

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

関根一郎¹・西牧 均¹・石垣和明²・原 敏昭³・斎藤 章⁴

¹正会員 工修 戸田建設(株) 土木技術開発室 (〒104 東京都中央区八丁堀 4-6-1)

²正会員 理修 戸田建設(株) 土木工事技術部 (〒104 東京都中央区京橋 1-7-1)

³正会員 戸田建設(株) 土木技術開発室 (〒104 東京都中央区八丁堀 4-6-1)

⁴理 博 三井金属資源開発(株) 調査本部物探部 (〒140 東京都品川区大井 1-23-1)

本研究では、岩石の比抵抗における表面伝導の影響について検討し、それを考慮した比抵抗と弾性波速度との関係式を提案する。実施にあたっては、比抵抗の異なる水中で飽和させた岩石の比抵抗を測定し、間隙水の比抵抗に依存しない過剰導電現象について調べた。その現象は表面伝導に関係することを明らかにし、表面伝導を考慮することにより、比抵抗と弾性波速度とを関係付けられることを示した。これらの結果は、近年、建設プロジェクトの地盤調査に使われる機会が増加した電気探査、電磁探査、比抵抗トモグラフィー等の探査結果の解釈に有効であると考えられる。

Key Words : resistivity, surface conduction, elastic wave velocity, specific surface

1. 緒 言

地下構造物を建設する際、地盤の調査精度が向上すれば、施工時の安全性が高まる他、効率的な建設が可能になる。また、LPガス地下備蓄等の大規模地下利用では、プロジェクトを経済的に推進するために事前調査の精度の向上が不可欠である。そのため、地形や地質条件に応じて、従来、主に実施されてきた弾性波による探査に加えて、電気探査、電磁探査等が行われるケースが増加している。これらの探査結果として比抵抗分布が得られるが、その解釈は定性的にされているのが現状である。この現状を改善し、定量的な評価に結びつけてゆくことが必要である¹⁾。

岩石の比抵抗については、古くから多くの研究が行われている。Archie²⁾は、岩石の比抵抗を間隙水の比抵抗で除した地層比抵抗係数と間隙率の関係を示した。これはArchieの法則として広く知られているが、その後、粘土鉱物を含む岩石や間隙水の比抵抗が高い場合には、この法則が成り立たないことが認識され、HillとMilburn³⁾、WaxmanとSmits⁴⁾、Bussian⁵⁾、de LimaとSharma⁶⁾などによって、過剰導電現象についての研究が行われている。過剰導電現象は固体と液体の界面で生じる表面現象で、粘土

鉱物を含む岩石では特に大きくなることが知られている。これらの研究は主に石油探査の目的で行われており、対象とする岩石は泥岩、砂岩などの原油の貯留岩に限られている。また、地下水や地熱の開発などを目的に山口⁷⁾、茂木⁸⁾、千葉と熊田⁹⁾が帯水層や岩石の比抵抗について研究している。しかし、地下構造物を建設する上で重要な力学的性質との関係については、小口他¹⁰⁾、Scott他¹¹⁾の研究があるが、研究事例は少なく十分に研究されている分野ではない。

そのため筆者らは、比抵抗と力学的性質との関係について室内実験を行い検討を加えてきた¹²⁾。その中で比抵抗と弾性波速度等の力学的性質との関係は相関性があるが、岩種による比抵抗値の差を考慮しておく必要があることを示した。しかし、それを考慮して岩石の比抵抗値と物性との関係を定量的に論ずるには至らなかった。弾性波速度はトンネル等の地山分類の指標として広く利用されており、岩石の比抵抗の支配要因について検討した上で、比抵抗から弾性波速度を推定できれば実用的な価値があると言える。

本研究では、比抵抗の異なる水中で飽和させた岩石の比抵抗を測定し、間隙水の比抵抗に依存しない過剰導電現象について調べた。その現象が表面伝導

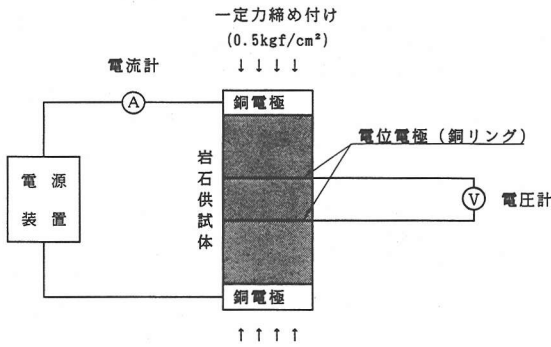


図-1 比抵抗測定装置

に関係することを明らかにし、岩石の比表面積を考慮することによって、比抵抗と弾性波速度とを関係付けられることを示した。

2. 岩石の過剰導電現象

(1) 実験方法

過剰導電現象は、間隙水の比抵抗が高いときその影響が大きくなる^{9),13)}。岩石の過剰導電現象を把握するためには、種々の比抵抗の水で飽和させた岩石の比抵抗を測定する必要がある。岩石の比抵抗測定方法については文献^{9),9),14)}等に述べられているが、ここでは一般的な4電極法によって測定した。実験方法は既に発表している¹²⁾、ここでは要点だけを述べる。

図-1に比抵抗測定装置の概要を示す。岩石供試体の上下端に銅電極を接触させ電流を流し、その中程2ヶ所に銅リングからなる電位電極を取り付け、その間の電位差を測定した。比抵抗 ρ は次式により求めた。

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4L} \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

ここに、 d ：供試体直径、 L ：電位電極間隔、 V ：電位差、 I ：電流値である。電位電極間隔 L は20mm、30mmと変えて測定し、両者を平均して比抵抗を求めた。

実験に用いた岩石は直径5cm、高さ10cmに整形し、110°Cで48時間、炉乾燥した後、純水にNaClを溶解させ所定の比抵抗に調整した水中で96時間以上真空ポンプで吸引し強制飽和させた。高比抵抗の水中で飽和させる場合、岩石内の電解質が溶出して飽和させている水の比抵抗を低下させるが、比抵抗が3%以上変化する場合は純水を加えて比抵抗を再調整した。なお、スレーキングを起こす堆積岩は炉乾燥せずに

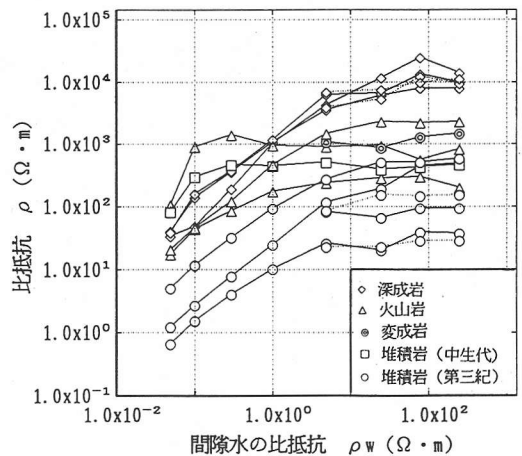


図-2 間隙水の比抵抗を変化させた時の岩石の比抵抗の変化

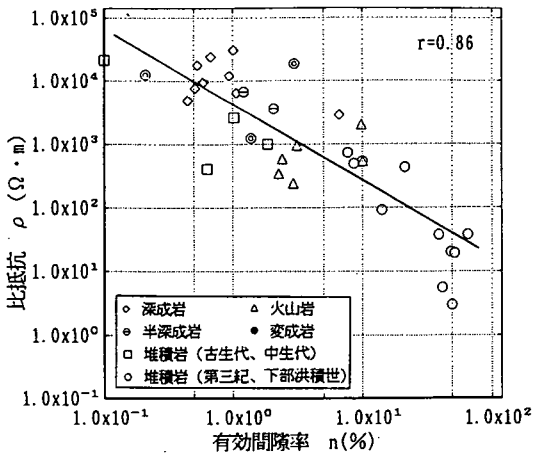
直ちに飽和させた。

土中の水分存在形態は強吸着水、弱吸着水、間隙水に分けられるとされ¹⁵⁾、岩石も同様と考えられる。強吸着水は電解質を殆ど溶解せず固体に近い性質を示し、弱吸着水はそのイオン濃度が間隙水中の電解質の種類や濃度によって変化する。これらの吸着水の電気化学的性質が電気伝導と密接な関係がある。これらに対して間隙水のイオン濃度は飽和させている水のそれに近いとされるので¹⁵⁾、以下の検討では飽和させている水の比抵抗を間隙水の比抵抗と呼ぶことにする。

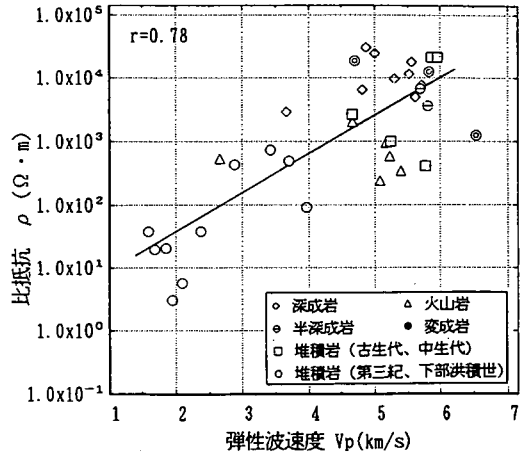
(2) 実験結果および考察

図-2は、間隙水の比抵抗の変化に伴う岩石の比抵抗の変化を示している。このデータは、既発表の間隙水の比抵抗が5Ω·mから250Ω·mまでの岩石の比抵抗測定結果¹²⁾に、間隙水の比抵抗が5Ω·m以下の測定結果を追加したものである。間隙水の比抵抗が5Ω·m以下では、間隙水の比抵抗が変化するとほとんどの岩石の比抵抗がそれに対応して変化している。また、間隙水の比抵抗が大きくなると岩石の比抵抗は次第に一定値に近づいているが、これは間隙水の比抵抗に依存しない過剰導電現象が支配的になるためと思われる。

間隙水の比抵抗が0.1Ω·m以下では、過剰導電現象の影響はほとんどないとされている⁹⁾。そこで種々の岩石を比抵抗0.05Ω·mの水中で飽和させ、その比抵抗を測定し80Ω·mで飽和させた場合と比較した。比抵抗測定結果と有効間隙率、弾性波速度との関係を図-3、4に示す。なお、間隙水の比抵抗80Ω·mの

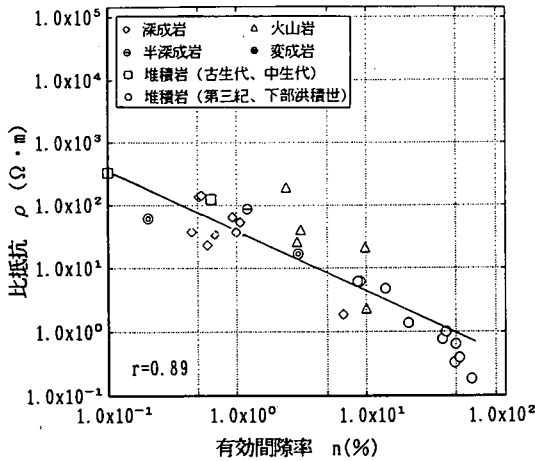


a) 比抵抗と有効間隙率との関係

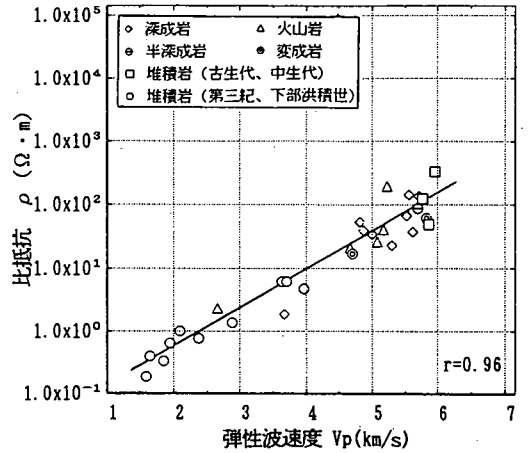


b) 比抵抗と弾性波速度との関係

図-3 比抵抗80Ω・mの水中で飽和させた岩石の実験結果



a) 比抵抗と有効間隙率との関係



b) 比抵抗と弾性波速度との関係

図-4 比抵抗0.05Ω・mの水中で飽和させた岩石の実験結果

岩石の比抵抗測定結果は、既発表の結果¹²⁾に岩種を追加したものである。間隙水の比抵抗0.05Ω・mの実験ができなかった岩石がいくつかあるが、これは岩石の追加入手ができなかったためである。有効間隙率は整形した供試体の直径と高さをノギスで測定し、それと乾燥重量、湿潤重量から求めた。スレーキングを起こす堆積岩はこの方法では測定できないため、見掛け比重試験¹⁶⁾の結果から有効間隙率を求めた。弾性波速度は、飽和状態の供試体に対して透過式超音波速度測定装置によって求めた値で、山岳トンネル

などの地山分類指標としてよく用いられるP波速度のみを対象とした。

図-3, 4中に相関係数rを示したが、これらの結果から間隙水の比抵抗0.05Ω・mの場合の比抵抗測定結果は80Ω・mの場合に比較して、特に図-4b)に示す比抵抗と弾性波速度との関係において相関係数が0.96と高い。これは、高い比抵抗の水中で飽和した図-3の比抵抗測定結果では過剰導電現象が支配的なのに対し、極めて低比抵抗の水中で飽和させた図-4の比抵抗測定結果では間隙中を直接電気が伝導

する現象が支配的なため、弾性波速度との相関性が良くなったものと考察される。

(3) 過剰導電現象の把握

図-5は、図-2に示した岩石の比抵抗と間隙水の比抵抗との関係を、比抵抗の逆数である導電率で表示し、岩石の導電率 σ ($\sigma = 1/\rho$) と間隙水の導電率 σ_w ($\sigma_w = 1/\rho_w$) との関係で示したものである。なお、導電率の大きい第三紀の堆積岩の結果を図-5 a)に、導電率の小さい深成岩、火山岩、中生代の堆積岩の結果を図-5 b)に示した。これらの図から、間隙水の導電率 σ_w が20 S/m (比抵抗0.05 $\Omega \cdot m$) のように高いときにはY切片の値を0とみなしたArchie²⁾の法則が成り立つが、 σ_w が0.013 S/m (比抵抗80 $\Omega \cdot m$) のように低いときにはY切片の値を0とみなすことはできないことがわかる。このY切片の値は、間隙水の導電率に依存しない導電率で過剰導電現象による導電率と考えられる。岩石の導電率と間隙水の導電率との関係は一次式の関係にあるので、岩石の比抵抗は次式で表される^{4),9)}。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F} \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad (2)$$

ここに、 ρ_w ：間隙水の比抵抗、 ρ_c ：間隙水の比抵抗に依存しない過剰導電現象による比抵抗、F：真の地層比抵抗係数で、過剰導電現象を考慮しない見掛け地層比抵抗係数 F_a ($F_a = \rho/\rho_w$) と区別される。

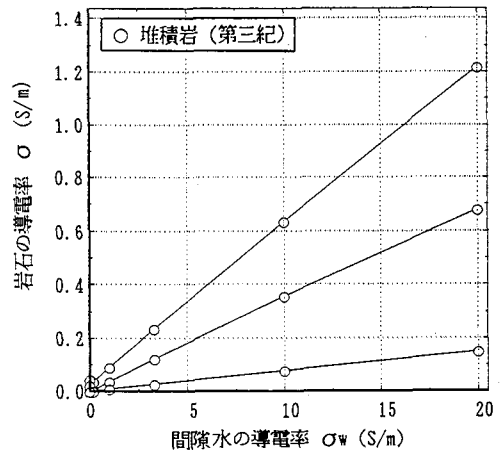
式(2)の右辺第二項が無視できるほど間隙水の比抵抗 ρ_w が十分小さい時、真の地層比抵抗係数は見掛け地層比抵抗係数と等しくなり、次式で表される。

$$F = b \cdot n^{-c} \quad (3)$$

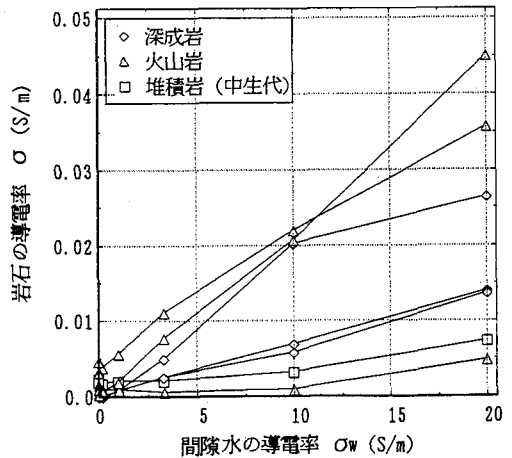
ここに、n：間隙率、b、c：係数でcは固結係数と呼ばれている。

間隙水の比抵抗が大きい時は、式(2)の右辺第二項が無視できないので、図-5の結果は式(2)で表わされ、直線の傾きが1/Fであり、Y軸の切片が1/ ρ_c であることから、容易にFと ρ_c を求めることができる。

次に過剰導電現象による比抵抗 ρ_c および真の地層比抵抗係数Fを求めた結果と、有効間隙率および弾性波速度との関係を図-6、7に示す。これらの結果を求める際、図-2のデータに加えて、図-3、4に示した間隙水の比抵抗80 $\Omega \cdot m$ と0.05 $\Omega \cdot m$ の比抵抗測定結果から同様にFと ρ_c を求めている。2種類の間隙水の比抵抗に対する結果ではあるが、間隙水の比抵抗が0.05 $\Omega \cdot m$ は過剰導電現象が無視できるほど十分に小さく、また、80 $\Omega \cdot m$ はそれがほとんど支配的な程大きいので誤差は少ないと考えられる。



a) 堆積岩 (第三紀)

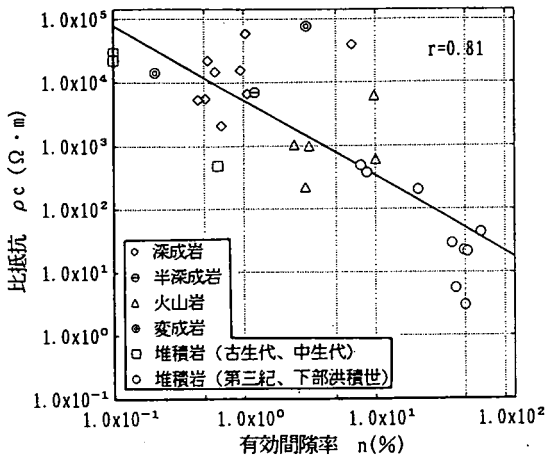


b) 深成岩, 火山岩, 堆積岩 (中生代)

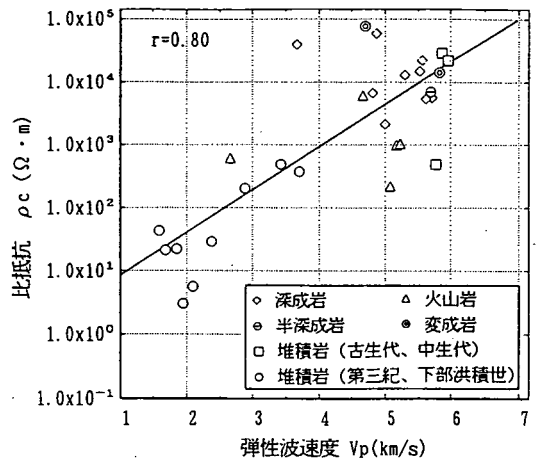
図-5 間隙水の導電率に対する岩石の導電率の変化

図-6の ρ_c は、 ρ_c の大きな岩石を除いて図-3の間隙水の比抵抗80 $\Omega \cdot m$ の時の岩石の比抵抗値にほぼ等しいことがわかる。これは、図-3の比抵抗値がほぼ過剰導電現象に支配されていることを示している。 ρ_c の大きな岩石の場合、比抵抗80 $\Omega \cdot m$ の水中で飽和させたときでも間隙水の比抵抗に依存する電気伝導現象の影響が大きいので、図-3の間隙水の比抵抗が80 $\Omega \cdot m$ のときの岩石の比抵抗と図-6の ρ_c との差が大きくなったと思われる。

また、図-7の真の地層比抵抗係数は、図-4の比抵抗0.05 $\Omega \cdot m$ の水中で飽和させた岩石の比抵抗のほぼ1/0.05に相当しており、図-4の結果は過剰導

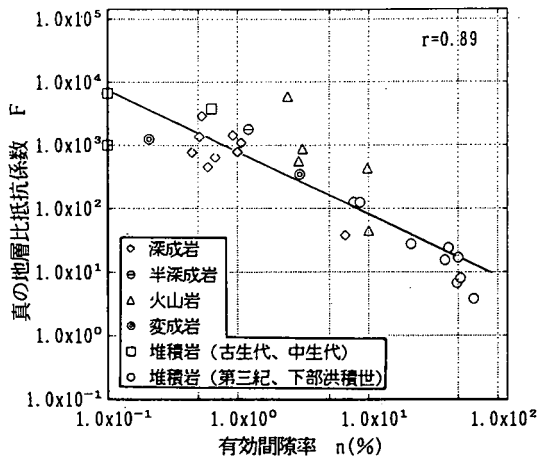


a) ρ_c と有効間隙率との関係

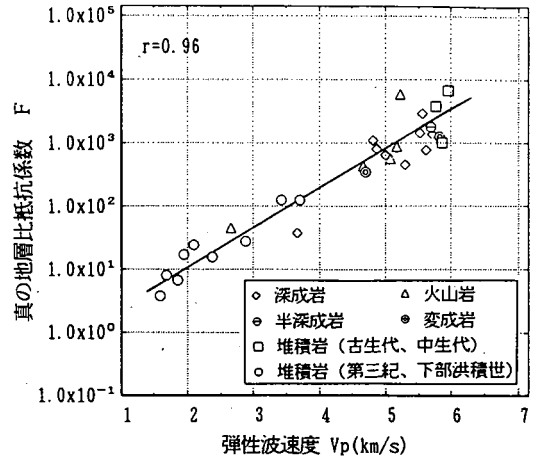


b) ρ_c と弾性波速度との関係

図-6 間隙水の比抵抗に依存しない過剰導電現象による比抵抗 ρ_c と物性との関係



a) 真の地層比抵抗係数と有効間隙率との関係



b) 真の地層比抵抗係数と弾性波速度との関係

図-7 真の地層比抵抗係数と物性との関係

電現象の影響をほとんど受けていないことがわかる。このことから、比抵抗 $0.05 \Omega \cdot m$ で飽和させた岩石の比抵抗測定結果から真の地層比抵抗係数 F を求め、 $80 \Omega \cdot m$ の測定結果を ρ_c と見なしても実用的には差し支えないと思われるが、正確を期すため第3章以降の検討には図-6, 7 から得られた F と ρ_c を用いることとする。

3. 過剰導電現象の原因に対する考察

過剰導電現象は、固体と液体の界面で生じる表面現象の一つである表面伝導によるものと考えられる^{7),8),9)}。表面伝導とは、界面の電気二重層の中にイオンが集積し間隙水のイオン濃度より大きな濃度となるため、電気二重層内の伝導度が間隙内のそれより大きくなる現象である¹⁷⁾。したがって、固体と液体の界面の面積によって過剰導電現象の程度が左右されると考えられる。

そこで図-6の岩石の中から代表的なものを選び、それらの比表面積を一般的なBET法¹⁸⁾により測定した。使用した測定器は、Quantachrome社製の高速比表面積測定装置NOVA1200で、セラミックス、吸着剤、土、鉱石、耐火物等の比表面積測定に用いられている。測定装置のサンプルセルに岩石を収納するため、2mmふるいを通して岩石を粉砕し測定に供した。なお、岩石の比表面積は大きいので、粉砕したことが測定結果に大きな影響を及ぼすことはないと考えられる。BET法にはBET1点法とBET多点法がある。この測定装置では両方の測定結果を同時に得ることができるので、より正確とされるBET多点法による測定結果を検討に用いた。なお両者の差は十分小さいものであった。

また、過剰導電現象を陽イオン交換容量(CEC)によって説明している論文も多く^{3),4),6)}、比表面積とCECとの関係を確認するため、比表面積を測定した岩石に対してCECをカラム浸透法¹⁹⁾によって測定した。測定した比表面積と陽イオン交換容量(CEC)との関係を図-8に示す。イオン交換などの表面現象の大きさは比表面積にほぼ比例することが知られており、図-8でも比表面積とCECは良い相関性を示している。WaxmanとSmits⁴⁾は1968年に、CECが比表面積に比較して測定が容易なことから粘土を含んだ砂岩の比抵抗値をCECによって説明している。しかし、近年、測定器の自動化が進み比表面積の測定操作が容易になったこと、比表面積の方が表面伝導と物理的に結び付けて考察し易いことから、以下では比表面積について過剰導電現象との関係を考察する。

比表面積と過剰導電現象による導電率 σ_c (ρ_c の逆数)との関係を図-9に示した。岩石の比表面積は、今回の測定で最も小さかった花崗岩でも $0.05 \text{ m}^2/\text{g}$ であり、第三紀の堆積岩では $47.9 \text{ m}^2/\text{g}$ と非常に大きな値を示している。図-9の σ_c と比表面積との関係はやや下に凸になっているが、相関係数は0.95と強い相関性を示しており、過剰導電現象は比表面積と密接な関係にあることがわかる。

表面伝導は、イオンの種類や濃度等様々な要因が関係しており理論的な取り扱いができる段階ではないと言われているが¹⁷⁾、西川¹⁹⁾は平板状の界面の表面伝導度 λ_w を以下のように示している。

$$\lambda_w = K_{s0} \cdot W/L \quad (4)$$

ここに、 K_{s0} :比表面伝導度、 W :幅、 L :長さである。単位体積当りの比表面積を A' とすると導電率 σ_c は、

$$\sigma_c = \lambda_w \cdot A' \quad (5)$$

と表される。 K_{s0} は $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ S}$ と言われているの

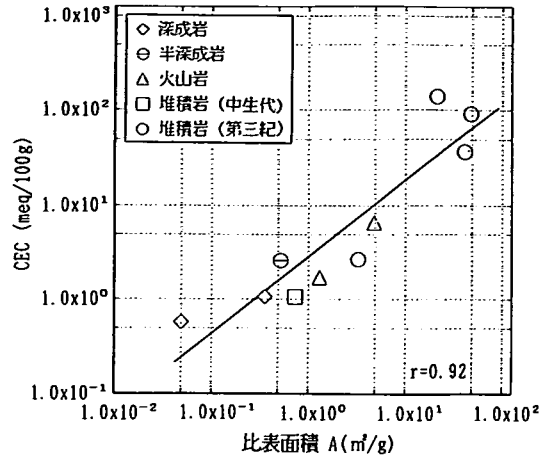


図-8 比表面積とCECとの関係

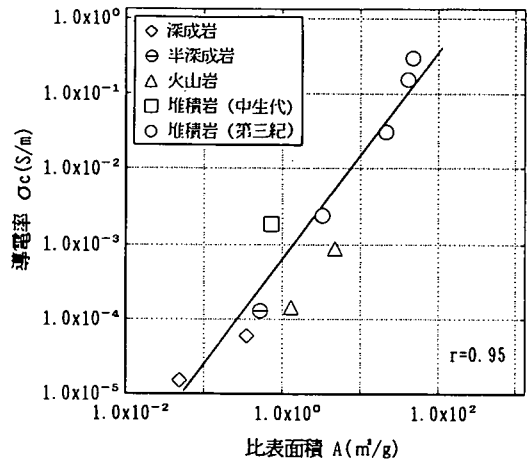


図-9 比表面積と過剰導電現象による導電率 σ_c との関係

で^{7),13),19)}、その値から求めた導電率 σ_c と比表面積 A との関係を図-10に示した。なお、長さ L および幅 W を単位長さ1mとし、乾燥単位体積重量は硬岩と軟岩で幅があるので $2.6 \sim 1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ とし、その範囲を図中に示した。実験結果の導電率は、計算された範囲よりやや小さくなっている。その理由としては、空隙の界面を平板と仮定したが実際には曲りの影響があること、平板の方向と比抵抗の測定方向が異なる場合、方向によっては平板に沿った表面伝導が測定方向の表面伝導に寄与しないことが挙げられる。これら事項はいずれも導電率を低下させる要因になるので、これらを鑑みれば過剰導電現象は表面伝導と密接な関係があり、比表面積から過剰導電現象を予測することが可能と思われる。

4. 表面伝導を考慮した岩石の比抵抗とその弾性波速度との関係

(1) 実験式の誘導

図-9で導電率 σ_c と比表面積Aとが両対数上でほぼ直線関係にあることから、

$$\sigma_c = \frac{1}{\rho} = S' \cdot A^{t'} \quad (6)$$

が得られる。ここに、 s' 、 t' は図-9から求められる係数である。式(2)に式(3)と式(6)を代入すれば、岩石の比抵抗は次式で表される。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{b \cdot n^{-c}} \cdot \frac{1}{\rho_w} + S' \cdot A^{t'} \quad (7)$$

また、図-7b)が明瞭な直線関係にあることから、地層比抵抗係数Fと弾性波速度との関係は次のように表される。

$$F = \beta \cdot \exp(\alpha \cdot V_p) \quad (8)$$

ここに、 α 、 β は図-7b)から求められる係数である。 $F = b \cdot n^{-c}$ なので、式(8)によって式(7)は次のように書き直せる。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\beta \cdot \exp(\alpha \cdot V_p)} \cdot \frac{1}{\rho_w} + S' \cdot A^{t'} \quad (9)$$

間隙水の比抵抗 ρ_w が小さくて、右辺の第一項の方が第二項より大きいときは、比抵抗と弾性波速度の関係式として用いることができる。しかし、地下水の比抵抗は一般に浅層地下水で50~100 $\Omega \cdot m$ 、深層地下水で20~50 $\Omega \cdot m$ 程度と比較的大きいことが知られている。間隙水の比抵抗が大きいときは、逆に第二項の方が大きくなるので、第二項と弾性波速度との関係を求める必要がある。

そこで、間隙水の比抵抗 ρ_w が大きい場合にも適用できる式を検討する。岩本他²⁰⁾は花崗岩を対象に、過剰導電現象による導電率が間隙率と関係することを示し比抵抗と間隙率の関係を示す実験式を求めている。種々の岩石を対象にした本研究でも図-6a)のように、過剰導電現象による比抵抗は有効間隙率と相関性が認められる。それは、図-11に示すように比表面積も有効間隙率と相関性があることに起因すると考えられる。すなわち、比表面積が大きい岩石は有効間隙率も大きい傾向がある。しかし、同程度の有効間隙率の岩石でも比表面積に差があり、有効間隙率に比較して比表面積が大きい岩石では図-6a)の ρ_c は小さい傾向がある。そこで比表面積と有効間隙率の比A/nと、図-6a)の ρ_c と回帰直線から

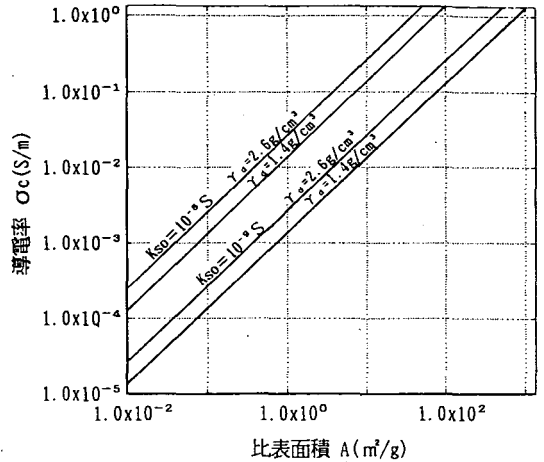


図-10 式(4),(5)によって求めた導電率

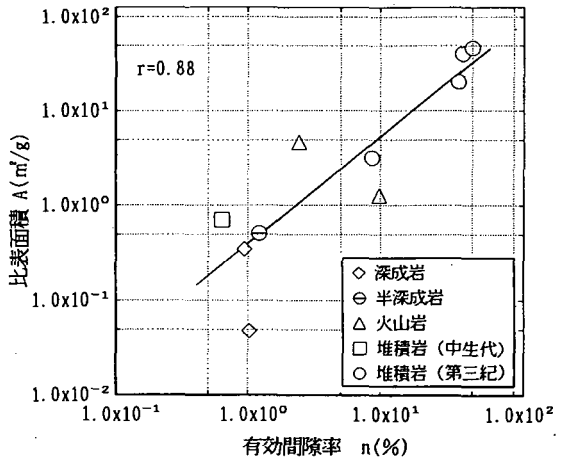


図-11 有効間隙率と比表面積との関係

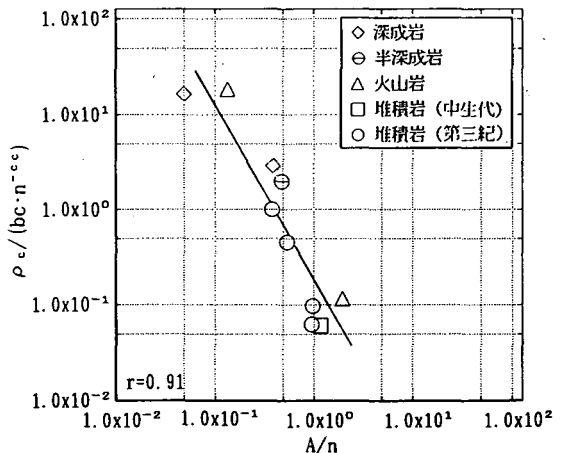


図-12 A/nと $\rho_c / (b \cdot n^{-c})$ との関係

求まる値 ($b_c \cdot n^{-cc}$) の比をグラフ化すると図-12が得られる。 A/n と $\rho_c / (b_c \cdot n^{-cc})$ は、両対数上で負の相関があるので次の式が成り立つ。

$$\frac{\rho_c}{b_c \cdot n^{-cc}} = s \cdot \left(\frac{A}{n}\right)^{-t} \quad (10)$$

ここに、 b_c , cc は係数で図-6 a)の回帰直線から求めることができる。また、 s , t は同様に図-12から求められる係数で、 $s = 860$, $t = 1.8$ が得られる。式(10)は、有効間隙率が同程度であれば比表面積の大きい岩石では、過剰導電現象による比抵抗 ρ_c を $b_c \cdot n^{-cc}$ で除した値が小さいことを示している。式(2)に式(3)および式(10)を代入することにより、次の式が得られる。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{b \cdot n^{-c}} \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{s \cdot b_c \cdot n^{-cc}} \cdot \left(\frac{A}{n}\right)^t \quad (11)$$

この式は、表面伝導の影響を考慮した岩石の比抵抗を表す実験式である。

次に比抵抗と弾性波速度との関係について検討する。図-12と同様に、比表面積と有効間隙率の比 A/n と、図-6 b)の ρ_c と回帰直線から求まる値($\beta_c \cdot \exp(\alpha_c \cdot Vp)$)との比をグラフ化すると図-13が得られる。 A/n と $\rho_c / (\beta_c \cdot \exp(\alpha_c \cdot Vp))$ は、両対数上で良好な負の相関性があるので次の式が成り立つ。

$$\frac{\rho_c}{\beta_c \cdot \exp(\alpha_c \cdot Vp)} = s'' \cdot \left(\frac{A}{n}\right)^{-t''} \quad (12)$$

ここに、 α_c , β_c は係数で図-6 b)の回帰直線から求めることができる。また、 s'' , t'' は同様に図-13から求められる係数で、 $s'' = 540$, $t'' = 1.8$ が得られる。式(12)は、有効間隙率に比較して比表面積の大きい岩石では、過剰導電現象による比抵抗 ρ_c を $\beta_c \cdot \exp(\alpha_c \cdot Vp)$ で除した値が小さいことを示している。式(2)に式(8)および式(12)を代入することにより、次の式が得られる。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\beta \cdot \exp(\alpha \cdot Vp)} \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{s'' \cdot \beta_c \cdot \exp(\alpha_c \cdot Vp)} \cdot \left(\frac{A}{n}\right)^{t''} \quad (13)$$

この式は、表面伝導を考慮した比抵抗と弾性波速度の関係を表す実験式で、式(9)は間隙水の比抵抗 ρ_w が大きい場合適用困難なのに対し、式(13)は第2項が弾性波速度との関係式として導かれているので、 ρ_w が大きい場合にも適用が可能である。

(2)実験式の検証

表面伝導の影響を考慮した岩石の比抵抗を表す実験式の適用性を検討するために、代表的な岩石につ

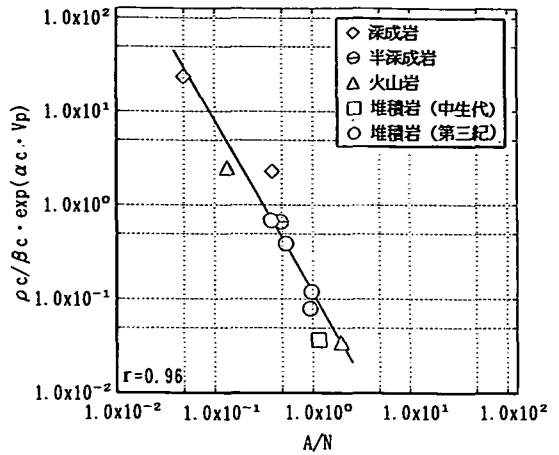


図-13 A/n と $\rho_c / (\beta_c \cdot \exp(\alpha_c \cdot Vp))$ との関係

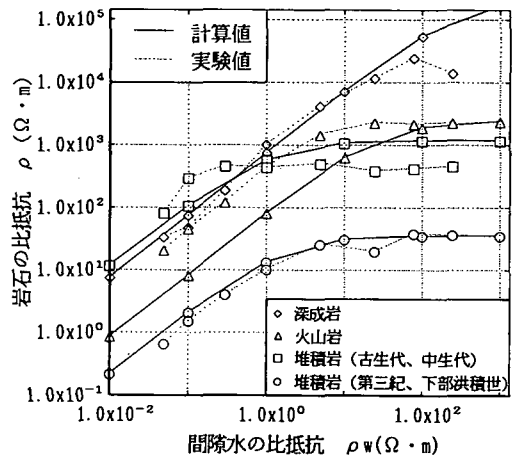


図-14 計算値と実験値の比較

いて式(11)を用いて比抵抗を試算した結果と実験結果を比較した。式(11)の係数は、図-12より $s = 860$, $t = 1.8$ であり図-7 a)より $b = 800$, $c = 0.97$ が、図-6 a)より $b_c = 22$, $cc = 1.2$ が得られる。これらの係数と図-11に示した各岩石の比表面積 A 、有効間隙率 n を用いて、間隙水の比抵抗 ρ_w に対する岩石の比抵抗を求めた結果を図-14に示した。また、図-2に示した当該岩石の比抵抗の測定結果を実験値として図-14に併記した。比抵抗の低い水で飽和させた火山岩で計算値と実験値の差がやや大きくなっているが、全体的には両者はよく一致していると判断される。

図-15は、比表面積と有効間隙率の比 A/n をパラメーターにして式(11)を用いて間隙水の比抵抗と岩石の比抵抗の関係を試算した結果である。間隙水の比抵抗が小さい範囲では表面伝導の影響が少なくなり、

大きい範囲ではA/nの違いによる岩石の比抵抗の差が大きくなり表面伝導の影響が支配的になる様子が良く表現されている。

次に、比抵抗と弾性波速度との関係を示した式(13)について、計算値と実験値の比較を行なう。この式の係数は図-7 b)より $\alpha=1.4$ 、 $\beta=0.77$ が、図-6 b)より $\alpha_c=1.5$ 、 $\beta_c=2.0$ が、図-13より $s''=540$ 、 $t''=1.8$ が得られる。図-11から各岩石のA/nを与え、前記係数を用いて比抵抗 $80\Omega\cdot m$ の水中で飽和させた岩石について、測定した比抵抗から計算により弾性波速度 V_p を求めた。式(13)から V_p を求めるには逐次計算をする必要がある。計算された弾性波速度と測定した弾性波速度との比較を図-16 a)に示した。なお、図-16 b)は、式(10)による補正を行わないで表面伝導を考慮せずに次式によって弾性波速度を求めた結果を示している。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\beta \cdot \exp(\alpha \cdot V_p) \rho_w} + \frac{1}{\beta_c \cdot \exp(\alpha_c \cdot V_p)} \quad (14)$$

なお、 α_c 、 β_c は過剰導電現象による比抵抗 ρ_c と弾性波速度 V_p との関係を示した図-6 b)によって得られる係数であるが、ここで表面伝導を考慮するというのはそれに起因する図-6 b)の ρ_c のばらつきをA/nを考慮して図-13から得た式(12)で補正することであり、表面伝導を考慮しないというのはその補正を行わないことを意味している。

図-16から表面伝導を考慮しない場合、計算された弾性波速度が広い範囲でばらつきのに対し、表面伝導を考慮した場合、計算値はやや小さめの値を与えているが、計算値と測定値はおおむね一致していることがわかる。岩石の比表面積と有効間隙率の比A/nを考慮して表面伝導の影響を補正することにより、比抵抗は弾性波速度に換算できる。

図-17は、間隙水の比抵抗が $0.05\Omega\cdot m$ と $80\Omega\cdot m$ の場合について、A/nをパラメーターとして式(13)を用いて比抵抗と弾性波速度との関係を試算した結果である。図-3 b)、図-4 b)の実験結果と良く一致しており、式(13)が妥当なものであることが確認できた。いろいろな間隙水の比抵抗に対して図-17と同様なグラフを用意しておくことが有益と思われる。

5. 結論

比抵抗の異なる水の中で飽和させた岩石の比抵抗測定結果から表面伝導の影響について調べ、それを考慮した比抵抗と弾性波速度との関係について検討した。本研究で得られた主要な結論を以下に列記する。
(1)極めて低比抵抗な $0.05\Omega\cdot m$ の比抵抗の水で飽和さ

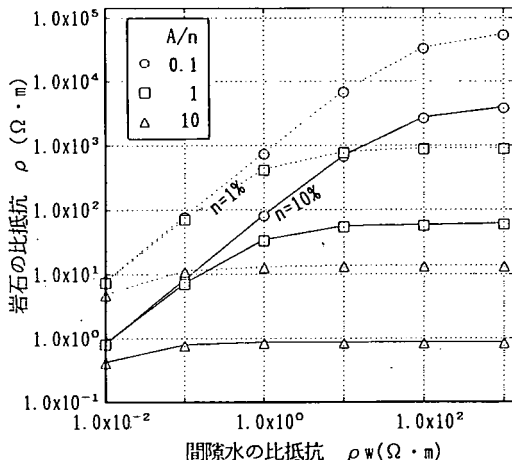
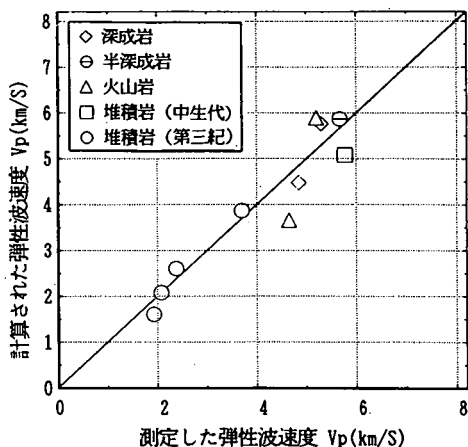
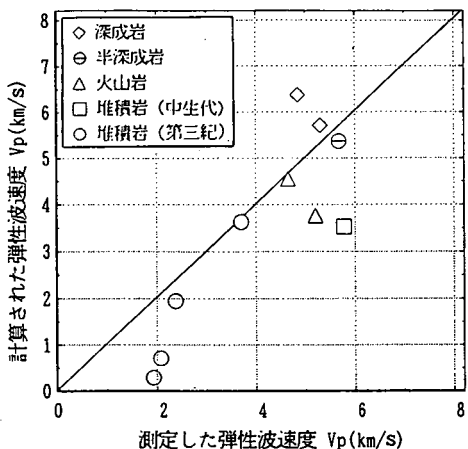


図-15 計算によって求めた岩石の比抵抗値



a) 表面伝導を考慮した場合



b) 表面伝導を考慮しない場合

図-16 間隙水の比抵抗 $80\Omega\cdot m$ の時の岩石の比抵抗から計算した弾性波速度と測定した弾性波速度との比較

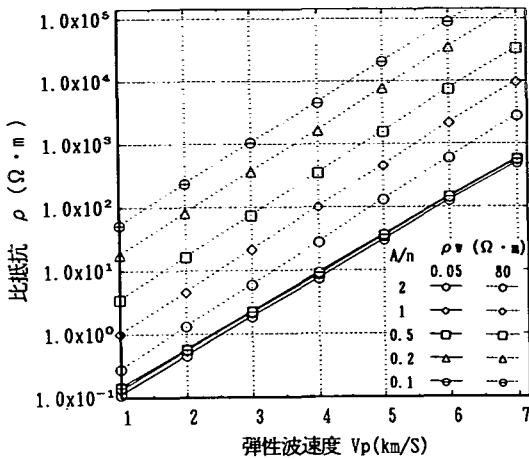


図-17 計算によって求めた比抵抗と弾性波速度との関係

せた岩石の比抵抗測定結果は、高比抵抗の水で飽和させた場合に比較して過剰導電現象の影響が殆どなくなるため、弾性波速度と強い相関性を示す。

(2)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おおむね説明できる。

(3)表面伝導の影響を考慮することによって、岩石の比抵抗を有効間隙率および間隙水の比抵抗と関係づける実験式が得られる。表面伝導の影響を考慮するための指標として比表面積Aと有効間隙率nの比A/nが有効である。

(4)A/nを考慮することによって比抵抗と弾性波速度との関係を表す実験式が得られる。この実験式によって表面伝導の影響を考慮して比抵抗を弾性波速度に換算できる。

本論文で示した比抵抗と弾性波速度との関係式は岩石供試体から求めたものであり、実際の岩盤の測定結果とは必ずしも一致しないと考えられる。電気探査や電磁探査などで得られた比抵抗値から弾性波速度を推定しようとした場合、弾性波速度と比抵抗に対する亀裂の影響程度なども今後検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 松井保：比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用, 物理探査, 第48巻, 第6号, pp. 530-538, 1995年12月。
- 2) Archie, G. E.: The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Trans. A. I. M. E.*, Vol. 146, pp. 54-62, 1942.
- 3) Hill, H. J. and Milburn, J. D.: Effect of Clay and Water Salinity on Electrochemical Behavior of

Reservoir Rocks, *Petroleum transactions, AIME*, Vol. 207, pp. 65-72, 1956.

- 4) Waxman, M. H. and Smits, L. J. M.: Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 8, pp. 107-122, 1968.
- 5) Bussian, A. E.: Electrical conductance in a porous medium, *Geophysics*, Vol. 48, No. 9, pp. 1258-1268, 1983, 9.
- 6) de Lima, O. A. L. and Sharma, M. M.: A grain conductivity approach to shaly sandstones, *Geophysics*, Vol. 55, No. 10, pp. 1347-1356, 1990, 10.
- 7) 山口久之助：砂の地層係数と表面電導との関係について, 物理探査, 第15巻, 第1号, pp. 26-33, 1962年3月。
- 8) 茂木透：地熱変質における岩石比抵抗の変化, 九大地熱研究報告, 第1号, pp. 25-29, 1992年9月。
- 9) 千葉昭彦, 熊田政宏：花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定, 物理探査, 第47巻, 第3号, pp. 161-172, 1994年6月。
- 10) 小口雄康, 藤原忠一, 橋本憲和：岩盤の比抵抗とP波速度に関する1考察, 物理探査, 第31巻, 第5号, pp. 293-298, 1978年10月。
- 11) Scott, J. H., Lee, F. T., Carroll, R. D. and Robinson, C. S.: The relationship of geophysical measurements to engineering and construction parameters in the straight creek tunnel pilot bore, Colorado, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 5, pp. 1-30, 1968.
- 12) 関根一郎, 西牧均, 石垣和明, 原敏明, 齋藤章：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年6月。
- 13) 茂木透, 本郷克巳, 佐々宏一：細粒土の電気的特性, 物理探査, 第39巻, 第2号, pp. 95-105, 1986年5月。
- 14) 島裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹編：建設・防災・環境のための新しい電気探査法, 比抵抗映像法, 古今書院, 1995年3月。
- 15) 土質工学ハンドブック改訂編集委員会：土質工学ハンドブック(1982年版)第2章土の構造, 物理化学的性質, 土質工学会, pp. 32-39, 1982年11月。
- 16) 岩の調査と試験編集委員会：岩の調査と試験, 土質工学会, 1989年9月。
- 17) 北原文雄, 渡辺昌編：界面電気現象—基礎・測定・応用—, 共立出版, 1972年11月。
- 18) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック第二版, 技報堂出版, 1987年4月。
- 19) 西川政忠：表面導電現象について, 電気化学, 第18巻, pp. 230-233, 1950年。
- 20) 岩本宏, 熊田政弘, 飯博行, 千葉昭彦：岩石コア試料の比抵抗値と孔内検層結果に基づく間隙率分布の推定, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 331-335, 1996年2月。

(1996.7.3.受付)

CONSIDERATION OF ELECTRIC SURFACE CONDUCTION FOR DETERMINING THE CORRELATION BETWEEN ROCK RESISTIVITY AND ELASTIC WAVE VELOCITY

Ichiro SEKINE, Hitoshi NISHIMAKI, Kazuaki ISHIGAKI,
Toshiaki HARA and Akira SAITO

With the increasing demands for electrical and electromagnetic surveys in the civil engineering works, the study on electrical properties of rocks becomes essential for the interpretation of such survey results. Since the elastic wave velocities are well accepted for civil engineering, the relation between electrical resistivity and elastic wave velocities is investigated. The resistivity of rocks are measured with various pore water resistivity, and the phenomenon of excess conductance was examined. Those experiments reveal the importance of electric surface conduction, and empirical equations which relate rock resistivity and elastic wave velocity are presented.