想させる。既述のように、今回の試験では流紋岩の供試体が伊関の結果に近くなっている。

(3) 岩盤の比抵抗等価モデルと試験データによる検証

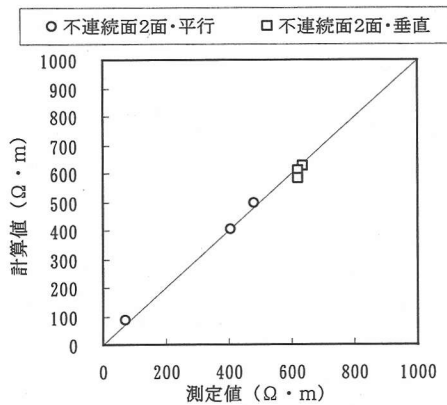
不連続面が比抵抗に与える影響について比抵抗等価モデルを用いて検討を加える。比抵抗等価モデルは図-13に示す単純な並列回路と直列回路によるモデルを考える。

a) 比抵抗等価モデル

① 不連続面に平行な方向に測定する場合



(a) 新鮮花崗岩 (804)



(b) 変質花崗岩 (802)

図-14 不連続面を含む供試体の比抵抗と計算値との対比

不連続面に平行な方向に測定する場合は電気回路的には並列回路と同等であり、比抵抗等価式は次式で示される。

$$1/R = 1/R_w + 1/R_r \quad (10)$$

ここに R : 供試体の抵抗

R_w : 不連続面介在物の抵抗

R_r : 岩石スライスの抵抗

岩石スライスと不連続面介在物は1片 L の正方形を構成しているので、式(11)の関係を用いて式(12)を得る。

$$R = \rho \cdot L / (L \cdot H) = \rho / H \quad (11)$$

$$H / \rho = (H_w + H_r) / \rho = H_w / \rho_w + H_r / \rho_r \quad (12)$$

ここに ρ , H : 供試体の比抵抗および厚さ

ρ_w , H_w : 不連続面介在物の比抵抗および厚さ

ρ_r , H_r : 岩石スライスの比抵抗および厚さ

② 不連続面に垂直な方向に測定する場合

不連続面に垂直な方向に測定する場合は電気回路的には直列回路と同等であり、比抵抗等価式は式(13)で示さ

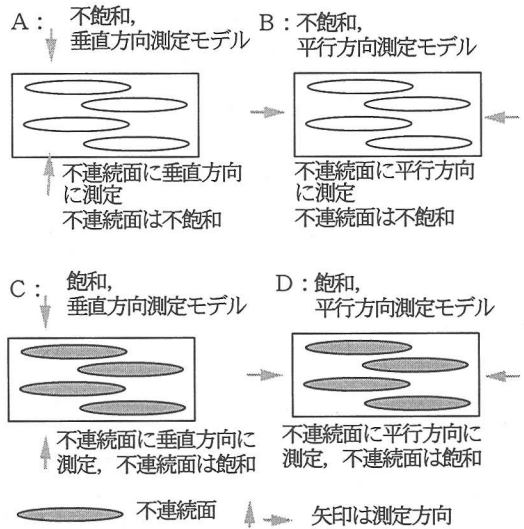


図-15 不連続面を含む単純化した地山の比抵抗モデルと測定方向との関係

れる。

$$\rho \cdot H = \rho (H_w + H_r) = \rho_w \cdot H_w + \rho_r \cdot H_r \quad (13)$$

b) 試験結果の検証

新鮮花崗岩と変質花崗岩の供試体について測定結果を比抵抗等価式による計算値と対比した結果が図-14である。測定結果から間隙水の比抵抗は $67 \Omega \cdot m$ 、粘土の比抵抗は $6 \Omega \cdot m$ とした。岩石スライスの比抵抗は不連続面に垂直な方向の測定結果に基づいて新鮮花崗岩で $3,400 \Omega \cdot m$ (不連続面2面の場合) および $6,700 \Omega \cdot m$ (不連続面3面の場合)、変質花崗岩で $650 \Omega \cdot m$ とした。不連続面2面の場合と3面の場合で岩石スライスの比抵抗が異なるのは、使用した岩石スライスを複数のブロックサンプルから整形したため岩質の違いに起因する比抵抗のばらつきが生じたためである。計算パラメータとして与えた含水濾紙の厚み、粘土の比抵抗値、岩石スライスの比抵抗には誤差および不均質さが含まれていることを考えれば、測定値と計算値はほぼ一致していると言って良いであろう。したがって、不連続面の影響については比抵抗等価式を用いて評価できることがわかる。

(4) 地山の比抵抗モデル

立方体供試体を用いた試験結果に基づいて分類した、亀裂などの不連続面を含む単純化した地山の比抵抗モデルと測定方向との関係を図-15に示す。A, B は不連続面に間隙水がない状態を、C, D は不連続面が間隙水で飽和されているかあるいは粘土などの低比抵抗介在物を

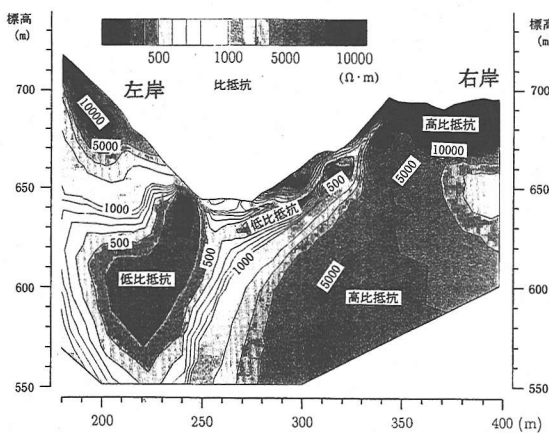


図-16 比抵抗探査の実施例

含む状態を示している。岩石自体は飽和に近い状態にあるものとし、矢印は測定方向を示す。

実際の地山岩盤中の亀裂は、方向の異なる多数の亀裂の組合わせから構成されており、測定方向との関係もこのように単純な関係にはないが、ここではもっとも代表的な場合として、図示した4つの場合を想定した。地山岩盤はこれらの4つのケースの間のどこかに内挿されると考えられる。

原位置での比抵抗探査で、直交する測線間で比抵抗値の異方向性が認められることがあり、特に亀裂が1方向に発達した古生層などで顕著である。この原因は図-15のモデルに基づけば亀裂の発達する方向と比抵抗の測定方向の関係に求めることができる。

(5) 地山比抵抗探査の事例

ボーリングコアを用いた試験によって不連続面を有しない岩石コアの比抵抗が風化・変質や含水状態によってどのように変化するかを調べた。また、立方体供試体を用いた試験によって、不連続面の方向、不連続面の含水状態および介在物の存在が比抵抗に大きく影響を与えることがわかった。地山は風化・変質程度の異なる岩石の集合体であり、風化等に起因する開口した不連続面を有し、また含水状態も地形条件や不連続面の分布密度等に規制されて場所によって変化をする。このような不均質な地山が示す比抵抗分布を解釈する上で、今回の室内試験結果は有効な判断材料を示してくれる。しかし、比抵抗値だけを判断材料とした地山状態の把握にはおのずと限界があり、地表踏査、ボーリング調査等の結果も合わせて総合的に判断することが重要である。以下には地山比抵抗探査の事例について述べる。

本研究に用いた岩石試料を採取した調査地において行った、比抵抗探査の実施例を図-16に示す。比抵抗探査は地表に沿って、水平距離5m間隔に測点を設けて実施

した。調査地の地質は花崗岩であり、測点240m付近の地表部には熱水変質による厚さ約3mの粘土化帯が測線にほぼ直交して露出している。現地調査は梅雨期の終わりに近い7月末に実施した。室内試験の結果を参考にし、また地表踏査、ボーリング調査等の現地調査結果も考慮して、比抵抗分布を以下のように解釈した。

① 測点240m付近から、約50°で傾斜する400Ω・m以下の低比抵抗部は地表変質部の延長を示すものである。露頭での測定では粘土化帯の比抵抗は27~93Ω・mの低比抵抗を示したほか、低比抵抗部と交叉する測点200mでの鉛直ボーリング調査でも粘土化帯が確認された。

② 地表面下20m付近までは、水平方向の比抵抗変化が大きいが、これは、風化等による地表付近の亀裂発達部中での含水状態が場所によって異なるためと考えられる。地表での観察によればほぼ同じ岩質からなる地山の比抵抗が、場所によって20~80倍程度大きく変化するの、地山が梅雨期の降雨によって吸水した状態にあったことを考慮すれば、次の理由から不連続面の存在と不連続面内における含水状態の影響によるためと考えられる。

- ボーリングコアを用いた試験結果によれば、飽和状態の岩石が乾燥によって20~80倍の比抵抗を示すには、図-5あるいは式(5)から飽和度が20~8%程度までに減少する必要がある。しかし、この含水領域は通常炉乾燥によって実現する領域であって、多湿な自然環境下での実現は考え難い。
- 一方、不連続面を含む立方体供試体を用いた試験結果によれば不連続面が開口し、含水していない場合には、不連続面に垂直な方向の測定値はきわめて大きい(測定不能状態を示し、100,000Ω・m以上と推定される)値を取り得ることを示している。

測点250~320m間の地表面に沿って、深度10~20mに認められる低比抵抗部(100~500Ω・m)は亀裂中に地下水が賦存していることを示すと考えられる。測点320mには流水のある小沢があり、この沢水の一部が伏流していることが予想される。測点180~230m間および測点350~400m間の地表面直下の高比抵抗部(8000Ω・m以上)は亀裂中に地下水が賦存していないことを示唆しているが、このことは測点200mでのボーリング調査でも確認された。

③ ボーリングコア供試体の試験結果では飽和状態の新鮮花崗岩は5000Ω・m以上の高比抵抗を示し、飽和度60%程度以上の含水状態では大きく変化しない。したがって①の低比抵抗帯、②の地表付近の亀裂発達部を除く、右岸側の深度20m以深の高比抵抗部には新鮮花崗岩が広く分布していると解釈される。

5. まとめ

岩種、風化程度の異なるボーリングコアおよび立方体供試体を用いて、含水状態や測定方向などの条件を変えた比抵抗測定を実施し、以下の結論を得た。

- ① ボーリングコアを用いた試験結果によれば、風化岩は新鮮岩に比べて、一般に有効間隙率が大きく、飽和状態の比抵抗は小さい。また、ほとんどの供試体において、コアの比抵抗は飽和度 60%程度以上、含水比 1~2%以上の含水状態において、飽和状態の比抵抗に対して3倍程度以内の範囲にあり、大きな比抵抗変化を示さない。
- ② ボーリングコアを用いた試験結果に、有効間隙率と飽和状態の比抵抗との関係、飽和度と比抵抗との関係を与えるアーチーの式を適用し、パラメータ a , m , n を求めた。求めたパラメータは通常の地下水が示す比抵抗範囲における岩石の比抵抗を評価するための有効な指標になり得ると考えられる。
- ③ 比抵抗と含水比（体積含水率）との関係については岩種によらず、含水比で 1~2%（含水比に乾燥密度を乗じた体積含水率では 2~5%）以下の領域で比抵抗の急激な増加が認められる。また、比抵抗と飽和度、含水比、体積含水率を関係づけた実験式(5), (6), (7)を求めた。
- ④ 不連続面を模擬した立方体供試体を用いた試験では、不連続面に平行に測定した場合と不連続面に垂直に測定した場合とを比較すると、前者が小さい比抵抗を示した。また、不連続面に平行な方向の測定では不連続面介在物の比抵抗が支配的な影響を与えることがわかった。
- ⑤ 不連続面を含む供試体の比抵抗は、単純な並列回路と直列回路を用いた等価比抵抗式を用いてある程度評価できることがわかった。
- ⑥ 亀裂性岩盤からなる地山比抵抗について亀裂の方向と含水状態および測定方向によってタイプ分けし、定性的な地山比抵抗モデルを示した。
- ⑦ 調査地において行った、比抵抗探査の実施例を示し、今回の室内試験で得られた岩石比抵抗および地山比抵抗に関する知見を参考にして解釈すると、より具体的な地山状態の把握が可能になることを示した。

参考文献

- 1) 島裕雅：二極法電極配置データを用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法—比抵抗映像法の解析法と適用例—, 物理探査, Vol.45, No.3, pp.204-223, 1992.
- 2) 島裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹：比抵抗映像法, 古今書院, pp.106, 1995.
- 3) 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.

- 4) 松井保, 上出定幸, 朴三奎：山岳トンネルの地山調査における比抵抗高密度探査の適用性, 土と基礎, Vol.45, No.5, pp.20-22, 1997.
- 5) 鈴木浩一：物理探査法の地質工学への適用（その2）—地下水流動モニタリングへの適用例—, 物理探査, Vol.50, No.5, pp.497-505, 1997.
- 6) 鈴木浩一：物理探査法の地質工学への適用（その3）—硬質岩盤の透水性評価への適用例—, 物理探査, Vol.51, No.1, pp.83-95, 1998.
- 7) 小島圭二, 神尾重雄, 石橋弘道, 内山成和, 斎藤秀樹, 島裕雅：ジオトモグラフィによる岩盤の画像化（その2）—岩盤内の地下水の流れの画像化—, 応用地質, Vol.30, pp.179-188, 1989.
- 8) 小峯秀雄：電気比抵抗による薬液注入改良部の充填率の評価方法, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.153-162, 1993.
- 9) 小峯秀雄：比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の適用範囲, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.89-98, 1997.
- 10) 真下英人, 石村利明, 宮川順一：トンネルの地山状態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, pp.123-128, 1997.
- 11) 関根一郎, 西牧均, 石垣和明, 原敏昭, 斎藤章：岩石の比抵抗値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.
- 12) 関根一郎, 西牧均, 石垣和明, 原敏昭, 斎藤章：岩石の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について, 土木学会論文集, No.568/III-39, pp.209-219, 1997.
- 13) Katsube, T. J. and Hume, J. P. : Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs, *Geophysics*, Vol.52, No.3, pp.342-352, 1987.
- 14) 千葉昭彦, 熊田政弘：花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定—間隙水の比抵抗が岩石比抵抗に及ぼす影響について—, 物理探査, Vol.47, No.3, pp.161-172, 1994.
- 15) 伊関伸一：岩石の岩水状態と比抵抗の関係について, 物理探査学会第91回学術講演会論文集, pp.205-208, 1994.
- 16) 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, 1996.
- 17) 関根一郎, 西牧均, 石垣和明, 原敏昭, 斎藤章：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, pp.213-223, 1997.
- 18) 遠藤源助, 勝部照雄, 梁敬豪, 堀昌雄：試料測定の標準化について, 物理探査, Vol.19, No.4,5, pp.16-21, 1966.
- 19) 西澤修, 高倉伸一：高温下の含水岩石比抵抗の研究, 工業技術院地質調査所, 深部地熱資源探査技術に関する研究, 昭和62年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書,

pp.17-30, 1989.

- 20) 佐々木靖人, 藤井厚企, 中村康夫: 電磁波トモグラフィによるダムの地質解析, *ダム技術*, No.89, pp.50-60, 1994.
- 21) (社)日本鉄道施設協会, *地質調査標準示方書*, pp.72-73, 1983.
- 22) Archie, G. E. : The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Trans. Am. Inst. Mech. Eng.*, Vol.146, pp.54-62, 1942.
- 23) Patnode, H. W. and Wyllie, M. R.J. : The Presence of Conductive Solids in Reservoir Rocks as a Factor in Electric Log Interpretation, *Petroleum Transactions, AIME*, Vol.189, pp.47-52, 1950.
- 24) 志村馨: 電気探査法, 昭晃堂, 1979.
- 25) 地盤工学会編: 土と基礎の物理探査, 1981.
- 26) 山口久之助: さく泉の電気検層法, 昭晃堂, 1965.
- 27) Schlumberger Co.Ltd. : *Log Interpretation Principles*, 1972.

(1999. 6. 22 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ABOUT THE GEOLOGICAL FACTORS ON RESISTIVITY CHARACTERISTICS OF ROCK

Makoto FUJII, Kaoru NISHIDA, Yukifumi ISHIGURO, Xinglin LEI
and Kenso NISHINO

To study the electrical properties of rocks and its relation to the geological factors and water content, laboratory tests were conducted with borehole cores including granite, rhyolite, sandstone, shale and altered rocks, and with cubic rock samples containing artificial discontinuities in it. The following results obtained give us the fundamental knowledge which is helpful at the stage of explaining the resistivity map which is the results of electrical survey. The major part of core resistivity are determined by the constituting matters, porosity and water (not brine) content. The direction of current flow to the discontinuity surface like fractures, water content and jammed matters in the discontinuity surface influence largely to the resistivity of cubic rock samples. And the equivalent parallel circuit model was successfully applied to explain the rock samples resistivity with discontinuities surface.