

岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係

閔根一郎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)

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、風化や破碎による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。本研究では、花崗岩、閃緑岩を加熱によって組織を緩め亀裂性岩盤モデルとした供試体と種々の岩石を成形した供試体を用いて室内実験を行い、比抵抗測定結果について検討するとともに、比抵抗と力学的性質との関係について考察した。

Key Words: resistivity, fracture, mechanical properties

1. 緒 言

近年、トンネルを始め各種地下構造物の地盤調査において、電気探査比抵抗法¹⁾や比抵抗トモグラフィー²⁾など地盤の比抵抗分布を探査する手法が注目を集め、しばしば適用されている。これらの探査手法は、通常の屈折法弹性波探査では検出できない、地下水や上部に高弾性波速度層を有する地質構造、大深度地下構造などの把握を目的としている。筆者らも TDEM 電磁探査法によりトンネルの地山調査を実施しており、精度良く比抵抗分布を把握するために探査法の改良を進めている³⁾。しかし、探査結果として得られる岩盤の比抵抗はその値を左右する要因が多く、弹性波に比較して岩盤の評価に適用するには課題が多いと言われ⁴⁾、その解釈は定性的にされるのが現状である。それらの課題を克服して比抵抗を岩盤の定量的な評価に利用することが求められている。岩盤の比抵抗探査結果を解釈し設計施工に利用するためには次の課題について検討する必要があると考えられる。

- ① 間隙水の比抵抗が地山の比抵抗に与える影響、
 - ② 飽和度が低下したときの比抵抗の変化、
 - ③ 岩種と比抵抗、力学的性質との関係、
 - ④ 岩盤の風化や破碎と比抵抗、力学的性質との関係、
- 従来、岩盤の比抵抗についての研究は資源探査の分野で主に行われており、建設分野での研究事例は少ないのが実情である。建設分野に適用する際には、間隙水の比抵抗などの適用条件に留意し、比抵抗と力学的性質との関連を明らかにする必要がある。

本文では、岩盤の比抵抗探査結果を解釈する上で必要な前記課題について、種々の岩石と、加熱処理して組織を緩めた花崗岩および閃緑岩を亀裂性岩盤のモデルとして一連の室内実験を行い、間隙水の比抵抗や含水状態が岩石の比抵抗に与える影響や岩種による比抵抗と力学的性質との関係について考察した。さらに比抵抗と弹性波速度との関係を把握し、準岩盤強度の考え方を比抵抗に適用できるか検討した。

2. 比抵抗に関する従来の研究と本研究の位置付け

(1) 間隙水の比抵抗の影響

岩石の比抵抗については、石油探鉱の目的で Archie⁵⁾が塩分を 20 g/l ~ 100 g/l 含む水で飽和させた間隙率 10% ~ 40% の砂岩コアの比抵抗を測定し、次式を示している。

$$\rho = F \rho_w \quad (1)$$

$$F = n^{-m} \quad (2)$$

ここに、 ρ : 岩石の比抵抗、 F : 地層比抵抗係数、 ρ_w : 間隙水の比抵抗、 n : 有効間隙率、 m : 固結係数である。地層比抵抗係数 F は岩石の比抵抗 ρ を間隙水の比抵抗 ρ_w で除した値で、石油探鉱の分野では貯留岩の評価に広く使われている。式 (1), (2) は Archie の法則と呼ばれ、式 (2) はより普遍性を持たせた次式の形で一般に知られている⁶⁾。

$$F = a \cdot Sr^{-b} \cdot n^{-m} \quad (3)$$

ここに, S_r : 飽和度, a , b : 係数である。式(1)~(3)は、間隙水の比抵抗が変化しても地層比抵抗係数は変化しないことを示しているが、粘土鉱物を含む試料では間隙水の比抵抗によって地層比抵抗係数は変化することが指摘されている^{7), 8)}。また近年、比抵抗の高い間隙水 ($\rho_w > 1\Omega \cdot m$) に対しては地層比抵抗係数の考え方があり立たないこと⁹⁾、含水した岩石の比抵抗は間隙の幾何学的形状によって支配されることが指摘されている¹⁰⁾。Archie⁵⁾の実験は塩分濃度が高く間隙率が大きい条件で実施されており、通常の岩盤とは条件が異なっている。

本研究の第3章では、比抵抗の測定方法について示した後、種々の岩石と、亀裂性岩盤のモデルとして加熱処理して組織を緩めた花崗岩および閃緑岩について、トンネル湧水の比抵抗を参考に飽和させる水の比抵抗を変化させて供試体の比抵抗を測定し、間隙水の比抵抗が岩盤の比抵抗に及ぼす影響について考察した。

なお、花崗岩を加熱して亀裂性岩盤のモデルを作成する方法は吉中ら¹¹⁾によって行われており、加熱により連続した開口亀裂が供試体に発生する。本研究では岩石自体だけでなく実際の岩盤により近い条件で室内実験を行うため、この手法により花崗岩および閃緑岩の亀裂を有する供試体（以下、人工亀裂性供試体と称す）を作成し、第3, 4, 6章の実験に供した。

(2) 飽和度と比抵抗との関係

比抵抗の探査結果を解釈するときに、地下水位がひとつの比抵抗境界を形成すると考えられる。岩盤の飽和度が変化することによってどの程度比抵抗が変化するのか把握しておく必要がある。これについては Archie⁵⁾が石油探鉱の目的で研究している。瀬戸ら¹²⁾は、トンネルの掘削に伴う比抵抗の変化を捕らえているが、現地の測定では飽和度との関連で議論することは困難である。また、地下水の採水の目的では滞水層と難透水層の比抵抗について古くから調べられている¹³⁾。伊関¹⁴⁾は、岩石の飽和度と比抵抗の関連について実験検討しているが、データはまだ少ない。本文第4章では種々の岩種の岩石と人工亀裂性供試体について飽和度を変化させて比抵抗を測定し、飽和度と比抵抗との関係について論じた。

(3) 岩種と比抵抗、力学的性質との関係

比抵抗探査結果から地山の力学的性質を考察する際、多様な岩種の比抵抗と力学的性質との関係を把握しておく必要がある。岩種と比抵抗については資源探査の目的で研究され、Keller¹⁵⁾がまとめている。それに対し比抵抗と力学的性質との関係についての研究事例は少ないが、例えば花崗岩地域の検層結果を検討した小口ら⁴⁾、高橋ら¹⁶⁾の研究がある。しかし、種々の岩盤について電

気検層やPS検層を実施したデータを蓄積するのは容易でない。また、建設分野に適用していく場合、比抵抗と他の工学的パラメーターとの関係について岩種によってどのような傾向があるのか把握する必要がある。本研究の第5章では、種々の岩石について比抵抗と弾性波速度や一軸圧縮強度等との関係を調べ、岩種による特徴について考察した。

(4) 風化や破碎と比抵抗、力学的性質との関係

岩盤の探査結果を検討するとき、風化や破碎の程度と比抵抗がどのように関係付けられるのか、把握しておく必要がある。内浦ら¹⁷⁾は Archie の法則と、弾性波速度と間隙率の関係式に基づいて、比抵抗と弾性波速度との関係を示し、それを用いてトンネルの地山の評価を行っている。また、藤原ら¹⁸⁾は地層比抵抗係数による岩盤の評価について述べ、山岳地域と海岸地域の比抵抗を比較する場合地層比抵抗係数に置き換えて検討すると良いことを示している。前述した小口ら⁴⁾、高橋ら¹⁶⁾は花崗岩岩盤について電気検層結果と PS 検層結果を対比し、岩盤の比抵抗は Archie の法則に従うとして比抵抗および P 波速度と岩盤分類について述べている。原位置測定では間隙水の比抵抗が不明であるなど測定位置での条件が充分に把握できないことがある。そのため室内実験により明確な測定条件で実験を行うことも必要であり、Donaldson¹⁹⁾は加熱処理した供試体を用いて比抵抗と弾性係数などの関係を論じている。

本文の第6章では、風化や破碎した岩盤の比抵抗と力学的性質を検討するための基礎実験として、結晶質の岩石を加熱して微細なクラックを発生させた亀裂性岩盤のモデルを作成しその比抵抗と力学的性質を測定した。その結果から、比抵抗と弾性波速度との関係式を導いた。さらに、比抵抗から準岩盤強度を求める式を示し、準岩盤強度の考え方が比抵抗に適用できるか検討した。

3. 間隙水の比抵抗が岩石の比抵抗へ及ぼす影響

(1) 実験方法および試料

直流比抵抗の測定は、古くから一般的に行われている4極法²⁰⁾によって実施した。4極法では分極による誤差の発生を防止できる。図-1は比抵抗測定装置の概要図で、比抵抗 ρ は次式により求めた。

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

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 20 mm, 30 mm と変えて各間隔での測定値を平均して比抵抗を求めた。電流電極と供試体の間には、接触状態を良くするため導電性グリースを塗布した。この導電性グリースはシ

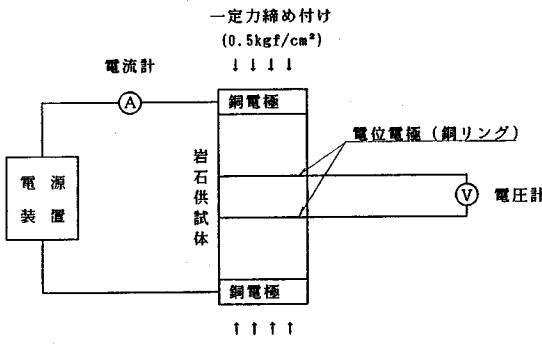


図-1 比抵抗測定装置

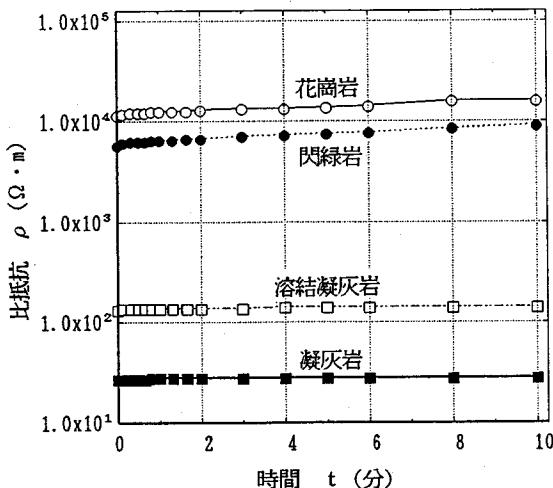


図-2 測定中の比抵抗の経時変化

リコンオイルとカーボンからなり、使用時に密着性が良いものである。

岩石の比抵抗測定では測定時に供試体表面が乾燥すると誤差を生ずることが指摘されており、そのため乾燥を防ぐ容器内で比抵抗を測定する試みがなされている⁹⁾。そこで、比抵抗の変化を経時に測定したところ図-2の結果が得られた。比抵抗は経時に微増する傾向があるが、これは供試体の乾燥や、分極に伴って発生し経時に発生する吸収電流などの影響と考えられる。変化量は本研究の検討をする上で十分小さかったので、特に乾燥防止の処置はとらずに条件を統一して通電1分後に測定することにした。以下、第4、5、6章も同様な方法で比抵抗を測定した。

実験に使用した岩石を表-1に示す。供試体の個数は各試料1個とし、寸法は直径50 mm、長さ100 mmを標準とした。以後の実験ではすべてこの大きさの供試体を用いた。また、人工亀裂性供試体は花崗岩(表-1○)、閃綠岩(表-1×)を電気マッフル炉により昇温率100°C/時で450°C~1000°Cまで加熱した後、徐々に冷

表-1 間隙水の比抵抗を変えた実験に使用した岩石

記号	分類	岩種	採集地	有効間隙率n(%)
○	深成岩	花崗岩	茨城県笠間市	0.70
○	"	"	愛媛県越智郡菊間町	0.51
×	"	閃綠岩	山形県長井市	0.61
◆	火山岩	安山岩	石川県鳳至郡能都町	2.43
■	"	"	"	3.55
△	変成岩	角閃岩	岩手県東磐井郡東山町	1.39
□	堆積岩	頁岩	宮城県牡鹿郡	0.64
⊖	"	溶結凝灰岩	秋田県仙北郡田沢湖町	8.21
▲	"	"	福島県西白川郡	21.8
●	"	凝灰岩	秋田県仙北郡田沢湖町	9.80
●	"	泥岩	神奈川県横須賀市	14.1
◇	"	凝灰岩	栃木県宇都宮市	39.1

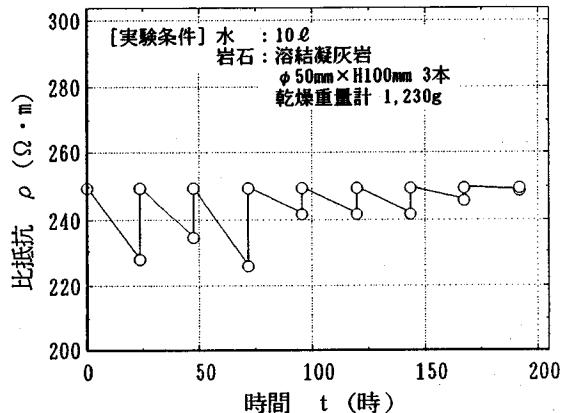


図-3 強制飽和中の水の比抵抗の経時変化

却して作成した。岩盤の間隙水の比抵抗は3ヶ所の掘削中のトンネル湧水の比抵抗を測定したところ80Ω·m程度であり、移動していない地下水の比抵抗はこれより小さいことが予想されることと、志村¹³⁾が浅層地下水の比抵抗は50~100Ω·m、深層地下水は20~50Ω·mの範囲にあることが多いと指摘していることから、海水の塩分の影響を受ける地域を除いて一般的な岩盤の間隙水の比抵抗は、20~100Ω·m程度と思われる。以上から各供試体を飽和するのに用いた水の比抵抗は蒸留水にNaClを溶かし5Ω·m、25Ω·m、80Ω·m、250Ω·mに調整した。供試体は110°Cで48時間炉乾燥した後、前記水中で96時間以上真空ポンプによって吸引し強制飽和させた。なお、比抵抗が高い水中(250Ω·m、80Ω·m)で飽和させる場合、図-3に24時間ごとに水の比抵抗を調整したときの例を示すように時間の経過に伴って飽和させている水の比抵抗が低下する現象が認められる。この現象は、岩石から電解質が溶出するためと考えられる。そのため、毎日水の比抵抗を測定し3%以上変化が認められた場合比抵抗を再調整した。供試体を飽和させた水の比抵抗と岩石の間隙内の水の比抵抗は厳密には一致

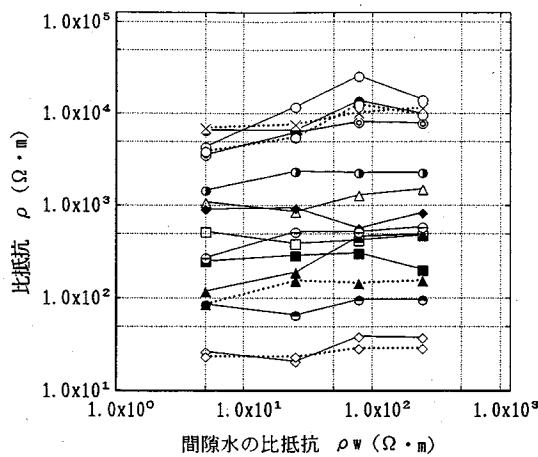


図-4 間隙水の比抵抗と岩石の比抵抗との関係

しないが、以後、便宜的に供試体を飽和させた水の比抵抗を間隙水の比抵抗と記述する。

(2) 実験結果および考察

図-4に間隙水の比抵抗に対する各種の岩石の比抵抗を示した。また、実験に用いた岩石の採取地と有効間隙率を表-1に示した。有効間隙率は、整形した岩石供試体の寸法をノギスで測定して求めた体積と乾燥重量及び湿潤重量から算出した。図-4で実線で示しているのは、同一の供試体を用いて $250\Omega \cdot m$ から順に $5\Omega \cdot m$ まで、乾燥、飽和、比抵抗測定の過程を繰り返しながら測定したものである。また、点線で示しているのはそれぞれの比抵抗の間隙水に対して一つの供試体を用意して測定した結果である。

図-4から間隙水の変化に対する各種岩石の比抵抗の変化は小さく、通常考えられる岩盤の間隙水の比抵抗の範囲では、間隙水の比抵抗と岩石の比抵抗が比例とした Archie の法則が成り立たないことがわかる。この結果は千葉ら⁹⁾の実験結果と整合しており、間隙水の比抵抗に依らない他の要因によって岩石の比抵抗が支配されていると考えられる。図-5には、人工亀裂性供試体に対する比抵抗測定結果を示した。人工亀裂性供試体では間隙水の比抵抗が $25\Omega \cdot m$ 以上になると間隙水の比抵抗と供試体の比抵抗は比例せず、供試体の比抵抗の変化が少なくなることがわかる。図-4の岩石と図-5の人工亀裂性供試体の差は、間隙の形状の違いに起因するとと思われる。すなわち、人工亀裂性供試体は亀裂の連続性が良いため間隙水の比抵抗の影響を受け易いと考察される。

以上の室内実験から、岩石の場合間隙水の比抵抗が $5\Omega \cdot m$ 以上、人工亀裂性供試体の場合は $25\Omega \cdot m$ 以上で比抵抗測定結果に対する間隙水の比抵抗の影響が少なく

人工亀裂性供試体凡例

記号	有効間隙率 n (%)	備考
○	1.80	花崗岩
●	3.86	"
◇	5.38	"
◆	6.45	"
□	3.40	閃緑岩
■	6.22	"
△	7.18	"

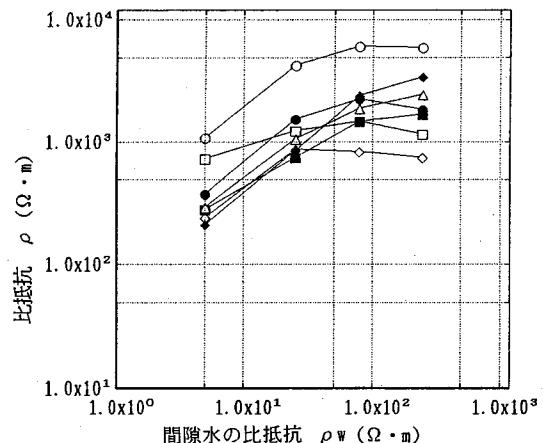


図-5 間隙水の比抵抗に対する人工亀裂性供試体の比抵抗の変化

なることがわかる。この原因是、岩石内の電気伝導が2種類の伝導機構によるためと思われる。一つは間隙中を直接伝わる電気伝導であり、これは間隙水の比抵抗に比例する。もう一つは間隙水の比抵抗に依らない電気伝導で、これは茂木ら⁸⁾や千葉ら⁹⁾が指摘しているように、固体と液体の界面を伝わる表面伝導と考えられる。間隙水の比抵抗が高い場合、後者の影響が顕著になるものと考察される。

4. 飽和度と比抵抗との関係

(1) 実験方法および試料

表-2, 3 に示す 11 種類の岩石と 17 種類の人工亀裂性供試体について、飽和状態の供試体を徐々に乾燥させながら飽和度と比抵抗の関係を検討した。供試体は 110°C で 48 時間炉乾燥した後、比抵抗 $80\Omega \cdot m$ の水中で 96 時間以上強制飽和させ、比抵抗と重量を測定した。その供試体を少量の乾燥剤(シリカゲル)を入れたデシケーター内で乾燥させた後、乾燥剤を入れないデシケーター内で 48 時間放置し、供試体内の含水状態の均一化を図った。

放置中の供試体の比抵抗と飽和度の経時変化の一例を図-6 に示す。この測定では放置中にデシケーターから供試体を取り出して比抵抗と重量を測定しているので、飽和度がやや低下している。それにもかかわらず放置後

表-2 飽和度を変えた比抵抗測定に用いた岩石

記号	分類	岩種	採集地	有効間隙率 n (%)
○	深成岩	花崗岩	茨城県笠間市	0.70
▲	〃	閃緑岩	愛媛県越智郡宮窪町	0.66
◇	〃	〃	〃	0.67
■	半深成岩	ひん岩	広島県広島市	2.07
×	火山岩	安山岩	山梨県甲府市	3.13
●	〃	〃	石川県鳳至郡能登町	3.55
△	堆積岩	砂岩	岩手県東磐井郡東山町	1.01
●	〃	頁岩	宮城県牡鹿郡	0.64
●	〃	溶結凝灰岩	秋田県仙北郡田沢湖町	8.21
●	〃	〃	福島県西白川郡	21.8
○	〃	凝灰岩	栃木県宇都宮市	39.1

表-3 飽和度を変えた比抵抗測定に用いた人工亀裂性供試体

花崗岩		閃緑岩	
記号	有効間隙率 n (%)	記号	有効間隙率 n (%)
●	2.12	◇	1.44
◇	2.82	●	1.57
□	4.36	▲	1.83
▲	4.96	△	2.86
△	5.82	■	6.67
●	6.73	□	8.50
■	6.85	◆	12.1
◆	7.55		

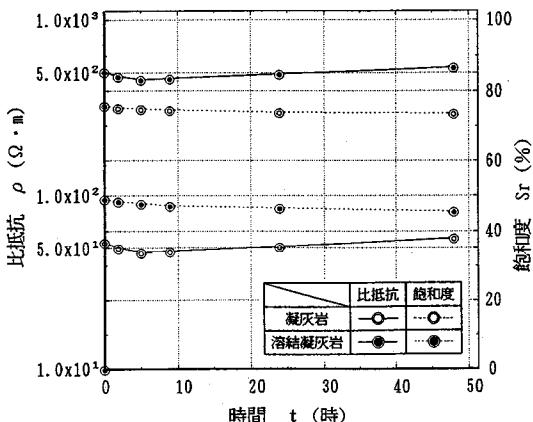


図-6 デシケーター内で放置中の供試体の比抵抗と飽和度の経時変化

しばらくの間比抵抗が低下しているのは、局部的に低下していた供試体表面付近の含水状態が供試体内部からの水分の移動により上昇し、水分の分布が均一化するためと考えられる。約5時間放置後は、飽和度の低下に対応して比抵抗が増大している。したがって、乾燥直後に比抵抗を測定すると過大評価する可能性があるが、放置することによって誤差の発生を防止できる。

この状態で比抵抗および重量を測定した後、再び次の乾燥を行う作業を繰り返した。なお、供試体の比抵抗は飽和度の低下とともに高くなるため、比抵抗の測定では電流電極と供試体の間に導電性グリースを塗布した他、電位電極と供試体の接触を良くするため、供試体の接触箇所に速乾性の銀ペーストをリング状に塗布し、そこに銅リングの電位電極が接触するようにした。

(2) 実験結果および考察

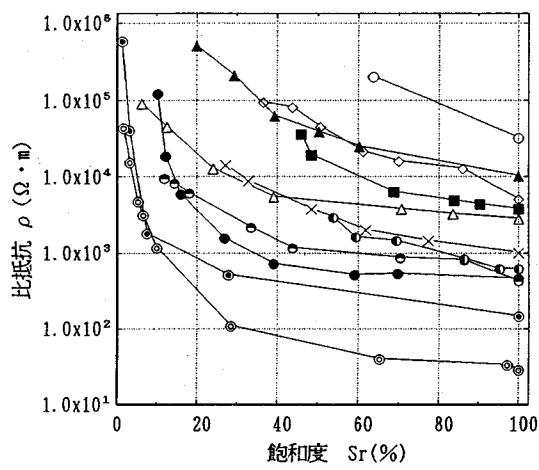
図-7に種々の岩石と、花崗岩および閃緑岩の人工亀裂性供試体について比抵抗と飽和度との関係を示した。比抵抗は従来一般的に間隙水の比抵抗で除した地層比抵抗係数で表示されているが、本文では3章の結果を踏まえ比抵抗値のまま表示する。なお、参考のために人工亀裂性供試体の実験結果の図中に、加熱していない花崗岩と閃緑岩のデータを参考として○印で示した。実験結果から種々の岩石試料と人工亀裂性供試体はほぼ同様な傾向を示しており、飽和度の減少に伴う比抵抗の増加は飽和度60%程度までの低下ではそれ程大きくなくおおむね1オーダー以内であり、多くは3倍程度であることがわかる。また、飽和度が40%以下になると比抵抗の増加が加速度的に大きくなることがわかる。図-8は、図-7の結果を飽和度100%の時の比抵抗値で正規化して示したものである。飽和度と比抵抗の増加率の関係は従来指摘されているように¹⁵⁾、次式の関係が認められる。

$$\rho/\rho_i = a_1 S^{b-1} \quad (5)$$

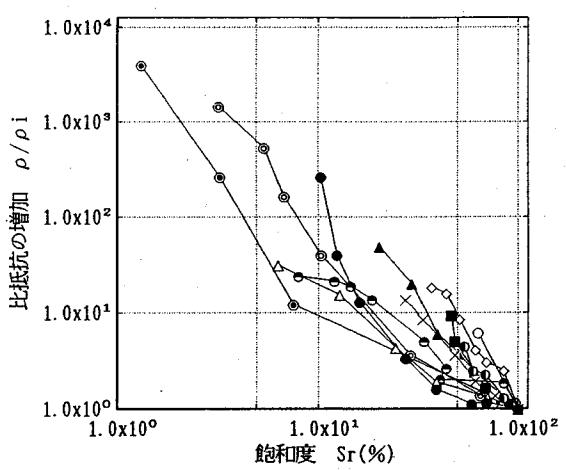
ここに、 ρ_i は飽和状態の比抵抗である。係数 b は本実験では岩石で1.7、人工亀裂性供試体で1.5が得られた。既存の研究では b は2に近いと言われておれば整合性のある結果が得られたと考える。

地下水より上部の不飽和な岩盤の飽和度がどの程度なのかは具体的なデータがなく、また地下水の上下で風化による物性の違いも予想される。したがって本実験の結果はただちに現地の探査結果に適用できるものではないが、探査結果を検討する上で1つの資料に成り得るものと考えられる。

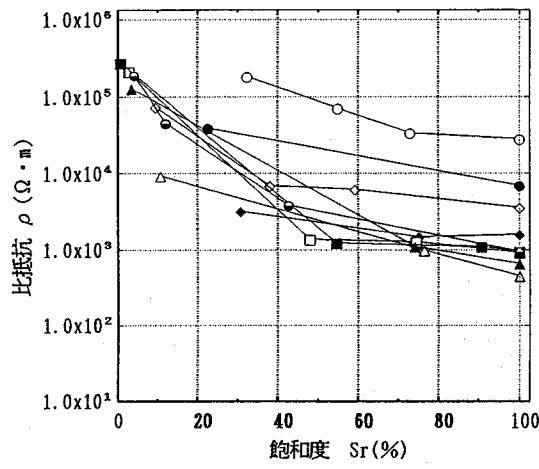
また、図-9は有効間隙率に飽和度を乗じた体積含水率と比抵抗の関係を示したものである。11種類の岩石の測定結果では、体積含水率が小さくなると岩種による差が顕著になり、頁岩で特に比抵抗が小さくなっている。前述したとおり岩石の比抵抗は連続した間隙内の電気伝導と表面伝導に支配され、体積含水率が小さくなると表面伝導による影響が大きくなるため、岩種による比抵抗の差が大きくなると考察される。体積含水率が大きくなると比抵抗と体積含水率との関係は岩石試料、人工亀裂性供試体ともにほぼ同じ直線で表される。これは地山の比抵抗が体積含水率によって一意的に決まる可能性を示



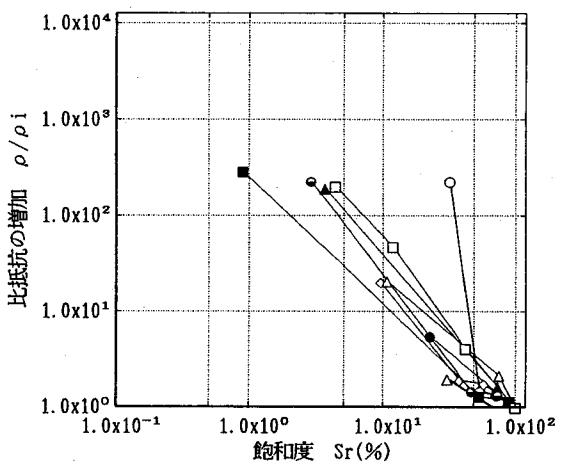
a) 岩石



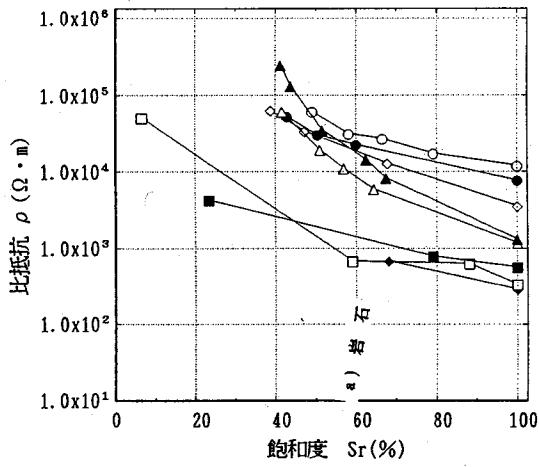
a) 岩石



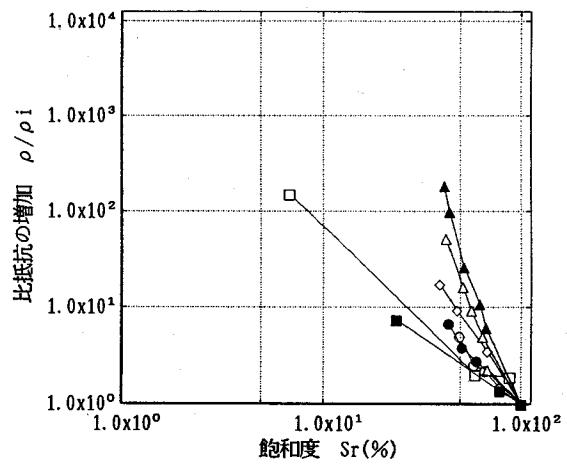
b) 人工亀裂性供試体(花崗岩)



b) 人工亀裂性供試体(花崗岩)

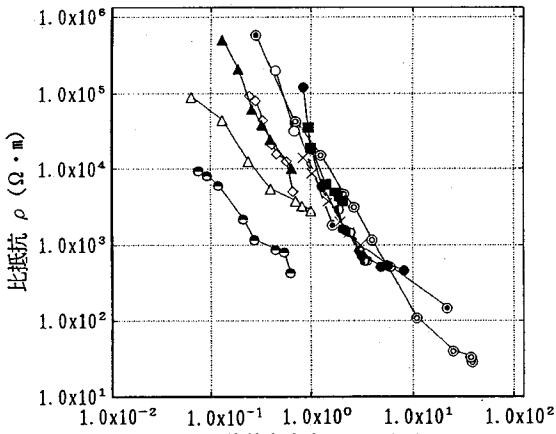


c) 人工亀裂性供試体(閃緑岩)

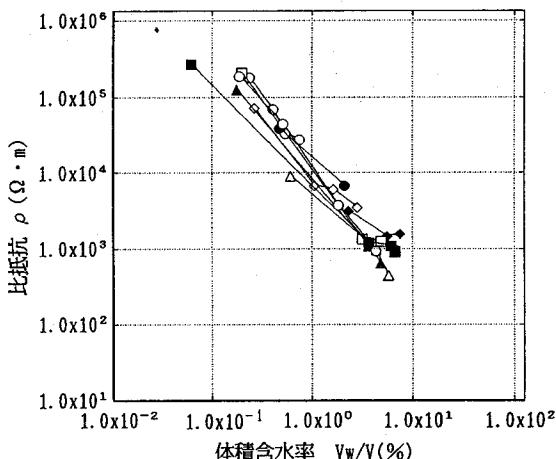
図-7 飽和度と比抵抗との関係
(凡例は表-2, 3 参照)

c) 人工亀裂性供試体(閃緑岩)

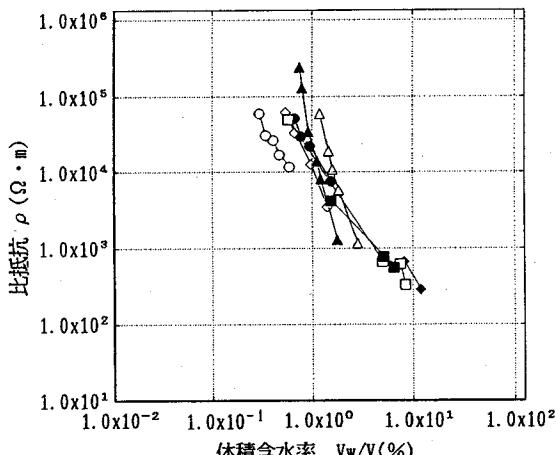
図-8 比抵抗の増加と飽和度との関係
(凡例は表-2, 3 参照)



a) 岩石



b) 人工亀裂性供試体（花崗岩）



c) 人工亀裂性供試体（閃綠岩）

図-9 体積含水率と比抵抗との関係
(凡例は表-2, 3 参照)

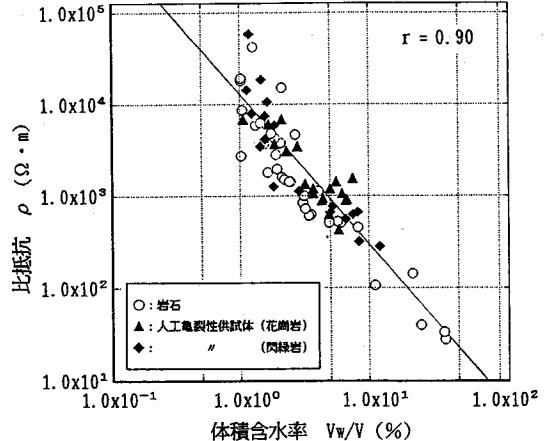


図-10 比抵抗と体積含水率との関係

している。図-9 の体積含水率 1 % 以上の測定点を同一グラフ上にプロットしたのが図-10 である。この図から比抵抗と体積含水率はべき級数型の次式で表現されることがわかる。

$$\rho = a_2 (Sr \cdot n)^{-c} \quad (6)$$

最小自乗法により体積含水率 1 % 以上の時の係数 a_2 , c の値を求める $a_2 = 7.3$, $c = 1.6$ が得られた。岩種による式 (3) の係数 a , b , m の値が研究されており¹⁵⁾, 第5章に述べるように図-10 も岩種により分類することが可能と思われる。しかし、巨視的に見て比抵抗と体積含水率との関係は良好な相関性があり、これにより探査結果で得られた比抵抗値から概略の体積含水率が推定可能である。

5. 種々の岩石の比抵抗と力学的性質

(1) 実験方法および試料

表-4 に示す種々の岩石について飽和状態で、比抵抗、有効間隙率、弾性波速度、一軸圧縮強度、弾性係数を測定した。弾性波速度は透過式超音波速度測定装置により測定した。弾性係数はひずみゲージによって測定し、破壊時応力の 50 % 時点における割線の値を使用した。供試体の個数は各試料 3 個とした。各試料を飽和するのに用いた水の比抵抗は掘削中のトンネル湧水の比抵抗測定結果から $80 \Omega \cdot m$ とし、 $110^\circ C$ で 48 時間炉乾燥した後、96 時間以上真空ポンプによって吸引し強制飽和させた。なお、スレーキングを起こす火山礫凝灰岩（表-4 □6, □7）は絶乾状態にせずに整形後直ちに強制飽和させた。

(2) 実験結果および考察

図-11 に実験に用いた 26 種の岩石について、比抵抗と有効間隙率、弾性波速度、一軸圧縮強度、弾性係数と

表-4 5章の実験に用いた岩石

記号	分類	岩種	採集地	備考
◆1	深成岩	花崗岩	茨城県笠間市	稻田花崗岩
◆2	"	"	"	"
◆3	"	"	愛媛県越智郡菊間町	古期頸花崗岩類
◆4	"	"	韓国ソウル市	大寶 (Daebu) 花崗岩
◆5	"	閃綠岩	愛媛県越智郡宮窪町	採集深度GL-62m、頸花崗岩類
◆6	"	"	"	採集深度GL-164m "
◆7	"	"	山形県長井市	野川花崗岩類
△1	半深成岩	ひん岩	広島県広島市	広島型花崗岩体中に貫入
△2	"	"	"	"
△1	火山岩	安山岩	山梨県甲府市	新第三紀片山溶岩
△2	"	"	石川県鳳至郡能登町	新第三紀穴水累層
△3	"	"	"	"
△4	"	"	"	"
●1	変成岩	角閃岩	岩手県東磐井郡東山町	塩基性、広域変成岩
●1	堆積岩	粘板岩	"	古生代デボン紀、鳶ヶ森層
○2	"	頁岩	宮城県牡鹿郡	中生代デトリ層群
○1	"	溶結凝灰岩	秋田県仙北郡田沢湖町	第四紀川溶結凝灰岩類
○2	"	"	"	"
○3	"	"	福島県西白川郡	石英安山岩質鮮新世-更新世
□1	"	砂岩	兵庫県氷上郡南伊丹町	中生代-古生代、丹波層群
□2	"	"	岩手県東磐井郡東山町	古生代デボン紀、鳶ヶ森層
□3	"	凝灰岩	秋田県仙北郡田沢湖町	第四紀玉川溶結凝灰岩類
□4	"	泥岩	神奈川県横須賀市	新第三紀三浦層群
□5	"	凝灰岩	横木県宇都宮市	" 大谷層
□6	"	火山巖凝灰岩	石川県鳳至郡能登町	スレーキングしやすい
□7	"	"	"	熱水変質帶

の関係を示した。また、図-12に弾性波速度と有効間隙率、一軸圧縮強度との関係を示した。実験結果から比抵抗と有効間隙率との関係には、岩種によってばらつくが図-10と同様に相関性があり、式(7)で表される。

$$\rho = a_3 n^{-m} \quad (7)$$

比抵抗と有効間隙率との関係は、本研究で試料とした岩石の範囲では岩種によって、②頁岩や熱水変質帶など粘土鉱物を多く含む岩石(図中○2, □6, □7)では最小自乗法で得た直線よりも比抵抗が低い、⑥火成岩では、深成岩、半深成岩、火山岩の順に比抵抗が低くなり、③酸性岩より塩基性岩で比抵抗が低くなっている。比抵抗と弾性波速度、一軸圧縮強度、弾性係数の間にも岩種によって同様な傾向が認められる。弾性波速度と有効間隙率、一軸圧縮強度との関係を見ると、角閃岩を除いて良い相関性を示しており、前述した岩種による傾向は比抵抗に固有のものと考えられる。例えば図-11c)では、深成岩と火成岩で同程度の一軸圧縮強度を示すサンプルでも比抵抗は深成岩の方が大きく、差が認められるのに対し、弾性波速度と一軸圧縮強度との関係を示した図-12b)ではそのような差は認められない。図-11c)の比抵抗と一軸圧縮強度との関係は相関係数 $r=0.79$ であり、弾性波速度と一軸圧縮強度との相関関係(相関係数 $r=0.88$)に比べ低いものの比較的良い相関性が認められ、前述した岩種による比抵抗の傾向を考慮すれば弾性波と同様に岩盤評価の1指標に成り得ると考えられる。

6. 人工的に組織を緩めた供試体の比抵抗と力学的性質

(1) 実験方法

本実験では、第3章と同じ方法で花崗岩および閃緑岩を加熱し、人工亜裂性供試体を作成した。その比抵抗と有効間隙率、弾性波速度、一軸圧縮強度を測定して、比抵抗と弾性波速度との関係式を示した。さらに比抵抗に準岩盤強度の考え方方が適用できるか否か考察した。準岩盤強度は多数のトンネルの実例に基づいて池田²¹⁾によつて提案されており、鉄道トンネルや道路トンネルの地山分類をする際に地山強度比の算定に利用されている²²⁾。なお、間隙水の比抵抗は $80\Omega \cdot m$ とした。

(2) 実験結果および考察

図-13に実験結果を示した。図中の○●印は加熱しない新鮮な岩石の結果を示している。実験結果から比抵抗と有効間隙率の間には前述した式(7)の関係があり、また有効間隙率と弾性波速度には図-13b)のように片対数上で明確な直線性が認められる。以上から弾性波速度 Vp と比抵抗 ρ との関係は図-13c)上で直線になり、次式で表現される。

$$\rho = \beta \exp(\alpha Vp) \quad (8)$$

式(8)を変形すれば Vp は比抵抗から次式で求められる。

$$Vp = \frac{1}{\alpha} \ln(\rho/\beta) \quad (9)$$

β は、図-13c)で $Vp=0$ のときのY軸の切片で、 α は直線の勾配に相当する。人工亜裂性供試体の場合、種々の岩種を同一のグラフにまとめた図-11b)に比較して良い相関性が得られた。これは人工亜裂性供試体が同じ岩石に対して亜裂の発生の程度をコントロールしたものであるためと考察される。実際の岩盤の風化過程では亜裂の発生と共に粘土化が進むので図-13の結果がそのまま実際の岩盤に適用できる訳ではないが、これにより亜裂の発生の程度を推定しうると思われる。

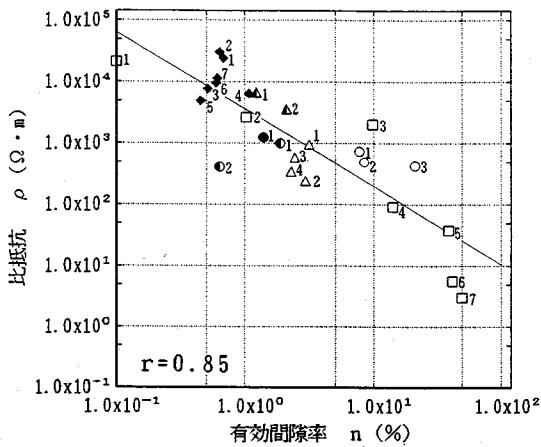
次に準岩盤強度を比抵抗で表現することを検討する。準岩盤強度は次式で与えられる²¹⁾。

$$\sigma_c = \sigma_{cs} (vp/Vp)^2 \quad (10)$$

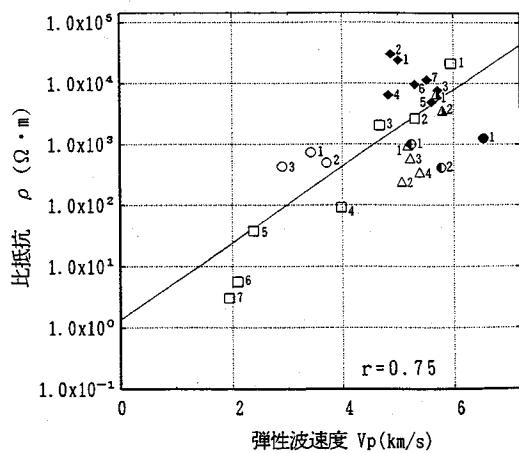
ここに σ_c : 準岩盤強度、 σ_{cs} : コアの一軸圧縮強度、 vp : 岩盤の弾性波速度、 Vp : コアの弾性波速度である。式(9), (10)より、比抵抗で準岩盤強度を表現すると次式が得られる。

$$\sigma_c = \sigma_{cs} \left[\frac{\ln(\rho_m/\beta)}{\ln(\rho_s/\beta)} \right]^2 \quad (11)$$

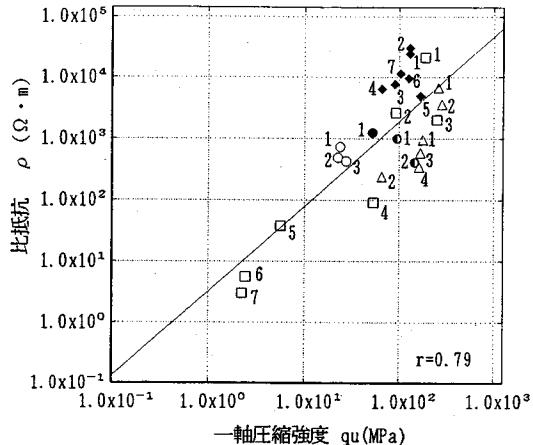
ここに ρ_m : 岩盤の比抵抗、 ρ_s : コアの比抵抗である。 β は係数で、人工亜裂性供試体に対して図-13c)では $\beta=41$ が得られたが、岩種によってどのような値をとる



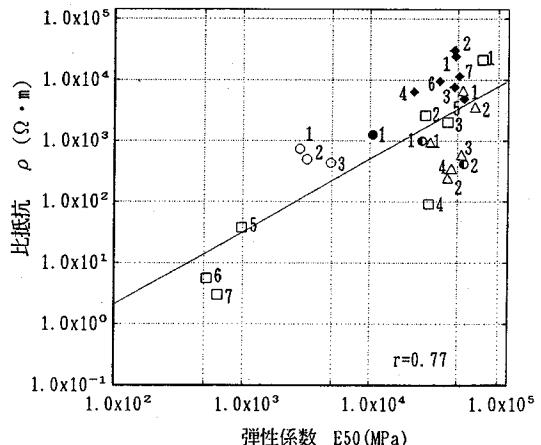
a) 比抵抗と有効間隙率との関係



b) 比抵抗と弾性波速度との関係

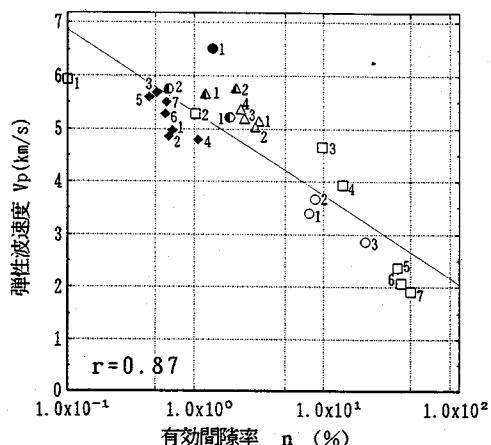


c) 比抵抗と一軸圧縮強度との関係

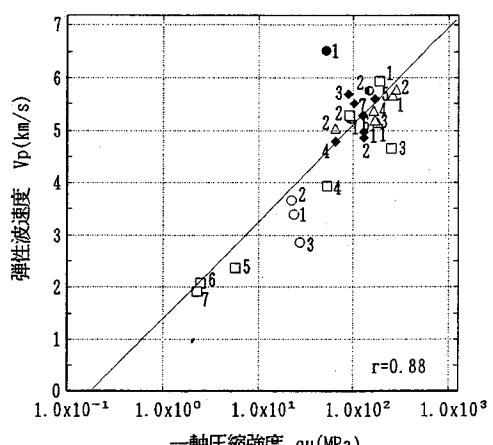


d) 比抵抗と弾性係数との関係

図-11 種々の岩石の比抵抗と力学的性質との関係

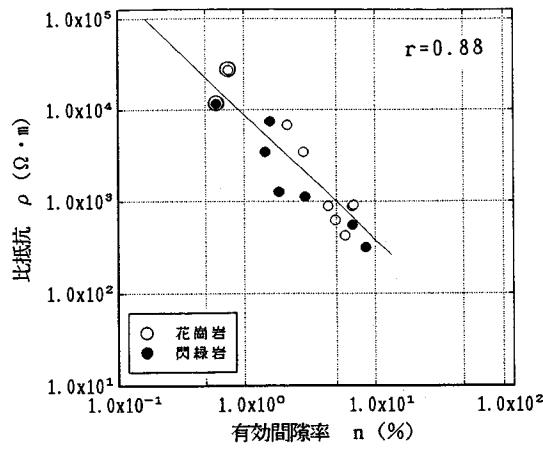


a) 弹性波速度と有効間隙率との関係

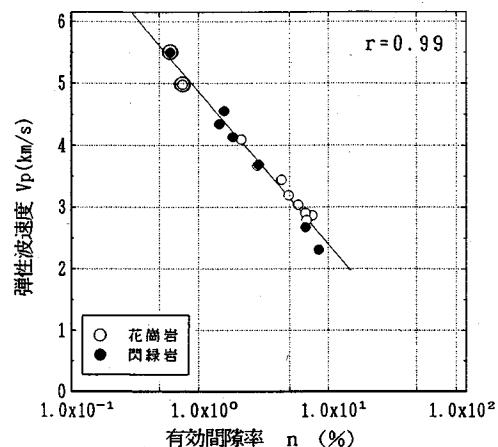


b) 弹性波速度と一軸圧縮強度との関係

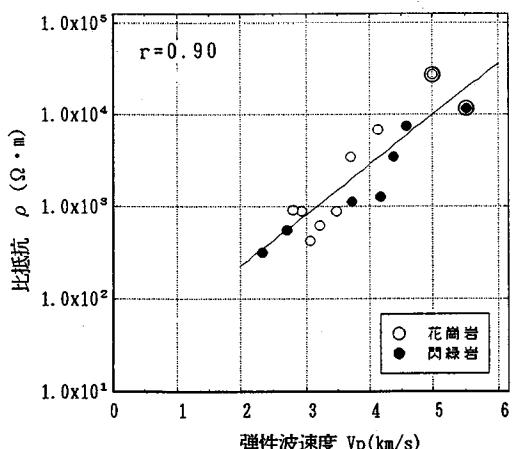
図-12 種々の岩石の弾性波速度と物性との関係



a) 比抵抗と有効間隙率との関係

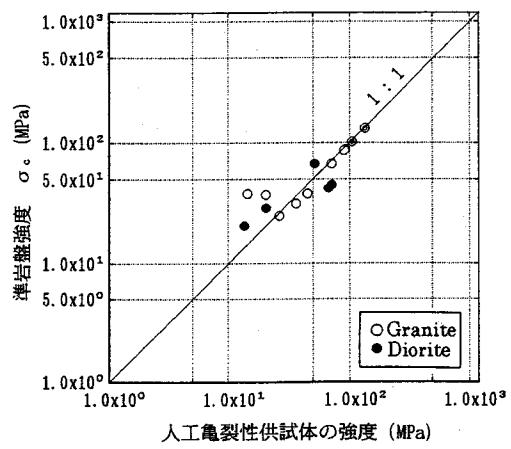


b) 弹性波速度と有効間隙率との関係

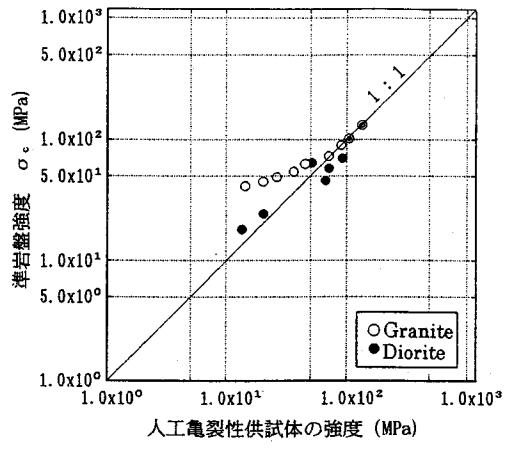


c) 比抵抗と弾性波速度との関係

図-13 人工亀裂性供試体の物性相互の関係



a) 比抵抗から求めた準岩盤強度



b) 弹性波速度から求めた準岩盤強度

図-14 準岩盤強度と人工亀裂性供試体の強度との関係

のかは今後の課題である。また、本文3章の結果から間隙水の比抵抗が高い場合 β の値は間隙水の比抵抗の影響をあまり受けないが、海岸沿いなどで間隙水の比抵抗が低い場合にはその影響を受けるので注意が必要である。そのような場合には β の値に対する間隙水の比抵抗の影響を把握しておく必要がある。

次に、この式を用いて比抵抗測定結果から準岩盤強度を算定し、人工亀裂性供試体の強度と比較した。図-14 a) にその結果を示すが、両者はほぼ1:1に対応している。また、図-14 b) に供試体の弾性波速度から求めた準岩盤強度も示した。図-14で算出された準岩盤強度と人工亀裂性供試体の強度が完全には一致しない理由として、準岩盤強度が仮定を含んだ便宜的な考え方に基づいており、それを実際のトンネルの弾性波速度と地質状態のデータによって経験的に検証したものであることが考えられる。図-14 a), b) を比較して、弾性波速

度から求める準岩盤強度とほぼ同じレベルで、式(11)により比抵抗から準岩盤強度を算出可能であることが判明した。

7. 結 論

本研究で得られた結論を以下に示す。

① 種々の岩石と花崗岩、閃綠岩を加熱処理した人工亀裂性供試体の試験結果から、海水の塩分の影響を受ける地域を除いて通常考えられる岩盤の間隙水の比抵抗値の範囲では、間隙水の比抵抗と岩石の比抵抗が比例するという Archie の法則は成立しないことが確認された。間隙水の比抵抗の増加に対して岩石の比抵抗は増加傾向にあるが、変化は小さい。

② 地下水面は 1 つの比抵抗境界となるがその基礎データとして飽和度に対する比抵抗の変化を検討した結果、種々の岩石、人工亀裂性供試体ともに飽和度が 60 % 程度まで減少しても比抵抗の増加は大きくとも 1 オーダー以内で多くは 3 倍程度であることが明らかになった。

③ 体積含水率と比抵抗は密接な関係があり、体積含水率が大きくなると種々の岩石、人工亀裂性供試体ともほぼ同一の直線上に乗り、べき級数型の関係式で表される。なお、この関係は、実験データが蓄積されれば岩種により再整理される性質のものである。

④ 種々の岩石についての比抵抗と力学的性質との関係から、比抵抗と弾性波速度や一軸圧縮強度の間には比較的良好な相関性があり粘土鉱物を含む岩石では比抵抗が低く結晶質の岩石では比抵抗が高いなど、岩種によって固有の傾向があることを示した。

⑤ 熱処理して組織を緩めた岩石を亀裂を有する岩盤のモデルとして比抵抗と力学的性質との関係を調べ、比抵抗と弾性波速度の間に良好な相関性があることがわかった。

⑥ 比抵抗から準岩盤強度を求める式を示し、算出した準岩盤強度と強度試験結果を対比して、準岩盤強度の考え方方が比抵抗にも適用しうることを示した。

以上、比抵抗トモグラフィーや電気探査比抵抗法等で得られた比抵抗探査結果の解釈に寄与するために、比抵抗値とその力学的性質との関係について一連の実験によって検討した。比抵抗はその特性を把握していくことによって他の調査結果と併せて総合的に岩盤を評価するために利用できるものと考えられる。

今後、現地での比抵抗探査技術の向上を図る他、調査地域の地質や水理条件を踏まえた上で、本研究で提案した比抵抗による岩盤の評価手法を探査結果に適用して掘削結果との対比を行うとともに、比抵抗の岩盤の評価への適用性を明らかにしていく所存である。

参考文献

- 1) 例えば、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。
- 2) 例えば、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）、応用地質、第30巻、第4号、pp.179-188、1989年12月。
- 3) 原敏昭、西牧均、関根一郎、斎藤章、和田一成：TDEM 電磁探査法の土木分野への適用（その2）、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.510-514、1995年1月。
- 4) 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、物理探鉱、第31巻、第5号、pp.293-298、1978年10月。
- 5) 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.
- 6) 北原良哉：岩石の電気的性質について（その1）—岩石の電気伝導度—、探鉱と保安、Vol.11, No.1, pp.17-36, 1973年1月。
- 7) 山下明夫：堆積層の比抵抗に関する研究、物理探鉱、第24巻、第3号、pp.138-147、1971年6月。
- 8) 茂木透、本郷克己、佐々宏一：細粒土の電気的特性、物理探鉱、第39巻、第2号、pp.95-105、1986年5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) Herrick, D.C. and David Kennedy, W.D. : Electrical efficiency-A pore geometric theory for interpreting the electrical properties of reservoir rocks, *GEOPHYSICS*, Vol.59, No.6, pp.918-927, June, 1994.
- 11) 吉中龍之進、小野寺透：微細亀裂を多く含む結晶質岩石の強度とダイレインシー、第10回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.31-35、1976年2月。
- 12) 濑戸政宏、和田有司、勝山邦久、篠原茂、斎藤章：トンネル掘進に伴う比抵抗分布の変化、第25回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.186-190、1993年2月。
- 13) 志村馨：電気探査法、昭晃堂、pp.60-71、1965年。
- 14) 伊閔伸一：岩石の含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年10月。
- 15) Keller, G.V. : Electrical properties of rocks and minerals, *Handbook of Physical Constants*, The Geological Society of America, pp.553-577, 1966.
- 16) 高橋幸蔵、高田忠郎、石川浩次、羽竜忠男：孔内測定を利用した岩盤調査（風化花崗岩の場合）、土と基礎、第21巻、第3号、pp.15-23、1973年3月。
- 17) 内浦慎一、谷口親平、松井保、朴三奎：比抵抗高密度探査データに基づくトンネル地山区分手法と適用性、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.326-330、1995年1月。
- 18) 藤原忠一、梅内勝彦、塙田基治、安盛義人：地層比抵抗係数による岩盤の評価、土と基礎、第25巻、第9号、pp.7-11、1977年9月。
- 19) Donaldson, P.R. : *Rock Resistivity and Geo-Engineering*

- Parameters*, Ph.D. thesis, Golorado School of Mines,
pp.28-84, 1974.
- 20) Parkhomenko, E.I. : *Electrical Properties of Rocks*,
PLENUM PRESS, NEW YORK, pp.83-85, 1967.
- 21) 池田和彦：トンネルの岩盤強度分類，鉄道技術研究報告，
No. 695, 1969年9月。
- 22) 土木学会トンネル工学委員会編：トンネル標準示方書(山
岳編)・同解説，社団法人土木学会，pp.28-32, 1986年
11月。

(1995.4.18受付)

ROCK RESISTIVITY AND ITS CORRELATION TO MECHANICAL PROPERTIES

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

In order to evaluate the rock mass in terms of resistivity, it is necessary to study the influence of resistivity of pore water and degree of saturation on rock resistivity. And also we need to study correlation between resistivity and other engineering parameters. In this paper, we made by heating rock mass models including open cracks from granite and diorite. After that resistivity measurements were carried out under various conditions. The results of experiments showed the correlation between resistivity and other geoengineering parameters and the possibility of evaluating rock mass by resistivity.