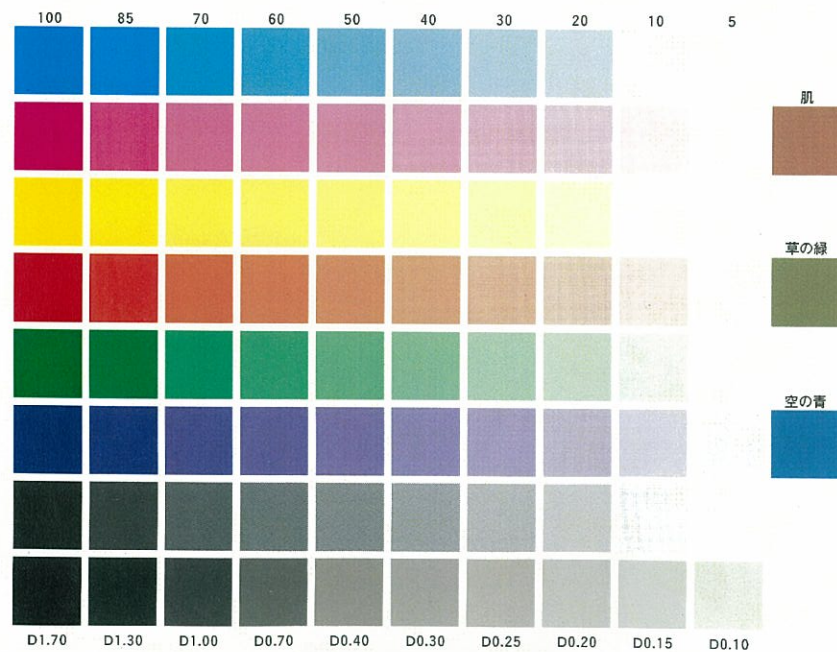


We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



関西大学審査学位論文

併用探査による地盤の工学的評価法に関する研究

平成15年 9 月

中 村 真

目 次

1. 緒 論	
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	2
参考文献	4
2. 地質構造評価手法の現状と課題	
2.1 はじめに	5
2.2 既往の物理探査による地質構造評価手法の概要	7
2.2.1 国内における地質構造評価事例	7
2.2.2 海外における地質構造評価事例	10
2.3 既往の物理探査による地質構造評価手法の課題	13
2.4 併用探査による地質構造評価の現状と課題	15
2.5 まとめ	16
参考文献	16
3. 室内試験による岩石の比抵抗および弾性波特性の把握	
3.1 はじめに	21
3.2 実験装置の概要	21
3.3 比抵抗および弾性波特性評価で用いた岩石供試体	27
3.4 弾性波特性評価結果	28
3.5 比抵抗特性評価結果	31
3.5.1 水分飽和度の影響	31
3.5.2 有効間隙率の影響	34
3.5.3 岩種および鉱物組成の影響	39
3.6 人工亀裂供試体による評価の試み	43
3.6.1 亀裂性岩盤のモデル化	43
3.6.2 計測方法の概要	43
3.6.3 人工不連続面モデルによる比抵抗特性	44
3.6.4 ポーラスモデルによる比抵抗特性	48
3.6.5 岩石供試体との比較	48
3.7 まとめ	51
参考文献	51

4. 比抵抗およびP、S波同時測定装置の開発とその適用性	
4.1 はじめに	53
4.2 同時測定装置の構成	53
4.3 A E センサ設置方法の検討	55
4.4 A E センサ設置間隔の検討	57
4.5 同時測定装置による評価手法の検討	57
4.6 同時測定装置の妥当性検討	57
4.7 同時測定による評価	61
4.8 まとめ	64
参考文献	64
5. 比抵抗連続計測による斜面内の水みち評価	
5.1 はじめに	65
5.2 比抵抗計測の概要	65
5.2.1 計測斜面の概要	65
5.2.2 計測方法の概要	69
5.3 電極配置の検討	70
5.3.1 計測の概要	70
5.3.2 計測結果	70
5.4 比抵抗連続計測結果による水みち評価	73
5.4.1 比抵抗連続計測の概要	73
5.4.2 降雨に伴う見かけ比抵抗の時間的变化	76
5.5 比抵抗変化特性による透水性評価	80
5.6 まとめ	84
参考文献	84
6. 原位置および室内比抵抗計測による岩盤の工学的評価	
6.1 はじめに	87
6.2 検討に用いた導水路トンネルの概要	87
6.3 導水路トンネルにおける簡易比抵抗探査結果による地質構造評価	89
6.3.1 不飽和条件下にある岩石の比抵抗特性	89
6.3.2 岩石コア、原位置岩盤の比抵抗～間隙率関係	91
6.3.3 支保設計への適用性の検討	96
6.4 まとめ	97
参考文献	98

7. 複数の物理探査結果の変換解析による地質構造評価	
7.1 はじめに	99
7.2 変換解析による地質構造評価システム	100
7.3 物理定数評価式の妥当性検証	103
7.3.1 岩盤モデル実験の概要	103
7.3.2 岩盤モデル実験装置の妥当性検証	105
7.3.3 岩盤モデル実験結果	108
7.4 変換解析による地質構造評価	112
7.5 まとめ	114
参考文献	114
8. 結 論	117
本研究に関連した研究成果	121
用いた記号一覧	125
謝 辞	127

第1章 結 論

1.1 本研究の背景と目的

土木構造物の建設においては、あらかじめ地盤の構造を知り、その地質工学的性質の特徴を把握することは、とくに重要である。また、重要土木構造物の建設場所が、複雑かつ脆弱な地盤にも求められるようになり、地盤を含めた構造物の安全性に関する厳密な評価と、長期的にも地震時にもより高い安全性の確保に対しては、事前の精緻な調査とモデル化、建設中の地盤挙動観測、さらには建設後の長期安全性の確認が極めて重要となる¹⁾。

事前調査では、ボーリング孔や調査横坑内における地質調査、不連続面調査、初期地圧測定、原位置透水試験、各種力学原位置試験などがあるが、これらすべての調査においては、点や線の情報しか得ることができない。それらの調査に対して、非破壊的かつ連続的に精度良く把握する手法に物理探査手法が挙げられる。弾性波探査や電気探査で代表される物理探査は、最初鉱山の分野で発達し、建設の分野ではトンネル、ダム基礎、斜面などの調査に用いられている。さらに近年では、物理探査は建設・防災・環境に関連した新しい分野にその適用を広げ、地盤工学における調査法の一環として多く用いられるようになってきた。

近年では、平成元年7月16日に越前海岸玉川において発生した岩盤崩壊事故とその発生原因解明のために電気探査が実施された²⁾。さらに、平成8年2月10日の豊浜トンネル崩落事故と平成9年8月25日の第2白糸トンネル崩落事故の発生が記憶に新しい。豊浜トンネル³⁾の崩壊規模は最大高さ約70m、最大幅約50m、最大厚さ約13m、体積約11,000m³で、第2白糸トンネル⁴⁾の崩壊規模は第1回目最大高さ約130m、最大幅約70m、最大厚さ約20m、体積約42,000m³であり、第2回目最大高さ約80m、最大幅約30m、最大厚さ約20m、体積約14,000m³と試算され、2回を合わせた崩落岩体総体積は実に約56,000m³に達している。崩落後の調査報告書によると、周辺の岩盤は岩相変化に富み構造も不規則で、岩体下部には多様な変質特徴を呈し複雑な分布形態をしている変質ゾーンが存在していた。岩石（変質した岩石を含む）の水による劣化特性は室内試験等により確認されるが、こうした多様な変質ゾーンの広がりや正確に把握する方法は確立されていない。また、今回の崩落は、崩落面の両側部では当該箇所周辺の主要な亀裂系に沿ったかたちで発生しているものの中央付近ではその方向が複雑に変化しており、崩落岩体は単純にこれらの亀裂系で分離しておらず、さらに、崩落面は数ヶ所において恒常的湧水が認められる。岩盤内の亀裂や地下水の存在はボーリング調査によって知ることが出来るもののそれらの連続性や性状については実用的に把握することが困難な現状にある。

また、豪雨が岩盤全体に与える影響についても、岩盤への地下水浸透状況や変動が亀裂発展に与える影響などについては未解明な部分が多く、具体的な知見もほとんど得られてお

らず、このような規模の崩落が降雨のピークから約 3 週間後に発生することなどに考慮が及ぶ段階になかったと述べている。

このような崩落危険箇所を事前に推定する手法として、物理探査が注目されてきている。ところが物理探査は、主に資源探査において発展してきたため、防災分野への適用に関しては、現状では探査結果の解釈において度々困難を生じる。すなわち、一般に建設分野の探査では土質や地質構造を知ることが主になっており、力学的な情報や地下水流動特性などが要求されている。一方、資源探査では石油・石炭や鉱床という化学的成分の分布状態である。この様に建設分野と資源分野では探査の目的が異なっている。また、建設分野での探査深度は主に地表から数十 m、深い場合でも数百 m 程度であり、微細な地質構造までの解析が求められている。したがって、資源探査で行っている探査方法、解析方法および解釈手法を直接建設分野に適用することには、精度面で問題が生じる。このように目的の異なる方法によって探査を行ったために成果が上らず、物理探査に対する信用が得られなかったこともあった⁵⁾。そのため、建設分野での評価に適した探査方法の研究が不可欠である。

さらに、弾性波探査と電気探査は、各々単独の調査には限界があり、お互いに補完関係として用いられることが望ましい。その理由として、弾性波は地盤の固体部分を伝播するので、その性質を特定するのに適している。一方、比抵抗は、地盤の脆弱部や間隙水を検出するのに適しているからである。したがって、同一地点において、両探査を実施し双方の探査結果を総合的に解釈することによって、探査精度を上げることになり、信頼性のある探査結果を得ることになる。一方、両探査結果の解釈に違いが生じた場合、地盤に何らかの問題があることを示唆しているものと捉えることで、データを吟味することで問題点を抽出できる。しかし、設計・施工に必要な物性値を把握する段階にはいまだ至っておらず、物理探査結果の評価法の今後の発展が望まれている。

1.2 本論文の構成

本論文は、主に建設分野でよく利用されている弾性波探査と電気探査に注目して、これらの探査結果から得られる P 波速度、S 波速度ならびに比抵抗を用いて地盤評価を効率よく行う手法について検討したものである。また、斜面を対象として見かけ比抵抗の連続計測を行い、斜面内の地下水挙動を把握することを試みたものである。

図 1-1 に本論文のフローチャートと構成を示す。また、各章の概要を以下に述べる。

第 2 章では、近年トンネル地山やダム基礎岩盤などの評価に広く用いられている物理探査のうち、比抵抗電気探査と弾性波探査に着目し、これらの物理探査の歴史と国内外の適用事例、ならびに現状での問題点についてレビューを行う。

第 3 章では、比抵抗および弾性波速度と岩盤物性値との関係についての定量的な把握を目的として、室内試験において種々の岩種の岩石供試体を用いて、含水状態を変化させながら

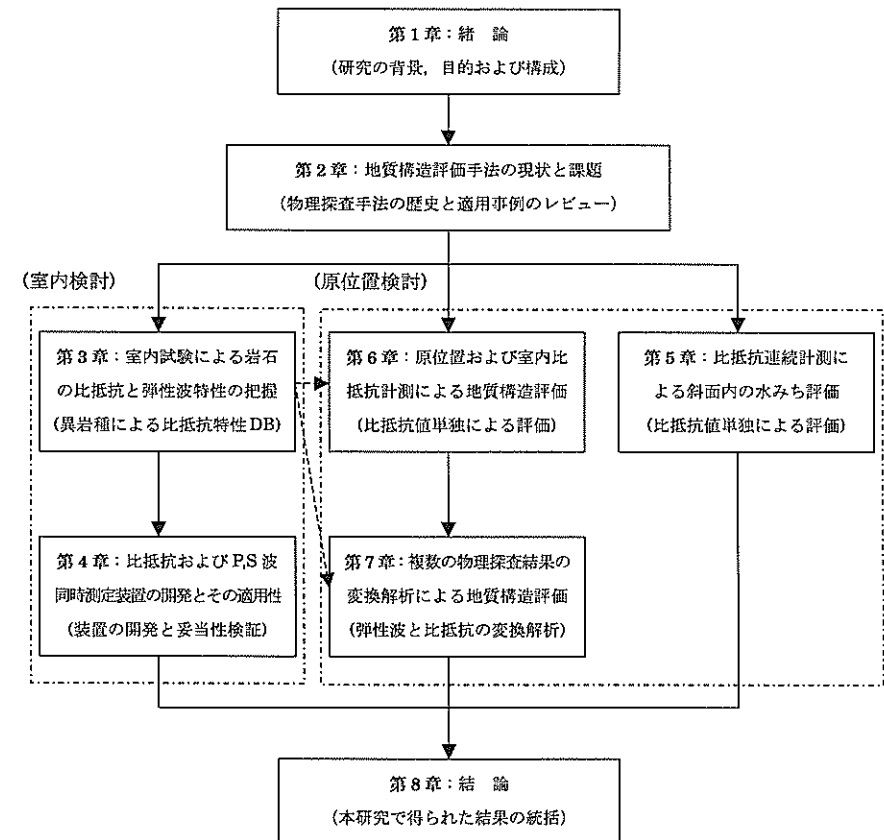


図 1-1 本論文のフローチャートと構成

測定し、岩石の両物性値と飽和度、間隙率の関係について検討する。また、岩石供試体での間隙率は数%程度しかないため、室内試験において亀裂を有する原位置岩盤の基礎物性評価を行うために、不連続面に種々の枚数の濾紙を介在させて、不連続面の開口幅を変化させた人工不連続面モデルと、電気マッフル炉で加熱処理を施す事により、岩石内部に微細な開口亀裂を発生させ、岩石供試体の有効間隙率を増加させて作成したポーラスモデルによって亀裂性岩盤を模擬し、比抵抗特性を検討する。

第4章では、岩石の弾性的特性を把握手法として有用な弾性波速度の計測において、従来の超音波法による計測の問題点を解決するために、岩石供試体の比抵抗および弾性波 P、S 波速度を同時に測定できる装置の開発を試みるとともに、この装置をいくつかの岩石供試体に適用させ、その有効性について検討する。

第5章では、岩盤内の地下水挙動のモニタリング手法として、2次元電気探査による連続計測を実施し、各測点の比抵抗変化と降雨との関係について検討を行い、とくに破碎帯部におけるこれらの関係から、透水性の評価法および斜面安定監視システムへの適用性について検討する。

第6章では、電気探査結果をトンネル設計に利用するために、既設トンネルのトンネル坑内で実施した簡易比抵抗結果と岩級区分、岩盤良好度、湧水評価点および実績湧水量などの関係について把握し、室内試験で得られた比抵抗と間隙率および体積含水率の関係を用いて簡易比抵抗測定から得られた比抵抗を変換し、間隙率および体積含水率と実績支保量との関係について検討する。

第7章では、現地で得られた弾性波速度と比抵抗の測定結果を間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法のシステム化を図るとともに、本システムで用いる比抵抗および弾性波速度の物理定数評価式の妥当性を、岩盤モデルを用いた室内試験により検証した結果について述べる。さらに、本システムを既往のトンネル経過地点の地質構造評価に適用し、掘削実績と比較することによって適用性の検証を行った結果を述べる。

第8章では、本研究で得られた結果を統括し、結論とする。

参考文献

- 1) 田中荘一・佐藤信一：土木調査における物理探査の役割，物理探査，Vol.50/No.6，pp.530-543，1997。
- 2) 谷本親伯・中川要之助・村井俊治・橋本俊昭・越智士郎：斜面崩壊と断層に関する一考察，第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.466-470，1990。
- 3) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会：豊浜トンネル崩落事故調査報告書，1996。
- 4) 第2白糸トンネル崩落事故調査委員会：第2白糸トンネル崩落事故調査報告書，1998。
- 5) 遠藤源助：電気探査による岩盤の評価，物理探査，Vol.33/No.5，pp.3-12，1980。

第2章 地質構造評価手法の現状と課題

2.1 はじめに

近年では、比抵抗電気探査や弾性波探査等の物理探査は、トンネル地山やダム基礎岩盤などの評価に広く用いられている¹⁾。本章では、これらの物理探査の歴史と国内外での適用事例、ならびに現状での問題点についてレビューを行う。

岩盤調査において広く用いられている物理探査のうち、電気探査は一番古い歴史を持っており、既に1800年代の初めにイギリスにおいて試みられている²⁾。最初に考案されたのは自然電位による探査方法であったが、当時の測定技術では実用には至らなかった。

1916年、Wennerが2つの電極間に電流を流して、中間に他の電極を埋めてその間の電位を測定する方法を考案した。この方法によって電極の接地抵抗の問題が解決され、電気探査の扉が開かれた。

1929年、Schlumbergerは電気探査を油田の調査に適用し、それ以後、探査結果の解析技術の向上とともに、急速な発展をとげるようになった。

電気探査が建設の分野に取り込まれたのはごく最近のことである³⁾。岩盤の含水状態や粘土の含有量に比抵抗電気探査は鋭敏に反応し、弾性波探査では識別しにくい風化帯や破碎帯などの調査に適しており、今後の発展が期待される。

初期の電気探査では、設定された各測点において垂直方向に変化していく地層の移り変わりに応じて、測定された見かけ比抵抗曲線を解析し地質を構成する地層の厚さとその比抵抗を求め、整理された解析結果を地質学との関連において取りまとめ、調査地域の水理地質学的性状を明らかにした。

垂直探査で測定された見かけ比抵抗曲線は、RS (Resistivity Sounding) 曲線あるいはVES (Vertical Electrical Sounding) 曲線と呼ばれ、その解析にはあらかじめ与えられたモデルに対して計算された理論曲線が用いられる。解析は地質が2層またはそれ以上の水平多層構造を成しているものとし、地質を構成する地層の厚さとその比抵抗とをいろいろに組み合わせ、計算によって2層、3層あるいは4層構造の理論曲線集を作図しておき、現地において測定された見かけ比抵抗曲線をこの理論曲線集と照合することにより地層の厚さと比抵抗が求まる。水平層モデルに対する理論曲線集としてSchlumberger電極配置に対してはC・G・Gの3層曲線集⁴⁾、Flatheの5層曲線集⁵⁾、RIJKSWATERSTAATの3層曲線集⁶⁾などが発表されており、Wenner電極配置に対してはMooney & Wetzelの2層、3層、4層曲線集がある⁷⁾。しかし、実際にはあらゆる条件を満たすだけの曲線集を完備させることは不可能に近いことである。例えば、Mooney & Wetzelの曲線集に収めてある曲線の数は2434本にも達するが、これでもなお十分多数とはいえない。また、測定された見かけ比抵抗曲線と理論曲線集とを照合して、理論曲線集の中から正しい曲線を選び出すことは容易なことではなく、

さらに特定の地域における地下構造の解析や解析結果の検討などには、理論曲線を新しく計算する必要があった。

そこで理論曲線の自動計算についての種々の方法が研究された。まず、水平成層地下構造モデルの表面に置かれた点電流源によって生ずる電位分布が Stefanescu によって解析的に求められた⁸⁾。この電位分布を基にして導かれる見かけ比抵抗の計算式には、ベッセル関数を含む無限積分の項があり、種々の電極間隔についてこの計算を実行しなければならない。これには直接積分、直交関数系による核関数の近似⁹⁾、核関数の差分近似¹⁰⁾などの方法が研究されているが、いずれも計算はかなり複雑である。その後 Van Dam により比抵抗曲線の手計算をめざして、核関数の級数展開による2種類の計算法が提案された¹¹⁾。この方法は Alge によりプログラム化され電子計算機用に実用化された¹²⁾。Mooney 他はやはり級数展開法によって理論曲線を計算し、級数展開の可能性、収束および誤差の評価などについて詳しい研究がなされた¹³⁾。わが国でも小野寺が多項式近似法による理論曲線の計算について研究し⁹⁾、計算プログラムが発表された¹⁴⁾。さらに、小野寺らの研究を踏まえ、牛島らによりミニコン程度の計算機を用いて、理論曲線を手軽に計算できるプログラムが開発された¹⁵⁾。

しかし、これらの理論曲線を用いる方法では、境界条件が複雑な場合や地表面や地層境界が水平でない場合には解釈が困難である。近年では、有限要素法や境界要素法を用いることによって、測定値から岩盤の内部構造を求める方法（インバージョン）と合わせて立体電気配列により探査対象物を取り囲むように電極を配置し、電気探査データから媒体内の媒体内の比抵抗分布を再構成する手法（比抵抗トモグラフィ）が種々検討されている^{16)~20)}。

一方、弾性波探査の歴史は比抵抗電気探査より若干浅く、萩原²¹⁾によると今から150年前にイギリスのマレー（R. Mallet）が地表付近の地質構造を調査することを試みている。また、わが国における弾性波探査の最初の試みは、1929年に今村により秋田県黒川油田において行われたが、地震計の不備もあってよい結果は得られていない。その後、1931年に東京大学地震研究所によって山形県梵字川ダム地点の地震探査（弾性波探査）が行われた。これが建設分野において弾性波探査が利用された最初である²¹⁾。

その後、建設分野の地質調査では屈折法弾性波探査がよく用いられてきた。現在でも、トンネル、ダム、道路、土地造成など、土木構造物建設に対する調査には必ずといってよいほど屈折法弾性波探査が実施されている²²⁾。屈折法弾性波探査が土木地質調査分野でよく使われてきた理由は、(1)地表で実施できる調査であり、どのような地形にでも適用できること。(2)解析には初動走時のみを使用するため、データ取得が比較的容易であること。(3)「萩原の方法」およびその拡張法など、実際の現場データの解析に適した方法が早くから確立されていたこと。(4)弾性波速度と地盤の力学特性の関係について調査・研究例が多く調べられ、速度値を土木工学的に利用するための研究が多くなされてきたことなどが挙げられる。

従来の屈折法地震探査でのデータ解析に用いられている手法である「萩原のはざとり法」

およびその拡張法では、弾性波速度が深くなるほど早くなることや、地形が水平で速度境界の凹凸もあまり大きくないことを仮定して解析を行う。そのため、地形や速度境界の凹凸が大きい場合には、誤差を生じる可能性がある²³⁾。この問題点を解決するため、コンピュータを利用した解析法（高精度屈折法解析）が開発された²⁴⁾。この手法では、従来のように地下の速度分布を層構造と仮定せず、深度方向および横方向に連続的に行う手法である。

このような高精度屈折法解析を用いることにより、従来の解析手法に比べて現実に近い地山状態の分布を推定することが可能となったが、更なる精度向上を目指して弾性波トモグラフィ手法が開発された。弾性波トモグラフィは、対象とする地盤を取り囲むように起振点や受振点を配置する探査方法である。したがって、深部ほど速度が大きくなるという前提条件が成り立たない場所では適用できないといった屈折法の原理的限界は、弾性波トモグラフィにはなく、屈折法に比べて地盤速度の分布を高精度かつ詳細に把握できるという特徴を呈している^{25),26)}。

2.2 既往の物理探査による地質構造評価手法の概要

2.2.1 国内における地質構造評価事例

近年、弾性波・電磁波・比抵抗などを用いて地下情報を映像化する研究が進み、探査事例も数多く報告されている。その探査手法については、すでにある程度確立されている。しかし、その探査結果は、地盤の状況を定性的に推定するために利用されると言うレベルにとどまっている。ここでは、国内での地質構造評価事例について評価の現状についてレビューを行った。

可視化技術において、島ら²⁷⁾によって、比抵抗トモグラフィが風化層、硬い岩や断層等の地下構造の把握、特に破碎帯ゾーンや断層のような連続した低比抵抗体の検出に効果があり、また、塩水トレーサの注入により浸透ゾーンの断面分布を明瞭に把握することが可能であることが明らかにされた。さらに、比抵抗と弾性波速度といった異なった物性の分布を併せて解釈することによって、地盤状況をより正確に把握できることも確認されたと述べている。

谷本ら²⁸⁾は、比抵抗および弾性波トモグラフィの結果を比較検討し、それぞれの特性を利用して不連続面の性状、分布特性を総合的かつ詳細に把握しようとしており、原位置において岩質の区分は比抵抗分布からは推定可能であるのに対し、弾性波分布および減衰分布からは困難であるが、亀裂の少ない良好な岩盤は、比抵抗および減衰分布からその範囲が特定した。また、亀裂の多い岩盤は、比抵抗および減衰分布からその範囲が特定されたが、速度分布からは、水平方向に広がる亀裂に対してその範囲の特定が困難であると述べている。

日比谷ら²⁹⁾は、比抵抗トモグラフィの原位置試験を、岩相境界の前後で湧水状況が顕著に異なる流紋岩サイトにおいて実施し、同一サイトにおいて実施した弾性波トモグラフィ結

果と併わせて検討することにより、岩盤の水利地質構造評価を試み、その結果を試験サイト周辺の地下水分布状況や水質分析結果と比較している。比抵抗トモグラフィにより、岩盤の含水状態の違いを検知でき、また、比抵抗トモグラフィと弾性波トモグラフィを重ね合わせて検討することにより、岩盤の水利地質構造を評価できると述べている。

鈴木ら³⁰⁾は、断層の位置、断層運動に伴う地層の変位量、変形構造の検出に有効な探査法の開発を目的にいくつかの断層調査地点において主として CSA-MT (Controlled Source Audio-frequency Magneto Telluric) 法、高密度電気探査法、比抵抗トモグラフィ法を行い、各探査法の活断層調査への有効性を検討している。CSA-MT 法を用いて 2 次元解析による比抵抗断面を求めた結果、堆積岩・火成岩などの岩種による比抵抗の相違を捉え、断層の境に明瞭な比抵抗境界が認められるなど大域的な地質構造を把握でき、これにより、深度 500 ~ 1000m を対象とした地表からの概略調査として有効であると述べている。また、高密度電気探査法・比抵抗トモグラフィ法を適用し、ボーリング・トレンチ調査結果との対比を行い、基盤岩および第四紀層中の粘土・シルト・砂・砂礫の比抵抗差をとらえ、断層の位置、断層運動に伴う基盤岩・第四紀層中の変位量、第四紀層の撓曲構造を検出でき、これにより、深度 10m を対象とした詳細調査に有効であると述べている。また、比抵抗トモグラフィ法による地下水流動のモニタリングを実用化するため、室内模型実験及びフィールド実験により有効性を検討している。

山口ら³¹⁾は、グラウチング試験対象岩盤において、比抵抗探査によるグラウチング効果判定の可能性について検討するとともに、図 2-1 に示すようにグラウチング前後に実施した、

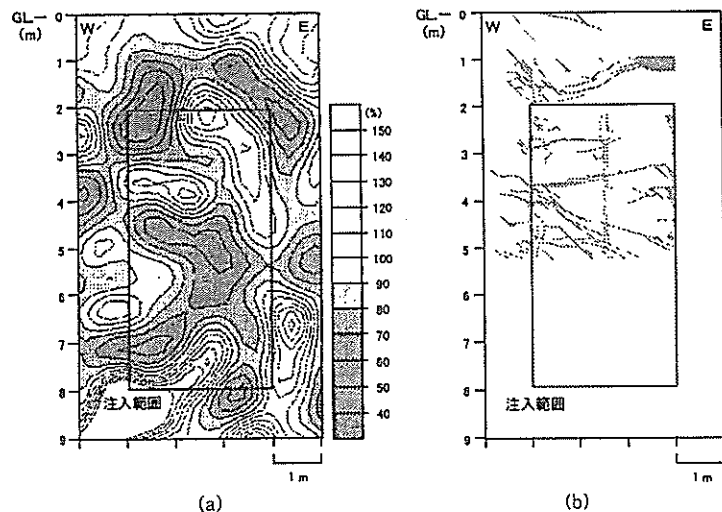


図 2-1 比抵抗変化率分布(a)とグラウト脈分布(b)の比較³¹⁾

比抵抗トモグラフィの結果から算出した比抵抗変化率分布とグラウチング後の試験サイトにおける開削調査により判明したグラウト脈分布を比較し、比抵抗トモグラフィのグラウチング効果判定方法としての適用性について検討しており、比抵抗トモグラフィによるグラウチング注入領域推定の可能性を見いだすことができた述べている。

坂下ら^{32),33)}は幅広い周波数帯域の電磁波を利用する帯磁率と比抵抗の 2 種類の物性を把握するトモグラフィ手法に関して、主として解析理論と数値実験結果について検討し、図 2-2 に示すシステムによる EM(Electro Magnetic)トモグラフィでは、インバージョンにおける解の一意性を高めるために、3 成分測定が有効であり、比抵抗のイメージングでは数値実験の結果、アルゴリズムが妥当であると述べている。また、複雑な地質構造を持つ地域の比抵抗構造を把握するために実施した適用実験例、および都市部での埋設管の探査に適用した結果について検討し、現場実験では、実測したデータから比抵抗イメージングを行い、検層結果のみでは把握しきれない地下の比抵抗構造を把握することができると述べている。

佐々木³⁴⁾は、均質大地モデルの感度分布を基に比抵抗の (3 次元) 探査特性について考察し、次に 3 次元モデルを用いた 2 次元インバージョンの数値シミュレーションにより、誤った解釈に結びつきやすい偽像の具体例を示している。すなわち、2 次元インバージョンでは解析断面の奥行方向には均質な 2 次元構造を仮定しているの、実際の地下構造が 3 次元的に不均質な場合にはそれが偽像になって解析断面上に現れる。さらに、比抵抗トモグラフィにおいてはボーリング孔周辺の 3 次元不均質体も偽像の原因となりうる。偽像の発生を抑制して 2 次元インバージョンの信頼性を高めるためには、調査地域の大域的な地質構造を考慮した探査を行う必要があると述べている。

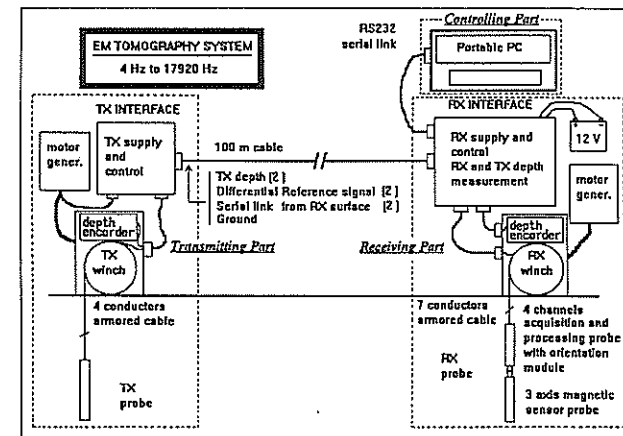


図 2-2 EM 測定装置の概念図³³⁾

そこで國井ら²⁰⁾は、3次元有限要素法ポテンシャル解析手法に、拡張カルマンフィルタを用いた逆解析のアルゴリズムを導入することにより、3次元領域の比抵抗を同定するプログラムを開発し、調査横坑内のボーリング孔間比抵抗トモグラフィによる地質構造評価を行っている。

松井ら³⁵⁾は、岩石の比抵抗は間隙率と膠結係数と密接な関係があり、間隙率が小さい新鮮な岩石の比抵抗は高く、風化や変質で間隙率が大きくなると比抵抗は低くなると述べている。また、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、岩石の比抵抗を弾性波速度に変換できる理論式を確立し、比抵抗探査結果を弾性波速度に変換し、トンネル経過地での地質構造評価を行っている。

弾性波反射法の建設分野への適用事例として、楠見ら^{36),37)}は軟弱地盤を対象として実施されるセメントミルクと粘土土の機械攪拌による地盤改良の改良効果の確認にS波反射法を実施し、得られたデータを用いて地質構造解析を実施している。

また、トンネル掘削時の切羽前方調査手法として、芦田ら^{38),39)}は反射面イメージングの解析手法として開発された等走時面を用いたアルゴリズムと3成分受振器を用いた弾性波反射法によるHSP (Horizontal Seismic Profiling) 探査手法を開発し、多くのトンネル掘削現場で成果を挙げている。

2.2.2 海外における地質構造評価事例

海外においても、近年では複数の物理探査を実施して総合的に地質構造評価を行う事例が増えている。次に、海外での動向についてレビューを行った。

Carpenterら⁴⁰⁾は、シカゴ西方郊外の市営ごみ廃棄を密閉する、厚さ1.2mの突固めた粘土を含む被覆層の薄化又は割れ目部分を確認するために比抵抗電気探査と屈折法弾性波探査を実施した。

Biehlerら⁴¹⁾は、重力、磁気、弾性波、MT、比抵抗探査法によってえられたデータを駆使して図2-3に示すような調査地点の地質構造モデルをつかった。そのモデルは実際の堆積物の存在によって特徴づけられ、初期の調査による知見が正しいことが実証された。

Sheng⁴²⁾は、モデル地点の堆積岩のモデリングを統一に行うための有効媒体理論を定式化した。この理論ではArchieの法則を導出するのみならず、S波とP波の相関を正しく表現し、観測結果と一致するWyllie方程式に対する修正も予測した。

Withersら⁴³⁾は、オレゴン北部の有望な標題鉱床を種々な物理探査技術を総合して発見した。個々の技術では構造や岩相の情報を特定できなかったが、それらを総合して探査基盤を形成した。重力とMTデータによるモデリングから被覆玄武岩の厚さを定めた。過渡現象電磁法から表層不均質によるスタティックシフトを算定した。地震反射法では良好な断面を得られなかったが、地震波特性にMTデータを加えて解釈した。

Dengら⁴⁴⁾は、中国東部江蘇省を含む標題地域では大陸型盆地下に石油の主要対象である厚い海洋型炭酸塩層が堆積するが、地震探査では変形作用による複雑な地下構造の解明は

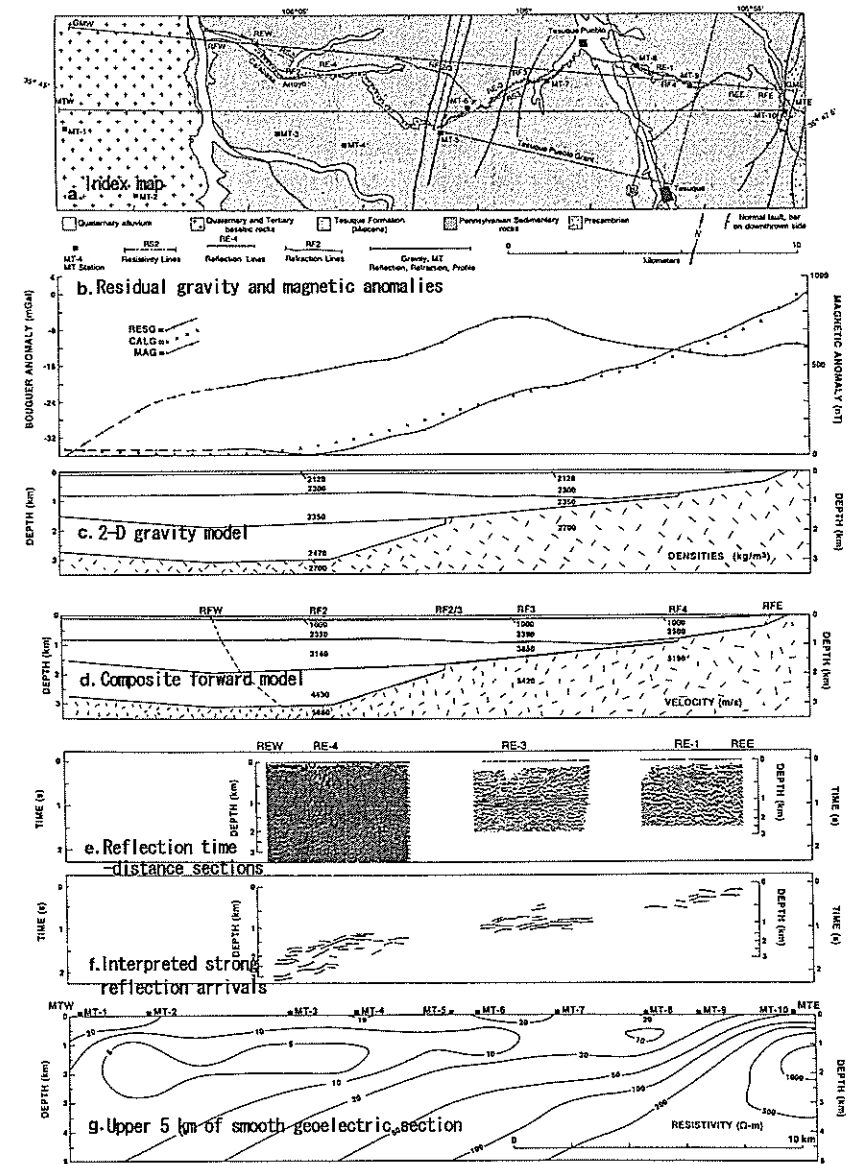


図2-3 Biehlerらによる各物理探査結果³⁷⁾

困難であったこの地域で、Wide-line 調査や三次元地震探査等の新技術を使い、更に屈折地震、MT、空中磁気および重力法を含む総合探査を行い良い成果を示した。

Chanpos ら⁴⁵⁾は、飲料水供給が重要問題である調査地域で、図 2-4 に示す測線で実施した直流比抵抗、地震屈折、重力及び坑井検層などの物理探査データにより盆地特性を調べた。重力モデルから湖成層と粒状湖成層帯水層間、及び粒状帯水層と玄武岩包含層間の境界面が分かった。比抵抗境界は湖成層と不完全被圧帯水層の塩水と淡水間の接触帯に相当し、それは帯水層への湖成層からの塩水の垂直流の存在と相関した。

Demanet ら⁴⁶⁾は、複数の物理探査手法によって、ベルギー-Roer 地溝における活断層を調査した。手法としては、電気探査や電磁波探査、屈折波探査、電気探査トモグラフィ、地中レーダ、反射波探査を用いた。トレンチなどの地質学的調査によって、これらの手法の有効性を検討した。その結果、電気探査や電磁波探査、屈折波探査は数 m の範囲で断層の位置を推定していた。最も有効な手法は反射波探査で、最大深度 120m までの断層分布を明らかにできることが分かった。

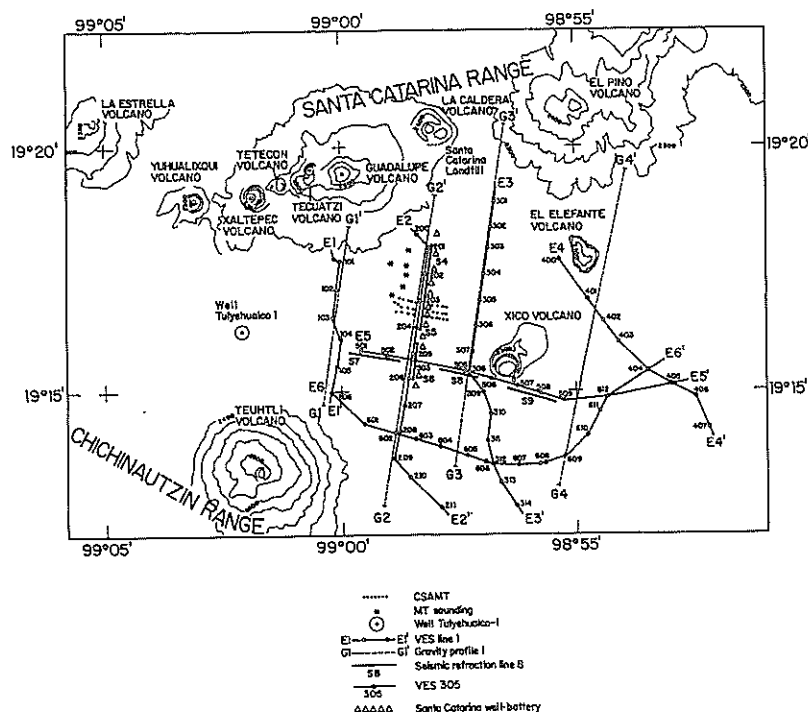


図 2-4 Chanpos らによる複数の物理探査測線配置⁴⁵⁾

また、現位置調査結果を室内試験で補完する事例として、White ら⁴⁷⁾は地表と坑井地質における密度、地震速度、及び導電率の室内測定によって、ニッケル帯の調査における地震反射と EM データを補った。これによりこの鉱床帯の岩石は、鉱床帯を包む始生代基盤岩より一般に高地震反射率で導電性であることが分かった。地震/EM の総合解釈により当地点の地質構造について解明した。この研究結果により地震と深部探査 EM 法が、ニッケル帯についての地域的探査道具として如何に活用されるかを論証した。

さらに、電気探査ならびに弾性波探査を単独に実施しても、複数の電極配置や物理量を測定することにより総合的に評価する試みも実施されている。Bevc⁴⁸⁾は、地下水の挙動を調べるために、塩水を注入してボアホールと地表間の電気比抵抗のモニタリングを行った。ボール-ボールとボール-ダイポール電極アレーを用いた 2 つの測定を行った。実験の結果、比抵抗の測定は、流体力学的測定では検出できない地下水の流れを良く同定できることを示した。

Salem⁴⁹⁾は、ドイツのシュレスウィッヒホルスタイン州において、表土とその下の土層に対して弾性波探査を行い、P 波と水平 S 波の伝播速度を測定した。測定値およびこれから計算した弾性係数等の数値の幅とそれぞれの層の空隙率とポアソン比の関係を求めた。P 波速度と空隙率の関係は Watkins の式により求めた。

2.3 既往の物理探査による地質構造評価手法の課題

建設分野において実施される物理探査としては、弾性波探査が主であるが、近年では水みち、地すべり、火山地帯の鉱化作用における変質帯および空洞等の調査に、電気探査が実施されるようになってきた。ここでは、建設分野への電気探査の適用に際して問題となる、岩盤の電気的性質の研究や検討課題について述べる。

電気探査の原理における因子として基本となるのは、大地の電位分布と分極である。しかし、大地の電位分布は土質・地質だけではなく空隙に含まれる水質とその量に大きく支配され、さらに媒質である土質・岩質と水質との化学反応によって発生する電位にも影響される。特に一部の鉱物や粘土鉱物などは分極電位が著しい。この現象は他の物理探査である弾性波探査と弾性係数、重力探査と密度、放射能探査と放射能の関係に基づく探査原理と基本的に相違していることである。

建設分野における探査対象および必要とする情報として、次のようなことが考えられる。例えば、構造物基礎の設計・施工に際しては、地質構造、支持層の確認、地盤定数の決定、液状化の評価、地盤の地震時挙動予測、地下水分布、地下空洞、風化岩・変質帯の分布および地下埋設物である。斜面安定としては、基盤・風化岩の分布、表層崩壊・崩積土すべり分布、落石・土石流および切り取り施工量の決定である。また、施工関係では地盤改良、グラウト効果、構造物根入れ深さ、橋脚の健全度および地下水の対策等である。このような目的に対して、いかに電気探査を適用し必要な情報を得るかが問題となる。そのために

は、目的に応じた探査の方法を考えるとともに、解析方法も要求に適したものを考慮する必要がある。

一般に、建設分野の探査では土質や地質構造を知ることが主になっており、力学的な情報が常に要求される。一方、資源探査では石油・石炭や鉱床という化学的成分の分布状態である。このように建設分野と資源分野では探査の目的が異なっている。また、建設分野での探査深度は主に地表から数十 m、深い場合でも数百 m 程度であり、微細な地質構造までの解析が求められている。したがって、資源探査で行っている探査方法、解析方法および解釈方法をそのまま建設分野に適用したのでは、目的通りの良い結果は得られない。このように目的の異なる方法によって探査を行ったために成果が上らず、電気探査に対する信用が得られなかったこともあった。そのため、建設分野での評価に適した探査方法の研究が必要である。

以上を総合して、遠藤⁵⁰⁾は今後建設分野において電気探査の適用性を拡大していくには、(1)土質、風化岩、その他の変質帯の電気的特性の検討と弾性波速度、力学的な性質との関係。(2)測定精度の高い測定器の開発。(3)探査目的に対応した電極配置とその表示方法およびデータ処理、解析ならびに解釈の検討等が必要であると述べている。

石村ら⁵¹⁾は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、(1)一般の地下水程度の比抵抗で浸透された状態の比抵抗は、浸透水の比抵抗の影響をほとんど受けない。(2)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。(3)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が大きく異なるが、水分飽和度が約 70%以上の高い状態であれば、比抵抗から岩石の有効間隙率を把握できるものと考えられる。(4)地山比抵抗が低く大きな値の変化を伴わない泥岩・頁岩などの地山では、地山比抵抗から風化・変質、割れ目の状態などの地山状態を推定することは難しいものと考えられる。(5)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と実施工時の切羽観察結果の関係から、風化・変質の程度、割れ目の状態や地山等級を分類できる可能性があることがわかった、と述べている。さらに、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と述べている。

一方、弾性波探査による事前調査において、トンネル施工時と事前調査結果が異なり、事前調査時の結果が不適切となる原因として、鈴木ら⁵²⁾は、(1)地質調査技術の限界。(2)不十分な地質調査。(3)事実と解釈の区別。(4)地質解釈は人によって異なる。(5)残された問題点の成果物への明記を挙げている。また中川ら⁵³⁾は、(1)地質調査技術の限界。(2)不十分な地質調査。(3)地質技術者の地山解釈に関する個人差としてまとめている。

トンネルの実施工結果との比較において、高橋⁵⁴⁾は屈折法の制約の中で、「弾性波速度は

亀裂を含んだ岩盤の平均速度として測定されるため、岩石の種類、地層の分布、走向傾に關連して表現されないと判断を誤る。例えば、速度が 3.7km/sec であっても、粘板岩（あまり悪くない）であるか、チャート（破碎構造）であるかによって内容が大いに異なる」としている。同様に中川⁵⁵⁾は、調査担当者に対するヒアリングを実施し、その中で「(変成岩である)片岩地山における弾性波探査の速度値は、トンネル掘削による応力開放時の岩盤の状態と対応していない（断層などで揉まれている場合に多い）場合がある」ことを述べている。また、竹内ら⁵⁶⁾は、トンネル施工中に孔内弾性波を実施し、その結果が「事前調査による地山弾性波速度の 3~6 割程度に相当する」とし、その割合が砂岩と頁岩や粘板岩では変わる可能性について述べている。

これら研究を踏まえて城間ら⁵⁷⁾は、事前設計時と実施工時の支保パターンと、施工前および施工中の弾性波速度値との関係を整理し、支保変更の割合は、深成岩より第三紀層において多く、また第三紀層より中古生層において多いことを傾向的に明らかにした。また、トンネル施工前後に実施された弾性波探査、孔壁弾性波探査、簡易弾性波探査、P 波検層、孔間トモグラフィの結果を整理することで、トンネル掘削によるゆるみ程度が地質によって異なる傾向があることも明らかにした。

2.4 併用探査による地質構造評価の現状と課題

先に述べたように、近年では複数の調査を実施して、総合的に地質構造を評価する事例も増えてきている。ところが、これらの調査結果を数学的に連立して評価される事例はまだ多くない。既往の評価事例として、弾性波速度と比抵抗の関係については、松井らが岩盤の比抵抗を弾性波速度に換算する手法を提案し、花崗岩など岩石の比抵抗が大きい場合にはこの手法がトンネル地山区分に適用しうる可能性を示している^{58),59)}。また、岩石が電気伝導性を持っている場合について、比抵抗を弾性波速度に換算する理論式を比抵抗検層データと速度検層データを用いて確立し、これをもとに堆積岩地層の地山区分に適用する研究も行っている⁶⁰⁾。

さらに岩盤の比抵抗と弾性波探査結果による総合評価として羽竜ら⁶¹⁾は、弾性波速度に関する物性モデルに Gassman-Biot の理論式を、電気比抵抗に関する物性モデルに Bruggen-Hanai の理論式を用いた「電気比抵抗-弾性波速度モデル (R-V モデル)」と称する複合モデルを考案し、花崗岩地盤においてその適用性について検証を行っているが、まだ他岩種への適用までには至っていない。

このように、複数の調査結果を定量的に評価する手法の開発が望まれるとともに、その適用例の蓄積が重要である。

2.5 まとめ

本章では、岩盤調査に用いられる電気探査と弾性波探査を中心にこれらの物理探査の歴史と国内外での適用事例、ならびに現状での問題点についてレビューを行った。歴史的には物理探査は資源探査の分野で、まず発展してきた。ところが建設分野の探査では土質や地質構造を知ることが主になっており、力学的な情報が求められる。一方、資源探査では石油・石炭や鉱床という化学的成分の分布状態である。この様に建設分野と資源分野では探査の目的が異なっている。また、建設分野での探査深度は主に地表から数十 m、深い場合でも数百 m 程度であり、微細な地質構造までの解析が求められている。したがって、資源探査で行っている探査方法、解析方法および解釈方法をそのまま建設分野に適用したのでは、目的通りの良い結果は得られず、建設分野での評価に適した指標の提案とその適用事例の蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 田中荘一・佐藤信一：土木調査における物理探査の役割，物理探査，Vol.50/No.6，pp.530-543，1997.
- 2) 萩原尊禮：物理探査法，現代工学社，pp.135-137，1951.
- 3) 物理探査学会：図解物理探査，pp.77-84，1989.
- 4) Compagnie Generale de Geophisique: Abaques de sondage electrique, Geophysical Prospecting, Vol.3, Supplement No.3, 1955.
- 5) Flathe, H.: Five-layer master curves for the hydrogeological investigation of geoelectrical resistivity measurements above a two-storey aquifer, Geophysical Prospecting, Vol.11, No.4, 1963.
- 6) RIJKSWATERSTAAT, THE NETHERLANDS: Standard graphs for resistivity prospecting, E. A. E. G., 1969.
- 7) Mooney, H. M., and Wetzal, W. W.: The potentials about a point electrode and apparent resistivity curves for a two-, three- and four-layered earth. One volume and one atlas, University of Minnesota Press, Minneapolis, Minnesota, 1956.
- 8) Stefanescu, S.: en collaboration avec C. et M. Schlumberger, Sur la distribution electrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain a couches horizontales homogenes et isotropes, Journal de Physique et Radium, Serie VII, Tome 1, 1930.
- 9) Onodera, S.: numerical analysis of relative resistivity for horizontally layered earth, Geophysics, Vol.28, pp.222-231, 1963.
- 10) Nabighian, M. N.: The application of finite forward differences in the resistivity computations over a layered earth. Geophysics, Vol.31/No.5, p.971, 1966.
- 11) Van dam, J. C.: A simple method for the calculation of standard graphs to be used in geoelectrical prospecting, Geophysical Prospecting, Vol.13/No.1, pp.37-65, 1965.
- 12) Argel, S. M.: Two computer programs for the calculation of standard graphs for resistivity prospecting, Geophysical Prospecting, Vol.15/No.1, pp.79-91, 1967.
- 13) Mooney, H. M., Orellana, E., Pickett, H., and Tornheim, L.: A resistivity computation method for layered earth models, Geophysics, Vol.31/No.1, pp.192-203, 1966.
- 14) 小野寺清兵衛：デジタル計算機による結果解析，日本鉱業会誌，Vol.85/No.976，pp.7-10，1969.
- 15) 牛島恵輔・牛島和夫：水平多層構造における RS 曲線の計算，物理探査，Vol.30/No.1，pp.1-11，1977.
- 16) 物理探査学会：図解物理探査，pp.192-198，1989.
- 17) 佐々宏一・芦田譲・菅野強：物理探査，森北出版，pp.128-196，1993.
- 18) 島裕雅・梶間和彦・神谷英樹：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，pp.42-52，1995.
- 19) 岡本良夫・野口康二・寺町康昌・赤羽秀郎・安久正紘：境界要素法による 3 次元比抵抗法のための効率的電位計算法，物理探査学会第 92 回学術講演会論文集，pp.185-189，1995.
- 20) 國井仁彦・大友譲・谷本親伯：岩盤調査への比抵抗電気探査の適用における基礎的問題ー逆解析のアルゴリズムと三次元有限要素法についてー，土木学会論文集，No.582/III-41，pp.11-21，1997.
- 21) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，ケーススタディ編，第 6 章 土木調査，p.1133，1998.
- 22) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，手法編，第 2 章 屈折法地震探査，pp.117-118，1998.
- 23) 林宏一・斎藤秀樹：高精度屈折法地震探査の開発と適用例，物理探査，Vol.51/No.5，pp.471-492，1998.
- 24) 日本トンネル技術協会：北陸新幹線飯山トンネルの合理的な設計施工に関する研究報告書，pp.5-113，2000.
- 25) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，手法編，第 15 章 ジオトモグラフィー，pp.749-750，1998.
- 26) 武田裕幸・今村達平：応用地学ノート，共立出版，pp.305-378，1996.
- 27) 島裕雅：比抵抗トモグラフィの基礎と応用，物理探査，Vol.42/No.6，pp.442-457，1989.
- 28) 谷本親伯・岸田潔・旗持和洋・國井仁彦・大友譲：比抵抗およびトモグラフィを用いた岩盤内不連続面の評価，第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.291-295，1996.

- 29) 日比谷啓介・稲葉武史・稲生道裕・戸井田克・升元一彦：比抵抗トモグラフィによる岩盤の水利地質構造評価について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，岩の力学連合会，pp.331-336，1994.
- 30) 鈴木浩一・東貞成・志田原巧：比抵抗トモグラフィ法の地下水流動のモニタリングへの適用，電力中央研究所報告，U97065，電力中央研究所，1998.
- 31) 山口嘉一・今林豊・佐藤弘行・吉田等：比抵抗によるセメントグラウチングの効果判定に関する基礎的研究，ダム工学，Vol.9/No.2，pp.125-136，1999.
- 32) 坂下晋・福岡晃一郎：EM トモグラフィによる帯磁率と比抵抗のイメージング技術 (1) -数値実験による基礎的検討-，物理探査，Vol.51/No.5，pp.493-506，1998.
- 33) 坂下晋・福岡晃一郎：EM トモグラフィによる帯磁率と比抵抗のイメージング技術 (2) -模型実験および適用例-，物理探査，Vol.51/No.5，pp.507-517，1998.
- 34) 佐々木裕：比抵抗の2次元インバージョンにおけるPitfall -3次元構造に起因する偽像-，物理探査，Vol.46/No.5，pp.367-371，1993.
- 35) 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.
- 36) 楠見晴重・芦田譲・西田一彦・江原竜二：S波反射法による地盤中の薄いセメント改良層の探査に関するシミュレーション解析とその適用性，土木学会論文集，No.624/III-47，pp.245-253，1999.
- 37) 楠見晴重・芦田譲・西田一彦・河口琢哉・林徹明：S波反射法による地盤中のセメント改良層の連続的な強度分布の評価法，土木学会論文集，No.666/III-53，pp.333-338，2000.
- 38) 芦田譲・松岡俊文・楠見晴重：弾性波の3成分受振におけるトンネル切羽前方の高精度イメージング，土木学会論文集，No.680/III-55，pp.123-129，2001.
- 39) 田中一雄・山田敏之・大友譲・中村真・芦田譲：複雑な堆積地盤におけるトンネル切羽前方探査の適用，第12回トンネル工学研究発表会，土木学会，pp.195-200，2002.
- 40) Carpenter, P. J., Kaufmann, R. S. and Calkin, S. F.: Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques, Geophysics, Vol.56/No.11, pp.1896-1904, 1991.
- 41) Biehler, S., Ferguson, J., Aiken, C. L., Baldridge, W. S., Jiracek, G. R., Martinez, M., Gilpin, B., Braile, L. W. and Luyendyk, B. P.: A geophysical model of the Espanola Basin, Rio Grande rift, New Mexico, Geophysics, Vol.56/No.3, pp.340-353, 1991.
- 42) Au Sheng P.: Consistent modeling of the electrical and elastic properties of sedimentary rocks, Geophysics, Vol.56/No.8, pp.1236-1243, 1991.
- 43) Withers, R., Eggers, D., Crebs, T. and Fox, T.: A case study of integrated hydrocarbon exploration through basalt, Geophysics, Vol.59/No.11, pp.1666-1679, 1994.
- 44) Deng, D., Ou, Q.: Geophysical prospecting for petroleum in marine carbonate areas of the lower Yangtze region of southern China, Geophysics, Vol.60/No.5, pp.1306-1312, 1995.

- 45) Campos-Enriquez, J. O., Delgado-Rodriguez, O., Chavez-Segura, R., Flores-Marquez, E. L., Gomez-Contreras, P., Bir, Ch F. S.: The subsurface structure of the Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data, Geophysics, Vol.62/No.1, pp.23-35, 1997.
- 46) Demanet, D., Renardy, F., Jongmans, D., Vanneste, K., Camelbee, Ck T. and Meghraoui, M.: The use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graben, Geophysics, Vol.66/No.1, pp.78-89, 2001.
- 47) Au White, D., Boerner, D., Wu J., Lucas, S., B Errer, E., Hannila, J. and Somerville, R.: Mineral exploration in the Thompson nickel belt, Manitoba, Canada, using seismic and controlled-source EM methods, Geophysics, Vol.65/No.6, pp.1871-1881, 2000.
- 48) Bevc, D., and Morrison, H. F.: Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment, Geophysics, Vol.56/No.6, pp.769-777, 1991.
- 49) Salem, H. S.: Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments, determined from seismic compressional and shear wave velocities, Geotechnique, Vol.50/No.4, pp.461-463, 2000.
- 50) 遠藤源助：電気探査による岩盤の評価，物理探査，Vol.33/No.5，pp.3-12，1980.
- 51) 石村利明・宮川順一・真下英人：電気探査によるトンネル地山評価，土木技術資料，Vol.41/No.5，pp.32-37，1999.
- 52) 鈴木守・富田宏夫：トンネル地質調査の性格と問題点(2)，トンネルと地下，Vol.24/No.10，pp.49-59，1993.
- 53) 中川浩二・保岡哲治・北村晴夫・三木茂・藤本睦・木村恒雄：トンネル事前設計における地質調査の問題点とその評価に関する研究，土木学会論文集，No.658/VI-48，pp.33-43，2000.
- 54) 高橋彦治：地質から見たトンネル工事のすべてー地質工学的アプローチー，施工技術，Vol.10/No.1，1977.
- 55) 中川浩二：弾性波速度分布によるトンネル岩盤の事前予測と施工時の岩盤評価との関係，テーマ「応用地質分野における物理探査の再評価」ー物理探査結果の工学的解釈を巡る諸問題，日本応用地質学会，2001.
- 56) 竹内智明・佐治嘉朗・大橋弘紀・木村正樹：近畿地方の美濃・丹波帯，四万十帯トンネルにおける地山評価と実施工の対比，日本応用地質学会関西支部平成13年度講演会予稿集，2001.
- 57) 城間博通・赤木歩・岡部幸彦・中西昭友：支保実績から分析した弾性波速度評価の一考察，トンネルと地下，Vol.33/No.9，pp.49-57，2002.
- 58) 内浦慎一・谷口親平・松井保・朴三奎：比抵抗高密度探査結果の定量的評価によるトンネル地山区分手法について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，岩の力学連合会，pp.1-6，1994.

- 59) 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，土木学会，pp.326-330，1995.
- 60) 松井保・朴三奎：比抵抗高密度探査データによる地山区分手法の研究，第 29 回土質工学研究発表会講演論文集，pp.153-154，1994.
- 61) 羽竜忠男・西川貢：電気比抵抗弾性波速度モデルによる変形係数及び透水係数の地下空間分布の推定，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.81-88，2003.

第 3 章 室内試験による岩石の比抵抗および弾性波特性の把握

3.1 はじめに

弾性波速度と岩石の物理特性の関係については調査・研究が多くなされており，弾性波速度から設計に用いる岩盤の力学値への換算も数多く提案されている．一方，電気探査は，岩盤の含水状況を精度よく把握できるため，弾性波探査と並び，近年では建設分野においても多く実施されるようになってきた．しかしながら，弾性波速度と異なり，比抵抗と岩盤物性値との関係については定量的に解明されていないのが現状である．そこで本章では，室内試験において種々の岩種の岩石供試体を用いて含水状態を変化させながら弾性波速度と比抵抗を測定し，これらの値と飽和度，間隙率の関係について検討した^{1),2)}．

さらに，岩盤は節理，層理，微小亀裂などの顕著な構造特性を持っている．岩盤は本質的には不連続体であり，亀裂性岩盤を対象とする場合，岩盤の構成要素である“岩石”および“不連続面”ならびに，その複合体としての“岩盤”の性状を把握しておく必要がある．特に，後述する比抵抗特性については地質によって異なるパラメータを幾つか含んでおり，数%程度の間隙率の岩石供試体による室内試験で得られた比抵抗特性を，岩盤評価に適用するためには十分な精度を有しているとはいえず，極力幅広い間隙率で評価することが望ましい³⁾．

そこで本研究では，不連続面に種々の枚数の濾紙を介在させて，不連続面の開口幅を変化させた人工不連続面モデルと，電気マッフル炉で加熱処理を施す事により，岩石内部に微細な開口亀裂を発生させ，岩石供試体の有効間隙率を増加させて作成したポーラスモデルによって亀裂性岩盤を模擬し，比抵抗特性を検討した．

3.2 実験装置の概要

本研究では，トンネル掘削切羽およびボーリングコアから採取した岩塊を，ボーリングマシンおよびダイヤモンドカッターを用いて，直径 50mm，高さ 100mm の円柱に整形した岩石供試体を用いた．使用岩石供試体の詳細については後述する．また，比抵抗および弾性波速度の測定に先立ち，強制乾燥状態の空中重量，強制湿潤状態の空中重量，強制湿潤状態の水中重量を測定し，使用岩石供試体の各物性値を調べた．なお，強制湿潤状態の空中重量とは，図 3-1 に示すような真空ポンプまたはタンクアスピレーターを用いて減圧することによって真空状態にしたデシケータ内で，供試体を水道水に 96 時間以上浸した後の供試体の空中重量である．また，強制乾燥状態の空中重量とは，乾燥炉内で 24 時間以上 110℃ で加熱乾燥させた供試体の空中重量であり，強制湿潤状態の水中重量とは，強制湿潤状態の供試体を図 3-2 に示すような電子天びんおよび水槽を用いて測定した重量である．

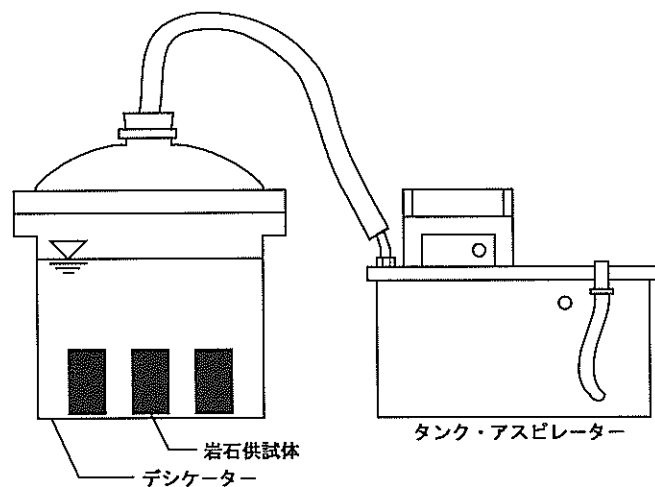


図 3-1 真空脱泡装置

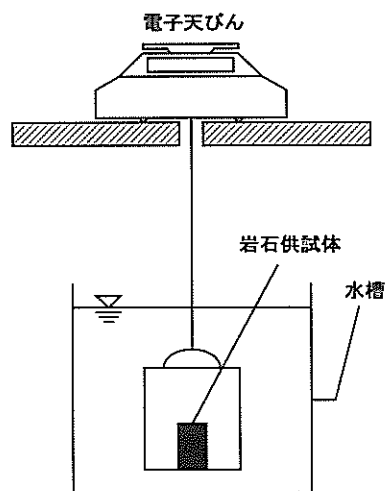


図 3-2 水中重量の測定方法

比抵抗の測定方法は、真空ポンプまたはタンクアスピレーターを用いて 96 時間以上減圧吸水することによって飽和させた岩石供試体を図 3-3 の比抵抗測定法の原理により飽和状態から自然乾燥で異なる含水状態における電流・電圧を測定し、式 (3.1) を用いて比抵抗を求めた。

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{L} \quad (3.1)$$

ただし、 ρ : 比抵抗 $[\Omega \cdot m]$

I : 電流値 $[A]$

V : 電圧値 $[V]$

L : 電位電極間の長さ $[m]$

S : 供試体の断面積 $[m^2]$

比抵抗測定中は、岩石供試体の含水状態を維持するために、底部には水道水を張り、上部に蓋をして容器内の湿度を安定させて密閉するアクリル型箱型測定容器を用いた。比抵抗サンプルホルダの詳細については後述する。

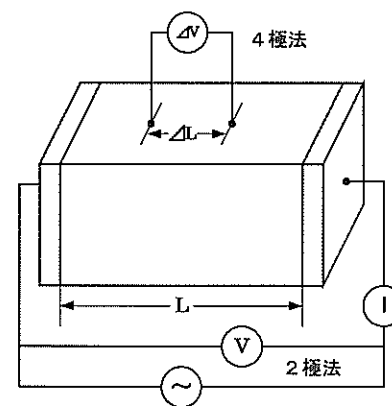


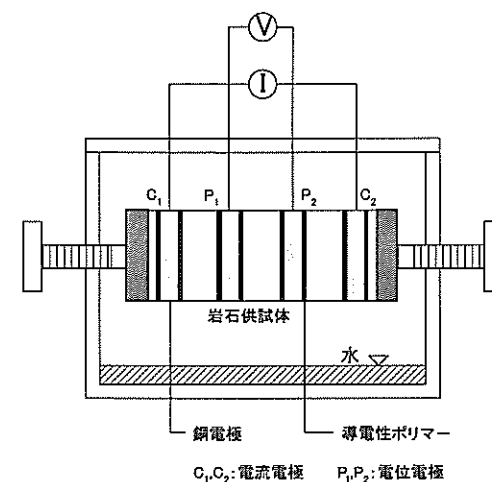
図 3-3 比抵抗測定法の原理

岩石試料の比抵抗測定は、個々の研究者^{4)~9)}の考えにもとづいてそれぞれ異なる測定法が採用されており、標準的な比抵抗測定法というものはまだ確立されていないのが現状である。サンプルの比抵抗の測定としては図 3-3 に示す 2 極法⁴⁾と 4 極法がある。2 極法はサンプルの両端に電極を取り付けて、電極間の電位差とサンプルに流れる電流とを測定する方法である。4 極法は電流を流す電極の他に二つの電位電極をサンプルに接触させ、その電極間の電位差を測定する方法である。2 極法では接地抵抗や誘電分極の影響など電極とサンプルとの境界の影響が測定値に入るので、一般に測定精度は高くない。そのため、サンプルの比抵抗の測定では 4 極法が標準的に使用されている。また、正確な比抵抗を測定するための注意事項としては、(a) 波形や振幅が安定していた電流を用いる。(b) サンプルの加熱や鉱物および間隙水の化学反応を抑えるため微小電流を用いる。(c) 少なくとも二つの電位電極の間では電流がサンプルの軸方向と平行となるようにする。(d) 電位電極における接地抵抗は測定システムの入力インピーダンスより十分低くし、電位測定の回路に電流がほとんど流入しないようにする。(e) 電流電極による分極による過渡応答の影響を避けるなどが挙げられる。

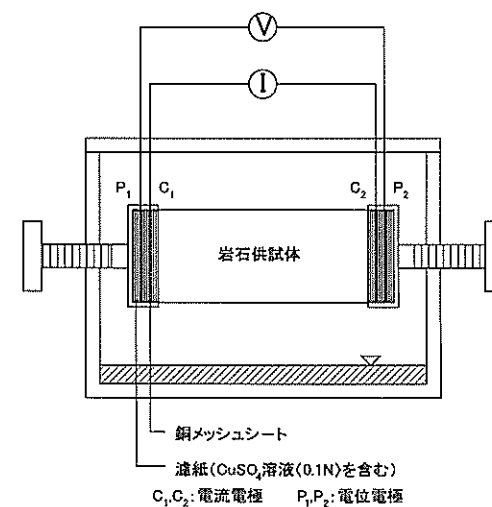
本研究では、図 3-4 に示す 4 極法サンプルホルダと GS(Geoscience)式サンプルホルダ⁴⁾を使用し、これらのサンプルホルダで測定した比抵抗値の比較を行った。4 極法サンプルホルダは、岩石供試体に 4 つの銅電極を等間隔に Wenner 配置に設置し、設置の際には岩石供試体と銅電極の間に導電性ポリマーを塗布することにより接地抵抗の影響を低減している。このサンプルホルダの場合には、不均質である岩石供試体の一部区間の電位差しか測定していないので、測定値が岩石供試体全体の比抵抗ではないことに注意する必要がある。また、所定位置へ正確に、しかも電気的に岩石供試体との接触を良くして電位電極を付けることは容易ではなく作業性に劣る。GS 式サンプルホルダは、金属製の電流電極 C および電位電極 P と電解質溶液を含ませた濾紙 R を P・R・C・R 供試体 R・C・R・P の順に並べたもので、供試体断面がサンプルホルダより小さければ供試体の大きさに左右されないなど作業性がよい。なお、GS 式サンプルホルダの電極には電流電極、電位電極とも 80 メッシュの銅網を用いた。電極や供試体間に挟む濾紙の枚数は 4 枚とし、濾紙に含ませる硫酸銅溶液には 0.1N 溶液を用いた。

これら二つのサンプルホルダから得られた、岩石供試体の比抵抗の比較を図 3-5 に示す。インタクト供試体および不均質である不連続面を有する供試体ともに、ほぼ同じような比抵抗が得られた。よって、本研究では作業性の良い GS 式サンプルホルダを用いて実験を実施した。

弾性波速度測定では、P 波及び S 波の受信子と発信子の間に岩石供試体を挟み、パルス波の到達速度により弾性波速度を求める超音波パルス透過法を用いた。測定装置には、図 3-6 に示す応用地質株式会社 MODEL-5217A NEW SONIC VIWER を用いた。この透過式超音波速度測定装置は、パルス発信部、発信子 (50kHz)・受信子 (50kHz)、増幅・制御部及び記録部から構成されている。

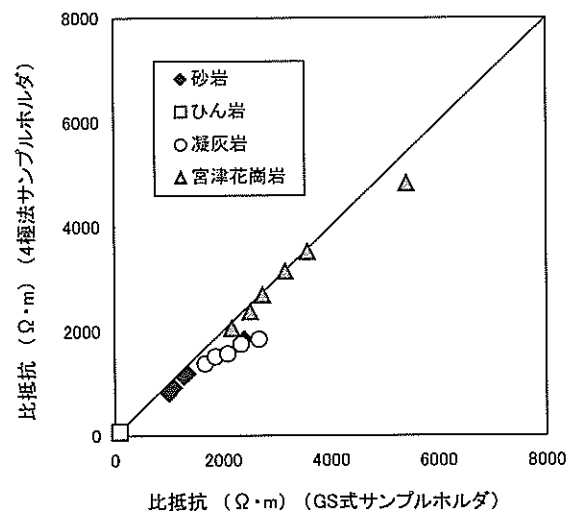


(a) 4 極法サンプルホルダ

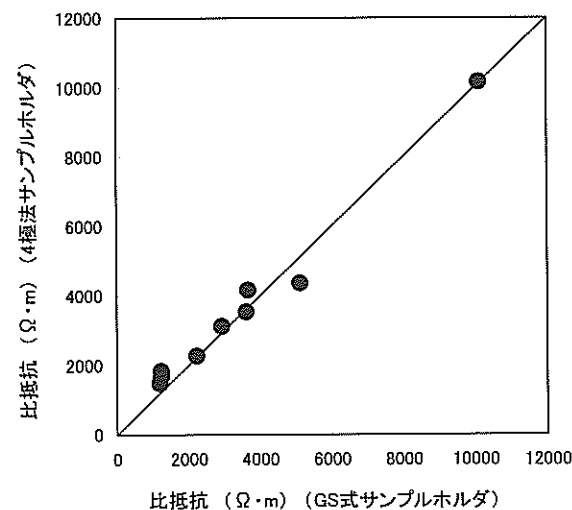


(b) GS 式サンプルホルダ

図 3-4 比抵抗測定ホルダ



(a) インタクト供試体



(b) 不連続面供試体

図 3-5 各サンプルホルダで測定した岩石供試体の比抵抗の比較

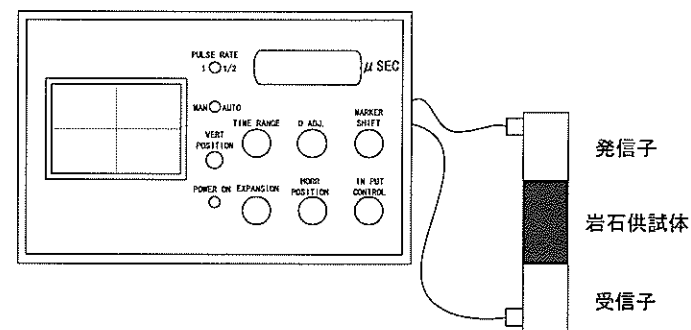


図 3-6 弾性波速度測定装置

弾性波速度の測定方法は、まず真空ポンプまたはタンクアスピレーターを用いて 96 時間以上の減圧吸水を行い岩石供試体を飽和させたのち、自然乾燥させる過程で適宜測定を実施した。

供試体中を伝わる弾性波には主に縦波(P 波)、横波(S 波)がある。これらの速度を推定することによって、供試体の弾性的性質を推定することができる。これらの速度は次式によって求められる。

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad (3.2)$$

$$V_s = \frac{L}{T_s} \quad (3.3)$$

V_p : 弾性波 P 波速度 [km/sec]

V_s : 弾性波 S 波速度 [km/sec]

L : 測定距離 [mm]

T_p : P 波伝播時間 [μ sec]

T_s : S 波伝播時間 [μ sec]

3.3 比抵抗および弾性波特性評価で用いた岩石供試体

本研究では、岩石の比抵抗特性が岩種ごとに異なるという前提の基に、各種の岩石の比抵抗および弾性波特性を把握するために、硬岩に属する 25 種類の岩石から採取した合計 379 本の供試体を用いて室内実験を行った。実験に用いた岩石の種類、供試体数、有効間隙率を表 3-1 に示す。

表 3-1 室内実験に用いた供試体

岩種		本数	有効間隙率	小計	合計
火成岩	深成岩	白川花崗岩(中粒)	17	0.005~0.023	379
		白川花崗岩(細粒)	4	0.009~0.012	
		宮津花崗岩	40	0.007~0.034	
		鈴鹿花崗岩	12	0.006~0.015	
		閃緑花崗岩	12	0.001~0.008	
		斑れい岩	14	0.004~0.037	
	半深成岩	ひん岩 I	7	0.001~0.010	
		ひん岩 II	7	0.029~0.063	
		輝緑岩	13	0.003~0.114	
		花崗斑岩	6	0.007~0.011	
	火山岩	流紋岩 I	8	0.010~0.030	
		流紋岩 II	10	0.005~0.011	
		玄武岩 I	11	0.037~0.054	
		玄武岩 II	14	0.039~0.069	
		安山岩 I	13	0.040~0.042	
		安山岩 II	10	0.030~0.035	
堆積岩	碎屑性堆積岩	塊状頁岩	11	0.002~0.010	136
		頁岩 I	22	0.001~0.022	
		頁岩 II	52	0.015~0.049	
		粘板岩	20	0.001~0.018	
		砂岩 I	12	0.001~0.006	
		砂岩 II	19	0.005~0.068	
	化学-生物的堆積岩	チャート	18	0.002~0.022	18
	火山碎屑岩類	輝緑岩質凝灰岩	17	0.001~0.035	27
		流紋岩質凝灰岩	10	0.030~0.051	

3.4 弾性波特性評価結果

図 3-7~12 は、表 3-1 に示す各岩石供試体の P 波速度および S 波速度と飽和度の関係の一例を示したものである。図中には P 波については 7 章で述べる Wyllie の関係式から求めた理論曲線を記述している。S 波は、飽和度に依存しないことが知られているので、平均値を示している。Wyllie の理論曲線は $S_r=1.0$ の測定値を真値として基岩の弾性波速度を仮定して算出している。各岩種の弾性波速度は飽和度 $S_r=1.0$ の時で $V_p=3.0\sim6.0\text{km/sec}$ 、飽和度 $S_r=0$ の時で $V_p=2.0\sim4.4\text{km/sec}$ の範囲に分布している。各弾性波速度の測定を行ったときの飽和度は、供試体の質量を計測することによって算出した。これらの図より、各岩石供試体において共通することは、P 波速度と飽和度の関係は、飽和度が減少するに伴って、P 波速度が減少する傾向がみられる。測定値と理論曲線との相関も概ねよいことから、本研究では Wyllie の式を用いて評価を行うことにする。

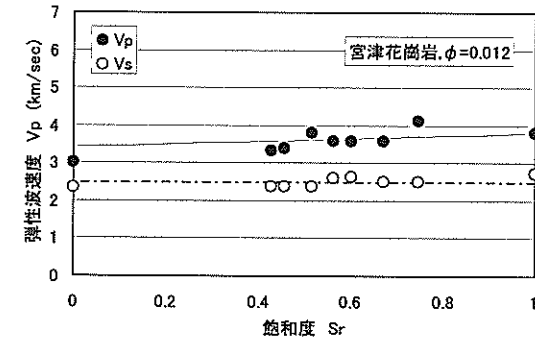


図 3-7 弾性波速度と飽和度の関係（宮津花崗岩）

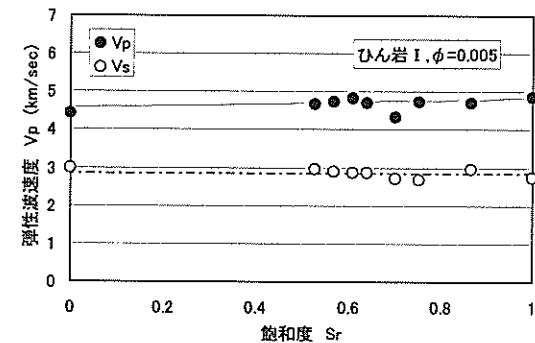


図 3-8 弾性波速度と飽和度の関係（ひん岩 I）

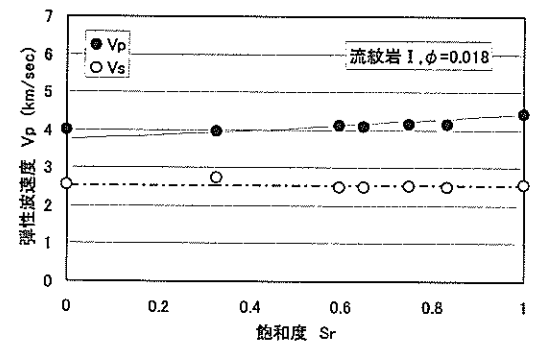


図 3-9 弾性波速度と飽和度の関係（流紋岩 I）

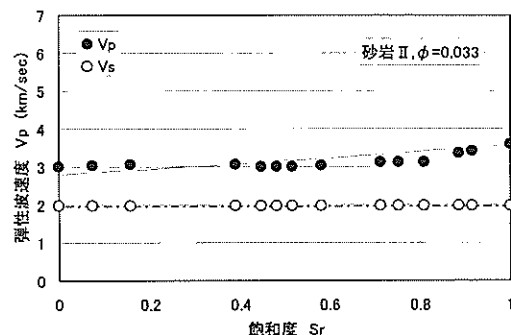


図 3-10 弾性波速度と飽和度の関係 (砂岩Ⅱ)

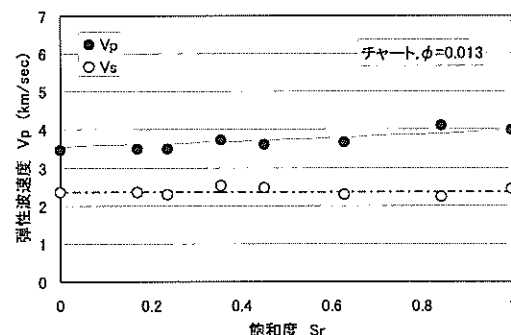


図 3-11 弾性波速度と飽和度の関係 (チャート)

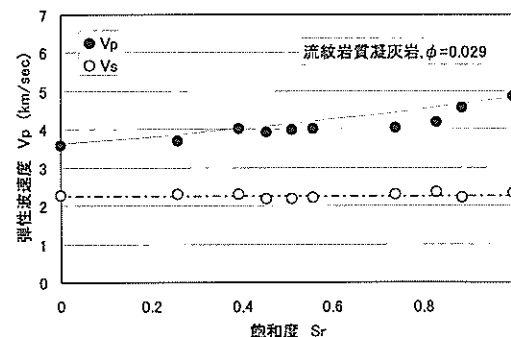


図 3-12 弾性波速度と飽和度の関係 (流紋岩質凝灰岩)

3.5 比抵抗特性評価結果

3.5.1 水分飽和度の影響

岩石の比抵抗特性を知るうえで、岩石の含水状態が比抵抗に及ぼす影響を把握することは重要な要素である。そこで、本研究では 3.2 で示した実験方法で比抵抗と飽和度を室内で測定し、岩石の比抵抗と飽和度の関係について実験的に検討を行った。

図 3-13～図 3-18 は、有効間隙率をパラメータとしたインタクト供試体の比抵抗と飽和度の関係を示したものである。図中の曲線は、比抵抗と飽和度の関係を次式に示す指数関数として表したものである。

$$\rho = A \cdot Sr^{-B} \quad (3.4)$$

ただし、 ρ : 岩石の比抵抗 $[\Omega \cdot m]$

Sr : 飽和度

A : 飽和状態の比抵抗 (ρ_s) $[\Omega \cdot m]$

B : 指数

これらの図より、岩種に関わらず岩石の飽和度が減少するにしたがい、比抵抗は指数関数的に増加していることがわかる。この傾向はほぼ全ての岩石で認められた。

岩石別に比較すると、花崗斑岩と有効間隙率の小さい斑れい岩は飽和状態から不飽和状態になると著しく比抵抗が増加する。花崗岩とチャートの比抵抗と飽和度の関係は、飽和度が 1.0～0.7 であれば比抵抗の変化は小さく、飽和度が 0.7 以下になると著しく比抵抗が増加する。流紋岩、玄武岩、安山岩などの火山岩では、飽和度が 0.4 以下になると著しく比抵抗が増加する。また、有効間隙率が大きい閃緑花崗岩、ひん岩、流紋岩、凝灰岩は、飽和度が減少しても比抵抗の変化はあまり見られなかった。さらに、頁岩のように飽和度が変化しても一定の低比抵抗を保持する岩石などがある。飽和度変化の影響を受けず、低比抵抗を示した頁岩は、他の岩石と異なり、岩石実質部分が導電性鉱物や粘土鉱物を多く含み^{8),9)}、それに起因して間隙水よりも比抵抗が低く表れたと考えられる。ただし、本研究で用いた間隙水は水道水で、その比抵抗は 50～100 $\Omega \cdot m$ である。

このように岩種によって比抵抗と飽和度の関係は大きく異なり、同じ岩種でも有効間隙率の違いによって比抵抗の値が大きく異なる。有効間隙率が大きい岩石は飽和度の変化に対する比抵抗の変化が小さく、有効間隙率の小さい岩石は飽和度の変化に対する比抵抗の変化が大きいことが認められた。この結果から、岩石の比抵抗は間隙水の影響を大きく受け、岩石の含水状態を示す飽和度および有効間隙率はその要因となることが認められた。比抵抗と有効間隙率の関係は後述する。

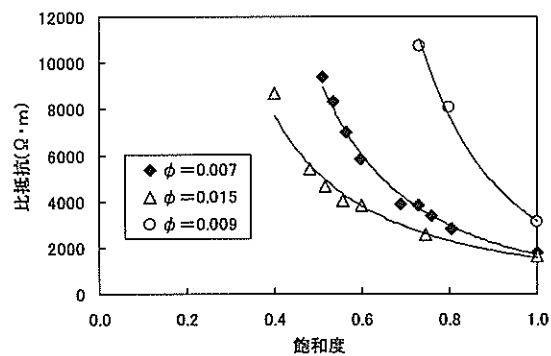


図 3-13 比抵抗と飽和度の関係（鈴鹿花崗岩）

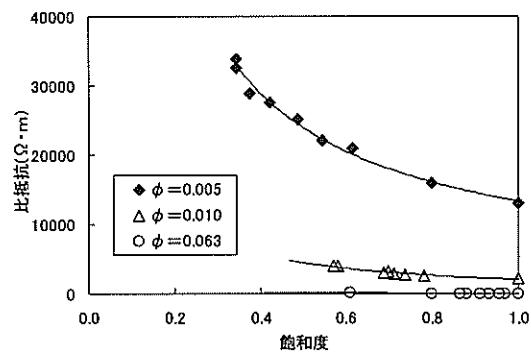


図 3-14 比抵抗と飽和度の関係（ひん岩 I, II）

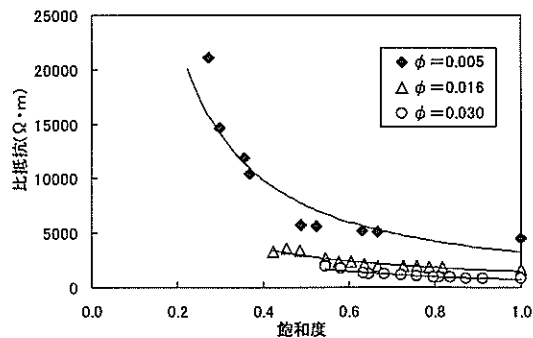


図 3-15 比抵抗と飽和度の関係（流紋岩）

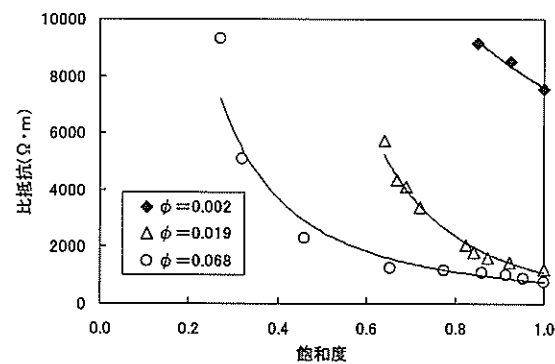


図 3-16 比抵抗と飽和度の関係（砂岩 I, II）

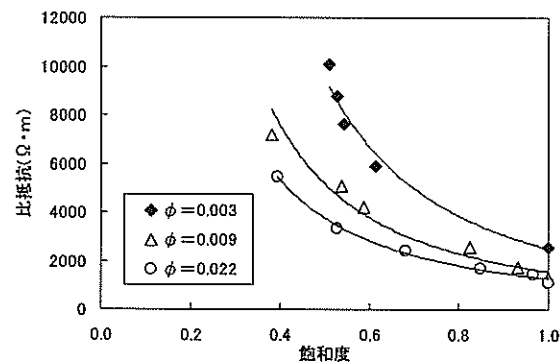


図 3-17 比抵抗と飽和度の関係（チャート）

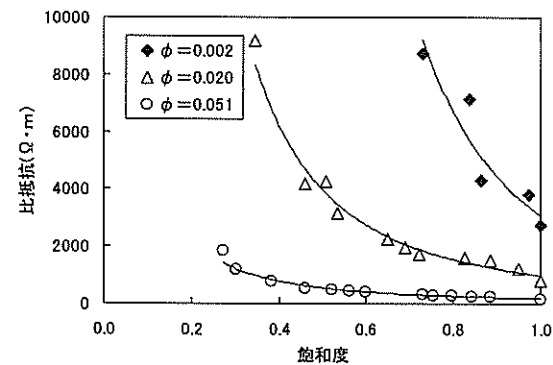


図 3-18 比抵抗と飽和度の関係（輝緑岩質 & 流紋岩質凝灰岩）

表 3-2 は、式 (3.4) の B 値を岩種ごとに示したものである。この表から各岩石とも B 値には大きなばらつきがみられる。この原因としては、岩石に内在する亀裂の密度・形状および岩石の鉱物組成が考えられるが、詳細については不明である。B 値の変動原因については、今後も検討する必要がある。

表 3-2 各岩石の B 値

岩種	B 値	平均値
花崗岩	0.7~4.0	2.2
斑れい岩	1.0~12.3	2.7
閃緑花崗岩	2.1~3.0	2.7
ひん岩	0.8~3.5	1.7
輝緑岩	0.2~6.7	3.1
花崗斑岩	5.9~12.5	8.6
流紋岩	0.8~3.4	1.7
玄武岩	0.7~2.0	1.3
安山岩	0.4~1.4	0.9
頁岩 I	0.1~3.3	0.8
頁岩 II	3.2~9.4	5.2
砂岩	0.4~4.5	1.9
粘板岩	0.2~7.1	2.5
チャート	0.1~6.0	2.2
輝緑岩質凝灰岩	0.8~19.5	4.6
流紋岩質凝灰岩	1.4~2.1	1.7

3.5.2 有効間隙率の影響

比抵抗と有効間隙率の関係は、飽和度と同様に岩石の比抵抗特性を知るうえで重要な要素である。そこで本研究では、式 (3.4) によって得られた実験式の A 値、つまり飽和状態 ($S_r=1.0$) における岩石の比抵抗と有効間隙率の関係について検討を行った。図 3-19、図 3-20 は、宮津花崗岩（火成岩）および粘板岩（堆積岩）の A 値と有効間隙率の関係を示したものである。これらの図より、各岩石とも有効間隙率の減少にしたがい A 値が指数関数的に増加する傾向が見られる。特に、有効間隙率減少に伴う A 値の変化は、有効間隙率が小さくなると増加割合が著しく大きく、有効間隙率が大きくなると増加割合が小さくなる傾向が見られる。この傾向は、有効間隙率が大きい岩石では、比抵抗に及ぼす間隙水の影響が大きく、有効間隙率が小さい岩石では、岩石実質部分の比抵抗に支配されていることが考えられる。また、宮津花崗岩、粘板岩以外の岩種でも同様の傾向が見られた。

これらの結果から、有効間隙率は岩石の比抵抗に大きな影響を与えることがわかる。また一般的傾向として、飽和状態 ($S_r=1.0$) にある岩石の有効間隙率を比抵抗から推定することが可能である。この結果は、調査対象とする区域が地下水面下にあれば、有効間隙率と密接な関係にある風化・変質、亀裂の状態などの地山状態を推定できることを示唆している。これら比抵抗と有効間隙率の関係を次式に示す指数関数として表した。

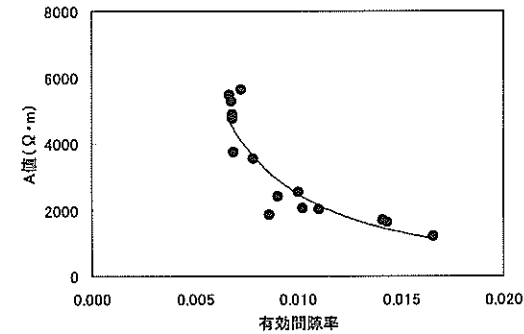


図 3-19 A 値と有効間隙率の関係（宮津花崗岩）

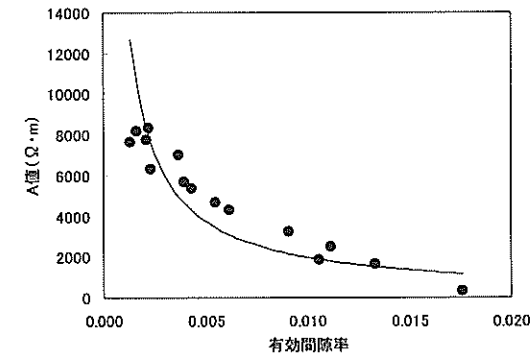


図 3-20 A 値と有効間隙率の関係（粘板岩）

$$A = \rho_s = m \cdot \phi^{-n} \quad (3.5)$$

ただし、A : 飽和状態の比抵抗 [Ω·m]

φ : 有効間隙率

m : 係数 [Ω·m]

n : 指数

次に、式 (3.4) に式 (3.5) を代入すると、次式を得る。

$$\rho = m \cdot S_r^{-B} \cdot \phi^{-n} \quad (3.6)$$

ただし、B, m, n は岩種ごとの固有値であり、これらを決定することにより各岩種の比抵抗と飽和度、有効間隙率の関係を定量的に評価できると考えられる。

図 3-21～図 3-27 は、同じ岩種で採取地の異なる岩石の A 値と有効間隙率の関係を示したものである。花崗岩については、白川花崗岩（中粒）を除けば、採取地が異なるにも関わらず、一つの指数関数として表すことができた。白川花崗岩（中粒）が他の花崗岩に比べて大きな比抵抗値を示した原因は、絶縁体である石英を比較的多く含んでいたと考えられる。また、ひん岩、安山岩、砂岩についても、多少ばらついているが、一つの指数関数として表すことができた。玄武岩については、供試体の有効間隙率の範囲が狭く、他の岩種のように一つの指数関数で表すには問題があるが、有効間隙率が小さくなると A 値が大きくなるという傾向は見られる。これに対して頁岩には、頁岩Ⅱのように他の岩石と同様に比抵抗と有効間隙率の相関性を有するものもあるが、低比抵抗を示す頁岩Ⅰのように相関性が見られない特殊なものも存在する。頁岩Ⅰは、一部の供試体が頁岩Ⅱと同様な比抵抗特性を有しているものの、一つの指数関数で評価することが困難である。

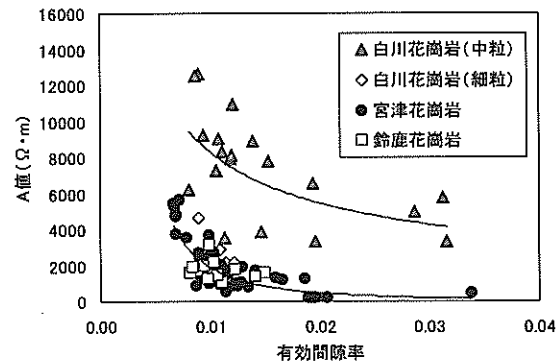


図 3-21 A 値と有効間隙率の関係（花崗岩）

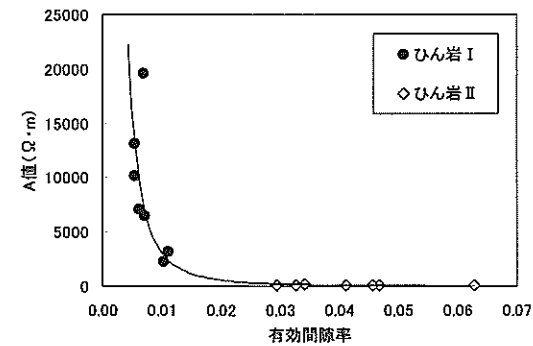


図 3-22 A 値と有効間隙率の関係（ひん岩）

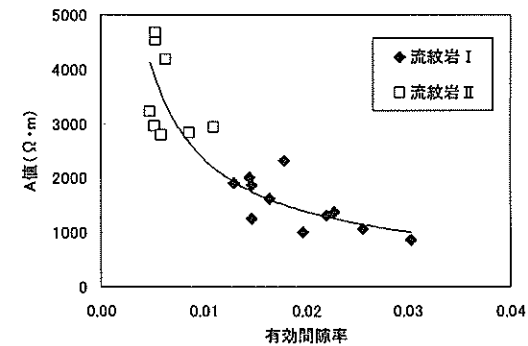


図 3-23 A 値と有効間隙率の関係（流紋岩）

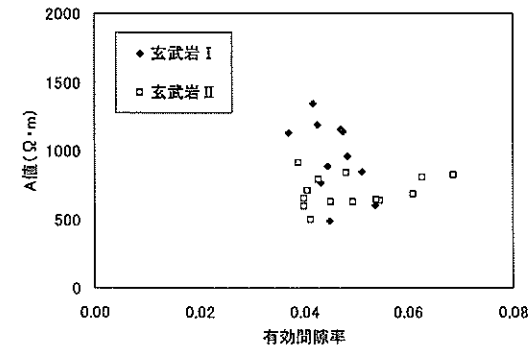


図 3-24 比抵抗と A 値と有効間隙率の関係（玄武岩）

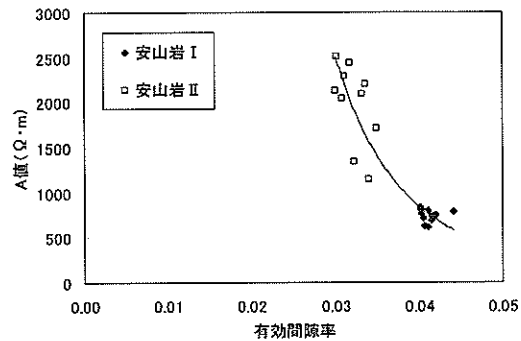


図 3-25 A 値と有効間隙率の関係 (安山岩)

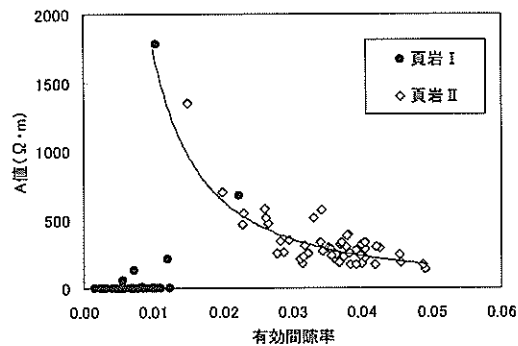


図 3-26 A 値と有効間隙率の関係 (頁岩)

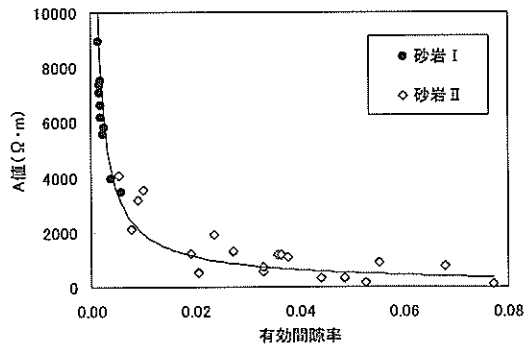


図 3-27 比抵抗と A 値と有効間隙率の関係 (砂岩)

3.5.3 岩種および鉱物組成の影響

岩石の比抵抗が水分飽和度および有効間隙率に大きく依存していることは、前項までで述べた。しかし同じ水分飽和度および有効間隙率を有する岩石でも、岩種によっては比抵抗が大きく異なる。したがって、岩種の条件は、比抵抗と工学的諸量との関係を把握する際の必須条件となる。

図 3-28～図 3-33 は、生成過程や鉱物組成を基に岩石を分類し、その種類別¹⁰⁾に A 値 (飽和状態の比抵抗) と有効間隙率の関係を示したものである。深成岩では、0.02 以上の有効間隙率に対して、白川花崗岩と他の岩石とは異なった傾向を示している。宮津花崗岩および鈴鹿花崗岩は、ピンク色を帯びたカリ長石を含み、目視によっても優白色帯桃色灰色の岩石であることが確認でき、風化すると粘質化するカリ長石を多く含有していることが分かる。これに対して白川花崗岩は、同様なカリ長石を目視で確認できず、石英、黒雲母といった絶縁体を多く含有している。このことから、同じ有効間隙率を有する深成岩でも比抵抗が大きく異なるのは、鉱物組成の違いが原因と考えられる。

半深成岩は、供試体の有効間隙率が 0.001～0.063 と幅広い範囲にあり、0.02 以上ではいずれも低比抵抗を示している。有効間隙率が 0.02 以下では、その減少に伴う比抵抗の増加の割合が著しく大きいことを示している。

火山岩では、安山岩 II を除くと、A 値と有効間隙率の関係を一つの指数関数で表すことができ、0.02 以下の有効間隙率でその減少に伴う比抵抗の増加割合が著しく大きくなっている。

碎屑性堆積岩では、塊状頁岩と頁岩 I を除くと、A 値と有効間隙率の関係を一つの指数関数で表すことができ、高い相関性が得られた。塊状頁岩および頁岩 I が他の岩石と異なる傾向を示したのは、頁岩が飽和度変化に伴う比抵抗変化が見られず、約 1～10 Ω·m の低比抵抗値を示す特殊な岩石であることが原因である。

化学-生物的堆積岩では、供試体は有効間隙率が 0.02 以下に集中しているチャートのみであった。

火山碎屑岩類は有効間隙率が小さい範囲では比抵抗のばらつきが見られるが、一つの指数関数で表すことができた。

以上の結果から、A 値 (飽和状態の比抵抗) と有効間隙率の関係は、岩種の違いにより傾向が異なるので、各岩種ごとに一つの指数関数で表すことができる。

図 3-34 は、地質学的分類による各種岩石の A 値と有効間隙率の関係を示したものである。この図には、有効間隙率が小さくなるにつれて、岩種による差が表れている。この結果から、岩石の比抵抗は、有効間隙率が大きくなると間隙水に左右され、有効間隙率が小さくなると鉱物組成と鉱物の結晶度合いに左右されるものと思われる。

表 3-3 は、各種岩石の飽和状態の比抵抗 (A 値) と有効間隙率の関係を表す指数関数を、まとめて示したものである。この表より、深成岩および半深成岩は有効間隙率に対する比抵抗の変化が大きいことがわかる。

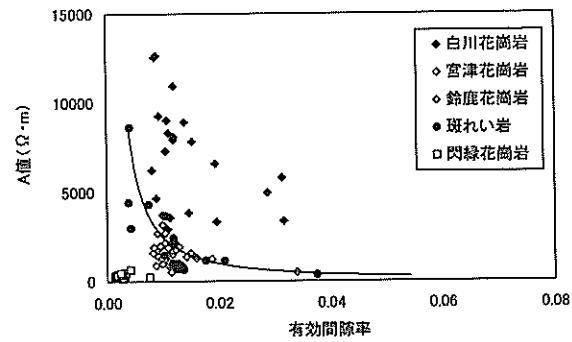


図 3-28 深成岩の A 値と有効間隙率の関係

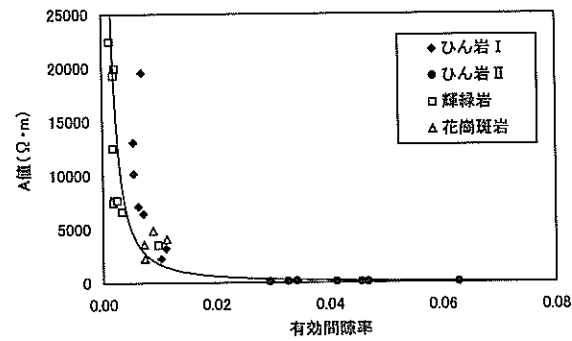


図 3-29 半深成岩の A 値と有効間隙率の関係

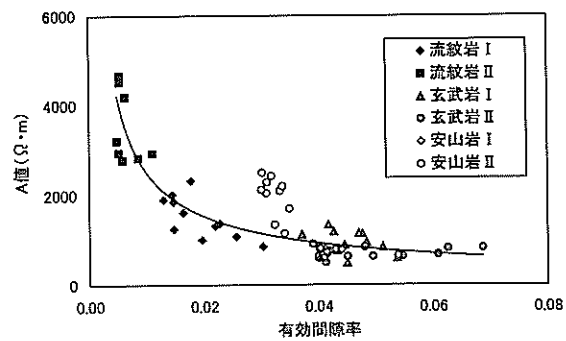


図 3-30 火山岩の A 値と有効間隙率の関係

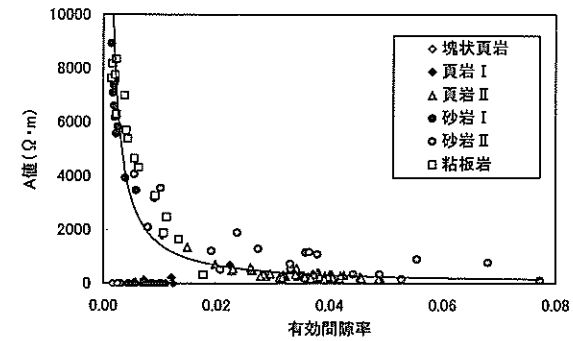


図 3-31 砕屑性堆積岩の A 値と有効間隙率の関係

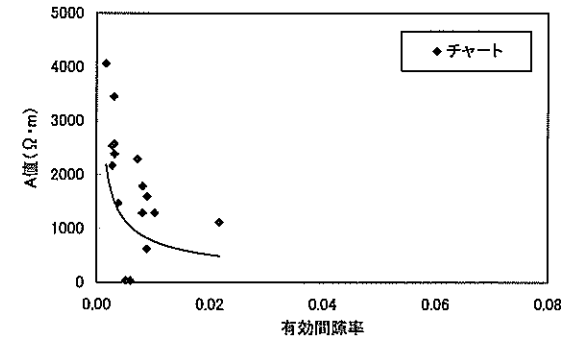


図 3-32 化学-生物的堆積岩の A 値と有効間隙率の関係

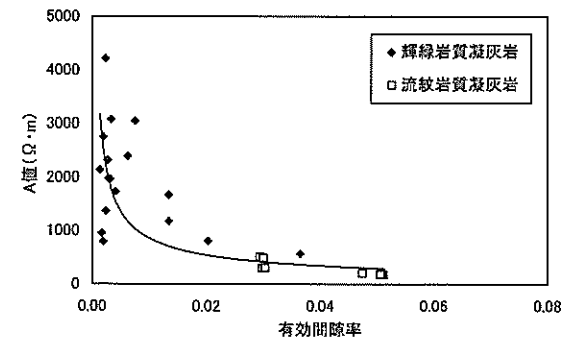


図 3-33 火山砕屑岩類の A 値と有効間隙率の関係

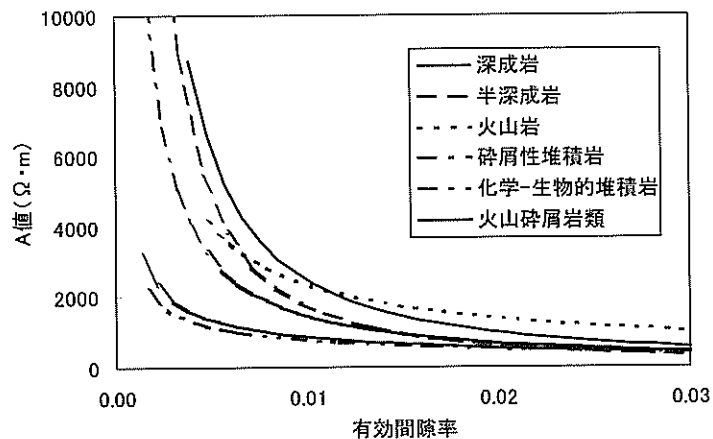


図 3-34 地質学的分類による A 値と有効間隙率の関係

表 3-3 各岩種の係数・指数

岩種	m	n
深成岩	5.39	1.33
半深成岩	1.72	1.5
火山岩	94.08	0.72
碎屑性堆積岩	5.80	1.17
化学-生物的堆積岩	52.56	0.58
火山碎屑岩類	41.02	0.66

3.6 人工亀裂供試体による評価の試み

3.6.1 亀裂性岩盤のモデル化

亀裂性岩盤モデルは、図 3-35 に示すように人工的に不連続面を作成した人工不連続面モデルと、加熱処理により岩石内部に微細な開口亀裂を発生させたポーラスモデルを用いた。人工不連続面モデルでは、不連続面の開口幅が比抵抗に及ぼす影響を検討するために、水を含んだ濾紙を 5 通りの枚数 ($s=2, 5, 10, 20, 30$) で比抵抗測定を行った。試験に用いた岩石供試体は花崗岩であり、ボーリングカッターおよびダイヤモンドカッターで、直径 50mm、高さ 100mm の円柱に整形した。

一方、ポーラスモデルでは吉中ら¹¹⁾の研究を参考に、電気マッフル炉で加熱処理を施すことにより、岩石内部に微細な開口亀裂を発生させ、岩石供試体の有効間隙率を増加させた。ポーラスモデルでは、深成岩である花崗岩、火山岩である安山岩ならびに堆積岩である砂岩について試験を行った。

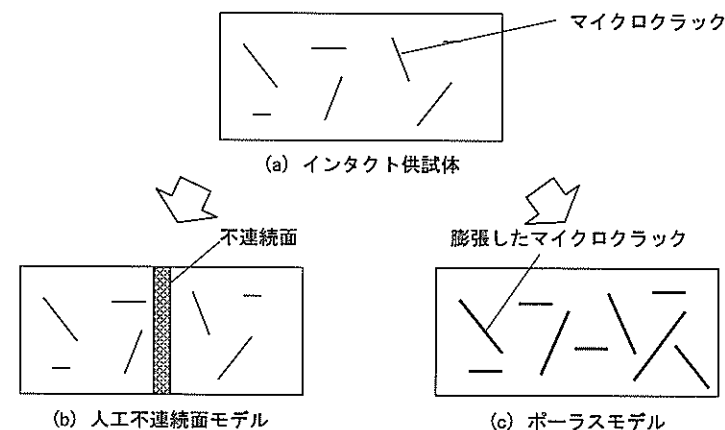


図 3-35 亀裂性岩盤のモデル化

3.6.2 計測方法の概要

比抵抗の測定手法は、図 3-4 (b) に示す GS 式比抵抗測定装置を用いた。電極装置は C_1 , C_2 を電流電極, P_1 , P_2 を電位電極として岩石供試体の左右に銅メッシュシートと 0.1N の硫酸銅溶液を含んだ濾紙を挟んで比抵抗の測定を行った。なお、比抵抗は、測定した電位差、電流値に断面積、高さをを用いて式(3.1)によって求めた。

比抵抗の測定は、インタクトコア (岩盤基質部) を 96 時間以上真空脱泡を行い、完全飽和の状態にしてから測定を行った。なお、間隙水は、水道水 $80 \Omega \cdot m$ のものを使用した。

3.6.3 人工不連続面モデルによる比抵抗特性

(1) 不連続面性状による比較

ここでは、不連続面の性状の違いによる比抵抗の影響を検討した。図 3-36 は 3 種類の異なる不連続面の性状を示す。不連続面には水を含んだ濾紙を挟んで測定を行った。不連続面の幅 e とすれば、これらの不連続面の体積を含む岩石供試体全体の空隙率（以下、見かけの有効空隙率と称す）は等しくなる。図 3-37 はこれら異なった 3 種類の不連続面を有する岩石供試体の比抵抗の測定結果を示している。測定ではインタクト部の空隙率の異なる 2 種類の供試体で実施した。同図より、見かけの有効空隙率が同じであれば比抵抗は同じ値を示していることがわかる。

このことから、不連続面の種類が異なっても、不連続面幅、面積、本数を考慮した、供試体全体に含まれる人工不連続面モデルの見かけの有効空隙率が同じであれば、不連続面の形状が異なっても飽和状態の比抵抗は同じ値を示すことがわかった。よって、以下では単一の不連続面を有するモデルを用いて検討を行う。

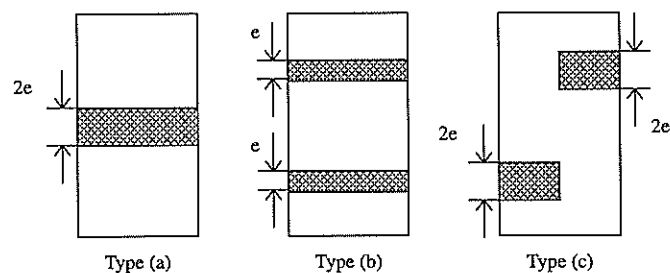


図 3-36 人工不連続面モデルの性状

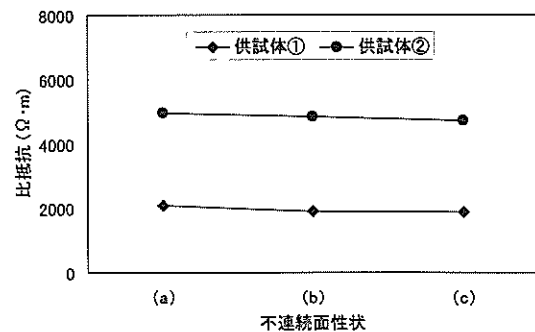


図 3-37 不連続面性状と比抵抗の関係

(2) 不連続面角度による比較

図 3-38 は、供試体のコア軸に対する不連続面の角度と飽和状態の比抵抗を示したものである。ここでコア軸に対する不連続面の角度とは、図 3-39 に示す角度 θ である。これらの人工不連続面は、ダイヤモンドカッターにより、コア軸に対する不連続面の角度が 0° 、 35° 、 45° 、 60° 、 90° となるように作成した。さらに不連続面に挟む濾紙の枚数を角度に応じて変え、不連続面を含む供試体全体の見かけの有効空隙率がほぼ同じとなるようにした。図 3-38 より、見かけの有効空隙率がほぼ同じ供試体でも、不連続面の角度が大きくなる、すなわちコア軸に対して 90° に近くなるほど、飽和状態の比抵抗は大きくなるがわかる。

以上のことから、同じ空隙率の岩石でも不連続面を含んでいる場合は、不連続面の面積が電流の透過面積に比べて大きくなると比抵抗は低下することがわかる。よって、原位置において比抵抗を測定することにより、岩盤内に存在する亀裂の方向が推定できる可能性を示すことができた。

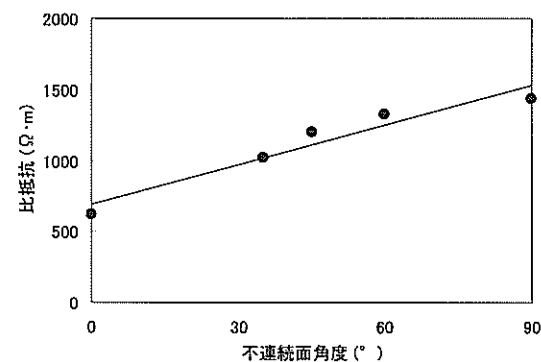


図 3-38 不連続面角度と比抵抗の関係

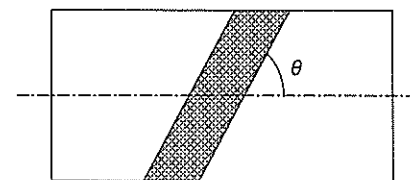


図 3-39 コア軸に対する不連続面の角度

(3) 不連続面幅による比較

図 3-40 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の比抵抗と飽和度の関係を、濾紙の枚数をパラメータとして示したものである。同図より飽和度が減少するにつれて比抵抗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と飽和度の関係は指数関数的であり、式(3.4)に示す指数関数で近似できる。

図 3-41 は、花崗岩における飽和度 $S_r=1.0$ 時の比抵抗である 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見かけの有効間隙率 ϕ' は、次式で求めた。

$$\phi' = (W_2 - W_1 + W_4) / (W_2 - W_3 + W_4) \quad (3.7)$$

ただし、 W_1 : 岩石実質部分の乾燥重量 [g]

W_2 : 岩石実質部分の湿潤重量 [g]

W_3 : 岩石実質部分の水中重量 [g]

W_4 : 不連続面内の水の重量 [g]

図中にはインタクト供試体の A 値もプロットした。同図から、不連続面を有する供試体の A 値と式(3.5)で示した見かけの間隙率の関係および、インタクト供試体の A 値と有効間隙率との関係は、式(3.5)に示す指数関数として表すことができる。

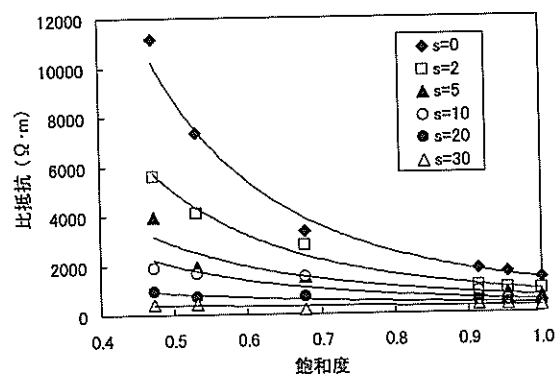


図 3-40 濾紙枚数の違いによる比抵抗と飽和度の関係

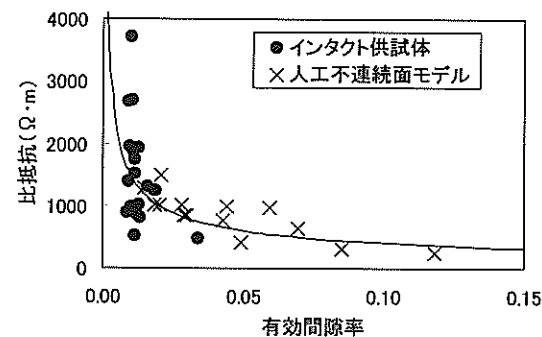


図 3-41 インタクト供試体と人工不連続面モデルの比較

図 3-42 は、花崗岩の飽和度 $S_r=1.0$ 時の比抵抗値と開口幅との関係を示したものである。ここで、開口幅とは、濾紙を不連続面に挟んだ状態での不連続面間の幅である。同図から、コア軸に対する不連続面の角度 θ が小さい 0° 、 35° の供試体は、両側の電極間が飽和した濾紙で短絡もしくはそれに近い、非常に電気の流れやすい状態であったため、不連続面に挟んだ濾紙の枚数の増加に伴って、比抵抗が大きく低下していることがわかる。また、コア軸に対して $\theta=45^\circ$ 、 60° および 90° の不連続面を有する供試体の比抵抗は、不連続面に挟んだ濾紙の枚数の増加に伴う減少量が、先の不連続面の角度が小さい 0° および 35° の場合より緩やかである。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は、不連続面に挟んだ濾紙による低比抵抗領域の及ぼす影響が小さいことがわかる。

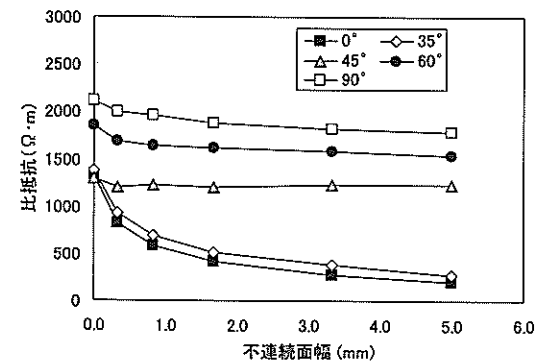


図 3-42 各不連続面角度における比抵抗と不連続面幅の関係

3.6.4 ポーラスモデルによる比抵抗特性

兼間らの研究¹²⁾では、岩石を構成している結晶が膨張して亀裂を発生する音波の発生加熱温度は400℃であり、音波のピークが600℃であることが実験的に確認されている。そのため、本研究で用いた岩石供試体においても、それぞれ400℃から加熱処理を行った。

図3-43は、加熱後の間隙率を ϕ_a としたときの、花崗岩における加熱処理温度と間隙の変化率を示している。その関係は、加熱温度が上昇するにしたがい、間隙の変化率が直線的に徐々に増加している。本結果は、吉中らの研究結果とほぼ同様に400℃から徐々に間隙が増加し、600℃で急激に間隙が増加するという同様な傾向を示した。これは、岩石供試体である花崗岩の構造が結晶質で構成されているためであると考えられる。その結果、花崗岩を加熱処理することにより、有効間隙率が最大6倍程度の岩石供試体を作成することができた。

図3-44は、安山岩における加熱処理温度と間隙の変化率を示している。花崗岩と比較すると、加熱温度が上昇しているにもかかわらず、間隙の変化率の増加がみられなかった。安山岩においては、急激に冷却した岩石であり、あまり結晶質が成長しておらず、わずかに地下のマグマだまりで結晶したごく小さい結晶（斑晶）だけが存在しているため、有効間隙率が増加しなかったと考えられる。

図3-45は、砂岩における加熱処理温度と間隙の変化率を示したものである。その結果、花崗岩と同様に加熱温度が上昇するにしたがい、徐々に間隙が増加する結果となった。しかし、加熱温度と間隙の変化率の関係における直線的な変化の傾向は、花崗岩の場合ほど明瞭には見られない。砂岩においては、有効間隙率がインタクト供試体の最大16倍程度の供試体を作成することができた。なお、加熱温度が600℃を超えると、砂岩の供試体は亀裂が生じて破壊したため、それ以上の温度は実施していない。

図3-46は、花崗岩における加熱温度800℃で処理を行った岩石と加熱処理前の岩石の飽和度と比抵抗の関係の一例を示したものである。同図より、加熱後の岩石は加熱前の岩石と同様に飽和度が減少すると比抵抗が高くなるという同様の結果が得られた。また、各飽和度において加熱後の岩石の比抵抗は、加熱前の比抵抗よりも低くなっていることがわかる。比抵抗が低下する原因としては、加熱することによって微小な亀裂が作成され、有効間隙率が大きくなったためと考えられる。この傾向は他の加熱温度によって得られた岩石についてもみられた。

3.6.5 岩石供試体との比較

図3-47は、インタクト供試体と亀裂性岩盤を模擬した人工不連続面モデル（ただし、ここでは不連続面の角度が90°の岩石を使用）およびポーラスモデルの比抵抗と有効間隙率の関係を示したものである。比較に用いた岩石は花崗岩である。図中にはインタクト供試体の測定結果から求めた近似曲線を併記している。同図より、ポーラスモデルが人工不連続面モデルと比較して、インタクト供試体の比抵抗と有効間隙率の関係との相関がよい。

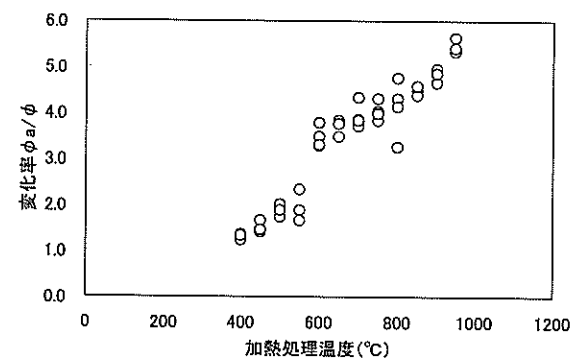


図3-43 加熱温度による有効間隙率の変化（花崗岩）

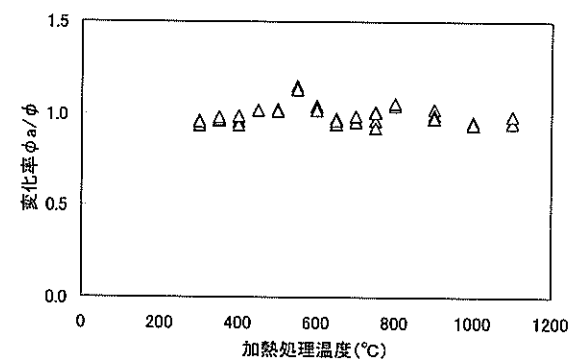


図3-44 加熱温度による有効間隙率の変化（安山岩）

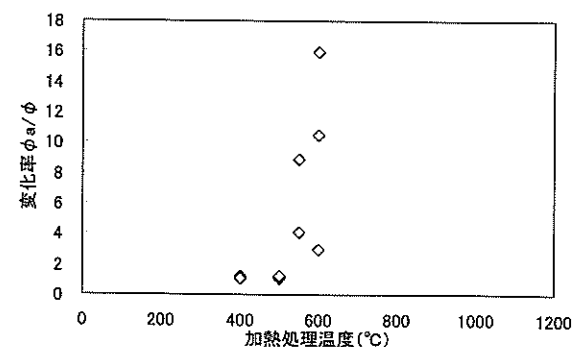


図3-45 加熱温度による有効間隙率の変化（砂岩）

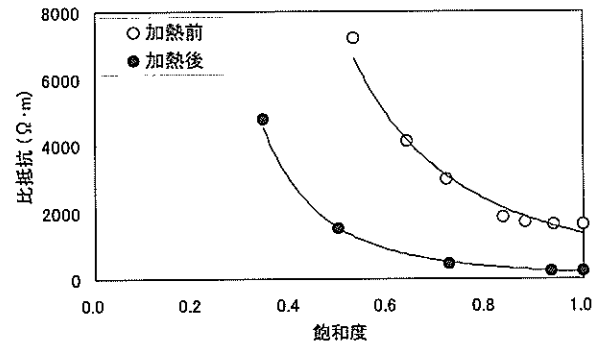


図 3-46 加熱前後における比抵抗と飽和度の関係

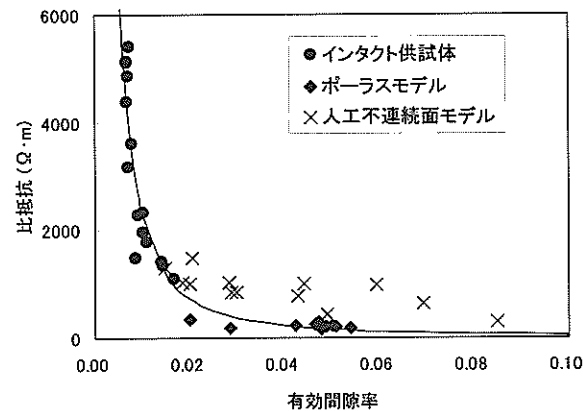


図 3-47 インタクト供試体と2種類の亀裂性岩盤モデルの比較

この原因としては、人工不連続面モデルでは単一不連続面の角度が 90° の岩石を使用しており、先に述べたように単一の不連続面を含む岩石の中でも最も高い比抵抗を示しているためと考えられる。一方、ポーラスモデルは、単一の亀裂ではなく、亀裂を2次元的に供試体全体に含む岩石であり、いくつかの卓越方向を有することが挙げられる。ポーラスモデルが人工不連続面モデルよりも低い値を示すということは、ポーラスモデルに内在している亀裂の方向が岩石内を流れる電流方向に卓越していると考えられる。このように岩石の比抵抗に影響を与える亀裂の異方性に関する問題は、今後さらに検討する必要がある。

3.7 まとめ

本研究では、比抵抗および弾性波速度と岩盤物性値との関係についての定量的な把握を目的として、室内試験において種々の岩種の岩石供試体を用いて、含水状態を変化させながら測定し、岩石の両物性値と飽和度、間隙率の関係について検討した。本研究で、ほぼすべての地質工学的分類に属する岩石の検討が実施でき、岩石の成因によって第7章で提案する変換パラメータが分類できる可能性を示せた。

さらに、岩石供試体による室内試験で得られた比抵抗特性を、岩盤評価に適用するために、亀裂性岩盤を2種類のモデルで模擬し、比抵抗特性の検討を行った。人工不連続面モデルでは、不連続面の割裂方向および形状の影響については、不連続面を有する岩石の比抵抗は、有効間隙率および平行電流が不連続面を透過する面積が等しければ、不連続面の数や形状が異なっても同じ値を示す。しかし、有効間隙率が等しくても、不連続面の角度の違いによって、平行電流が不連続面を透過する面積が異なれば比抵抗も異なる値を示すことがわかった。

一方、電気マッフル炉を用いて供試体内部に亀裂を発生させたポーラスモデルでは、岩種によって亀裂の発生の難易度が異なることが分かった。また、加熱によって亀裂つまり有効間隙率が増大した花崗岩では、比抵抗が低下することを確認した。両モデルの比較では、ポーラスモデルは単一の亀裂ではなく2次元の亀裂を含むことにより、単一の不連続面を有する人工不連続面モデルの比抵抗より低い値を示した。しかしながら、今回の比較は一種類の岩種でしか実施できておらず他の岩種についても検討する必要がある。さらに、現位置データとの比較によりどちらのモデルが実際の亀裂性岩盤のモデルとして妥当かを検討する必要がある。

参考文献

- 1) Kusumi, H., Hatakenaka, Y., Nishikata, U., Nakamura, M. and Nishida, K.: Characterization of Electrical Resistivity for Intact and Jointed Specimens and its Application for In Situ Rock Mass Assessment, An Int. Conf. on Geotechnical & Geological Eng.(GeoEng2000), CD-ROM, 2000.
- 2) 楠見晴重・畠中与一・西方卯佐男・中村真・奥田善之: 種々の岩石の比抵抗特性に及ぼす飽和度、間隙率の影響とそれを利用した岩盤物性の評価手法、亀裂性岩盤の浸透問題に関するシンポジウム論文集、地盤工学会, pp.187-194, 2001.
- 3) 中村真・楠見晴重: 岩石供試体を用いた亀裂性岩盤モデルの作成とその比抵抗特性、日本材料学会誌, Vol.52/No.5, pp.478-482, 2003.
- 4) Patnode, G. E. and Wyllie, M. R. J.: The presence of conductive solids in seervoir rocks as factor in electric log interpretation, Trans. A. I. M. E., 189, pp.47-52, 1950.

- 5) Collet, L. S. : Laboratory investigation of overvoltage, in Wait, J. R. ed., Overvoltage reserch and geophysical applications, Pergamon Press, pp.50-60, 1959.
- 6) Marshali, D. J. and Madden, T. R. : Induced polarization, a study of its cause, Geophysics, Vol.24, pp.790-816, 1959.
- 7) 九里尚一・堀津多三郎：鴻之舞鉱山産岩石の IP 特性について，日本鉱業会誌，Vol.81, pp.932-965, 1965.
- 8) Vinegar, H. J. and Waxman, M. H. : Induced polarization of shaly sands, Geophysics, Vol.49, pp.1267-1287, 1984.
- 9) 勝部照雄：岩石・鉱石の電気および電気化学的過渡現象の基礎理論に関する研究，物理探鉱，Vol.18, pp.25-34, 1965.
- 10) 三木幸蔵：わかりやすい岩石と岩盤の知識，鹿島出版会，1978.
- 11) 吉中龍之進・小野寺透：微細亀裂を含む結晶質岩石の強度とダイラタンシー，第 10 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.31-35, 1976.
- 12) 兼間強・前田亟：加熱による花崗岩の微小破壊音とその発生機構，地震工学会，No.31, pp.391-400, 1978.

第 4 章 比抵抗および P, S 波同時測定装置の開発とその適用性

4.1 はじめに

岩石供試体の弾性波速度の計測は，岩石の動的な弾性係数の把握手法として，よく実施されている。さらに，P, S 波と密度，間隙率，N 値，一軸圧縮強度等との相関を検討した研究も種々行われている¹⁾。特に，N 値に象徴される地盤の工学的諸性質が S 波と顕著な関連性を示すことは，S 波が地盤調査における指標として有用であることを示唆している。室内試験における弾性波速度の測定法は超音波法(以下，従来法と称す)が圧倒的に多いが，共振法も少数が行われている²⁾。従来法による P, S 波速度の計測に際しては，別々に発信，受信端子を取換えることが普通である。端子を取換える場合，岩石の飽和度等が刻々と変化する環境下では同一条件での測定が困難である。端子を取り換えなくて測定する方法としては，波形を分散フラクタル次元法を用いることにより，P 波と S 波を区分する研究³⁾もなされているが，それぞれの岩石において P, S 波の周波数および振幅値を設定する必要があるため，P, S 波の区別は多少困難である。そのため，本研究では実際の波形を解析することにより，P, S 波の周波数の差異から区別する方法を用いた。一方，岩石の比抵抗と工学的諸物性との関係についても研究が進められている⁴⁾。これらの測定において，P, S 波の弾性波速度に加えて，比抵抗に対しても同時に測定できれば，同一環境下での測定が可能となり，また省力化の面においても大変有効な計測となる。そのため，本研究では，岩石供試体の比抵抗および弾性波 P, S 波速度を同時に測定できる装置(以下，提案法と称す)の開発を試みるとともに，この装置をいくつかの岩石供試体に適用させ，その有効性について検討した^{5)~7)}。

本システムによる P, S 波の震源は，高周波のインパルス(衝動)を与え，他方で受信する。また，このインパルス(衝動)は，繰り返し岩石供試体の一方向に与える。P, S 波は，オシロスコープで記録された波によって読み取り，同時に岩石供試体の比抵抗は電流電極と電位電極を端面に併せ持った GS 式⁸⁾によって測定する。本システムを用いることにより，種々の岩石供試体の比抵抗と弾性波 P, S 波速度が，様々な飽和度の状態で同時に得られる。本装置の妥当性を検討するために，提案法により得られた P, S 波速度と従来法による測定で得られたこれらの値を比較した。その結果，提案法による測定値は，様々な岩石供試体において従来法による測定とほぼ一致し，本測定装置の有効性が確認できた。

4.2 同時測定装置の構成

図 4-1 に，今回開発した同時測定システムの弾性波計測システム構成を示す。測定システム構成に関しては，①パルス発生装置，②増幅器，③AE センサ，④同時測定ホルダー，

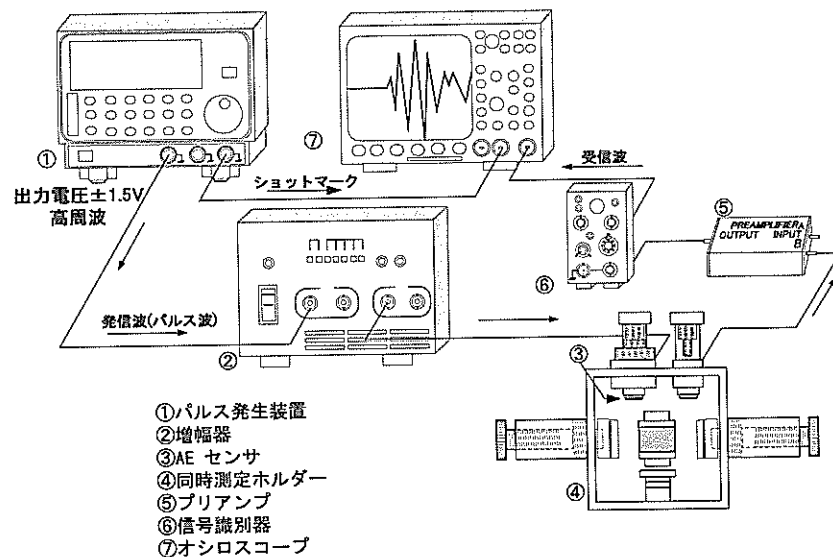


図 4-1 弾性波測定器

⑤プリアンプ、⑥信号識別器、⑦オシロスコープである。信号源であるパルス発生装置は、周波数 1.0Hz、波形（方形波）、電圧±1.5V のインパルスが発生する。その信号は、増幅器により増幅され、供試体の一側面に取り付けた AE センサ（AE-900S-WB:NF 回路ブロック製）に送られる。その信号により、その AE センサを振動させ、他方の側面に取り付けた AE センサで受信する。その受信された波形は、プリアンプおよび信号識別器などで増幅し、オシロスコープ（デジタル・フォスファ・オシロスコープ：NF 回路ブロック製）に表示される。また、表示された波形は、同装置により、ファイルに読み込む。

図 4-2 に、図 4-1 で示した④同時測定ホルダー（弾性波および比抵抗同時測定器）の詳細図を示す。これは、従来の比抵抗測定器に使用していた GS 式サンプルホルダーに、側面から AE センサを設置し、供試体における弾性波速度および比抵抗の同時測定を可能にするために設計したものである。図 4-2 で示すように、供試体をしっかりと固定させ、測定に関して安定性を保つために、設置された AE センサに対して、反対側および供試体の下部に供試体にそった円形の供試体固定プラグを使用した。提案法で使った AE センサは、検出感度が高く、周囲の振動の影響を受けにくい。周波数特性としては、300kHz~2MHz（±10dB）と広帯域で平坦である。なお、実際の測定での AE センサと供試体の接触部は、平坦に整形し、接触部分には、シリコングリース（カップラント：日本パナメトリクス製）を塗ることにより、AE センサと供試体との接触を高め、パルス波を鮮明に伝達できるようにした。

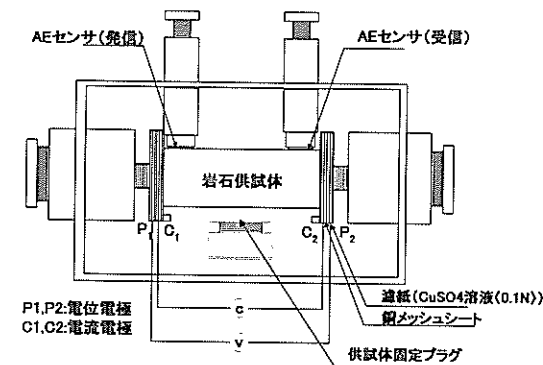


図 4-2 弾性波および比抵抗同時測定器

4.3 AE センサ設置方法の検討

従来の測定では、AE センサは岩石供試体の端面に設置するのが一般的である。ところが、今回比抵抗と弾性波速度を同時に測定するに際して GS 式サンプルホルダーを用いる場合、端面には電極がくるために AE センサを側面に配置する必要があった。そこで、図 4-3 に示すような AE センサ配置において測定される弾性波の波形と立ち上がり位置から求められる弾性波速度に違いが生じないかを検討した。

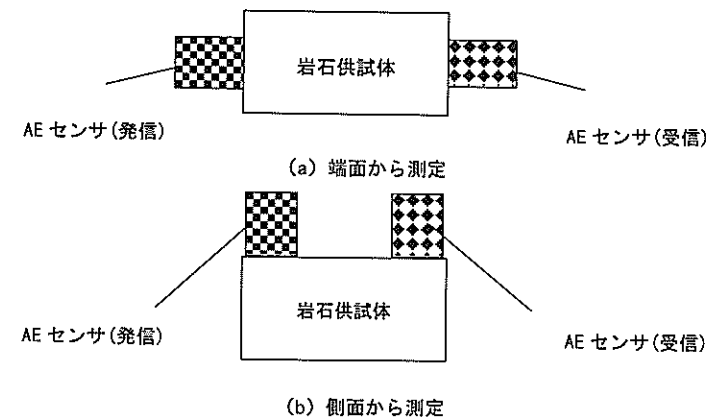
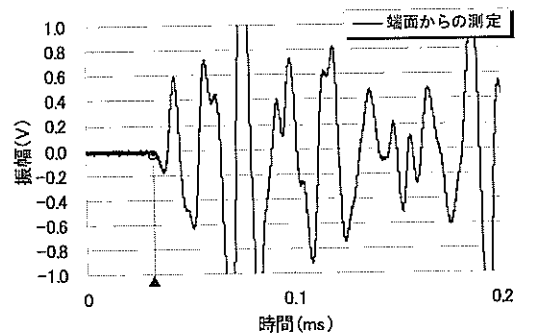
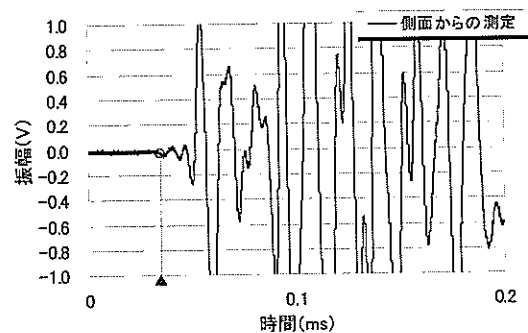


図 4-3 センサー配置

図 4-4 は異なる AE センサ配置で得られた波形である。図 4-4(a) では、初動である P 波の立ち上がりは明瞭である。一方、側面に配置した図 4-4(b) では圧縮性の縦波を垂直に受信していないため、P 波の立ち上がりは小さくなるが初動を読み取ることは可能であった。なお、AE センサを側面に配置した場合、岩石の飽和度が減少するにつれて、初動の波形勾配は若干緩やかになるが、その読み取りは可能であった。



(a) 端面から測定



(b) 側面から測定

図 4-4 異なる AE センサ配置で得られた波形

4.4 AE センサ設置間隔の検討

単一波形より P, S 波を区別するためには、AE センサの間隔は減衰の影響が出ない程度で長いほうが望ましい。ところが、従来の GS 式サンプルホルダに用いる供試体長さは 100mm であるため、岩石供試体の長さ 100mm 程度でも P, S 波を判別できるかどうかの検討を行った。検討では、供試体の側面に沿って AE センサを 100mm から 300mm で 100mm ピッチでスライドさせ、それぞれのセンサ間の距離に対して得られた波形を比較した。なお、使用した岩石供試体は、長さ 500mm、直径 50mm の花崗岩のボーリングコアで、含水状態は自然状態のものを使用した。

図 4-5 に、AE センサの設置間隔 100, 200, 300mm の波形結果を示す。それぞれの測定距離に対して、振幅の違いが見られるが、P, S 波の読み取りに関しては、十分に読取可能であることがわかる。したがって、供試体の長さが 100mm においても、十分適用できることが確認できた。

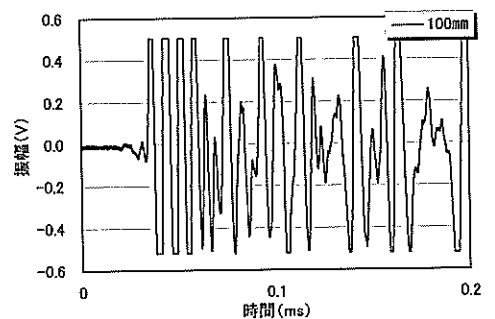
4.5 同時測定装置による評価手法の検討

弾性波測定において、AE センサから発信した単一波より得られた P, S 波の読み取り位置の検討を行った。今回使用した供試体は、鉄および 9 種類の岩石であるが、ここでは、ひん岩について特に示す。

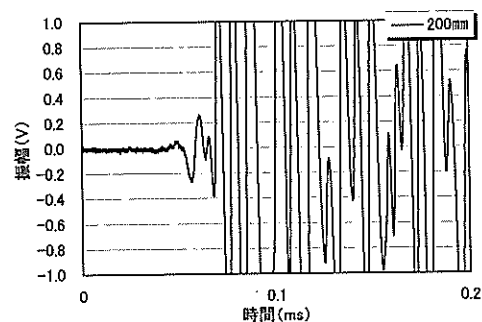
図 4-6 は、ひん岩についての P, S 波読み取り位置比較図を示す。図 4-6(a) において、P 波より S 波の振幅（エネルギー）が大きくなるセンサー配置とした本システムで、実際に読み取った位置が○印である。なお、実際の読み取り位置については、図 4-6(a) の初動を P 波とし、S 波の初動については、振幅が急激に大きくなる位置とした。また、図 4-6(b) に示す P, S 波の周波数は、実際の波形が現れる位置 (0s) から 0.2ms の間で 0.2μs 間隔で、合計 1000 回 FFT（高速フーリエ変換）を行い、周波数を求めた。一般に、P 波が高く、S 波の方が低いという関係⁹⁾より、その周波数の変化点の位置をそれぞれ点線で示す。その結果、実際に測定した読み取り位置と、周波数解析から求めた P, S 波の立ち上がり位置は、ほぼ一致した。また、各岩種の P, S 波の周波数を比較すると、岩の種類により周波数の違いが見られた。なお、初期の高周波はパルス発生時の電気ノイズであると考えられる。

4.6 同時測定装置の妥当性検討

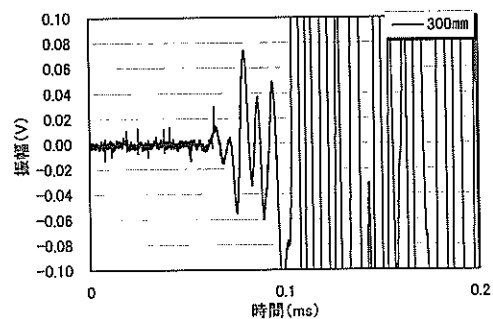
従来法から求めた P, S 波速度と提案法により測定して求めた P, S 波速度を比較することにより、単一波形からの P, S 波立ち上がり位置を比較から読み取った本手法の妥当性を検討した。なお、実験に使用した供試体の岩種は 9 種類であり、比較を行った岩石供試体は、飽和度 $S_r=1.0$ の状態について比較をしたものである。



(a) センサー間隔 100mm

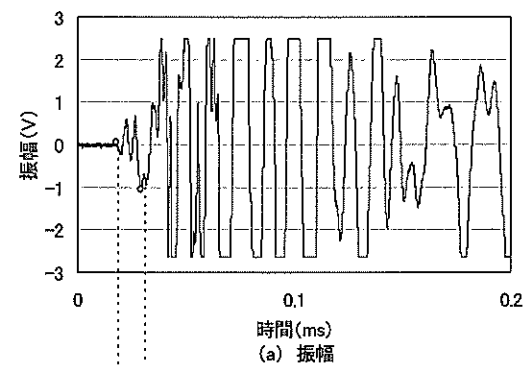


(b) センサー間隔 200mm

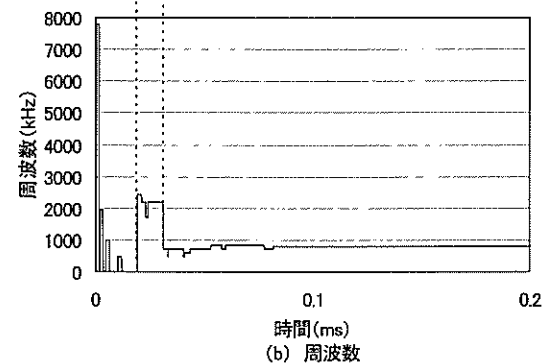


(c) センサー間隔 300mm

図 4-5 測定距離における波形比較



(a) 振幅



(b) 周波数

図 4-6 弾性波読み取り位置比較 (ひん岩)

図 4-7 は、提案法によって測定された P, S 波速度と、従来法による P, S 波速度との関係を示したものである。この結果、各岩種ともに、図 4-7(a) に示す P 波速度については、よく一致しているが、図 4-7(b) に示す S 波速度に関しては、少し差が生じる結果を示した。しかし、全般的にみるとそれぞれ P, S 波速度は、概ね一致している。S 波速度の若干の差異がみられているが、この原因としては、従来法では、発信子、受信子の種類にもよるが、S 波の初動を読み取るのは多少の困難を伴い、またその読み取りには、主観的要素の占める割合が大きい。それに対して、本研究で開発した周波数解析による提案法では、主観的要素の占める割合がかなり低いことから、精度的には、従来の手法に比べ本手法が優れているものと考えられる。その結果、S 波速度の差が、図 4-7(b) に現れたものと思われる。そのため、今回同時測定器に用いた AE センサにおいて P, S 波の立ち上がり位置を読み取る提案法の妥当性が確認できたと考えられる。

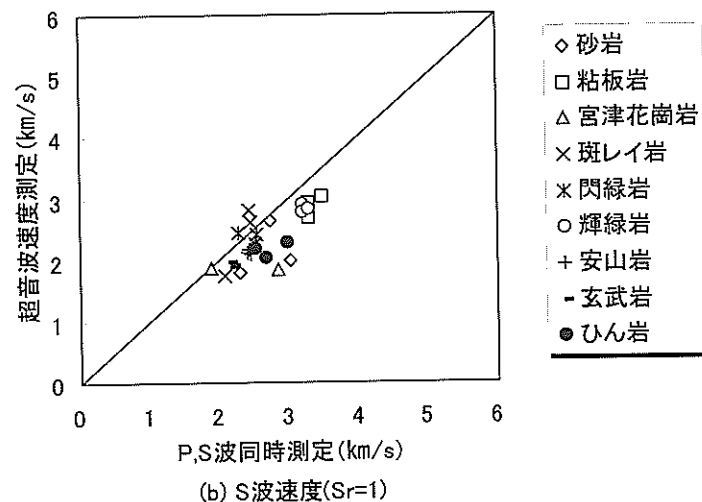
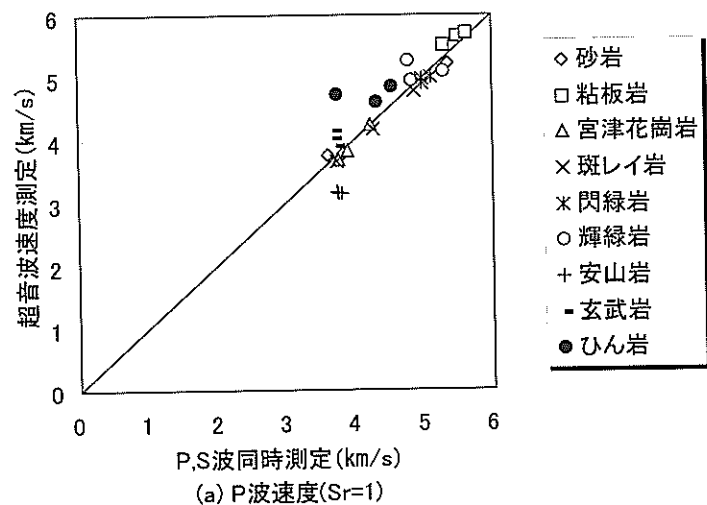
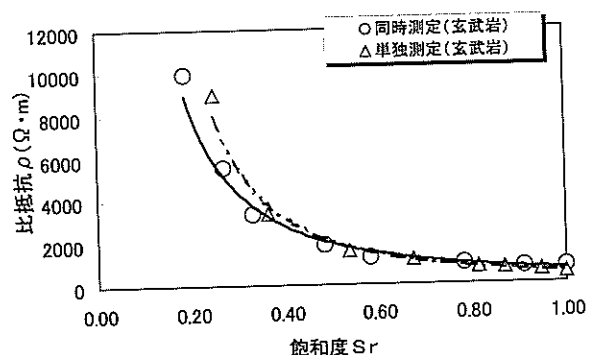


図 4-7 測定法が異なる弾性波速度比較

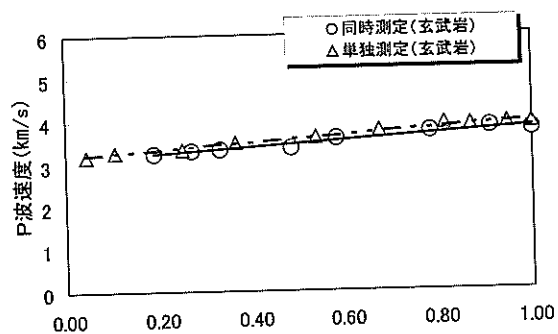
4.7 同時測定装置による評価

図 4-8 は、玄武岩における比抵抗および弾性波同時測定結果を示す。凡例に示す単独測定とは、弾性波速度に関しては従来法による測定のことであり、比抵抗に関しては、GS 式比抵抗装置のみの測定である。また、弾性波測定に関しては、従来法による測定をそれぞれ表している。図 4-8 (a) は、比抵抗と飽和度の関係を同時測定した値と GS 式比抵抗装置のみで測定した値との比較図である。図 4-8 (b) (c) は、P、S 波速度と飽和度の関係を本システムにより同時測定した値と従来法による測定で得られた値を比較した図である。これらの図より、比抵抗および P 波速度に関しては概ね一致しているが、S 波速度と飽和度の関係については、少し差が生じる結果となった。これは、先に述べたように P 波速度に関しては、第一目ということで初動を読みやすいが、S 波速度に関しては、従来法には、主観的要素が含まれているため、提案法との測定誤差が生じたものと考えられる。また、従来の GS 式比抵抗装置のみの測定と本システムによる測定値にはほとんど差異がないことより、今回の弾性波測定システムの追加が比抵抗測定に影響がないことが確認できた。

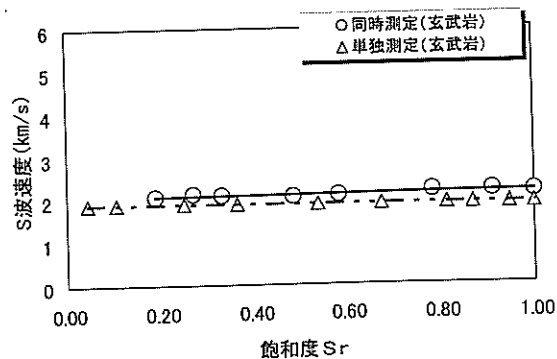
図 4-9 は、堆積岩である砂岩について、比抵抗および弾性波同時測定結果を示す。その結果、火成岩である玄武岩と同様な結果を得ることができた。今回の測定で用いた砂岩は玄武岩より間隙率が高い。そのため、提案法において、それぞれの岩種における弾性波速度および比抵抗は、従来の単独測定で得られている値と比較的一致しているため、幅広い間隙率の岩石において本装置の適用性が確認できた。



(a) 比抵抗

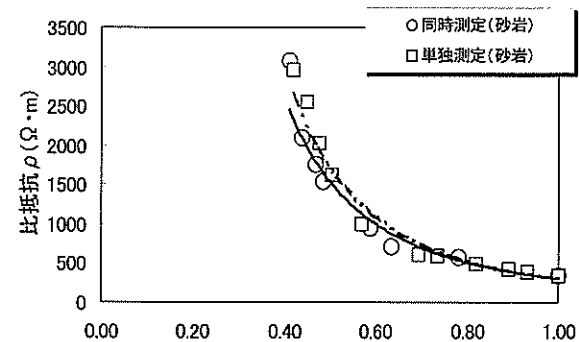


(b) P波速度

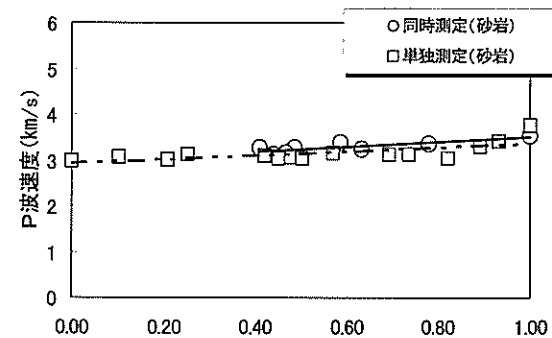


(c) S波速度

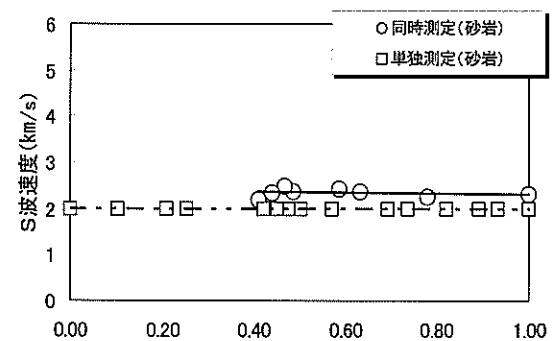
图 4-8 比抵抗及び弾性波速度比較 (玄武岩)



(a) 比抵抗



(b) P波速度



(c) S波速度

图 4-9 比抵抗及び弾性波速度比較 (砂岩)

4.8 まとめ

本研究では、岩石供試体の比抵抗および弾性波速度 P、S 波同時測定器およびシステムの開発とその適用性について検討を行った。その結果、P、S 波の振幅および周波数の関係より、P、S 波の立ち上がり位置を判別することができ、従来法による単独測定で得られた弾性波速度がほぼ一致した。そのため、単一波形より、P、S 波速度を求めることが可能であることがわかった。また、提案法により得られた P、S 波速度および比抵抗値と従来法で得られているこれらの値は、ほぼ一致したため、本測定システムの適用性が確認できた。

参考文献

- 1) 松枝富士雄・川原田宏・山口伸治：サスペンション式 PS 検層による弾性波速度 (Vp, Vs) と地質との対比, 物理探査, Vol.49/No.5, pp.360-371, 1996.
- 2) 物理探査学会：土および岩の速度測定に関する研究委員会報告, 物理探査, Vol.41/No.3, pp.226-249, 1988.
- 3) 多田良平：分散フラクタル次元法を用いた地震波初動解析について, 物理探査学会第 103 回学術講演会講演論文集, pp.40-44, 2000.
- 4) 西牧均・関根一郎・斎藤章・吉中龍之進：岩石・岩盤の比抵抗とその工学的性質との関係について, 物理探査, Vol.52/No.2, pp.161-172, 1999.
- 5) Kusumi, H., Okuda, Y. and Nakamura, M.: Development of Simultaneously Measured System for P, S Wave and Electric Resistivity of Rock Samples and its Application, ISRM 2nd Asian rock Mechanics Symposium (2nd ARMS), pp. 149-151, 2001.
- 6) 中村真・楠見晴重・奥田善之：岩石供試体の P、S 波速度および比抵抗同時測定装置の開発とその適用性, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp. 381-386, 2002.
- 7) Nakamura, M. and Kusumi, H.: Several Examinations in Development of Simultaneously Measuring System for P and S Wave Velocity and Electric Resistivity of Rock Samples, The 7th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics in Kyoto (RAEG2003), pp. 241-246, 2003.
- 8) 千葉昭彦・熊田政弘：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.
- 9) 金井清：地震工学, 共立出版, pp.46-47, 1969.

第 5 章 比抵抗連続計測による斜面内の水みち評価

5.1 はじめに

斜面崩壊の原因として降雨等による地下水の変動があることは良く知られている。岩盤内の地下水の浸透あるいは流動挙動は、岩盤内に存在する亀裂や破砕帯を主な水みちとして、いることから、これら不連続面部の性状に支配される。しかし、その挙動を精度よくモニタリングできる手法は、現時点において確立されておらず、崩壊危険箇所の推定のためにはこの分野の研究が必要とされている。電気探査比抵抗法による地下水計測として、これまでも地中の水の流動による比抵抗変化をモニタリングしている研究^{1)~4)}はいくつかみられるが、直接降雨の浸透状況を連続的に測定し、降雨の量と比抵抗の変化との関係について言及した論文は見受けられない。

そこで本章では、まず岩盤斜面内の破砕帯や地層境界部を対象として、斜面上に 95m の計測線を設けて 2 極法, Wenner 法, Dipole-Dipole 法の中から地下水挙動のモニタリングに有効な電極配置を検討した。3 種類の電極配置から、もっとも分解能が高かった Dipole-Dipole 電気探査法によって降雨前後で連続的に見かけ比抵抗を計測し、各測点の見かけ比抵抗変化と降雨との関係について検討を行い、とくに破砕帯部におけるこれらの関係から、透水性の評価法について考察した^{5)~7)}。

5.2 比抵抗計測の概要

5.2.1 計測斜面の概要

計測を実施したのは図 5-1 に示す大阪府東部の標高 150~200m の丘陵地である。計測地点の地質は中生代ジュラ紀から古生代二疊紀に形成された丹波層群の砂岩、粘板岩、チャートを基盤とし、計測線に比較的近い場所で行われたボーリングコアから得られた一軸圧縮強度は、約 60~80MPa の値を示す。また地表近くは、場所によって風化が進んでいるところも見受けられ、一部は粘土化している。図 5-2 に計測線の平面を、図 5-3 に同断面を示す。この計測線上に 1m 間隔で 96 本の電極を斜面下部より電極番号 No.1, No.2...として配置した。計測線の全長は 95m、標高差 24.5m、平均斜度 14.5°である。この計測線において弾性波探査を実施した結果、地表面から約 1~4m 程度までは弾性波速度が 100~200m/sec の表土、深度 4~14m 程度までは弾性波速度が 300~800m/sec の軟岩、さらに深度 14~15m 以深では弾性波速度は 3500~4500m/sec の砂岩層であり、図 5-4 に示すボーリング柱状図と概ね一致する。また電極番号 73 から 75 付近においては、破砕帯と思われる低速度帯が存在しており、露頭観察結果からも破砕された表面が観察されている。



圖 5-1 計測位置

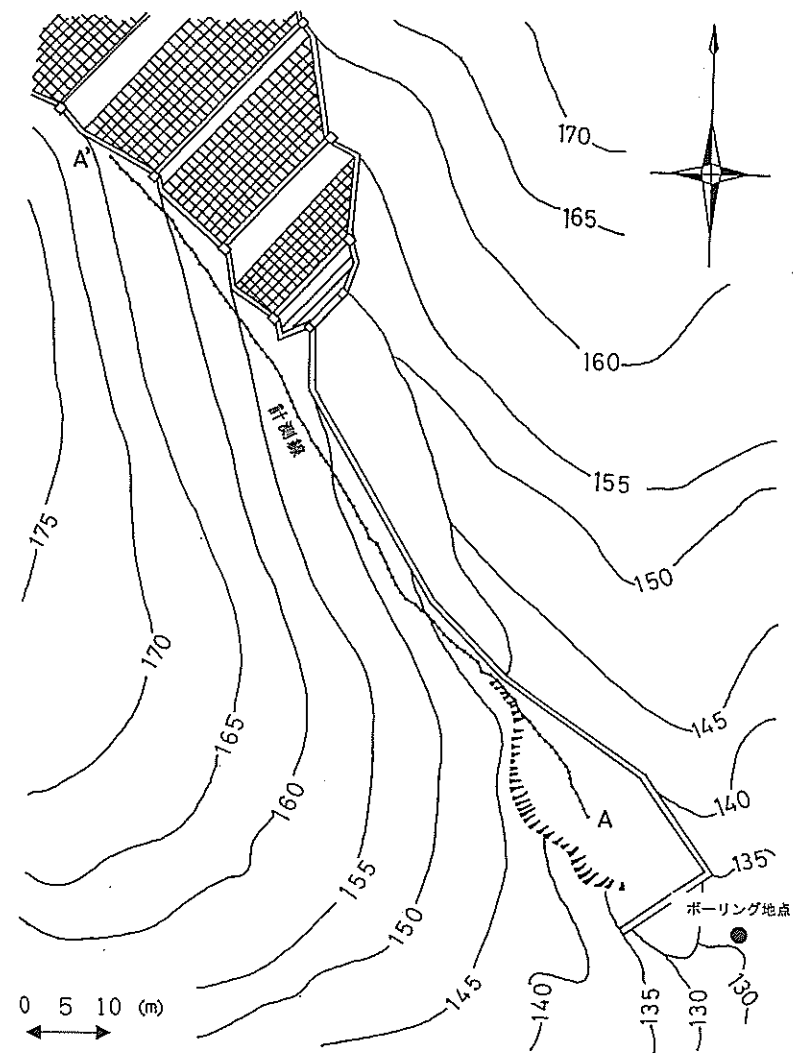


図 5-2 計測線平面図

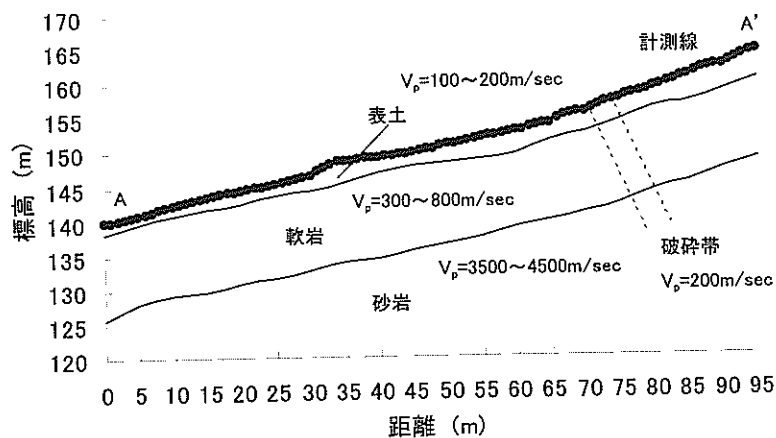


図 5-3 計測線断面および弾性波速度分布

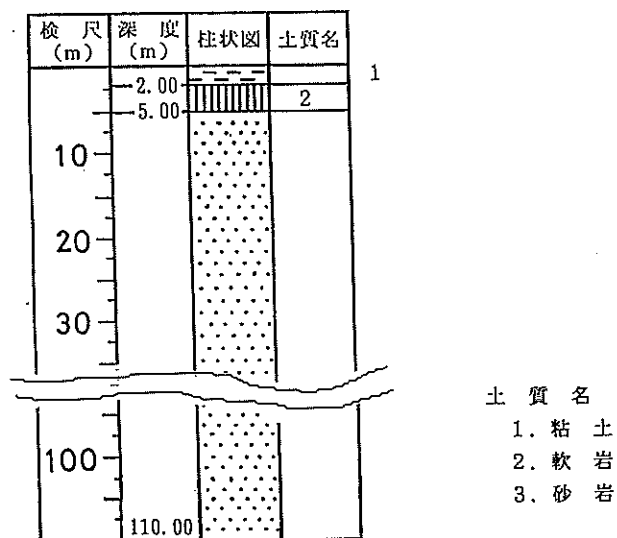


図 5-4 ボーリング柱状図

5.2.2 計測方法の概要

電極配置は表 5-1 に示すような 3 種類の電極配置を用いた。ここで、C は電流電極、P は電位電極を示す。これらの配置では見かけ比抵抗 ρ_a は 2 極法および Wenner 法では式(5.1)によって、Dipole-Dipole 法では式(5.2)によって求めることができる。

$$\rho_a = 2\pi a \times V/I \quad (5.1)$$

$$\rho_a = i(i+1)(i+2)\pi a \times V/I \quad (5.2)$$

ただし、V: 電圧 [mV]

I: 電流 [mA]

a: 電極間隔 [m]

i: 整数

使用した探査機は、自動電気探査装置 (Mac-OHM21, 応用地質製) である。この探査装置のシステム構成を図 5-5 に、送信部、受信部の仕様を表 5-2 に示す。電極は長期の測定に対して耐えられるために、あらかじめ水中に放置しておき、表面に錆を発生させた鉛棒を用いた。これは、鉛はいったんさびるとそれ以上さびが進行しない性質を利用したものである。

表 5-1 電極配置

2 極法	
Wenner 法	
Dipole-Dipole 法	

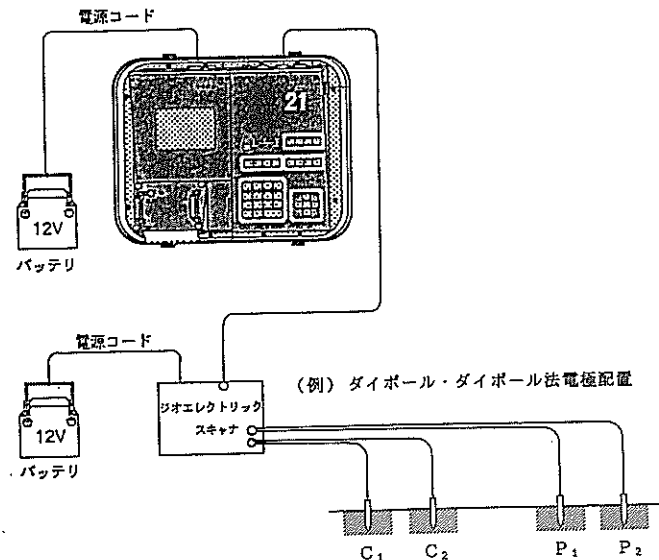


図 5-5 測定システム構成

表 5-2 測定器の仕様

送信部	最大電圧	200V
	出力電流	1~200mA
受信部	入力インピーダンス	5MΩ 以上
	入力チャンネル	3ch
	最小電圧感度	6μV

5.3 電極配置の検討

5.3.1 計測の概要

水平探査による測定結果の表示方法として、一般に見かけ比抵抗分布図で表すことが多い。そこで本研究においても、斜面内の地下水挙動の把握を目的とする場合の最適な電極配置を求めるために 2 極法、Wenner 法、Dipole-Dipole 法の 3 種類の方法を用いて、岩盤斜面内の比抵抗分布状況を比較することによって検討を行った。なお、地盤内の湿潤状態がほぼ同じ条件下になる気象条件を選んで比抵抗を測定しており、2 極法による計測では、前日に総雨量 4mm 程度の降雨が、Wenner 法および Dipole-Dipole 法での計測では、前日に総雨量 7mm 程度の降雨が観測された。

5.3.2 計測結果

図 5-6 は 2 極法による水平探査によって求められた地盤内の見かけ比抵抗分布である。測定は C_1P_1 電極間隔 a を 4m, 8m, 12m, ..., 60m とし、深さ 2m ごとに計 225 点行った。計算された見かけ比抵抗は、以後他の各探査方法との比較を行う際に断面図における表示方法を統一するために、地表面を直線で近似し、計測線の高低差に対応させた 2m 間隔のグリッド上に、100, 200, 400, 1000 $\Omega \cdot m$ の等比抵抗線で示すことにする。ただし 2 極法による計測結果では、測定値が 100 $\Omega \cdot m$ 以下または 400 $\Omega \cdot m$ 以上となる点が存在せず、200 $\Omega \cdot m$ のみの等比抵抗線で表されることから、見かけ比抵抗の差を明確にするために、300 $\Omega \cdot m$ の等比抵抗線を破線で示した。この図では、左下の部分に 300 $\Omega \cdot m$ の見かけ比抵抗分布がみられる程度で、個々の測点で明確な差は認められない。

次に Wenner 法による水平探査によって求められた地盤内の見かけ比抵抗分布を示したのが、図 5-7 である。測定は各電極間隔 a を 2m, 4m, 6m, ..., 20m とし、2 極法と同様に深さ 2m ごとに計 155 点行った。Wenner 法による計測結果でも、測定値が 400 $\Omega \cdot m$ 以上となる点が存在せず、個々の測点で明確な差も認められなかった。ただし、100 $\Omega \cdot m$ 以下の見かけ比抵抗分布を示す部分は粘土やシルトなどといった不透水層または、地下水を含む帯水層の可能性もある。

Dipole-Dipole 法による水平探査によって求められた地盤内の見かけ比抵抗分布を、図 5-8 に示す。この方法では電極間隔係数 i を 1, 3, 5, ..., 29 と増加させるにしたがい、測定深度は 2m ずつ深くなる。本研究では深度 30m までの 225 点の計測を行った。Dipole-Dipole 法による測定結果は、先の 2 種類の電極配置の結果と比較して明らかに個々の測点で明確な差が認められる。この図より 100 $\Omega \cdot m$ の見かけ比抵抗分布に着目すると、深度 4m 付近に大きな等比抵抗分布が広がり、また断面の右側下部にも 100 $\Omega \cdot m$ の見かけ比抵抗分布が認められる。深度 8m 付近には 400 $\Omega \cdot m$ の見かけ比抵抗分布が、さらに左下の部分には 1000 $\Omega \cdot m$ 以上の高い見かけ比抵抗を示す部分が存在する。これらの部分は、弾性波探査でも速い速度を示した基盤岩の存在が考えられる。

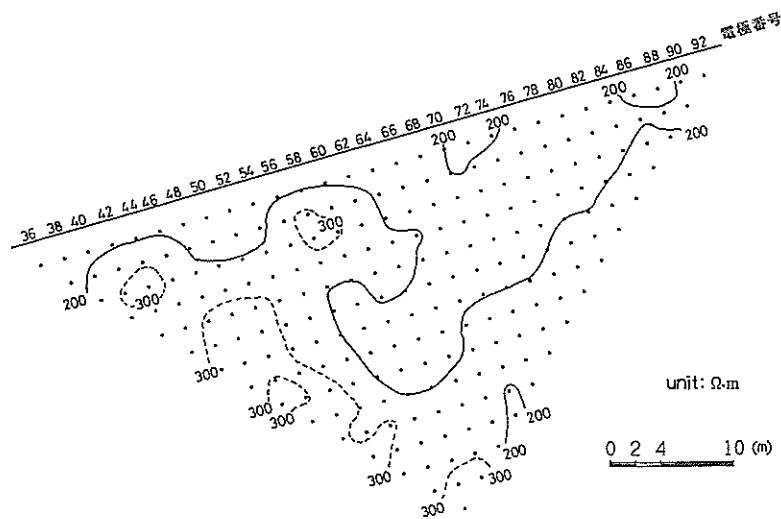


図 5-6 Wenner 法による見かけ比抵抗分布

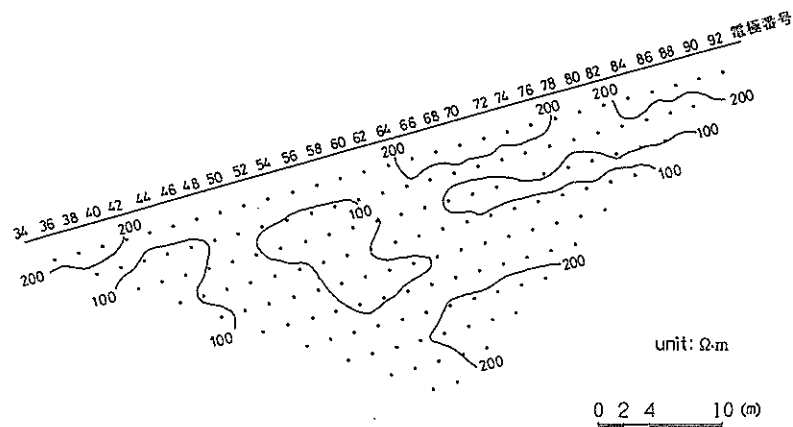


図 5-7 Wenner 法による見かけ比抵抗分布

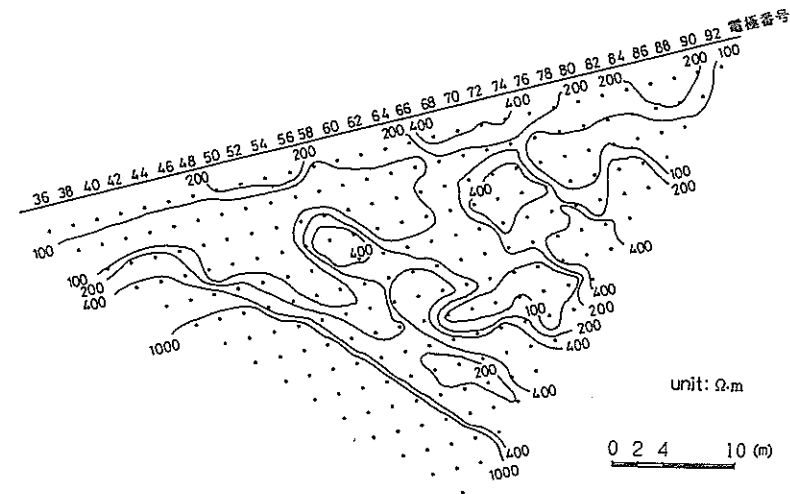


図 5-8 Dipole-Dipole 法による見かけ比抵抗分布

図 5-6～図 5-8 において測定値の大小およびその分布形態について比較すると、3 種類の電極配置の中で Dipole-Dipole 法が、最も分解能が高いことが判った。ただし測定における注意点として Dipole-Dipole 電極配置では、測定される電位差は他の配置より一般に小さいため、微小な電位差を精度よく測定することが可能な測定器を用いる必要がある。本研究で用いる測定器は、最小電圧感度が $6\mu\text{V}$ とたいへん精度が優れており、計測地盤内の見かけ比抵抗の微小変化を判別することにより降雨に伴う地下水挙動を把握するためには、Dipole-Dipole 法が最も適していることが認められた。

5.4 比抵抗連続計測結果による水みち評価

5.4.1 比抵抗連続計測の概要

連続計測を実施するに際して、電極間隔が 1m、電極本数が 96 本の場合、最大測定深度は 30m であるが、すべての測点について計測すると、膨大な時間がかかることから、測定は基岩である砂岩層より浅部を中心に、最大の見かけ深度を 22m までとした。また、電極間隔も 2m としたので計測点の合計は 289 点、1 回当たりすべての測点を一巡するのに要する時間は、約 2 時間半である。各計測期間における測定間隔は 6 時間である。見かけ比抵抗計測は、図 5-9 に示す(a)から(e)までの 5 つの降雨事象（以後の計測期間は、計測期間(a)、計測期間(b)、…と表すことにする）について行った。これら図中の降雨は 6 時間ごとの降

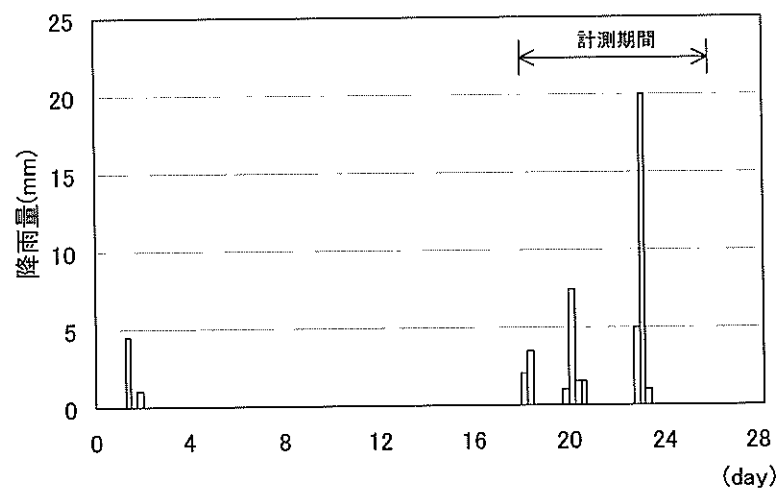


図 5-9 (1) 計測期間の 6 時間毎雨量 (計測期間 (a))

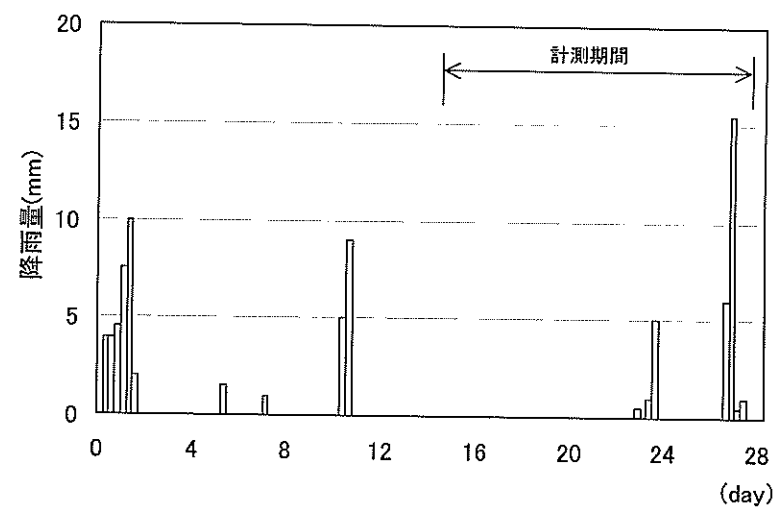


図 5-9 (3) 計測期間の 6 時間毎雨量 (計測期間 (c))

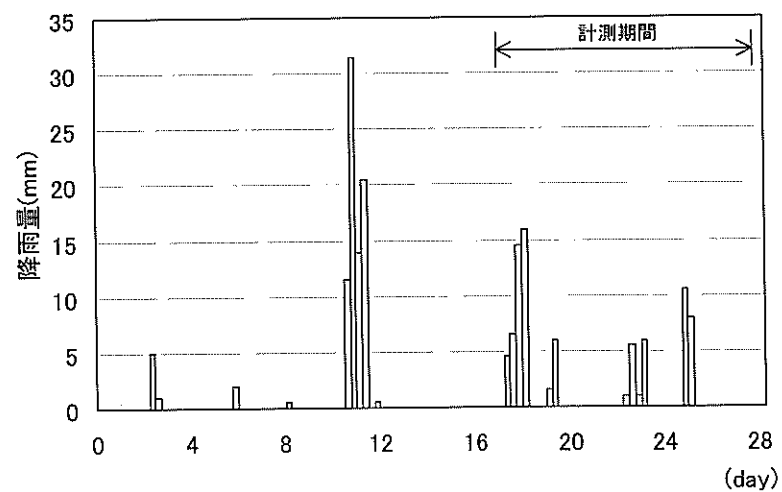


図 5-9 (2) 計測期間の 6 時間毎雨量 (計測期間 (b))

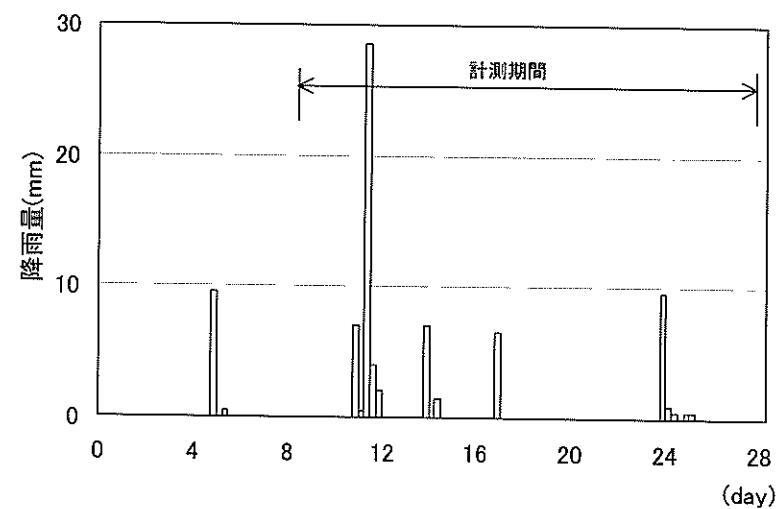


図 5-9 (4) 計測期間の 6 時間毎雨量 (計測期間 (d))

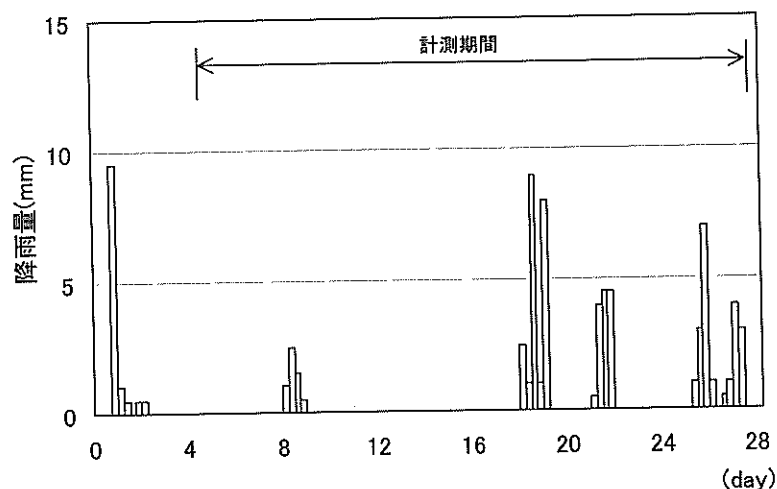


図 5-9 (5) 計測期間の 6 時間毎雨量 (計測期間 (e))

雨量である。また、計測は雨の降り出す前から行っており、したがって、地盤が降雨前まで最も乾燥している状態の見かけ比抵抗値も計測されている。各図に示した矢印は各計測期間で解析対象とした降雨である。各計測期間の計測開始時点において、地盤が乾燥状態にあるのが計測期間(a)と(d)であり、湿潤状態にあるのが計測期間(b), (c), (e)であると考えられる。

5.4.2 降雨に伴う見かけ比抵抗の時間的变化

図 5-10 は計測期間(a)における計測開始直後の見かけ比抵抗の等分布曲線を示す。さらに図 5-11 は、計測期間(a)における 3 回目の降雨直後のものである。図 5-10 と図 5-11 とを比較すると、降雨後は全体的に表層部を除き、見かけ比抵抗は低くなっているようにみられるが、場所によってその度合いは異なっているように思われる。とくに破碎帯部と思われる付近の見かけ比抵抗部の変化が大きいことが認められる。

図 5-12 は、計測期間(a)における電極番号 60 番、見かけ深度 4m、電極番号 74 番、見かけ深度 6m (以後 No.60-4, No.74-6 と表す) の見かけ比抵抗の時間変化を表している。ここで各測点のナンバーは電極番号、後の数字はその電極番号における断面表示上の深さ(m)を表している。まず No.60-4 においては、降雨に対して見かけ比抵抗はほとんど変化が見られず、ほぼ一定の値を示している。No.74-6 では降雨があると見かけ比抵抗は減少し、降雨後は徐々に増加している。No.60-4 のような見かけ比抵抗変化を示すのは、比較的浅い部分の

測点である。これはこの斜面においては表層部からの雨水の浸透は少ないためと考えられる。

さらに図 5-13 には、計測期間(c)における No.74-6 と No.46-10 の見かけ比抵抗の時間変化を示す。同図より、No.74-6 では計測期間(a)と異なる降雨パターンにおいても、無降雨期間中に徐々に見かけ比抵抗が増加して、降雨直後に低下することがわかる。このような変化は、他の計測点(No.46-10)でも認められる。

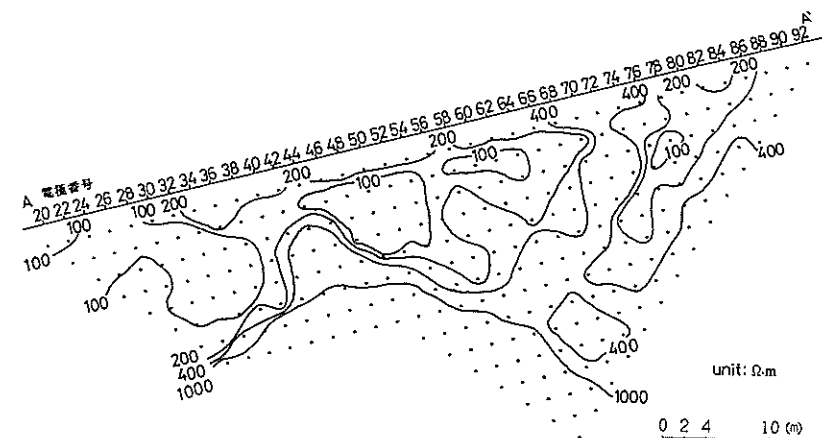


図 5-10 降雨前の見かけ比抵抗分布

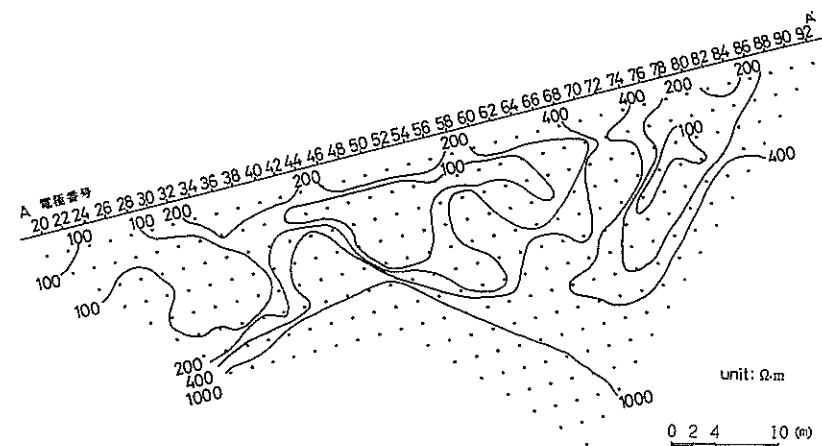
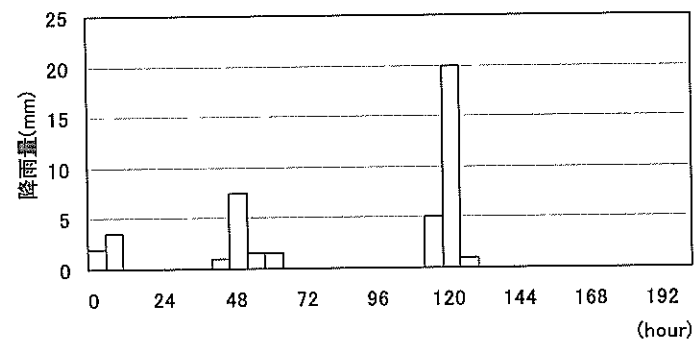
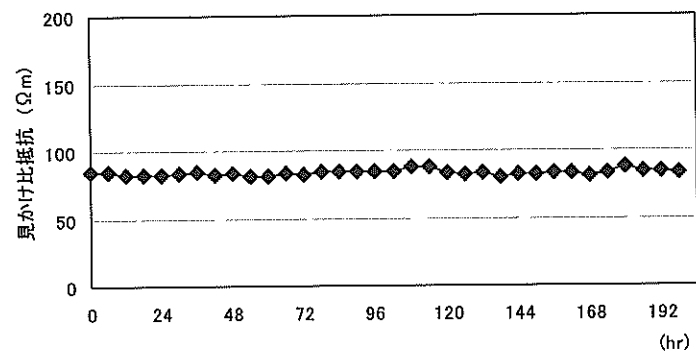


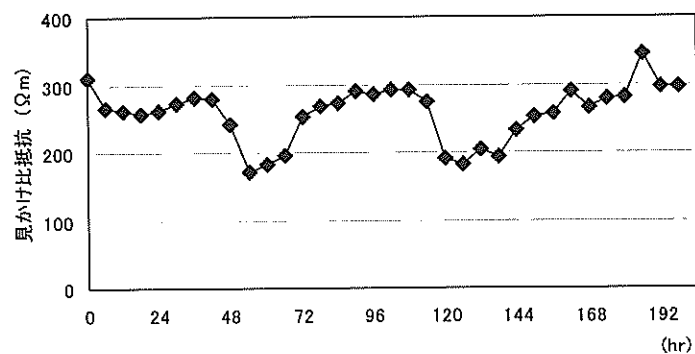
図 5-11 降雨後の見かけ比抵抗分布



計測期間(a)

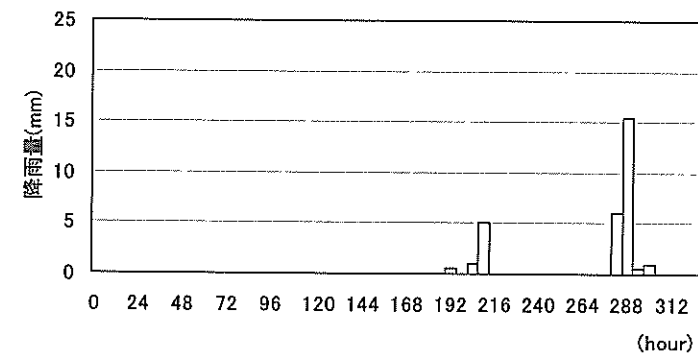


No. 60-4

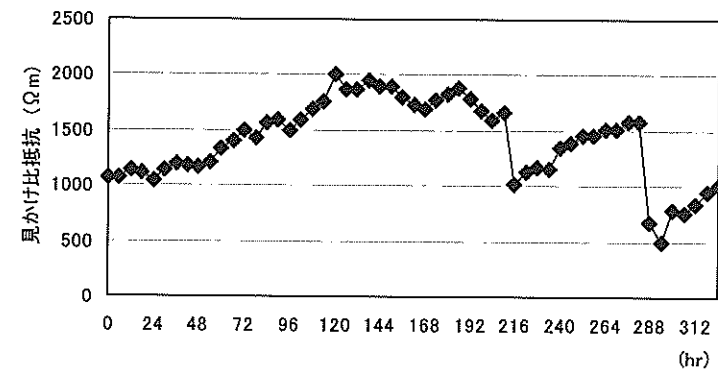


No. 74-6

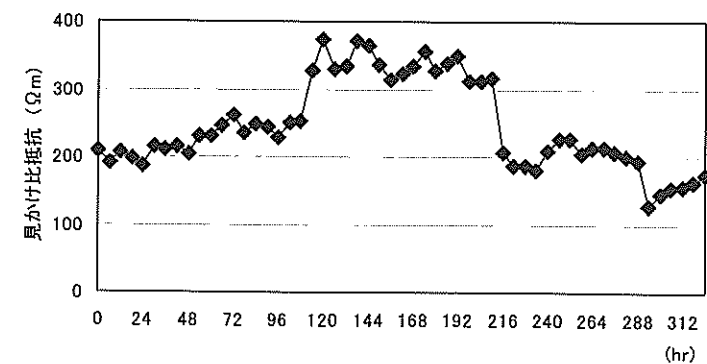
図 5-12 計測期間(a)における経時変化の一例



計測期間(c)



No. 46-10



No. 74-6

図 5-13 計測期間(c)における経時変化の一例

このように、降雨が観測されると見かけ比抵抗が減少を示す測点は、この斜面内では十数点（図 5-19 参照）見られ、それら測点の表示位置は、破碎帯や地層境界部に一致している。

5.5 比抵抗変化特性による透水性評価

先に示したように、降雨が観測されると見かけ比抵抗が下がるような現象を定量的に解析するために、次式に示した見かけ比抵抗変化率 α を各測点で求めた。

$$\alpha = (\rho_{\max} - \rho_x) / \rho_{\max} \times 100 \quad (5.3)$$

ただし、 α ：見かけ比抵抗変化率 [%]

ρ_{\max} ：各計測期間内における最も高い見かけ比抵抗 [$\Omega \cdot m$]

ρ_x ：ある連続する 6 時間降雨に対する最も低い見かけ比抵抗 [$\Omega \cdot m$]

図 5-14 は、計測期間(a)における降雨前後（図 5-10 と図 5-11）の見かけ比抵抗の等変化率分布曲線である。同図より、電極番号 78 番付近から左斜め落ちに 30～60% 程度の領域が帯状に見受けられる。

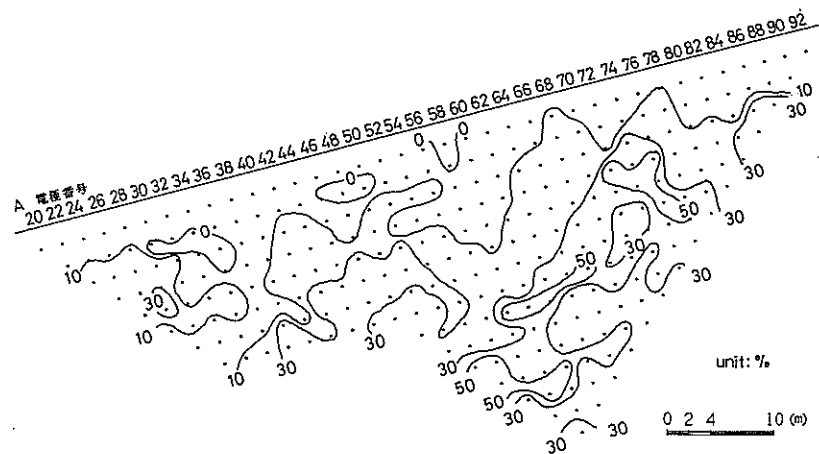


図 5-14 見かけ比抵抗変化率

図 5-15 は、計測期間(a)における各測点の降雨量と見かけ比抵抗変化率 α との関係を示したものである。この図より、降雨量が多くなると見かけ比抵抗変化率 α は増加しているが、その増加傾向は各測点によって異なっていることがわかる。しかし、これらの関係は次式に示すような指数関数に近似することができる。

$$\alpha = \beta \times r^\gamma \quad (5.4)$$

ただし、 r ：降雨量 [mm]

β, γ ：各測点によって決まる定数

一方、図 5-16 に示す降雨強度と見かけ比抵抗変化率の関係からは、明確な関係はみられない。このことから、本計測地の特徴として降雨に伴う地表からの浸透水に比べて、電極番号 76 番付近の風化の進んだ基盤岩の露出部分からの雨水の流入が多いということも鑑み、地盤の見かけ比抵抗の変化は、降雨による総雨量に関係が深いと考えられる。よって以下では、降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係について検討する。

図 5-17 は、計測期間(a)以後の各計測期間での No.74-6 における降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係について示したものである。この図で計測期間(b)と計測期間(e)における見かけ比抵抗変化率が、他の 3 回と比較して小さいことが判る。特に計測期間(b)においては、他の計測期間よりも約 50% 低い値となっている。この原因として、先行降雨の影響で基準とした見かけ比抵抗が、最も乾燥していると思われる状態と比べ低い値であったため、全体的に見かけ比抵抗変化率が小さくなったと思われる。そこで、これらの 2 回については、他の計測期間中に基準とする見かけ比抵抗を設定した。そのような補正を行うことによって各降雨量に対する見かけ比抵抗変化は、図 5-18 に示すように、かなり良好な指数関数的な関係となった。ところが今回は、各計測期間中の先行降雨の影響に対する補正は行っておらず、同一計測期間内での降雨量と見かけ比抵抗変化率との関係においてばらつきがみられる。したがって、今後は先行降雨からの経過時間による補正についても検討する必要がある。

上記の方法で、見かけ比抵抗の変化が顕著な測定点において見かけ比抵抗変化率 α を算出し、降雨量 r との関係を表(3)で近似させて β, γ を求め、疑似断面に表したのが図 5-19 である。この図より、見かけ比抵抗変化率と降雨量とが式(5.4)に近似できる測定点は、図 5-3 に示した弾性波探査による地層断面の破碎帯部と地層境界部に大方向一致しているものと考えられる。

さらに、 β, γ がどのような物理量を示すかを考察すると、概して β は水みちの規模を、 γ は降雨浸透の特徴（急激に変化するか徐々に変化するか）を示すものと考えられる。

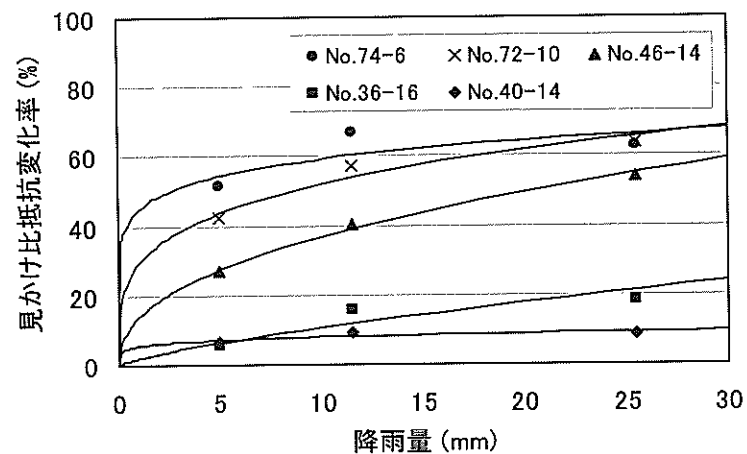


図 5-15 計測期間 (a) における降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係

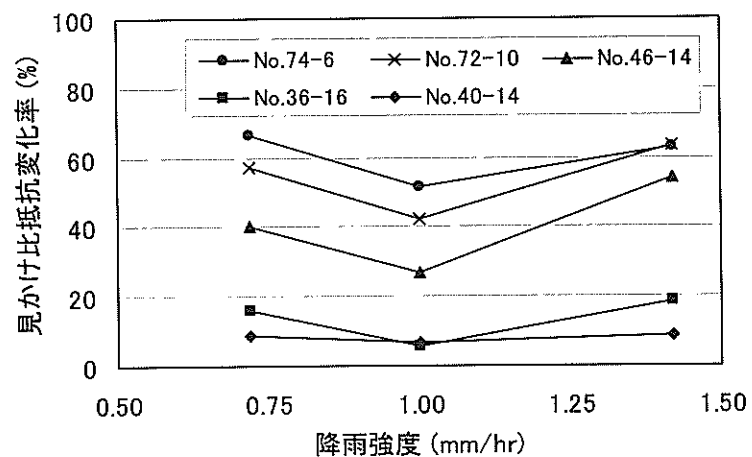


図 5-16 計測期間 (a) における降雨強度と見かけ比抵抗変化率の関係

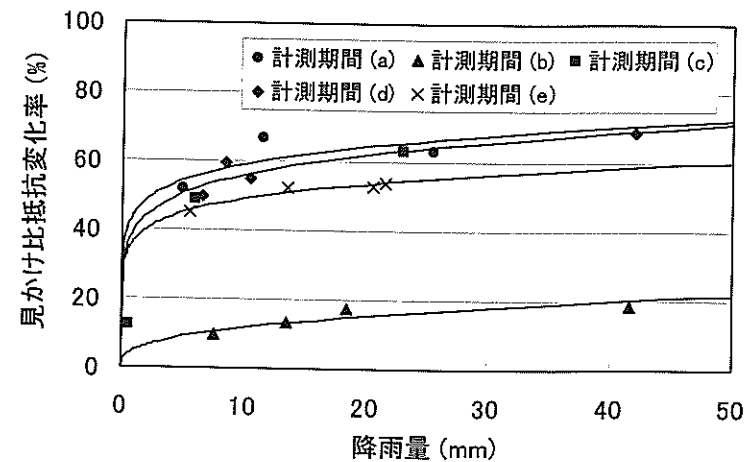


図 5-17 No. 70-6 における降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係 (補正前)

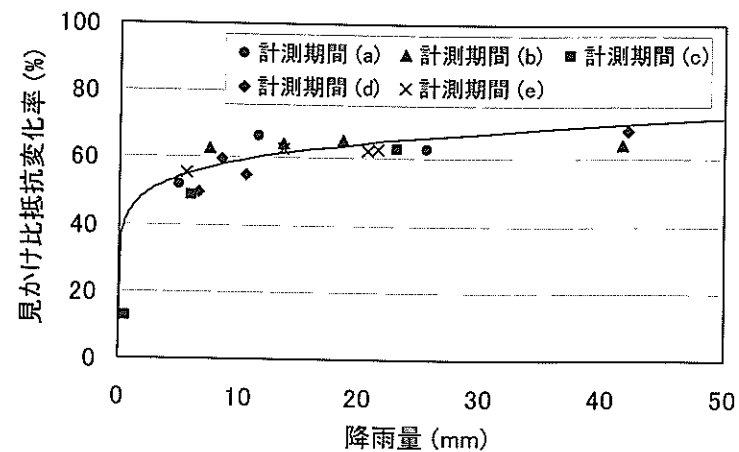


図 5-18 No. 70-6 における降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係 (補正後)

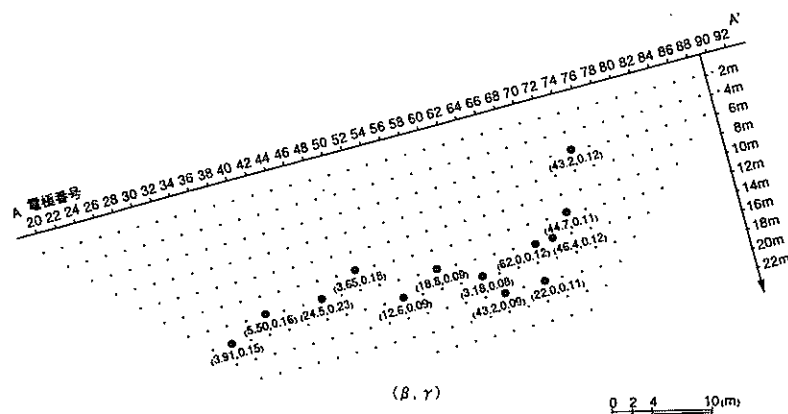


図 5-19 擬似断面における β と γ

5.6 まとめ

岩盤斜面において、降雨に伴う見かけ比抵抗変化を連続的に計測を行い、見かけ比抵抗変化率 α という指標を用いて降雨量と α の関係について検討した。さらに、降雨量と α は指数関数的な関係を有し、同一の破砕帯部の異なった測定点においても、ほぼ同じ値の係数、指数を持った指数関数で表されることが判明した。この関数は地山の水みちの性状によって異なることが推測される。このことから、本手法を用いて斜面の透水性の評価が行えるものと考えられる。

参考文献

- 1) 和田卓也・井上誠・横田修一郎・岩松暉：電気探査の自動連続観測によるシラス台地の降雨の浸透，応用地質，Vol.36/No.5，pp.29-38，1995.
- 2) 長江亮二・竹内睦雄：電気探査による地下水流動モニター法の研究（その2），応用地質，Vol.33/No.1，pp.1-16，1990.
- 3) 高倉伸一：比抵抗による地下水位変化のモニタリングの試み，物理探査，Vol.44/No.4，pp.227-231，1991.
- 4) 鈴木浩一・東貞成・志田原巧：比抵抗トモグラフィ法の地下水流動のモニタリングへの適用，電力中央研究所報告，U97065，1998.

- 5) Kusumi, H., Taniguchi, K. and Nakamura, M.: Monitoring of Groundwater Behavior on a Rock Slope by Dipole-dipole Electric Resistivity Technique, Safety and Environmental Issues in Rock Engineering (Erock'93), pp.331-336, 1993.
- 6) 楠見晴重・中村真・西田一彦：連続計測による岩盤斜面の破砕帯部における見かけ比抵抗と降雨の関係，応用地質，Vol.38/No.2，pp. 74-82，1997.
- 7) Kusumi, H., Nakamura, M. and Nishida, K.: Monitoring of Groundwater Behavior Caused by Rainfall Fracture Zone of Rock Slope using Electric Resistivity Method, 8th International Symposium on Landslides, pp.871-876, 2000.

第6章 原位置および室内比抵抗計測による岩盤の工学的評価

6.1 はじめに

山岳トンネルや地下発電所空間などの地下構造物を計画・設計するにあたって、地質構造および地盤物性を把握するための事前調査として、地表面からの弾性波探査が実施され、これらの結果に基づき地山分類や支保構造の設計が行われている。しかし、これらの調査の分解能は低く、地山区分、複雑な地質構造や地下水の性状などの掘削位置周辺地山の地質構造を十分に把握していない。

近年、これらの調査に加えて電気探査等の比抵抗による評価が利用されつつあるが、これらの探査結果は、直接設計・施工に結びつけられることは少ないのが現状である。

本章では、まず地質境界のある既設トンネルのトンネル坑内で実施した簡易比抵抗結果と岩級区分、岩盤良好度、湧水評価点および実績湧水量などの関係について分析した。次にトンネル坑内で測定した簡易比抵抗結果を用いて、岩盤良好度から推定した間隙率と室内試験の比抵抗と有効間隙率の関係の比較を試みた。さらに、室内試験で得られた比抵抗と間隙率および体積含水率の関係を用いて簡易比抵抗測定から得られた比抵抗を変換し、間隙率および体積含水率と支保工種の関係について検討した¹⁾。

6.2 検討に用いた導水路トンネルの概要

岐阜県西北端に位置するA水力発電所²⁾は、床川支流の荒谷川の中流部に高さ13.2mの取水ダムを築造するとともに、kWh増をはかるため荒谷川支流の2箇所からも溪流取水を行い荒谷川本川に注水することで最大5m³/s取水する。取水した水は、高さ2.2m、幅2.0m、全長が約2.4km、水路勾配1/640の導水路トンネルで水槽に導水し、内径1.4mの水圧鉄管を経て273.6mの有効落差を利用し、最大出力11,200kWの発電を行うものである。図6-1は、計画平面図を示したものである。

導水路トンネル周辺の地質は、中生代白亜紀に生成された濃飛流紋岩類および白川花崗岩が主体となり、これを貫く厚さ10cmから3mの貫入岩（主としてひん岩）、そしてこれら基盤岩を覆う未固結の段丘堆積物および崖錐堆積物から構成される。濃飛流紋岩は流紋岩および流紋岩質熔結凝灰岩から構成され、一方白川花崗岩は中粒および細粒花崗岩から構成されている。地質上重要な構造線としては、付近に御母衣断層のほか勝津川断層、牛首断層といった活断層が存在し、広い範囲に広域破碎作用を与えている。

トンネルの地質分布を図6-2に示す。この図から、トンネル中央部よりやや上流側に位置するナラ谷をほぼ境にして上口側は流紋岩が主体で、一部中粒花崗岩からなっており、下口側は花崗岩が主体となっている。地質状況は、破碎作用の影響もあって亀裂が進展し、

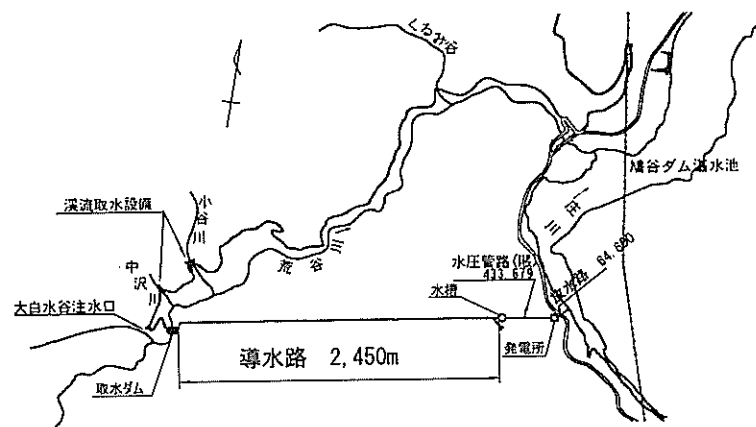


図 6-1 導水路トンネル平面

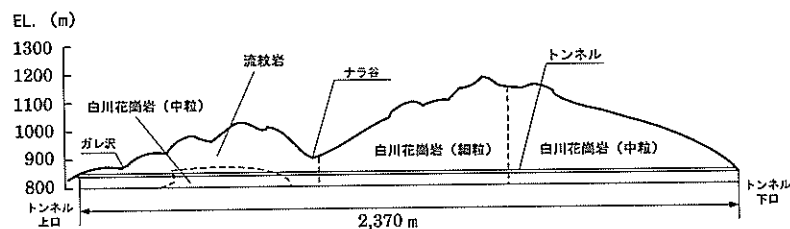


図 6-2 導水路トンネル断面

風化も進行しておりトンネルの地質として非常に悪い状況である。

トンネル掘削開始直後から、両坑口ともに地質不良が続き、上口側では掘削を開始してしばらくした後に、切羽に河床砂礫が出現しルート変更を余儀なくされた。また、地質不良に加えて度重なる出水と断層破碎帯に起因するトラブルによりトンネルの施工は困難を極めた。

6.3 導水路トンネルにおける簡易比抵抗探索結果による地質構造評価

6.3.1 不飽和状態下にある岩石の比抵抗特性

試験に用いた岩石供試体は、表 6-1 に示す 3 種類の硬岩である。それぞれの有効間隙率は表に示すとおりである。各岩石は硬岩の部類に属するもので、各岩石の供試体は、直径 50mm、高さ 100mm の円柱に成形した。図 6-3 は、流紋岩の岩石供試体の比抵抗～飽和度関係の一例である。同図より、岩石供試体の比抵抗と飽和度の関係は、飽和度が減少するにしたがって比抵抗が増加し、この関係は指数関数として表すことができる。

他の供試体においても、比抵抗と飽和度の関係は相関よく指数関数で表せることがわかった。さらに、中粒花崗岩と細粒花崗岩についても同様の結果が得られた。

表 6-1 供試体諸元

岩 種	本数	有効間隙率
流紋岩	8	0.008～0.030
細粒花崗岩	4	0.009～0.012
中粒花崗岩	9	0.009～0.014

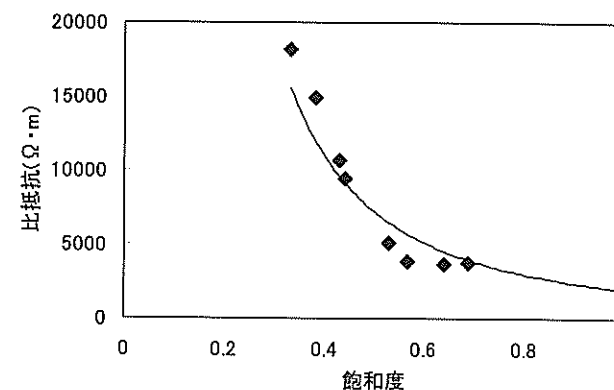


図 6-3 飽和度と比抵抗の関係（流紋岩）

次に、図 6-4 は飽和状態にある流紋岩(Rh)、中粒花崗岩(mGr)および細粒花崗岩(fGr)の有効間隙率 ϕ と、第 3 章で検討した A 値との関係について示したものである。ただし、流紋岩については、他地点の岩石供試体による試験結果も加えてある。第 3 章で行ってきた室内試験結果の評価では、有効間隙率が小さくなるほど A 値は大きくなり、特に有効間隙率が小さいところでは、A 値の増加が著しいことから、次式に示す指数関数によって近似することを試みてきた。

今回も同様に指数関数で近似したところ、流紋岩については相関よく近似できたが、中粒花崗岩および細粒花崗岩については、各岩石供試体間の有効間隙率の差が小さいため、あまり顕著な相関性が見られなかった。

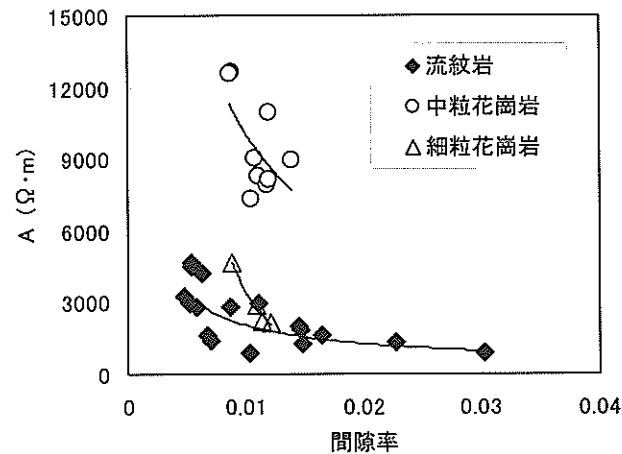


図 6-4 飽和度時の比抵抗と有効間隙率の関係

6.3.2 岩石コア、原位置岩盤の比抵抗～間隙率関係

原位置岩盤への適用性を検討するために、岩石採取地点の導水路トンネルにおいて、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調べた。

トンネル掘削現場の比抵抗は、掘削切羽で簡易比抵抗測定器を用いて 7 測点で測定した。同時に、従来から多用されている電中研式岩級分類 (表 6-2 参照) に加えて、表 6-3 に示す Q 値による評価法を改良した地山評価手法を用いて「岩盤良好度」を判定した。この中で湧水の評価点は、「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」と評価している。表 6-4 にこれらの結果をまとめて示す。

表 6-5 は、各評価手法による地山区分を対比した花崗岩の例³⁾で、現場で判定した岩級区分と岩種の良好度から間隙率を推定するために引用した。この関係から図 6-5 に示すような間隙率と岩盤良好度との関係を仮定した。

図 6-6 は、流紋岩領域の湧水を確認した切羽における比抵抗の最大・最小値を岩盤の良好度に対して示したものである。比抵抗はかなりばらついているが、これは切羽全面にわたって均等に湧水が生じていないため、不飽和状態の測点も計測していることが原因と考えられる。しかし、各切羽の簡易比抵抗測定結果では、比抵抗の最低値を示す測点が湧水の影響を一番大きく受けて飽和に近い状態にあると仮定し、表 6-4 の岩盤の良好度から推定した間隙率に対して室内試験で求めた近似曲線 (飽和状態) との整合性を調べた。

図 6-7 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併記したものである。図から室内試験結果に多少のばらつきはあるものの、簡易比抵抗測定結果とともに同じ指数関数で近似できることがわかる。なお、簡易比抵抗測定結果の比抵抗が若干大きめの測点は、湧水評価においては「2」と判定されているものの、切羽での湧水量がほぼ 0 であることから、飽和状態にまで至っていないものと考えられる。

また、図 6-8 は、中粒花崗岩での測定結果である。図から室内試験結果と簡易比抵抗測定結果は、かなり相関性の高い指数関数で近似できることがわかる。

さらに図 6-9 に示す細粒花崗岩においても、簡易比抵抗測定結果には、岩盤が飽和に至っていないと思われる測点も見受けられるが、ほぼ一つの指数関数上に分布することがわかる。

表 6-2 電力中央研究所式岩盤分類

記号	特 徴
A	極めて新鮮なもので、造岩鉱物および粒子は風化・変質を受けていない。亀裂節理はほとんどなく、あってもよく密着し、それらの面に沿って風化の跡は見られないもの。岩質はきわめて堅硬でハンマーによって打診すれば、澄んだ音を出す。
B	岩質堅硬で開口した亀裂あるいは節理はなく、よく密着している。ただし造岩鉱物および粒子は部分的に多少風化・変質が見られる。ハンマーによって打診すれば、澄んだ音を出す。
C _H	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けているが、岩質は比較的堅硬である。一般に鉄銹などに汚染せられ、節理あるいは亀裂間の粘着力はわずかに減少しており、ハンマーの強打によって割れ目に沿って岩塊が剥離し、剥離面には粘土質の薄層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば、少し濁った音を出す。
C _M	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けて多少軟質化しており、岩質も多少柔らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は多少減少しており、ハンマーの普通程度の打撃によって割れ目に沿って岩塊が剥離し、剥離面には粘土質の薄層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば、多少濁った音を出す。
C _L	造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて軟質化しており、岩質も柔らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は減少しておりハンマーの強打によって割れ目に沿って岩塊が剥離し、剥離面には粘土質の薄層が残留する。ハンマーによって打診すれば、濁った音を出す。
D	造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて著しく軟質化しており、岩質も著しく柔らかい。節理あるいは亀裂間の粘着力はほとんどなく、ハンマーによってわずかな打撃を与えるだけで崩れ落ちる。ハンマーによって打診すれば、著しく濁った音を出す。

表 6-3 地質観察シートの一例

岩種		流紋岩		花崗岩		貫入岩・火成岩	
区分		1	2	3	4	5	7
岩盤	A 電研分類	B以上(95)	C ₁ (95)	C ₂ (65)	C ₃ (45)	D(0)	-
	B 掘削後の切羽の状態	安定(90)	時々小石が落ちるが(70)	時々岩塊がぬけ落ちるが(65)	掘削の際に岩塊がぬけ落ちるが(60)	岩塊が抜け落ちる(5)	大塊で抜け落ち、自立困難(0)
	C ハンマーによる打診	鋭い金属音(キンキン)を発生し強く反発する。強打すれば割れ目に沿って大きく割れる。(80)	金属音(キンキン)を発生し反発する。強打すれば割れ目に沿って大きく割れる。(80)	やや濁った音(カンカン)を発生し強く反発。強打すれば割れ目に沿って部分的に小片に割れる。(60)	濁った音(ボンボン)を発生しほとんど反発しない。ハンマーのビックで磨くことができる(40)	著しく濁った音(ドンドン)を発生し反発しない。ハンマーのビックで磨くことができる。(0)	ハンマーで押すとへこむ。だんだん土状・粉状(0)
	D 割れ目の形状	塊状(100)	ランダム形状(70)	板状層状(60)	細片状～土砂状(10)	-	-
	E RQD	50以上(90)	49～25(70)	24～10(65)	9～0(35)	-	-
良好度	RQDの算出式: $RQD=15-3.3 \times \sum V_i$ (1系列のクラック間隔(m)) $\times 1/1$ (1系列のクラック間隔(m)) $\times 100$						
岩質	F 割れ目間隔	30cm以上(100)	29～10cm(75)	9～5cm(60)	4～2cm(0)	1cm以下(0)	-
	G 割れ目の状態	表面は荒くよく密着している。介在物はない。(100)	表面は荒くよく密着している。介在物はない。(90)	表面は荒くよく密着している。一部に鉄銹があるが連続しない。(70)	1ないし2系統の連続する鉄銹が発達する。(55)	多方向の連続する鉄銹が発達し、粘土を挟む。(10)	-
	H 割れ目の開口性	密着している(95)	わずかに開口(65)	開口(65)	開口し粘土を挟む(40)	-	-
	I 風化・変質の度合い	新鮮(95)	割れ目に沿ってやや変質、岩片内部は新鮮(65)	割れ目も、岩片内の亀裂も変色(50)	岩石自体が変色し軟質化(50)	軟質化が進み破砕状(0)	-
	J 掘削機による割れ方	硬くてもんもんの音がなかなか定まらない(80)	難な音(80)	前岩塊の振動でロスはかなり落ちるが穴はくづれる。(55)	振動でかなり崩れ落ちるが、掘削は困難。穴がくづれる。(5)	掘削機で穴は掘れ、ビック掘によるもの。(5)	-
好度	K のみ下がり速度	非常に速い(80)	速い(80)	普通(55)	速い(5)	非常に速い(5)	-
	L J _n	A,B,C(100)	D(95)	E(75)	F(70)	G(60)	H,J(5)
	M J _a	A(100)	B(90)	C,D(80)	E(65)	F,G,H(60)	J,K,L(45)
	N J _r	A,B(100)	C,D,E(95)	F(70)	G,H,J(35)	-	M～P,R(10)
	区分	1	2	3	4	5	7
湧水評価	湧水の湧出	なし	湧水・じみ出る程度	湧水程度	少量連続して落ちる。	特定の位置から集中的に噴出する。吹付けが難しい。	切羽全面よりかなりの量。吹き出し、吹付けが不可能。
	湧水量	坑口湧水量(L/min):4300			切羽での推定湧水量(L/min):15		
評価点		岩盤の良好度:71 (A～Nの評点の平均値)				湧水評価:3 (湧水評価区分)	
評価からの判定工程:		実施工程 C-1(c)					

表 6-4 簡易比抵抗測定結果

岩種	TD(m)	岩級	良好度	湧水	比抵抗(Ω・m)							坑口湧水量 (リットル/min)
					1	2	3	4	5	6	7	
Rh	1号上ロッド											
	44.4	CL	35	2	288	577	2069	2605	3681	5089	7227	0
	46.2	CL	43	2	731	1183	1279	3118	3347	3573	4782	0
	48.9	CL	37	2	748	1375	1827	2288	3520	3887	4393	0
	69.6	CL	31	1	1063	1136	1193	2143	2493	4260	4840	0
	92.7	CL	38	1	962	1713	1760	1893	1981	2693	4708	0
	121.7	CL	21	1	1178	1540	1816	2286	2907	3362	4924	0
	137.9	CL	47	1	529	646	811	1516	2161	3453	6855	0
	175.5	CL	33	1	1487	1526	1679	1920	2533	5405	9540	0
	202.8	CL	24	1	1154	1433	1713	1829	1837	2146	2307	0
	232.4	CL	58	4	429	549	570	676	1081	1267	1310	1
	253.5	CL	60	4	356	1222	1709	1820	1933	2387	2588	43
	283.5	CL	35	1	154	567	656	952	1134	3648	8784	100
	300.3	CL	46	1	208	423	985	1068	2211	4857	5280	75
	325.0	CL	25	3	225	704	804	1327	1588	2244	3354	108
347.0	D	18	2	58	197	265	298	3435	4538	4650	100	
372.5	CL	20	2	20	46	102	202	712	1782	2119	2000	
mGr	424.4	D	18	2	94	99	165	187	221	856	1291	225
	452.0	CL	27	2	194	289	411	680	691	836	1924	260
	488.0	CL	47	1	785	821	968	1055	1098	1146	3630	293
	518.0	CL	30	3	345	448	1010	1343	1411	2027	3961	293
	546.0	CL	52	3	179	704	837	930	994	1289	1382	293
	569.9	CL	36	3	67	216	357	427	567	843	1039	1645
	596.8	CM	76	2	756	787	850	3264	3531	3811	6735	1543
	624.0	CM	67	3	720	1171	2091	3138	3679	6066	9831	551
	653.0	CL	57	2	217	267	711	3193	3518	4412	6171	454
	683.5	CL	62	1	1470	2028	2703	3432	3671	3686	8374	585
fGr	899.0	CL	33	1	275	275	323	428	651	729	5365	502
	927.0	CL	33	1	140	484	2090	2880	5165	12320	37455	454
	966.2	CL	46	2	390	966	334	390	688	2126	10587	535
	987.8	CL	49	2	96	201	323	419	691	929	2000	502
	1030.0	CM	67	5	1642	3102	3146	3506	3520	3148	4840	1500
	1146.4	CL	66	3	7257	12410	13737	15600	19663	26764	29700	2062
	1186.6	CL	55	3	985	4932	5250	6100	7116	15800	21600	3500
	1228.6	CL	57	2	114	302	813	2000	4382	11640	12961	4300
	1265.8	CM	73	2	708	843	2186	3127	3673	4352	10596	4600
	1295.8	CL	45	2	436	666	944	2100	3653	6009	15421	4100
	1号下ロッド											
	974.0	CM	71	3	804	936	6495	8343	9470	13533	18339	4000
	951.0	CM	85	2	3049	7764	9950	11705	19221	20968	21634	4000
	921.0	CL	41	2	307	757	1060	2148	6656	8588	13805	4000
	868.0	CM	72	3	700	4125	8932	9922	15900	20529	26100	1400
833.0	CL	60	3	7940	10290	11971	12490	18500	31865	32900	1400	
785.0	CL	49	5	71	4500	7088	7748	10880	11300	17097	1400	
mGr	658.1	CL	61	2	53	67	94	472	2055	2081	2129	800
	592.7	CM	80	1	1409	1771	2281	3460	5600	6115	11717	1500
	552.0	CL	63	2	392	1146	2109	3267	3904	4722	4972	2000
	511.7	CM	64	5	56	942	7324	8388	9278	9705	11061	1000
	481.3	CL	70	1	1422	5270	5781	13838	13970	16127	49280	800
	468.8	CL	61	5	1792	5039	-	-	-	-	-	1000
	395.5	CM	66	1	260	1020	1196	1811	2701	2405	3533	0
	368.0	CM	63	1	699	1100	1724	2600	3037	3133	8909	0
	322.0	CM	68	1	752	787	1574	3375	3550	9272	22572	0
	292.5	CM	58	1	944	1089	2274	2778	4180	4604	7062	0
	260.0	CM	74	1	852	1418	2022	4731	5709	7480	10296	0
	193.0	CL	48	1	993	1203	1420	1593	1895	3476	4177	0
	157.4	CH	76	1	1280	1384	2131	2694	3475	3956	8506	0
	122.0	CM	74	1	1984	2277	4355	4973	34144	42361	43232	0
	85.1	CH	80	1	3225	3996	4520	4758	5250	5965	9077	0
	47.3	CM	76	1	2864	5446	6132	6795	7346	7583	10946	0
	27.0	D	66	1	3273	4940	6714	6787	8690	9845	10479	0
	2号ロッド											
49.0	CM	63	1	2788	4816	5068	6955	7122	7205	7778	0	
37.3	CL	65	1	2376	2574	4913	5163	6222	7403	8385	0	
23.8	D	41	1	1513	1811	3771	4814	9945	11129	12320	0	

表 6-5 岩級区分と間隙率の関係(花崗岩の例)

岩級区分	岩盤良好度	間隙率
D	0~20	0.14以上
C _L	20~40	0.07~0.14
C _M	40~60	0.035~0.07
C _H	60~80	0.035以下
B以上	80~100	

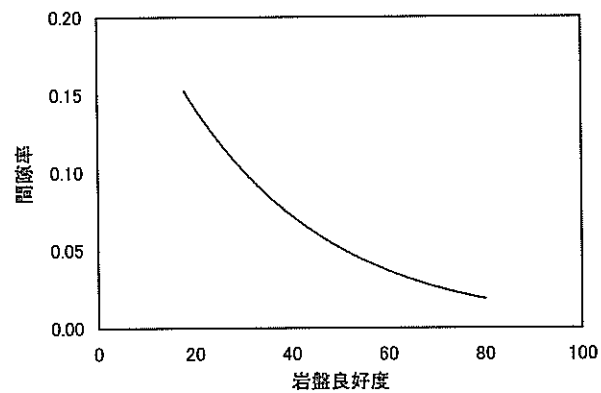


図 6-5 間隙率と岩盤良好度の関係(仮定)

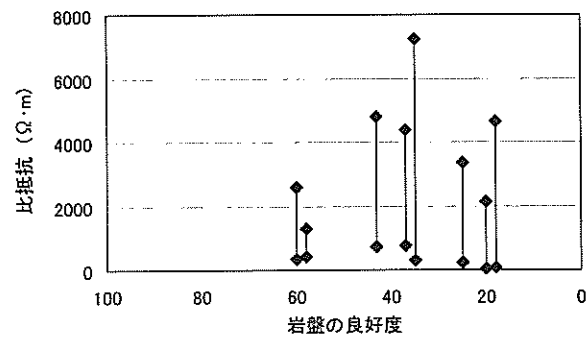


図 6-6 現位置測定における比抵抗のばらつき

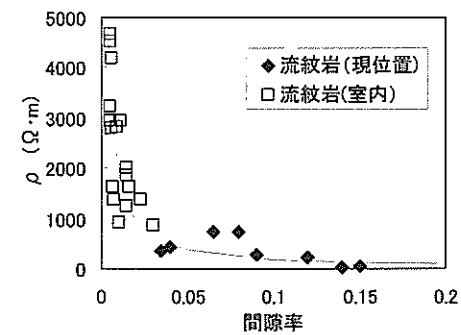


図 6-7 室内試験と現位置測定結果の比較(流紋岩)

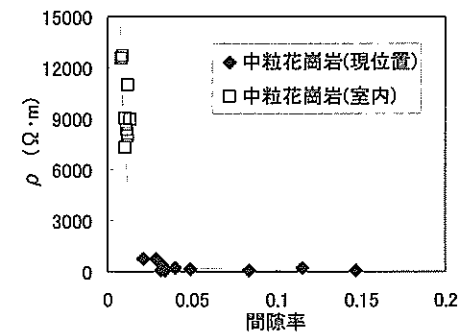


図 6-8 室内試験と現位置測定結果の比較(中粒花崗岩)

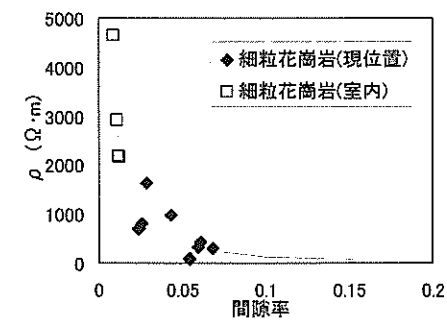


図 6-9 室内試験と現位置測定結果の比較(細粒花崗岩)

6.3.3 支保設計への適用性の検討

従来の支保設計では、弾性波探査等の結果から評価した岩の良好度を用いていた。しかしながら、湧水の有無が非常に関係深いため、設計には水の情報も考慮する必要がある。

そこで、間隙率と飽和度の積である体積含水率を用いて評価を試みた。体積含水率は、簡易比抵抗測定結果から式 (6.1) を用いて算出した。

$$\rho = c \cdot (Sr \cdot \phi)^d \quad (6.1)$$

ただし、 c 、 d は岩種ごとに固有の係数および指数であり、各岩種におけるパラメータを表 6-6 に示す。体積含水率と岩盤良好度から求めた間隙率を実績支保工種と比較したのが図 6-10 および図 6-11 である。図中の支保工種における使用は表 6-7 に示す通りである。これらの図より、体積含水率で評価した方が、若干右上がりの傾向が認められる。但し、同一支保工種内でのバラツキについては今後の検討課題である。

表 6-6 岩種毎によるパラメータ

岩 種	c	d
流紋岩	111	0.70
細粒花崗岩	0.25	2.07
中粒花崗岩	124	0.99

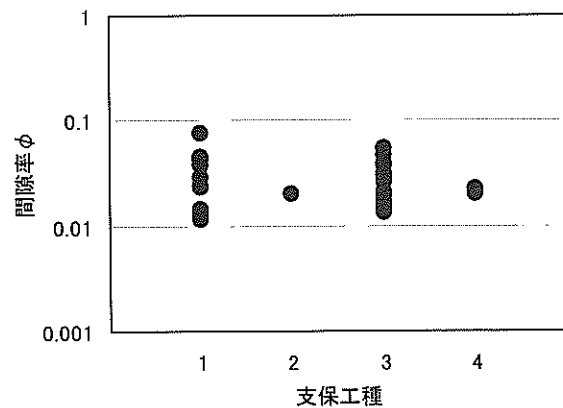


図 6-10 間隙率と支保工種の関係

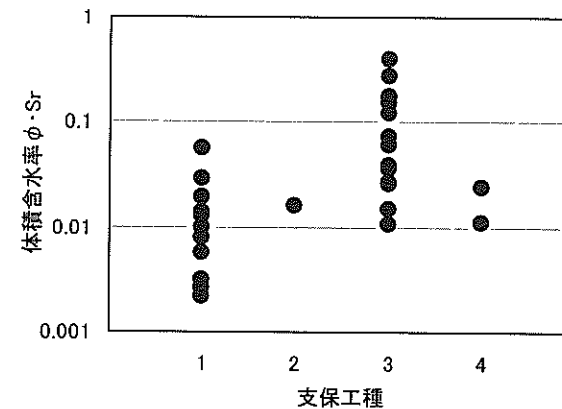


図 6-11 体積含水率と支保工種の関係

表 6-7 支保工種とパターン

工種	支保パターン
1	吹き付けコンクリート、ロックボルト
2	吹き付けコンクリート、ロックボルト、I型鋼
3	吹き付けコンクリート、ロックボルト、H型鋼
4	覆工コンクリート、H型鋼

6.4 まとめ

本検討では、電気探査による地盤の比抵抗からトンネルの支保設計を行うための基礎検討として、まず同一トンネル内で採取した 3 岩種の岩石コアの室内試験結果とトンネル切羽で実施した簡易比抵抗測定結果を比較し、各岩種ごとに一つの比抵抗～間隙率関係で示すことができた。

さらに、支保設計への適用性の検討では、間隙率による評価と比較して、岩盤の良好度と水の情報を包括した体積含水率による評価の有効性を示すことができた。

参考文献

- 1) Nakamura, M., Kusumi, H. and Kondo, E.: Application of Several Electric Resistivities of Rock Masses for Tunnel Supporting Design, Modern Tunneling Science and Technology (IS-KYOTO 2001), CD-ROM, 2001.
- 2) 岸本修治・竹内信久・庄司功: 荒谷水力発電所の設計と施工, 電力土木, No.277, pp.39-47, 1998.
- 3) 土質工学会編: 土質工学ライブラリー16, 風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用, pp.128-134, 1979.

第7章 複数の物理探査結果の変換解析による地質構造評価

7.1 はじめに

トンネル等の岩盤を対象とした地下構造物の建設における地質調査として、弾性波探査や電気探査が実施されている例が多いが、これらの調査結果に基づく設計は経験的で、度々実際と異なることがある。蓮井ら¹⁾は、近年地盤内部の可視化技術としてトモグラフィーに関する研究が盛んに行われているが、掘削実績による検証にまで至らず、一方的な推定に留まるものが多いと述べている。このような背景の中、菅原ら²⁾はジオトモグラフィー手法を実用的なものとするためには、条件の異なる多くのサイトに適用し、結果の評価と手法の改良を繰り返していく必要があると指摘する中で、弾性波トモグラフィーと比抵抗トモグラフィーの2種類の手法について、その適用性を検討するとともに両者を併用することの有効性について指摘している。また、横井ら³⁾は地下坑道における地質観察結果とレーダトモグラフィー、比抵抗トモグラフィー、弾性波トモグラフィー等の物理探査結果の比較検討を行って、いずれの手法とも地質構造評価に有効であることが確認され、さらに今後より体系的にさまざまな手法を併用することによって、より高精度な解析が可能となることが期待されると述べている。

併用探査による評価として最近の研究では、比抵抗と弾性波速度を組み合わせで解釈しようとする手法が提案されている。松井ら⁴⁾は、岩盤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であることを用いて、比抵抗検層データから岩盤の弾性波速度を換算し、これを速度検層データと比較している。さらに、これらの関係式に基づいて、比抵抗高密度探査結果から得られる換算弾性波速度による地山区分手法を示している。また内浦ら⁵⁾は、比抵抗高密度探査、弾性波探査、岩石試験により得られる物性値を用いて、理論的に上記の各パラメータの定量値を算出し、これらの値を用いて比抵抗を岩盤の弾性波速度と間隙率に換算している。

著者は、岩盤の含水状況に大きく左右される比抵抗に関して、その関係を定量的に明らかにするために、種々の岩石における比抵抗と間隙率、飽和度の関係を室内試験で把握し、その評価手法を確立するとともに、現地で得られた弾性波速度と比抵抗の測定結果を間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法のシステム化を図った^{6,7)}。

本章では、著者が提案する地質構造評価手法の概要を述べるとともに、本システムで用いる比抵抗および弾性波速度の物理定数評価式（以下、変換式と称する）の妥当性を、岩盤モデルを用いた室内試験により検証した結果について述べる。さらに、本システムを既往のトンネル経過地点の地質構造評価に適用し、掘削実績と比較することによって適用性の検証を行った結果を述べる。

7.2 変換解析による地質構造評価システム

原位置岩盤における弾性波速度と比抵抗とは異なる物理量ではあるが、岩盤の間隙率や水の飽和度をパラメータとして関係付けることができる。弾性波速度については式(7.1)に示す Wyllie(1956)の式が、比抵抗については式(7.2)に示す Archie(1941)らの式が一般に知られている。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-\phi)}{V_m} + \frac{\phi \cdot S_r}{V_f} + \frac{\phi \cdot (1-S_r)}{V_a} \quad (7.1)$$

$$\rho = m' \cdot \rho_w \cdot \phi^n \cdot S_r^B \quad (7.2)$$

ただし、

V_p : 岩盤の弾性波速度 [km/sec]

V_m : 岩石実質部の弾性波速度 [km/sec]

V_f : 間隙水の弾性波速度 [km/sec]

V_a : 空気間隙の弾性波速度 [km/sec]

ρ : 岩盤の比抵抗 [$\Omega \cdot m$] で比抵抗探査で求めたもの

ρ_w : 間隙水の比抵抗 [$\Omega \cdot m$]

m' , n , B : 地質の違いによる係数

ϕ : 間隙率, S_r : 飽和度

Archie らの式については、最近の研究^{8), 9)}によれば、この式は砂層ではよく適合するが、岩盤ではあまりよく適合しないとされているので、本システムでは式(7.3)の並列回路モデルを採用するものとした¹⁰⁾。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_0} \quad (7.3)$$

ただし、

F : 地層比抵抗係数 ($m' \cdot \rho_w \cdot \phi^n \cdot S_r^B$)

ρ_c : 粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗 [$\Omega \cdot m$]

ρ_0 : 岩石実質部の比抵抗 [$\Omega \cdot m$]

式(7.1)および式(7.3)は、間隙率 ϕ と飽和度 S_r を変換して、ひとつの岩盤要素（小要素に分割したセル）についてそれぞれ次の連立した方程式として表される。

$$V_p = f(\phi, S_r) \quad (7.4)$$

$$\rho = g(\phi, S_r) \quad (7.5)$$

したがって、地盤の比抵抗と弾性波とが既知であれば、式(7.4)と式(7.5)から逆解析（最適化手法）により、未知の間隙率と飽和度を求めることができる。

図 7-1 に変換手法による地質構造評価システムのフローを示す。図 7-2 に示すような岩盤要素（小要素に分割したセル）において、各セルごとに 1 対の比抵抗と弾性波速度が求められると、変換式の選択と別途室内試験により変換パラメータの設定を行い⁶⁾、変換解析と称する逆解析（最適化手法）により間隙率と飽和度が得られる。

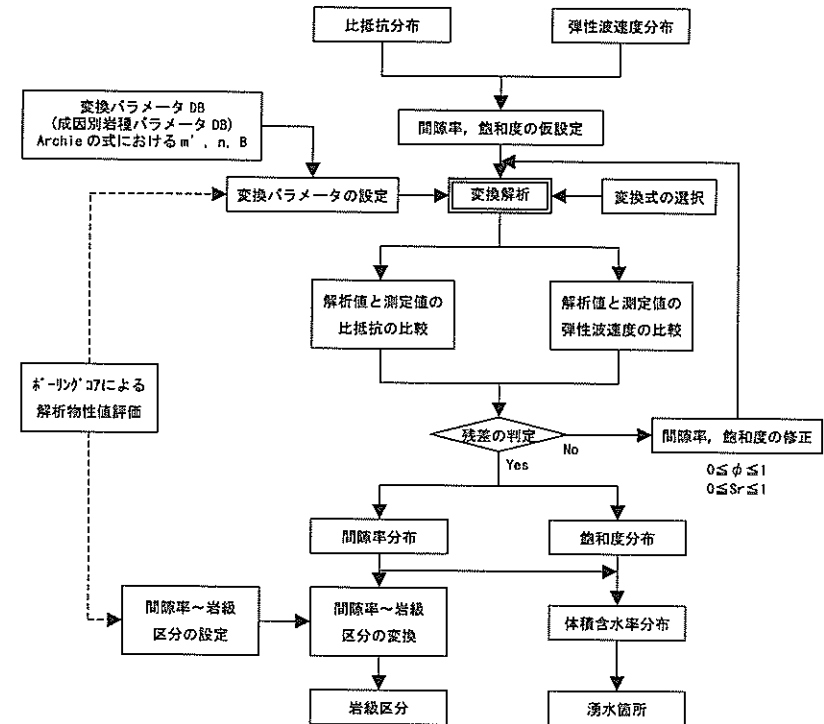


図 7-1 地質構造評価システムのフロー

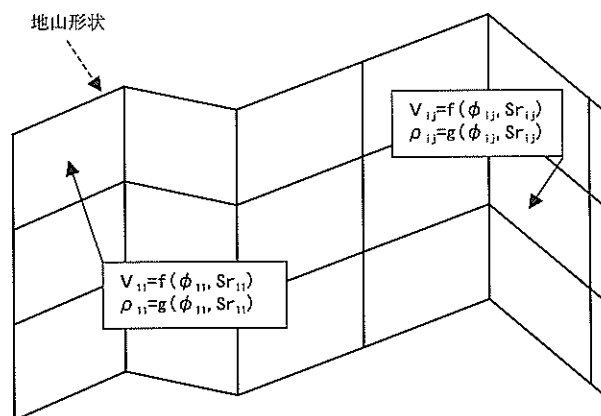


図 7-2 変換のイメージ

変換式は、一般的な岩盤については式(7.1)と式(7.3)を用いるが、亀裂の連続性が顕著で岩盤基質部が分断された岩盤には後述する岩盤モデルによる室内試験の結果、式(7.1)は適用しないことが認められたため、別途考慮する必要がある。

変換パラメータの設定は、検討地点の岩石コアから求めるのが望ましいが入手不可能の場合には、変換パラメータデータベースと呼ぶ既存の試験結果に基づくデータベースにより対応する岩種のパラメータを用いることができる。

変換解析によって求められた間隙率分布と飽和度分布のうち、間隙率分布においては、ボーリング等で岩級分布が既知の位置で間隙率から岩級区分への変換のしきい値を決定して、掘削地点の岩級区分を求める。一方、間隙率と飽和度の積から体積含水率を求め、体積含水率の急変箇所から湧水箇所を推定する。

以上の手順により、それぞれ単独かつ定性的に評価されていた弾性波探査や電気探査結果を、連立することによって設計、施工時に必要な地山特性として定量的に把握することが可能となる。

7.3 物理定数評価式の妥当性検証

7.3.1 岩盤モデル実験の概要

本システムで用いる変換式は弾性波速度については式(7.1)を、比抵抗については式(7.3)を採用している。ところがこれらの式は、砂層といった粒状体地盤において提案された評価式であるため、本研究で対象とする亀裂性岩盤への適用性については明らかにされていない。そこで、間隙率や飽和度が異なる岩盤モデルの比抵抗および弾性波速度を測定するため、模擬岩盤として間隙率が調整可能な花崗岩ブロックや碎石を用いた実験装置を作製した¹¹⁾。実験用岩盤モデルは、実規模岩盤の平均的な比抵抗と弾性波速度を検討するため、できるだけ大きい方が望ましい。しかし、効率的に岩盤モデル製作を行う必要があったので、鈴木らの検討¹²⁾等を参考にし、岩盤モデルの領域を1m四方の立方体とした。比抵抗測定を行う場合の電極配置は、本研究では岩盤モデル内を一樣電界とするため、図7-3に示すように電流電極を1m×1mの銅板による面電極とした。電位電極は、ブロックに埋め込んだ銅板による点電極である。

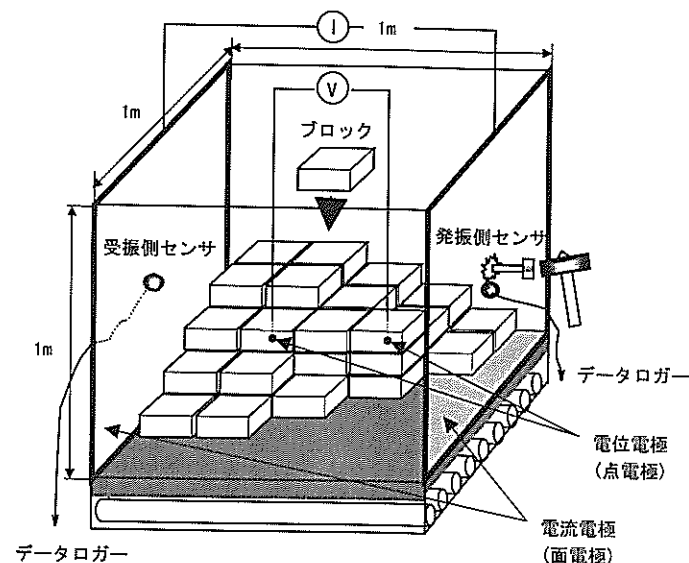


図 7-3 岩盤モデル試験の測定配置

岩盤のモデル化に際しては、硬岩モデルとして花崗岩を整形して作製したブロックを積み上げ、ブロック間の隙間を 0mm（亀裂はあるが岩盤基質部は接触、間隙率 0.030）と 2mm（岩盤基質部は分断、間隙率 0.065）に設定し、隙間の大小をモデル化した模擬亀裂として扱った。間隙率が大きい（0.402）軟岩モデルとして最大粒径 25mm の碎石（粘板岩）を用いて十分締め固めた。

不飽和状態の岩盤モデルは、兼間の実験装置¹³⁾を参考に、図 7-4(a)に示すような上面から散水する方法と、硬岩モデルについては図 7-4(b)に示すような飽和隙中に気泡を送って再現する方法を試みた。気泡発生装置は、エアーコンプレッサー、自在ホース、空気量調整バルブ、補助エアータンク、気泡発生器具により構成した。気泡発生器具には、数種類の市販品（観賞魚の水槽用）を使用した結果、気泡発生状況が均等で良好なセラミックストーン（φ20mm、長さ 20cm）を採用した。これを 10 列に分岐し、1 列につき 4 本ずつ実験装置の底部に配置した。散水装置は、市販の家庭用散水ノズルを 25 等間隔に設置し、ホース長さを均一にするなど極力均等に散水できるように配慮した。

弾性波速度は図 7-3 に示す岩盤モデルの両端に圧電型加速度センサー（感度 100mV/G、共振周波数約 30kHz）を設置し、一端をハンマーで打撃して初動の到達時間から求めた。

比抵抗および弾性波速度測定時の岩盤モデルは、インタクト部（ブロック等）を飽和状態とし、気泡発生装置または散水装置にて模擬亀裂の飽和度を種々変えた。各飽和度では 10 回ずつ測定してその平均値を記録した。

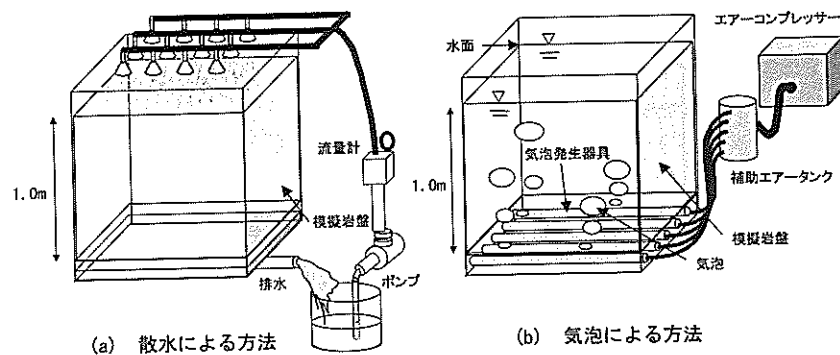


図 7-4 不飽和状態の岩盤モデル

7.3.2 岩盤モデル実験装置の妥当性検証

最初に、検討領域内が一様電流場であることを確認するために、水を満した 1m 四方の領域内に 1mA の電流を流し、0.2m グリッド毎の電位分布を測定した。電位測定位置を図 7-5 に、3 次元鳥瞰による電位分布を図 7-6 に示す。さらに、水平断面における 2 次元での電位分布を図 7-7 に示す。同図より、0cm と -80cm 以深を除き、概ね良好なポテンシャル分布が得られている。このことから、本実験装置の妥当性が確認できた。

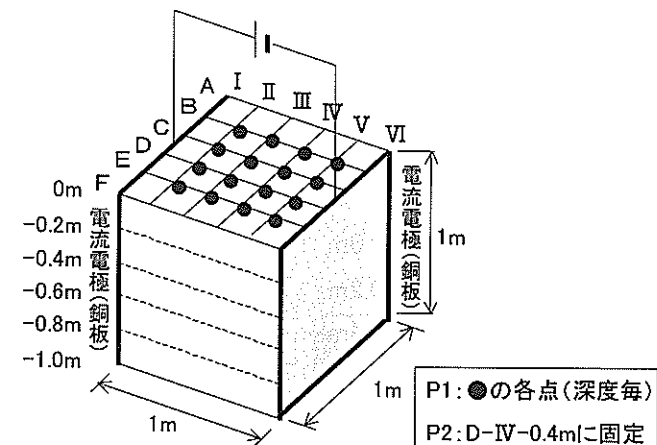


図 7-5 電位測定位置

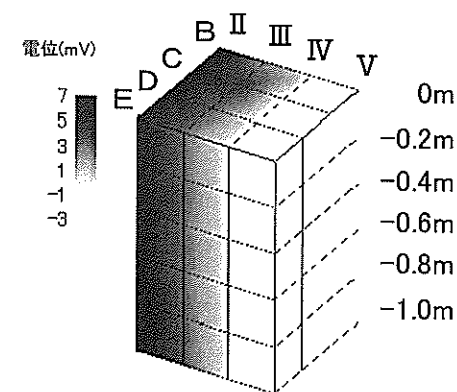


図 7-6 3次元鳥瞰による電位分布

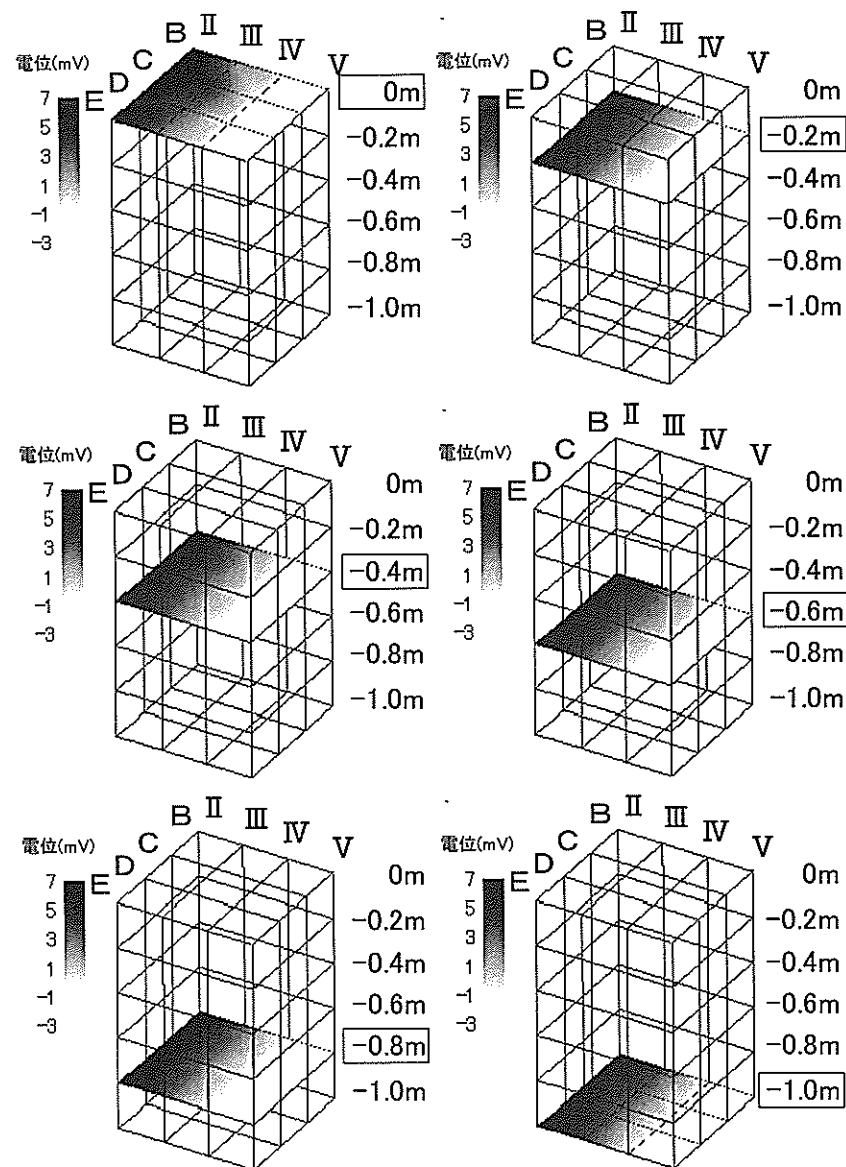


図 7-7 電位の 2 次元分布 (0m~-1.0m 断面)

次に、弾性波速度測定においては、実験装置の外周を通して伝播する弾性波の見かけの速度と、水を満した 1m 四方の領域内の弾性波速度を測定した。模型のみの測定結果を図 7-8 に、水を満した測定結果を図 7-9 に示す。模型のみの弾性波速度の平均値は 852m/sec と、あとで述べる岩盤モデルの測定における最小値 (887m/sec；砕石、飽和度 0) より小さい。また、水の弾性波速度は 1533m/sec と、一般に知られている速度とほぼ同じ値が得られた。

以上の結果より、本装置では岩盤モデルを伝播する弾性波を初動として検出できることが示せ、実験装置の妥当性が確認できた。

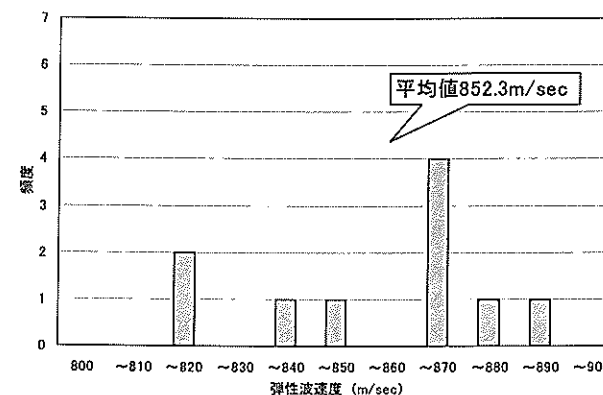


図 7-8 模型の見かけの弾性波速度

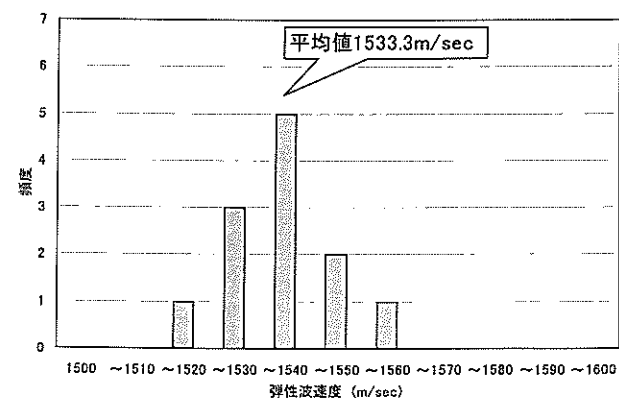


図 7-9 水の弾性波速度

7.3.3 岩盤モデル実験結果

岩盤モデル実験結果を図 7-10 に示す。各ケースの間隙率は飽和度 1.0 から 0 にした時の排水量から算定し、表面水は無視した。図中の理論曲線は、花崗岩および砕石の基岩である粘板岩の変換パラメータを、第 3 章で確立した室内試験手法⁶⁾により評価して変換式により求めたものである。各物性値を表 7-1 に示す。なお、ここでは式(7.3)中の粘土等による間隙中の導電性粒子は考慮していない。花崗岩ブロックのケースでは、全体的に間隙が小さいため、気泡実験と散水実験で重複した飽和度域での測定ができた。2つの手法による不飽和状態のモデル化では、散水実験の方が ρ/ρ_w 値が大き目に出る結果が得られた。岩盤亀裂内の浸透水のモデル化としては、亀裂内の一部分を流れると考えた場合、散水実験の方が現実に近いと考えられる。散水実験結果より、ブロック間隔 2mm の場合では、飽和度の低い領域での ρ/ρ_w 値の増加傾向が認められ、式(7.3)と整合する。砕石においても若干ながら飽和度が低くなるに伴い、 ρ/ρ_w 値の増加傾向が認められる。

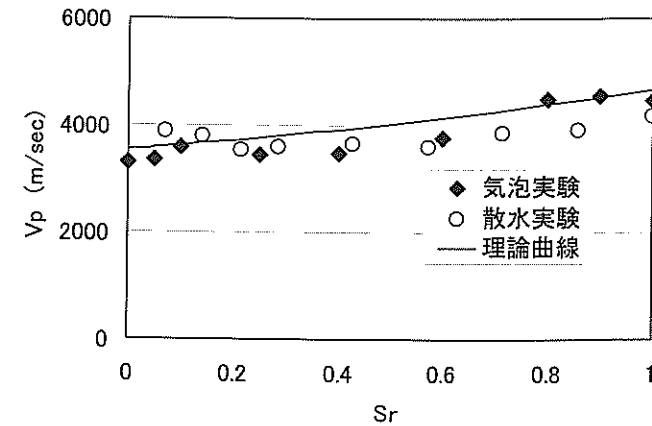
弾性波速度測定では、飽和状態での測定値は概ね安定しているが、不飽和状態での測定では、気泡発生時や散水時のノイズが大きいのに加えて、弾性波振幅の減衰が激しいため、伝播時間の読み取りには困難を極めた。したがって、各ケースの各飽和度において 10 回ずつ測定して、弾性波速度のバラツキについて検討し、極端に異なる値がないことを確認した上で平均値で評価することにした。

花崗岩ブロックの場合では、ブロック間隔が 2mm のケース（図 7-10(2) (a)）では、飽和状態から不飽和状態になって弾性波速度は大きく低下し、以後飽和度の減少と共に若干ながら微減する傾向が見受けられる。間隔 0mm のケース（図 7-10(1) (a)）では、気泡実験および散水実験ともに急激な減少はなく、飽和度の減少に伴い弾性波速度の微減傾向が認められた。

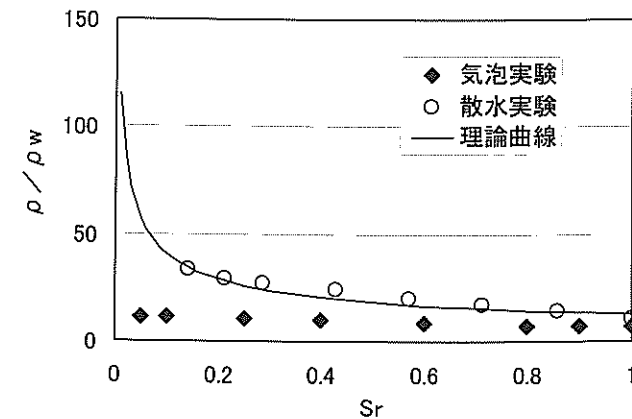
実験結果と理論曲線の比較より弾性波速度についてはブロック間隔が 2mm のケース、すなわち岩盤基質部が亀裂で完全に分断されている場合を除き概ね式(7.1)が、比抵抗については全ケースとも概ね式(7.3)が適用可能であることが分かった。

表 7-1 理論曲線の物性値

岩 種		花崗岩	粘板岩
変換パラメータ	m'	4.9	2.0
	n	0.28	0.50
	B	0.53	1.15
岩石実質部の比抵抗 ρ_0		5000 $\Omega \cdot m$	500 $\Omega \cdot m$
岩石供試体の弾性波速度 V_m		5000m/s	3200m/s
間隙水の弾性波速度 V_f		1500m/s	
間隙空気の弾性波速度 V_a		340m/s	

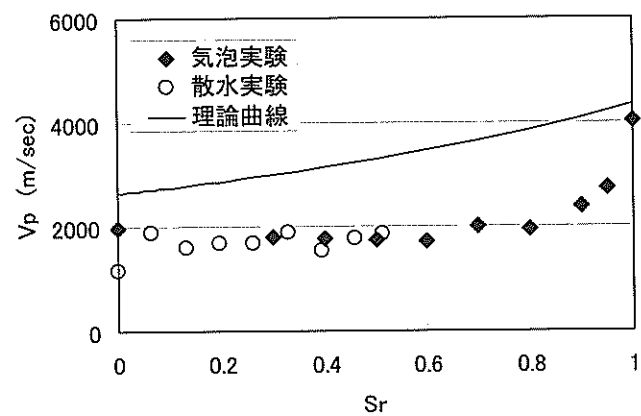


(a) 弾性波速度測定結果

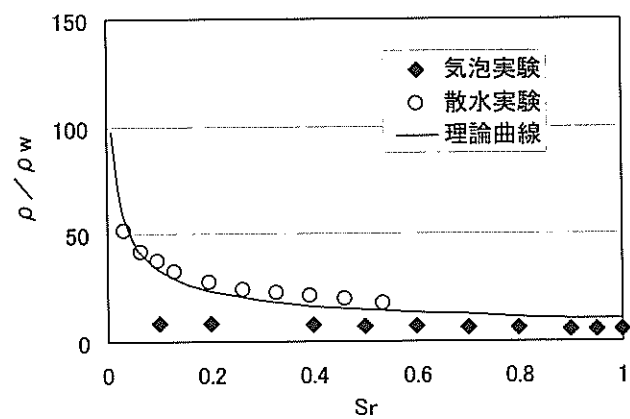


(b) 比抵抗測定結果

図 7-10(1) 岩盤モデル実験結果（花崗岩ブロック【 $\phi=0.030$ 】）

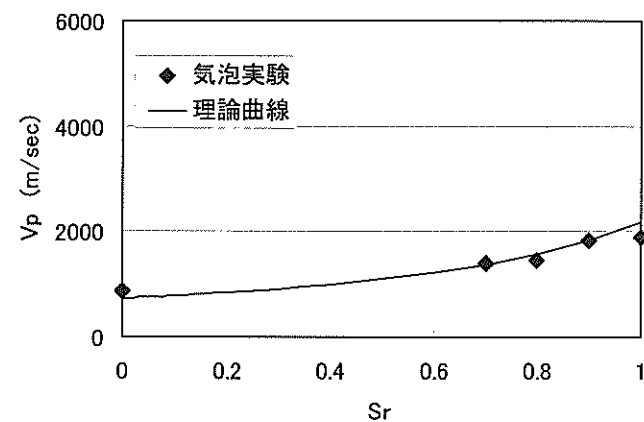


(a) 弾性波速度測定結果

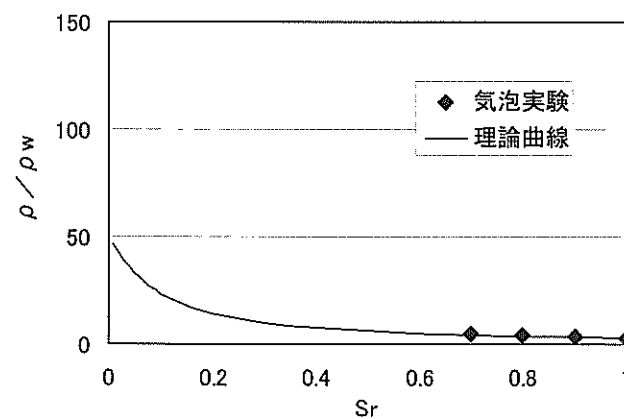


(b) 比抵抗測定結果

図 7-10(2) 岩盤モデル実験結果 (花崗岩ブロック [$\phi=0.065$])



(a) 弾性波速度測定結果



(b) 比抵抗測定結果

図 7-10(3) 岩盤モデル実験結果 (砕石(粘板岩) [$\phi=0.402$])

7.4 変換解析による地質構造評価

本研究で提案する地質構造評価システムの妥当性を検証するために、既往のトンネルの掘削に際して地表面から実施された2種類の物理結果を用いて変換手法を用いて岩級評価を行い、掘削実績との比較を行った。

検討対象としたのは、S地点における水力発電所導水路トンネル¹⁴⁾とM地点における火力発電所放水路トンネル¹⁵⁾である。S地点のトンネル標準断面は内径2.4mの円形、M地点は幅7m、高さ7mの馬蹄形で、掘削工法は両地点ともにNATMである。S地点の岩種は古第三紀の流紋岩、M地点の岩種は白亜紀末期の花崗岩および古生代末期から中生代初期の斑レイ岩である。現地では、地表からの屈折法弾性波探査とS地点では電磁探査の一種であるCSA・MT探査が¹⁶⁾、M地点では高密度電気探査が実施された。検証は、S地点では全長約3kmのうちCSA・MT探査を実施した500m区間について、M地点ではトンネル全区間の2450mで実施した。

検討に際して、岩盤モデル時実験と同様に図7-1のフローにしたがいトンネル断面近傍で実施されたボーリングコアを用いて、先に示した室内試験により変換パラメータを算出した。各地点のパラメータを表7-2に示す。

S地点で実施した変換解析によって得られた体積含水率分布と湧水量実績を図7-11に示す。湧水量実績には、トンネル掘進時の切羽での湧水量と、坑口で測定した各切羽位置でのトンネル全長の総湧水量を示す。この図より、体積含水率の急変箇所、すなわち透水層と不透水層の境界と湧水箇所が比較的一致し、体積含水率の変化が湧水箇所の推定に有効であることが確認された。

次に、M地点で実施した変換解析によって得られた岩級分布と実績岩級区分を図7-12に示す。変換解析によって得られた間隙率から岩級区分への変換においては、トンネル経過地点で実施された、ボーリングによる岩級分布と変換解析による間隙率分布より、凡例に示す基準値で岩級区分を評価した。変換解析との比較では、岩級分布は地質観察結果とは概ね一致している。しかし、TD.1100~1400m付近では実績岩級区分の方が少し悪いように区分された。地質観察による岩級判定では、湧水が顕著であると岩級を1ランク下げて評価することが多い。ところが、変換解析による岩級区分判定基準では、湧水の影響が考慮されていないため、岩級を過大評価することになったものと考えられる。したがって今後湧水の影響を加味した判定基準についても検討する必要がある。

表 7-2 各地点の変換パラメータ

地点		S地点	M地点
変換パラメータ	m'	0.01	0.1
	n	2.5	1.1
	B	2.2	2.2

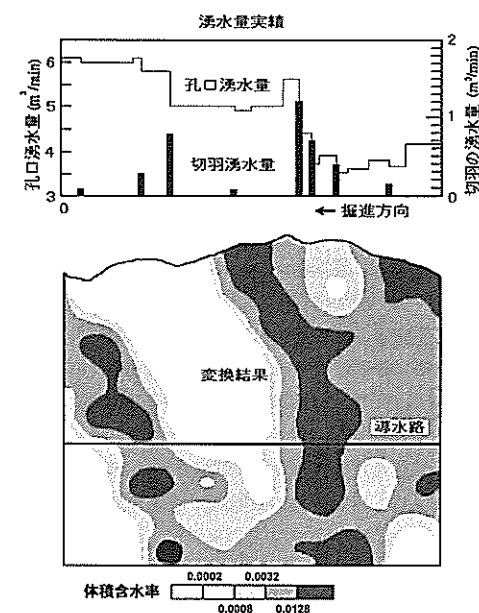


図 7-11 変換解析による湧水箇所予測 (S地点)

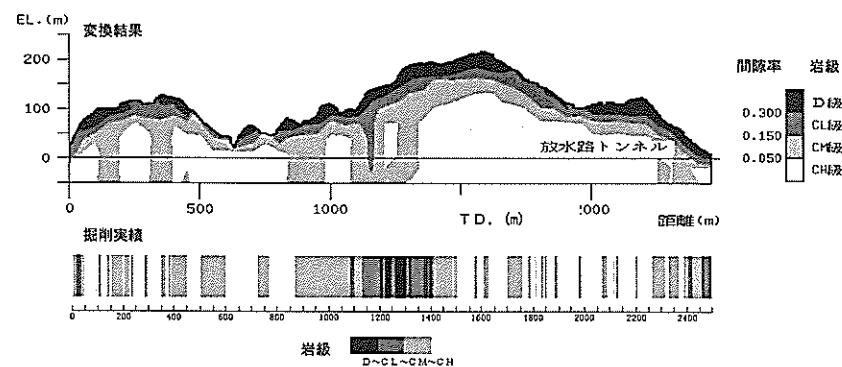


図 7-12 変換手法による岩級分布と掘削実績との比較 (M地点)

7.5 まとめ

本章では、トンネル等の地下構造物の建設に際して問題となる地質不良帯や湧水箇所を、地盤の弾性波速度分布と比抵抗分布を用いてより精度よく推定する手法を構築し、そのシステム化を計った。

本システムで用いる変換式の妥当性を評価するために実施した岩盤モデルの室内試験では、弾性波速度については岩盤基質部が亀裂で完全に分断されている場合を除き概ね式(7.1)が、比抵抗については、間隙率の大小に関わらず、概ね式(7.3)が適用可能であることがわかった。弾性波速度において Wyllie の式が適用できないケースについて、その原因として佐々ら¹⁷⁾は、亀裂で分断されているモデルでは測定される波が亀裂で透過のみを繰り返して到達される波によって形成されているのではなく、亀裂で多重反射し遅れて到達する多くの波の重畳によって形成されるためと述べている。

本システムを用いて、既トンネル経過地点の地質構造評価を実施し、実績岩級区分および湧水箇所と比較したところ概ね一致し、本システムの適用性が検証できた。これらの指標を用いてトンネル支保設計を行うには、固結度や応力状態を考慮する等、検討する課題は多いが、本システムは設計・施工段階において断層、破碎帯、帯水層等の地質構造を事前に把握するのに有効なツールとなろう。

参考文献

- 1) 蓮井昭則・世一英俊・北村晴夫・中川浩二：弾性波・電磁波・比抵抗トモグラフィーによる地盤状況の推定，土木学会論文集，No.462/VI-18，pp.141-150，1993。
- 2) 菅原捷・神尾重雄・斎藤秀樹・島裕雅：岩盤調査におけるジオトモグラフィの適用性の検討，第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.146-150，1989。
- 3) 横井浩一・野口義文・長久・浜辺修二：釜石鉱山における地下空間利用と物理探査，物理探査，Vol.44/No.6，pp.350-361，1991。
- 4) 松井保・朴三奎：比抵抗高密度探査データによる地山区分手法の研究，第29回土質工学研究発表会，pp.153-154，1994。
- 5) 内浦慎一・谷口親平・松井保・朴三奎：比抵抗高密度探査結果の定量的評価によるトンネル地山区分手法について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，岩の力学連合会，pp.1-6，1994。
- 6) 近藤悦吉・大友謙・中村真：地質構造調査・評価法のシステム化，電力土木，No.293，pp.79-83，2001。
- 7) Nakamura, M., Ohtomo, Y., Kusumi, H. and Kondo E.: Interpretation Technique of Geological Survey by Combination of Seismic Velocity and Electric Resistivity, The 6th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics in Kyoto (RAEG2002), pp. 47-52, 2002.
- 8) 千葉昭彦・熊田政弘：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。
- 9) 岩本宏・熊田政弘・飯博行：花崗岩の比抵抗および間隙水との関係，土木学会第50回年次学術講演会，pp.64-65，1995。
- 10) 西方卯佐男・大友謙・小里隆孝・澤井清人：比抵抗及び弾性波探査結果を用いた岩級区分の算定について，土木学会第51回年次学術講演会，pp.13-14，1996。
- 11) 中村真・近藤悦吉・楠見晴重：併用探査によるトンネル施工ルートの岩盤および湧水予測評価法，土木学会論文集，No.735/VI-59，pp.209-214，2003。
- 12) 鈴木浩一・東貞成・志田原巧：比抵抗トモグラフィ法の地下水流動のモニタリングへの適用，電力中央研究所報告，No.U97065，1998。
- 13) 兼間強：不完全飽和状態の含水砂試料を伝搬する弾性波速度と減衰に及ぼす空気飽和度の影響，物理探査，Vol.50/No.3，pp.229-245，1997。
- 14) 中村幾雄・永田隆：境川水力発電所新設工事の概要，電力土木，No.234，pp.16-20，1991。
- 15) 小笠原正治：舞鶴発電所土木工事の概要，電力土木，No.270，pp.62-67，1997。
- 16) 西方卯佐男・打田靖夫・大友謙：複数の物理探査結果を用いた地質構造の定量的評価法の試み，電力土木，No.275，pp.75-80，1998。
- 17) 佐々宏一・劉明治・杉本卓司：水で飽和した亀裂を含む岩盤のP波伝播特性，第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，岩の力学連合会，pp.163-168，1984。

第8章 結 論

本論文では、主に建設分野でよく利用されている弾性波探査と電気探査に注目して、これらの探査結果から得られるP波速度、S波速度ならびに比抵抗を用いて地盤評価を効率よく行う手法について提案した。また、斜面を対象として見かけ比抵抗の連続計測を行い、斜面内の地下水挙動を把握することについても提言を行った。

以下に、各章で得られた知見と結論を述べる。

第1章では、建設分野の地盤調査で近年よく利用されている物理探査に着目して、本研究の背景と目的を述べるとともに、研究全体の流れについて概要を説明した。

第2章では、近年トンネル地盤やダム基礎岩盤などの評価に広く用いられている物理探査のうち、電気探査と弾性波探査に着目し、これらの物理探査の歴史と国内外の適用事例、ならびに現状での問題点についてレビューを行った。

歴史的には、物理探査は資源探査の分野でまず発展をしてきた。資源探査では石油・石炭や鉱床という化学的成分の分布状態を調査する。ところが建設分野の探査では土質や地質構造を知ることが主になっており、力学的な情報が求められる。この様に、建設分野と資源分野では探査の目的が異なっている。また、建設分野での探査深度は主に地表から数十m、深い場合でも数百m程度であり、微細な地質構造までの解析が求められている。したがって、資源探査で行っている探査方法、解析方法および解釈方法をそのまま建設分野に適用したのでは、目的通りの良い結果は得られず、建設分野での評価に適した指標の提案とその適用事例の蓄積が必要であることを示した。

さらに、弾性波探査と電気探査は、各々単独の調査には限界があり、お互いに補完関係として用いられることが望ましい。その理由として、弾性波は地盤の固体部分を伝播するので、その性質を特定するのに適している。一方、比抵抗は、地盤の脆弱部や間隙水を検出するのに適しているからである。したがって、同一地点において、両探査を実施し双方の探査結果を総合的に解釈することによって、探査精度を上げることになり、信頼性のある探査結果を得ることになる。一方、両探査結果の解釈に違いが生じた場合、地盤に何らかの問題があることを示唆しているものと捉えることができ、データを吟味することで問題点を抽出できる。しかし、設計・施工に必要な物性値を把握する段階にはいまだ至っておらず、複数の物理探査を実施して総合的に評価する併用探査の重要性と評価手法の確立の必要性を明らかにした。

第3章では、比抵抗および弾性波速度と岩盤物性値との関係についての定量的な把握を目的として、硬岩に属する25種類の岩石から採取した合計379本の供試体を用いて、室内試験において含水状態を変化させながら測定し、岩石の両物性値と飽和度、間隙率の関係について検討した。

弾性波 P 波速度および S 波速度と飽和度の関係では、飽和度の減少に伴い P 波速度は減少する傾向が認められ、測定値と Wyllie の理論曲線との相関も概ねよいことが明らかになった。また、S 波速度は飽和度に依存しないことが確認できた。

比抵抗と飽和度の関係では、岩種に関わらず岩石の飽和度が減少するにしたがい、比抵抗は指数関数的に増加し、この傾向はほぼ全ての岩石で認められた。さらに、比抵抗と飽和度の関係を指数関数で近似すれば、その係数は各岩種毎に、有効間隙率との間に良好な指数関数的な相関があることが確認できた。本研究で、ほぼすべての地質工学的分類に属する岩石の検討を実施した結果、第 7 章で提案した変換解析による地質構造評価に用いる変換パラメータを、岩石の成因によって分類できる可能性を示した。

さらに、岩石供試体での間隙率は数%程度しかないので、室内試験において亀裂を有する原位置岩盤の基礎物性評価を行うために、人工不連続面モデルとポーラスモデルの 2 種類のモデルにより亀裂性岩盤を模擬し、比抵抗特性を検討した。その結果、亀裂性岩盤を模擬した供試体により原位置岩盤の基礎物性評価が行える可能性を示した。

第 4 章では、岩石の弾性的特性を把握手法として有用な弾性波速度の計測において、従来の超音波法による計測の問題点を解決するために、岩石供試体の比抵抗および弾性波 P、S 波速度を同時に測定できる装置の開発した。開発した装置では、P、S 波の震源を高周波のインパルス（衝動）を片方で与え、他方で受信する。P、S 波は、オシロスコープで記録された波によって読み取り、同時に岩石供試体の比抵抗は電流電極と電位電極を端面に併せ持った GS 式によって測定する。本システムを用いることにより、種々の岩石供試体の比抵抗と弾性波 P、S 波速度が、様々な飽和度の状態で同時に得ることが可能となった。開発に際しては、センサ位置の検討およびセンサ間隔の検討を行い、本装置の妥当性を確認した。さらに、この装置をいくつかの岩石供試体に適用させ、従来から用いられている測定方法による測定結果と比較し、本装置の妥当性を検証した。

第 5 章では、岩盤内の地下水挙動のモニタリング手法として、2 次元電気探査による連続計測を実施し、各測点の比抵抗変化と降雨との関係について検討を行い、とくに破碎帯部におけるこれらの関係から、透水性の評価法および斜面安定監視システムへの適用性について検討した。検討では、まず斜面内の地下水挙動の把握を目的とする場合の最適な電極配置を求めるために、2 極法、Wenner 法、Dipole-Dipole 法の 3 種類の方法を用いて、岩盤斜面内の比抵抗分布状況を比較した結果、Dipole-Dipole 法が最も分解能が高いことが判った。岩盤斜面において、降雨に伴う見かけ比抵抗変化を連続的に計測を行った結果、水みちと推測される複数の測定点において、無降雨期間中に徐々に見かけ比抵抗が増加して、降雨直後に低下し、またその低下の割合も一様でないことがわかった。さらに、見かけ比抵抗変化率という指標を用いて降雨量との関係について検討した結果、降雨量と見かけ比抵抗変化率は指数関数的な関係で表されることが判明した。この関数は地山の水みちの性状によって異なることが推測される。このことから、同指数関数の係数および指数から破碎帯の性状評価が行える可能性を示した。

第 6 章では、電気探査結果をトンネル設計に利用するために、既設トンネルのトンネル坑内で実施した簡易比抵抗探査結果と岩級区分、岩盤良好度、湧水評価点および実績湧水量などの関係について把握した。湧水を確認した切羽における簡易比抵抗結果の最大・最小値と岩盤の良好度の関係を評価したところ、比抵抗はかなりばらついていて、これは切羽全面にわたって均等に湧水が生じていないため、不飽和状態の測点も計測していることが原因と考えた。そこで、各切羽の簡易比抵抗測定結果では、比抵抗の最低値を示す測点が湧水の影響を一番大きく受けて飽和に近い状態にあると仮定し、岩盤の良好度から推定した間隙率に対して室内試験で求めた近似曲線（飽和状態）との整合性を評価した結果、良い相関が認められた。さらに、室内試験で得られた比抵抗と間隙率および体積含水率の関係を用いて簡易比抵抗測定から得られた比抵抗を変換し、間隙率および体積含水率と実績支保量の関係について検討した結果、岩盤の良好度と水の情報を包括した体積含水率による支保設計の可能性を示した。

第 7 章では、併用探査による地質構造評価法の提案として、現地で得られた弾性波速度と比抵抗の測定結果を間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法のシステム化を図った。本システムでは、原位置岩盤における弾性波速度と比抵抗とは異なる物理量ではあるが、岩盤の間隙率や水の飽和度をパラメータとして関係付けることができることから、弾性波速度については Wyllie の式を、比抵抗については Archie らの式を基礎とした並列回路モデル式を連立して逆解析（最適化手法）する手法を提案し、未知の間隙率と飽和度を求めることを可能とした。

さらに、本システムで用いる比抵抗および弾性波速度の物理定数評価式の妥当性を、岩盤モデルを用いた室内試験により検証した。岩盤のモデル化に際しては、硬岩モデルとして花崗岩を整形して作製したブロックを積み上げ、ブロック間の隙間を 0mm（亀裂はあるが岩盤基質部は接触、間隙率 3%）と 2mm（岩盤基質部は分断、間隙率 6.5%）に設定し、隙間の大小をモデル化した模擬亀裂として扱った。また、間隙率が大きい（40.2%）軟岩モデルとして最大粒径 25mm の碎石（粘板岩）を用いた。不飽和状態の岩盤モデルは、上面から散水する方法と、飽和隙中に気泡を注送して再現する方法を試みた。飽和状態を種々変化させて実験を行った結果と理論曲線の比較より、弾性波速度についてはブロック間隔が 2mm のケース、すなわち岩盤基質部が亀裂で完全に分断されている場合を除き概ね Wyllie の式が、比抵抗については全ケースとも概ね Archie らの式を基礎とした並列回路モデル式が適用可能であることを確認した。

最後に、本システムを既往のトンネル経過地点の地質構造評価に適用し、掘削実績と比較することによって適用性の検証を行った。体積含水率による湧水箇所予測では、体積含水率の急変箇所、すなわち透水層と不透水層の境界と湧水箇所が比較的一致し、体積含水率の変化が湧水箇所の推定に有効であることが確認された。変換解析によって得られた間隙率による岩盤良好度の評価では、トンネル経過地点で実施されたボーリングによる岩級分布と変換解析による間隙分布より、岩級区分のしきい値を評価した。変換解析により評価

したトンネル経過地の岩級分布とトンネル掘削時の地質観察結果とは概ね一致し、本システムの適用性が検証できた。これらの指標を用いてトンネル支保設計を行うには、固結度や応力状態を考慮する等、検討する課題は多いが、本システムは設計・施工段階において断層、破碎帯、帯水層等の地質構造を事前に把握するのに有効なツールとなろう。

最後に、本論文の総括として、提案した地質構造評価手法の適用事例の蓄積等、更なる検討が必要であるが、本研究の成果は建設分野に適した地質構造評価に少なからず寄与できるものと考ええる。

本研究に関連した研究成果

【学術論文(審査あり)】

- 1) 楠見晴重・中村真・西田一彦：連続計測による岩盤斜面の破碎帯部における見かけ比抵抗と降雨の関係，応用地質，Vol.38/No.2，pp.74-82，1997.6.
- 2) 近藤悦吉・大友譲・中村真：地質構造調査・評価法のシステム化，電力土木，No.293，pp.79-83，2001.5.
- 3) 楠見晴重・畠中与一・西方卯佐男・中村真・奥田善之：種々な岩石の比抵抗特性に及ぼす飽和度，間隙率の影響とそれを利用した岩盤物性の評価手法，亀裂性岩盤の浸透問題に関するシンポジウム論文集，地盤工学会，pp.187-194，2001.11.
- 4) 中村真・楠見晴重・奥田善之：岩石供試体のP，S波速度および比抵抗同時測定装置の開発とその適用性，土木学会論文集，No.722/III-61，pp.381-386，2002.12.
- 5) 中村真・楠見晴重：岩石供試体を用いた亀裂性岩盤モデルの作成とその比抵抗特性，日本材料学会誌，Vol.52/No.5，pp.478-482，2003.5.
- 6) 中村真・近藤悦吉・楠見晴重：併用探査によるトンネル施工ルートの岩盤および湧水予測評価法，土木学会論文集，No.735/VI-59，pp.209-214，2003.6.

【学術論文(審査なし)】

- 1) 中村真・西方卯佐男・楠見晴重・畠中与一：各種岩盤供試体の比抵抗特性とその原位置岩盤への適用，第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.211-215，1999.1.
- 2) 楠見晴重・中村真・奥田善之・西田一彦：岩石供試体のP，S波速度および比抵抗同時測定装置の開発とその適用性，第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.87-91，2001.1.
- 3) 中村真・楠見晴重：比抵抗電気探査による地下水挙動のモニタリング手法の提案，第22回西日本岩盤力学シンポジウム論文集，西日本岩盤工学会研究会，pp.31-34，2001.7.

【国際会議】

- 1) Kusumi, H., Nakamura, M. and Taniguchi, K.: Monitoring of Groundwater Behavior on a Rock Slope by Dipole-dipole Electric Resistivity Technique, Safety and Environmental Issues in Rock Engineering (Erock'93), pp.331-336, 1993.6.
- 2) Kusumi, H., Nakamura, M. and Nishida, K.: Monitoring of Groundwater Behavior Caused by Rainfall Fracture Zone of Rock Slope using Electric Resistivity Method, 8th International Symposium on Landslides, pp.871-876, 2000.6.

- 3) Kusumi, H., Hatakenaka, Y., Nishikata, U., Nakamura, M. and Nishida, K.: Characterization of Electrical Resistivity for Intact and Jointed Specimens and its Application for In Situ Rock Mass Assessment, An Int. Conf. on Geotechnical & Geological Eng. (GeoEng2000), CD-ROM, 2000.11.
- 4) Kusumi, H., Okuda, Y. and Nakamura, M.: Development of Simultaneously Measured System for P, S Wave and Electric Resistivity of Rock Samples and its Application, ISRM 2nd Asian Rock Mechanics Symposium (2nd ARMS), pp.149-151, 2001.9.
- 5) Nakamura, M., Kusumi, H. and Kondo, E.: Application of Several Electric Resistivities of Rock Masses for Tunnel Supporting Design, Modern Tunneling Science and Technology (IS-KYOTO 2001), CD-ROM, 2001.10.
- 6) Nakamura, M., Ohtomo, Y., Kusumi, H. and Kondo, E.: Interpretation Technique of Geological Survey by Combination of Seismic Velocity and Electric Resistivity, The 6th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics in Kyoto (RAEG2002), pp.47-52, 2002.1.
- 7) Nakamura, M. and Kusumi, H.: Several Examinations in Development of Simultaneously Measuring System for P and S Wave Velocity and Electric Resistivity of Rock Samples, The 7th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics in Kyoto (RAEG2003), pp.241-246, 2003.1.

【学会発表】

- 1) 黒崎信夫・谷口敬一郎・楠見晴重・中村真：電気探査の浸透流解析への適用性に関する2, 3の考察, 土木学会第46回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, pp.864-865, 1991.9.
- 2) 楠見晴重・中村真・瀧木鉄哉・谷口敬一郎：ダイポール・ダイポール法による斜面内の浸透流探査, 第86回物理探査学会春季大会, pp.373-375, 1992.5.
- 3) 中村真・楠見晴重・谷口敬一郎：電気探査による降雨に伴う地下水挙動の現地計測, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, pp.1158-1159, 1992.9.
- 4) 中村真・楠見晴重・谷口敬一郎：ダイポール・ダイポール電気探査法による岩盤斜面内の地下水挙動計測, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, pp.1112-1113, 1993.9.
- 5) 楠見晴重・吉村輝樹・西方卯佐男・中村真：不飽和状態にある岩石の比抵抗特性, 第33回地盤工学研究発表会, pp.1227-1228, 1998.7.
- 6) 楠見晴重・西田一彦・畠中与一・西方卯佐男・中村真：種々な岩石の比抵抗に及ぼす飽和度の影響, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, pp.718-719, 1998.9.
- 7) 大友謙・打田靖夫・中村真・西方卯佐男・岸本修治：岩石の比抵抗～有功間隙率関係の原位置岩盤への適用性について, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, pp.828-829, 1998.9.

- 8) 斉藤勉・楠見晴重・畠中与一・西田一彦・西方卯佐男・中村真：岩石供試体の比抵抗特性から見た岩盤分類とその特性, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, p.Ⅲ-24, 1999.5.
- 9) 畠中与一・楠見晴重・西田一彦・西方卯佐男・中村真：単一不連続面を有する岩石供試体の比抵抗特性, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, p.Ⅲ-25, 1999.5.
- 10) 畠中与一・楠見晴重・西田一彦・西方卯佐男・中村真：室内試験における岩石供試体の比抵抗特性と原位置岩盤への適用, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, pp.638-639, 1999.9.
- 11) 奥田善之・楠見晴重・畠中与一・西方卯佐男・中村真・西田一彦：岩石の比抵抗特性とそれを利用したトンネル岩盤評価に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, p.Ⅲ-23, 2000.5.
- 12) 畠中与一・楠見晴重・西方卯佐男・中村真・西田一彦：岩石の比抵抗特性に及ぼす飽和度および間隙率の影響とそれを利用した岩盤評価に関する研究, 第35回地盤工学研究発表会, pp.59-60, 2000.7.
- 13) 奥田善之・楠見晴重・畠中与一・西方卯佐男・中村真・西田一彦：岩石の比抵抗特性に及ぼす岩盤不連続面の影響, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, pp.586-587, 2000.9.
- 14) 中村真・大友謙：KNC手法を用いた地質構造評価の提案, 近畿地方整備局平成13年度管内技術研究発表会, p.調・計・設25, 2001.7.
- 15) 楠見晴重・奥田善之・中村真：堆積岩におけるP, S波速度および比抵抗同時測定とその評価法, 土木学会第56回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, CD-ROM, 2001.9.
- 16) 阪本一生・楠見晴重・奥田善之・中村真：弾性波および比抵抗同時測定を用いた岩石の工学的評価法と原位置への適用性, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, p.Ⅲ-25, 2002.5.
- 17) 阪本一生・楠見晴重・奥田善之・中村真：弾性波および比抵抗同時測定を用いた岩石の工学的評価法と原位置への適用性, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部門, CD-ROM, 2002.9.

用いた記号一覧

記号	名称	出典
a	電極間隔	5章
A	比抵抗～間隙率関係における係数(飽和状態での比抵抗)	3章, 6章
B	比抵抗～飽和度関係における指数	3章, 7章
c	比抵抗～体積含水率関係における係数	6章
C	電流電極	3章
d	比抵抗～体積含水率関係における指数	6章
e	不連続面間隔	3章
F	地層比抵抗係数	7章
i	整数	5章
I	電流値	3章
L	測点間の長さ	3章
m	比抵抗～有効間隙率関係における係数(水の比抵抗含む)	3章
m'	比抵抗～有効間隙率関係における係数(水の比抵抗含まない)	7章
n	比抵抗～有効間隙率関係における指数	3章
P	電位電極	3章
r	降雨量	5章
R	濾紙	3章
s	濾紙の枚数	3章
S	供試体の断面積	3章
Sr	飽和度	3章, 6章, 7章
T _p	弾性波P波伝播時間	3章
T _s	弾性波S波伝播時間	3章
V	電圧値	3章
V _a	空気間隙の弾性波速度	7章
V _f	間隙水の弾性波速度	7章
V _m	岩石実質部の弾性波速度	7章
V _p	岩盤または岩石供試体の弾性波P波速度	3章, 4章, 7章
V _s	岩盤または岩石供試体の弾性波S波速度	3章, 4章
W ₁	岩石実質部分の乾燥重量	3章
W ₂	岩石実質部分の湿潤重量	3章
W ₃	岩石実質部分の水中重量	3章
W ₄	不連続面の水の重量	3章
α	見かけ比抵抗変化率	5章
β	見かけ比抵抗変化率～降雨量関係における係数	5章
γ	見かけ比抵抗変化率～降雨量関係における指数	5章
θ	コア軸に対する不連続面の角度	3章
ρ	岩盤または岩石供試体の比抵抗	3章, 6章, 7章
ρ_0	岩石実質部の比抵抗	7章
ρ_a	地盤の見かけ比抵抗	5章
ρ_c	粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗	7章
ρ_{max}	5回の計測期間内における最も高い見かけ比抵抗	5章
ρ_s	飽和時の比抵抗	3章
ρ_w	間隙水の比抵抗	7章
ρ_x	ある連続する6時間降雨に対する最も低い見かけ比抵抗	5章
ϕ	岩盤または岩石供試体の(有効)間隙率	3章, 6章, 7章
ϕ'	不連続面を有する岩石供試体の見かけの有効間隙率	3章
ϕ_s	加熱処理後の岩石供試体の有効間隙率	3章

謝 辞

本論文は、著者が関西大学大学院博士課程前期課程在席中、ならびに株式会社ニュージェック就職後に従事した研究業務より得られた成果を取りまとめたものである。

本論文をまとめるにあたり、終始暖かいご指導とご鞭撻を賜りました関西大学工学部都市環境工学科教授・楠見晴重博士に心からの感謝の意を表するとともに、ご教示を賜りました関西大学工学部都市環境工学科教授・西田一彦博士、同建築学科教授・八尾眞太郎博士、同都市環境工学科教授・堂垣正博博士に厚く御礼申し上げます。

論文執筆に際して、関西電力株式会社総合技術研究所副所長・工藤アキヒコ氏、同構築研究室主幹・長谷川靖明氏、同構築研究室副主任研究員・近藤悦吉氏には、多大なご配慮と激励を賜るとともに、研究遂行時には、近藤茂氏(元構築研究室主幹)および西方卯佐男氏(元同主任研究員)のご指導とご鞭撻を賜りました。さらに、岩石収集ならびに現地計測に際しては、多くの建設所関係各位のご協力を頂きました。

株式会社ニュージェック西日本事業本部長・國井仁彦博士ならびに谷河正也博士(元西日本事業本部長)には著者の論文執筆を快く承諾頂くとともに、技術開発部長・白井義朗博士、浦山克氏(元技術開発部長)、打田靖夫博士(元技術開発部長)、大友譲氏(元同地盤室長)には終始適切なお助言とご配慮を賜りました。

研究遂行に際しては、室内実験では関西大学大学院博士課程前期課程の畠中与一氏(現株式会社日本地下探査)、奥田善之氏(現近畿地方整備局)、坂本一生氏ら学生の方のご協力を得ました。岩盤モデル実験では、財団法人電力中央研究所地質部上席研究員・楠建一郎博士および同主任研究員・鈴木浩一博士にご助言賜るとともに、当時技術開発部の木崎康正氏、小野暁氏、柿原満氏、原田秀敏氏ならびに協力会社各位のご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

最後に、著者を支えてくれた家族に心からの感謝の意を表し、謝辞の結びとします。

