

ダムの築造および管理過程における 非破壊調査技術の応用に関する研究

森 充広*

目 次

I 緒言	21	2 物理探査法を利用したダム管理手法の概念	49
1 研究の背景と目的	21	3 数値実験による検証	52
2 本論で適用した物理探査法の概要と既往の研究	22	4 室内実験による安全管理システムへの 応用可能性の検討	53
3 本論文の構成	25	5 試験堤体による基礎的検討	55
II 比抵抗トモグラフィ法のダム基礎地盤調査への 適用 (調査段階)	25	6 実規模の調整池を用いた 比抵抗トモグラフィ法による実証試験 —調整池の概要と事前検討結果—	61
1 概説	25	7 調整池堤体内部の比抵抗モニタリング結果 および考察	67
2 電極配置による探査精度の数値実験	25	8 現地実証試験の考察	85
3 ダムサイトの調査事例	34	9 比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理に おける適切な電極配置に関する考察	95
4 まとめ	38	10 まとめ	102
III 地中レーダ法によるRCDコンクリートの 施工管理技術の開発 (施工段階)	39	V 結言	103
1 概説	39	参考文献	106
2 疑似ポーラスコンクリートによる基礎実験	39	Summary	109
3 RCDコンクリートを用いた基礎実験	43		
4 RCD工法コンクリートダム施工管理への適用	46		
5 まとめ	48		
IV 比抵抗トモグラフィ法による ダム安全管理システムの開発 (安全管理段階)	48		
1 概説	48		

I 緒 言

1 研究の背景と目的

戦後の高度経済成長に伴い、農業土木分野では農業生産性の向上に資する農業農村基盤の整備、農業水利施設の建設が進められてきた。全国の農業水利施設の資産ストックは2002年再建設費ベースで25兆円にも達するといわれている。特に、飲料水をはじめ、工業用水、農業用水、発電用水などの水をたたえ、われわれの生活を支えるダムの建設は、戦後から建設省（現国土交通省）、農林水産省、電力会社が各地で事業を展開してきた。1999年の統計（日本ダム協会，1999）によると、日本における既設のダム総数は2,613であり、うちフィルダムは1,711である。しかし、実際に農業用水源として各

地に点在しているため池は、全国で21万カ所以上あるといわれている。

戦後のダム建設においては、基礎地盤や盛立材料などに課題があった場合、莫大な費用を投じてその課題を解決してきた。しかし、バブル崩壊後、近年では公共事業費のコスト削減施策により、ダム建設に多額の費用を投じることができなくなりつつある。さらには、環境保護への関心が高まり、ダム建設そのものも中断あるいは計画見直しを余儀なくされる地区も出始めている。新たに農業水利施設を建設する際にも、従来の「安くして性能がよいものが優れている」という考え方から、初期投資が増えても、維持管理費や更新費を含めた、いわゆる「ライフサイクルコスト」が小さい施設、あるいは国民の環境問題への意識の高まりを反映した「環境低負荷型」あるいは「自然共生型」施設の建設が望まれるようになりつつある。また、最近の農業農村整備事業においては、大きな流れとして特に性能照査型設計への移行が進められ、あらゆる農業水利施設の設計理念や公共性について、受益者だけでなく一般市民に対しても説明責任が求めら

* 造構部施設機能研究室

平成18年1月18日受理

キーワード：非破壊調査・比抵抗トモグラフィ法・地中レーダ・地盤調査・RCDコンクリート・ダム安全管理

れるようになりつつある。

このような背景のもと、今後新たにダムを建設する際には、できる限り建設コスト、維持管理コストを低減することが重要な課題となる。さらに、今ある既存のダムに関しては、それを永年の活用できるよう、様々な予防保全的対策を講じることが重要となる。具体的コスト削減方法としては次のようなことがあげられる。

① ダムサイトとしての適地選定

ダムサイトの基礎地盤の力学的安定性や水理学的特性は、ダム設計の基本理念であるダムタイプ（アースダム、ロックフィルダム、コンクリートダムなど）を決定する重要な要素であると同時に、基礎処理のコストを決定する制限因子となる。良好なダムサイトを選定することは、ダム建設の事業費を削減できる重要なポイントである。

② 基礎掘削から基礎処理、盛立に至る施工段階での施工管理

例えば、フィルダムに関していえば、厳密な材料選定・品質管理のために、一次掘削時の不用土を大量に廃棄せざるを得なくなり、処分費にコストがかかるなどの事態もあった。したがって、今後は低コスト化のため、低品質の材料であっても、規定された性能が十分発揮できるような材料選定・施工管理を行うとともに、合理化した施工技術や施工管理が必須となる。

③ ダム供用後の安全管理

築堤後のダムの安全管理は、湛水を開始してから満水に至るまでの荷重増加に伴うダムの挙動やダムの水密性を監視する第一期、第一期を経過して堤体および基礎地盤の挙動が定常状態になるまでの第二期、それ以降の第三期に区分される（土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」技術書 [フィルダム編]、2003）。第一期までは事業主体が責任をもって監視することになるが、農業用ダムでは、ほとんどの場合、第二期以降の管理を県や土地改良区に委託することになる。一般にダムの安全管理は、埋設計器や表面変位計の挙動観測、現地の浸透量監視が中心である。しかし、最も重要な役割を果たすべき埋設計器は、落雷や施工後の初期欠陥などにより、設置後数年までの間にその機能を失ってしまうものも多く、ダム管理第二期以降の機能管理に支障をきたしている。しかも埋設計器データはあくまでその「点」における物性値を示すものであり、局所的な異常をとらえることは困難である。したがって、ダム堤体内部を面的に管理できる手法の開発、および低コストで耐久性に優れた埋設計器の開発が望まれている。

本論では、以上の3項目に着目し、農業水利施設の重要構造物であるダムに焦点を当て、ダム築堤適地選定ための事前調査段階、築堤過程における施工管理段階および築堤後の安全管理段階に至るダム築堤過程において、各段階に適した物理探査法を応用することにより、低コストでしかも安定性に優れたダム建設のための非破壊調査技術を提案し、それを実用化することを目的としている。

2 本論で適用した物理探査法の概要と既往の研究

本論では、ダム建設過程における非破壊調査技術として、電気を利用した比抵抗トモグラフィ法、電磁波の物理特性を利用した地中レーダ法に着目し、これらの応用を試みている。ここでは、比抵抗トモグラフィ法と地中レーダ法の概要と、既往の研究成果について触れる。

a 比抵抗トモグラフィ法

(1) 比抵抗トモグラフィ法の概要

一般にトモグラフィとは、調査対象領域の周辺から領域内の様々な方向の投影データを収集し、それらの観測データから対象領域内部の物理的パラメータ分布を再構成する技術の総称である（大友、1986）。被写体にX線を照射し、透過したX線の線吸収係数の分布を求め画像化するX線CT（Computed Tomography）はその代表例である。この手法を地盤調査へ適用し、対象地盤の地質構造を調査するために行われるトモグラフィを、土木分野では「地球・地盤」を意味する「ジオ」という接頭語を付け加えて「ジオトモグラフィ」と称している。これまで実施されてきた弾性波探査や電気探査などの物理探査法は、地表面から地下の構造を調査しようとするものであった。地表からの探査は、簡便に行える、あるいは比較的広域の調査にも適用できるという利点があるが、対象とする地盤の深度が深くなるにつれて探査精度が落ちるといった欠点を有している。一方、ジオトモグラフィでは、探査できる範囲は局所的な領域に限定されるものの、地質調査のために掘削したボーリング孔を利用し、調査対象により近い位置から探査を行えるため、測定精度を格段に向上させることが可能である。Fig.1-1にジオトモグラフィの測定概念をX線CTと対比して示す。ジオトモグラフィとX線CTとの相違点は、X線CTでは全周・全方向からのデータが取得できるのに対し、ジオトモグラフィでは、測定に使用するボーリング孔や試掘横坑を設置するための費用など経済性の観点から、全周からの探査は困難である場合が多いことである。また、X線CTの解析では、波（X線）の透過経路を直線と近似できるのに対し、ジオトモグラフィで用いる弾性波、電気、電磁波などの波線は屈折、回折をおこし、直線性を仮定できない場合もあるため、X線CTに比べて解析が難しく、また精度も落ちる傾向にある。

ジオトモグラフィを大別すると、弾性波を用いる弾性波トモグラフィ、電気を用いる比抵抗トモグラフィ、電磁波を用いる電磁波トモグラフィに分類できる。弾性波トモグラフィにおいては速度分布や減衰率分布が、比抵抗トモグラフィにおいては比抵抗分布が、電磁波トモグラフィにおいては減衰率分布や反射・散乱源分布が再構成される。

ジオトモグラフィの研究は、1970年代の弾性波トモグラフィの研究から始まったとされている。Boisら（1972）は、トモグラフィという言葉を用いてはいないが、孔間の地震探査データを取得して、その孔間断面内

の速度分布を再構成するという、現在の反復法による速度分布再構成技術の原型ともいべき成果を報告している。1970年代後半には、Lagerら（1977）、Dinesら（1979）により、電磁波を用いて地下構造を画像化しようという試みが行われた。また、1980年代後半には電磁探査をトモグラフィに応用した電磁気トモグラフィも登場し、現在、実用化が進みつつある。

比抵抗トモグラフィ法とは、対象とする領域を取り囲むように金属製の電極を配置し、その電極から種々の組み合わせで人為的に電流を通电したときに生じる電位分布から、対象領域の電流の流れにくさ（比抵抗値）の分布を求めるものである。一般に比抵抗法とは、地盤の比抵抗値を計測する調査法全般を指し、電流の代わりに磁場を送信し、その時に生じる誘導電流を利用する電磁法も比抵抗法の一つとして取り扱われる。なお、本論では、地表面に設置した電極から電流を通电し、対象領域の比抵抗構造を調査する手法を水平電気探査、地表面だけでなく、地中にも電極を設置して電流を通电し、対象領域の比抵抗構造を調査する手法を比抵抗トモグラフィ法と称する。

(2) 既往の研究と研究動向

1980年代後半から利用され始めた比抵抗トモグラフィ法の研究は、当初、数値計算を主とした理論研究がなされていた（例えば、菅野ら、1988や島、1989）。その後、比抵抗トモグラフィ法を用いた岩盤調査や、比抵抗モニタリングへの応用（小島ら、1989）、ダムサイトの基礎地盤調査（鈴木、1998）など、各分野での適用が増えつつある。さらに、比抵抗トモグラフィ法の測定には障害となっていたボーリング中の金属ケーシングを、線電流として活用する手法も開発され（杉本、1998）、ますます活用の方が広がっている。1997年に地盤工学会が実施した物理探査についてのアンケート調査結果（桑原ら、1997）においても、今後活用が期待される技術として、長期モニタリング、非破壊検査、地震防災とともに、トモグラフィがあげられている。

測定に関しては、大量のデータを取得する必要がある

ことから、従来の手動測定式に変わり、全自動式の測定機が開発、実用化されている。鈴木ら（1998）は、短期間の比抵抗モニタリングを効率的に行うため、512成分比抵抗法自動測定装置を開発し、計測時間を従来型の自動測定装置の約1/4に短縮した。この装置では、商用周波数ノイズや自然電位などによるバイアス成分を除去するために、受信電位の「実効値積分」を行い、モニタリングにおける微小な変化を捕らえようとする工夫がなされている。今後も、多チャンネル化、高精度化をキーワードとした探査装置が開発されると思われる。

比抵抗トモグラフィ法も含め、比抵抗法全般の今後の課題は、

- ①物性値との相関性
- ②解釈の評価手法の確立
- ③コストの低減

があげられる。①に関しては、Archie（1942）による室内実験以来、特に岩石の空隙率と比抵抗値との相関（千葉ら、1994）、一軸圧縮強さや弾性係数などの力学的性質と比抵抗値との相関（関根ら、1996）、粘土鉱物の種類やその含有量と比抵抗値の相関（高倉、2000）について報告されており、各物性値と比抵抗値との相関について研究が進んでいる。しかし、現地への適用に際しては、地質や地下水の分布など比抵抗値に影響を与える要因が多く、比抵抗法のみで調査結果を結論づけることは難しい。したがって、②に示すように、解釈の評価手法の確立が望まれている。今後は、解釈の評価精度を向上させるため、ハードウェアに関してはS/N比の高い、高品質のデータを取得することが望まれるとともに、ソフト的には、複数の物理探査法を組み合わせたり、あるいは一部ボーリングなどにより実際に確認したりしながら、より解釈の精度を高めていくことが重要である。また、今後は、物理探査技術を社会的ニーズが増大している防災や施工管理、維持管理や環境面への適用することが不可欠になる。③のコストに関しては、電極の設置などに人件費がかかることから、調査費の低減は難しい状況にある。しかし、これまでワークステーションやスーパーコ

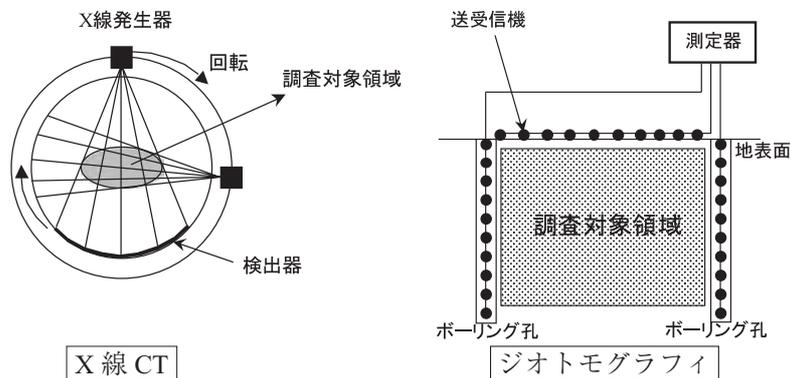


Fig.1-1 X線CTスキャンとジオトモグラフィとの比較
Comparison between CT scan by X-ray and Geotomography

ンピュータで行っていた解析については、パソコンの高性能化に伴い、パソコンレベルでの自動解析が主流となりつつあることから、解析に係る費用の低減が可能になりつつある。

b 地中レーダ法

(1) 地中レーダ法の概要

地中レーダ法とは、地中に電磁波を放射し、この電磁波の反射・屈折・透過などの物理現象を捉えることにより、地下構造を調査する物理探査技術である。電磁波を利用して地下を調査しようという試みは古くからあった。1904年ドイツの Huelsmier によって電磁波を利用した地中の金属体の検出法が提案され、1910年同じくドイツの Leimbach, Loewy らによって地中に埋められたアンテナを利用した地下埋設物の位置検出法に関する特許が申請された。これらの発明は連続波を利用した手法であったが、1926年、Huelsenbeck はパルス波を利用した埋設物探査に関する研究を行っており、これが地中レーダに関する最も初期の研究と考えられている（物理探査ハンドブック、1998）。その後、1960年、Cook が南極の氷雪厚の測定に地中レーダの利用を試みた。このころ地中レーダ探査の対象となったのは岩塩鉱山、石炭鉱山などであり、主に資源の探査・開発を目的としていた。日本においては1970年代から地中レーダに関する研究が行われ、近年では、埋設管や空洞といった異常点の調査法としてだけでなく、土質構造の非破壊診断、断層調査、地すべり調査などの一手法として、さらには、土木・建設分野における物理探査法としての応用が進められようとしている段階である。また、その測定方法も、従来は地表のみからの探査にとどまっていたが、近年では削孔したボーリング孔を利用し、より調査対象領域にアンテナ（電磁波の送受信部）を近づけて計測するポアホールレーダも実用化されつつある。

(2) 既往の研究と研究動向

地中レーダを現地調査に適用した例は数多く報告されている。その多くは、①空洞・埋設管調査、②遺跡（埋蔵文化財）調査であり、これまでは、主として何らかの対象物の検出を目的として実施されるケースが多かった。しかし、近年では、岩盤内部における亀裂調査（例えば、福田ら、1990、新田ら、1992）や地質調査法としての活用（例えば、竹内ら、1987、笠井ら、1996）や、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋位置調査やかぶり厚調査、トンネル背面の空洞調査（土田ら、1994）、あるいは老朽ため池の漏水箇所調査（堀ら、2002）など維持管理手法としての適用が図られつつある。

地中レーダ技術の適用に関する今後の課題として主に次の2点が考えられる。

①探査深度の向上

他の物理探査法と比較すると、分解能は高いものの、探査深度が小さい。アンテナから発射された電磁波は地表面で約60%は反射されるため、約40%の電磁波

しか地中に透過しない。また、透過した電磁波も地中で大きな減衰を受けるため、使用する電磁波の周波数、対象とする地盤の比誘電率にもよるが、可探深度はおよそ2~3m程度と報告されている。比抵抗値が低い地盤ではさらに波動エネルギーの減衰が激しく、探査深度は小さくなる。コンクリート構造物の鉄筋探査に利用されている周波数800MHz~1GHzの地中レーダの可探深度は数十cmと報告されている。

②画像の解釈

得られる画像の解釈が困難である。現時点では、地中レーダ技術を熟知した専門家の判断によるところが大きく、客観的で確実な画像処理方法は確立されていない。

近年の地中レーダに関する研究の動向をみると、こうした問題に対処するための数多くの研究がなされている。これらの研究内容は、次の3種類に大別できる。

①ハードウェアの改良

②解析法の研究

③地盤やコンクリートの電磁気特性の解明

従来のパルス型地中レーダでは、探査深度の確保と分解能の向上とは、相反する事象であり、実現できなかった。しかし、近年では、振幅が一定で、時間の経過とともに周波数が低い波から高い波に遷移する連続波を利用した地中レーダ技術が開発されつつある（例えば、鈴木ら、1999）。こうした連続波を用いることにより、パルス波に比べて単位時間あたりの送信エネルギーを大きくすることができるため、結果的に送信出力が高まり、より深くまで電磁波を送信することが可能になっている。

地中レーダ探査によって得られた画像を解析することは、探査対象物の位置、形状、深度などを特定する上できわめて重要である。地中レーダ探査の解析では、反射法地震探査などで行われているように、デコンボリューション、マイグレーションなどの処理が必要であり、専門家が画像を判定していた。しかし、コンピュータ技術の発展および理論研究の進展により、より高精度のデータ解析法も行われるようになってきた（例えば、朴ら、1998）。トンネル覆工背面の空洞調査事例においては、±数cmのオーダーで空洞厚を計算できる時系列解析法が確立され、現地にも適用されつつある（例えば、大東ら、1994）。今後コンピュータの性能が向上すれば、探査から解析までをリアルタイムで実行できるようなシステムに発展することが期待されている。また、③については、コンクリートの比誘電率を正確に捉えることにより、近年大きな社会問題となっているコンクリートの劣化判定や深い位置にある鉄筋の検出などに適用することが可能となる。

3 本論文の構成

本研究においては、ダム建設を3つの段階に区分し、各ステージを「調査段階」・「施工管理段階」・「維持管理（機能管理）段階」とする。それぞれのステージにおいて、比抵抗トモグラフィ法と地中レーダ法を適用し、従来の「点」による調査・管理を「面」による調査・管理へ拡大するための非破壊調査技術の開発、実用化を行う。

本論文の構成は下記のとおりである。

まず、第Ⅱ章では、ダム基礎地盤の「調査段階」における物理探査法として、比抵抗トモグラフィ法を選定し、現地ダムサイトにおいて用いるべき電極配置について、数値実験を行う。その後、御前山ダム（関東農政局那珂川沿岸農業水利事業所管内）基礎地盤を対象として、一般に行われている地表面からの水平電気探査法とボーリング孔内の電極を用いた比抵抗トモグラフィ法の両手法を試み、ダムサイトの地質状況の把握を行うとともに、両手法の分解能の差について検証する。

次に、第Ⅲ章では、ダム本堤の「施工管理段階」における物理探査法として、施工時にコンクリート内部に発生する「ジャンカ」などの初期欠陥を迅速に検出できる可能性があると考えられる地中レーダ法を選定し、基礎実験を行う。その後、農林水産省のダムで唯一RCD工法により築造している新宮川ダム（東北農政局会津農業水利事務所管内）の築堤中に、ジャンカの検出実験を行い、現地作業性や検出精度について結果をまとめる。

第Ⅳ章では、フィルダム完成後の「維持管理（機能管理）段階」として、フィルダム堤体内部にあらかじめ電極を埋設し、比抵抗トモグラフィ法により堤体を管理する手法について、そのシステムの概要や数値実験結果、農業工学研究所内で実施した小規模な試験堤体の実験結果についてとりまとめる。さらに、築堤時にあらかじめ基礎地盤内および堤体内に比抵抗トモグラフィ用の電極を埋設して施工した高柴調整池（東北農政局郡山土地改良建設事業所管内）において実証試験を実施し、試験湛水時における堤体内部の比抵抗分布を求めるとともに、比抵抗トモグラフィ法をフィルダム堤体安全管理として用いるための解析手法の開発を試みる。

第Ⅴ章では、第Ⅱ章、第Ⅲ章、第Ⅳ章を要約し、本研究の結論を述べる。

本研究のとりまとめに際しましては、多くの方のご協力とご助言を頂きました。京都大学青山咸康教授には、非常に多くのご指導・ご助言と励ましを頂きました。心より感謝致します。また、京都大学三野徹教授と河地利彦教授には、本論文を仕上げるにあたり、有益なご意見を頂きました。記してお礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、在籍致しました研究室関係者や行政部局の方々にも、大変お世話になりました。関東農政局、東北農政局、九州農政局など、行政部局のご協力を頂きながら進めることができました。各行政部局

担当者にお礼申し上げます。特に、本研究の大半を占める東北農政局郡山土地改良建設事業所管内の高柴調整池実証試験につきましては、実際に、2年間、人事交流で事業所の職員として赴任し、多くの方からご協力・ご支援を得て建設開始から盛立完了まで見届けることができました。事業所ならびに東北農政局関係者の皆様方に深く感謝いたします。

なお、本論文は京都大学審査学位論文であることを付記する。

Ⅱ 比抵抗トモグラフィ法のダム基礎地盤調査への適用（調査段階）

1 概説

農業用ダムをはじめ、各種農業水利基幹施設を建設する際には、あらかじめその基礎地盤に関する情報を収集することが、施工経済性、構造的安全性を高める上で極めて重要である。近年、弾性波探査、水平電気探査をはじめとする物理探査法が確立し、ボーリング孔間の基礎地盤に関する情報を補完し、連続した2次元情報としてとらえる技術が実用化されている。これら地表からの探査は、簡便に行える、あるいは比較的広域の調査にも適用できるという利点がある。しかし、調査対象とする深度が深くなるほど分解能が低下し、精度の高い情報がとらえられないという欠点を有している。特に局所的に存在する断層・破碎帯などの不連続な地盤構造の分布を正確に把握するためには、地表からの物理探査だけでは限界がある。本章では、局所的な基礎地盤に関する情報をより詳細にとらえるための物理探査法として、地表およびボーリング孔内に電極を設置して行う比抵抗トモグラフィ法に着目する。まず、比抵抗トモグラフィ法測定時の電極配置について数値実験を行い、電極配置の相違による低比抵抗異常に対する感度特性を明らかにする。次に、比抵抗トモグラフィ法をダム基礎地盤の断層調査へ適用し、水平電気探査との分解能の相違を検証する。

2 電極配置による探査精度の数値実験

a 電極配置の特徴

一般に、電気探査には、2極法、3極法、4極法という電極の組み合わせがある。2極法は、送受信電極のおおの一点をほぼ無限遠と見なせる測線の外側に固定し、もう一方の送受信電極を目的とする測線内で移動させる電極の組み合わせ法である。2極法の特長は、①移動させる電極が測線内で電流電極1つ、電位電極1つであるため、電極移動の自動化が容易であり、それにより大量のデータを取得できること、②同じ測線長であれば、3極法や4極法と比較して探査深度が深くなること、②観測される電位差が大きくなり、ノイズが少なくなるため、観測値の信頼度が大きくなること、③他の3極法、

4 極法のデータが 2 極法のデータから再構成できること、などが挙げられる。逆に、短所としては、①測線から離れた位置に遠電極を設置する手間がかかること、②電極系中央部では逆感度となること、③感度が 4 極法に比較して小さいため、微小な変化をとらえることが困難であること、などが挙げられる。なお、感度とは、均一の比抵抗を有する地盤中に周囲と異なる比抵抗の単位体積要素を考えたとき、この単位体積要素の比抵抗変動が電位差あるいは見かけ比抵抗値の変化に与える影響度であり、単位体積要素の比抵抗が増加したことにより、測定される見かけ比抵抗が増加する場合を順感度、その逆の場合を逆感度と称している。一方、遠電極の設置位置に関しては、測線内で通電する最大電極間隔の 10 倍以上離せばその影響は十分に小さくなるとされている (島ほか, 1995)。

これに対し、4 極法は、遠電極を設置せず、測線内に電流電極 2 本、電位電極 2 本を設置する組み合わせ法である。送信電極、受信電極の並びによりウェンナー法、シュランベルジャー法、ダイポール・ダイポール法に分類できる。4 極法一般の特長として、遠電極を設置する必要がないことが挙げられる。各電極配置の特長を見ると、まずウェンナー法の特長は、①送信電極間に電位電極を設置するため、観測される電位差が他の 4 極配置と比較して大きくなり、S/N 比が向上する、②電極系中央部に順感度の大きい領域があるため、異常物に対する感度が電極系中央で高くなる、などが挙げられる。また、ダイポール・ダイポール法の特長は、①電流電極間、電位電極に順感度の高い領域が現れる、②中央部及び電極系外側は逆感度を示す、などが挙げられる。

また、3 極法は、送信電極の一方を遠電極とし、もう一方の電流電極 1 本と電位電極 2 本を目的とする測線内で移動させる方法である。2 極法では測定の効率化、4 極法では水平方向の分解能向上という明確な目的があるのに対し、3 極法は 2 極法、4 極法の中間的な探査特性を示す (災害科学研究所トンネル調査研究会, 2001) ことから、現場測定で利用されることはほとんどなく、主として数値実験において 2 極法や 4 極法との対比で用いられることが多い。

以上に示すように、各種電極配置にはそれぞれ特有の性能があるため、ダム基礎地盤調査に適用する場合には、これらの特性を考慮した調査計画を立てる必要がある。

地表面から行う水平電気探査法に関しては、これら電極配置の相違による異常物に対する感度特性について、数値実験、現地試験が実施されている (例えば、高倉, 1998)。しかし、比抵抗トモグラフィ法に関しては、観測すべきデータが多量になることから、ほとんどの場合、全自動計測が可能な 2 極法が採用されている。そこで、比抵抗トモグラフィ法の計測を行う場合、どのような電極配置で計測すれば異常物に対する感度が高くなるのかを数値実験により確認した。

b 比抵抗トモグラフィ法における数値モデリング

比抵抗トモグラフィ法の数値解析方法は、地表から行う直流比抵抗法の 2 次元探査の数値解析方法と本質的には同様で、点電流源によって地盤中に生じる電位分布を求めることに帰着する。比抵抗法の数値解析方法としては、有限要素法 (Coggon, 1971)、アルファセンター法 (Shima, 1990) などがあげられるが、今回の数値実験では調査対象とする領域の奥行き方向に比抵抗構造が変化しないと仮定した 2 次元構造に対して、点電流源により生じる 3 次元ポテンシャルを求める 2 次元差分法 (Dey and Morrison, 1979) を用いた。

3 次元比抵抗構造の半空間において、点電流源によって生じる電位は、次式 (2.1) で表される。

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] = j_s(x, y, z) \quad \dots (2.1)$$

ここで、 $\sigma(x, y, z)$ は導電率、 $\phi(x, y, z)$ は電位、 $j_s(x, y, z)$ は電流源分布である。ここで、調査対象の奥行き方向 (ここでは y 方向とする) に比抵抗構造が変化しない、すなわち 2 次元構造を仮定すると、

$$\frac{\partial \sigma(x, y, z)}{\partial y} = 0 \quad \dots (2.2)$$

が成り立つので、式 (2.1) は、次のように変形できる。

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \phi(x, y, z)] = j_s(x, y, z) \quad \dots (2.3)$$

左辺と右辺の次元を合わせるため 2 空間波数 λ を導入して、式 (2.3) をフーリエ変換すると、次式が得られる。

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \Phi(x, \lambda, z)] + \lambda^2 \sigma(x, z) \Phi(x, \lambda, z) = J_s(x, \lambda, z) \quad \dots (2.4)$$

ここで $\Phi(x, y, z)$ 、 $J_s(x, y, z)$ は、それぞれフーリエ変換された電位および電流源分布である。式 (2.4) を離散化し、差分方程式を解くことによって、2 次元空間内のポテンシャル分布が計算できる。求めるべき 3 次元空間の電位 $\phi(x, y, z)$ は、 $\Phi(x, y, z)$ をフーリエ逆変換することにより求められる。

$$\phi(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \Phi(x, \lambda, z) \cos(\lambda y) d\lambda \quad \dots (2.5)$$

$y = 0$ の断面を考えれば、式 (2.5) は、結局次式となる。

$$\phi(x, 0, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \Phi(x, \lambda, z) d\lambda \quad \dots (2.6)$$

適当ないくつかの λ について $\Phi(x, y, z)$ を求め、それらを補完して、式 (2.6) の数値積分を行えば、求めるべき電位分布が得られる。この数値積分に際しては、 λ の小さい領域では、 $\Phi(x, y, z)$ を対数近似することによって、また、 λ の大きい領域では、 $\Phi(x, y, z)$ を指数近似することによって、誤差を少なくできる (藤崎ら, 1992)。

c 逆解析 (インバージョン)

比抵抗トモグラフィ法による現地調査では、流した電流値と、そのときある 2 点の電位電極間に生じた電位差 (あるいはその電位差から計算される見かけ比抵抗値) が、観測データとして得られる。したがって、この結果

から地盤の比抵抗構造を推定するためには、次に述べる逆解析（インバージョン）を用いなければならない。

比抵抗トモグラフィ法におけるインバージョンでは、地下を m 個のブロックに分割し、各ブロックの比抵抗値を未知のモデルパラメータ $\vec{p}=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ として、観測された n 個の見かけ比抵抗値データからこれらを推測する。本論においては、実際に測定された見かけ比抵抗値 $\rho_{ai}^f (i=1, 2, \dots, n)$ と、数値モデルから計算される見かけ比抵抗値 $\rho_a(\vec{p})$ との二乗和が最小となるようにモデルパラメータを修正し、かつ、安定な解を求めるために、比抵抗値の変化が最も滑らかになるという制約条件（松岡, 1986）を付加した平滑化制約付き最小二乗法を用いた。

比抵抗トモグラフィ法におけるインバージョンは、結局

$$U = \sum_{i=1}^n [\ln \rho_{ai}^f - \ln \rho_a(\vec{p})]^2 \quad \dots (2.7)$$

を最小とする問題に帰着する。ここで、 $\rho_a(\vec{p})$ は、モデルパラメータ $\vec{p}=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ の比抵抗ブロックがあるときに、数値モデルから計算される n 個の見かけ比抵抗値である。さらに、新しいモデルパラメータ $\vec{x}(x_0, x_1, x_2, \dots, x_m) = \ln(\vec{p})$ を導入して、モデルパラメータ \vec{p} も対数値に置き換える。比抵抗値を対数変換することによって、インバージョンの過程で比抵抗値が負になることを避けることができる。

$\rho_a(\vec{x})$ を、初期値 \vec{x}_0 の周りで Taylor 展開し、2 次以上の項を無視すれば、次式が得られる。

$$\rho_a(\vec{x}) = \rho_a(\vec{x}_0) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial x_j} \right)_{\vec{x}_0} \Delta x_j \quad \dots (2.8)$$

ここで、

$$\Delta x_j = x_j - x_0 \quad \dots (2.9)$$

である。これを式 (2.7) に代入すれば、次式が得られる。

$$U = \sum_{i=1}^n \left[\ln \rho_{ai}^f - \ln \rho_a(\vec{x}_0) - \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial \ln \rho_a}{\partial x_j} \right)_{\vec{x}_0} \Delta x_j \right]^2 \quad \dots (2.10)$$

U が最小となる条件は、これを $x_k (k = 1, 2, \dots, m)$ で微分した値が 0 になることである。したがって、

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial x_k} \left[\ln \rho_{ai}^f - \ln \rho_a(\vec{x}_0) - \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial \ln \rho_a}{\partial x_j} \right)_{\vec{x}_0} \Delta x_j \right] = 0 \quad \dots (2.11)$$

である。これを行列表示すれば、次の正規方程式が導かれる。

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \Delta \vec{x} = \mathbf{A}^T \Delta \vec{y} \quad \dots (2.12)$$

ただし、

$$A_{ij} = \left(\frac{\partial \ln \rho_a}{\partial x_j} \right)_{\vec{x}_0} \quad \dots (2.13)$$

$$\Delta y_i = \ln \rho_{ai}^f - \ln \rho_a(\vec{x}_0) \quad \dots (2.14)$$

である。これを解いて更新値を決定する。

d 電極配置による比抵抗異常に対する感度特性の検証

Fig.2-1, 2-2 に示すように、 $100 \Omega \cdot m$ 均一土層内部に $10 \Omega \cdot m$ の低比抵抗異常を有する数値モデル [I] および [II] を仮定し、このモデルについて、2 極法、3 極法、4 極法によって測定される見かけ比抵抗値を数値計算により求めた。まず、隣り合う電極間隔を 5 等分し、解析領域を、周辺の地盤まで含めて 118×65 の四角形メッシュに分割した (Fig.2-3)。

初期モデルとして各図に示す比抵抗値を与え、差分法による順解析により、各観測での計算値を算出した。本数値実験では、比抵抗異常の影響が計算値にどのように現れるかを調べることに焦点をおいている。

(1) 数値モデル [I] の計測結果

差分法順計算によって得られた見かけ比抵抗値の頻度分布を Fig.2-4 に示す。総測点数が各電極配置で異なっていたため、縦軸は総測点数に対する頻度 (%) 表示とした。

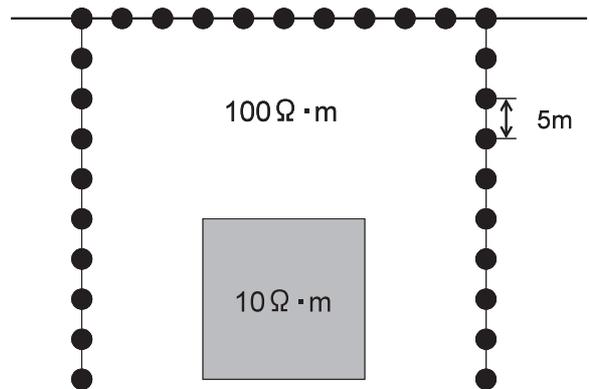


Fig.2-1 数値実験モデル [I]
Numerical simulation model [I]

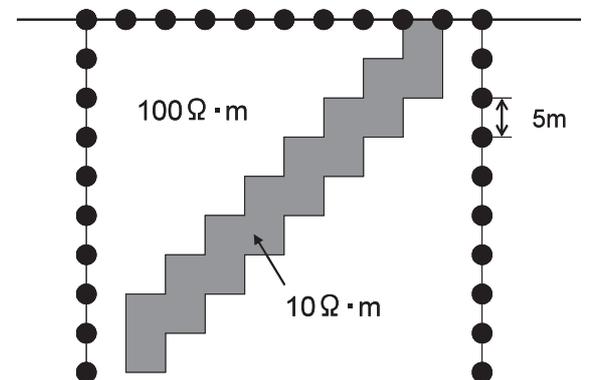


Fig.2-2 数値実験モデル [II]
Numerical simulation model [II]

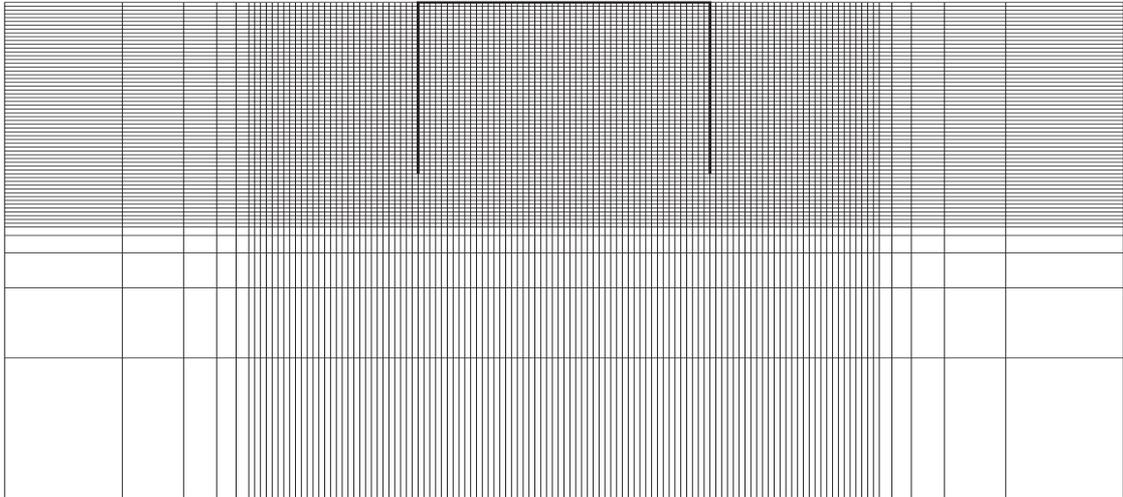


Fig.2-3 差分法による数値計算に利用したメッシュ分割図
Division map for calculus of finite differences

2 極法では内部に $10\Omega \cdot m$ の低比抵抗異常があるにもかかわらず、計算される見かけ比抵抗値が最低でも $80\Omega \cdot m$ にとどまっていること、しかも計算値のほとんどが $80\sim 95\Omega \cdot m$ 内に集中していることが明らかとなった。このことから、2 極法では低比抵抗異常に対する感度は低く、仮定した土層モデルをなめらかな比抵抗変化としてとらえる電極配置であるといえる。

一方、4 極法では、見かけ比抵抗値が $100\Omega \cdot m$ に測定される頻度が高くなっており、また計算される見かけ比抵抗値が $50\Omega \cdot m$ にまで低減していることから、2 極法と比較すると低比抵抗異常に関する感度が高いといえる。3 極法は、2 極法と比較すると $100\Omega \cdot m$ 程度に測定される頻度が増え、計算される見かけ比抵抗値が $65\Omega \cdot m$ にまで減少しており、2 極法と4 極法の間中間的な性質を有することが明らかとなった。

(2) 数値モデル [II] の計測結果

差分法順計算による見かけ比抵抗値の頻度分布を Fig.2-5 に示す。この場合は $10\Omega \cdot m$ に割り当てたブロック数は 16 ブロックで、数値モデル [I] (ブロック数 20) に対して 20% 減少している。しかし、数値モデル [II] では電極近傍に比抵抗値の小さいブロックが点在することから、2 極法、3 極法、4 極法それぞれの電極配置において、数値モデル [I] と比較すると全体的に計算値が小さな値まで示すようになっている。数値モデル計算の結果、それぞれの電極配置による低比抵抗異常に関する感度は先の数値モデル [I] と同様の傾向が得られた。すなわち、4 極法で感度が高く、以下3 極法、2 極法の順で感度が悪くなっている。したがって、異常物の検知を目的とした比抵抗トモグラフィ法による調査の場合には、感度が高い4 極法での測定が有効であることが明らかとなった。

e 逆解析における電極配置の影響度評価

比抵抗トモグラフィ法によって得られた見かけ比抵抗

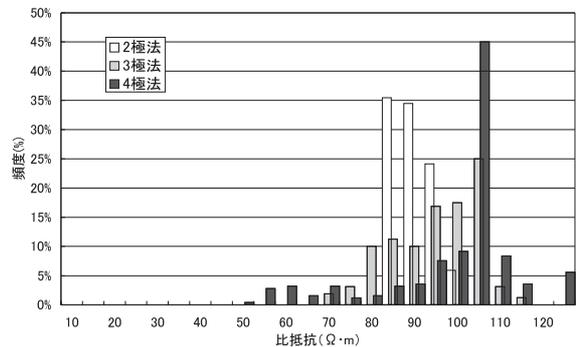


Fig.2-4 数値モデル [I] の計測結果ヒストグラム
Distribution of calculated resistivity
in numerical simulation model [I]

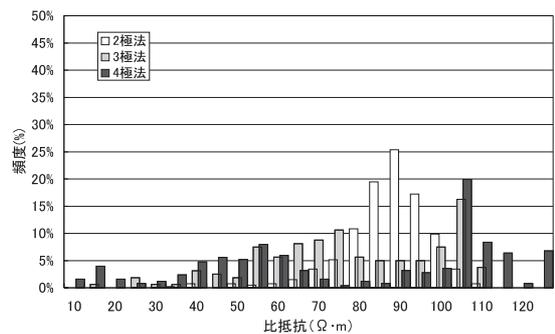


Fig.2-5 数値モデル [II] の計測結果ヒストグラム
Distribution of calculated resistivity
in numerical simulation model [II]

値は、地下の比抵抗が均一で、しかも地表面が平坦である場合のみ真の比抵抗値と一致する。しかし、実際の大地において、均一な地質構造が続く場所は限定され、また、地形も複雑に変化している。このため、比抵抗トモグラフィ法によって得られた電位データから逆解析によって真の比抵抗値を求める必要がある。

Fig.2-6 に比抵抗法における解析フローチャートを示す。まず、全体が均一比抵抗であるという前提で、地形の起伏のみによって生じる電位分布を順計算し、地形の影響のみに起因する理論値を求める。実際の測定で得られたデータには地形の影響も含まれるため、現場測定値をこの理論値で正規化して地形の影響を除外する。次に、初期値としてある比抵抗構造を与え、それに対する電位分布を求める。差分法においては、こうした地形補正が必要となるが、有限要素法などを利用する場合には、地形の影響を含めた解析が可能であるので、地形補正を意識する必要はない。

次に地形補正後のデータから逆解析によって比抵抗構造を推定する。このとき、推定した比抵抗構造から計算される電位分布が実際に測定された電位分布と同じになるように順次比抵抗構造を修正していく。修正値は、計算値と実測値との差の分散の逆数を重み係数として乗じることによって決定している。さらに今回開発した逆解析プログラムでは、安定した計算が行われるように、隣り合うブロック比抵抗値の変化ができる限りスムーズになるような平滑化を加えている。

逆解析プログラムの精度を検証するため、2.d で利用した数値モデル [I] および [II] の順解析で得られた値に Table 2-1 に示すノイズを加えた値を測定値と見なし、この値から逆解析によって比抵抗構造の推定を行った。電極配置の相違による精度を検証するため、2 極法、3 極法、4 極法それぞれについて逆解析を行った。逆解析においては、初期モデル、メッシュサイズ、境界条件

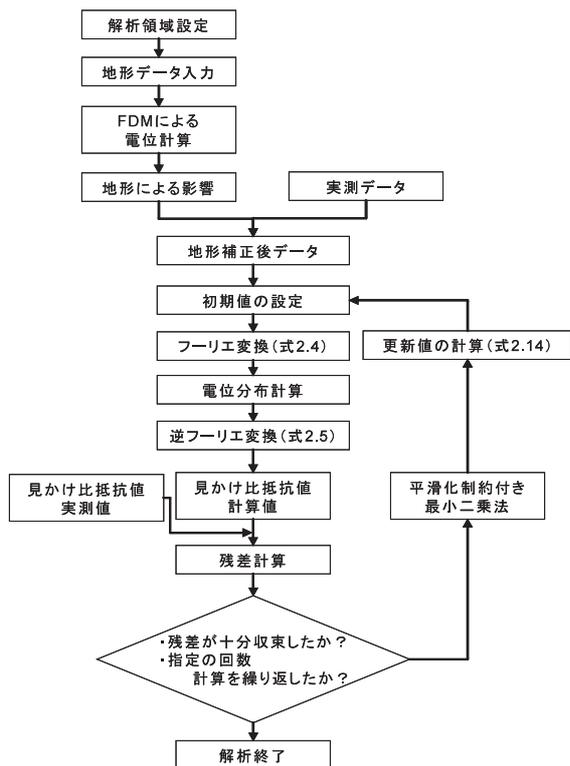


Fig.2-6 比抵抗法の解析フローチャート
Flowchart of analysis of resistivity data

が逆解析の精度に多大な影響を与える。そこで、条件を統一するため初期モデルはいずれの電極配置においても $100 \Omega \cdot m$ 均一とし、境界条件は精度が高い混合境界条件を用いた。また、メッシュサイズは順解析時に設定したものを採用した。

(1) 数値モデル [I] 逆解析結果

数値モデル [I] の逆解析結果を Fig.2-7 に示す。逆解析においては、 $5m \times 5m$ の正方形を1つの比抵抗ブロックとしたため、計 90 個の未知パラメータを同定することになる。逆解析結果を見ると、初期値はすべて $100 \Omega \cdot m$ としていたにもかかわらず、数値モデル [I] の逆解析では 2 極法、4 極法で $10 \Omega \cdot m$ の低比抵抗帯の位置がほぼ正確に推定されている。3 極法では低比抵抗帯の位置が非対称となつてずれている。この原因については、2 極法、4 極法ではそれぞれ送受信の電極がポール・ポール配置およびダイポール・ダイポール配置と対称であるのに対し、3 極法では送信電極がポール配置、受信電極がダイポール配置であるという非対称性が関係していると考えられる。なお、一般的な解析では、解が発散しないよう、また、現実の比抵抗構造は急激な比抵抗値の変化がない、という仮定のもとに、平滑化制約を設け、できる限り高比抵抗部と低比抵抗部をなだらかに連結させるような工夫をしている。今回用いた解析においても、この平滑化制約を設けているため、正確な低比抵抗の位置は再現できなかったが、およその位置は再現できていると判断できる。

ノイズを加えた影響について考察すると、2 極法、4 極法では、ノイズを多く加えることにより、あらかじめ $10 \Omega \cdot m$ に設定した領域の左右および上部に $120 \Omega \cdot m$ を越える領域が出現した。3 極法では、電極の非対称性が問題となり、ノイズの大小にかかわらず $120 \Omega \cdot m$ を越える比抵抗値を示す領域が多くなった。

逆解析によって推定された比抵抗構造と、実際の比抵抗構造との適合度を表す指標のひとつに RMS 残差がある。これは、測定で得られた見かけ比抵抗値を fap 、逆解析によって得られた比抵抗構造から計算によって求められる見かけ比抵抗値を $fcomp$ としたとき、エラーを $\log(fap / fcomp)$ として全測点数足し合わせ、この二乗和の平均値の平方根をとった値である。したがって、RMS 残差が小さいほど実際の見かけ比抵抗値と、推定した比抵抗ブロックモデルから計算される見かけ比抵抗値との差が小さいことを意味している。Fig.2-8 に数値モデル [I] の逆解析時の RMS 残差の変化を示す。正

Table 2-1 逆解析時に利用したノイズ

Added noise data for inversion			
	2 極法	3 極法	4 極法(DP-DP [※] 法)
Case 1	正規分布ノイズ (範囲: -2.8~+2.8%)		
Case 2	ランダムノイズ (範囲: -5~+5%)		
Case 3	ランダムノイズ (範囲: -10~+10%)		

※DP-DP: ダイポール・ダイポール法

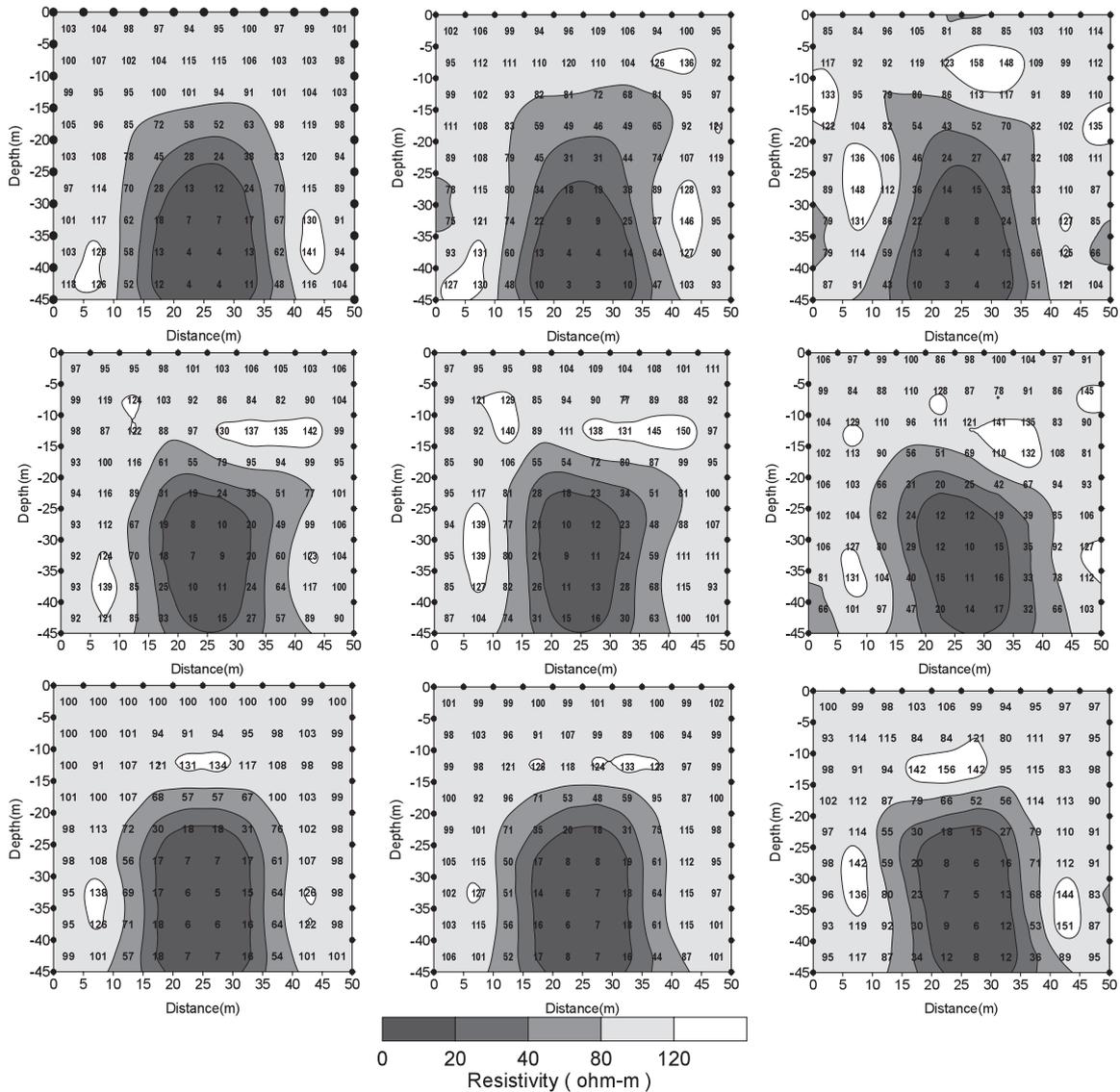


Fig.2-7 数値モデル [I] インバージョン結果 (図中の数値は比抵抗値 $\Omega \cdot m$)

(上段から2,3,4極法, 左から Case 1, Case 2, Case 3 のインバージョン結果)

Result of inversion in numerical model [I] (Numerical value: resistivity $\Omega \cdot m$)

From the upper: pole-pole, pole-dipole, dipole-dipole electrical array

From the left: Result of Case 1, Case 2, Case 3

規分布ノイズ, 5%ランダムノイズ, 10%ランダムノイズの順で, 収束する RMS 残差が若干異なり, 大きいノイズを加えるほど, RMS 残差が大きくなる傾向がある。しかし, 繰り返し計算 3 回目以降はどのレベルのノイズレベルであっても RMS 残差の変化は小さくなり, 計算が収束していることがわかる。繰り返し計算 5 回目の RMS 残差は, 正規分布ノイズを加えた値の逆解析結果では, 0.0099~0.014, 5%ランダムノイズを加えた値の逆解析結果では, 0.0275~0.0309, 10%ランダムノイズを加えた値の逆解析結果では, 0.0507~0.0548 となった。

(2) 数値モデル [II] 逆解析結果

次に数値モデル [II] の逆解析結果を Fig.2-9 に示す。すべての電極配置について, 地表に近い部分では $100 \Omega \cdot m$ 均一部分と $10 \Omega \cdot m$ 低比抵抗帯との境界が明瞭

に現れているが, 下部になるにつれて, 仮定した $10 \Omega \cdot m$ ブロックが下方にシフトした結果となった。すなわち, 仮定した低比抵抗帯の傾きがより垂直に表現された結果となった。特に 2 極法と 4 極法の結果は類似した解析結果となっているが, 2 極法では下部の比抵抗ブロックまで低比抵抗値に判定された反面, 4 極法では, 下部のブロックは $10 \Omega \cdot m$ にまで比抵抗値が下がっていない。また, 2 極法と 4 極法では, 低比抵抗帯の下側の $100 \Omega \cdot m$ 均一部分におけるブロック比抵抗値は, あらかじめ割り当てた $100 \Omega \cdot m$ よりも大きい値となることが分かった。一方, 3 極法は他の 2 種類の電極配置とは異なる傾向を示し, 斜めの低比抵抗帯が上部, 下部の 2 つに分断されたような解析結果となっている。また, 2 極法, 4 極法に見られる $200 \Omega \cdot m$ を超えるような偽像は

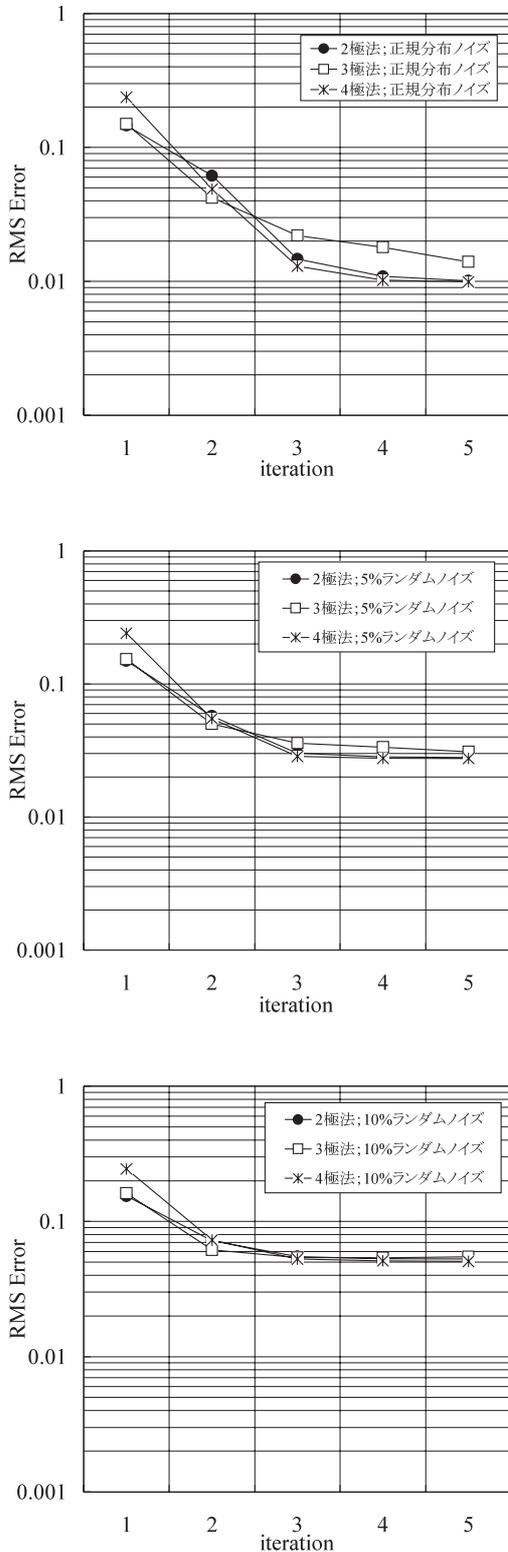


Fig.2-8 RMS 残差の推移

(上から Case 1, Case 2, Case 3 の RMS 残差結果)

RMS error according to iteration

(From the upper: Case 1, Case 2, Case 3)

生じていない。

Fig.2-10 に数値モデル [II] の逆解析時の RMS 残差の推移を示す。それぞれの電極配置で 3 回目以降は RMS 残差にほとんど変化はなく、計算が十分収束して

いる。5 回目の RMS 残差は 2 極法では 0.0426, 3 極法では 0.0321, 4 極法では 0.1041 となった。図を見ると、全体を $100 \Omega \cdot m$ 均一として行った 1 回目のモデリング計算において、RMS 残差が 2 極法, 3 極法, 4 極法の順に小さくなっている。すなわち、2 極法逆解析では異常体に対する感度が小さいために、初期モデルにあまり依存せず、柔軟にブロック比抵抗値を変化させられると考えられる。逆に 4 極法逆解析では、電極近傍の感度が高く、微妙なブロック比抵抗値の変化がモデリング精度に影響を与えるため、結果としてブロック比抵抗値の更新値設定が難しいと推察される。したがって、データ数が増えた場合、4 極法逆解析では RMS 残差が大きくなるのが推測できる。これを防ぐ手段として、4 極法逆解析を行う場合には、見かけ比抵抗分布から比抵抗構造をあらかじめ推測しておき、それを初期モデルとして設定することが有効と考えられる。また、大量のデータを取り扱うような場合には、データ取得の容易さと、逆解析の安定性の面から判断すると、2 極法によるデータ取得と逆解析が効果的である。

(3) 全周を取り囲む電極配置の有効性

数値モデル [II] の逆解析結果において、仮定した低比抵抗帯の傾きが正確に再現されず、実際より垂直に傾いた比抵抗分布として解析された。この原因として、地表-ボーリング間の比抵抗トモグラフィ計測において、底面の電極が配置できないことが想定できる。実際、比抵抗トモグラフィ法の計測において、分解能の偏りが生じ、底面から 2 孔のボーリング間隔の 1/4 程度の深度の比抵抗情報はあまり信頼性のないデータとなることが指摘されている (物理探査ハンドブック, 1998)。そこで、底面に電極を設けることにより、数値モデル [II] の逆解析結果が改善されるか否かを検証した。解析は前述した Case3 の 10% ランダムノイズ付加 2 極法データで行った。底面にも電極を増やしたため、測定の組み合わせは 406 から 703 に増加した。

逆解析結果を Fig.2-11 に示す。平滑化パラメータの影響により、低比抵抗周辺には Fig.2-9 でも見られたように、 $100 \Omega \cdot m$ を超える比抵抗ブロックが設定した低比抵抗の上下に偽像として発生している。しかし、低比抵抗部の位置は非常によく再現できた。これは、底面に電極を設置したことにより、底面の電極と他の電極を使った比抵抗トモグラフィの計測が可能となったことが効果的であったと考えられる。

(4) 比抵抗回復度による電極配置の解析精度に関する検討

RMS 残差による数値計算精度の評価は、あくまで入力と出力の差が一番小さいモデルかどうかを判断するのみであり、内部の比抵抗構造をよく再構成できたかどうかは判定できない。そこで、インバージョンによって仮定した比抵抗構造がどの程度再構成できているのかを定量的に評価するため、ブロック比抵抗回復度 BE を定義

し、各電極配置における BE を評価した。BE は、数値モデルで設定したブロックの比抵抗値と、逆解析で算定した比抵抗値との平均的な“ずれ”を示す指標であり、次式で定義した。

$$BE = \sqrt{\frac{\sum_i (p_i - p_s)^2}{i}} \quad \dots (2.15)$$

ここで、 p_i : 比抵抗異常のブロック比抵抗値 (計算値)、 p_s : 比抵抗異常のブロック比抵抗設定値 (ここでは $10 \Omega \cdot m$)、 i : 比抵抗異常のブロック数である。したがって、うまく低比抵抗異常が再構成され、初期値として与えた $100 \Omega \cdot m$ が $10 \Omega \cdot m$ に近づくことにより、BE は 0 に近づくことになる。初期値は均一 $100 \Omega \cdot m$ を与えたので、BE の初期値は、数値モデル [I] (比抵抗異常

20 ブロック)、数値モデル [II] (比抵抗異常 16 ブロック) とも $90 \Omega \cdot m$ である。

結果を Fig.2-12 に示す。左が数値モデル [I]、右が数値モデル [II] の結果であり、上から Case 1, Case 2, Case 3 の結果である。なお、Case 3 においては、全周に電極を配置した 2 極法の BE も記載している。

まず、数値モデル [I] と [II] の結果を比較すると、構造が単純な数値モデル [I] の BE が数値モデル [II] の BE と比較して全体的に小さい値であった。

数値モデル [I] の BE 推移に着目すると、2 極法と 3 極法では、繰り返しを行うごとに BE が小さくなる傾向を示した。一方、4 極法では反復回数 2 回の時に他の電極配置よりも BE が小さくなり、その後は反復回数が増えても小さくならず、Case 3 ではむしろ BE が上昇し

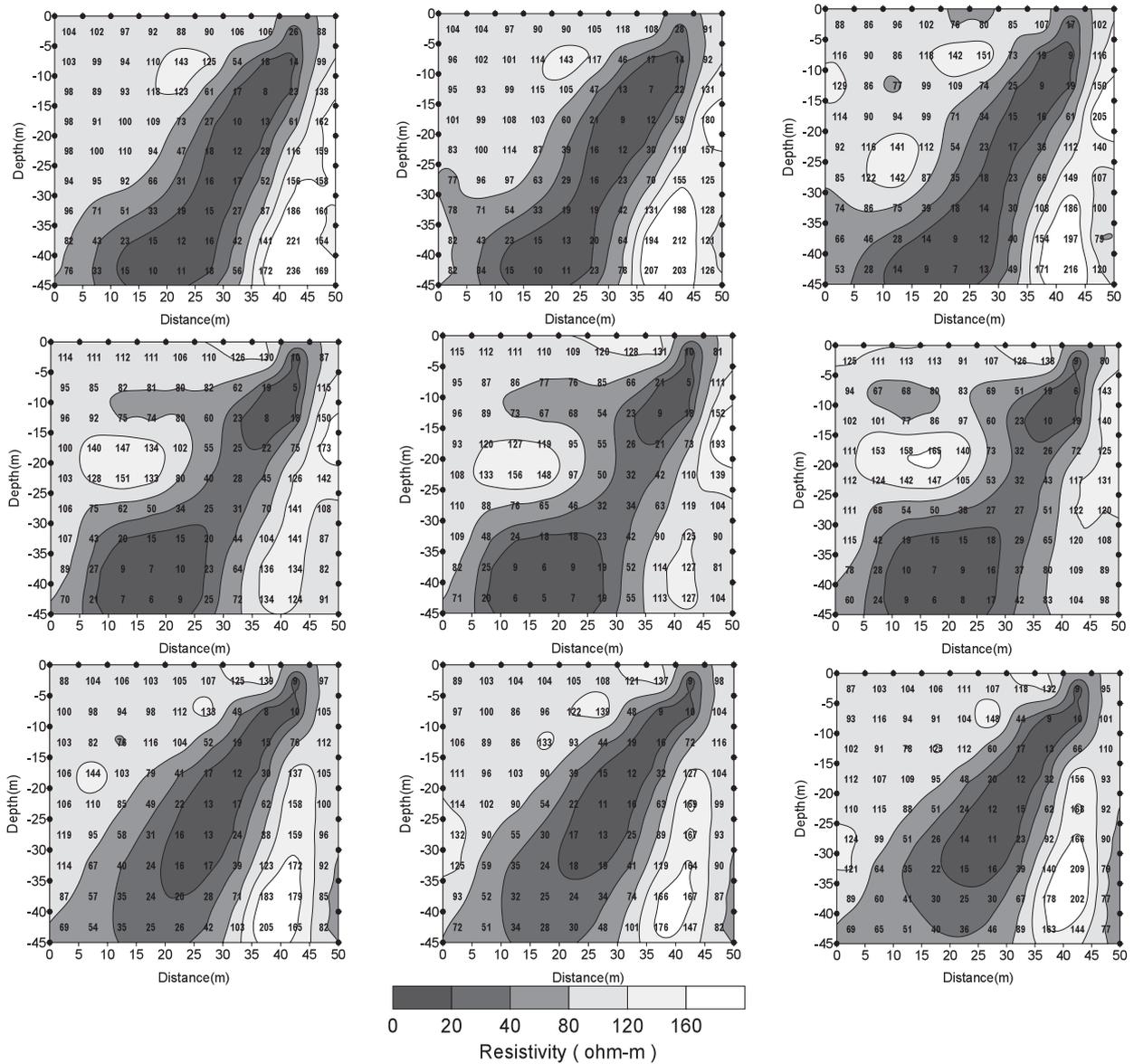


Fig.2-9 数値モデル [II] インバージョン結果 (図中の数値は比抵抗値 $\Omega \cdot m$)
(上段から 2,3,4 極法, 左から Case 1, Case 2, Case 3 のインバージョン結果)

Result of inversion in numerical model [II] (Numerical value: resistivity $\Omega \cdot m$)

From the upper: pole-pole, pole-dipole, dipole-dipole electrical array

From the left: Result of Case 1, Case 2, Case 3

た。

次に、数値モデル [II] の BE の推移をみると、2 極法では反復回数によらずほとんど変化がないか、Case 3 ではむしろ BE が上昇した。3 極法は特異的な BE 推移を示し、反復回数 5 回目まで BE が急激に減少した。4 極法では、反復回数が増えるごとに BE が次第に減少し、いずれの結果においても 4 極法の BE が最小となった。なお、全周に電極を配置した数値モデル [II] の 2 極法 (Case 3) の BE は、数値モデル [I] の 4 極法の BE よりもさらに小さな値となっていたことから、全周に電極を配置する際の有効性が明らかとなった。

以上の結果から、比抵抗トモグラフィ法における電極

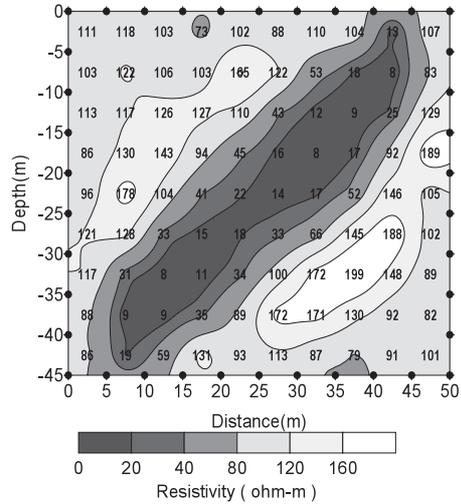


Fig.2-11 全周を取り囲んだ場合の数値モデル [II] 逆解析結果 (図中の数値は比抵抗値 $\Omega \cdot m$)

Result of inversion in numerical model [II] when electrodes are located surround all perimeter (Numerical value: resistivity $\Omega \cdot m$)

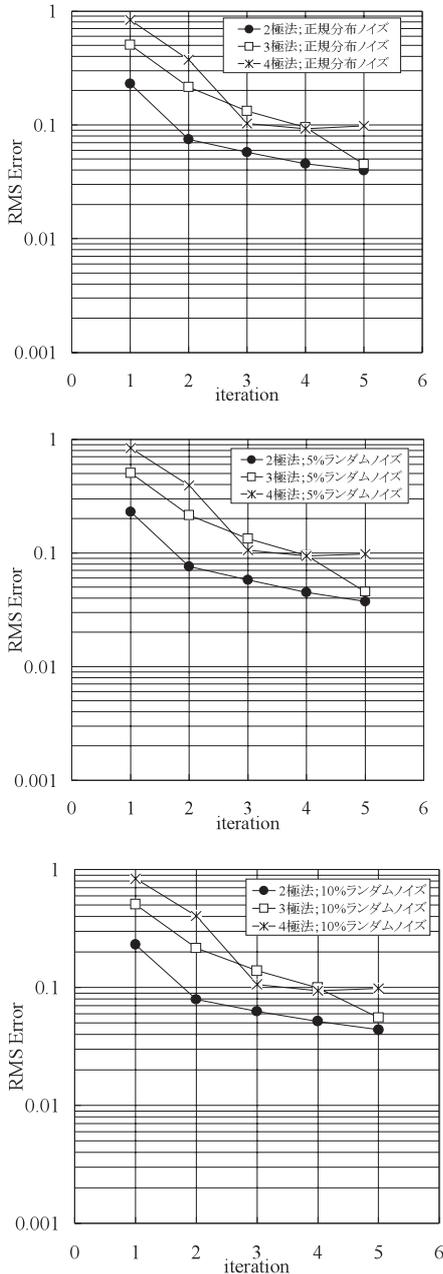


Fig.2-10 RMS 残差の推移

(上から Case 1, Case 2, Case 3 の RMS 残差結果)

RMS error according to iteration

(From the upper: Case 1, Case 2, Case 3)

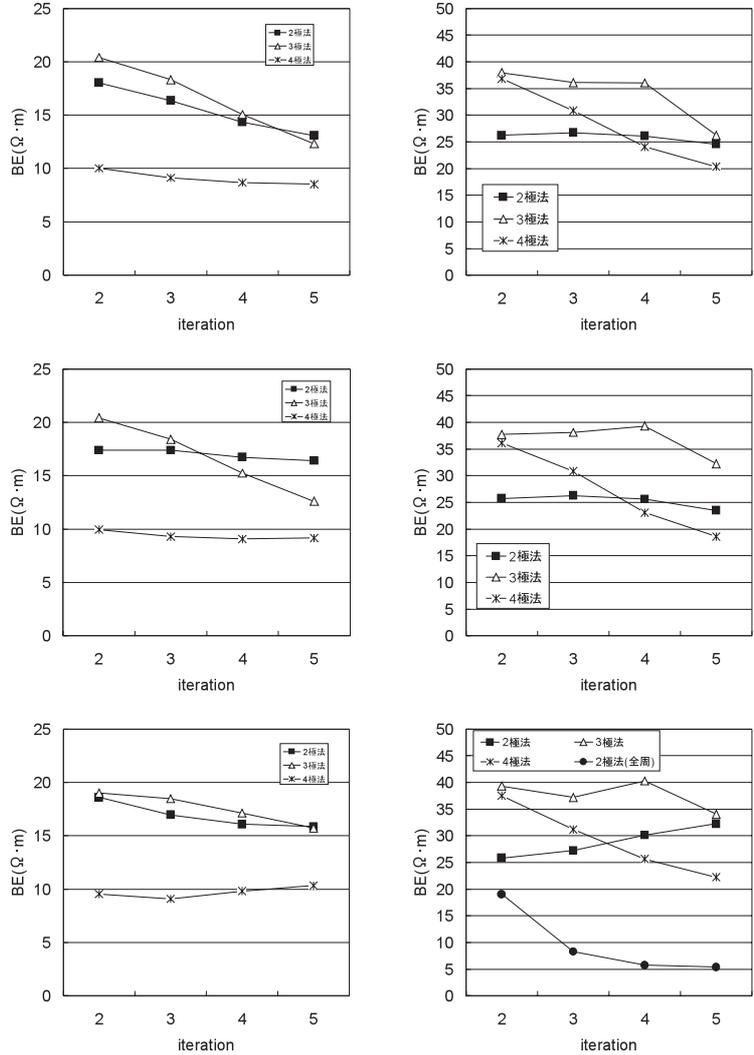


Fig.2-12 ブロック比抵抗回復度の推移

(左; 数値モデル [I], 右; 数値モデル [II], 上から Case 1, 2, 3 の結果)

Recovery of block resistivity according to iteration

(Left: Numerical model [I], Right: Numerical model [II], From the upper: Case 1, Case 2, Case 3)

配置に関して、低比抵抗異常の検出には 4 極法が有効であると評価できた。差分法による順計算においても敏感に低比抵抗異常に反応し、比抵抗回復度 BE による評価でも、他の電極配置よりも優れた性能を有していると考えられる。ただし、現地計測に際しては、4 極法の測定に時間がかかること、などの短所もあり、現場状況に応じた電極配置の設定が求められる。一方、全周に電極を配置できるような測定環境にあれば、2 極法においても BE の向上が期待できるため、多量のデータを自動計測できるという 2 極法のメリットが活用できることになる。

3 ダムサイトの調査事例

ダム建設工事費を左右する要因として、基礎地盤の強度がある。基礎地盤の強度によりダムタイプも決定されるため、建設工事費だけでなく、設計の基本的考え方にも影響を及ぼす。それゆえに、ダム建設前の地区調査、全体実施設計では、数多くの調査ボーリングが削孔され、2 次元的な想定地質図が作成される。しかし、ボーリングデータは、あくまで「点」の情報であり、地質図の作成には、その地域の地史、周辺露頭の観察などのデータを収集し、専門家が判定しているのが現状である。しかし、これらの「点的」調査だけでは、局所的に発生する地質の変化、例えば断層などを捉えることは難しい。そこで、こうした局所異常が比抵抗トモグラフィ法により検出できるか、実証試験を実施した。本調査の目的は、ダムサイトにおいて確認された F-1 断層の広がり具合を比抵抗トモグラフィ法により検出できるかどうかを確認することである。

a 調査地の概要と調査方法

(1) 調査地の概要

調査は関東農政局管内の御前山ダムサイトで実施した。御前山ダムは渇水期的那珂川への農業用水供給を目的としてその支流（相川）に建設中のゾーン型ロックフィルダムで、堤高 52m、堤頂長 298m、有効貯水量 6,500 千 m³ である。ダム配置の上での地形的特徴は、右岸に上下流幅 450m の広大な段丘面を擁していることである（檜野ら、1999）。

調査ボーリングなどによって、周辺地質は中世期ジュラ紀の付加体である八溝層群の砂岩、粘板岩、チャート、礫岩から成っていることが明らかとなっている（Fig.2-13）。事前に行われた弾性波探査の低速度帯およびボーリングなどによる地質調査から、堤体左岸アバットに断層の存在が確認されたため、比抵抗法によって F-1 断層の分布状況およびその規模（幅、深さ）の把握を試みた。

(2) 調査方法

まず、水平電気探査をダム軸上において実施した。これは、ダムサイトの大局的な地質構造が水平電気探査によってどの程度把握できるのかを確認すること、また地表からのみ行う水平電気探査と、ボーリング孔を利用した比抵抗トモグラフィ法との結果を対比するためである。水平電気探査では、水平距離 4m を基準として電極を設置し、全長 380m（電極数 96 点）の測線を設定した（Fig.2-13 地表面の記号）。測定は、4 極法のダイポール・ダイポール法で行い、測定の電極組み合わせは電極間隔 4m 隔離係数 1~9、電極間隔 8m 隔離係数 5~9、電極間隔 16m 隔離係数 5~9、電極間隔 32m 隔離係数 5~9 とし、全体の電極組み合わせは 1,611 であった。ここで、隔離係数とは、送信側のダイポールと受信側のダイポールとの間の距離が、そのときの電極間隔の何倍離れているかを示す整数値であり、例えば、電極間隔 4m、隔離係数を 2 としたとき、送信電極が 0m、4m の位置である場合には、受信電極は 12m、16m の位置にあることを意味する。

次に、比抵抗トモグラフィ法による比抵抗構造の調査を行った。電極は、地質調査用のボーリング孔 2 本および地表面に 1m 間隔で設置した。調査対象は、地表地質踏査やボーリングなどで明らかにされた左岸側の F-1 断層とした。地中の電極はボーリング孔を利用して、1m 間隔で鉛板を張り付けた導線を地下水位以下に設置した。F-1 断層近傍の想定地質図および電極配置図を Fig.2-14 に示す。総電極数は地表 32 点、地中 64 点の合計 96 点で、2 極法および 4 極法による計測を行った。2 極法では、任意の 1 点で電流を通電し、残りの電極すべてで遠電極との電位差を計測した。全体の電極組み合わ

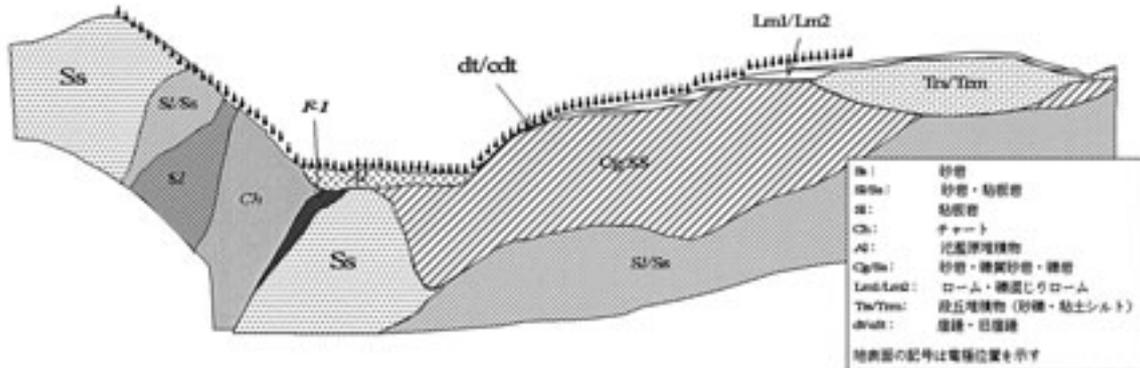


Fig.2-13 御前山ダムサイト想定地質図および水平電気探査の電極位置

Assumed geologic map at the damsite of Gozenyama and position of electronodes for electrical resistivity survey

せは4,574である。ただし、相反性（例えば1番の電極で通電し2番の電極で電位を計測したときと、2番の電極で通電し1番の電極で電位を計測したときの相違）は計測していない。また、4極法では、電極間隔1m、隔離係数1~4、電極間隔2m、4m、8mで隔離係数それぞれ4とし、全体の電極組み合わせは630である。

b 水平電気探査結果

水平電気探査結果を Fig.2-15 に示す。この図では、電気が流れにくい高比抵抗領域を暖色系、電気の流れやすい低比抵抗領域を寒色系で表示している。図中の黒線は、

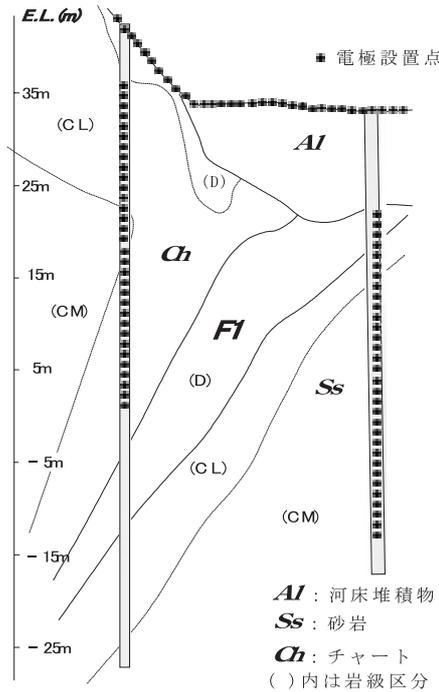


Fig.2-14 F-1断層近傍の想定地質図および比抵抗トモグラフィ法の電極設置点図

Assumed geologic map near the F-1 fault and position of electrodes for resistivity tomography

別途実施された弾性波探査（檜野ら，1999）において、弾性波速度が1.9km/s以下を示した低速度帯の位置を示す。

Fig.2-13の地質図と比較すると、水平電気探査結果からは下記のことが示される。

- 大局的な比抵抗構造は、左岸上部（距離20~40m, EL.70~80m）に200Ω・m以下の低比抵抗帯、その下部（距離50~90m, EL.20~70m）が2,000Ω・m以上を示す高比抵抗帯が存在する。この高比抵抗帯は、ほぼチャートの分布域に相当する。
- 河床部左岸には低比抵抗帯がEL.-20mの深部にまで連続しており、想定しているF-1断層の影響によるものと考えられる。
- 距離180~200m表層部の1,000Ω・m以上の比抵抗帯は、崖錘堆積物の分布に一致している。
- 右岸（距離180~280m, EL.-20~表層）には600~1,000Ω・m程度の比抵抗領域がまとまって存在しているが、これは地質図のCg/Ssに相当する。
- 水平距離250~300mの表層部には400Ω・m以下のやや周囲よりも比抵抗値が小さい領域が分布している。地質図との対応では、この表層部に粘土質のロームが広く分布しており、これが低比抵抗値を示すと考えられる。
- 距離300~310m付近の比抵抗構造は、上部の低比抵抗帯と下部の低比抵抗帯が連続しているように見える。この部分については、別途実施した弾性波探査結果（檜野ら，1999）で確認されている低速度帯と一致している。

以上、本ダムサイトの水平電気探査結果では、おおむね地質構造に対応した比抵抗構造が確認できた。

c 比抵抗トモグラフィ法による調査結果

(1) 2極法と4極法の結果の比較

2極法によって得られた測定データの逆解析結果を Fig.2-16 に、4極法によって得られた測定データの逆解

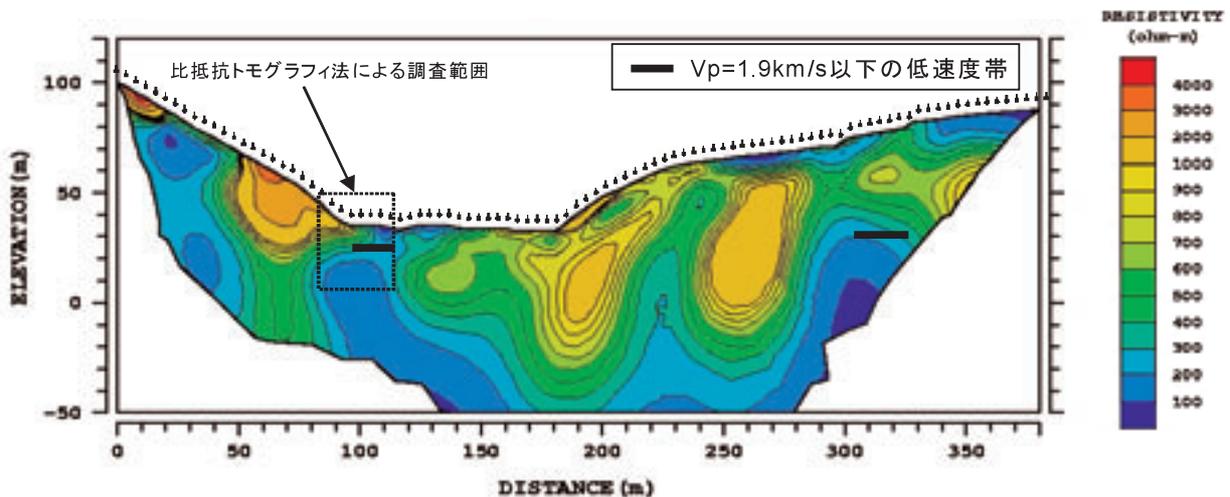


Fig.2-15 御前山ダムサイトの水平電気探査結果

Result of electrical resistivity survey at the damsite of Gozenyama

析結果を Fig.2-17 に示す。逆解析には、比抵抗変化が最もなめらかとなる平滑化制約を設けた最小二乗法を使用している。さらに、大幅なはずれ値の重みを小さくするロバスト推定法により、データの質をチェックしている。

2 極法、4 極法の結果は、EL.20m 以下の低比抵抗値の解析結果が異なるものの、おおむね類似した結果となった。共通した結果として、下記の点があげられる。

- 左岸アバット側で 1,000 Ω・m 以上の高比抵抗値を示す。
- 距離 13~23m, EL. 20~33m 付近に 1,000 Ω・m の高比抵抗帯が独立して存在している。
- EL.20m より深いボーリング孔間は、ほぼ全体が 100 Ω・m 以下となっている。
- 想定地質断面 (Fig.2-14) との対応では、チャートが 1,000 Ω・m 以上の高比抵抗値、F-1 断層付近が 100 Ω・m 以下の低比抵抗値として明瞭に区分される。
- 水平電気探査結果 (Fig.2-15) では得られなかった新鮮砂岩の高比抵抗部 (ボーリング 7B-S の EL.3m 以下) が検出されている。

なお、繰り返し計算 6 回終了後の残差は、2 極法 0.134, 4 極法 1.090 となり、4 極法での残差が 2 極法に比べて大きくなっている。数値実験の結果でも、4 極法は感度が高いため、残差も大きくなる傾向にあった。現地結果では、さらにこの特徴が顕著に見られる。これは、4 極法の測定では、2 極法と比較して測定で得られる電位差が小さく、S/N 比が悪くなる、すなわちノイズが大きくなることが一因と考えられる。

また、2 極法と 4 極法の相違点としては、Fig.2-16 に示す A の部分と B の部分の比抵抗分布があげられる。2 極法によれば、A の部分は 400~500 Ω・m の比抵抗値を示しており、この領域が 7B-S の方向に向かってのびているように見える。一方、4 極法では、この比抵抗構造が認められない。また、B に関しては、2 極法では低比抵抗として現れているのに対し、4 極法では高比抵抗として表現されている。

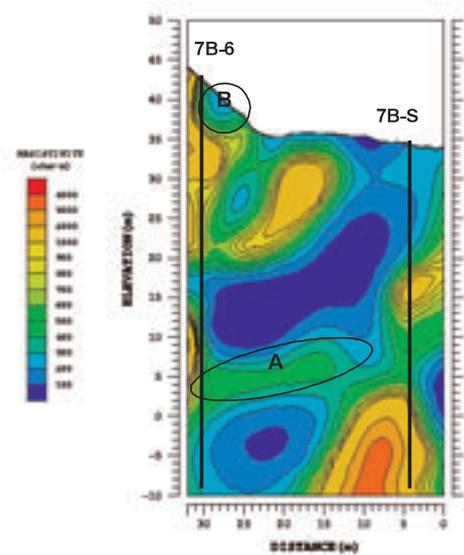


Fig.2-16 2 極法比抵抗トモグラフィ計測結果
Result of resistivity tomography using pole-pole array

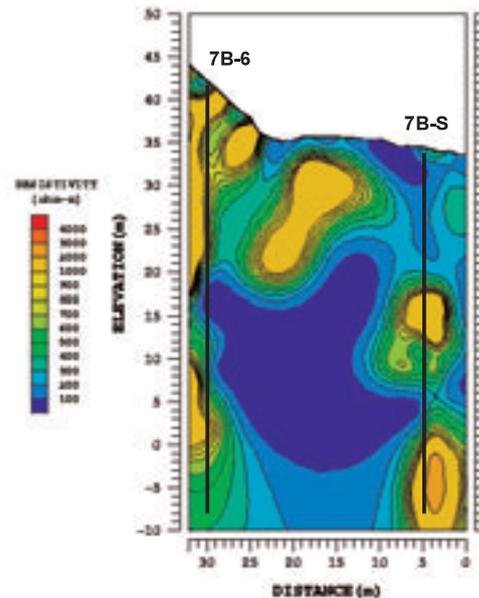


Fig.2-17 4 極法比抵抗トモグラフィ計測結果
Result of resistivity tomography using dipole-dipole array

Table 2-2 7B-6 および 7B-S ボーリングの電気検層結果
Result of electric log at the borehole 7B-6 and 7B-S

	区間深度(EL)	地質名称		岩級区分	電気検層結果 比抵抗 (Ω・m)
		記号	説明		
7 B 6	43.14~ 19.99	Ch	新鮮部	CL	650~1,680
	19.99~ 14.49	Ss	破砕部	CL	150~180
	14.49~ 6.54	Ch	破砕部	CL	430~580
	6.54~ -2.16	Ch	新鮮部	CL (一部 CM)	380~1,080
	-2.16~-10.86	Ss	破砕部	CL~D	200~250
	-10.86~-17.16	Ss	新鮮部	CL~D	250~400
	-17.16~-18.56	Cg/Ss	新鮮部	CL	380~430
-18.56~-26.86	Cg/Ss	新鮮部	CM~CL	430~800	
7 B S	17.23~12.23	Ss	新鮮部	CM	700~1,000
	12.23~ 3.23	Ss	新鮮部	CM	150~500
	3.23~-6.77	Ss	新鮮部	CM (一部 CL)	1,500~3,000
	-6.77~-15.77	Ss	新鮮部	CM	700~1,300

Aに関しては、4極法の解析に際し、S/N比が良好と思われた隔離係数4までのデータのみを採用したため、電極近傍の比抵抗値は計測できたものの、各ボーリング孔および地表面から遠い領域の情報が十分反映できなかったことが原因のひとつである。さらに、4極法においては、7B-6と7B-Sのボーリング孔間に電極を配置した組み合わせでは、得られる電位差が著しく小さくなってしまい、トモグラフィの利点が十分に活用できず、インラインデータ（同一の孔内に電流電極と電位電極が存在する電極の組み合わせ）を中心とした解析になっていることが原因であると考えられる。

さらに、Bに関しては、見かけ比抵抗値でチェックしたところ、この付近の2極法の結果と4極法の結果が全く異なっていた。すなわち、2極法では、距離28.5mで $657\Omega \cdot m$ 、29.5mで $835\Omega \cdot m$ であるのに対し、4極法ではそれぞれ $840\Omega \cdot m$ および $1,392\Omega \cdot m$ （いずれも見かけ比抵抗値）となっていた。これらの比抵抗値が逆解析で反映され、4極法で高い比抵抗値として解析されたと考えられる。

(2) ボーリング結果との対応

この解析結果と現地で行った電気検層結果との比較を行った。7B-6および7B-Sボーリング孔において実施された電気検層（ノルマル法）結果をTable 2-2に示す。

この表から、砂岩の比抵抗値は新鮮部分で $150\sim 3,000\Omega \cdot m$ と分布範囲が広いことが分かる。岩級区分による相違について見ると、CL～D級の新鮮部砂岩は $250\sim 430\Omega \cdot m$ 、CM級は $150\sim 3,000\Omega \cdot m$ （7B-S EL.3.23～6.77mは $1,500\sim 3,000\Omega \cdot m$ と高比抵抗を示す）という比抵抗値を示している。また、破碎部砂岩では $150\sim 250\Omega \cdot m$ と新鮮部と比較すると相対的に低くなっている。チャートについては新鮮部で $380\sim 1,680\Omega \cdot m$ 、破碎部で $430\sim 580\Omega \cdot m$ と、新鮮部の方が相対的に高い傾向にある。

次に、ボーリング結果と2極法および4極法比抵抗トモグラフィ法による比抵抗分布の結果について考察する。ボーリング7B-6の結果では、EL.20mまでがチャート、EL.15mまでは砂岩になっており、それ以降は再びチャートとなっている。EL.-2.16m以深は再び砂岩に変化しているが、深くなるにつれて比抵抗値が上昇する傾向が認められる。Fig.2-16およびFig.2-17の比抵抗分布を見ると、EL.20m付近までは $1,000\Omega \cdot m$ を超える比抵抗値を示している。EL.15m付近にはやや比抵抗値が小さい領域があり、その後また比抵抗値の高い部分が存在する。EL.-1～-2mを境に、再度比抵抗値が小さくなる領域となっている。したがって、地質図と比抵抗分布の結果は、非常によく対応し、高比抵抗部がチャート、低比抵抗部が砂岩に区分できるといえる。

7B-Sのボーリング結果では、EL.17m付近までは河床堆積物であり、それ以深はすべて新鮮な砂岩である。EL.17.23～12.23mおよびEL.3.23～6.77mでは、高比抵

抗を示す砂岩が存在する。比抵抗トモグラフィ法の解析結果をみると、7B-Sにおいては高比抵抗部がEL.17～12m、EL.2m以深の2箇所が存在しており、電気検層結果と比抵抗トモグラフィ法による比抵抗分布が非常によく一致している。

これらのことから、比抵抗トモグラフィ法により明らかになった比抵抗分布は、岩級区分よりもむしろ地質構造を反映しているものと推測される。また、電気検層結果と比抵抗トモグラフィ法による比抵抗分布は非常によく一致していることから、電気検層結果は、比抵抗法の解釈精度を高める上で有効な情報となることが明らかとなった。

d 水平電気探査結果と比抵抗トモグラフィ法の結果の比較および考察

次に、3.bで得られた水平電気探査結果と、3.cで得られた比抵抗トモグラフィ法の結果とを比較し、これらの相違について考察する。下にFig.2-15～17を再掲する。

両者の結果を比較すると、水平電気探査における表層付近の比抵抗値は、比抵抗トモグラフィ法における表層の比抵抗とほぼ一致している。しかし、深部の比抵抗値は比抵抗トモグラフィ法による結果で得られた比抵抗値の方が低い結果となっていることが分かる。さらに、比抵抗トモグラフィ法の計測結果の図中Aに示すように、水平電気探査ではなめらかに高比抵抗領域から低比抵抗領域へと移行している部分において、比抵抗トモグラフィ法では、明瞭に高比抵抗領域間の低比抵抗領域が検出されており、比抵抗トモグラフィ法では、細かい比抵抗コントラストを区別できる能力があることが明らかとなった。

一方、比抵抗トモグラフィ法の計測結果図中Bに示すように、比抵抗トモグラフィ法や電気検層でその存在が確認されている7B-S EL.3.23～6.77m付近の高比抵抗領域を水平電気探査は検知できていない。これは、電気探査は一般に電極近傍の比抵抗値の影響を強く受けることから、深部に電極を設置しない水平電気探査では、調査対象領域が地下深部になるにつれて検出能力が低下することを示している。以上のことから、地下にも電極を埋設する比抵抗トモグラフィ法の有効性を確認することができた。

ただし、今回の調査では、地表面からの4極法（ダイポール・ダイポール電極配置）水平電気探査においては電極を4m間隔、比抵抗トモグラフィ法では1m間隔に設置している。このため、電極間隔の小さい比抵抗トモグラフィ法の解析精度が向上するのは当然の結果であり、両者の結果を単純比較することは難しい。しかし、ダムサイトにおける地下地質構造を詳細に明らかにするためには、グラウチングの際に先行して削孔するパイロットボーリング孔などを有効利用した比抵抗トモグラフィ法が有効であると考えられる。

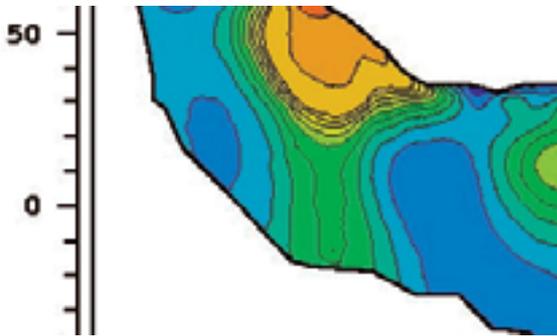


Fig.2-15 比抵抗トモグラフィ法領域の
水平電気探査結果拡大図
Magnifying map of electrical resistivity survey
where resistivity tomography was excused

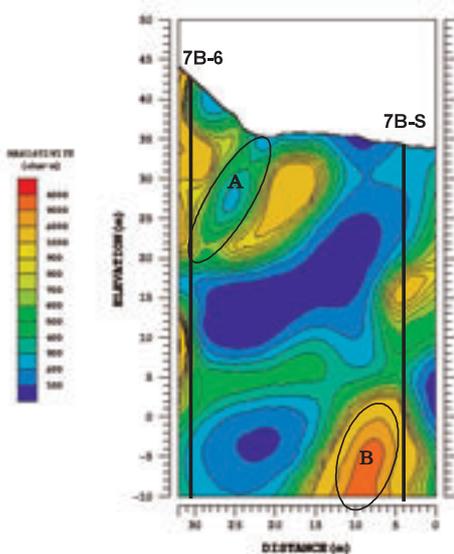


Fig.2-16 2 極法比抵抗トモグラフィ計測結果
Result of resistivity tomography using pole-pole array

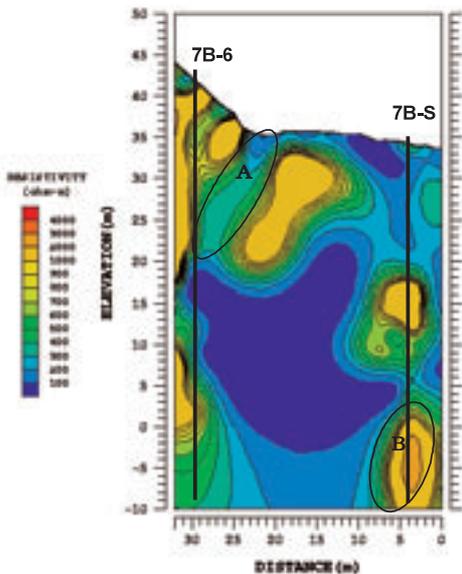


Fig.2-17 4 極法比抵抗トモグラフィ計測結果
Result of resistivity tomography using dipole-dipole array

4 まとめ

本章では、局所的な基礎地盤に関する情報をより詳細にとらえるための物理探査法として、地表およびボーリング孔内に電極を設置して行う比抵抗トモグラフィ法に着目し、比抵抗トモグラフィ法測定時の電極配置について数値実験を行った。さらに、比抵抗トモグラフィ法をダムサイトの断層調査に適用し、水平電気探査結果と比較した。これらの結果、以下のことが明らかとなった。

- (a) $100 \Omega \cdot m$ の均一土層中に $10 \Omega \cdot m$ の低比抵抗異常が存在する2種類の数値モデル [I], [II] について、Dey & Morrison の 2 次元差分法モデリングにより、2 極法、3 極法、4 極法の電極配置により得られる見かけ比抵抗値を算出した結果、4 極法が低比抵抗異常に関する感度が高いことが示された。
- (b) 数値モデル [I] について、2 極法、3 極法、4 極法の電極配置により得られる見かけ比抵抗値にランダムノイズを乗じた値を計測値と見なし、逆解析によって元の比抵抗構造を再現できるかを検討した。その結果、2 極法と 4 極法では、あらかじめ $100 \Omega \cdot m$ を設置した位置に比抵抗異常の位置を再構成することができた。
- (c) 数値モデル [II] についても同様の数値実験を行った結果、仮定した低比抵抗帯の傾きがより垂直に表現された形となり、しかも下部ほど低比抵抗帯が広がる傾向があることが明らかとなった。2 極法、4 極法では、仮定した低比抵抗帯の下側には、あらかじめ設定した $100 \Omega \cdot m$ よりも高い比抵抗値が偽像として出現した。
- (d) 逆解析による数値実験の再構成精度を定量的に評価するため、比抵抗回復度 BE を導入した。その結果、低比抵抗異常をとらえるには、4 極法の採用が望ましいことが示された。その反面、4 極法の逆解析においては、RMS 残差が大きくなるため、あらかじめおよそその比抵抗構造を推測し、それを初期モデルとすることが有効であることを示した。
- (f) 全周に電極を配置した数値実験では、あらかじめ設定した低比抵抗部の異常箇所は非常によく再構成できた。したがって、調査対象領域を取り囲めるように全周電極を配置できる測定条件であれば、2 極法でも比抵抗回復度 BE の向上が期待でき、多量のデータを自動計測で取得できるという 2 極法のメリットが活用できる。
- (g) 御前山ダム基礎地盤を対象として水平電気探査、比抵抗トモグラフィ法を適用し、基礎地盤の地質構造調査を行った。両探査法で電極間隔が異なることから、単純比較することは難しいが、比抵抗トモグラフィ法では、より詳細な地質構造や地下深部の比抵抗構造を明らかにすることができた。また、地質調査ボーリングから存在が確認されていた F-1 断層を、低比抵抗異常として認識することができた。

Ⅲ 地中レーダ法によるRCDコンクリートの 施工管理技術の開発（施工段階）

1 概説

近年、公共事業におけるコスト縮減が重要な課題となっている。農業用コンクリートダムの施工においても低コスト化を目指した工法のひとつである RCD 工法の施工事例が見られる。RCD 工法とは、貧配合超固練りのコンクリートをブルドーザーで薄層敷き均しした後に振動ローラで締固め、面状にコンクリートを打設していく工法である。しかし、RCD 工法に用いるコンクリートは流動性が非常に小さいため、施工条件によってはコンクリートの未充填部が生じる可能性があり、施工管理が重要視される。コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編] (土木学会, 2002) によれば、RCD 用コンクリートの締固め管理法として、「必要な締固め密度が得られるように締固め管理を行わなければならない」と規定されているものの、具体的な検査法は示されていない。現地施工においては、振動ローラの転圧回数による方法、RI 密度計による方法、締固め時の沈下量測定による方法、コア採取によるチェックなどが行われている。転圧回数による管理方法および締固め時の沈下量測定による管理方法では、事前に試験施工を行い、転圧回数あるいは沈下量と密度との相関を調べておく必要がある。しかし、コンクリートや骨材の品質が日々変化するような場合では、転圧回数や沈下量と密度との相関を補正しながら品質を管理しなければならない。

一方、コア採取によるチェック法や RI 密度計による方法では、「密度」という物性値が確認でき、非常に有効である。しかし、コア採取によるチェック方法ではコンクリートの硬化後でなければコアの採取が不可能であるため、結果を得るまでに時間を要する、あるいはコアリングの経費がかかるなどの問題点がある。また、多点で RI による密度の計測やコア採取を行っても、得られる情報は、部分的な「点」の情報であり、連続した面としての確認はできていない。

そこで、地中浅部の情報を詳細に把握することができ物理探査法のひとつである地中レーダ法に着目した。地中レーダ法では、直接コンクリートの密度は計測できないものの、施工後直ちに迅速かつ連続的にコンクリートの面的な異常箇所を検出することが可能である。また、硬化を待たずにコンクリートの未充填部を検出できる可能性があるため、確認後未充填箇所があった場合にはすぐ再転圧などの対策作業が可能となり、施工管理の確実性が飛躍的に向上すると期待できる。

本章では、まず RCD コンクリートへの地中レーダ法の適用に際し、疑似ポーラスコンクリート供試体を用いた地中レーダのポーラス部分検出能力についての基礎実験を行う。また、現地で実際使用する RCD コンクリー

トを用いて転圧回数の異なる RCD コンクリート供試体を作成し、転圧回数による反射強度の相違や RCD コンクリートの比誘電率の変化、電磁波の透過深度を確認し、施工管理に適した地中レーダの使用周波数を選定するための実験を行う。さらには、実際の RCD コンクリートのダム施工現場において、撒き出し・転圧の施工管理技術として地中レーダを適用し、その性能を把握する。そして、最終的には RCD 工法を採用するダムの施工管理手法への適用・実用化を図ることを研究目的としている。

2 疑似ポーラスコンクリートによる基礎実験

a 実験の目的

地中レーダ法は、これまで「地質あるいは地盤」を対象とした測定機の開発、研究が行われてきた。そのため、電磁波を送受信する装置である「アンテナ」は、調査深度を大きくするために比較的 low 周波数（数十～数百 MHz 程度）のものが頻りに利用されてきた。しかし、近年、コンクリートの鉄筋位置の確認や、トンネル裏込め背後の空洞検査などに地中レーダが適用されるようになりつつあり、アンテナの周波数も 1GHz を超える高周波のものも開発されている。そこで、まず、地中レーダ法が RCD コンクリートを対象とした非破壊調査法として適用できるのか、RCD コンクリートの施工管理に適した電磁波周波数はどの程度か、また RCD コンクリートの施工管理への応用に際し、完全に空洞でないコンクリートの未充填部分（いわゆる「ジャンカ」）が検出できるのかを確認することにした。通常のコンクリートと、極端な施工不良箇所を再現した疑似ポーラス供試体の 2 種類を作製し、地中レーダ法の施工管理手法としての適用可能性を検討するため、小規模なモデル実験を実施した。

b 実験方法

(1) 実験コンクリート平面・縦断面図

長さ 6m、幅 1.5m、高さ 0.5m の型枠を作成して中央で二等分し、一方に通常のリッチなコンクリート（以後レーン 1 側という）、もう一方に疑似ポーラスコンクリート（以後レーン 2 側という）を打設した。実験に使用したコンクリートモデルの平面図および縦断面図を Fig.3-1 に示す。疑似ポーラスコンクリートは高さ 45cm まで 80～150mm の石英斑岩粗骨材①を 2,884 kg 投入し、その上に 20～40mm 石英斑岩粗骨材②を 360kg 敷き、さらにその上をモルタルで整形した。両者の供試体を同時に設置できなかったため、まずレーン 1 側コンクリートを打設し、その 3 日後にレーン 2 側を打設した。

(2) 使用したコンクリートおよび骨材の物性値

使用した石英斑岩の物理的性質を Table 3-1 に示す。また、レーン 1 側のコンクリート、レーン 2 側のモルタルの物性は次の Table 3-2 に示すとおりである。地中レーダの探査においては、調査対象とする基礎地盤やコン

クリート内の電磁波速度が分からなければ、埋設物や異常物などの反射異常点の深さは特定できない。そのため、地中レーダ法により得られる反射画像の深度軸は、通常電磁波を放射してからその反射波が戻ってくるまでの時間で表すことが多い。今回の実験においては、作成したレーン 1、レーン 2 供試体中の電磁波伝播速度を求めることを目的として、Fig.3-1 に示すように供試体左右端から 50cm、深さ 50cm のところに目標となる直径 50mm の鉄管をそれぞれ 1 本ずつ埋設した。中は空洞である。この鉄管をレーダでとらえることができれば、鉄管からの反射面までの往復反射走時と埋設深度から、コンクリート媒質中の電磁波伝播速度が計算により求めることができる。逆にこの結果を利用することでレーン 1 側とレーン 2 側の比誘電率、電磁波伝播速度などの相違を明確にできる可能性がある。

完成した供試体を Photo 3-1 に示す。

(3) レーン 2 の間隙比の算出

投入した骨材量から疑似ポーラスコンクリートの間隙比 e を次のように算出した。

投入した粗骨材の総重量 (①) = 3,243.9 (kg)
 型枠の体積 (②) = $3 \times 1.5 \times 0.46 = 2.07$ (m³)
 骨材の表乾比重 (③) = 2.56
 骨材がしめる体積 (④) = $\frac{①}{③} = 3\,243.9$ (kg) / (2.56 × 1) (g/cm³) = 1.267 (m³)

Table 3-1 石英斑岩の性質

Property of quartz porphyry		
	粗骨材① 80~150mm	粗骨材② 20~40mm
表乾比重	2.56	2.55
吸水率	0.900	2.550
単位容積重量	1.52	1.48
実績率	59.9	59.0

Table 3-2 打設コンクリート、モルタルの物性

Property of concrete and mortar			
	使用材料	レーン 1	レーン 2
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16	比重 3.16
細骨材	混合砂	比重 2.59	—
	木更津産山砂	—	比重 2.16
粗骨材	混合砕石 Gmax=40mm	比重 2.70	—
混和剤	ポゾリス No.70	比重 1.06	—

配合

	W/C %	s/a %	kg/m ³				
			W	C	S	G	混和剤
レーン 1	65.5	43.6	151	231	826	1112	2.45
レーン 2	75	—	255	340	1540	—	—

試験結果

	スランプ cm	空気量 %	温度 ℃
レーン 1	10	5.6	22.0
レーン 2	19	3.5	22.5

間隙体積 / 総体積 (⑤) = $\frac{② - ④}{②} = \frac{0.803}{2.07}$ (m³) = 0.388

したがって、間隙比は 0.388 と算出された。

(4) 使用した地中レーダ装置の概要

使用した地中レーダ装置は、GSSI 社の SIR-10A シリーズ (Photo 3-2) である。地中レーダの仕様を Table 3-3 に示す。また、中心周波数 300MHz および 500MHz のアンテナを Photo 3-3 に示す。

c 実験結果

測定はレーン 1 側を打設してから 6 日後 (使用中心周波数; 300MHz)、51 日後 (使用中心周波数; 300MHz)、104 日後 (使用中心周波数 500MHz, 1GHz) に行った。

(1) 中心周波数 300MHz による測定結果

使用中心周波数 300MHz のアンテナによって測定した打設 6 日後の結果を Fig.3-2 に示す。図では戻ってきた電磁波の反射振幅が強いほど白色系、弱いほど黒色系で表示している。レーン 1 側とレーン 2 側との反射画像は大きく異なるという結果を得た。レーン 1 側では往復反射走時約 3ns で電磁波が減衰してしまっているのに対し、レーン 2 側では反射画像が乱れており、図で示された往復反射走時 10ns 以上の反射をもとらえている。また、レーン 1 側では鉄管が検出できないものの、レーン 2 側では往復反射走時約 4.5ns の位置に鉄管の明瞭な山型の反射 (図中矢印部分) がとらえられた。これは、Fig.3-1

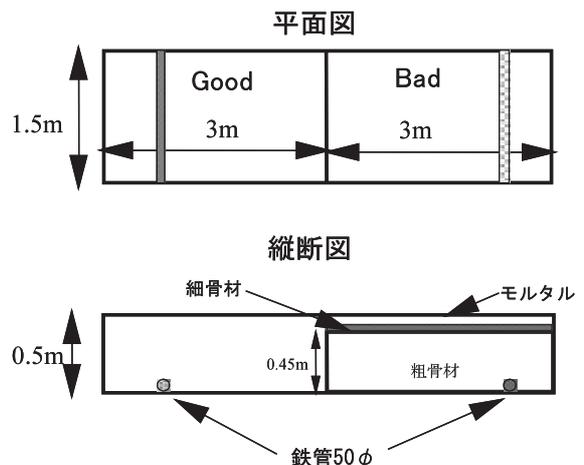


Fig.3-1 モデル実験コンクリートの平面図および縦断面図
 Plan and cross section of model concrete



Photo 3-1 粗骨材 (左) と完成後の実験用コンクリート供試体 (右)
 Left: Coarse aggregates Right: Concrete for ground penetrating radar survey

の縦断面に示したように、レーン1側では鉄管までのコンクリート厚が50cmあるため、アンテナから送信された電磁波がコンクリート表層で反射されてしまうこと、また、打設間もない時期であったことからコンクリート中に水分が多く含まれているため、電磁波が鉄筋に到達する前に減衰してしまうことが原因であると考えられた。一方、レーン2では、モルタルが表層のわずか5cmであったことから、容易に内部に電磁波が透過し、さらに内部が空隙の多い粗骨材であったことから、電磁波が

減衰せず、鉄筋にまで到達したため、レーン2で鉄筋からの反射がとらえられたものと推測される。

この結果を用いてレーン2側の比誘電率および電磁波伝播速度を計算した。比誘電率 ϵ_r を有する媒質中の電磁波伝播速度 V (m/s) は、光速を c (m/s)、反射対象物までの深度を D (m)、往復反射走時を t (sec) とすると、次式で表される。

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{2D}{t} \quad (3.1)$$

鉄管の頂点の位置はモルタル表面から45cmの位置であり、この位置が4.5nsで表示されていることから、式(3.1)を用いると、次のような関係式が求められる。

$$\frac{2 \times 0.45}{4.5 \times 10^{-9}} = \frac{3.0 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots (3.2)$$

式(3.2)から比誘電率、式(3.1)からレーン2中の電磁波伝播速度を逆算すると、比誘電率は2.25、電磁波伝播速度は 2×10^8 m/s となった。なお、Table 3-4 に主な媒質の比誘電率と比抵抗値について示す(五十嵐, 1988)。間隙が0.388と大きく、空気が多いため、1に近い値となったものと推測できる。

(2) 中心周波数 500MHz による測定結果

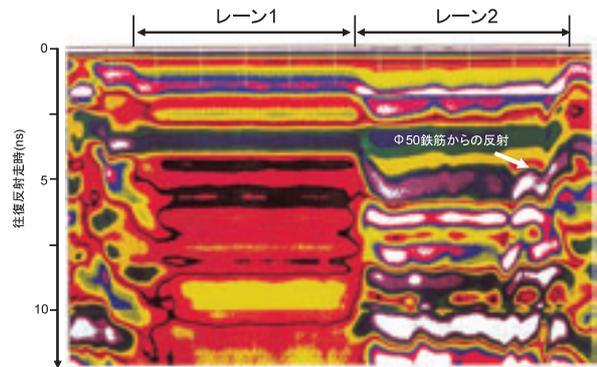


Fig.3-2 中心周波数 300MHz による測定結果

GPR image using 300MHz antenna



Photo 3-2 地中レーダシステム 本体
Main controller of GPR system



Photo 3-3 地中レーダシステムのアンテナ
(上：中心周波数 300MHz, 下：中心周波数 500MHz)
Antenna of ground penetrating radar(GPR) system
(Upper: 300MHz frequency, Lower: 500MHz frequency)

Table 3-3 地中レーダ装置の仕様

Specifications of GPR system

使用 CPU	486SLC 25MHz
メモリー	16MB RAM + FLASH EPROM
測定レンジ	5~10,000nsec
A/D 分解能	8 or 16 ビット
スキャンレート	128 スキャン/sec 以下
A/D サンプリング	128~1,024 サンプル/scan
表示部	VGA カラー-CRT
データ収録	2.3GB/8mm 112m テープ
インターフェイス	RS-232C 16 ビットパラレル
接続可能アンテナ数	4ch
電源	DC 12V 200W

Table 3-4 主な物質の電気的特性

Electrical property

物質	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	比誘電率 (ϵ_r)
空気	—	1
アスファルト	~1000	2.5~3.5
コンクリート	~100	3~9
土	礫質土 100~1000	9~14
土	砂質土 50~400	11~18
土	シルト土 20~200	14~36
土	粘土 1~30	25~56
岩	砂岩 200~1000	9~14
岩	石灰岩 2000~10000	6~11
氷	—	3.2
水	—	81
海水	5×10^{-2}	81

中心周波数 500MHz のアンテナを用いて測定した打設 106 日後の結果を Fig.3-3 に示す。使用したアンテナの仕様上、測定する平面とアンテナが接触した状態でアンテナを牽引するため、表面の凹凸やアンテナの浮き沈みなどに起因する凹凸が画像に表れた。このため、反射走時断面の解釈が難しくなった。

Fig.3-3 を見ると、レーン 1 側、レーン 2 側での反射画像が大きく異なっている。さらに、レーン 2 側に約 4~5ns の往復反射走時を頂点とした双曲線型の反射波形が読みとれ、深さ 50cm の鉄管が確認できた。なお、この双曲線型の反射波形は中心周波数 300MHz の結果でも確認されている。一方、レーン 1 側ではレーン 2 で見られる乱れた反射画像が見られず、鉄管の位置も特定できなかった。打設後 106 日を経過していることから、打設直後と比較すると内部の水分は減少していると考えられる。しかし、この結果でも鉄管を区別することができなかったことから、コンクリート表層での反射が大きく、電磁波が鉄管まで到達していないために、鉄管を判別できなかったと考えられる。

(3) 中心周波数 1GHz による測定結果

Fig.3-4 に中心周波数 1GHz アンテナでの測定結果を示す。中心周波数 1GHz のアンテナの場合、電磁波の波長が短く、分解能が向上したため、粗骨材表面と粗骨材の空隙との境界での反射と思われる反射画像がいたる所に現れており、鉄管からの反射がこれらに隠れてしまっている。しかし、他の中心周波数では区別できなかったレーン 2 の粗骨材とモルタルとの境界部分が明瞭な反射として捕らえられ、非常に高い分解能を示していることが認められる。したがって、ごく表層の詳細構造を非破壊で可視化する必要がある場合、例えば、コンクリート構造物中の配筋状態を確認する場合において、高周波アンテナは非常に有効である。

d 総括

地中レーダを用いて、コンクリート供試体におけるポーラス箇所検出のための基礎的な実験を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- ①使用した中心周波数帯の種類を問わず、通常のリッチなコンクリートと疑似ポーラスコンクリートでは、レーダの反射画像が大きく異なる。
- ②レーン 2 の疑似ポーラスコンクリート側では、電磁波到達深度を明らかにするために設置した鉄管が中心周波数 300MHz、500MHz のアンテナにより検出できた。この結果を用いて疑似ポーラスコンクリートの平均的な比誘電率を計算したところ、比誘電率 2.25、電磁波伝播速度 2×10^8 (m/s) となった。この値は、一般的なコンクリートの比誘電率 3~9 よりは小さく、アスファルトの比誘電率とはほぼ同程度であった。これは、内部に多くの空気層があったため、電磁波伝播速度がコンクリート中よりも速くなったためである。
- ③レーン 1 のリッチなコンクリート側では、どの周波数

でも鉄管は検出できなかった。この理由については、電磁波が表面で反射し、深部に電磁波が到達していない可能性が高いことが分かった。したがって、リッチなコンクリートの場合、表層から 45cm 以上の深い位置にある鉄管の検出は難しいことが示された。

また、疑似ポーラスコンクリート供試体を用いた基礎実験の課題は次の事項である。

- ①今回の実験では RCD コンクリートとは異なる「疑似ポーラスコンクリート」を用いている。実際の RCD コンクリートでの適用性はどうか。
- ②実際の RCD コンクリートの場合は深度の目安となる鉄管などが埋設されないため、異常箇所を発見できたとしても、その深度の特定が難しい。深度の情報を明らかにするためには、RCD コンクリートの比誘電率に関する情報の蓄積が必要である。
- ③どの程度の幅の亀裂や空洞が検出できるかという限界を明らかにする必要がある。

このうち、①および②の課題を解決するため、東北農政局会津農業水利事務所の協力を得て、実際の RCD コンクリートで試験を行った。次項では、これらの結果を述べる。

3 RCD コンクリートを用いた基礎実験

a 実験の目的

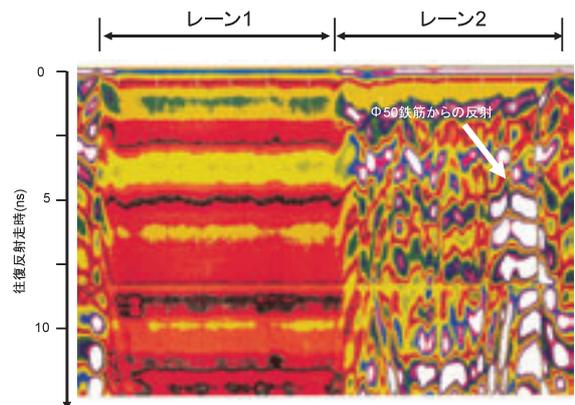


Fig.3-3 500MHz アンテナによる測定結果

GPR image using 500MHz antenna

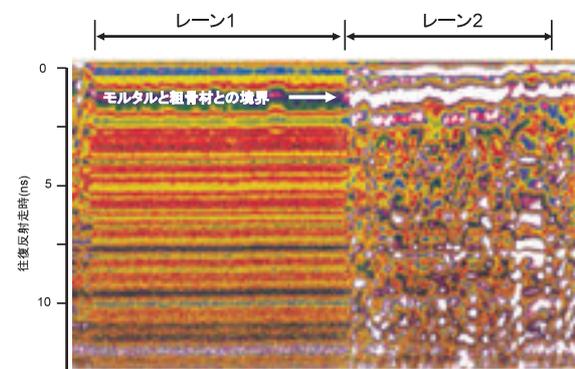


Fig.3-4 1GHz アンテナによる測定結果

GPR image using 1GHz antenna

基礎的なモデル実験によって、通常コンクリートと疑似ポーラスコンクリートとは反射画像が大きく異なるという結果を得た。この結果を受けて、実際の RCD コンクリートの反射画像はどのように見えるのかを調査し、RCD コンクリート中の電磁波伝播速度、比誘電率の値を得ることを目的として、東北農政局会津農業水利事務所管内の新宮川ダム建設現場内に設置した RCD コンクリートモデルを使った現地実験を行った。

b 実験方法

作製した RCD コンクリートモデルを Fig.3-5 に示す。転圧用振動ローラの進入路を除いた全長は 14m、幅約 2.5m のモデルである。転圧回数を 4 回としたレーン、12 回としたレーンの 2 レーンを設け、各レーン内には、電磁波の到達を確認するための塩ビ管 (VP φ 150mm) を設置した。計測の状況を Photo 3-4 に示す。また、RCD コンクリートの示方配合は Table 3-5 のとおりである。

まず、先の実験で疑似ポーラスコンクリート中の鉄管を検出できた中心周波数 300MHz と中心周波数 500MHz のアンテナを用いて 12 回転圧レーン、4 回転圧レーンを調査し、転圧回数による差が生じているか、埋設した VP φ 150mm 塩ビ管まで電磁波が透過、反射しているかを確認した。さらに、得られる VP φ 150mm 塩ビ管からの反射走時から RCD コンクリート中の平均的な比誘電率や電磁波伝播速度を計測し、それが打設後の経過時間とともにどのように変化していくのかを観察した。

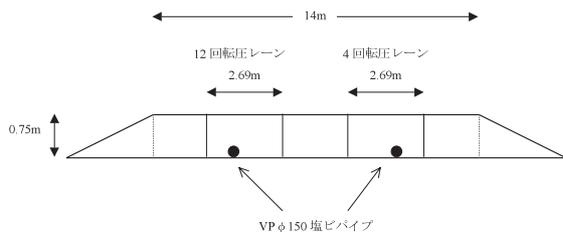


Fig.3-5 RCD コンクリートモデル

Roll compacted dam-concrete(RCD) test model

c 実験結果

(1) SIR-10A による測定結果 (供試体作成直後)

測定は中心周波数 300MHz、500MHz の 2 種類のアンテナで行った。調査は供試体作成 4 日後に実施した。Fig.3-6 は中心周波数 300MHz、Fig.3-7 は中心周波数 500MHz のアンテナを使ったときの反射画像である。なお、塩ビ管には、比誘電率が 81 と非常に高い水を満たした。塩ビ管に到達した電磁波は、管の直上で一部が反射し、一部が管内の水に透過する。しかし、水中の電磁波伝播速度は、式 (3.1) に示すように空気中の 1/9 と遅くなるため、水中を伝播して管の底部で反射した電磁波の到達までの時間は、管の直上からの反射と比較すると遅くなる。このため、Fig.3-6 および Fig.3-7 の解釈においては、管の直上から反射して到達した電磁波の反射画像 (図中矢印先端部の双曲状の波形) が管までの深さに対応するものとした。中心周波数 300MHz、500MHz の両方の周波数により、塩ビ管の位置が特定できた。しかし、中心周波数 500MHz の測定結果では、300MHz に比



Photo 3-4 RCD コンクリートモデル測定状況

Measurement situation of RCD model

Table 3-5 RCD コンクリートの示方配合

Specified mix of RCD

Gmax (mm)	スランブ (cm)	VC 値 (秒)	空気量 (%)	W/(C+F) (%)	細骨材率 (%)
80	0	20±10	1.5±1	73.1	32
単位量 (kg/m ³)					
水 (W)	セメント (C)	フライアッシュ (F)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤
95	91	39	709	1512	0.325

Table 3-6 電磁波伝播速度および比誘電率計算結果

Velocity of electromagnetic radiation and dielectric constant

	パイプまでの深さ 測量による実測 (m)	反射走時 (ns=10 ⁻⁹ scc)	電磁波速度 (10 ⁸ m/s)	比誘電率
4 回転圧レーン	0.528	12.3	0.859	12.2
12 回転圧レーン	0.493	12.1	0.815	13.6

べて周波数が高いため、中心周波数 300MHz の結果よりも明瞭な双曲線状の反射画像が確認できた。双曲線状の反射画像の直上までの反射走時は、約 12ns であることが確認できた。この結果を利用し、RCD コンクリート中の電磁波伝播速度 V (m/s) と比誘電率 ϵ_r とを式 (3.1) の計算によって求めた。

供試体作成直後の中心周波数 300MHz, 500MHz での測定結果をまとめると、次の Table 3-6 のとおりである。比誘電率は両者とも標準的なコンクリートの比誘電率といわれる 3~9 (Table 3-4) の値を上回っており、打設直後の含水状態の高さを示しているものと推測できる。一方、転圧回数が 12 回のレーンと 4 回のレーンとの相違は認められなかった。

(2) SIR-10A による測定結果 (供試体作成から 1 年 7 ヶ月経過後)

中心周波数 300MHz アンテナによる調査結果を Fig.3-8 に、中心周波数 500MHz による調査結果を Fig.3-9 に示す。縦軸は往復反射走時 (ns = 10⁻⁹sec) である。

図に示すように、電磁波の透過深度を確認する目的で埋設した塩ビ管は、中心周波数 300MHz, 500MHz のアンテナを用いて調査を行った結果、両方とも明瞭に現れた。しかし、パイプの直上を示すと考えられる反射画像は反射強度が弱く、その下の多重反射部分が逆に反射強度が強く現れた。これらの傾向はほぼ打設直後も同様な現象を示していた。

パイプの直上を示す反射面までの反射走時を測定したところ、12 回転圧レーンでは約 7.53ns, 4 回転圧レーンでは 9.63ns であった。先と同様に、RCD コンクリートの比誘電率を求めた結果を Table 3-7 に示す。

RCD コンクリート供試体打設約 1 年 7 ヶ月後では、

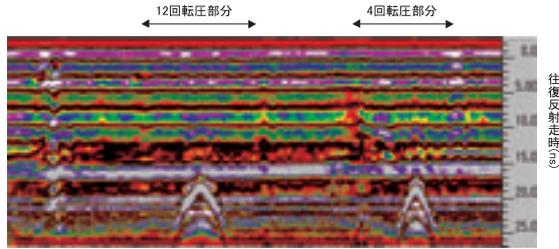


Fig.3-6 300MHz アンテナによる調査結果
GPR image using 300MHz antenna

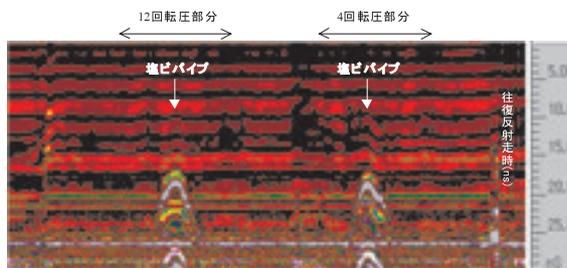


Fig.3-7 500MHz アンテナによる調査結果
GPR image using 500MHz antenna

RCD コンクリートの比誘電率は、12 回転圧レーンにおいて 5.25, 4 回転圧レーンにおいて 7.48 と算出された。通常、コンクリートの比誘電率は、3~9 程度といわれているが、本実験結果において確認した RCD コンクリートの比誘電率は、この範囲内に入っており、通常のコンクリートのレベルの比誘電率を維持していた。転圧回数 4 回と 12 回では、比誘電率にわずかな相違が出たが、レーダ反射画像結果としてその相違を示すことはできなかった。なお、同じ配合により作成した RCD コンクリート供試体の一軸圧縮強度に転圧回数による相違が見られなかった。

(3) RCD コンクリートの比誘電率の経日変化

第 III 章 3.b では、打設直後と、打設 1 年 7 ヶ月後の結果のみを示しているが、同様の調査を打設 1 年後、2 年後と継続して実施し、経日的に 12 回転圧レーンおよび 4 回転圧レーンの比誘電率を求めた。これらの調査結果から得られた比誘電率の経日変化結果を Fig.3-10 に示す。ばらつきはあるものの、比誘電率は、供試体作成直後から徐々に低下していることが明らかとなった。また、打設 1 年 7 ヶ月後の 4 回転圧レーンの比誘電率を除けば、ほぼ経日的に比誘電率が減少していることが明らかとなった。

これらの要因としては、コンクリートと間隙水との反応が徐々に進み、RCD コンクリートの体積含水率が小さくなったためであると考えられる。水の比誘電率は 81 で、他の媒質の比誘電率と比較すると極端に大きい。今回、経時的に直接コンクリートの含水量を測定していないため、あくまで推測ではあるが、RCD コンクリート内部の含水状態と比誘電率との相関は高いと推測される。確認のため、簡易水分測定計を用いて Fig.3-5 に示

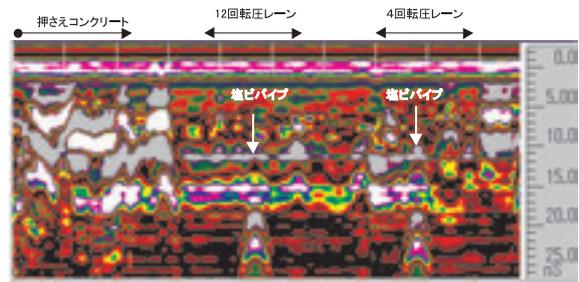


Fig.3-8 300MHz アンテナによる調査結果
GPR image using 300MHz antenna

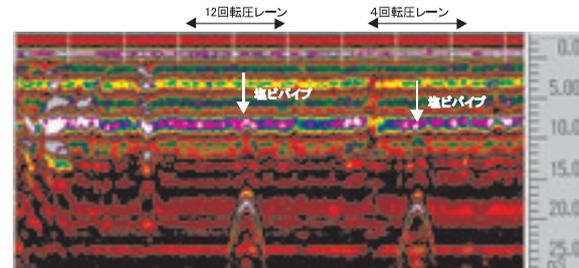


Fig.3-9 500MHz アンテナによる調査結果
GPR image using 500MHz antenna

した RCD コンクリートモデル表層部の水分量を打設 7ヶ月後に測定した。その結果、水分率は 12 回転圧部分で約 3.1%，4 回転圧部分で約 2.9%であり、通常のコンクリートと大差なかった。

d 地中レーダによる RCD コンクリートの非破壊診断への適用可能性

(1) 反射異常の検出結果

本研究の目的は、地下レーダによって、RCD コンクリート打設時にまれに生じる蜂の巣状のポーラス部分を特定することである。これまで実施してきたテストフィールドの実験は、事前に RCD コンクリートの比誘電率などの電磁氣的性質や、電磁波がどのくらいの深さまで透過するのかを明確にすることを目的としたものであった。この際、転圧回数を 4 回と 12 回のレーンを設置し、その反射画像がどのように異なるか、また反射画像の見え方は異なるのかを調査した。しかし、顕著な差異は認められなかった。

ところが、数回行った調査データにおいて、特定部分に乱れた反射画像が常に現れていることが判明した。一例を Fig.3-11 に示す。

そこで、反射画像が乱れた部分において、コア採取を行った。photo 3-5 下側が異常反射画像を呈するコアの写真である。写真上側に示された健全なコアは、異常反射が検出された地点から 1.2m 塩ビ管寄りの地点でサンプリングしたものである。異常な反射画像が認められた地点のコアは、表層から 15cm 程度までは密実であったが、15cm~22cm にかけての約 7cm の区間に、蜂の巣状のポーラス箇所が検出された。

(2) 反射異常箇所の間隙比

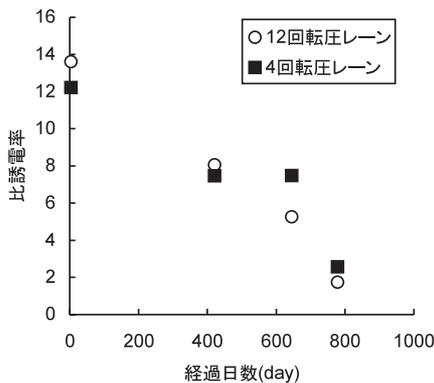


Fig.3-10 比誘電率の経時変化
Dielectric constant change

Fig.3-11 のような反射異常が現れた原因は、ポーラス部分での比誘電率が、周囲の RCD コンクリートの比誘電率と比較して大きく異なっているためであると考えられた。予備的に実施した疑似ポーラスコンクリートの調査結果においても、間隙比 0.388 で明らかに密実部のコンクリートとは全く異なる反射画像を呈していた。そこで、今回検出できたポーラス部分について間隙比を計算し、前回の予備実験との比較検討を行った。

まず、RCD コンクリート間隙比を計算するために、次に示す項目について実測した。粗骨材の物性（比重など）は既存資料を参考にして計算した。結果を Table 3-8 に示す。

以上の計算式から、間隙比は 0.342 と試算された。通常コンクリートと疑似ポーラスコンクリートとの反射面の相違を検出した実験において、明瞭な反射面の異常を呈した疑似ポーラス部分の間隙比は 0.388 であった。したがって、間隙比が 0.34 程度であれば、地中レーダにより、300MHz あるいは 500MHz の周波数のアンテナを適用することによって、ポーラス部分の検出は十分に可能であることが判明した。

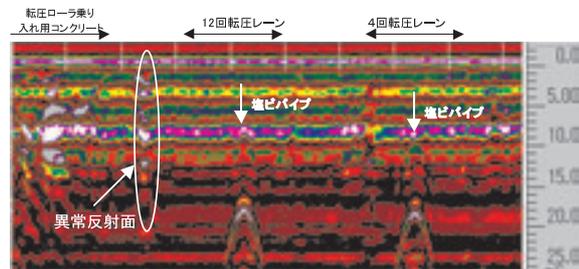


Fig.3-11 反射異常（使用中心周波数 500MHz）
Reflection abnormality using 500MHz antenna



Photo 3-5 反射異常箇所（下）と健全部（上）のコア
Lower: Concrete core at the reflection abnormality
Upper: Concrete core at the non-abnormality

Table 3-7 電磁波伝播速度と比誘電率

Velocity of electromagnetic radiation and dielectric constant				
	パイプまでの深さ 測量による実測 (m)	反射走時 (ns=10 ⁻⁹ sec)	電磁波速度 (10 ⁸ m/s)	比誘電率
4 回転圧レーン	0.528	9.63	1.10	7.48
12 回転圧レーン	0.493	7.53	1.31	5.25

Table 3-8 反射異常箇所 RCD コアポーラス部間隙比計算
Voids ration of RCD core at the reflection abnormality

項目	数値	備考
① コア抜き後の孔内体積	4,130cm ³	孔内に薄いビニールを敷設し、水を注入して測定
② RCD コンクリートコアの体積	2,445cm ³	バケツに水を満たしてコアを入れ、あふれた水の体積を RCD コアの体積とした
③ 粗骨材の重量	2,827g	実測
④ 粗骨材の比重	2.55	既存データ
⑤ 骨材のみの体積	1,108.6cm ³	③/④=2,827/2.55=1,108.6 cm ³
⑥ 間隙の体積	576.4cm ³	①-②-⑤=576.4 cm ³
⑦ 間隙比	0.342	⑥/ (①-②) =576.4/1,685=0.342

4 RCD工法コンクリートダム施工管理への適用

a 調査地の概要

前節に示す考察より、RCD コンクリート中に間隙比 0.34程度のポーラス部分が存在すれば、完全に空隙でなくても地中レーダにより検出できる見通しが得られた。そこで、実際に RCD コンクリート工法によりダムを施工している現地において、RCD コンクリート打設直後の施工管理への適用を試みた。

調査は、東北農政局会津農業水利事務所管内で建設中の新宮川ダムにおいて実施した。本ダムは、福島県大沼群会津高田町に建設中の重力式コンクリートダムであり、その規模は堤高 69m、堤頂長 325m、堤体積 480 千 m³、総貯水量 10,320 千 m³である。基礎地盤の地質は花崗閃緑岩、石英斑岩、宮川流紋岩からなる。1990 年に工事着工し、2001 年に盛立が完了した。2003 年からは試験湛水が行われ、2004 年には工事完了予定である。Fig.3-12 に新宮川ダム標準断面図および正面図を示す。

b 調査方法

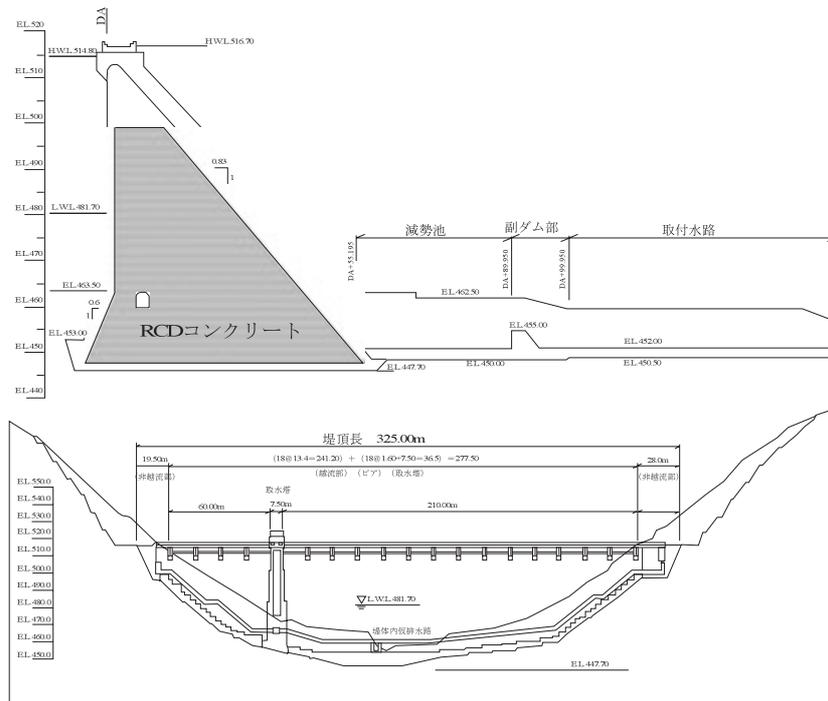


Fig.3-12 新宮川ダム標準断面図および正面図
Cross and Front section of Shinmiyagawa dam

調査は新宮川ダム 48 リフト目 (EL.483.00m)、BL12 ヤードにおいて実施した。調査した RCD コンクリートヤードの概要を Fig.3-13 に示す。BL12 ヤードは、上下流幅 21.8m、ダム軸幅 15m であり、ダム軸方向に撒き出し幅約 7m の 3 列にて施工している。また、RCD コンクリートの施工に先立ち上流側および下流側には有スランプコンクリート (幅 3m) を打設している。

地中レーダによる測定に際しては、調査測線を上下流方向およびダム軸方向に設定した。Fig.3-13 に示す点線矢印が調査測線である。調査は BL12 打設から 4 日後に実施した。測定には、これまでの試験においてポーラス部の異常反射を明瞭に検出した GSSI 社の SIR-10A シリーズ (周波数 500MHz のアンテナ) を用いた。

c 調査結果

測線 A-A' の測定結果を Fig.3-14 に示す。RCD コンクリート打設直後の測定においても、上流側から 10m 付近に反射画像の乱れを生じる箇所が検出された。続いて、測線 A-A' において反射画像の乱れを検出した箇所を通るダム軸方向 (測線 B-B') に測定を行った結果を Fig.3-

15に示す。この測定の結果においても反射画像の乱れを生じる箇所を検出した。この箇所は2測線のほぼ交点に当たる部分であり、RCDコンクリートの硬化を待ってコアの採取を行ったところ、コンクリートが十分に充填されていないポーラス部を検出することができた(Photo 3-6)。この部分の間隙比を試算した結果、0.24であった(Table 3-9)。このことは、事前のRCDコンクリートの基礎実験において確認されたポーラス箇所の間隙比は0.34であり、これよりも0.1程度低い間隙比を有しているポーラス箇所も検出可能なことを示した。

地中レーダで検出されたポーラス部分について、その透水係数が堤体材料としての材質を十分満足しているかを確認するため、コア採取した孔を利用し、変水位ピット法による現場透水試験を行った。透水係数は次式(3.3)により算出した。

$$k = -\frac{r_0^2}{\Delta t} \cdot \left(\frac{1}{h_1} \sinh^{-1} \left(\frac{h_1}{2r_0} \right) - \frac{1}{h_2} \sinh^{-1} \left(\frac{h_2}{2r_0} \right) + \frac{1}{(2r_0)^2} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{2r_0}{h_1} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{2r_0}{h_2} \right) \right\} \right) \quad (3.3)$$

その結果、透水係数は Table 3-10 に示すとおり 6.0×10^{-6} (cm/s) であり、検出されたポーラス部分は連続していないことが確認されたため、水密性に問題がないと判断した。

d 考察

Photo 3-7 は、今回コアを採取した箇所付近の施工状況写真である。この箇所は RCD コンクリートの撒き出し・転圧の境界にあたる場所であり、転圧ローラの振動などにより粒径の大きい骨材が集積しやすい部分であった。従来から RCD 工法においては骨材分離の発生が懸念されており、実施工では、それを防止するために撒き出し端部では入念な施工が行われている。本調査結果からも、実施されている撒き出し端部におけるコンクリート掻き混ぜなど、撒き出し・転圧の施工には十分留意する必要があるといえる。

5 まとめ

本章では、地中浅部の情報を詳細に把握することができる物理探査法の一つである地中レーダ法に着目し、RCD 工法を採用するダムの施工管理手法への適用・実用化することを目的とした疑似ポーラスコンクリートによる基礎実験、RCD コンクリートヤードにおける基礎

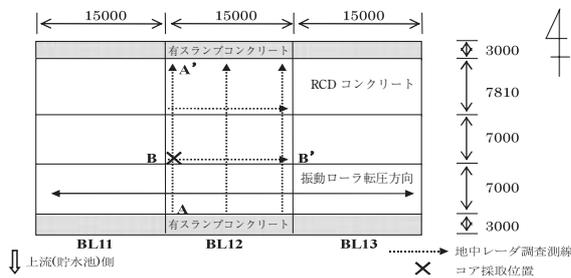


Fig.3-13 RCD コンクリートヤード

Survey field of the RCD

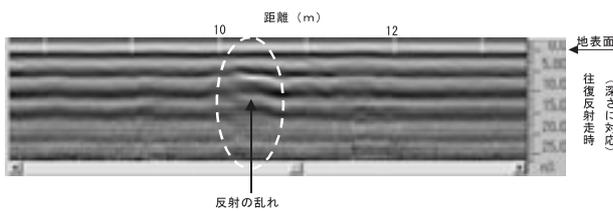


Fig.3-14 測線 A-A' の地中レーダ調査結果

GPR image at the measurement line A-A'

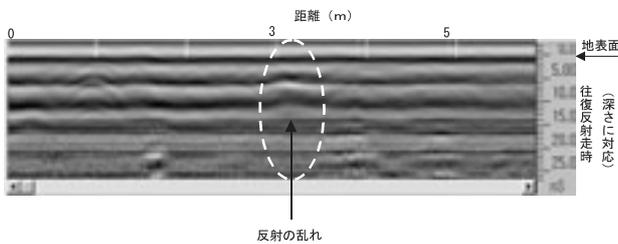


Fig.3-15 測線 B-B' の地中レーダ調査結果

GPR image at the measurement line B-B'



Photo 3-6 地中レーダによる反射異常箇所のコア採取結果

Obtained concrete core at the point of reflection abnormality



Photo 3-7 RCD コンクリート転圧時の施工状況

Compaction condition of RCD

Table 3-10 透水係数の算定

Hydraulic conductivity

孔半径 r0 (cm)	測定時間 Δt (sec)	測定開始時水位 h1 (cm)	測定終了時水位 h2 (cm)	透水係数 (cm/s)
10.8	13,800	138	130	5.96×10^{-6}

実験, RCD 施工現地実証試験を行った。その結果, 次のことが明らかとなった。

- (a) 疑似ポーラスコンクリートを用いた基礎実験により, 完全に空洞でない, 間隙比 0.39 程度のポーラス部が存在すれば, 地中レーダの反射画像が大きく異なるため, 面的に広がっていれば中心周波数 500MHz のアンテナを装着した地中レーダにより検出が可能であることを示した。
- (b) コンクリートを用いた基礎実験では, コンクリート表面から 45cm 下に埋設した ϕ 50mm の鉄管を検出することはできなかった。これは, コンクリート表層で電磁波の大半が反射し, コンクリート内部の鉄管にまで電磁波が届かなかったためであると推測された。
- (c) RCD コンクリートを用いた基礎実験では, 4 回転圧レーンと 12 回転圧レーンとの相違を検出することは困難であった。同じ配合により作成した RCD コンクリート供試体の一軸圧縮強度も回転回数による相違は見られなかった。
- (d) 転圧していないレーンにおいて, 間隙比 0.34 程度のポーラス部を検出することができた。
- (e) RCD コンクリートヤードに設けた ϕ 150mm の塩ビ管からの反射をもとに, RCD コンクリートの比誘電率を経日的に調査した結果では, 打設直後 12~14 程度であった比誘電率は徐々に低下した。打設 7ヶ月後の表面付近の含水比は約 3% であり, 通常のコンクリートと大差はなかった。
- (f) 新宮川ダムを対象とした実証試験では, 打設ブロック BL12 の一部に間隙比 0.24 のポーラス部分を検出できた。なお, 現位置において変水位ピット法により透水係数を計測したところ, 6.0×10^{-6} (cm/s) であり, 水密性に問題がないことを確認した。
- (g) 実証試験においてポーラス部が発生した位置は, 撒き出し・転圧施工を区切る境界部分であったことから, RCD 工法においては, 端部における施工を注意深く行わなければならないことが示された。

本研究により, RCD 工法を採用する場合の面的チェック法として, 地中レーダが適用できることが明らかとなった。より調査性能を高めるため, 自走式の地中レーダや GPS を搭載し, 計測位置を遠隔管理できる地中レーダなどの開発が期待されることである。さらに, 今後の展開として, 地中レーダの画像を専門家でなくとも判別できるよう, 画像をリアルタイムで解析し, 画像上に表示される反射異常を自動的に認識できるようなアルゴリズムの開発も重要となると考えられる。

IV 比抵抗トモグラフィ法による ダム安全管理システムの開発 (安全管理段階)

1 概説

我が国の農業を支える農業用水の多くは, 従来からた

め池や農業用ダムに貯留されることにより地域を潤してきた。堤高 15m 以下のため池を含めると, 日本全国には約 21 万個ものため池が存在するといわれている。これらのため池の維持管理は, 従来から近隣の農家個人, 土地改良区, 地域住民によって行われているが, 農業用ため池の多くは, 築造年不詳といわれるほど古いものが多数あり, 現在老朽化による漏水などの被害が多発している。農林水産省でも, ため池整備事業などを制度化し, その補修・改修に努めている。

これらため池は, 小規模であるが故に, 大規模なフィルダムで埋設されているような堤体の安全管理機器, 例えば間隙水圧計や土圧計, あるいは堤体内部の浸潤面を観測するための観測孔などが設置されていないのが現状である。したがって, 漏水などの事故が発生した場合, 堤体下流部の浸潤線が出現している箇所は目視などにより確認できるものの, 堤体上流側の浸潤経路が分からないことが多い。こうした場合, 漏水などの異常箇所が事前に正確に分かれれば, 必要な箇所のみ補修で済み, 事業費を押さえることが可能である。

さらに, 1995 年の阪神淡路大震災のような巨大な地震に見舞われた際, 農業用ため池堤体にも堤体天端の亀裂や法面の崩れなどの変状が確認されるケースがある。このような場合, 地表に現れた変状が堤体のどこまで進展しているのかを判定することは難しい。

堤体観測機器を設置している近年のいわゆる「大ダム」の築造後の安全管理は, その堤体内部の計器 (間隙水圧計や土圧計) の挙動観測や周辺地山ボーリング孔の水位観測などによって行われている。安中 (1996) は, 昭和 50 年代以降に築造されたダムを対象として行った埋設計器設置率に関する調査を実施し, フィルダムの観測項目としては, 主として「変形」および「浸透水」の計測に重点がおかれているため, 層別沈下計や土圧計, あるいは間隙水圧計などの設置率が高いことを示し, これらの挙動を定期的に監視することにより, ダム堤体の安全性を評価することの重要性に言及している。

地震時, あるいは漏水量の増加が認められた場合には, ダム堤体の安全性を確認するため, これら埋設計器の観測値が必要となる。しかし, 堤体埋設計器は落雷や経年劣化により埋設後数年でその信頼性が落ちる場合がある。国営事業により築堤されたダムを対象として, 農業工学研究所が独自に聞き取り調査を行い, ダムに設置されている計器の種類およびその稼働率のデータをとりまとめている (農業工学研究所, 1993)。この報告によれば, ダムに設置されている主な計器の種類は, 層別沈下計, 間隙水圧計, 漏水量計, 降水量計, 貯水位計であり, その設置率は 80% 以上である (Fig.4-1)。一方, 主な埋設計器の稼働率は, Fig.4-2 のとおりである。測定原理が単純で, 機械的に測定する水位計, 漏水量計などは, 1 ダムあたりの設置個数は少ないものの, 非常に高い稼働率を示している。しかし, 1 ダムあたりの設置個数が

多い間隙水圧計，土圧計はフィルダムの長期安定性を監視する上で，非常に重要な埋設計器であるにもかかわらず，その稼働率はそれぞれ約 61%，35%と低い値にとどまっている。これらの稼働率が低い原因のひとつには，電気式の埋設計器が用いられていることが挙げられる。すなわち施工中の断線や接続ミスなどの人為的故障のみならず，経年劣化による埋設機器の老朽化や，落雷による計器の故障が発生している。特に，落雷が原因の故障件数は相当な数にのぼるものと推測される。現在築堤中のフィルダムでは，測定器の直前に耐雷型アタッチメントをほぼ必ず設置するようになってきているという現状からも，落雷による被害が多いことが分かる。

これら従来の埋設計器では，ある「点」の物性情報を正確に把握できるという利点があるが，その一方で，計測値が他の埋設計器と整合しない場合，それが異常現象を示しているのか，埋設計器の故障であるかを判断することは難しい。今後，フィルダムやため池の長期安定性を監視していく上で，間隙水圧計や土圧計の耐用年数を超えた後の安定性診断手法の開発が望まれている。

そこで，本章では，埋設計器により明らかにされる

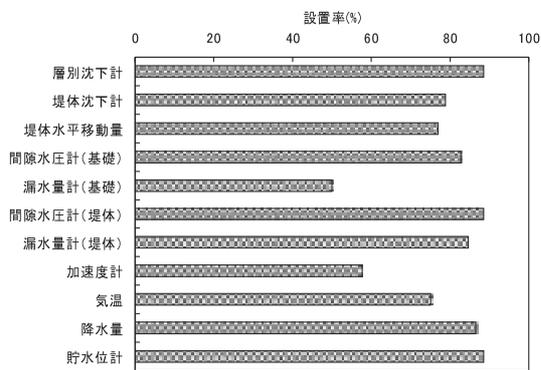


Fig.4-1 主な埋設計器の設置率

Introduced rate of fundamental buried instruments

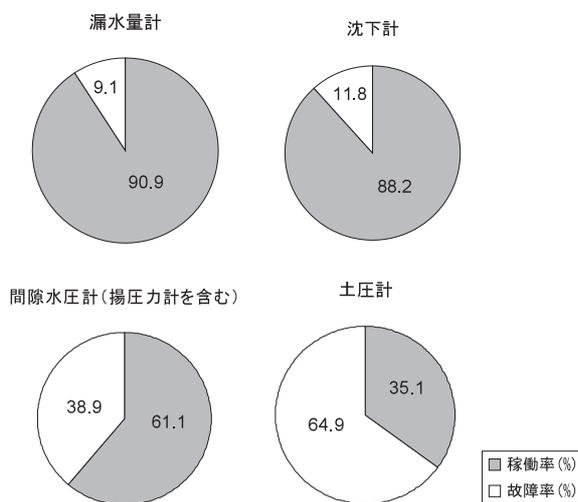


Fig.4-2 主な埋設計器の稼働率

Rate of fundamental buried instruments which keep good conditions for data measurement

「点」の物性値を「面」として補完し，ダム本堤およびその周辺地山の 2 次元的情報をとらえるため，物理探査法の中でも特に高分解能を有する比抵抗トモグラフィ法を利用したフィルダム堤体安全管理システムを構築し，実用化することを目的とした研究開発を行う。フィルダム遮水部およびその周辺部の含水状態を比抵抗値の変化としてモニタリングすることができれば，遮水部の安全性を 2 次元かつ長期的に監視することができると考えられる。

本章における構成は以下のとおりである。

まず，第 4 章 2 では，物理探査法を利用した既存のダム管理手法をレビューし，課題を明らかにするとともに，フィルダムの安全管理システムとして，比抵抗トモグラフィ法を用いた新たな技術開発の思想を述べる。第 4 章 3 では，遮水材をモデル化した数値シミュレーションを行い，その適用可能性を考察する。第 4 章 4 および第 4 章 5 では，土層および小規模な試験堤体を利用した基礎実験を行い，実規模への応用可能性を確認する。第 4 章 6，第 4 章 7，第 4 章 8 では，東北農政局管内の高柴調整池における実証試験に向けて実施した事前調査および堤体内部の比抵抗モニタリング結果を述べ，さらに浸透流解析や時系列トモグラフィ法の適用による比抵抗変化率の検討を行い，実証試験の結果をとりまとめる。第 4 章 9 は，これら実証試験から得られた結果を受けて，九州農政局管内の木之内川内ダムへの適用に際し，比抵抗モニタリングのための電極配置に関する検討を行う。第 4 章 10 では，第 4 章を総括し，比抵抗トモグラフィ法を用いたフィルダム安全管理システムについてとりまとめる。

2 物理探査法を利用したダム管理手法の概念

a 物理探査法によるダム漏水経路特定技術に関する既往の研究

近年，ダム堤体への浸潤過程をモニタリングしたり，あるいは既設ダムの安全性を確認したりするために，物理探査法，特に電気探査を利用して堤体からの漏水経路を特定しようとする試みがなされている。フィルダムの漏水調査や安全管理として物理探査法を用いた事例としては，既設ダムの堤体および基礎岩盤の健全性を評価するために，堤体天端より岩盤部まで掘削した孔を利用した比抵抗トモグラフィ法，弾性波トモグラフィ法の適用事例（鈴木，1998），老朽ため池の漏水経路を特定するために塩水をトレーサーとして利用し，比抵抗変化をとらえた調査（松葉ほか，1995），アースダム堤体内部の浸透調査を目的とした高密度電気探査（吉田ほか，1999），地中レーダを併用して老朽ため池の漏水経路を特定した事例（堀ほか，2002），阿武隈調査管理事務所による羽鳥ダムの漏水調査（菅原，2002）などが報告されている。

例えば，鈴木（1998）の事例では，コンクリートダム

堤体天端から深度約 50m のボーリング孔を削孔し、これらを使用した比抵抗トモグラフィ法および弾性波トモグラフィ法を適用している。しかし、フィルダムの基礎地盤および堤体内部の調査においては、重量で水圧に耐えるコンクリートダムとは異なり、フィルダム遮水材の遮水性が重要であるため、堤体そのものにボーリングすることは漏水を誘発するおそれがあり、適用は困難である。また、吉田ほか (1999) の事例では、フィルダム上下流方向の法面表層部に 2m 間隔で電極を設置し、試験湛水直前、サーチャージ水位、試験湛水終了後の計 3 回の高密度電気探査を実施することにより、比抵抗値が変動した領域をとらえようとする試みがなされている。実験結果によると、湛水直前の比抵抗分布とサーチャージ水位時の比抵抗分布を比較することによって、ダム堤体内の浸透状況が把握できる可能性があるとされている。しかし、この実験では、設置した電極が表層部に限定されていることから、偽像が発生し、解釈を困難にしている。

以上に示されているように、既存のダム堤体に電気探査を利用する場合は、電極の設置が堤体表面に限定されるため、電極から離れた位置に偽像が発生するなどの問題点がある。さらに、比抵抗トモグラフィ法などを適用しようという場合には、堤体に削孔するなどの破壊作業を伴うことから、適用が主としてコンクリートダムに限定される。したがって、ため池の大多数を占めるフィルタイプダムの安全管理手法に物理探査法を応用した事例は、地表面から実施する調査が大半を占めている。

b 想定したフィルダム安全管理システムの概要

これまで示したように、農業用水の貴重な資源となっているため池などの貯水池盛土構造物に関しては、その安全性を長期にわたって管理するための計器 (間隙水圧計や土圧計などの埋設計器) が整備されていない。また、堤高 15m 以上の大ダムについても、長期にわたって土圧計や間隙水圧計などの埋設計器が十分に機能しない場合があり、耐久性に優れ、かつ面的な情報が取得可能な

堤体管理技術の開発が望まれている。

そこで、本研究では、物理探査法のひとつである比抵抗トモグラフィ法を利用した堤体の安全管理システムを構築することを目的としている。Fig.4-3 にこのシステムの概念図を示す。本システムでは、堤体の遮水機能を有する堤体遮水部を対象として、その浸潤状況や漏水などの機能低下を比抵抗値の変動としてとらえようとするものである。フィルダム築堤後に堤体表面に電極を設置して計測するのではなく、フィルダム堤体の築造時にあらかじめ電極を埋設し、堤体遮水部全体を囲んで電極を設置することが特徴である (中里ほか, 2000)。探査対象領域を完全に取り囲むことによって、既往の実験でも確認されている偽像の発生を押さえることができ、解析精度の向上が見込まれる。また、遮水材は厳密に施工管理されて築堤されるため、材料が均質であり、しかも事前にその物性を実験的に求めることができる。したがって、遮水材の比抵抗値などの事前情報を解析に組み込むことが可能となり、部分的で小さな比抵抗変化を精度よくとらえることができる可能性がある (森ほか, 1999)。

本システムでは、築堤時にあらかじめ埋設した上下流断面およびダム軸断面の電極に電流を通電し、計測プログラムにより比抵抗トモグラフィ法による計測を行う。この計測を繰り返すことにより、堤体内部の比抵抗値を継続的にモニタリングする。堤体内部に異常が発生した場合、平常値との比較を行うことにより、その異常がどの位置で発生したのかを求めることができる。

c 比抵抗値のモニタリングによって異常部が評価できる根拠

フィルダム基礎地盤を構成する岩石や、フィルダムの盛土材料である土質材料の電気的性質を示す値に比抵抗値がある。比抵抗値は、電流の「流れにくさ」を示す指標であり、粘土鉱物の含有量、間隙率、水分含有量、飽和度、間隙水の比抵抗、温度といった多くの要因で決定される。

粒状構造を有する土質地盤や堆積岩の比抵抗値は、土

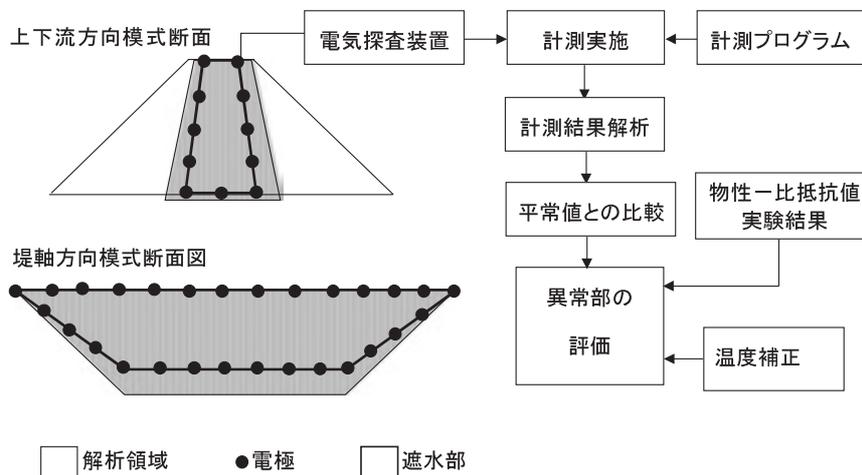


Fig.4-3 比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム安全管理システムブロック図

System block of fill dam safety monitoring system using resistivity tomography

粒子の比抵抗値や地層水の比抵抗値，間隙率，飽和度といった土質パラメータで決まる。例えば，Archie (1942)によれば，計測される土質地盤や堆積岩の比抵抗値と，その間隙水の比抵抗値には，次の関係式が成立するとされている。

$$\rho_s = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \quad \dots (4.1)$$

ここで， ρ_s ：土質地盤や地層の比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)， ϕ ：間隙率， S ：飽和度， ρ_w ：間隙水の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)， a, n, m ：定数である。砂岩では，通常 $0.5 \leq a \leq 2.5$ ， $1.3 \leq m \leq 2.5$ ， $n = 2$ であることが実験的に示されている。したがって，式 (4.1) の関係を利用すると，間隙水の比抵抗値，間隙率，および定数値をあらかじめ求めておけば，理論上飽和度を推定することができる。逆に飽和度が一定であれば，比抵抗変化から間隙率の変化を求めることができる。植野ら (2000) は，比抵抗値と空気間隙率との間の相関に着目し，見かけ比抵抗値を用いた盛立管理手法を提案している。

一方，岩盤の比抵抗値は岩相によって大きく異なる。また，同じ岩相であっても，含水率や風化・熱水変質の程度によって，比抵抗値は幅広い値を示す。Table 4-1 に岩石の比抵抗値に影響を及ぼす要因を示す。岩石の比抵抗値は，地質，岩相，含水率，風化度，熱水変質の程度などによって，幅広い値を示し，例えば，花崗岩の比抵抗値は，およそ $100 \Omega \cdot m \sim 100,000 \Omega \cdot m$ を示す。また，間隙を満たす水の温度の影響も大きく，室温付近では温度が $10^\circ C$ 低下すると，岩石の比抵抗値は $20 \sim 30\%$ 上昇する (島ほか，1995)。

岩石試料と間隙水の比抵抗との相関については，千葉ら (1994)，西田ら (2000) が特定の岩石に関して室内実験を行っている。千葉ら (1994) によれば，間隙比が $0.61 \sim 1.22$ の愛媛県産の花崗岩試料を 8 段階に濃度を調整した KCl 溶液で強制的に飽和させ，試料全体としての比抵抗値を計測した結果，間隙水の比抵抗値が $1 \Omega \cdot m$ 以上 (電気伝導度に換算して $10,000 \mu S/cm$ 以下) であれば，間隙水の比抵抗値が上昇しても，岩石試料全体としての比抵抗値が一定値に近づくことを示している。こうした現象が見られる原因には，岩石の比表面積や間隙幅と密接な関連のある表面伝導が影響していると考え

られている。

本システムでは，このような比抵抗値の特性に着目し，フィルダムの基礎地盤や遮水部の比抵抗値を比抵抗トモグラフィ法によって継続的にモニタリングするものである。フィルダム遮水材は，粒状構造と見なせる土質地盤であるため，式 (4.1) に示した Archie の式が成立すると考えられる。遮水ゾーンは，フィルダムの遮水機能を発揮する重要部分であり，十分な締固めと施工管理が行われ，飽和度は 90% 以上になる。初期湛水の浸潤過程においては，浸水沈下による間隙構造の緻密化，それに伴う間隙率の低下，含水状態の変化，間隙中の飽和地下水の貯水への置換などの物理現象が発生し，これらが比抵抗値を変動させる要因となる。したがって，継続的に比抵抗値の変化をモニタリングすることにより，初期湛水時の浸潤過程を比抵抗値の変化した領域として可視化できる可能性がある。さらに，初期湛水時に多量の浸透水が確認されるなどの不具合が発生した場合，貯水の比抵抗値と地山地下水の比抵抗値が大きく異なれば，それが貯水なのか地山地下水なのかを比抵抗値の変化量から特定できる可能性がある。しかも，本システムでは，比抵抗値の分布を面的にとらえることが可能であるため，従来から活用されてきた間隙水圧計や土圧計の記録を補完できる可能性がある。

d 研究開発の手順

比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム堤体安全管理システムを実用化するために，以下の手順により適用可能性を検討した。まず，フィルダム遮水ゾーンと貯水を考慮した単純な 2 次元モデルによる数値実験を行った。数値実験では，堤体内部や基礎地盤内に比抵抗変動箇所を発生させ，差分法で得られた電位分布からこれらの変動箇所が推定できるかどうかを検証した。次に，大型の鋼製容器を用いた土層実験を行った。土層実験では，容器内でマサ土を締固め，底面から水を浸潤させ，この浸潤過程が比抵抗トモグラフィ法により検出できるかどうかを確認した。さらに，高さ $1m$ ，堤長 $7m$ の試験堤体を風化マサ土によって作成し，上流側を貯水し，この浸潤過程を比抵抗トモグラフィ法により検出する基礎実験を行った。以上の基礎実験を経て，最終的に東北農政局

Table 4-1 比抵抗値に影響を及ぼす要因 ((財) 災害科学研究所トンネル調査研究会，2001)

要 因		地盤の比抵抗			地盤の関連現象
		低い	← →	高い	
間隙率	飽和状態	大きい	← →	小さい	風化，破砕帯
	乾燥状態	小さい	← →	大きい	
飽和度 (間隙率一定)		大きい	← →	小さい	地下水位
体積含水率 (間隙率×飽和度)		大きい	← →	小さい	風化，破砕帯
粘土鉱物含有量 (導電性鉱物)		多い	← →	少ない	風化，変質
地下水の比抵抗		低い	← →	高い	塩水楔など
温度 (地温)		高い	← →	低い	地熱，温泉

郡山土地改良建設事業所管内の高柴調整池において、本システムの実証試験を実施した。以降では、これらの結果を順にとりまとめる。

3 数値実験による検証

a 数値実験の目的と方法

比抵抗トモグラフィ法によって、フィルダム堤体や基礎地盤に発生した比抵抗変動をどの程度の精度でとらえられるかを検証することを目的として、2次元モデルによる数値実験を行った(長束ほか, 2000)。Fig.4-4 に示すように、堤体の上下流方向の断面をモデル化し、堤体の遮水部および基礎地盤部に比抵抗値の変化が生じた場合の比抵抗変化の検出能に関して、数値実験を行った。

初期値は、遮水部の比抵抗値を $30 \Omega \cdot m$ 、下流側のロック材および空間の比抵抗値を $999,999 \Omega \cdot m$ 、上流側の飽和したロック材および貯水の比抵抗値を $50 \Omega \cdot m$ 、基礎地盤の比抵抗値を $300 \Omega \cdot m$ に設定した。差分法による順計算と逆解析に使用する計算領域は、 59×50 メッシュの範囲内とし、逆解析の解析領域は 2×2 メッシュの比抵抗ブロックを単位とする 20×21 ブロックの範囲とした。電極はダムの上下流方向の標準断面全周に 64 点設置し、電極配置は 2 極法とした。電極の送受信総組み合わせ数は 2,016 である。以上のモデルについて、初期モデルの比抵抗ブロックに、次に示すケースに応じた比抵抗変化を与え、それに対して差分法による順計算を行い、計測値を求めた。この計測値に対して平滑化制約付き最小二乗法による逆解析を行い、10 回の反復計算結果を解析結果として表示した。

b Case 1: 堤体遮水部の一部で比抵抗値が減少した場合

まず、Case 1 として、堤体遮水部の一部分で比抵抗値が $30 \Omega \cdot m$ から $20 \Omega \cdot m$ に変化 (33% 減少) した場合を想定した。差分法による順計算結果を計測値と見なして逆解析し、比抵抗構造を再構成した。逆解析は全体に初期値として $100 \Omega \cdot m$ 均一を設定して開始した。逆解析結果を Fig.4-5 に示す。最初の順解析時に想定した異常箇所は、黒で塗りつぶした 2 ブロック部分である。また、各ブロック内の数値は、逆解析により再構成された比抵抗値 ($\Omega \cdot m$) を示している。図のように、比抵抗変化を想定した 2 ブロックが $20 \Omega \cdot m$ にうまく再構成され、それ以外の遮水部の比抵抗値はほぼ $30 \Omega \cdot m$ 前後に再構成されている。

c Case 2: 堤体基礎地盤の一部で比抵抗値が減少した場合

次に、堤体基礎地盤の比抵抗値が $300 \Omega \cdot m$ から $150 \Omega \cdot m$ に半減 (50% 減少) した場合を想定して、同様の計算を行った。結果を Fig.4-6 に示す。結果は先の Case 1 と同様、想定した基礎地盤の異常箇所を正確に特定することができた。

Case 1 および 2 において、あらかじめ想定した異常箇所

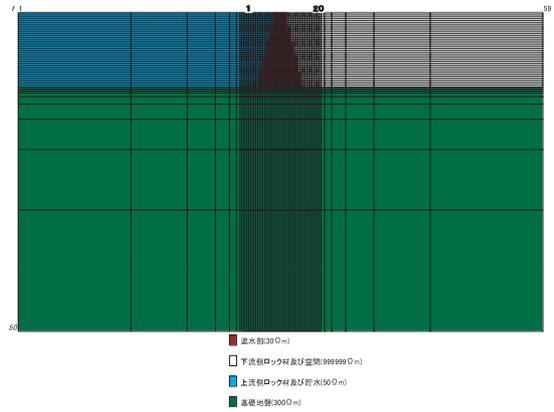


Fig.4-4 堤体上下流断面の数値計算モデル

Upstream and downstream cross section numerical model of fill dam

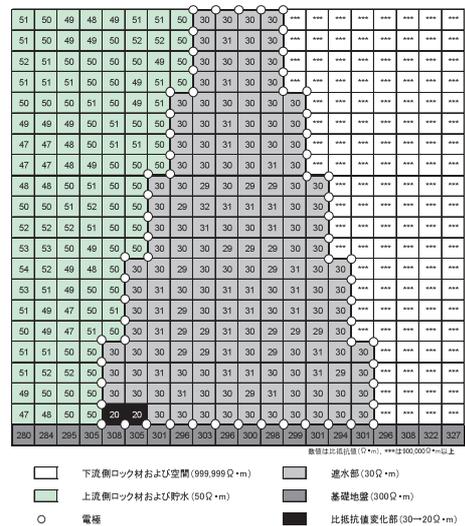


Fig.4-5 堤体遮水部の一部に比抵抗変化部が生じた場合の逆解析結果

Result of inversion when resistivity change is occurred in a part of impervious zone

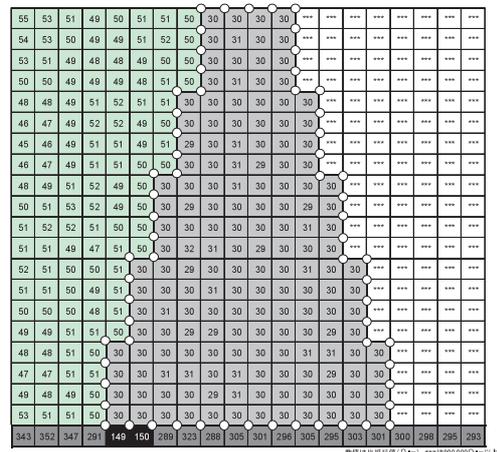


Fig.4-6 堤体基礎の一部に比抵抗変化部が生じた場合の逆解析結果

Result of inversion when resistivity change is occurred in a part of foundation

所を正確に再構成できた成因は、遮水部底面にも電極を配置することによって、遮水部全周を取り囲んだことであると考えられる。この効果を確認するために、初期モデルにおいて順計算によって得られた解析値を用いて、全体を $100 \Omega \cdot m$ 均一と仮定して逆解析を開始した時、底部に電極を配置した場合と底部に電極を配置しない場合との間で、どの程度再構成後の比抵抗分布に差が生じるかを検証した。**Fig.4-7** は底面に電極がない場合、**Fig.4-8** は底面に電極がある場合の結果である。底面に電極を配置しない場合には、初期モデルにおいて設定した貯水 $50 \Omega \cdot m$ 、遮水部 $30 \Omega \cdot m$ 、基礎地盤 $300 \Omega \cdot m$ には再構成されず、底面に電極を配置した **Fig.4-8** の結果と比較すると極端に精度が低下することが明らかになった。

以上の数値実験結果から、本ダム管理システムでは、底部に電極を設置することによってフィルダムに発生した比抵抗の異常箇所を精度よく検出できることが確認できた。

4 室内実験による安全管理システムへの 応用可能性の検討

a 予備実験

盛土内部の比抵抗値を 33%，基礎地盤内部の比抵抗値を 50% 変化させた数値実験の結果、比抵抗トモグラフィ法によって、その変化した位置を精度よく再構成できた。したがって、フィルダム堤体内部の浸潤状況を管理するためには、飽和度や間隙を満たす水の変化によって比抵抗値が変化することがその必要条件である。そこで、最適含水比付近で締固めたダム遮水材と、それをほぼ飽和させた場合との間に、どの程度比抵抗値に差があるのかを調べた。供試体は、東北農政局山王海ダムの遮水材（2mm ふるい通過試料）であり、これを $\phi 50mm \times 1100mm$ の三軸圧縮試験供試体作成モールドで締固めたものを用いた。最適含水比付近で締固めた供試体の比抵抗値は $360 \Omega \cdot m$ であった。この供試体に約 3m の水頭差を設けて強制的に飽和させ、電気伝導度 $300 \mu S/cm$ （比抵抗 $33.3 \Omega \cdot m$ ）の水道水で飽和後させた後の比抵抗値を計測した。その結果、比抵抗値は $203 \Omega \cdot m$ にまで減少し、飽和前と比較して比抵抗値が約 40% 低下した。含水状態や間隙水の比抵抗値が変化することによって比抵抗値が大きく変化したことから、前述した数値実験の結果も併せて考えると、含水状態の変化を比抵抗値の変化としてモニタリングできる可能性が示唆された。

b 土層実験

(1) 土層実験の概要

大型の鋼製容器（L300cm×B150cm×H94cm）内に、側壁コンクリート・発泡スチロール・ゴムシートからなる絶縁層に囲まれた土層（L208cm×B60cm×H37cm）を作製し、比抵抗トモグラフィ法により土層中の含水分布が把握できるかを調べる室内土層実験を実施した。

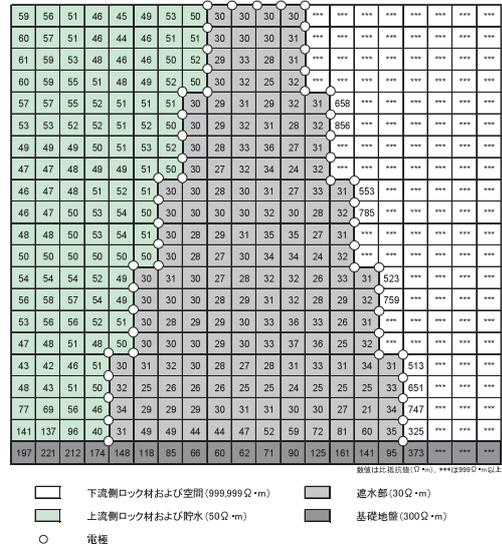


Fig.4-7 底面に電極がない場合の逆解析結果
Result of inversion when there is no electrodes
at the bottom of dam

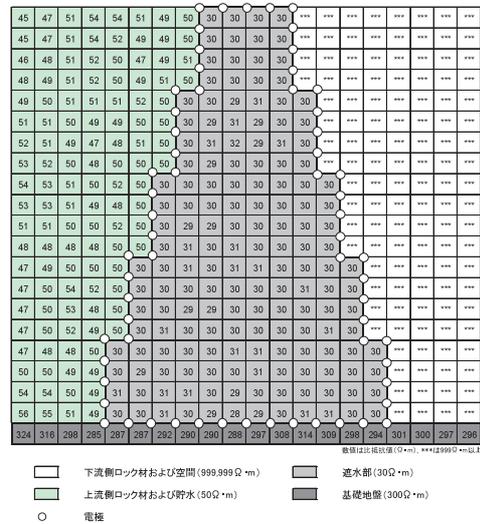


Fig.4-8 底面に電極がある場合の逆解析結果
Result of inversion when the dam is surrounded by electrodes

Fig.4-9 に、本実験における土層の断面図と電極配置を示す。供試土は強風化マサ土（東北農政局金沢調整池副堤遮水材）であり、最大乾燥密度は $1.96g/cm^3$ 、最適含水比は 10.6% である。土層は最適含水比付近に調整した供試土を 5 層に分けてタンパで突き固めた。電極には $\phi 8mm$ のステンレス球を用い、これを 8cm 間隔で 48 点設置した。土層底部には、土層を浸潤させるための給水口を設けた。また、温度の比抵抗値への影響度および給水時の浸潤箇所を特定する目的で、図に示した位置に温度計（熱電対）を設置した。

(2) 計測電位差の変化

上記の土層において経時的に比抵抗トモグラフィ法による計測・解析を行い、含水量の変化により計測される電位差がどの程度変動するのかを調べた。計測時の電極

配置は、4 極法のダイポール・ダイポール法を用いた。土層完成直後の 1999 年 1 月の計測値を基準値とし、その後の計測結果に対し、その基準値からの変化率を見た結果を、Fig.4-10 のヒストグラムに示す。この図は、土層完成後約 1 ヶ月後、約 4 ヶ月後、地盤上面から -1cm のところまで静水圧をかけた時点、地下水位を下げた水を排水し約 1 週間経った時点の計 4 ケースについて、基準値に対する変化率の頻度分布を示したものである。

約 1 ヶ月後では、基準値とのずれが -30~+10% に収まっていた。さらに計測を継続し、約 4 ヶ月後には、見かけ比抵抗値の中央値がマイナス側（比抵抗値が小さくなる方）にシフトしていた。この段階では、給水していないので、一般には土層が乾燥し、抵抗値が大きくなると予測された。しかし、計測結果では比抵抗値が減少していた。この要因としては、気温の上昇が想定され、気温が上昇するにつれて土層の温度も上昇し、比抵抗値が減少したと考えられる。なお、常温レベルの温度変化による地面表層の比抵抗値の変動に関しては、地中内の 10℃の温度変化に対し、比抵抗値が 62% 変動したという地すべり地での繰り返し実測に基づく事例が報告されている（中里ら, 1998）。

次に、土層上面から -1cm 高さの静水圧をかけて水道水を注水した時点では、比抵抗値が下がり、基準値からの変化率が中央値で比較した場合 70 % 比抵抗値が小さくなった。その一方で、変化率が基準値よりも +100% と高い計測結果も見られる。これらのデータを確認した結果、比抵抗値が上昇した多くの計測データでは、地表

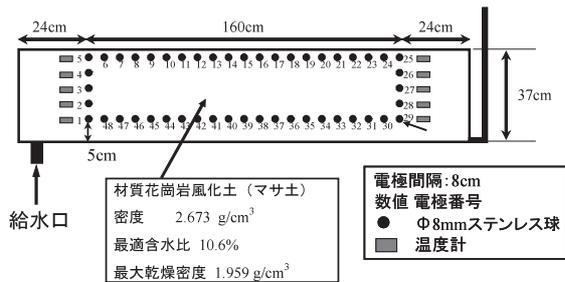


Fig.4-9 室内土層実験の装置図 (縦断面図)
Cross section of insitu experiment

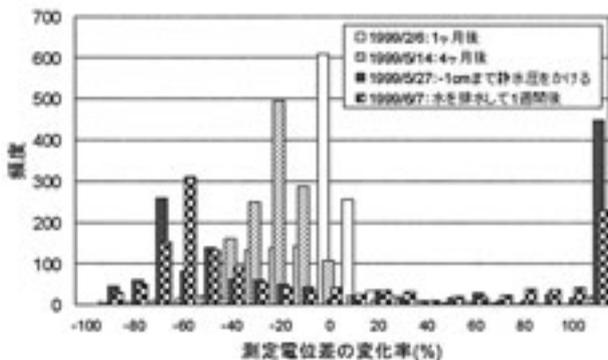


Fig.4-10 変化率ヒストグラム
Histogram of change of apparent resistivity

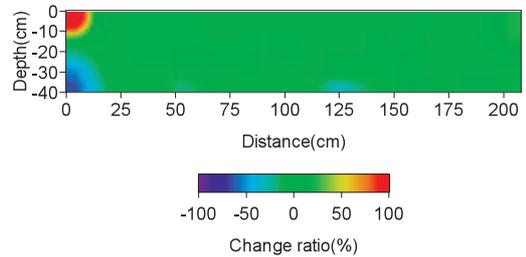


Fig.4-11(a) 土層完成後約 1 ヶ月後の変化率
Resistivity change ratio after one month when the soil specimen was made

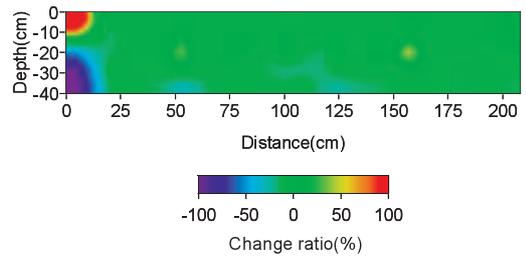


Fig.4-11(b) 土層完成後約 4 ヶ月後の変化率
Resistivity change ratio after four month when the soil specimen was made

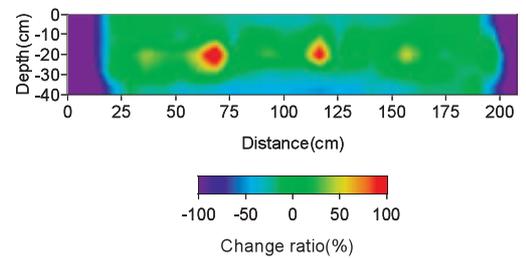


Fig.4-11(c) 地盤上面から -1cm のところまで静水圧をかけた時点
Resistivity change ratio when hydrostatic pressure was acted at the level of -1cm from soil surface

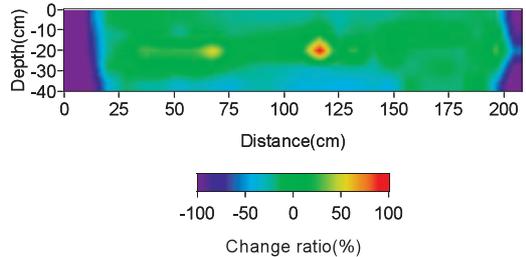


Fig.4-11(d) 排水約 1 週間後
Resistivity change ratio after one week when the water was drained off



Photo 4-1 壁面部分の水位上昇状況
Rising of water level at the side of soil specimen

面付近に電流電位電極があることが明らかになった。このことから、土層表面が乾燥した結果、電極の接地抵抗が高くなったため測定に悪影響を及ぼした可能性が示唆された。その後、注入した水を排水すると、乾燥により、通水中よりも比抵抗値が上昇した。

(3) 逆解析による土層内の比抵抗値変動モニタリング

計測電位差の変化率の追跡だけでは、変化の生じた箇所を特定できない。そこで、これらのデータを逆解析し、土層中の比抵抗分布を再構成した。ここで、給水前後での比抵抗分布の変化領域をより明確にするため、土層完成直後の比抵抗分布を基準値としたときの比抵抗変化率を次式で定義した。

$$\text{変化率 (\%)} = \{(\text{計測時の比抵抗値} - \text{土層完成直後の比抵抗値}) / \text{土層完成直後の比抵抗値} \times 100 \quad \dots (4.2)$$

Fig.4-11(a)~(d) に比抵抗変化率を示す。Fig.4-11(a), Fig.4-11(b) は給水前の変化率である。全体的に比抵抗値の変化はないものの、土層左側の上側で比抵抗値が高く、下側で低くなった領域が認められた。これは、給水口の影響によるものと考えられた。Fig.4-11(c) は土層上面から -1cm まで静水圧をかけたときの変化率、Fig.4-11(d) はこれらの水を排水して 1 週間後の変化率である。昇圧速度が速すぎたため、静水圧をかけた時に土層の深層から浅層へと水面が上昇せず、壁面に敷設したゴムシートと供試土との境界に沿って水が上昇した (Photo 4-1)。土が電気伝導度の大きい (比抵抗値の小さい) 水で飽和されると低比抵抗化するため、この左右壁面直近の飽和部が低比抵抗部として再構成されたと想定できる。

この室内土層実験では、土層のスケールが小規模であったため、間隙水圧計などの埋設計器設置による浸潤線変動の追跡ができなかった。しかし、比抵抗トモグラフィ法により、含水状態の変動を時間的に、視覚的に捉えることができるという見通しを得ることができた。

5 試験堤体による基礎的検討

a 実験の目的

室内土層実験により、土中に浸潤した水による比抵抗変動の影響を比抵抗トモグラフィ法を用いることによって継続的にモニタリングできる見通しが得られた。しかし、実ダムを対象として比抵抗トモグラフィ法を実施する際、種々の問題が起ころうる。例えば、通常、比抵抗トモグラフィ法の解析では、解析断面の奥行き方向には比抵抗値の変化がなく、無限遠まで解析断面の比抵抗構造が続くと仮定して解析を行っている。ところが、フィルダム堤軸方向の解析に際しては、垂直軸方向となる上流側に貯水、下流側は空気層が存在し、この仮定が成り立たない。すなわちダム形状の三次元効果が現れると推測できる。

そこで、実規模の実証試験を行う予定の東北農政局高柴調整池遮水材を用いて野外に小規模な試験堤体を作製し、この堤体中に電極を設置して比抵抗トモグラフィ法による計測を行う実験を行った。比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム堤体内部の浸潤過程および比抵抗異常を計測する上で、ダム形状による三次元効果が解析上問題になるかを検証するとともに、実規模の実証試験において、どのようなことが計測上あるいは解析上問題となる可能性があるのか事前に探ることにした。

b 試験堤体の概要

(1) 試験堤体の規模と築堤材料

試験堤体は農業工学研究所敷地内に設置した堤高 105cm、堤頂長 700cm、天端幅 90cm、底幅 300cm の小規模な盛土である。試験堤体の概要図および完成後の写真を Fig.4-12 に示す。堤体盛土材料は、実証試験を想定している高柴調整池の遮水材 (強風化マサ土) を使用した。なお、降雨による影響を避けるために試験堤体全体を覆う屋根を設置した。さらに、雑草による堤体への損傷や貯水および周辺からの地下水による浸食を防ぐことを目的として、堤体全体を不織布で覆った。

(2) 施工方法

試験堤体は、一度平地を掘り込み、その上に高柴調整池遮水材を 1 層 15cm まきだし、80kg 級タンパで締め固めた。堤体下部の電極は、一度基礎地盤を溝状に掘込んだ後、鉄板電極を巻き付けた $\phi 10\text{mm}$ 塩ビ管を埋設し、鉄板電極と接合した導線を塩ビ管内に封入した (Photo 4-2)。また、鉛直方向の電極についても同様に、電極を巻き付けた塩ビ管 $\phi 50\text{mm}$ を垂直方向に固定し、周辺を遮水材で転圧した。施工結果は Table 4-2 のとおりである。盛立材の施工含水比は全 24 箇所平均で 29.9% であり、実施工における管理基準値 (= 最適含水比 + 5% 以内) をクリアしていた。なお、高柴調整池で実際に施工した遮水材の最適含水比は 24.9~27.6% であった。原位置透水係数は 3 箇所平均で $1.13 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ であり、高柴調整池遮水材の管理基準値 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以下 (10^{-6} オーダー) をわずかにオーバーしているが、ほぼ設計どおりの透水係数が出ている。砂置換法による現場密度測定結果では、6 箇所の平均値が 1.51g/cm^3 であり、高柴調整池の遮水材と同等の性能を有する盛土ができた。

(3) 電極配置の詳細

鉛直方向の電極間隔は 15cm、水平方向の電極間隔は 25cm を基本として配置した。また、貯水した後に堤体内部への浸潤状態を把握するために、オープンピエゾメータを設置した。さらに、水みちモデルとして、堤体内部に 2 箇所、 $\phi 30\text{mm}$ および $\phi 10\text{mm}$ の有孔管 2 本を敷設した。有孔管端部にはキャップをつけ、必要に応じてキャップを取り外しできるようにした。堤体は 1999 年 10 月中旬に完成した。

以下に報告する各計測断面の名称は、試験堤体を輪切

りする上下流方向の計測断面を NS 断面と呼び、西側の断面からそれぞれ 1,2,3 という番号をつけて区分する。また、堤体中央を通る堤軸方向の計測断面を EW 断面と呼ぶ。

Fig.4-13 に、NS 断面におけるトモグラフィ計測用の電極配置を示す。No.1~11 までの堤体表面の電極には釘を使用した。計測は遠電極を使用する 2 極法とし、図中の黒丸は電流を流す電極を、白丸は電位だけを計測する電極を表す。**Fig.4-14** に、この電極配置における計測パターンを示す。図の実線の組み合わせで計測を実施した。一般に、トモグラフィの計測では、相反性が成り立つことをチェックすることにより、データの品質管理を行う。そこで、例えば、1 番の電極で通電し 3 番の電極で計測した場合と、3 番で電流を流して 1 番で計測した場合の二つのデータを比較し、計測値の品質を確認した。

Fig.4-15、**Fig.4-16** に EW 断面における電極配置、計測パターンをそれぞれ示す。

(4) 実験方法

比抵抗トモグラフィ法による計測は、以下の手順で実施した。まず、堤体完成後に比抵抗トモグラフィ法による計測を行い、各断面の比抵抗分布を確認した。これは、盛立によって過剰な間隙水圧が発生したかどうか、発生したとすればそれが十分消散したかどうかを確認することと、貯水する前の状態を初期値（基準値）として把握しておくためである。その後、上流側を貯水し、比抵抗トモグラフィ法による計測を経時的に行うとともに、堤体内部の比抵抗分布とオープンピエゾメータによる観測結果の対応関係を調べた。その後、十分飽和して定常状態になったのを確認した後、水位を変動させたり、あるいは有孔管を操作して、堤体内の浸透状況を変化させたりして、これらの変化が比抵抗トモグラフィ法によって計測されるかを実験した。

比抵抗トモグラフィ法による計測は **Table 4-3** のスケジュールで行った。

1999 年 11 月下旬 (11/26) に、堤頂 -5cm まで湛水し、貯水前 (11/8) と貯水直後 (12/09) に比抵抗トモグラフィ法による計測を行った。測定には、応用地質 (株) 製 McOHM21 を使用した。

c 実験結果

(1) NS-2 断面における貯水前・貯水直後の堤体内部の比抵抗構造変化

計測された電位分布から逆解析により求めた NS-2 断

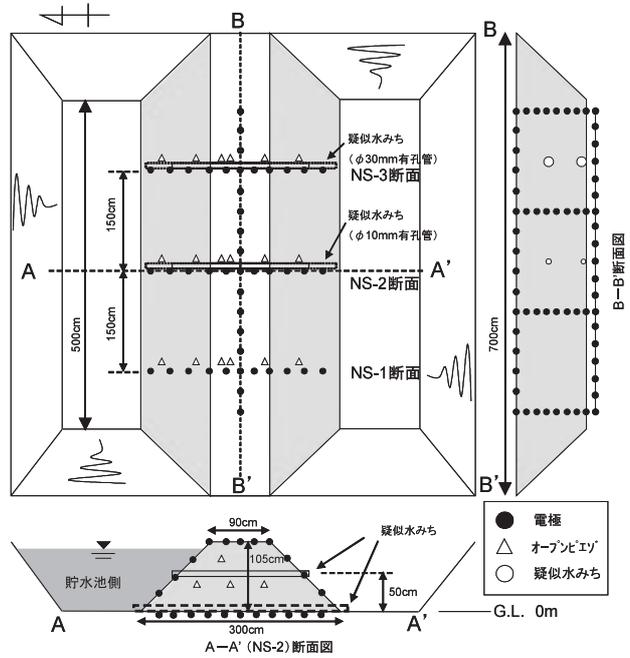


Fig.4-12 試験堤体概要図
(上：平面図および縦断面図，下：完成直後の写真)
Plane of experiment dam model
(Upper:Plane and cross section, Lower : photo)

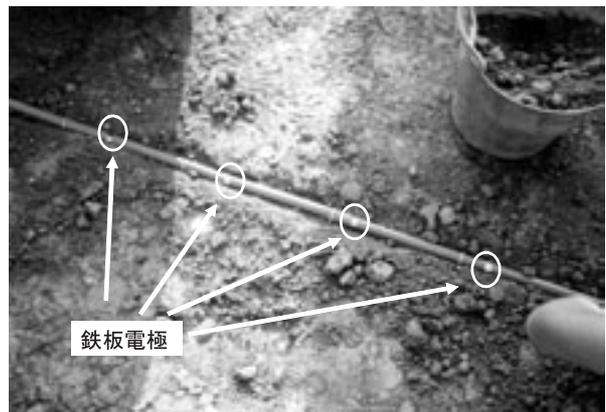


Photo 4-2 基礎地盤部の鉄板電極
Electrodes at the foundation of experiment dam model

Table 4-2 試験堤体施工結果

Property of experiment dam model		
項目	結果	施工管理基準 (実証試験堤体)
施工含水比 ^{※1}	29.9%	Wopt+5% (Wopt:24.9~27.6)
透水係数 ^{※2}	1.13×10 ⁻⁵ (cm/s)	1×10 ⁻⁵ (cm/s) 以下

※1 : G.L.0.15m で 9 点, 0.50m で 9 点, 0.85m で 6 点計 24 点の平均値
 ※2 : 試験盛土で 5 箇所, 堤体 G.L.0.73m で 1 箇所計 6 箇所の平均値

面における比抵抗分布を Fig.4-17 に示す。貯水前（図 (a)）の比抵抗値は、堤体上流側の表層部が $160\ \Omega \cdot m$ 以上、堤体下流側の表層部が $120\ \Omega \cdot m$ 以上を示し、堤体内部は基礎地盤面付近の下段が $100\ \Omega \cdot m$ 以下、中段が $100\sim 120\ \Omega \cdot m$ 、上段が $120\ \Omega \cdot m$ 以上と、天端に向かって高比抵抗の層状構造を示した。

上流側を電気伝導度 $300\ \mu S/cm$ （比抵抗 $33.3\ \Omega \cdot m$ ）の水で満水にした貯水直後（図 (b)）の堤体内部の比抵抗値は、下段では $100\sim 120\ \Omega \cdot m$ を示す領域（図中の黄色）が、上段では $120\sim 140\ \Omega \cdot m$ を示す領域（図中のオレンジ色）が拡がり、貯水前の比抵抗値分布に比べて堤体内部の比抵抗値は全体的に高比抵抗側にシフトした。しかし、上流側（貯水側）の表層部は、 $160\ \Omega \cdot m$ 以上を示していた抵抗値が $80\sim 120\ \Omega \cdot m$ にまで大きく減少した。

貯水後3ヶ月の時点（図 (c)）では、貯水直後の計測時に拡大していた堤体内部上段の比抵抗値 $120\sim 140\ \Omega \cdot m$ の領域（図中のオレンジ色）が減少し、 $100\sim 120\ \Omega \cdot m$ の領域（図中の黄色）が拡大している。また、堤体内部下段は $80\sim 100\ \Omega \cdot m$ （図中の黄緑色）へと低比抵抗側にシフトした。さらに時間が経過した貯水1年後（図 (d)）の結果では、堤体内部下段から上段に向かって $80\sim 100\ \Omega \cdot m$ の領域（図中の黄緑色）が拡大した。

有孔管の上下流端の蓋をはずし、模擬水みち用の有孔管を開放（2000.12.13）した直後の結果（図 (e)）では、解放直前の結果と大差は認められなかった。なお、疑似水みちを発生させた前後のオープンピエゾメータによる直接水位計測結果では、解放直後に水位が1日で $10\sim$

12cm 上昇した箇所があったが、その後は大きな変動は見られず、ほぼ一定水位となった。

(2) EW 断面における貯水前・貯水直後の堤体内部の比抵抗構造変化

計測された電位分布から逆解析により求めた比抵抗分

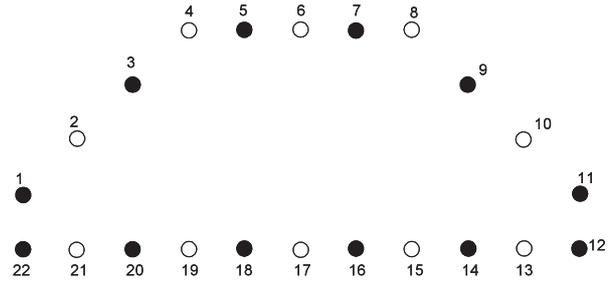


Fig.4-13 NS-1,2,3 断面電極配置図

Electrodes array at the section of NS-1,2,3

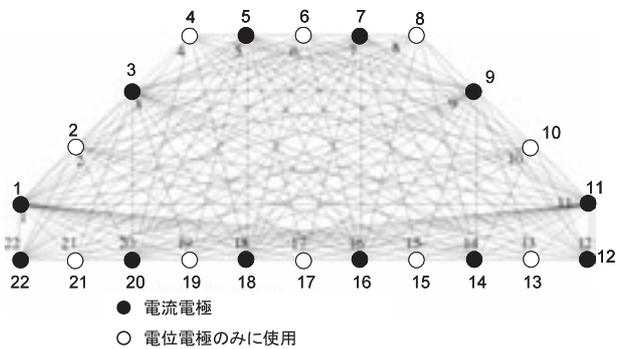


Fig.4-14 NS-1,2,3 断面計測パターン

Measurement pattern at the section of NS-1,2,3

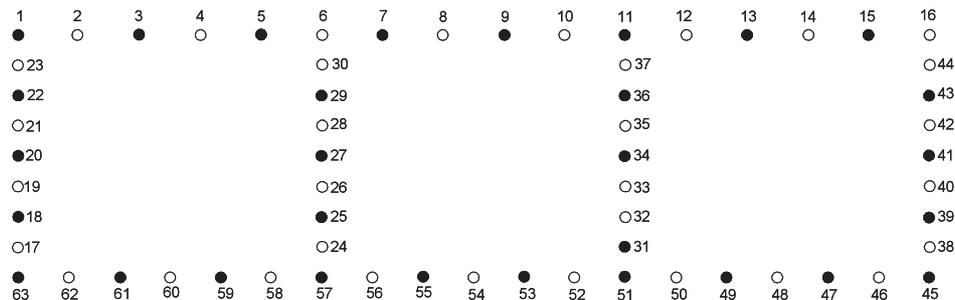


Fig.4-15 EW 断面電極配置図

Electrodes array at the section of EW

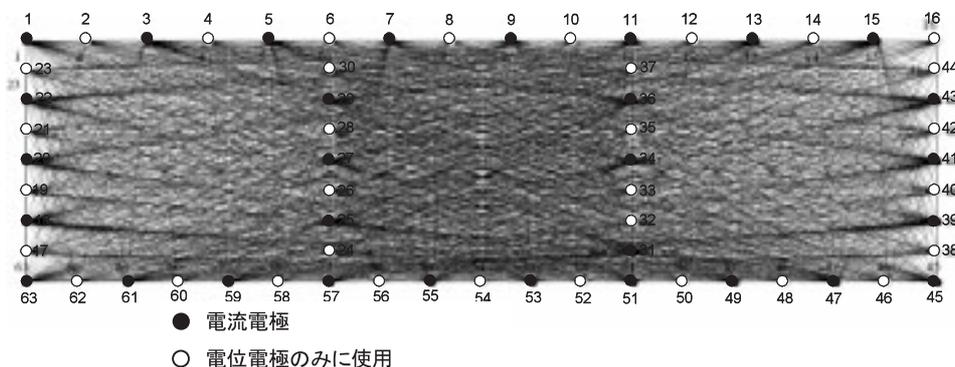


Fig.4-16 EW 断面計測パターン

Measurement pattern at the section of NS-1,2,3

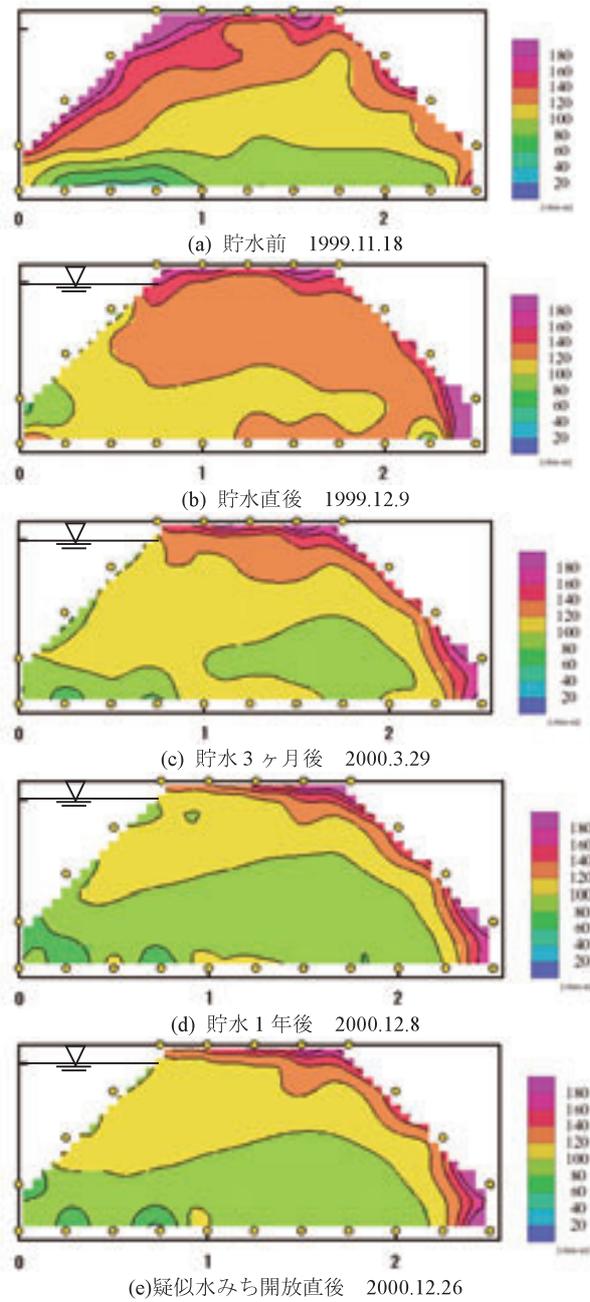


Fig.4-17 試験堤体の NS-2 断面比抵抗値分布の経時変化
Change of resistivity distribution at NS-2 section of dam model

布を Fig.4-18 に示す。貯水前 (図 (a)) の比抵抗値は、堤体上流側の表層部が $100\Omega \cdot m$ 以上、全体がほぼ $80\sim 100\Omega \cdot m$ 以上を示し、NS-2 断面と同様に、天端ほど比抵抗値が高い層構造が認められた。

貯水前 (図 (a))、貯水直後 (図 (b)) の解析結果を比較すると、比抵抗値の変動が見られる箇所は少なく、 $80\sim 100\Omega \cdot m$ を示す領域が少なくなり、 $100\sim 120\Omega \cdot m$ を示す領域が拡大した。さらに貯水 3 ヶ月後の図 (c) では、さらに高比抵抗化が進行し、表層では $180\Omega \cdot m$ を越える比抵抗領域が拡大した。先に示した NS-2 断面の結果では、貯水面に接している上流側から徐々に貯水が浸潤していく様子がとらえられたが、堤体軸中央に電

Table 4-3 計測時期とその目的

Measurement time and its purpose

時 期	計測の有無・イベント	計 測 目 的
1999.9	○試験堤体完成直後	初期状況把握
1999.11	○試験堤体完成 1.5 ヶ月後	初期状況確認, 間隙水圧の消散
1999.11	貯水開始	
1999.12	○貯水終了直後	貯水の影響
2000.3	○貯水約 3 ヶ月後	貯水の影響
2000.12	○貯水約 1 年後	貯水の影響
2000.12	有孔管 (疑似水みち) に導水	
2000.12	○有孔管導水約 2 週間後	漏水の影響
2001.4	○有孔管導水約 4 ヶ月後	漏水の影響, 温度の影響
2001.5	○有孔管導水約 5 ヶ月後	漏水の影響, 温度の影響
2001.6	○有孔管導水約 6 ヶ月後	漏水の影響, 温度の影響
2001.7	○有孔管導水約 7 ヶ月後	漏水の影響, 温度の影響
2001.7	落水	
2001.8	○落水約 1 ヶ月後	落水の影響
2001.9	○落水約 2 ヶ月後	落水の影響

○ 比抵抗トモグラフィ法による計測を実施

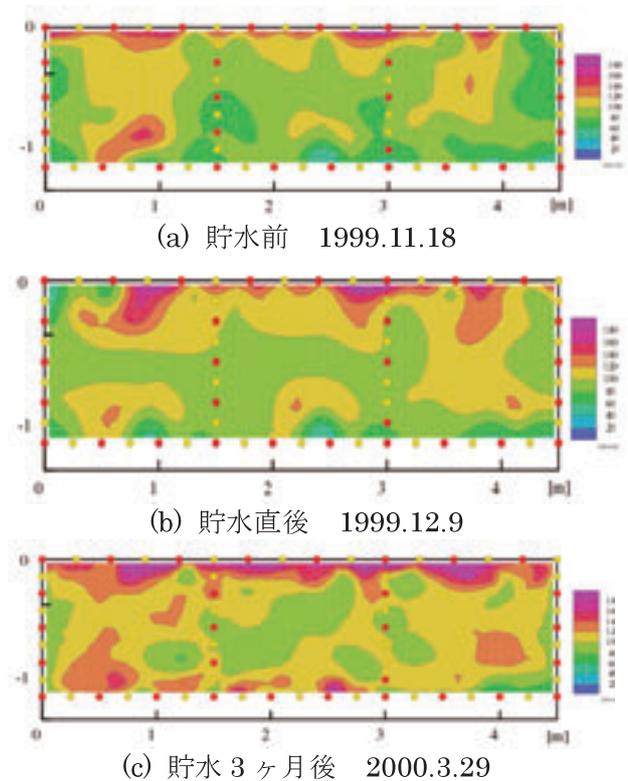


Fig.4-18 試験堤体の EW 断面比抵抗値分布の経時変化
Change of resistivity distribution at EW section of dam model

極を配置したため、貯水後 3 ヶ月では貯水が堤体中央部まで到達していないと想定された。

(3) 水みち解放後における比抵抗変化

NS-2 断面における水みち解放後の 2001 年 4 月以降の比抵抗分布を Fig.4-19 に示す。2001 年 4 月から 7 月にかけては、比抵抗値が徐々に小さくなり、2001 年 7 月では、全体の比抵抗値がほぼ $40\sim 60\Omega \cdot m$ にまで低下した。しかし、貯水を落水した 2001 年 8 月、9 月以降では、逆に比抵抗値が上昇した。特に 9 月の結果では、表層部の比抵抗値が $120\Omega \cdot m$ 以上となっており、試験堤体完成直後の 1999.11 月時点の比抵抗値に近づく傾向を示した。

次に、水みち解放後におけるEW断面の比抵抗分布をFig.4-20に示す。EW断面の結果をみると、表層付近の比抵抗値は $100\Omega \cdot m$ を超える高比抵抗部が見られた。しかし、全体としては $60\Omega \cdot m$ 程度にまで比抵抗値が低下した。NS-2、NS-3断面において、2001年7月には $40\sim 60\Omega \cdot m$ の低い領域が生じたが、落水した8月以降は、比抵抗値が高くなる傾向を示した。2001年7月におけるNS断面およびEW断面の比抵抗値が他の月と比較すると、全体的に低比抵抗を示す領域が拡大していたことから、温度変化が比抵抗値の変動に影響を与える可能性があると考えられた。

d 考察

—変化率を用いた比抵抗変動領域の可視化—

以上の比抵抗値の観測により、貯水前後で試験堤体内部の比抵抗分布が変化すること、長期にわたる観測においても十分モニタリングが可能であることが確認できた。しかし、これまでの結果では、比抵抗値の変化した領域を一目で判別するのは困難であった。そこで、貯水前後の比抵抗変化領域をより明確に判定するため、湛水前の比抵抗分布を基準値とし、式(4.2)に示した「変化率」による比抵抗変化領域の表示を試みた。

Fig.4-21にNS-2断面の変化率を示す。図では、寒色系が「貯水前と比較して比抵抗値が減少した領域」を示し、暖色系がその逆を意味している。

貯水直後の図(a)の比抵抗変化率では、貯水と堤体が接する上流面に沿って層状の低比抵抗化した部分が捉えられた。一方、堤体内部の基礎地盤に近い領域では、

貯水後比抵抗値が上昇していることが分かった。堤体基礎に設置したオープンピエゾメータでは、貯水による間隙水圧の上昇が認められなかったため、浸潤がその原因ではないと推測された。このことから、盛立材料が粘性土であるため、圧密により堤体の間隙構造が緻密化し、比抵抗値が上昇したものと判断した。堤体下流法面で見られる高比抵抗化した部分は乾燥による比抵抗値の上昇であると考えられた。

図(b)に示した3ヶ月後の結果では、上流側において、さらに低比抵抗化した領域が拡大した。また、堤体中段から下段に向かって低比抵抗化している様子がとらえられた。一方、堤体下流法面では、貯水後も乾燥の影響が残り、高比抵抗化のままであった。

図(c)に示した貯水1年経過後の結果では、低比抵抗化した変化率 $-2\sim -4\%$ を示す領域が堤体内部全体に出現している。築堤時に埋設しておいたオープンピエゾメータにも貯水後の経過に応じた水位上昇が見られることから、堤体全体に貯水が浸潤し、比抵抗値が低下したと推測できた。

図(d)に示した模擬水みち用の有孔管を開放した直後の結果は、解放直前の結果である図(c)に比べ、逆に比抵抗値が上昇している領域が部分的に見られた。しかし、その変化率は $\pm 2\%$ であり、計測誤差の範囲内であった。

次に、Fig.4-22にEW断面の変化率を示す。西側から距離約1mまでのゾーンに比抵抗が低下、3m以降のゾーンに上昇した部分が見られた。これは、地面を掘り込

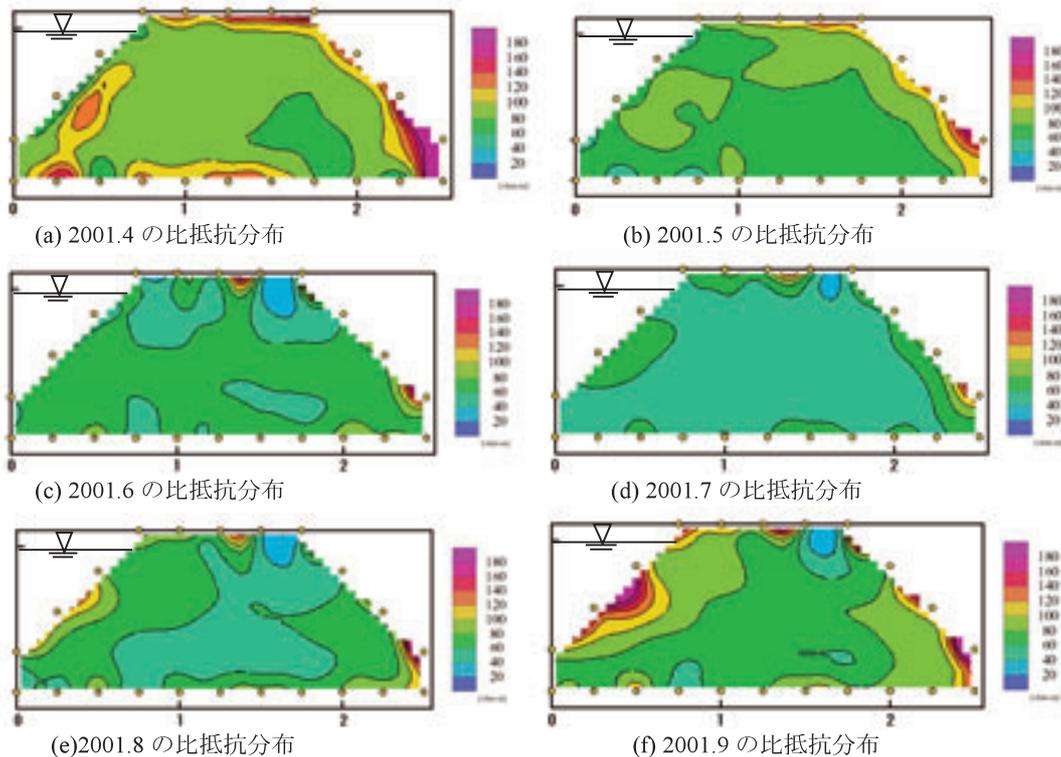


Fig.4-19 NS-2断面の比抵抗分布図

Change of resistivity distribution at NS-2 section

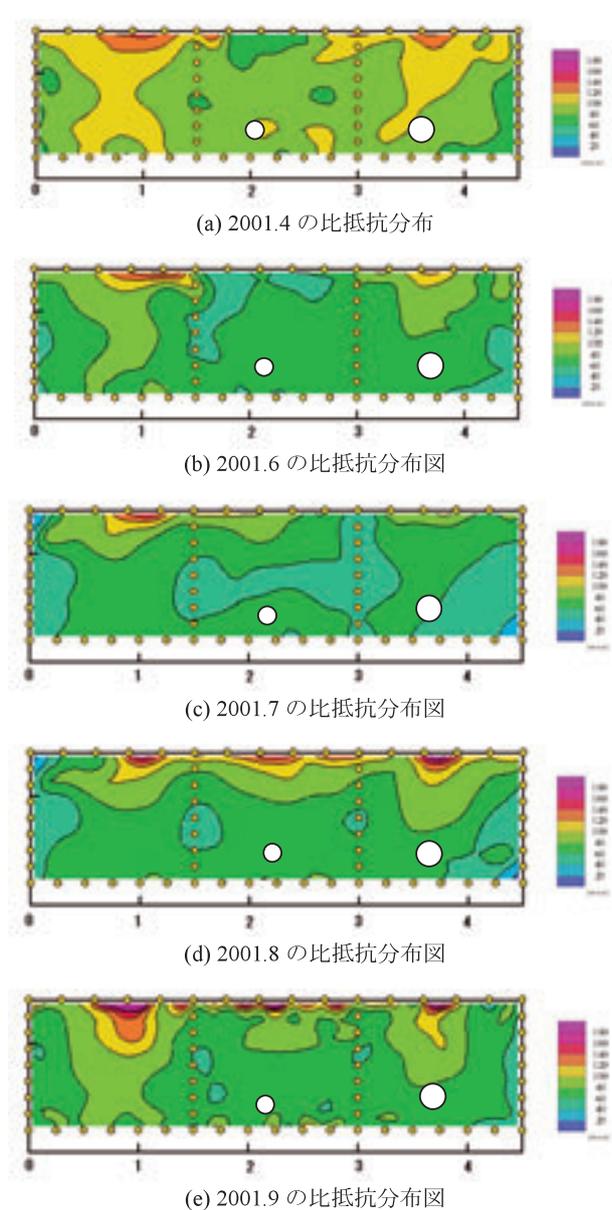


Fig.4-20 EW 断面における比抵抗分布図
(図中○は水みちの位置)

Resistivity distribution at EW section

(Circles show the place of artificial partial water flow)

み築堤した両サイド地山比抵抗値の影響を受けたものであると推測された。特に、東端の比抵抗の上昇した部分は、地面の掘り込みから築堤までの間に地山の乾燥が進み、地山に乾燥亀裂が生じたほど乾燥の程度が著しい状況であったため、この影響を受けて試験堤体の自然乾燥が進んだことによるものと考えられた。したがって、比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理を行う場合、事前に地山の比抵抗構造を明らかにする必要がある。こうした部分を除けば、EW 測線では、貯水直後には貯水の影響は見られなかった。図 (b) の貯水 3 ヶ月後の結果でも、圧密沈下や乾燥による比抵抗値の上昇が顕著に認められたことから、貯水 3 ヶ月後では、まだ貯水の影響がダム軸まで達していないことが確認できた。以上の結

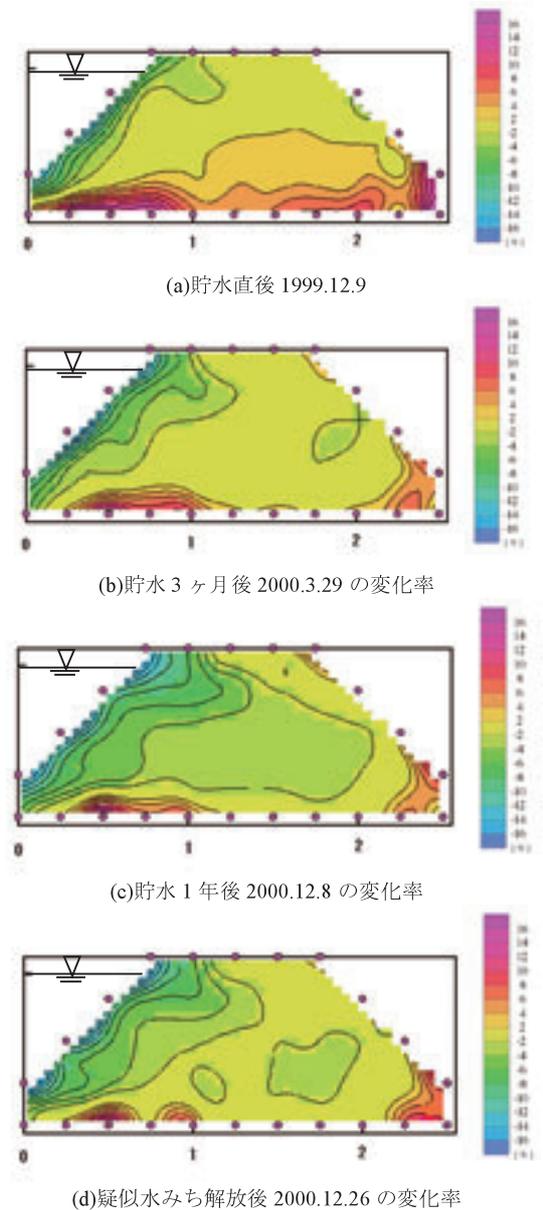


Fig.4-21 貯水前 (1999.11.18) の計測値に対する NS-2 断面の比抵抗値経時変化率

Change ratio of resistivity at NS-2 section compared with the resistivity in 1999.11.18

果は、試験堤体の透水係数 $1.13 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ および貯水による水頭が 1m 不足であることから、妥当な結果であると推測された。

e 試験堤体を用いた小規模なモデル実験のまとめ

ここでは、比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理の実証試験に先立ち、堤高 105cm の小規模な試験堤体を用い、比抵抗トモグラフィ法による貯水の浸潤過程のモニタリングを試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 貯水前の比抵抗分布は、表層ほど比抵抗値が高く、堤体内部ほど低い状態であった。これは、築堤後の堤体表層部の自然乾燥によるものと考えられる。
- ② 貯水後の比抵抗変化は、まず、貯水側の法面に沿っ

た形状で低比抵抗化した領域（表層から 15～25cm 程度）が生じ、低比抵抗化が徐々に堤体内部へと広がった。これは、堤体内部に浸潤しつつある現象をとらえられているものと判断された。

- ③ 堤体と地盤との着岸部付近には、貯水後も高比抵抗化した部分が残った。これは、堤体直下の地盤中に埋設したオープンピエゾメータの水位が確認できないことから、貯水は堤体最下段層や地盤表層を浸透せず、主として貯水側の池底地盤から堤体地盤の比較的深部に直接浸透しているものと推測された。この現象は、堤体下流の築堤基礎地盤から掘り下げたオーガボーリング孔の水位が G.L.-2.5～-3.0m 程度であることから推測される。
- ④ 水みち解放後の比抵抗値は徐々に減少する傾向にあった。
- ⑤ 2001 年 7 月の比抵抗値は、他の月と比較して非常に低い比抵抗値を示した（Fig.4-19(d), Fig.4-20(c)）ことから、地中の温度影響も無視できない可能性がある。
- ⑥ 落水後の比抵抗変化は、上下流法面や天端から高比抵抗化していく様子が可視化できた。

以上の結果から、比抵抗トモグラフィ法により、堤体内部の浸潤過程を可視化できる見通しが得られたと判断した。そこで、東北農政局郡山土地改良建設事業所管内の高柴調整池を対象に、本安全管理システムを導入することにした。次項では、高柴調整池の概要を示すとともに、事前に基礎地盤を対象として実施した比抵抗トモグラフィ法および水平電気探査の結果について報告する。

6 実規模の調整池を用いた比抵抗トモグラフィ法による実証試験

— 調整池の概要と事前検討結果 —

a 調整池の概要

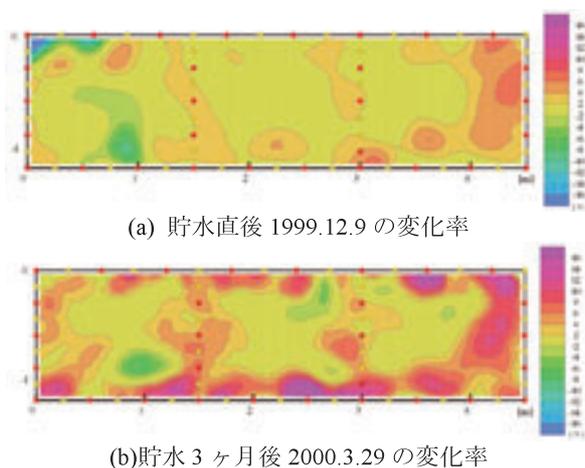


Fig.4-22 貯水前（1999.11.18）の計測値に対する EW 断面の比抵抗値経時変化率

Change ratio of resistivity at EW section compared with the resistivity in 1999.11.18

小規模モデル実験の結果から、比抵抗値の異なる貯水が堤体内部に浸潤して飽和した場合、その領域を比抵抗値の変化した部分として可視化できることが明らかとなった。この結果を受けて、実規模での実証試験を行うことにした。現地は東北農政局管内の高柴調整池である。本調整池の工事は、1998 年 10 月基礎掘削から開始し、2001 年 12 月に堤体盛立を完了、同年 9 月から試験湛水を実施した。ここでは、調整池の概要、電極配置計画とともに、堤体盛立前に基礎地盤表面から行った比抵抗トモグラフィ法および水平電気探査の結果について述べる。

(1) 高柴調整池の概要

高柴調整池は、国営総合農地開発事業「郡山東部地区」において、地区内の農業用水を確保する目的で建設した調整池である。取水源は、約 7km 南に位置する三春ダム（国土交通省；多目的ダム）である。三春ダムより取水した農業用水はパイプラインによって高柴調整池まで送水される。三春ダムの貯水位が高い時には、自然流下による注水が可能であるが、水位を下げる洪水期には自然流下で注水できないため、高柴調整池下流の県道脇に設置した揚水機場から毎秒 0.032m³ で加圧注水される。かんがい期には斜樋から毎秒 0.153m³ で取水され、一部はそのまま受益地へ、一部は揚水機場から高柴調整池北側の丘陵地に設けた配水槽にポンプアップした後、自然流下により受益地に送水される。調整池の規模は、堤高 24.3m、堤頂長 128m、堤頂幅 6.0m、堤体積 98,700m³、総貯水量 115,000m³、有効貯水量 111,000m³ である。Table 4-4 にダム諸元を記す。堤体の築堤材料はダムサイト周辺に厚く分布する風化花崗岩（マサ）である。この材料は主として遮水性～半透水性であり、ダムサイト周辺ではロック材の確保が困難であったことから、ダムタイプは均一型を原型とし、堤体の遮水機能を強化するために中央部に遮水ゾーンを設ける中心遮水ゾーン型アースフィルダムとしている。Fig.4-23 に堤体の標準断面図、Photo 4-3 に写真を示す。ゾーン I a、ゾーン I b の設計透水係数は、それぞれ 1×10⁻⁵cm/s 以下、5×10⁻⁵cm/s 以下である。

(2) 周辺の地形地質の概要

高柴調整池周辺の地質は、北部阿武隈山地系に属し、古期花崗閃緑岩類及び新期灰色黒雲母花崗岩類が分布する地域にあたる。ダムサイトで確認される主な地質は、花崗岩類の花崗岩、花崗閃緑岩、閃緑岩であり、ペグマタイトやアプライトなどの岩脈が複雑に分布している。

調査ボーリングおよびカーテングラウチング用パイロット孔掘削時に採取したコアから推定した調整池基礎の地質断面図を Fig.4-24 に示す。主として花崗岩からなり、表層ほど風化が進んでマサ化している。岩級はほぼ C_L～D_H 級に相当する。左岸は、下部が花崗岩～花崗閃緑岩、上部が強風化閃緑岩から成る。基礎地盤の花崗閃緑岩は非常に堅硬であり、岩級は C_H 級である。河床部コ

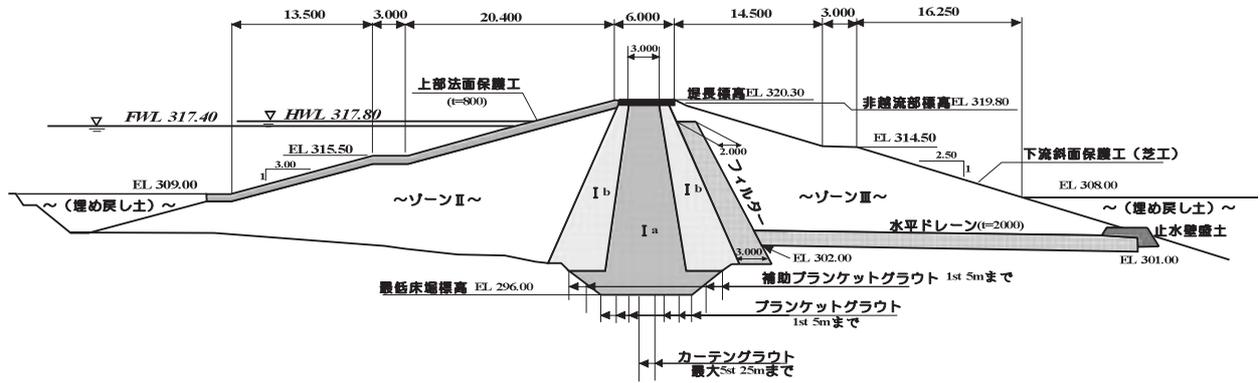


Fig.4-23 高柴調整池標準断面図
Cross section of Takashiba reservoir

Table 4-4 ダム諸元表

Property of Takashiba reservoir

ダム名		高柴調整池
一般	ダム所在地	福島県郡山市西田町高柴地内
	基礎地盤地質	花崗岩類
	ダム目的	かんがい
貯水池	流域面積	直接：0.14km ² , 間接：0km ²
	貯水量	総貯水量：115,000m ³ 有効貯水量：111,000m ³
	設計堆砂量	4,000m ³
洪水吐	形式	自由越流式立坑型
	設計洪水量	6.0m ³ /s
	ゲート	なし
	減勢工形式	強制跳水型
堤体	形式	中心遮水ゾーン型アースフィルダム
	堤体規模	堤高24.3m, 堤頂長128m 堤体積98,700m ³
仮排水路	形式	トンネル
	設計流量	2.0m ³ /s
設計震度	0.15 (中震帯)	
監査廊	なし	
取水設備	形式	斜樋
	最大取水量	0.153m ³ /s

アトレンチは、右岸側が主に花崗岩、左岸側が主に閃緑岩からなり、その境界部には、熱変質などにより岩種の色調の変化および部分的な強度低下が見られる劣化帯が存在する。また、この劣化帯部には幅 5~10cm の筋状の白色変質部がいくつか分岐して形成されている。この劣化帯部分の施工は、表層のゆるみ部を撤去し、コンタクトクレーおよび着岩材で置き換えることにより対応した。また、右岸アバット直下には、地下 30m 程度にまで高ルジオン帯の垂れ下がり部が存在していた。

b 水平電気探査による基礎地盤の比抵抗構造調査

堤体の比抵抗トモグラフィ法による調査に先立ち、基礎地盤の比抵抗構造を把握することを目的として、盛立前に水平電気探査を行った。

(1) 調査方法

調査は高柴調整池のダム軸に沿って、左岸工専用道路



Photo 4-3 高柴調整池堤体を上流から望む
(試験湛水開始直後)
View of Takashiba reservoir from the upstream
(Just after the test filling)

から堤体右岸にある土取場 C の奥地にかけて測線を設置して行った。測線図を Fig.4-25 に示す。

(2) 測定方法

水平電気探査は、ダイポール・ダイポール 4 極法により計測した。測定は原則として 10Hz, 3Hz の 2 種類の方形波電流を通電することにより行い、両者の結果に 1 割以上の差がない場合、3Hz の電流を通電した時の電位差を解析採用値として用いた。なお、ノイズなどの影響により 10Hz, 3Hz での測定値に 1 割以上の誤差があった場合には、さらに低周波の 0.3Hz 方形波電流での測定を行い、これを解析採用値としている。

測定の間隔は斜距離で 4m とし、電極の移動は 4m、見かけの探査深度は表層から深度 160m までを対象として実施した。なお、電極配置の総組み合わせ数は 1,467 であった。測定条件を Table 4-5 にまとめる。さらに、測定結果の解釈をより正確に行うため、閃緑岩 (D_H~C_L 級) について、その露頭比抵抗値を河床部コアトレンチ内部、下流側堤敷の計 4 箇所測定した。

(3) 調査結果

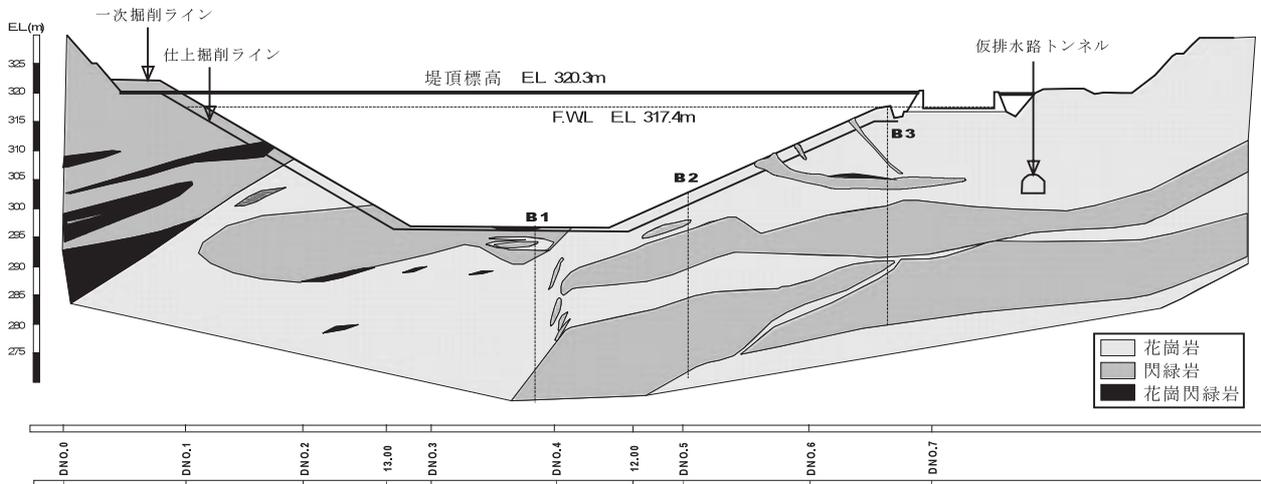


Fig.4-24 高柴調整池基礎地盤地質断面図

Geologic map at the damsite of Takashiba reservoir



Fig.4-25 水平電気探査測線位置図

Survey line of dipole-dipole electrical resistivity

Fig.4-26 に水平電気探査結果を示す。寒色系は比抵抗値が小さい（すなわち電気を通しやすい箇所）を示し、暖色系は比抵抗値が高い（すなわち電気を通しにくい箇所）を示している。

結果をみると、大別して、①100Ω・m以下の低比抵抗部、②100～500Ω・mの中程度の比抵抗部、③500

Ω・m以上の高比抵抗部に分類できる。

①は測点 68～84m 付近に見られるほぼ鉛直に延びる低比抵抗部および測点 268～328m の土取場Cの部分に分布する。Fig.4-24 に示した地質図と対応させると、河床部 68～84m 付近では、地表面に現れている劣化帯部分（閃緑岩と花崗岩の地質境界）において、比抵抗値が小さくなっていることが分かった。劣化帯においては、閃緑岩と花崗岩との接触により、部分的に白色粘土化している状況も見られたことから、この粘土部分が低比抵抗としてとらえられたものと推測される。さらに、168m 付近に低比抵抗帯が分布しているが、これは仮排水路トンネルの位置にほぼ一致する。トンネルは空洞であるため、一般的には電流が流れない高比抵抗値を示すと想定

Table 4-5 測定条件

Condition of measurement

測線長 (m)	電極数 (本)	電極間隔 a (m)	隔離係数	見かけ深度 (m)	電極の移動間隔 (m)
356	90	4	1-9	4-20	4
		8	5-9	24-40	4
		16	5-9	48-80	4
		32	5-9	96-160	4

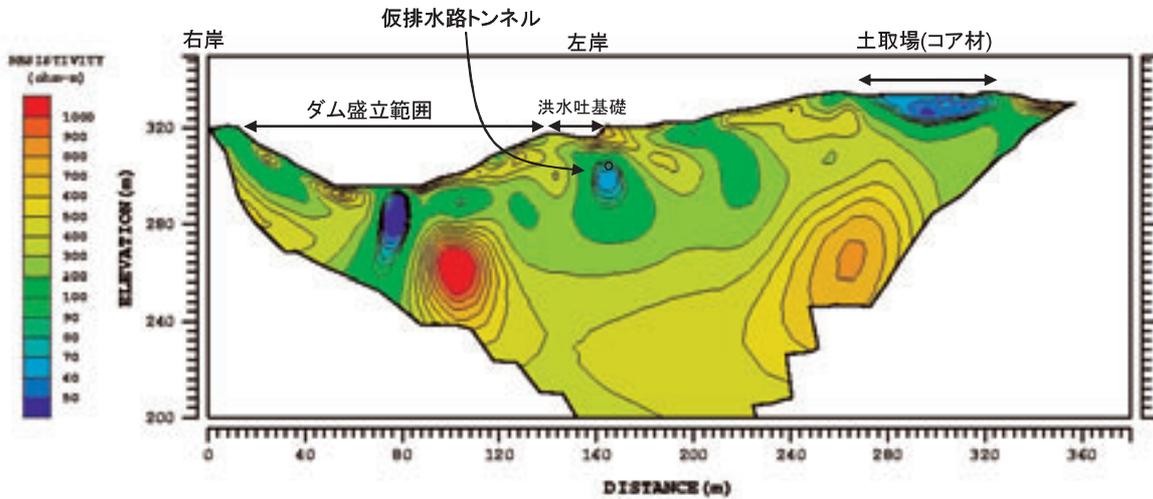


Fig.4-26 水平電気探査 (ダイポール・ダイポール 4 極法) による比抵抗構造調査結果
Result of electrical resistivity survey (dipole-dipole electrodes array)

される。今回、低比抵抗部として現れた原因は、トンネル断面が $2R=1.8\text{m}$ と電極間隔に比べてトンネル断面が小さいこと、かつ仮排水路トンネルが右岸地山からの比抵抗の低い地下水 ($25\sim 33\Omega\cdot\text{m}$) を集水する役目を果たしていることから、全体的に低比抵抗領域として認識されたものと推測できる。一方、土取場Cは、高柴調整池遮水材 (I a および I b) の採取場である。事前に最適含水比で締固めた I a 材の比抵抗値 ($\phi 5\text{cm}\times\text{h}10\text{cm}$) を測定したところ、約 $60\Omega\cdot\text{m}$ 程度であることを確認している。今回の水平電気探査結果でも、土取場Cの比抵抗値は $80\Omega\cdot\text{m}$ 以下であり、室内で求められている I a 材の比抵抗値とよく一致した。したがって、土取場選定手法として、従来からの弾性波探査だけでなく、水平電気探査も活用できる可能性が示唆された。

一方、③の高比抵抗部は、左岸アバット下部～測点 60m 付近の地表付近、測点 100m 付近の EL.280m 以深、測点 240～280m の EL.280m 以深に見られた。左岸アバット下部～測点 60m 付近は、地表面で確認された C_H 級の新鮮な閃緑岩を捉えたものである。測点 100m の EL.280m 以深の高比抵抗部も、同じく C_H 級以上の閃緑岩と対応している。測点 240～280m の EL.280m 以深の高比抵抗部については、これらの結果を踏まえると新鮮

な閃緑岩が分布しているものと推測できる。

(4) 閃緑岩の直接比抵抗値測定結果

高柴調整池基礎地盤においては、深部に硬質な閃緑岩、地表面付近には風化して砂のように変質した閃緑岩が分布している。そこで、地表面に現れている閃緑岩部に電極を 1m 間隔で設置し、閃緑岩の比抵抗値を直接ダイポール・ダイポール 4 極法で測定した。測定対象とした閃緑岩は、風化した $D_L\sim D_H$ 級閃緑岩である。結果を Table 4-6 にまとめる。比抵抗値は、ダイポール・ダイポール法の見かけ比抵抗値計算式

$$\rho_a = \pi \cdot a \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot V / I \quad \dots (4.3)$$

より求めた。ここで、 ρ_a : 見かけ比抵抗値 ($\Omega\cdot\text{m}$)、 a : 電極間隔 (m)、 n : 隔離係数、 V : 計測される電位差 (mV)、 I : 電流値 (mA) である。

この測定結果、同じ風化閃緑岩でも比抵抗値が $75\sim 500\Omega\cdot\text{m}$ と異なっており、水平電気探査の結果のみで地質を特定することは難しいという結論となった。さらに、岩級区分による相関も見られなかった。水平電気探査の見かけ比抵抗値の計算では、測線の走向方向には比抵抗構造が変化しないという前提のもとに計算される値であるため、地表面で確認した閃緑岩だけでなく、周囲

Table 4-6 閃緑岩の直接比抵抗値測定結果

Resistivity of diorite by direct resistivity measurement

番号	測点 No.	岩級区分	電流値 (mA)	電位差 (mV) 10Hz 矩形波	電位差 (mV) 3Hz 矩形波	比抵抗値 ($\Omega\cdot\text{m}$)
①	DNo.3+13 (下流堤敷)	DH~DL	50	198	200	75.4
②	DNo.3 (河床部)	DH	50	740	749	282
③	DNo.2+15 (下流堤敷)	DH	50	1,270	1,300	490
④	DNo.3+8 (下流堤敷)	DH~DL	50	934	952	359

に分布している様々な岩種の影響を受けたことが原因であると考えられる。さらに、間隙率や間隙を満たす水の比抵抗値の相違、含まれる粘土鉱物の含有量の相違などによって同じ岩であっても比抵抗値が異なることから、水平電気探査結果の解釈を行う場合には、ボーリング結果や電気検層結果など、他の調査法と組み合わせて調査を実施し、結果を解釈する必要がある。

c 比抵抗トモグラフィ法による基礎地盤の比抵抗構造調査

水平電気探査の結果から、ダム軸の比抵抗構造が明らかになった。しかし、風化閃緑岩の露頭比抵抗調査結果が岩級などとの相関が見られず、解釈が困難であった。そこで、グラウチング用に削孔した孔内に電極を設置し、比抵抗トモグラフィ法による比抵抗構造調査を実施した。

(1) 調査方法

比抵抗トモグラフィ法による基礎地盤の比抵抗構造調査は、既に堤体内部の比抵抗トモグラフィ法を実施するために削孔し、電極の設置を行ったボーリング孔 B1, B3, B3 の 3 孔およびこのボーリング間の地表面に設置した 16 本の電極を用いて実施した (Fig.4-27)。電極間隔は 2m とし、2 極法により比抵抗値の計測を行った。2 極法では、電流電極および電位電極の一方を測線外の離れた位置に設置し、測線内で移動させる電極を電流電極 1 個、電位電極 1 個とするため、自動測定を容易に行えるという特長を持っている。測定に使用した電極数は、ボーリング孔内電極 43 個、地表面の電極 16 個の計 59 個である。送信電極は電極番号 1 からひとつおき (電極番号 1, 3, 5...) とし、受信電極は送信した電極を除くすべての電極 (58 個) とした。

(2) 調査結果

2 極法による測定結果を Fig.4-28 に示す。表層部から

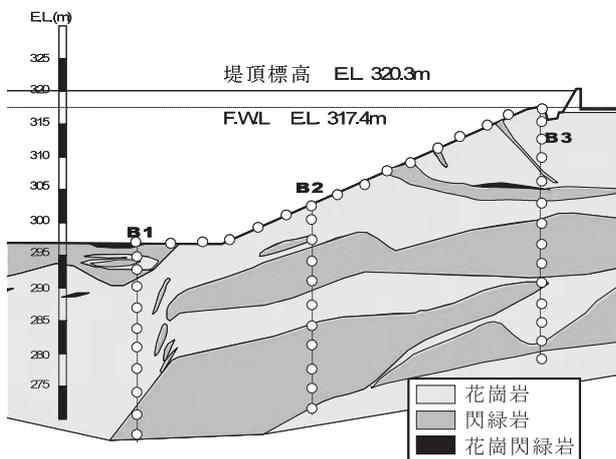


Fig.4-27 比抵抗トモグラフィ法電極配置図

(白丸が電極位置を示す)

Electrodes array at the section of resistivity tomography

(White circle:electrode)

約 6m までの比抵抗値は $500 \Omega \cdot m$ 以上と高い比抵抗値を示した。水平距離 24~34m, EL.290m に $100 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗の領域が水平に分布しており、さらにそれより深いところでは比抵抗値が高くなる、という層構造がとらえられた。想定されている地質図によれば、表層部分が花崗岩、EL.290m 付近に広く閃緑岩が分布し、さらに深い部分では再び花崗岩と閃緑岩が出現している。比抵抗分布と比較すると、花崗岩に相当する領域が高比抵抗、閃緑岩に相当する領域が低比抵抗としてとらえられており、比抵抗トモグラフィ法による比抵抗分布が地質図とよく対応していた。

一方、B1 孔付近の水平距離 0~4m までの領域では、垂直方向に $50 \Omega \cdot m$ 以下を示す低比抵抗帯が分布している。地質状況から、B1 周辺は花崗岩と閃緑岩との接触部付近であり、地表面には熱的変成を受けて生成されたと推定される白色粘土が分布していた。一般に、細粒子が多く、粘土化した領域は、低比抵抗値を示すことから、B1 近傍での比抵抗値が小さくなっていると推定される。

Fig.4-26 で示した地表面からのダイポール・ダイポール法による水平電気探査結果と比較すると、表層付近の比抵抗分布は、両者とも非常に一致を示しており、地質図で示されている表層の花崗岩、その下位の閃緑岩が区別できた。したがって、比抵抗構造の概略を調査する場合、ダイポール・ダイポール法による水平電気探査が十分有効であると考えられる。しかし、調査対象とする領域がより深い位置にあるような場合、水平電気探査では、深度が深くなるにつれて比抵抗構造が不明瞭になる可能性がある。それに対し、比抵抗トモグラフィ法では、特に電極を設置したボーリング孔周辺の比抵抗情報がより鮮明にとらえられる。

(3) ボーリング調査および電気検層の調査結果との比較

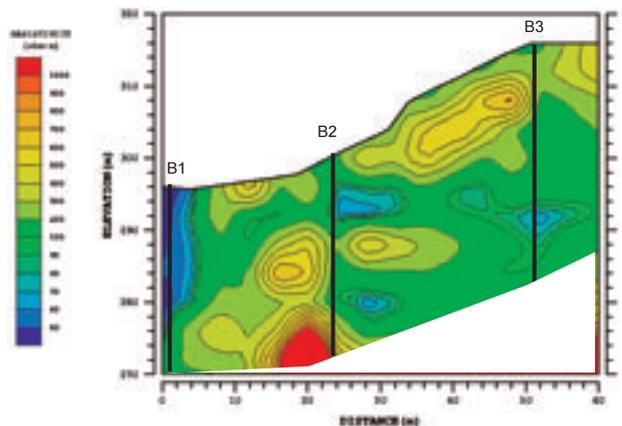


Fig.4-28 比抵抗トモグラフィ法 (2 極法) による

比抵抗構造調査結果

Result of resistivity tomography using pole-pole array

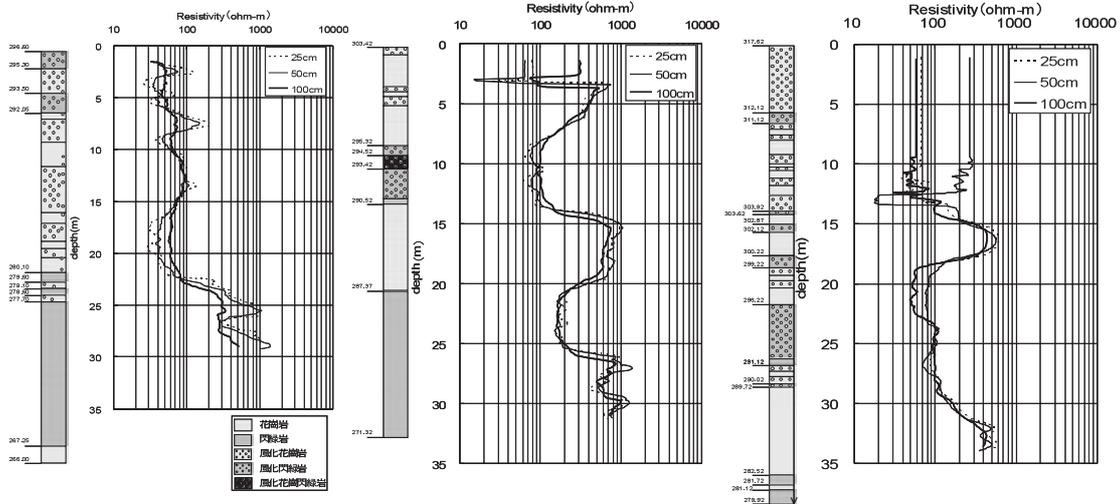


Fig.4-29 比抵抗トモグラフィ用ボーリング孔の柱状図および電気検層結果 (左からB1, B2, B3 孔)
Result of geologic column and electrical logging of the boring for resistivity tomography (B1, B2, B3 from left)

比抵抗トモグラフィ法によって明らかになった右岸アバット近辺の比抵抗構造を検証するため、B1, B2, B3のボーリングコアの性状や、削孔時に行った電気検層結果との整合性を確認した。B1, B2, B3それぞれのボーリング柱状図および電気検層結果を Fig.4-29 に示す。電気検層は、電極間隔を 25cm, 50cm, 100cm の 3 種類として比抵抗を調査した結果を示している。

まず、B1 孔について比抵抗トモグラフィ法の解析結果と比較した。B1 孔のボーリングコアによって確認された地質は、主として閃緑岩と花崗岩であり、これらが層状に混在していた。電気検層結果では、ほぼ $100 \Omega \cdot m$ 以下の比抵抗値が EL.279m 付近まで連続していた。風化した地質では、花崗岩の方がやや高い比抵抗を示していた。EL.279m より深部では、地質は硬質な閃緑岩が主体となり、比抵抗値も局所的にはあるが、 $1,000 \Omega \cdot m$ 以上となっている部分も見られた。以上の結果を Fig.4-28 と比較すると、EL.279m 付近まではほぼ $50 \Omega \cdot m$ 以下であり、電気検層結果と整合する。それより深い部分では、若干比抵抗値が高くなっているものの、電気検層で見られるような $1,000 \Omega \cdot m$ を超える比抵抗値は認められなかった。電気検層において、電極間隔が小さいときに高い比抵抗値を示していることから、局所的に高比抵抗部が存在しているものの、電極間隔 2m の比抵抗トモグラフィ法では十分とらえきれなかったと考えられる。

次に、B2 孔について考察した。B2 孔では、EL.294m 付近に一部風化花崗閃緑岩が確認されているが、全体としては花崗岩と閃緑岩の 2 種類が卓越して分布していた。電気検層結果では、花崗岩の部分で $500 \sim 1,000 \Omega \cdot m$ 以上の高い比抵抗値を示し、閃緑岩ではほぼ $200 \Omega \cdot m$ 以下の比抵抗値を示した。ただし、深部の新鮮な閃緑岩では、花崗岩と同様、 $1,000 \Omega \cdot m$ を超える比抵抗値が確認されていた。これらの比抵抗値の結果と、 Fig.4-

28 とを比較すると、 Fig.4-28 では EL.283~288m, EL.278m より深い部分の 2 箇所が高い比抵抗値を示す部分が認められ、電気検層の結果とほぼ整合していることが明らかとなった。

おわりに、B3 孔について考察した。B3 孔は右岸地山アバット天端付近からのボーリングであったため、地下水位が GL. で 15m 以下となっていた。B3 孔も他のボーリング孔と同じく、花崗岩と閃緑岩との互層となっていた。まず、EL.302~299m 付近の新鮮な花崗岩では、比抵抗値がおおよそ $500 \Omega \cdot m$ となっていた。それより深くなると、比抵抗値が $50 \sim 80 \Omega \cdot m$ 程度の低比抵抗部分が出現した。さらに EL.288m 付近までは $100 \Omega \cdot m$ 程度であるが、それ以深の部分では、再び $400 \sim 600 \Omega \cdot m$ 程度の高比抵抗領域が出現した。この部分は地質図と対応すると新鮮な花崗岩に相当した。以上の電気検層の結果を比抵抗分布図と比較すると、深度の情報はずれているものの、一部高比抵抗値となっている EL.302~299m 付近に相当すると思われる高比抵抗領域、および EL.294~288m に位置する $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗領域、さらに深い部分ではやや比抵抗値が上昇する傾向がよく一致した。

以上、ボーリング孔の地質、電気検層結果、比抵抗トモグラフィ法によって明らかにされた比抵抗分布を比較した結果、高柴調整池基礎地盤の比抵抗構造として、次のことが明らかとなった。

- ① 花崗岩はおおむね $500 \Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗値を示し、閃緑岩はそれよりも低い値を示した。
 - ② 花崗岩、閃緑岩にかかわらず、未風化の新鮮な岩盤の比抵抗値は高比抵抗値を示した。
 - ③ 電気検層から得られる比抵抗分布と、比抵抗トモグラフィ法で得られた比抵抗分布とは、おおむね傾向が一致していた。
- したがって、ボーリング孔がない領域でも、比抵抗ト

モグラフィ法で得られた比抵抗分布から、およその地質分布が推定できると思われた。しかし、閃緑岩の直接比抵抗値測定結果で示されたように、比抵抗分布のみから基礎地盤の地質を特定することは不可能であることが分かった。今回の結果の場合、比抵抗値が高い場合、それが新鮮な閃緑岩なのか、花崗岩なのかの判定は難しい。あくまで、ボーリング孔との対比や、相対的な比抵抗分布の差異から、地質を推定することになる。

7 調整池堤体内部の比抵抗モニタリング結果および考察

2000年4月より高柴調整池の盛立を開始し、同年12月、非越流部ダム天端標高 EL.319.8m までの盛立を完了した（日数；255日間）。翌2001年9月25日から試験湛水を開始し、常時満水位で1ヶ月間の水位保持期間を経たのち、さらに最低水位にまで貯水位を下げ、1ヶ月間保持し、試験湛水を終了した。本節では、試験湛水前および試験湛水期間中に実施した比抵抗トモグラフィ法による高柴調整池堤体内部の比抵抗モニタリング結果を示し、比抵抗変動要因について考察する。

a 比抵抗トモグラフィ法に用いる電極・電線の仕様および電極設置位置

(1) 電極・電線の仕様

高柴調整池に埋設した電極および電線を **Photo 4-4** に示す。電線は15芯で、仕上がり外径が $\phi 16\sim 18\text{mm}$ 、ケーブル重量が350kg/kmの多芯ケーブルであり、電極部はSUS製の編みネット状のものとした。

この編みネット状電極部は、目的以外の多芯ケーブルと絶縁されていなければならないため、以下の手順で電極部の水密性試験を実施した。

1. 約3mの多芯ケーブルの中間に電極を取り付け、両端をシールしたケーブルを準備する。
2. この供試体を $\phi 170\text{mm}$ のマンドレルに5往復巻き付け巻き戻しを行い、多芯ケーブルに大きな変形をあらかじめ与える。
3. ケーブルを水圧0.49MPaの耐水圧容器内に24時間



Photo 4-4 埋設した電線・電極

Buried electroneode and electric cable

放置する。

4. 耐水圧容器から取り出したケーブルの電極部を解体し、多芯ケーブル内に水が侵入していないかどうか調べる。

以上の水密性試験の結果、SUS電極部と多芯ケーブル内には、水の浸入が見られず、完全に遮水されることを確認した。また、電極部を含む多芯ケーブルを2個のドラムに巻き付け、一方のドラムを固定し、片方のドラムを移動させる引張試験を実施した。その結果、多芯ケーブル内の15芯のうちの1芯に断線が発生した時の張力は9.2kNであり、そのときの伸びは2.0%であった。試験後に供試体を解体し断線位置を特定した結果、断線した箇所はドラム間に配置した電極部ではなく、ドラムに巻き付けて固定した多芯ケーブルの曲率の大きい屈曲部（1ターン目）であった。したがって、開発した電線および電極部は、堤体の沈下に十分追従できること、さらに、屈曲部以外の引張時にはさらに断線に対する抵抗力は高いことが確認できた。

(2) 電極配置位置

当初、比抵抗トモグラフィ法により、堤体遮水部内部の浸透状況のみをモニタリングする計画であった。しかし、これまでの知見によれば、堤体遮水部内部に漏水の原因となる水みちが発生するケースは稀であり、むしろ堤体基礎部あるいは盛土の岩着部付近において水みちが発生する可能性の方が高いとされている。そこで、堤体遮水部のみでなく、堤体基礎地盤内にも電極を埋設し、比抵抗トモグラフィ法による計測を行うことにした。この際、

1. 高柴調整池における埋設計器の設置数は間隙水圧計で34箇所、岩盤変位計2箇所、層別沈下計1箇所であり、調整池の規模からすると相当の点数があり、多数のケーブルを堤体内に埋設しなければならないこと（監査廊がなかったため）
2. これら以外に比抵抗トモグラフィ法に使用する電極を埋設するとなると、さらに多くのケーブルを堤体内部に埋設しなければならず、堤体自体の安定性に問題が生じる懸念があったこと
3. 本実験はあくまで実証試験の段階であり、本システムにより堤体内部すべてをモニタリングする必要性がないこと

などや、先に述べた地質性状（劣化帯、高ルジオンゾーンの存在）を考慮し、電極は堤体右岸側を中心に配置した。

Fig.4-30 および **Fig.4-31** に高柴調整池における電極配置図を示す。電極は水平間隔4m、垂直間隔2mを基本として配置した。電極は基礎処理のボーリング孔を有効活用するため、主カーテングラウチングを実施したダム軸上流側50cmに設置している。

(3) 電極の施工

河床部B1孔と右岸アバット部B2孔を1999年11月

に設置した。その後、右岸アバット最上部 B3 孔を 2000 年 2 月に設置した。Fig.4-30, 4-31 に示した基礎地盤内の電極は、基礎処理が行われている際、基礎処理で掘削したボーリング孔を活用して設置した。削孔したボーリング孔内に電極ケーブルを垂らし、固定後、孔をセメントミルク (C:W=1:1) で充填した。

高柴調整池堤体の盛立は 2000 年 4 月に開始した。これに先立ち、まず、ダム軸方向堤体下部の電極を埋設した。基礎地盤内に 20cm×20cm のトレンチを掘り、コンタクトクレーを厚さ 10cm 敷き、その上に電極ケーブルを人力で敷設した後、再度コンタクトクレーで埋戻す方式をとった。この方法により、ケーブル周辺に水みちが発生しないように配慮した。

基礎地盤内に埋設した電極は、一本の多芯ケーブルであるため、堤体盛立しながら上部に立ち上げていく方式を採用した。高柴調整池の遮水ゾーンの施工仕様は、盛立試験の結果、21t 級タンピングローラーでの転圧となった。施工時、遮水ゾーンが狭く、上方に立ち上げる電極の周辺は重機で転圧が不可能であったため、人力 (タンパ) により周囲の盛立よりも先行して転圧を行った。2000 年 12 月、堤体上部の L1 ケーブルを埋設し、すべての電極、電線を埋設した。施工の状況を Photo 4-5,

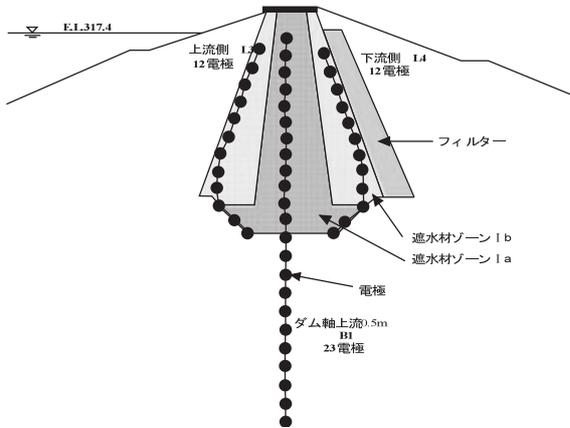


Fig.4-30 上下流断面電極配置図
Electrodes array at the upstream and downstream section

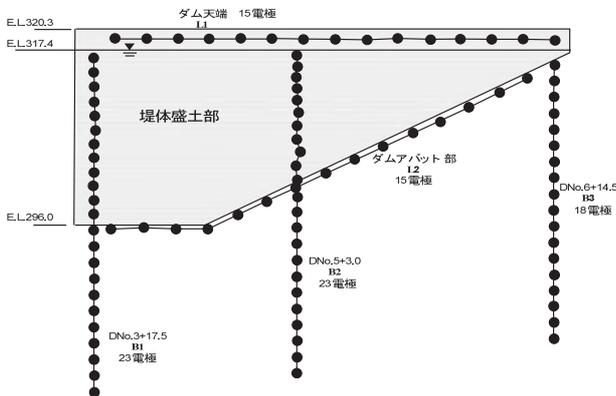


Fig.4-31 ダム軸断面電極配置図
Electrodes array at the axis of dam section

Photo 4-6に示す。

b 比抵抗トモグラフィ法の計測および解析方法

(1) 計測スケジュール

盛立完了から試験湛水にかけて、適宜比抵抗トモグラフィ法による堤体内部の比抵抗計測を実施した。まず、堤体の盛立が完了して約 3 ヶ月後の 2001 年 3 月にまず 1 回目の計測を行った。それ以降、試験湛水が開始される 2001 年 9 月まで、月に 1 度の頻度で計測を実施した。これは、湛水が始まる前の「基準となる比抵抗値」を精度よくとらえること、また月ごとにどの程度の変動があるのかを事前に点検すること、さらに観測に際して予期しない問題が発生するかどうかを確認することであった。以降、2001 年 3 月から 9 月までの期間を試験湛水前と定義する。その後、試験湛水期間中には、Fig.4-32 に示す日程で計測を実施した。

(2) 現地計測および解析の手順

現地計測および解析の手順は、次のとおり実施している。

- ① 現地計測
- ② データ加工
- ③ 領域の要素分割



Photo 4-5 基礎地盤面への電極設置状況
Setting of electrodes in the basement of the dam



Photo 4-6 垂直方向の電線の埋設状況
Setting of electrodes of vertical electrodes

- ④ FEM による順解析
- ⑤ 逆解析による比抵抗分布決定

ここでは、各項目についてその方法を示す。

[1] 現地計測

現地における比抵抗トモグラフィ法の計測は、次のとおり実施した。なお、計測時の電極組み合わせは、膨大な組み合わせを効率よく取得でき、S/N 比に優れる 2 極法を採用した。

まず、ダム軸最大断面付近の DNo.4 (Fig.4-24 参照) から平面距離で約 300m 堤体下流側に離れた位置に遠電極 (送信側)、上流側の離れた位置 (平面距離で約 400m) に遠電極 (受信側) を設置した。これらの遠電極は、遠電極設置位置の相違による計測への影響を極力抑えるため、計測のたびに毎回同じ位置に設置した。次に、堤体天端に設置した電極切替 BOX から計測に必要な端子を取り出し、測定機 (応用地質 (株) Mcohm-21) と接続して計測した。測定機は、堤体内部の 1 電極と遠電極との間に通電した電流値、およびそのときに堤体内部の電極と遠電極との間に発生した電位差を測る。計測の概念図を Fig.4-33 に、計測の状況を Photo 4-7 に示す。設定した C1P1 の電極の組み合わせにおいて、スタッキングを 3 回実施し、その平均値を計測値とした。計測したデータは、本体内蔵のメモリに保存され、フロッピーディスクにより外部に取り出すことが可能となっている。電極の組み合わせ数は、上下流断面で 1,081、ダム軸断面で 4,371 である。

[2] データ加工

現地計測が終了すれば、記録されているデータを測定機からフロッピーディスクに取り出し、解析に利用できる形式にファイルを加工する。ファイルには、送信電極、受信電極、送信電流、受信電位 (差) および繰り返し測定 (スタッキング) 時の標準偏差が記録されている。このとき、以下のようなデータは計測時の機械誤差として破棄した。

- 1. スタッキング 3 回の測定データの標準偏差が 2% 以上を示すもの

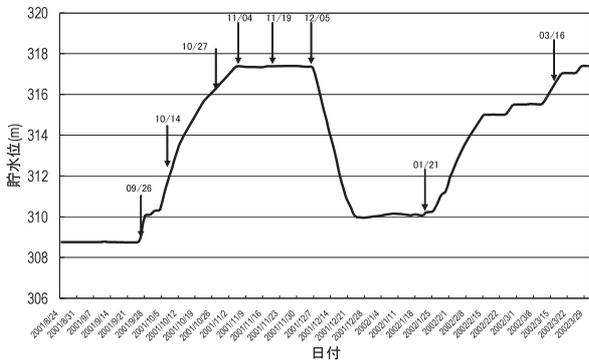


Fig.4-32 試験湛水期間中における比抵抗トモグラフィ法の観測スケジュール
Measurement shedule of tomography during test filling

- 2. 前回の計測値および今回より 1 回後の計測値が同程度にあるにもかかわらず、今回の値が 20% 以上異なる値を示すもの
- 3. 測定機の仕様により、1 度の通電で同時に 3 通りの組み合わせの電位データが取得できるが、この 3 つすべてが前回の値と 20% 以上変化したもの
これらの機械誤差が発生する要因として、計測時の天

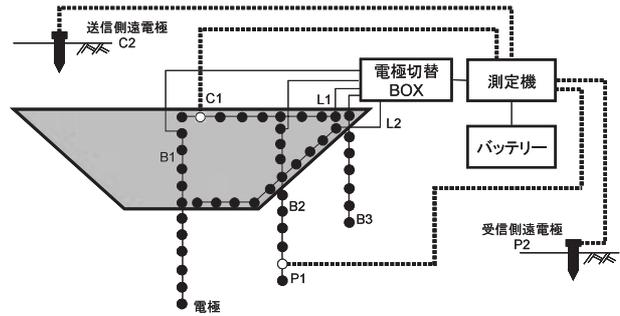


Fig.4-33 比抵抗トモグラフィ法による堤体の比抵抗値計測の概念図
Outline of measurement system of resistivity tomography



Photo 4-7 測定場所と測定機
(上：配電盤の脇にテントを設置、下：測定機・電極切替機およびバッテリーにより構成)
Measurement location and instrument
(Upper: Measument was made in a tent located near the electronodes, Lower: Instruments consisted of main controll unit, scanner unit and battery)

候(例えば雷雨など),送電線などの影響があるが,このような加工を行ったのは,「特定の電極組み合わせにおいて急激な計測値の変化はおこらない」ということを前提にしているためである。

【3】領域の要素分割

比抵抗分布を決定する領域について,有限要素法(FEM)による電位分布を求めるための要素分割を行う。比抵抗トモグラフィ法のデータ解析では,電極近傍の比抵抗情報を強く感知するため,電極周辺のメッシュを細かく分割し,電極から離れるにしたがって次第に荒いメッシュを作成した方が,全体の接点数が少なくなり,計算時間を短くできる。そこで,今回は,接点の自動発生およびデラウニ法による要素分割を行い,効率的なメッシュ分割を行っている。メッシュの分割図については後述する。

【4】FEMによる順解析

解析においては,第Ⅱ章と同様,比抵抗構造が探査断面と垂直の方向(ここではy方向とする)には変化しないという仮定を設けている。すなわち,y方向には同じ比抵抗構造が連続している準2次元構造である。解析では,3次元のポアソン方程式をy方向にフーリエ変換し,次元を3次元から2次元に下げ,おのおのの周波数成分についての2次元問題に分解して解く。その後,各周波数成分について2次元FEMによる計算を行い,得られた結果を逆フーリエ変換することによって,3次元の電位場を求める手法を採用している。

【5】逆解析による比抵抗分布決定

比抵抗トモグラフィをはじめ,比抵抗法の逆解析問題では,未知パラメータ(内部の比抵抗構造)が多いため,データに含まれる情報だけでは,すべてのパラメータを一意的に決定することができない。これを無理に解こうとすると,計算の途中で解が発散し,常識的に考えられない異常な比抵抗分布が得られるケースもある。そこで,今回の比抵抗トモグラフィ解析では,制約付き最小二乗法による逆解析を行っている。すなわち,式(2.12)の正規方程式

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \Delta \bar{x} = \mathbf{A}^T \Delta \bar{y} \quad \dots (4.4)$$

を解く場合,次のような拘束条件を加える。

$$\mathbf{A}^T \Delta \bar{y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \omega^2 \mathbf{C}) \Delta \bar{x} \quad \dots (4.5)$$

ここで, ω は,与えた拘束の度合いを示すパラメータ(ダンピング係数と呼ばれる), \mathbf{C} は制約の種類を決定する行列である。例えば \mathbf{C} 単位行列の場合,初期値にできるだけ近いという制約(初期値拘束)となる。この ω を導入することにより,制約条件を付加することができるため,比抵抗トモグラフィ法の解析が安定する。解析においては,試行錯誤的に定めた ω の中からAIC

(Akaike's Information Criterion)が最小となる解を最適解とした。ここで,AICは次のように定義した(杉本,1999)。

$$\text{AIC} = (\text{データ数}) \times \text{LOG}(\text{残差の平方和}) + 2 \times (\text{自由度}) \quad \dots (4.6)$$

(3) 解析条件および解析時のパラメータ設定

比抵抗トモグラフィ法の解析においては,まず,領域を要素分割し,FEMなどによる順解析を行える条件を設定する必要がある。次に,各節点(あるいは比抵抗ブロック)に比抵抗値(初期値)を割り当て,順解析を行う。FEMの順解析で得られた電位差(あるいは電位差から求まる見かけ比抵抗値)が実際の計測で得られた電位差(あるいは電位差から求まる見かけ比抵抗値)と同程度になるように,節点(あるいは比抵抗ブロック)の比抵抗値を修正する。そして,最終的に得られた比抵抗領域から順計算で求められるみかけの比抵抗値と観測値との二乗和が最小となるように試行錯誤的に比抵抗値を決定する。したがって,解析に影響を与える要因としては,FEMなどによる順解析の精度を確保する要素分割状況(範囲やメッシュの大きさ),未知パラメータとなる比抵抗ブロックの設定状況(比抵抗ブロックの領域,1ブロックあたりの大きさ,数など)のほかに,拘束の度合いを示すパラメータなどがある。今回の比抵抗トモグラフィ法の解析における解析パラメータは,次に示すとおりとした。

【1】上下流断面の解析パラメータ

上下流断面のFEMメッシュ図をFig.4-34に示す。横軸の座標は,堤体ダム軸を0とし,下流方向を正とした。上下流断面の解析では,鉛直方向の電極間隔が2mであったため,電極近傍のFEMメッシュは電極間隔の1/4分の0.5m前後を基本として,接点数2,335点,三角形要素数4,579に分割した。Fig.4-34の堤体近傍の拡大図をFig.4-35に示す。

一方,比抵抗値は,Fig.4-36に示すとおり,上下流距離-48~48m,標高258~318mを図のように四角形に分割し,四隅のグリッド(交点)に比抵抗値を与えた。各三角形要素の比抵抗値は,これを含む四角形の各角4点の比抵抗値から内挿によって求めている。したがって,上下流断面の解析で決定すべき未知数は,グリッド(交点)数323個である。なお,上下流断面で使用した電極は47電極,測定した電極の組み合わせは,1,081である。

【2】ダム軸断面の解析時パラメータ

ダム軸断面のFEMメッシュ図をFig.4-37に示す。ダム軸断面では,水平方向の電極間隔が4mであったことから,FEMメッシュとしては,この1/4の1mを基本として接点の自動発生およびデラウニ法による要素分割を行った。節点数は2,801,三角形要素数は5,470である。

Fig.4-37 の四角内の拡大図を Fig.4-38 に示す。

一方、比抵抗値は、Fig.4-39 に示すとおり、水平距離 -28~92m、標高 236~320m を図のように四角形に分割し、各グリッドに比抵抗値を与えた。グリッドの個数 414 個が決定すべき未知比抵抗値である。なお、ダム軸断面で使用した電極は 94 電極、測定した電極の組み合わせは、4,371 である。

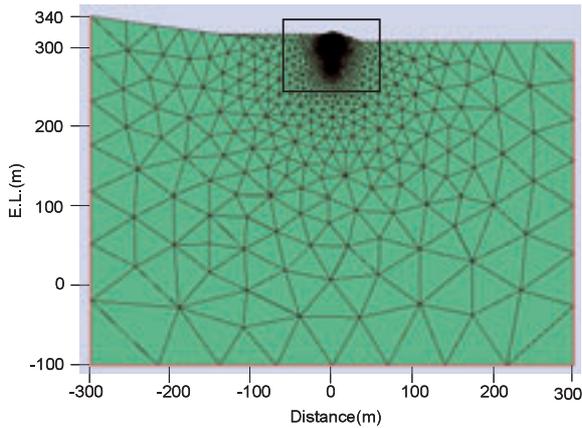


Fig.4-34 上下流断面の解析用 FEM メッシュ図 (全体図)
FEM mesh for the analysis of upstream and downstream section

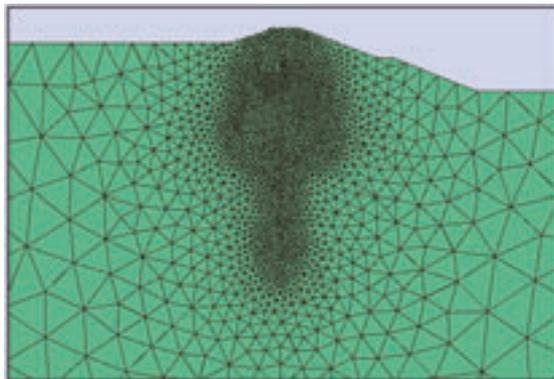


Fig.4-35 FEM 分割図 (Fig.4-34 の四角内の拡大図)
FEM mesh (Expanded figure of Fig.4-34)

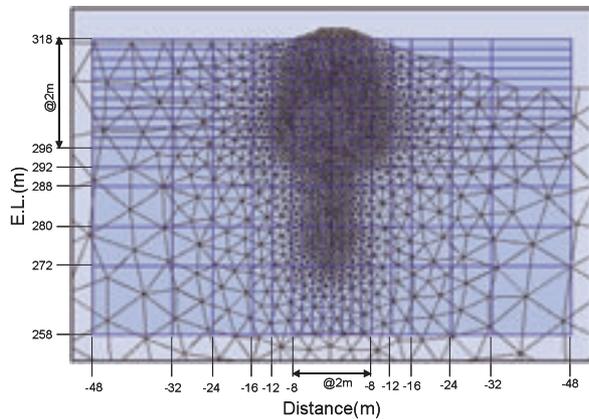


Fig.4-36 設定した比抵抗ブロック配置図
Arrangement of resistivity blocks

c 比抵抗トモグラフィ法による堤体内部の比抵抗分布

比抵抗トモグラフィ法によって計測した上下流断面およびダム軸断面の比抵抗断面を示す。おのおのの断面の調査結果は、試験湛水前の結果と試験湛水期間中の結果を分けて考察した。

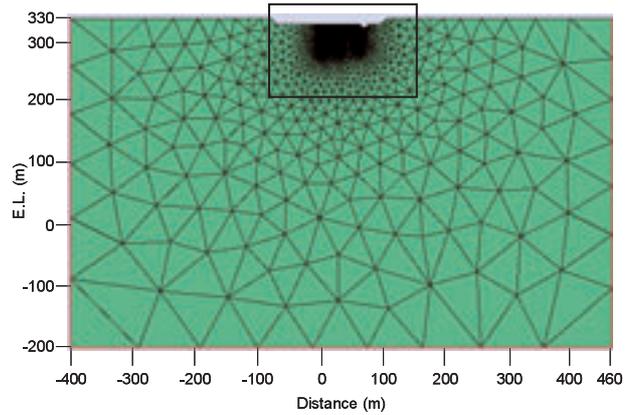


Fig.4-37 ダム軸断面の解析用 FEM メッシュ図 (全体図)
FEM mesh for the analysis of the axis of dam

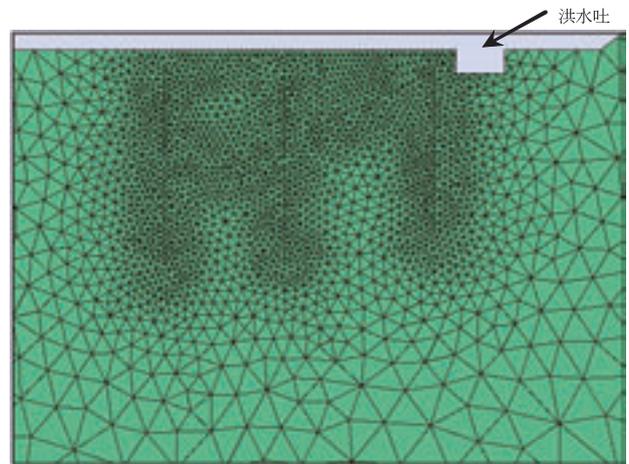


Fig.4-38 FEM 分割図 (Fig.4-37 の四角内の拡大図)
FEM mesh (Expanded figure of Fig.4-37)

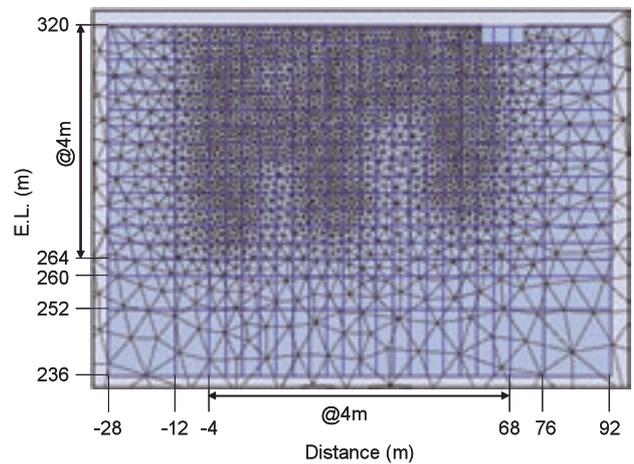


Fig.4-39 設定した比抵抗ブロック配置図
Arrangement of resistivity blocks

(1) 上下流断面の結果

【1】試験湛水前の結果

逆解析により求められた比抵抗分布を Fig.4-40(a)~(d) に示す。図中の黒丸は設置した電極の位置を示しており、比抵抗値は黒色を低比抵抗、白色を高比抵抗として表示している。なお、上下流断面中央の電極は、堤体遮水部だけでなく、ボーリング孔を利用して基礎地盤内にも設置している。しかし、基礎地盤の電極と堤体内の電極との間で取り囲める領域は、非常に狭い領域となり、ボーリング孔直近の比抵抗値しか感知できない。したがって、ここでは上下流の電極に囲まれた遮水ゾーンの比

抵抗についてのみ表示している。

試験湛水前の堤体内部の比抵抗分布を見ると、基礎地盤を掘り込んだコアトレンチ (EL.300m 以下) の比抵抗値はおおむね $100\ \Omega \cdot m$ 以下の低い抵抗値を示しており、現地遮水材を実験室に持ち帰って計測した比抵抗値 $50 \sim 60\ \Omega \cdot m$ に近い値を示した。この $100\ \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯は、EL.308m 付近のダム軸センターを頂点とする山型の比抵抗分布となっていた。一方、遮水ゾーン上部の比抵抗値は、下部の比抵抗値と比較して大きくなっており、かつ、遮水ゾーン上流側の比抵抗値が高い傾向を示した。

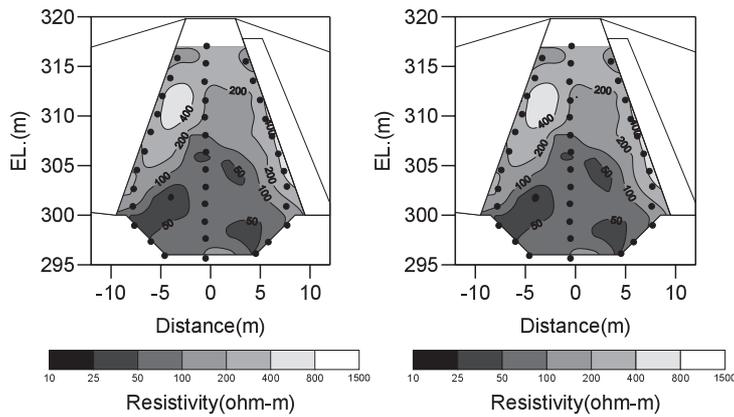


Fig.4-40(a) 上下流断面の比抵抗分布 (左から 2001.3, 4月)

Resistivity distribution (Left : March, Right : April, 2001)

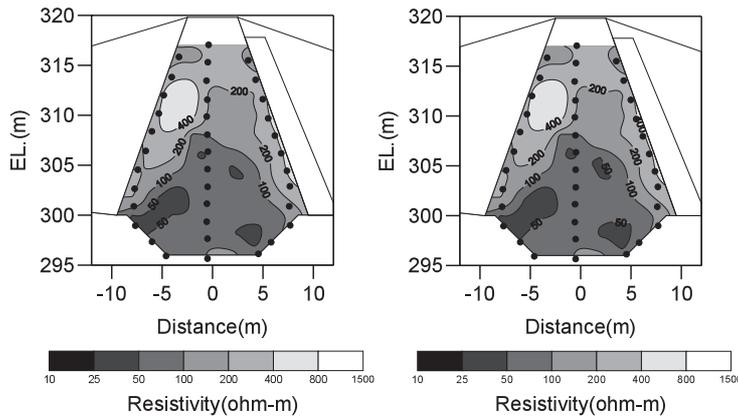


Fig.4-40(b) 上下流断面の比抵抗分布 (左から 2001.5, 6月)

Resistivity distribution (Left : May, Right : June, 2001)

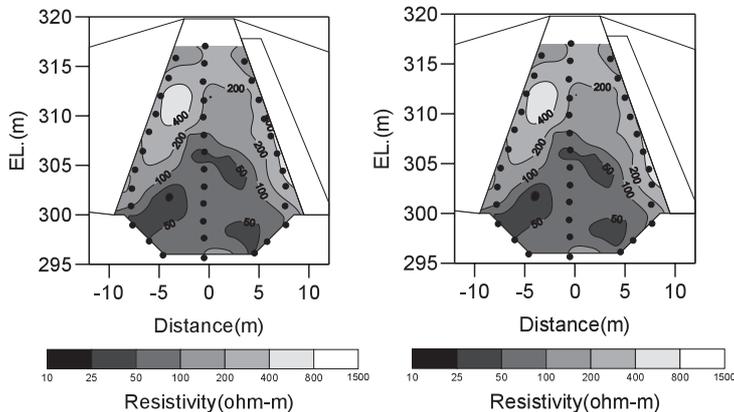


Fig.4-40(c) 上下流断面の比抵抗分布 (左から 2001.7, 8月)

Resistivity distribution (Left : July, Right : August, 2001)

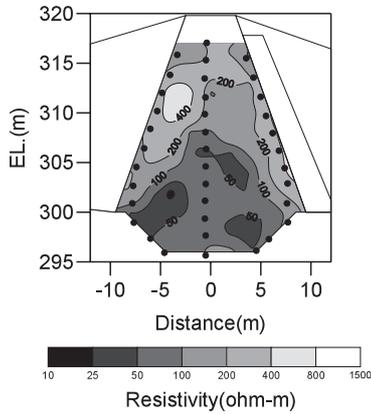


Fig.4-40(d) 上下流断面の比抵抗分布 (2001.9月)
Resistivity distribution (September, 2001)

時系列的な変化を見ると、試験湛水までの期間、大局的な比抵抗構造の変化は認められなかった。2001年5月および6月の結果で、 $50 \Omega \cdot m$ 以下の領域 (EL.305m, ダム軸から下流側) が狭まり、さらに $25 \Omega \cdot m$ 以下の領域 (EL.303m, ダム軸上流側の小領域) が消失するなど、部分的に高比抵抗側にシフトする傾向が認められたものの、2001年7月には再び比抵抗値が下がっている。7月以降の試験湛水開始前の9月までの比抵抗分布はほとんど変化がなかった。

[2] 試験湛水中の結果

2001年9月の測定時以降、試験湛水を開始した。試験湛水中の堤体内部の比抵抗値を Fig.4-41(a)~(c) に示す。試験湛水開始後2001年10月下旬までは、比抵抗分布の大局的な変動は認められなかった。しかし、2001年11月では、ダム軸付近のEL.315m以上の比抵抗値が徐々に小さくなる傾向が認められた。ほぼ満水位に達した12月の比抵抗分布では、上流側EL.311m付近の比抵抗値が $800 \Omega \cdot m$ を超え、さらにEL.300m~305m, ダム軸下流側に見られた $50 \Omega \cdot m$ 以下の比抵抗領域が全体的に高比抵抗側にシフトした。この傾向は貯水位をいったん最低水位にまで下げた2002年1月にも見られた。しかし、再び貯水を開始し、貯水位がEL.316.45mに達した2002年3月の比抵抗分布では、上流側の $400 \Omega \cdot m$ 以上を示す比抵抗領域が減少し、EL.300m~305m, ダム軸下流側に見られた $50 \Omega \cdot m$ 以下の比抵抗領域が再び出現した。以上述べたように、試験湛水中に顕著な変動が見られた領域は、① EL.310~315m 上流側の高比抵抗部、② EL.300~305m 付近の下流側の低比抵抗部、③ 堤頂に近いEL.315m以上の比抵抗部の3箇所であった。

(2) ダム軸断面の結果

[1] 試験湛水前の結果

ダム軸断面について、逆解析で求めた試験湛水前の比抵抗分布を Fig.4-42(a)~(d) に示す。図中の黒丸は設置した電極の位置を示しており、比抵抗値は黒色を低比抵抗

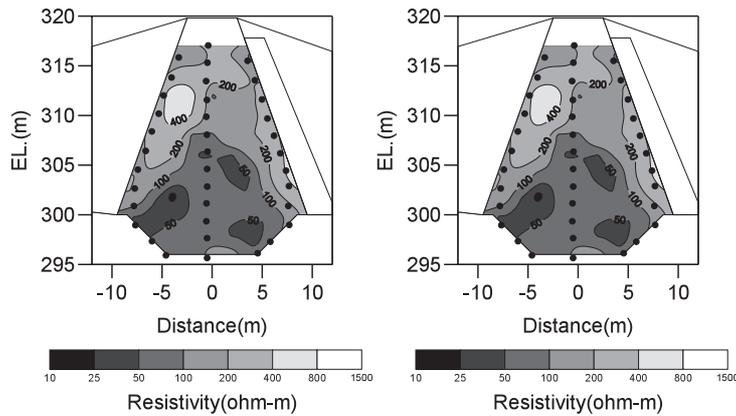


Fig.4-41(a) 試験湛水中の上下流断面の比抵抗分布 (左から2001.10月中旬, 10月下旬)
Resistivity distribution during the test filling (Left: Middle of autumn, Right: End of autumn, 2001)

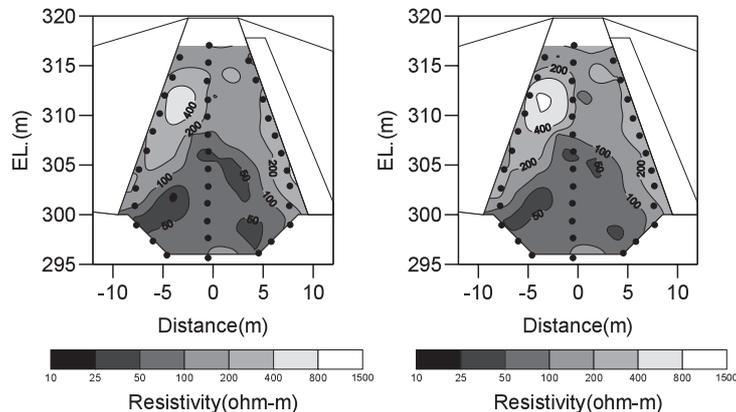


Fig.4-41(b) 試験湛水中の上下流断面の比抵抗分布 (左から2001.11月, 12月)
Resistivity distribution during the test filling (Left: November, Right: December, 2001)

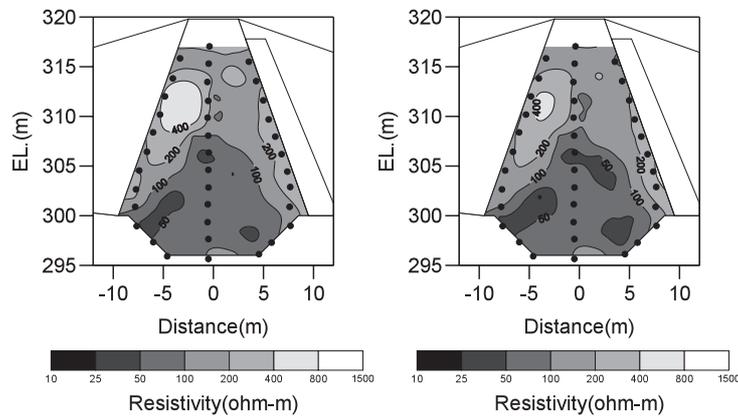


Fig.4-41(c) 貯水位低下後の上下流断面の比抵抗分布 (左から 2002.1 月, 2002.3 月)

Resistivity distribution during the test filling (Left : January, Right : March, 2002)

抗, 白色を高比抵抗として表示している。なお, 第 IV 章 7.b の解析方法でも述べたように, 比抵抗法の解析においては, 簡便化を図るため, 断面の奥行き方向の比抵抗分布は, 無限に同じ比抵抗値が連続していることを前提とした解析を実施している。しかし, 実際のダム軸断面の比抵抗計測においては, 上流側には貯水が, 下流側は空気の層が存在することになり, この前提が成り立たない。したがって, ダムを対象とした比抵抗値を計測する場合, 「ダム」という三次元的形状の影響が大きく出現する。すなわち, 「山地形」での測定となるため, 電流密度が増加し, 結果的には解析上比抵抗値は実際よりも高めになると考えられる (島, 1995)。しかし, これら測定条件は, 毎回同じである。したがって, 実証試験においては, 比抵抗値の絶対値を求めることよりも, 継続的な計測を行い, その「差」をモニタリングするということを主目的とした。

ダム軸断面における比抵抗分布について, 盛土内部および基礎地盤それぞれについて結果を述べる。盛土内部の大局的な比抵抗構造は次のとおりである。

まず, EL.310m (水平距離 10~15m の位置では EL.300m) より標高の高い位置での比抵抗値は, おおむね $200 \Omega \cdot m$ から場所によっては $800 \Omega \cdot m$ にも達した。さらに, 標高の低い EL.303m 前後までの比抵抗値がほぼ $50 \Omega \cdot m$ 以下, EL.310m 付近までの比抵抗値がほぼ $100 \Omega \cdot m$ 以下となっており, 上下流断面での比抵抗分布図と同様の傾向を示していた。

次に比抵抗値の変動した領域について概観した。2001 年 3 月~5 月までは, 大局的な比抵抗値の変化は見られなかった。しかし, 2001 年 6 月の比抵抗分布では, 盛土内部の EL.310m 以上の高比抵抗領域の連続性が途切れ, 比抵抗値が小さくなる傾向が認められた。さらに, 距離 0~5m の EL.295~300m の盛土底部において, $100 \Omega \cdot m$ を示す領域が拡大し, 比抵抗値が減少する傾向が認められた。2001 年 7 月の結果も同様の傾向を示したが, 2001 年 8 月あるいは 9 月になると再び比抵抗値は大きくなる傾向が認められた。また, 盛土内の特徴的な

比抵抗構造は, 堤敷からアバットにかけた区間で, 非常に低い比抵抗を示す部分が拡大することである。

一方, 基礎地盤の比抵抗構造を見ると, 盛土と基礎地盤との比抵抗コントラストが非常に大きいことが分かった。盛土内部の比抵抗値は一部を除いて $800 \Omega \cdot m$ 以下であったが, 基礎地盤の比抵抗構造は $2,000 \Omega \cdot m$ を超える高比抵抗値を示した。高柴調整池右岸基礎地盤の地質は, おおむね $C_L \sim D_H$ 級の花崗岩であり, 表層ほどマサ化している。盛土がない状態での比抵抗トモグラフィ法による基礎地盤の比抵抗調査結果 (Fig.4-28) と比較すると, 比抵抗分布の状況, すなわち高比抵抗と低比抵抗の位置関係はほぼ一致した。しかし, Fig.4-28 で $1,000 \Omega \cdot m$ 程度に解析された花崗岩の比抵抗値が, 今回の堤体内部の比抵抗トモグラフィ法の結果では $2,000 \Omega \cdot m$ 以上と, さらに高い比抵抗値として解析された。電気検層の結果でも花崗岩はおおむね $1,000 \Omega \cdot m$ 程度であったことから判断すると, 堤体盛土内部の比抵抗トモグラフィ法の解析で, 高めに解析されていると考えられた。基礎地盤を対象とした比抵抗トモグラフィ法を実施した際には, EL.304m よりも高い標高の部分の二次掘削が終了しておらず, 新鮮な花崗岩が露頭していなかったため, 当初の測定では, 低めに解析されている可能性もあると考えられた。また, 盛土下部の比抵抗値が $50 \Omega \cdot m$ 程度であり, 基礎地盤の比抵抗値と比較して極端に小さいため, 基礎地盤との比抵抗コントラストが大きい条件であった。このような条件で数値解析を行うと, 第 II 章 2.e (1) や第 II 章 2.e (2) の数値実験で示されているように, 実測値に計算結果を合わせるように, 解析上低比抵抗部の比抵抗値をさらに低減し, 高比抵抗部の比抵抗値をさらに高め, 偽像が発生する場合もある。したがって, 今回の測定条件のように, 高比抵抗値を示す基礎地盤と, 低比抵抗値を示す堤体盛土が近接していたことも, 花崗岩の比抵抗値が高く解析されている原因の一部であると想定された。

[2] 試験湛水中の結果

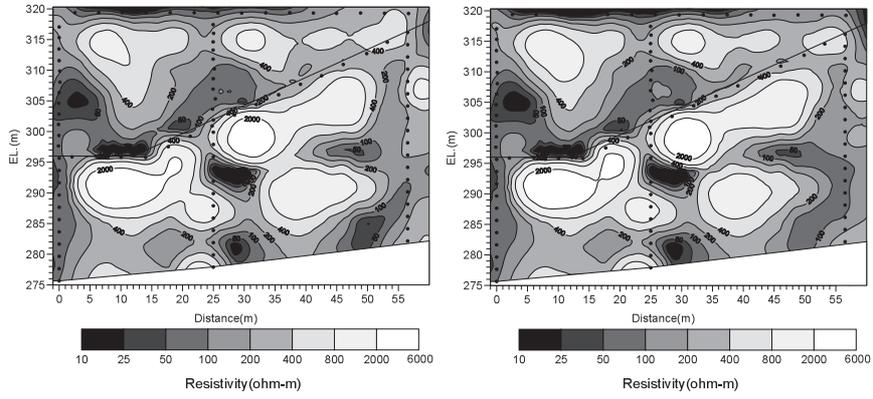


Fig.4-42(a) ダム軸断面の比抵抗分布 (左から 2001.3, 4 月)

Resistivity distribution (Left: March, Right: April, 2001)

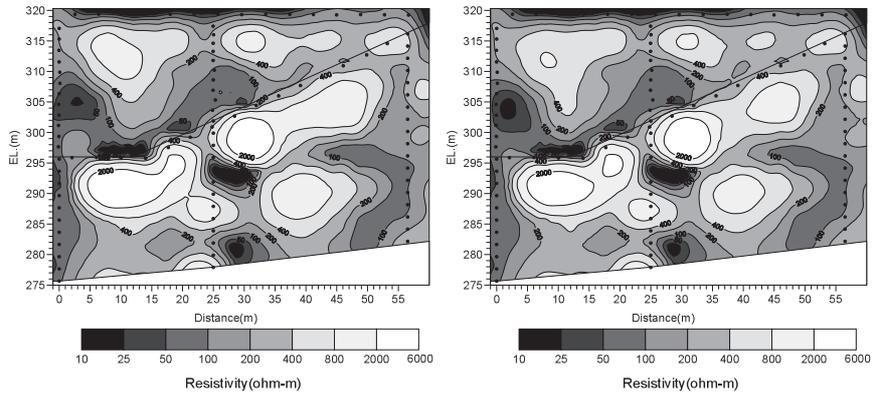


Fig.4-42(b) ダム軸断面の比抵抗分布 (左から 2001.5, 6 月)

Resistivity distribution (Left: May, Right: June, 2001)

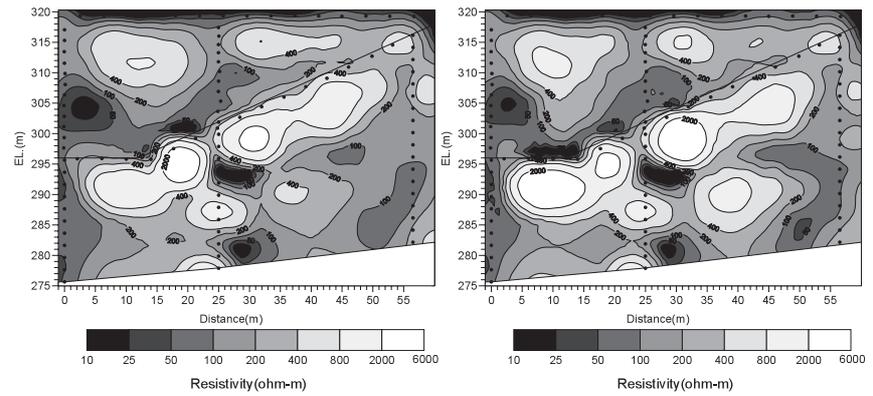


Fig.4-42(c) ダム軸断面の比抵抗分布 (左から 2001.7, 8 月)

Resistivity distribution (Left: July, Right: August, 2001)

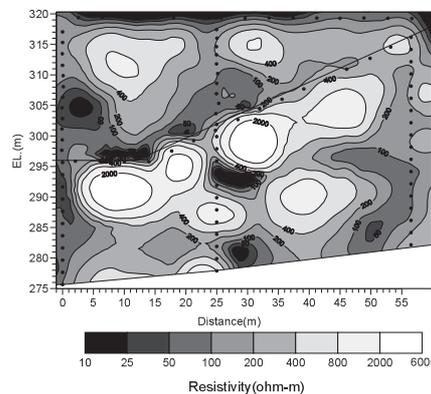


Fig.4-42(d) ダム軸断面の比抵抗分布 (2001.9 月)

Resistivity distribution (September, 2001)

試験湛水期間中のダム軸断面の比抵抗分布を Fig.4-43(a)~(c) に示す。まず、盛土内部の比抵抗構造の変化を概観すると、2001年9月の比抵抗分布で認められていた水平距離7~13m, EL.310~313m 付近の比抵抗値の変動が認められた。2001年9月の比抵抗分布では $800 \Omega \cdot m$ を示しているのに対し、2001年10月中旬の比抵抗分布では、この部分が低比抵抗化した。また、満水位に達した2001年12月の計測結果では、水平距離14~16m, EL.309~310m 付近に $50 \sim 100 \Omega \cdot m$ 程度にまで低

比抵抗化した領域が出現した。同じく、2001年12月の水平距離7~16m, EL.305~310m の比抵抗値について、 $400 \Omega \cdot m$ 以上を示す領域が減少し、 $200 \Omega \cdot m$ を示す領域が拡大するなど、盛土部分では貯水位の上昇に伴って堤体遮水部の EL.305~310m にかけて低比抵抗化する現象が認められた。一方、水位を L.W.L. にまで低減した2002年1月の盛土内部には、水平距離10~15m, EL.300~305m の位置に $400 \Omega \cdot m$ 以上を示す高比抵抗領域が出現した。以上に示すように、ダム軸断面の比抵

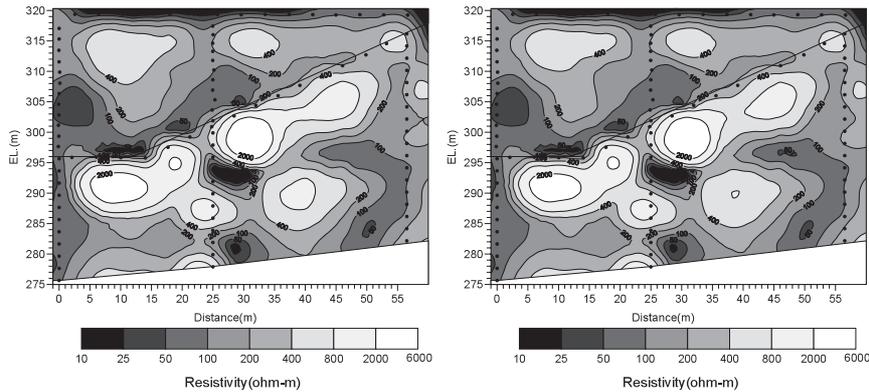


Fig 4-43(a) 試験湛水時のダム軸断面の比抵抗分布 (左から 2001.10月中旬, 10月下旬)

Resistivity distribution during the test filling (Left: Middle of autumn, Right: End of autumn, 2001)

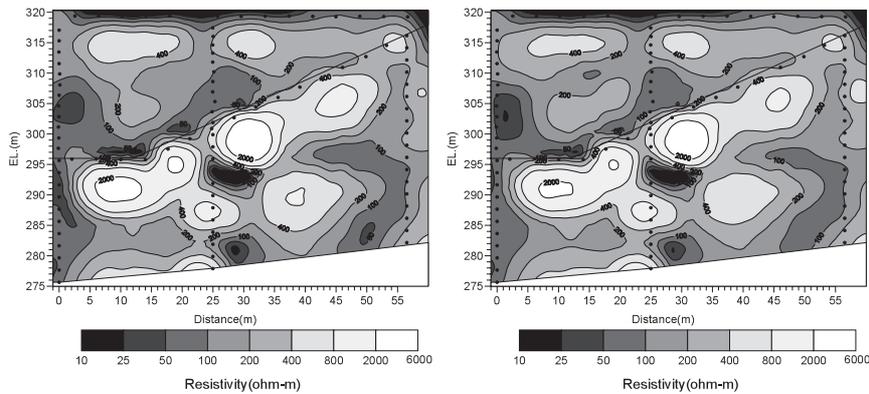


Fig.4-43(b) 試験湛水時のダム軸断面の比抵抗分布 (左から 2001.11, 12月)

Resistivity distribution during the test filling (Left: November, Right: December, 2001)

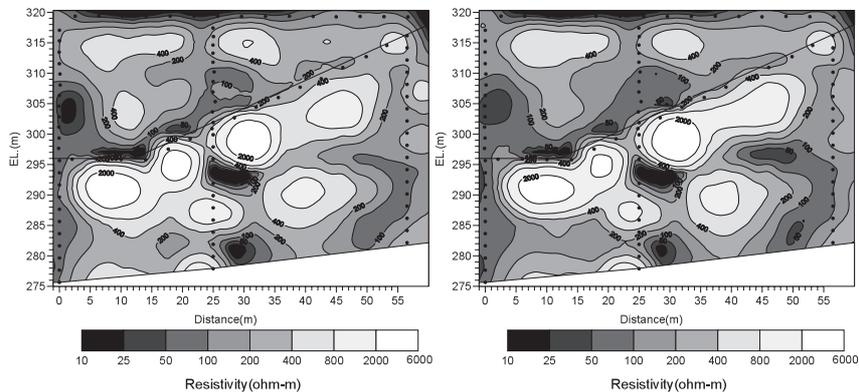


Fig.4-43(c) 貯水位低下時のダム軸断面の比抵抗分布 (左から 2002.1, 2002.3月)

Resistivity distribution during the test filling (Left: January, Right: March, 2002)

抗変動の傾向は、貯水位が上昇すれば低比抵抗側にシフトし、貯水を下げれば高比抵抗側にシフトする、という傾向を示した。

次に、基礎地盤について見ると、試験湛水直後から見られた水平距離 35~40m, EL.285~290m の 800 Ω・m 以上の比抵抗領域に変動が見られた。まず、貯水位の上昇に伴って低比抵抗化し、2001 年 12 月に一時期消失した。さらに、貯水位を L.W.L. にまで低下させた 2002 年 1 月に 800 Ω・m 以上の高比抵抗部が再度出現し、3 月に至っても認められた。一方、2001 年 10 月中旬の比抵抗分布では水平距離 25~48m, EL.295~307m にかけて連続して分布していた 800 Ω・m 以上の比抵抗領域が、貯水位の上昇とともに水平距離 25~35m, EL.295~303m 付近および水平距離 40~48m, EL.303~307m の 2 箇所に分断された。しかし、2002 年 3 月には再び連続した比抵抗値として解析された。以上のように、基礎地盤に関しては、特に EL.285~295m 付近で、貯水位の上昇とともに比抵抗値が減少し、貯水位を下げると比抵抗値が上昇する傾向が見られた。

d 時系列トモグラフィ法による比抵抗モニタリング

前項において、各月の比抵抗分布を示し、図化して認められた各月の特徴を述べた。これらの比抵抗分布図の結果では、大局的な比抵抗構造の変化が認められなかったものの、実際は各領域で微少な比抵抗値の変動が生じていると考えられた。そこで、こうした微少な比抵抗値変動領域をより明瞭に把握するため、以下に示す時系列トモグラフィ法による比抵抗変動領域の可視化を試みた。

(1) 時系列トモグラフィ法の概説

これまでの比抵抗変化の解析では、変化前後のデータを個別に逆解析し、これらの差を比較していた。しかし、個別に解析して求めた比抵抗分布を比較する方法では、①真の比抵抗変化、②ノイズ成分の変化による比抵抗変化、③逆解析における収束性の変化、などが不可避的に含まれる。したがって、真の比抵抗変化が小さい場合には、ノイズ成分や解析上の収束条件の変化によって、真の比抵抗変化がとらえられない可能性がある。佐々木 (1985) は、この中の②や③の影響を極力抑えるために、線形化法による逆解析方法を考案した。この方法は次のとおりである。

M 個のブロックからなる 2次元モデルを考え、各ブロックの比抵抗 $\rho_1, \rho_2 \cdots \rho_M$ が、通常のとモグラフィ解析で求められているとする。測定値 ρ_a (測定電位から見かけ比抵抗値に換算した値) は、 $\rho_1, \rho_2 \cdots \rho_M$ の関数であるから、次のような形式で記述できる。

$$\rho_a = f(\rho) \quad \dots (4.7)$$

ただし、 $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M)^T$ である。なお、 $f(\rho)$ は解析的な形式で与えることはできず、FEM や差分法を使っ

た数値解析の手法で計算される。

設定した各ブロックの比抵抗値がそれぞれ $\Delta\rho_1, \Delta\rho_2 \cdots \Delta\rho_M$ だけ変化したとき、1 次式を Taylor 展開することによって、変化後の測定値は、次のように表すことができる。

$$\rho_a + \Delta\rho_a = f(\rho + \Delta\rho) = f(\rho) + \sum_{j=1}^M \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_j} \Delta\rho_j + \delta \quad \dots (4.8)$$

ここで、 δ は $\Delta\rho$ に関する高次量である。比抵抗値の変化量が小さい場合、 δ を無視することができるため、式 (4.7) を代入すれば、見かけ比抵抗値の変化量 $\Delta\rho_a$ は、次式で表される。

$$\Delta\rho_a = \sum_{j=1}^M \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_j} \Delta\rho_j \quad \dots (4.9)$$

したがって、測定値の変化 $\Delta\rho_a$ を既知量として、 $\Delta\rho_j$ を求めることができる。この線形化による比抵抗変化の解析では、収束性の問題を除去できるため、従来の個別解析よりも精度の高い解析が可能である。しかし、反面、Taylor 展開の非線形項を無視しているため、比抵抗変化が大きい場合には、これらを反映できず、解析精度が悪くなる、という問題がある。さらに、式 (4.9) が一意的に解けず、求められる解が発散する可能性があるとともに、与えるダンピング係数 (式 (4.5) 参照) などのパラメータによっては、異なる解が発生することがあるというパラメータ依存性が大きいことが問題である。

そこで、杉本 (1995) は、微少な比抵抗変化をとらえるため、Fig.4-44 の下図に示す新たな解析手法を導入した。比抵抗変化前後の差に着目した解析であるため、一般には「差トモグラフィ法」などと称されているが、未だ定義された用語は存在しない。ここでは、比抵抗値の時間的変化を継続して観測し、その変動を解析することから「時系列トモグラフィ法」と称する。これまでの解析では、変化前データおよび変化後データを個別に解析し、得られた比抵抗断面図を比較していた。これに対し、時系列トモグラフィ法では、まず、変化前データの逆解析を行い、「リファレンス比抵抗断面」を求める。次に、変化後データについては、変化前データとの比率で表現しておく。リファレンス比抵抗断面について、FEM などの順解析によって求められる理論値に、この比を乗じた値を変化後データと見なす。そして、リファレンス比抵抗断面を初期値としてこのデータを逆解析することにより、変化後データの比抵抗断面を求める。最終的にはリファレンス比抵抗断面との差を比較し、微少な比抵抗変化をとらえようというものである。この手法の利点は、非線形データを取り扱うことにより、比抵抗変化が大きい場合にも対応できること、さらにリファレンス比抵抗断面を初期値としているため、逆解析の計算に伴い発生するノイズが毎回同様な傾向となり、真の比抵抗変化をより際立たせることができることである。さらに、杉本 (1995) によれば、あらかじめ想定できる比抵抗変化、

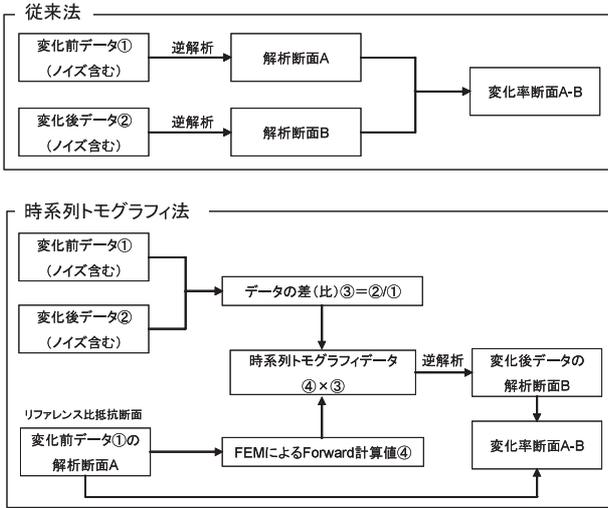


Fig.4-44 時系列トモグラフィ法概念図
Concept of time series tomography

例えば「比抵抗値は必ず小さくなる」などの情報を逆解析の際、制約条件として加えることにより、さらに解析に生じる誤差を少なくすることができるとしている。

(2) 時系列トモグラフィ法による堤体内部の比抵抗モニタリング結果

高柴調整池における比抵抗変化を考えた場合、計測時

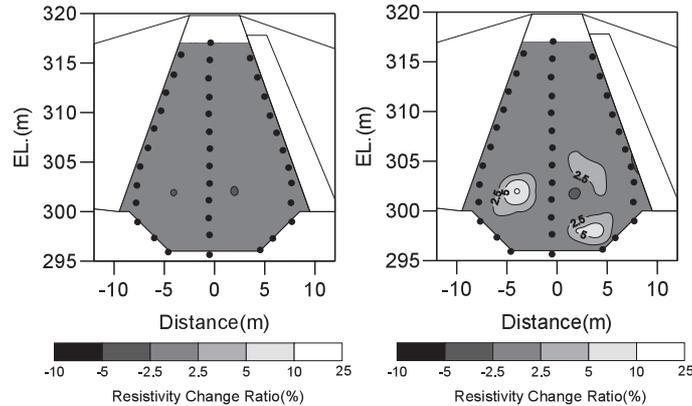


Fig.4-45(a) 時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2001.4, 5 月の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: April, Right: May, 2001)

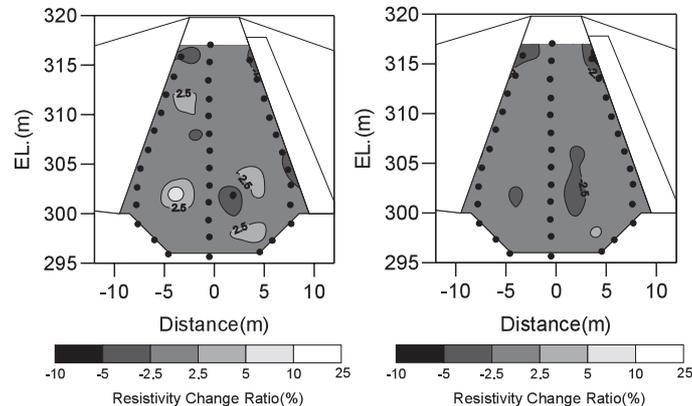


Fig.4-45(b) 時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2001.6, 7 月の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: June, Right: July, 2001)

に発生するノイズなど、測定環境に起因するノイズの影響は、ほぼ毎回同様であると考えられる。したがって、解析のパラメータを毎回同じに設定すれば、非常に精度の高い比抵抗モニタリングが可能であると考えられる。しかし、逆解析に伴って発生するノイズの乗り方などは、計測データによって異なるため、時系列トモグラフィ法を行うことにより、さらに微小な比抵抗変化を正確に求めることが可能であると思われる。そこで、前項で述べた時系列トモグラフィ法を利用し、高柴調整池で得られたデータを解析した。基準となるデータ(リファレンス比抵抗断面)は、試験湛水前の解析においては、2001年3月の比抵抗断面、試験湛水中の解析においては、試験湛水直前の2001年9月の比抵抗断面とした。

【1】時系列トモグラフィ法による上下流断面の比抵抗変化率結果

時系列トモグラフィ法を用いて解析した上下流断面の比抵抗変化率結果を Fig.4-45(a)~(f) に示す。これらの結果は、各月のデータを時系列トモグラフィ法により解析した後、基準月との変化率をとったものである。

試験湛水前の比抵抗変化率をみると、2001年4月の比抵抗変化率分布図では、変化率が±2.5%以内の部分が大半であった。しかし、2001年5月には、水平距離-5m付近、1~4m付近のEL.305m以下で比抵抗値の上

昇が見られた。2001年6月もほぼ2001年5月と同様の傾向を示した。続く2001年7月、8月は、ダム軸から下流側の水平距離1~2m付近で2.5%を超える比抵抗値の減少が認められた。2001年9月の比抵抗変化率は、3月と比較するとさらに堤体下流側の比抵抗値が減少し、特に水平距離0~4mのEL.305m以上の部分でも比抵抗値が2.5%以上減少した。試験湛水前の比抵抗変動は、おおむね数%以内に収まっていた。

試験湛水中の比抵抗変化率分布をみると、試験湛水直

後の2001年10月中旬および10月下旬では、堤体ダム軸下流に変化率2.5%以上の比抵抗値の高比抵抗化が見られた。貯水位を上昇させるとともに、比抵抗値は上昇する傾向を示し、満水位に到達した2001年11月では、水平距離で-5m付近の速水部上流側に比抵抗値が上昇した部分が見られた。さらに満水位を1ヶ月間保持した2001年12月および貯水位を一旦L.W.L.まで下げて1ヶ月を経過した2002年1月の比抵抗変化率分布では、水平距離-5m, EL.310~314mおよび水平距離-5m,

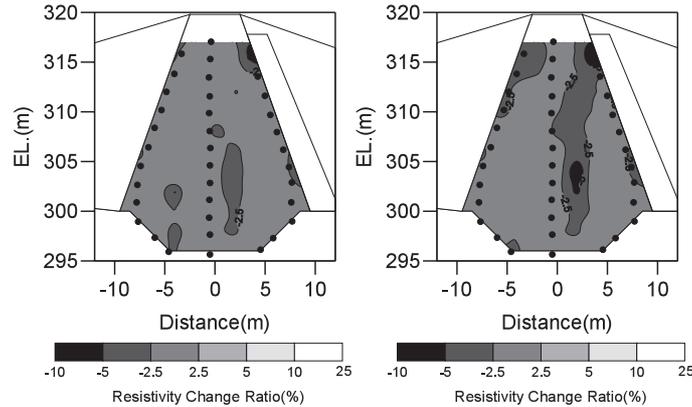


Fig.4-45(c) 時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から2001.8, 9月の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: August, Right: September, 2001)

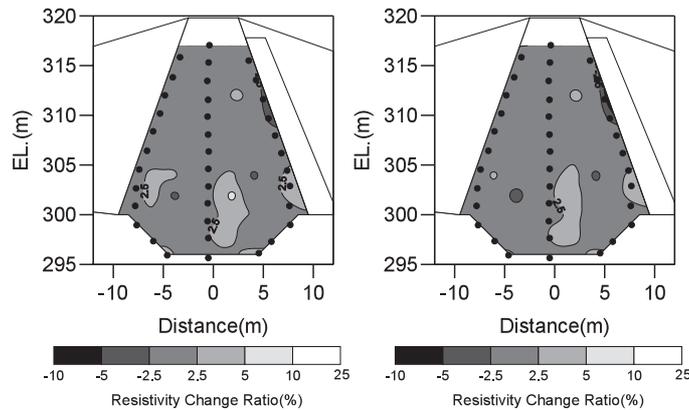


Fig.4-45(d) 試験湛水期間の時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から2001.10月中旬, 10月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: Middle of Autumn, Right: End of Autumn, 2001)

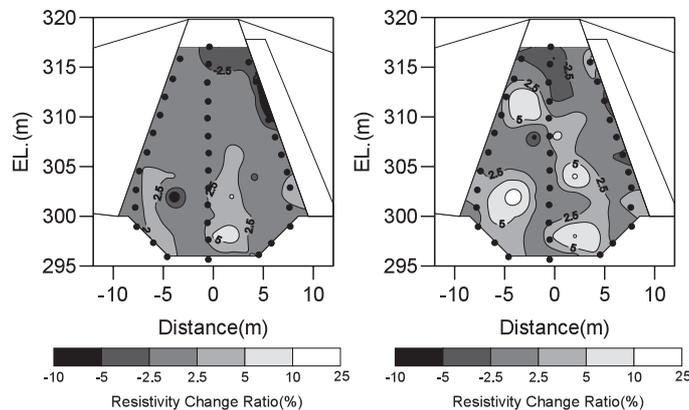


Fig.4-45(e) 試験湛水期間の時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から2001.11, 12月の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: November, Right: December, 2001)

EL.302m 付近を中心とした変化率 5%以上の比抵抗上昇を示す領域が認められた。さらに、堤体下流側の EL.300m 以下の基礎地盤との境界付近にも変化率 5%以上の比抵抗上昇を示す領域が認められた。しかし、再び貯水位を上げ始めた 2002 年 3 月の比抵抗変化率では、EL.310~314m の比抵抗値の上昇が認められなかった。一方、標高が高い EL.310~315m の堤体下流側の比抵抗変化率が -2.5%以上を示した。

時系列トモグラフィ法を用いて解析したダム軸断面における比抵抗変化率結果を Fig.4-46(a)~(f) に示す。これらの結果は、各月のデータを時系列トモグラフィ法に

より解析した後、基準月との変化率をとったものである。ダム軸断面に関しては、計測の組み合わせが 4,000 を超え、かつ、基礎地盤内部については、完全に対象領域を取り囲んでいないことから、上下流断面の変化率と比較すると、変動率が大きくなった。

2001 年 4~6 月の比抵抗変化率では、水平距離 45~50m, EL.285m 以深の基礎地盤に比抵抗値が上昇した領域が見られ、右岸堤体上部に比抵抗値が低下した領域が見られた。比抵抗値が上昇した基礎地盤の地質は、風化閃緑岩~花崗閃緑岩に相当していた。ただし、これら 2箇所は、比抵抗トモグラフィ法のために設置した電極の

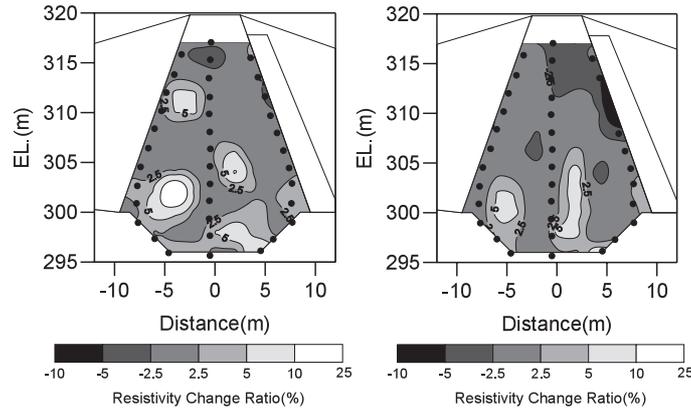


Fig.4-45(f) 貯水位低下時の時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2002.1, 3 月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: January, Right: End of March, 2002)

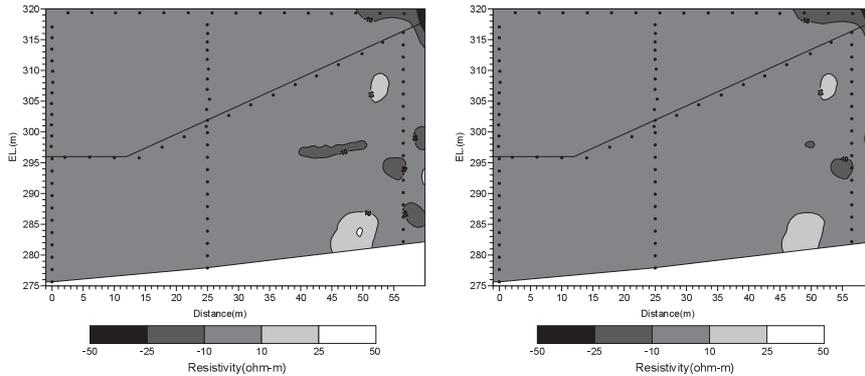


Fig.4-46(a) 時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2001.4, 5 月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: April, Right: May, 2001)

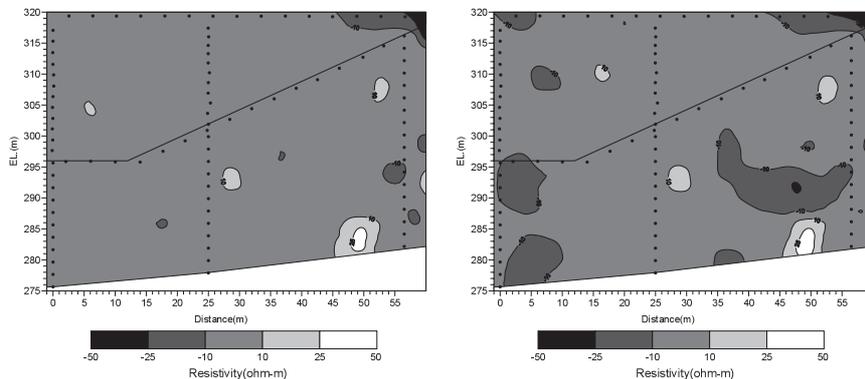


Fig.4-46(b) 時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2001.6, 7 月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: June, Right: July, 2001)

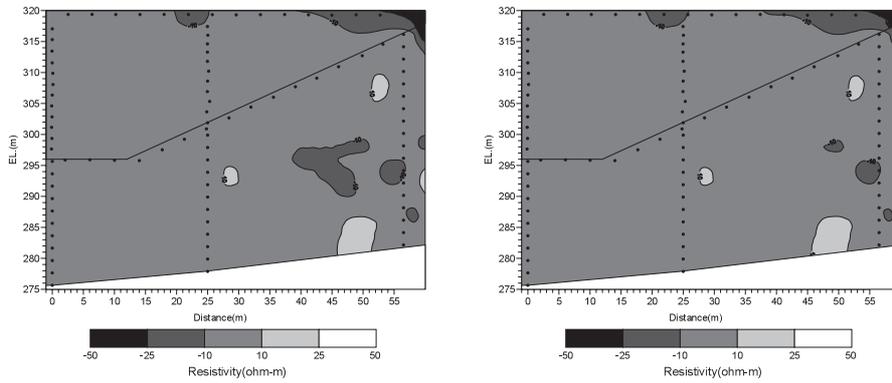


Fig.4-46(c) 時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2001.8, 9 月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: August, Right: September, 2001)

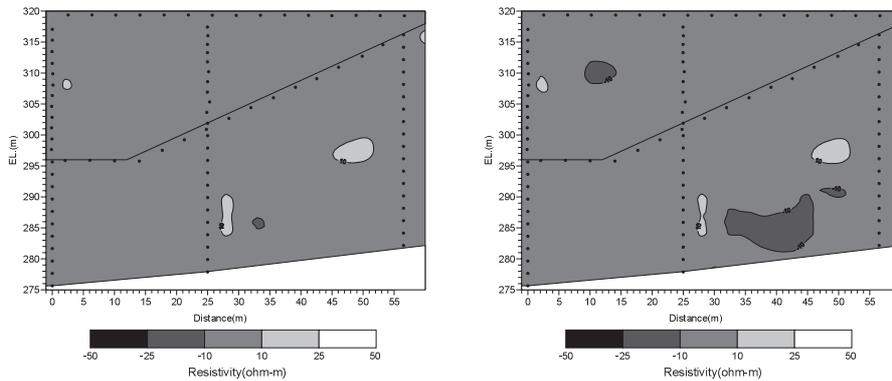


Fig.4-46(d) 試験湛水期間の時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2001.10 月中旬, 10 月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: Middle of Autumn, Right: End of Autumn, 2001)

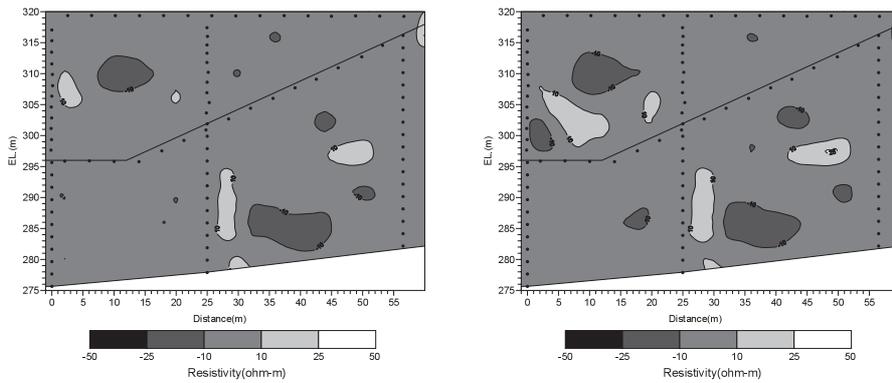


Fig.4-46(e) 試験湛水期間の時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2001.11, 12 月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: November, Right: December, 2001)

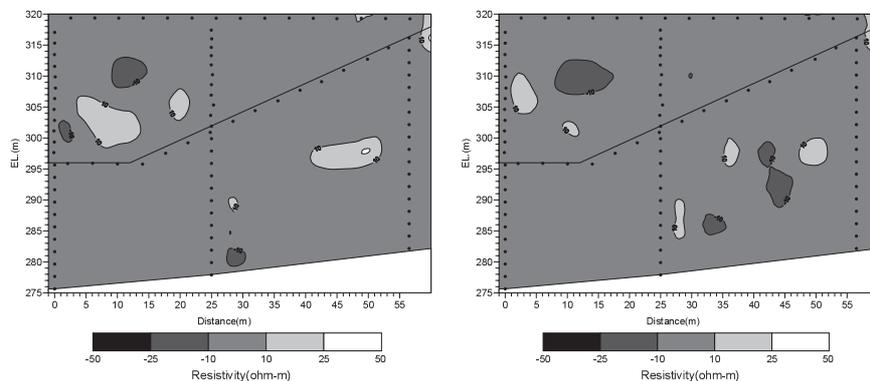


Fig.4-46(f) 貯水位低下時の時系列トモグラフィ法による比抵抗変化率 (左から 2002.1, 3 月下旬の変化率)
Resistivity change ratio by time series tomography (Left: January, Right: End of March, 2002)

外側, もしくは電極で囲めない基礎地盤部など, 比抵抗値同定のための情報が少ない領域に該当していた。

2001 年 7 月の比抵抗変化率では, 全体的な比抵抗値の低下が見られた。しかし, 翌月の 2001 年 8 月, 9 月の結果がほぼ 2001 年 6 月の結果と類似していることから, 2001 年 7 月の比抵抗変化率が特異な値を示した可能性があると考えられた。以上のように, 試験湛水前までの間の比抵抗変動は, 特に基礎地盤に見られることが確認された。

一方, 試験湛水中の 2001 年 10~2002 年 3 月までの比抵抗変化率をみると, 試験湛水前の比抵抗変化率とは異なり, 堤体内部にも比抵抗値の変動が見られた。2001 年 10 月下旬の比抵抗変化率では, 特に水平距離 10~15m, EL.310m を中心として比抵抗値の低下した領域が出現し, 以降, 試験湛水期間中その領域が確認された。貯水位の上昇とともに比抵抗値の低下した領域が拡大していることが分かった。一方, 満水位に到達して 1 ヶ月を経過した 2001 年 12 月の比抵抗変化率では, 水平距離 2~13m, EL.298~307m 付近に, 比抵抗値の上昇した領域が認められ, 堤体内部に比抵抗値の上昇した領域と低下した領域が不規則に存在した。貯水位を最低水位にまで低下させ, 1 ヶ月を経過した 2002 年 1 月の比抵抗変化率では, 比抵抗値の低下した水平距離 10~15m, EL.310m を中心とする領域は最も小さくなった。

試験湛水中の基礎地盤の比抵抗変化率をみると, 満水位に近づくとつれて, 水平距離 31~46m, EL.280~288m 付近に比抵抗値が低下した領域が出現した。しかし, 貯水位を下げた 2002 年 1 月にはこの領域は見られなくなり, 2002 年 3 月にもまとまって出現しなかった。

(3) 時系列トモグラフィ法の優位性 一 個別逆解析結果との解析精度の比較一

時系列トモグラフィ法による解析精度の優位性を確認するため, 個別の逆解析による RMS 残差と, 時系列トモグラフィ法による RMS 残差とを比較した。試験湛水前の 2001 年 9 月, 試験湛水中の 2001 年 12 月, L.W.L. にまで貯水位を低下させた 2002 年 1 月の結果を Fig.4-47 に示す。上下流断面の個別逆解析の RMS 残差は繰り返

返し回数 6 回時点で 0.031~0.034 程度であったものが, 時系列トモグラフィ法を利用することで 0.005~0.02 程度にまで低減した。

総じて, 上下流断面の RMS 残差とダム軸断面の RMS 残差とを比較すると, ダム軸断面の RMS 残差が大きくなっていった。これは, 決定すべき未知の比抵抗グリッドの数が, ダム軸断面の解析の方が上下流断面に比べて多いためであると考えられた。個別逆解析の RMS 残差では, 上下流断面の RMS 残差とダム軸断面の RMS 残差では, およそ 0.035 の相違が見られた。しかし, 時系列トモグラフィ法を適用することにより, その差が改善されており, 特にダム軸断面における解析精度の向上が顕著であることが分かった。したがって, 決定すべき未知パラメータが多い比抵抗モニタリングに関して, 時系列トモグラフィ法を適用する優位性があると思われた。さらに, 時系列トモグラフィ法適用時の RMS 残差は, 繰り返し回数による RMS 残差低減は少ないことから, 比抵抗構造を推定する上で, リファレンス断面の決定が非常に重要であることが分かった。

e 不飽和・飽和域を考慮した浸透流解析結果

フィルダム遮水ゾーン内の間隙水圧は, 盛立過程において発生・消散を繰り返す。このため, 試験湛水前に不飽和領域にもかかわらず過剰間隙水圧が残留する現象が生じることが多い。試験湛水時の貯水の浸透状況をより正確に評価するためには, 浸透量や力学的安定性に大きく影響を与えるこの残留間隙水圧を把握することが重要である。

フィルダムの遮水材は細粒分が多く, かつ, 最適含水比付近で飽和度 90%以上を確保するように締め固められていることから, 間隙内の空気は, 大気と連結しない封入不飽和状態で, 間隙流体は圧縮性流体となる。通常, このような流体の間隙水圧挙動を求めるためには, 飽和土および不飽和土の変形と浸透流との連成問題を解く必要がある。しかし, この解析は煩雑でかなりの時間を有するという問題点があった。

そこで,

①圧密はすでに終了したのものとして連成問題から切り離

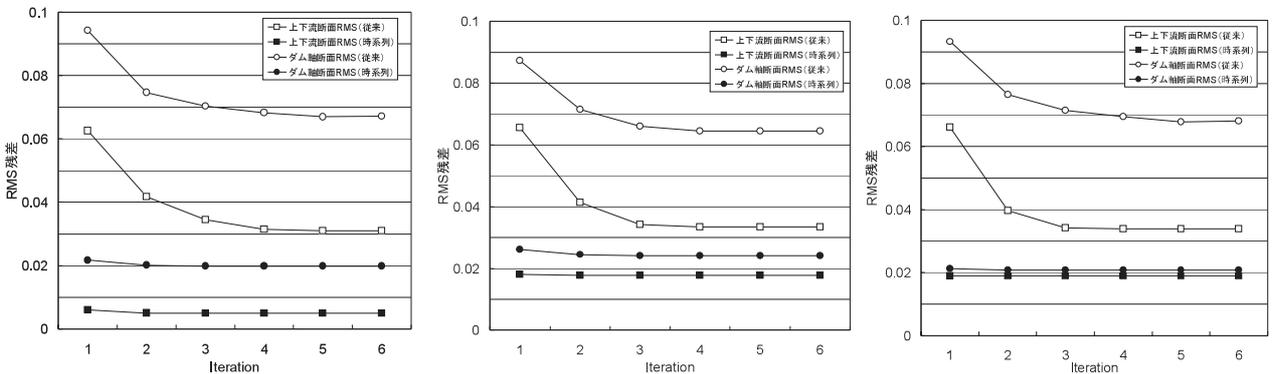


Fig.4-47 時系列トモグラフィ法および個別逆解析による RMS 残差の推移 (左から 2001.9, 12, 2002.1 月の RMS 残差)

Change of RMS error using time series tomography and normal inversion (Left: September, 2001, Center: December, 2001, Right: January, 2002)

す

②間隙水圧が正の場合は飽和度と圧縮流体の圧力関係、負の場合は飽和度とサクシジョンの関係を用いて遮水材の保水特性や透水係数を求める

ことを前提とした簡易的な不飽和・飽和域を考慮する解析法を用いた浸透流解析を行った。

以降では、試験湛水直前 2001 年 9 月、常時満水位に到達して 1 ヶ月を経過した 2001 年 12 月、水位を L.W.L. に下げた 2001 年 12 月末について、不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析を行った結果（立石，2002）を示す。

(1) 試験湛水開始直前 2001 年 9 月の結果

2001 年 9 月時点での浸透流解析により推定される流速コンター図、全水頭コンター図、圧力水頭コンター図をそれぞれ Fig.4-48～50 に示す。また、そのときの間隙水圧分布を Fig.4-51 に示す。試験湛水前の結果では、遮水部の P-9 の間隙水圧計（EL.304m，ダム軸）を中心に残留間隙水圧が発生していた。今回利用した不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析の結果でも、遮水部中央に残留間隙水圧が発生する現象をよく再現できた。なお、試験湛水開始前に仮排水路トンネルを閉塞したため、解

析時の貯水位は 310m とした。これによる貯水の遮水部への浸透はごく遮水部の上流に近い部分に限られていた。すなわち、試験湛水開始直後、貯水のほとんどは基礎地盤を浸透し、遮水部中心のカーテングラウチングの部分で遮水機能が発揮され、下流のフィルターゾーンに流出する形状を示すことが分かった。

(2) 常時満水位到達 1 ヶ月後 2001 年 12 月上旬の結果

貯水が満水位に達して 1 ヶ月を経過した 2001 年 12 月上旬時点での浸透流解析により推定される圧力水頭コンター図、全水頭コンター図、流速コンター図をそれぞれ Fig.4-52～54 に示す。また、そのときの間隙水圧分布を Fig.4-55 に示す。流速コンター図および全水頭コンター図をみると、満水位に達して 1 ヶ月を経過したにもかかわらず、遮水材の透水係数が 1.0×10^{-6} (cm/s) オーダーと難透水性であることから、理論的な浸潤面を形成せず、遮水ゾーン上流側の限られた部分でしか浸潤していない様子がとらえられた。浸透水も、堤体を通過してドレーンに到達するものはほとんどなく、多くは遮水ゾーンの表層面で完全に遮水され、遮水材と基礎地盤との境界や、カーテングラウチングで透水性を改良した基礎地盤を迂回して下流に到達するものがほとんどであることが示されている。また、Fig.4-55 は、間隙水圧計の点のデータ

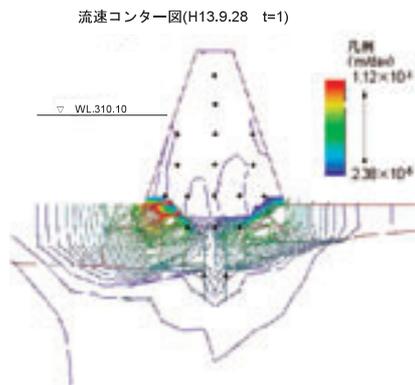


Fig.4-48 流速コンター図 (2001.9月)
Contour line of velocity(September, 2001)

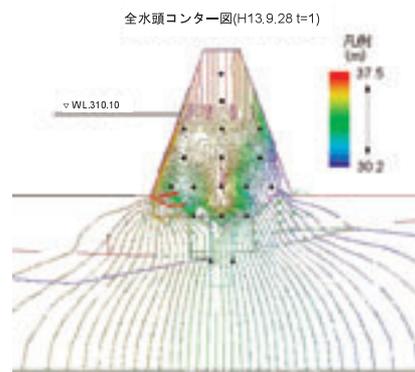


Fig.4-49 全水頭コンター図 (2001.9月)
Contour line of total head(September, 2001)

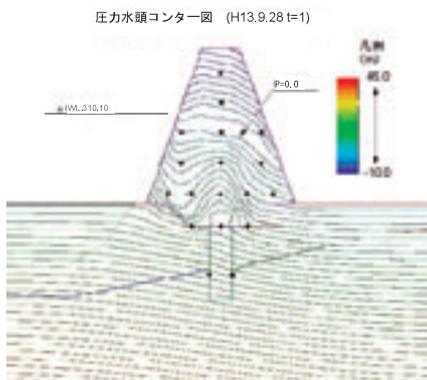


Fig.4-50 圧力水頭コンター図 (2001.9月)
Contour line of water pressure head(September, 2001)

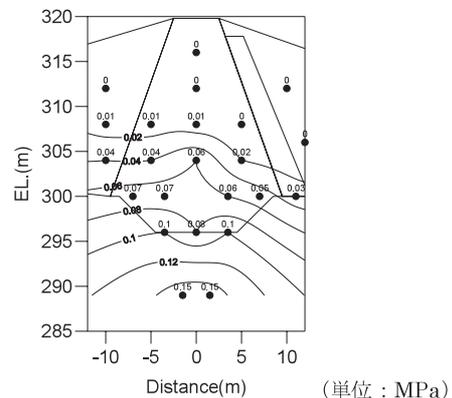


Fig.4-51 間隙水圧分布 (2001.9月)
Pore water pressure(September, 2001)

から、補完するかたちでコンターを引いているものであるが、不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析結果では、**Fig.4-54** に示すように、遮水ゾーンの表層部分で急激な圧力水頭低下となっていると推測された。

これまで、フィルダム試験湛水時の安全性に関しては、間隙水圧計のデータを単純に補完した圧力水頭コンター図によって遮水性を評価していた。しかし、特に試験湛水のように、不飽和状態への浸潤が起りうる状況においては、ここに示した不飽和・飽和域を考慮した浸透流解析が非常に有効なツールとして利用できることが示された。

(3) 最低水位に水位を下げた 2001 年 12 月下旬の結果

次に、貯水が満水位に達して 1 ヶ月を経過した 2001 年 12 月上旬から 17 日間かけて水位を下げ、L.W.L. に達した 2001 年 12 月下旬時点での浸透流解析により推定される圧力水頭コンター図、全水頭コンター図、流速コンター図をそれぞれ **Fig.4-56~58** に示す。また、そのときの間隙水圧分布を **Fig.4-59** に示す。透水係数が 1×10^{-4} (cm/s) オーダーで施工管理を行ったゾーンⅡ材の部分では、貯水位の低下に伴い、速やかに間隙水圧が小さくなった。一方、遮水ゾーン上流側の間隙水圧計のデータでは、ゾーンⅡ材中に設置している間隙水圧計の分布と比較して、残留間隙水圧が発生した。不飽和・飽和領域

を考慮した浸透流解析結果では、流速コンター、全水頭コンターとも、貯水がなくなった遮水ゾーン上流側表面で緩やかな浸透水の移動が確認でき、間隙水圧分布の結果と非常によく一致した。さらに、**Fig.4-52** と **Fig.4-56** の流速コンター図を比較すると、貯水がなくなったにもかかわらず、**Fig.4-56** の結果では、徐々に下流フィルターに流出する浸透水の流速が増加傾向にあることが示された。

以上に示されたように、不飽和・飽和域を考慮した浸透流解析において、ほぼ、間隙水圧の分布を説明することができた。さらに、試験湛水という短い期間においては、遮水部全体が浸潤する可能性は小さく、遮水部のごく表層のみが浸潤すると考えられた。一方、間隙水圧の結果からは、遮水ゾーン上流側では、貯水に伴って間隙水圧が上昇する箇所も見られるが、試験湛水というわずかな貯水期間においては、全体に浸潤して浸潤線を形成するのではなく、間隙水の圧力伝播などによるものもあると想定できる。以降の第Ⅳ章 8 では、比抵抗トモグラフィ法で得られた比抵抗分布や変化率、間隙水圧計や温度計の記録、不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析の結果を総合的に評価し、比抵抗トモグラフィ法で得られた比抵抗変化が意味している現象を考察する。

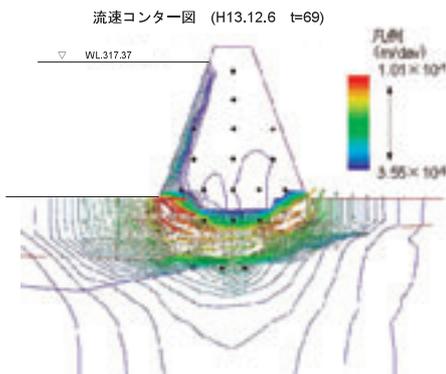


Fig.4-52 流速コンター図 (2001.12 月上旬)
Contour line of velocity (Beginning of December, 2001)

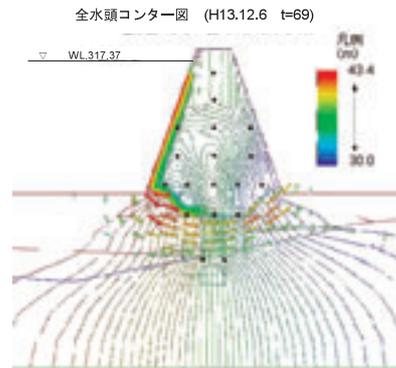


Fig.4-53 全水頭コンター図 (2001.12 月上旬)
Contour line of total head (Beginning of December, 2001)

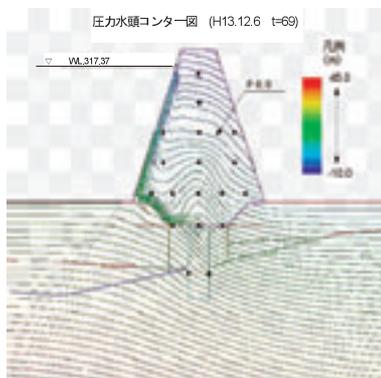


Fig.4-54 圧力水頭コンター図 (2001.12 月上旬)
Contour line of pressure head (Beginning of December, 2001)

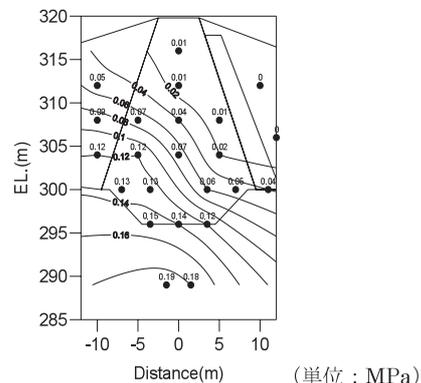


Fig.4-55 間隙水圧分布 (2001.12 月上旬)
Pore water pressure (Beginning of December, 2001)

8 現地実証試験の考察

高柴調整池で行っている実証試験について、比抵抗トモグラフィ法による堤体内部の比抵抗分布の変化を時系列的に述べてきた。本節では、これらの比抵抗変化と、観測した間隙水圧分布、温度分布などの結果、不飽和・飽和域を考慮した浸透流解析結果と対比することにより、比抵抗トモグラフィ法による比抵抗分布変化の原因を考察する。なお、ここでは、試験湛水前、貯水位満水到達時、最低水位時に分類してこれらの結果を総括し、その評価を行うこととする。

a 試験湛水前の結果 (2001年9月)

堤体の盛立が2000年12月に完了し、3ヶ月を経過した2001年3月より比抵抗トモグラフィ法による堤体内部の比抵抗モニタリングを継続している。第IV章7.dでは、2001年7月の比抵抗分布が上下流断面、ダム軸断面とも大きく比抵抗値が減少するという状況が見られたが、この月のデータ以外では、おおむね比抵抗値の変動が±2.5%の範囲に入っており、大局的な比抵抗構造の変動はないと考えられる。そこで、試験湛水前の結果として、2001年9月の結果を取り上げ、種々の調査および解析結果から、この月の比抵抗構造について考察する。

(1) 2001年9月の調査および解析結果

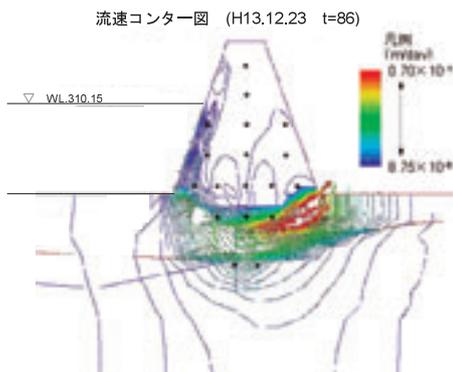


Fig.4-56 流速コンター図 (2001.12月下旬)
Contour line of velocity (End of December, 2001)

2001年9月に実施した調査および解析は、次のとおりである。

- 単独逆解析による比抵抗分布推定
- 2001年3月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ法による比抵抗分布推定
- 2001年3月の単独逆解析結果と2001年9月の単独逆解析結果との変化率
- 2001年3月の単独逆解析結果と2001年3月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ結果との変化率
- 埋設計器 (間隙水圧計, 温度計) データ
- 試験湛水開始直後の不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析結果

これらの結果を評価することにする。

(2) 考察

第IV章8.aで挙げている調査および解析結果を、以下のFig.4-60~63に示す。まず、上下流断面の比抵抗分布 (Fig.4-60) については、個別逆解析の結果も、2001年3月の比抵抗断面をリファレンスとした時系列トモグラフィによる比抵抗分布も大差がなかった。すなわち、遮水材の比抵抗値は、おおむね200Ω・m以下の比抵抗値であり、遮水ゾーン上流側のEL.305mより上側や、遮水ゾーン下流側については部分的に200Ω・m以上の比抵抗

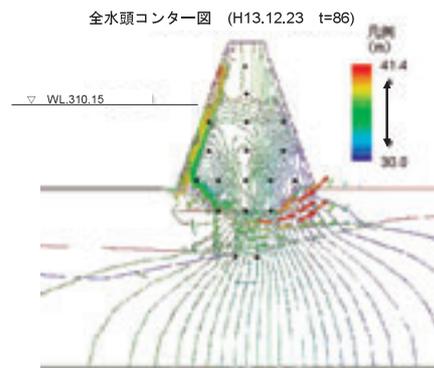


Fig.4-57 全水頭コンター図 (2001.12月下旬)
Contour line of total head (End of December, 2001)

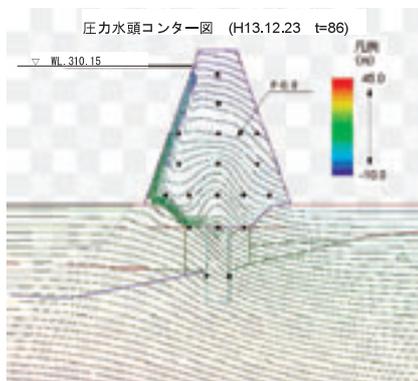
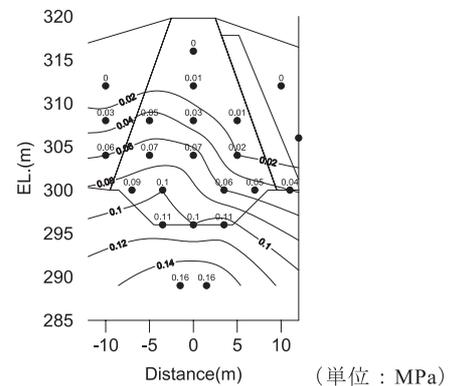


Fig.4-58 流速コンター図 (2001.12月下旬)
Contour line of pressure head (End of December, 2001)



抗値を示す比抵抗構造であった。特に $100 \Omega \cdot m$ 以下の比抵抗値の領域に着目すると、EL.307m 付近のダム軸を中心とした「山」形の分布となっている。

このような比抵抗構造を有する一因として、当初想定していた現場発生地の遮水材が不足したために、急遽代替の遮水材として、現場発生土 (Fig.4-23 に示すゾーンⅡ、Ⅲ材) と関東ローム質粘土とのブレンド材料に変更されたことが考えられた。Fig.4-64 に遮水材 I a 材の標高別の盛立品質管理結果を示す。この図の右端グラフに示され

ているように、EL.307m 付近を境に、盛立材料の物性値、すなわち細粒分含有率が約 20% 低下した。この影響が比抵抗断面に出現したと想定された。

次に、比抵抗変化率 (Fig.4-61) について考察する。個別逆解析と時系列トモグラフィとで、比抵抗値が変化した位置には、大差は認められなかった。主として、水平距離 0~3m 付近、EL.300~305m 付近の比抵抗値が小さくなる傾向を示していた。それ以外の位置では、2001 年 3 月から 2001 年 9 月の間に比抵抗値はほとんど変化

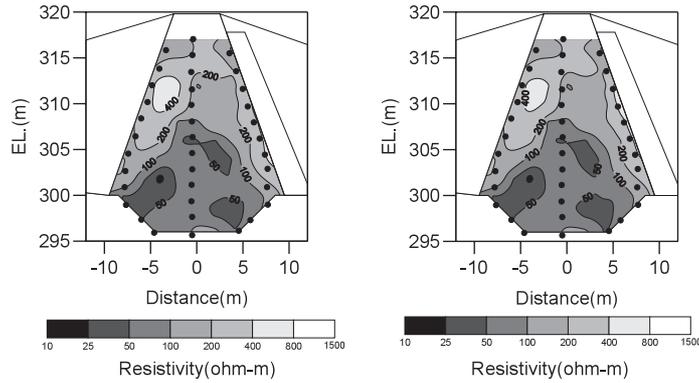


Fig.4-60 個別逆解析による比抵抗分布 (左: Fig.4-40(d)) と時系列トモグラフィによる比抵抗分布 (右: Fig.4-45(c)右図相当)
Resistivity distribution of normal inversion(Fig.4-40(d)) and time series inversion(Fig.4-45(c))

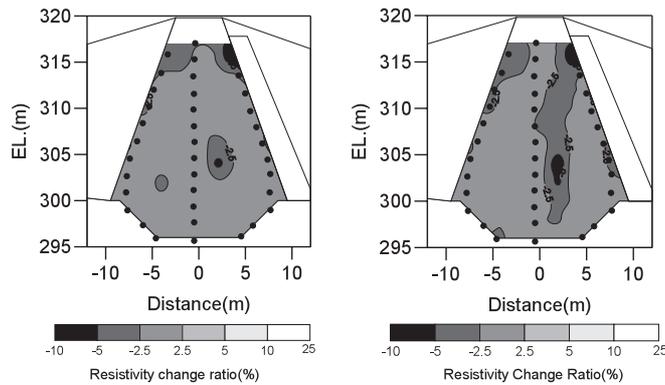


Fig.4-61 個別逆解析結果による比抵抗変化率 (左: Fig.4-40(d)相当) と時系列トモグラフィによる比抵抗変化率 (右: Fig.4-45(c)右図)
Change ratio of resistivity of normal inversion(Fig.4-40(d)) and time series inversion(Fig.4-45(c))

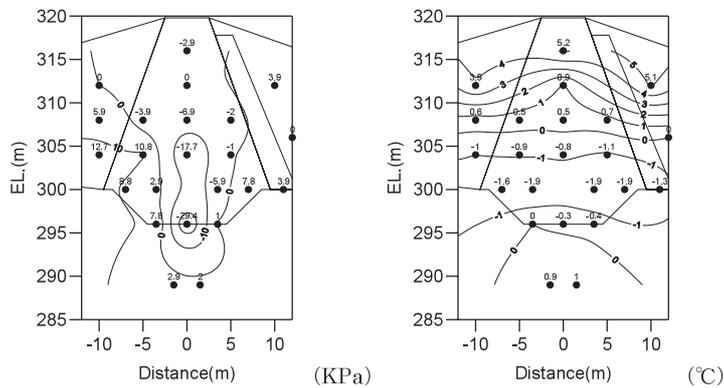


Fig.4-62 2001 年 3 月を基準としたときの間隙水圧差および温度差
Difference of pore water pressure and temperature compared with the value at March, 2001

していなかった。

試験湛水前に比抵抗変動が起こりうる要因として、外的要因による比抵抗変化、内的要因による比抵抗変化が考えられた。

① 外的要因

試験湛水前には、比抵抗変動に影響を与える外的要因は、仮排水路トンネルの閉塞による上流側の貯水である。自流域はないものの、周辺地山からの湧水により、L.W.L. 以下の EL.309m まで貯水した。この影響により、EL.309m より標高が低い上流側ゾーンⅡ材あるいはコアトレンチ内部は、これらの影響があったものと推測される。

② 内的要因

一方、内的な要因としては、遮水材内部の間隙水圧の消散、それに伴う遮水材の圧密沈下、温度の変化などがある。一般に、土粒子中の間隙が比抵抗値一定と仮定できる水で満たされている場合、圧密などにより密な構造になれば、比抵抗値は大きくなる。しかし、土粒子中が空気ですべて満たされている場合には、間隙中の空隙量が減少することにより、比抵抗値は小さくなる。Fig.4-62 の間隙水圧計の結果は、2001 年 9 月の間隙水圧から 2001 年 3 月の間隙水圧を差し引いた値、すなわち全水頭変化量とそのコンターを示している。上流側のランダムゾーンおよび遮水ゾーンにおいて、ごくわずかではあるが間隙水圧の上昇が認められた。また、間隙水の流れは、このコンターに直交するベクトルで示され、遮水ゾーン内部

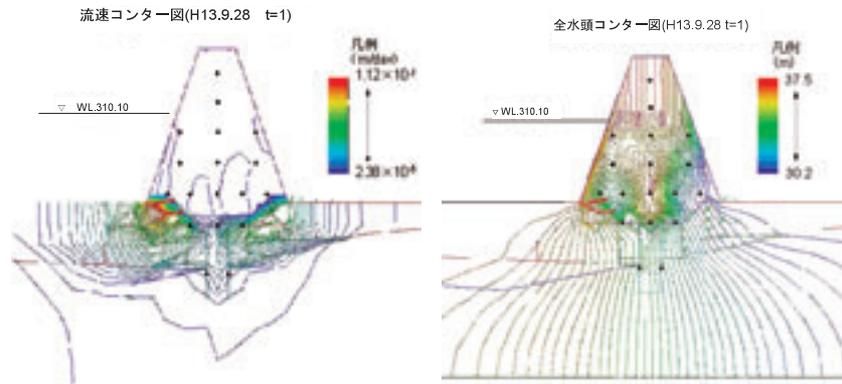


Fig.4-63 不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析による流速 (左: Fig.4-48) および全水頭結果 (右: Fig.4-49)
 Analysed velocity (Fig.4-48) and total head (Fig.4-49) using osmotic potential analysis which considers unsaturated and saturated area

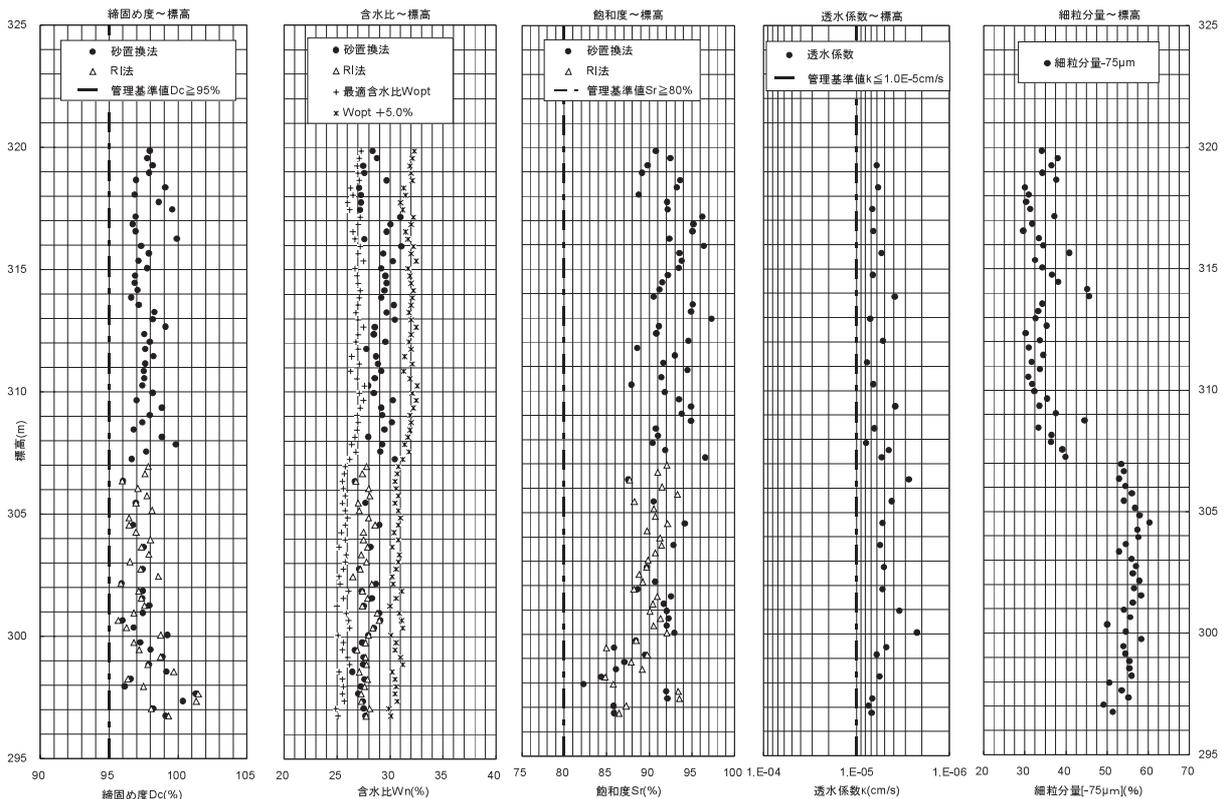


Fig.4-64 盛立管理施工結果 (ゾーンⅠa材)
 Management of compaction(zone Ia)

においては、間隙水圧が消散している様子がとらえられた。ただし、堤体の圧密沈下については、盛立完了から層別沈下計で計測した結果、盛立完了の2000年12月～2001年3月末までに最大で5.5cmの沈下(EL.308mに設置した層別沈下計の記録)であり、しかも2001年4月～9月までの期間の沈下量はわずか0.1cmであった。したがって、堤体の沈下などによる比抵抗変動への影響は少ないものと想定される。

堤体内部の温度は、基礎地盤を除いて、EL.307m以下の盛立材料については、温度が下がる傾向を示し、それより標高の高い部分は温度が上昇する傾向を示した。堤体内部の温度は、この地域の地下水の年平均気温(13～14℃)に収束すると考えられる。したがって、温度の高い夏季に施工されたEL.300～305m付近の温度は、初期の温度が高く、次第に低下する傾向が見られ、冬季に施工された堤体上部の温度は次第に温度が高くなる傾向があるものと考えられる。

さらに、Fig.4-63に示す浸透流解析の結果からは、特に遮水ゾーン上流側から内部への流速が認められ、残留間隙水圧が発生していたダム軸付近への浸潤は少ないことが解析からも示されている。

(3) 総合評価

比抵抗トモグラフィ法によって観測された2001年9月の比抵抗変化は、間隙水圧の消散が認められたダム軸近傍の比抵抗値が2.5%以上低下していることが特徴的である。この比抵抗変化の要因は、次のように結論づけられる。すなわち、相対的に空隙の多い遮水材が、試験湛水前に圧密し、余分な空隙が減少した結果、比抵抗値が小さくなったと考えられる。特に、Fig.4-64の遮水材の盛立管理結果の標高-飽和度の関係を見ると、飽和度が相対的に低くなっているEL.300mまでの部分で間隙水圧の消散が大きくなっている。したがって、この部分では空気が封入されていたため間隙水圧が高く計測されており、それが時間の経過とともに消散し、間隙水で満たされた部分が相対的に大きくなったと想定される。このため、全体として比抵抗値が小さくなったものと考えられる。

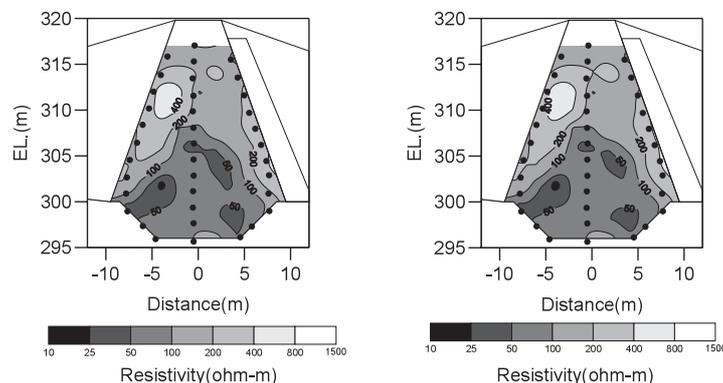


Fig.4-65 個別逆解析による比抵抗分布(左: Fig.4-41(b)左)と時系列トモグラフィによる比抵抗分布(右: Fig.4-45(e)左相当)

Resistivity distribution of normal inversion(Fig.4-41(b)) and time series inversion(Fig.4-45(e))

b 常時満水位到達時の結果(2001年11月)

2001年9月から試験湛水を開始し、2001年11月上旬に常時満水位に達した。この時点での比抵抗構造について考察する。

(1) 2001年11月の調査および解析結果

2001年11月に実施した調査および解析は、次のとおりである。

- 単独逆解析による比抵抗分布推定
- 2001年9月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ法による比抵抗分布推定
- 2001年9月の単独逆解析結果と2001年11月の単独逆解析結果との変化率
- 2001年9月の単独逆解析結果と2001年9月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ結果との変化率
- 埋設計器(間隙水圧計、温度計)データ
- 試験湛水直後の不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析結果

これらの結果を評価することにする。

(2) 考察

第4章8.bで挙げた調査および解析結果を、以下のFig.4-65～68に示す。まず、上下流断面の比抵抗分布(Fig.4-65)については、個別逆解析で得られた比抵抗分布と、2001年9月の比抵抗断面をリファレンスとした時系列トモグラフィによる比抵抗分布との差はなかった。さらに、試験湛水前の比抵抗分布と比較しても、堤体の上部で若干比抵抗値が小さくなる傾向を示しているものの、大局的な比抵抗構造には変化が認められなかった。これは、貯水後約40日しか経過していないことから、遮水部への貯水の浸潤がほとんど生じなかったためであると推測される。

次に、2001年9月の比抵抗分布を基準とした比抵抗変化率(Fig.4-66)を見ると、従来の個別逆解析の結果と時系列トモグラフィによる結果とで結果が異なった。個別逆解析の結果では、水平距離-7.5～-5mの上流側コアトレンチ、水平距離0～5mのコアトレンチ内部で比抵抗値の上昇が認められ、遮水部下流側、EL.310～

317m 付近にかけて比抵抗値が小さくなった領域が認められた。一方、時系列トモグラフィにより求められた比抵抗変化率では、より詳細な比抵抗変動が認められ、時系列トモグラフィによる解析の効果が発揮されている。特に距離 -7~-5m の EL.305m までの領域と、距離 0~5m の EL.305m までの領域にかけては、2001 年 9 月の比抵抗値と比較すると、大きいところで 5%、全体として 2.5% の比抵抗上昇が認められている。さらに、個別逆解析による比抵抗変化率の結果でも認められたように、水平距離 0~5m の堤体上部から下流フィルターゾーン

にかけての領域に 2.5% の比抵抗低下領域が認められた。さらに、距離 -5~0m の EL.302m 付近に、局所的ではあるが、比抵抗値の減少が認められた。以上のように、貯水池側から下流にかけて一定の傾向で比抵抗値が変動する様子は捉えられず、むしろ不均一に比抵抗変化が生じているという結果が得られた。

Fig.4-67 の間隙水圧分布の差および温度分布の差を見ると、堤体上流側では、貯水の影響により間隙水圧が増加していた。この図から、貯水が遮水部へ浸透していく過程においては、堤体遮水ゾーン上流側下部から浸潤が

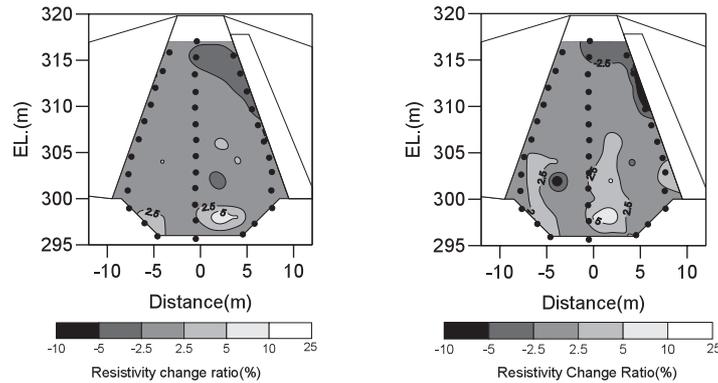


Fig.4-66 個別逆解析結果による比抵抗変化率（左：Fig.4-41(b)左相当）と時系列トモグラフィによる比抵抗変化率（右：Fig.4-45(e)左）

Change ratio of resistivity of normal inversion(Fig.4-41(b)) and time series inversion(Fig.4-45(e))

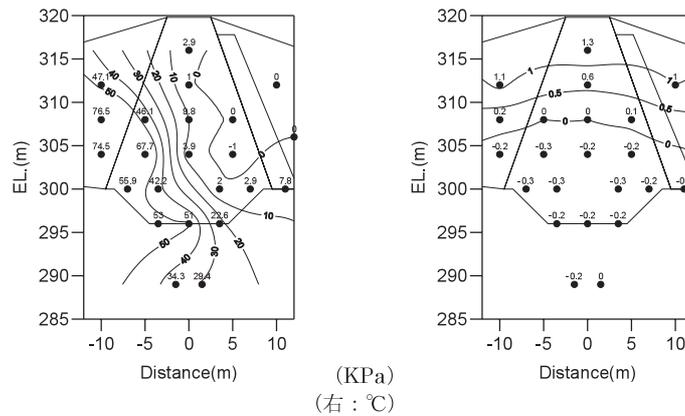


Fig.4-67 2001 年 9 月を基準としたときの間隙水圧差および温度差

Difference of pore water pressure and temperature compared with the value at September, 2001

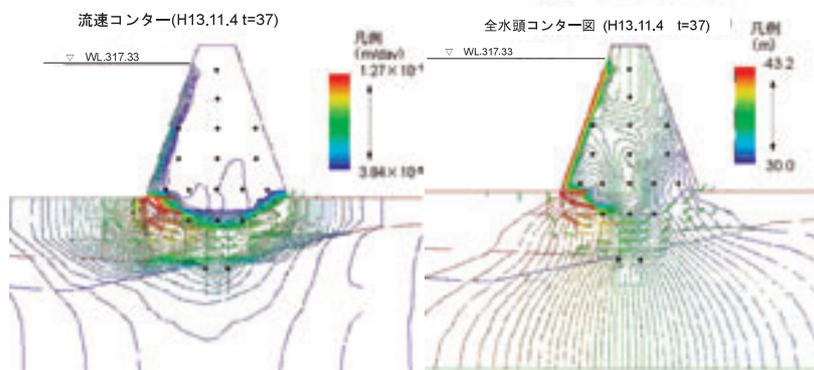


Fig.4-68 不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析による流速（左）および全水頭（右）結果

Analysed velocity and total head using osmotic potential analysis which considers unsaturated and saturated area

開始することが分かる。すなわち、遮水ゾーン表層で遮水された貯水が、遮水ゾーンを迂回して基礎地盤内を浸透する過程において、遮水ゾーンの上方側底部から浸潤が進行する可能性がある。また、貯水は地下水に比べると比抵抗値が大きいことから、遮水ゾーン底部の比抵抗値が上昇したと考えられた。さらに、温度は、堤体上部ほど上昇傾向があり、コアトレンチ内部では、若干ではあるが温度が低下する傾向が見られた。

Fig.4-68の不飽和浸透流解析の結果では、遮水材の透水係数が 1×10^{-6} (cm/s) オーダーと高いため、試験湛水のわずかな期間では遮水ゾーン内部にまで貯水は浸透せず遮水ゾーン表層部分のみ浸透していること、さらに浸透水は主として基礎地盤部を浸透している様子がとらえられた。したがって、常時満水位に達した2001年11月、遮水ゾーン内部にまで貯水が侵入し、比抵抗値が変化したという可能性は低いと考えられた。

(3) 総合評価

以上の結果を総合的に判断すると、2001年11月に観測されている比抵抗変動は、次のとおりと考えられる。

まず、時系列トモグラフィにより明らかとなった堤体上部での比抵抗値の低下は、堤体内部温度の上昇と関連している可能性が考えられた。すなわち、温度が上昇傾向にある標高の高い遮水部から遮水部下流側のフィルター部分にかけて比抵抗値が変化しているため、温度の高くなった領域で比抵抗値の低下が見られたと考えられた。なお、温度の影響に関しては、地中1m地点における約15℃の温度変化により、約60%の比抵抗変化が確認された事例が報告されている。(中里ほか, 1998)。

一方、時系列トモグラフィによる比抵抗分布の結果-7.5~5m, EL.295~305m付近の上流側に見られる比抵抗値が上昇している領域に関しては、堤体遮水材の透水係数や浸透流解析の結果から判断すると、遮水ゾーン表層で遮水された貯水が、遮水ゾーンを迂回して基礎地盤内を浸透する過程において、遮水ゾーンの上方側底部から浸潤が進行する可能性があると考えられる。ダム軸より下流側についても、遮水ゾーンと基礎地盤との境界付近を浸透する貯水が、遮水材底面から不均一に浸潤する

可能性があると考えられた。

c 満水位1ヶ月経過後の結果 (2001年12月)

2001年11月にF.W.L.に到達し、12月上旬まで30日間満水位を継続させた。この時点での比抵抗構造について考察する。

(1) 2001年12月の調査および解析結果

2001年12月に実施した調査および解析は、次のとおりである。

- 単独逆解析による比抵抗分布推定
- 2001年9月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ法による比抵抗分布推定
- 2001年9月の単独逆解析結果と2001年12月の単独逆解析結果との変化率
- 2001年9月の単独逆解析結果と2001年9月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ結果との変化率
- 埋設計器 (間隙水圧計, 温度計) データ
- 試験湛水直後の不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析結果

そこで、これらの結果を評価することにする。

(2) 考察

第4章8.cで挙げた調査および解析結果を、以下のFig.4-69~72に示す。個別逆解析の結果 (Fig.4-69) では、EL.310~312mの上流側比抵抗値が $800 \Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗となっている。しかし、2001年9月の比抵抗断面をリファレンスとした時系列トモグラフィによる比抵抗分布では、 $800 \Omega \cdot m$ を超える高比抵抗部は認められず、これまでの比抵抗構造と大差がないという結果となった。試験湛水前の比抵抗分布 (Fig.4-60) と比較すると、堤体コアトレンチ内部に存在していた $50 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗領域が小さくなり、全体的に高比抵抗化したのが特徴的である。この結果を反映し、Fig.4-70に示す比抵抗変化率では、コアトレンチ内部の比抵抗値や、EL.310~312mの上流側の比抵抗値が高くなっている。

一方、2001年9月との間隙水圧差、温度差はFig.4-71に示すとおりである。満水位に達した直後の2001年11月の間隙水圧差 (Fig.4-67左) と比較すると、EL.305m

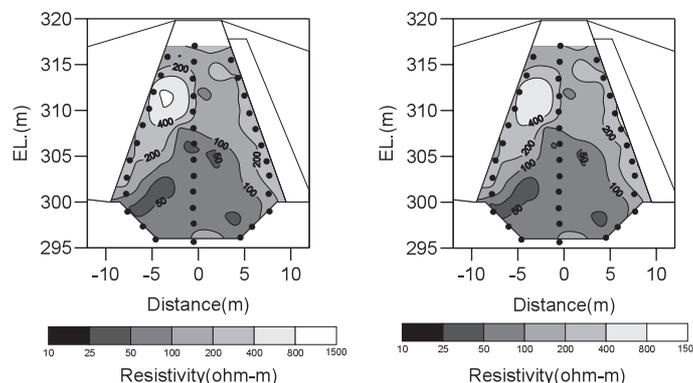


Fig.4-69 個別逆解析による比抵抗分布 (左: Fig.4-41(b)右) と時系列トモグラフィによる比抵抗分布 (右: Fig.4-45(e)右相当)

Resistivity distribution of normal inversion(Fig.4-41(b)) and time series inversion(Fig.4-45(e))

よりも標高の高い部分、特に上流側の間隙水圧は上昇する傾向を示した。しかし、EL.305mよりも標高の低い部分における間隙水圧の差は、変化は少ない。これは、遮水ゾーン内部の残留間隙水圧が大きいため、貯水が浸透しにくい環境にあるためと考えられる。不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析によれば、Fig.4-72の計算結果に示されるように、浸潤は遮水ゾーン表層から徐々に進行しているように計算される。しかし、実際の貯水の浸透は、Fig.4-72に示されているように均一に進行するの

ではなく、間隙水圧が残留していない部分を通して不均一に進行している可能性がある。

Archieの理論式(4.1)によると、岩石や地層の比抵抗、間隙率、飽和度、間隙水の比抵抗が全体の比抵抗値を決定することになる。今回の場合、遮水材を構成する土そのものの比抵抗値が浸潤により変動する影響は少ない。したがって、比抵抗モニタリングで認められる比抵抗値の変動は、間隙率、飽和度、間隙水の比抵抗値の関数であるといえる。このうち、飽和度に関しては、盛立

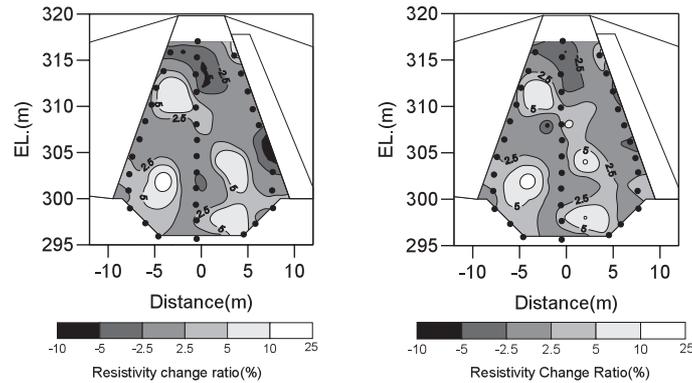


Fig.4-70 個別逆解析結果による比抵抗変化率(左: Fig.4-41(b)右相当)と時系列トモグラフィによる比抵抗変化率(右: Fig.4-45(e)右)
Change ratio of resistivity of normal inversion(Fig.4-41(b)) and time series inversion(Fig.4-45(e))

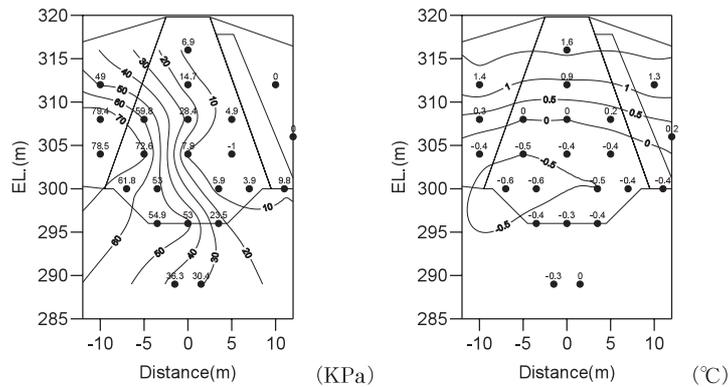


Fig.4-71 2001年9月を基準としたときの間隙水圧差および温度差
Difference of pore water pressure and temperature compared with the value at September, 2001

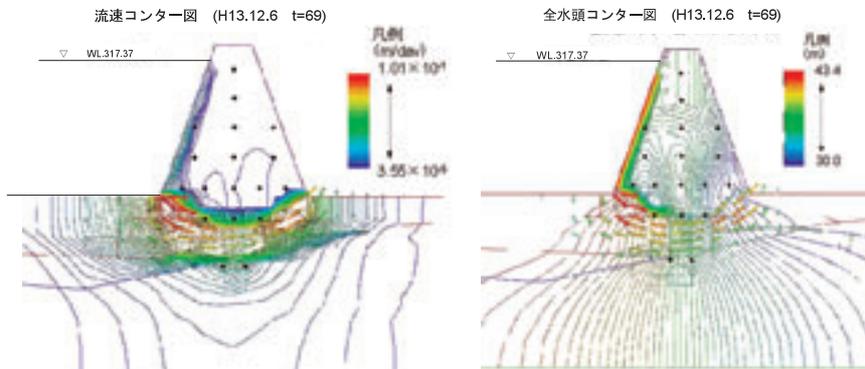


Fig.4-72 不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析による流速(左)および全水頭(右)結果
Analysed velocity and total head using osmotic potential analysis which considers

管理結果から、コアトレンチ内部で85%程度と小さかったものの、EL.300m 以上ではほぼ 90%以上となっていることが確認されている。これが貯水により 100%となったとしても、比抵抗値が大きく変動する可能性は少ない。したがって、浸潤により比抵抗値が変動する要因としては、①浸水沈下や圧密などによる間隙率の低下による比抵抗変動と、②間隙水が貯水により置き換わることによる比抵抗変動、であると考えられる。

試験湛水期間中に高柴調整池漏水量観測室で計測した浸透水の水温、pH、電気伝導度ECを Fig.4-73 に示す。凡例の「右斜面」は、堤体下流右岸の地すべり対策で設置したドレーンからの湧水である。水温は、おおむね 14~15℃を示し、堤体内部の温度は、この温度に近づく傾向があるものと推測される。pH もおおむね中性~弱アルカリ性を示しており、貯水前後での大差はない。電気伝導度はおおむね 24~26mS/m (比抵抗値換算で 38~42Ω・m) 程度を示していた。一方、貯水の電気伝導度は 12~17mS/m (比抵抗値換算で 59~83Ω・m) であり、堤体ドレーンからの浸透水と比較すると低い (比抵抗値としては大きい) 傾向があることが分かった。したがって、24~26mS/m 程度の地下水で間隙が満たされた堤体内部に 12~17mS/m の貯水が浸透した場合、全体として比抵抗値が上昇する可能性がある。

一方、温度はこれまでの傾向と同様、上部ほど温度が高くなり、底部ほど温度が減少する傾向を示した。特にコアトレンチ上流側では、温度が 0.6℃低下している。

また、浸透流解析の結果では、貯水位が満水位に達して日数が経過したことから、遮水ゾーン上流部で徐々に流速コンターが広がりを見せているが、2001 年 11 月との差はほとんどないという結果となった。

(3) 総合評価

以上の結果を総合的に判断すると、2001 年 12 月に観測されている比抵抗変動は、全体的に 2001 年 11 月の結果と同様であると判断される。まず、堤体上部での比抵抗値の減少は、これまでと同様、堤体内部温度の上昇したことによるものであると推測される。

遮水材内部、特に間隙水圧の変化している領域で比抵抗値が上昇している原因については、これまで電気伝導度 24~26mS/m の地下水などにより飽和されていた盛土が、電気伝導度 12~17mS/m の貯水で置き換わったことにより、全体的な比抵抗値が上昇する可能性が示唆された。

d 最低水位に 1 ヶ月保持後の結果 (2002 年 1 月)

2001 年 12 月上旬まで 30 日間満水位を継続させたのち、放流を開始し、12 月 23 日に最低水位 (L.W.L.310m) に至った。翌 2002 年 1 月 18 日までの 32 日間最低水位を保持した時点で比抵抗トモグラフィ法による計測を行っている。この時点での比抵抗構造について考察する。

(1) 2002 年 1 月の調査および解析結果

2002 年 1 月に実施した調査およびは、次のとおりである。

- 単独逆解析による比抵抗分布推定

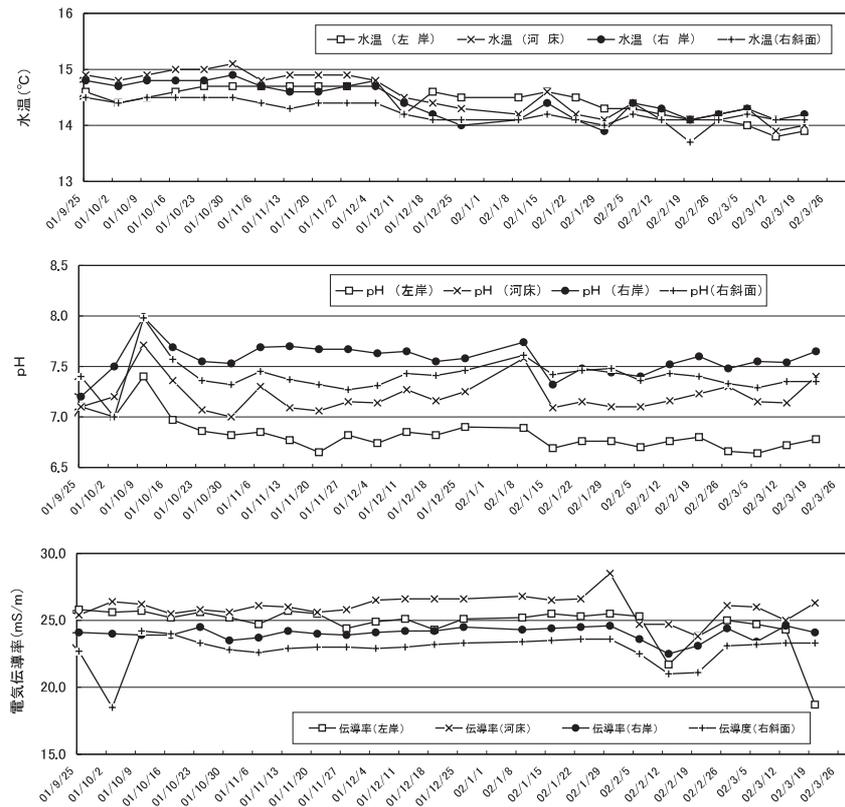


Fig.4-73 試験湛水期間中の堤体下部および右岸下流斜面部からの浸透水の水質
Phreatic water quality from the bottom of resevoir and right abutment during test filling

- 2001年9月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ法による比抵抗分布推定
- 2001年9月の単独逆解析結果と2002年1月の単独逆解析結果との変化率
- 2001年9月の単独逆解析結果と2001年9月の比抵抗分布をリファレンス断面とした時系列トモグラフィ結果との変化率
- 埋設計器（間隙水圧計，温度計）データ
そこで，これらの結果を評価することにする。

(2) 考察

第IV章8.dで挙げた調査および解析結果を，以下のFig.4-74～77に示す。なお，不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析結果は，貯水位が最低水位に達した直後の2001年12月末の解析結果を示している。Fig.4-74に示す上下流断面の比抵抗分布については，個別逆解析結果で800Ω・mを超えていた上流側の高比抵抗領域の比抵抗値が低下したこと，ダム軸のEL.308m付近の比抵抗値が小さくなったこと，コアトレンチ上流側の比抵抗値がさらに上昇傾向にあること，などが特徴的である。しかし，2001年12月から大きな比抵抗構造の変化は認められない。Fig.4-75の比抵抗変化率分布が2001年12月の比抵抗変化率分布とほぼ同じであることから，この2001年12月から2002年1月にかけての比抵抗変化は小さいことが分かる。

一方，2001年9月との間隙水圧差，温度差はFig.4-76

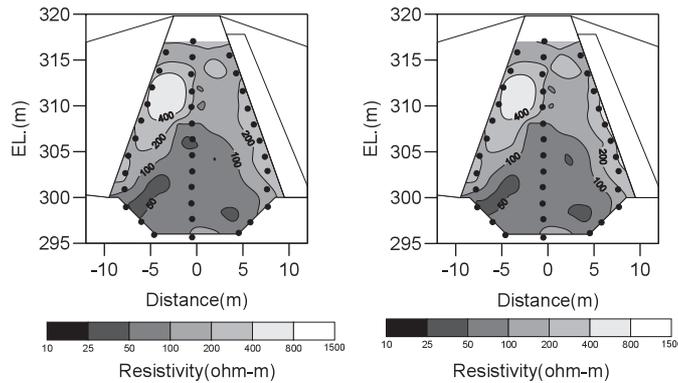


Fig.4-74 個別逆解析による比抵抗分布（左：Fig.4-41(c)左）と時系列トモグラフィによる比抵抗分布（右：Fig.4-45(f)左相当）
Resistivity distribution of normal inversion(Fig.4-41(c)) and time series inversion(Fig.4-45(f))

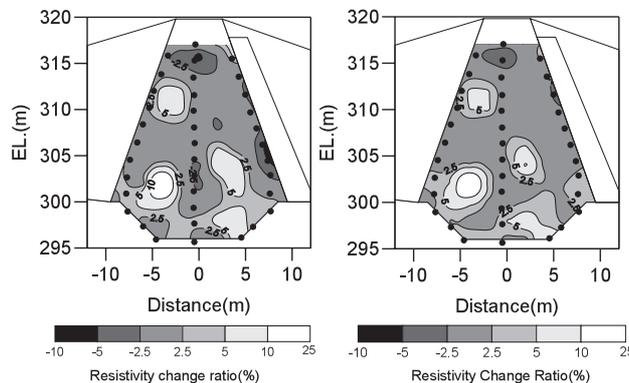


Fig.4-75 個別逆解析結果による比抵抗変化率（左：Fig.4-41(c)左相当）と時系列トモグラフィによる比抵抗変化率（右：Fig.4-45(f)左）
Change ratio of resistivity of normal inversion(Fig.4-41(c)) and time series inversion(Fig.4-45(f))

に示すとおりである。上流側およびダム軸センターに埋設したEL.308mで残留間隙水圧が発生する傾向が認められた。しかし，全水頭ほとんど差がないため，間隙を満たす水の移動は発生していないことが分かる。このことから，貯水位を下げたにもかかわらず2001年12月の常時満水位の比抵抗分布（Fig.4-69，Fig.4-70）との差が認められないのは，土粒子間隙にある間隙水の移動がないためであると考えられる。

温度に関しては，堤体下部のコアトレンチ内がほぼ0.5～1℃低下した領域となっている。浸透流解析の結果では，上流側の貯水位の減少に伴い，堤体への浸透力が弱まっているが，堤体下流側の基礎地盤と遮水材との境界付近に，大きな流速が発生していると予測された。遮水材内部への浸透に関しては，ダム軸EL.308m付近で発生している残留間隙水圧により，堤体の中心部への浸透は抑制される傾向にあると考えられる。

(3) 総合評価

以上の結果を総合的に判断すると，2002年1月に観測されている比抵抗変動は，全体的に2001年12月の結果と同様であると判断される。まず，堤体上部での比抵抗値の減少は，これまでと同様，堤体内部温度の上昇したことによるものであると推測される。

遮水材上流側の比抵抗値が上昇している原因については，例えば，これまで24～26mS/mの地下水などにより飽和されていた盛土が，電気伝導度12～17mS/mの貯水

で置き換わったことにより、全体的な比抵抗値が上昇し、その後貯水位を下げたものの、間隙水の比抵抗値に変動がないため、2001年12月と2002年1月の結果は、ほぼ同様の比抵抗分布を示している可能性が示唆された。

ダム軸下流側については、基礎地盤を流れる浸透水が遮水材底面から浸潤し、電気伝導度の低い地下水などにより飽和されていた盛土が、電気伝導度のより低い貯水で置き換わったことにより、全体的な比抵抗値が上昇したものと推測される。

e 想定される試験湛水期間中の比抵抗変動メカニズムと今後の課題

以上の考察から、試験湛水期間中に発生した比抵抗変動のメカニズムとして、次のような事項が想定される。

① 温度変化による比抵抗変動

堤体内部に埋設した温度計の結果から、堤体内部の初期温度は盛立時期と密接に関連していた。さらに、温度は、時間の経過とともに14~15℃付近に漸近する傾向があった。特に堤体遮水材上部では、施工時期が冬季であったことから、初期の堤体温度が低く、次第に温度が上昇した。このため、堤体上部では、比抵抗値が小さくなる傾向を示したものと考えられる。今後、地表面にもっとも近いEL.316mに設置した温度計は、季節変動を示す可能性があり、これに伴い、比抵抗値の季別増減がみられる可能性がある。

② 浸潤による比抵抗値の上昇

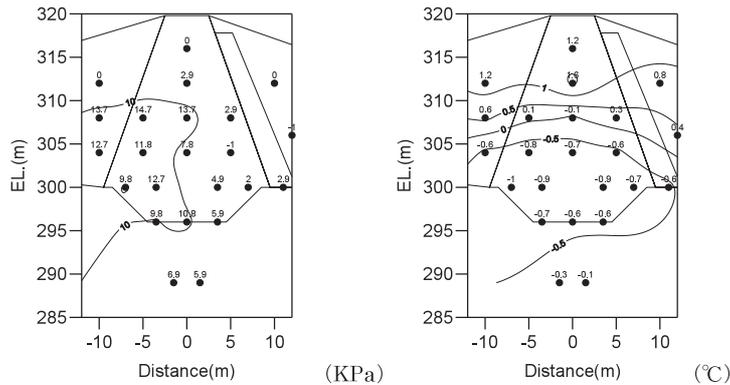


Fig.4-76 2001年9月を基準としたときの間隙水圧差および温度差

Difference of pore water pressure and temperature compared with the value at September, 2001

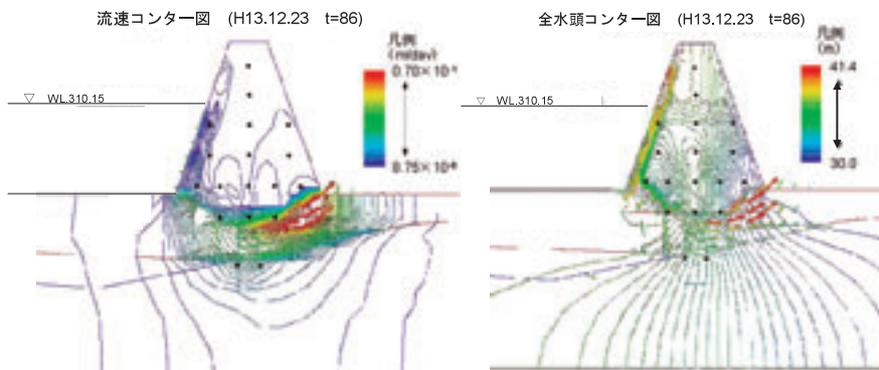


Fig.4-77 不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析による流速(左)および全水頭(右)結果

Analysed velocity and total head using osmotic potential analysis which considers

堤体ドレーンから流出する浸透水や、堤体右岸下流の地すべり土塊から流出する地下水の電気伝導度は、ほぼ24~26mS/m程度であった。一方、貯水の電気伝導度は、降雨や沢水など、地表面流の流入もあり、12~17mS/m程度である。このことから、Archieの理論式によれば、これまで電気伝導度の24~26mS/m地下水で浸潤していた遮水材が、電気伝導度の12~17mS/mの貯水で置き換わることにより、全体的な比抵抗値が上昇する可能性がある。このメカニズムによると、今後、本システムで比抵抗変動を連続的に監視する場合、例えば地震やパイピング現象などによって大きな流動経路の変化が発生した場合、これらを検知できる可能性があると考えられる。

また、今後の課題としては、比抵抗変動に与える影響度を定量的に評価すること、また、異なる電極配置によるデータの取得が上げられる。遮水ゾーンが浸潤することにより、含水比は大きくなり、飽和度が高くなる、浸水沈下などにより間隙率が小さくなるなどの現象が発生する。これらのどのファクターが比抵抗変動の支配要因になるかについては、これまでの結果では決定づけることはできていない。今後高柴調整池で利用した遮水材を利用し、環境が制御された室内での試験などにより、これらの影響度を再評価することが必要である。さらに、今回、電極配置に2極法を選定した。2極法では遠電極を設置する作業が必要であるものの、計測の自動化が容易で、得られる電位差も大きいため、今後も主流となる

と思われる。しかし、電流電位電極間で逆感度を示すというその特性上、実際のダム管理システムに採用する場合には、必ず解析を行わなければ正確な比抵抗変動領域が明瞭に現れない。このため、異なる感度分布を有する3極法や4極法などを組み合わせて計測することにより、比抵抗値の変動した領域をより絞り込むことが可能となる。また、種々の電極配置を組み合わせることで、より精度の高い解析が可能となる。今後は高柴調整池のデータに関しても他の電極組み合わせでのデータを取得していく予定である。

9 比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理における適切な電極配置に関する考察

これまでに、室内実験から高柴調整池における現地実証試験の結果を示した。これらの結果を参考に、新たに比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理システムを導入する場合の電極配置などについて、高柴調整池で得られた知見をもとに、九州農政局管内の木之川内ダムを想定した電極の配置計画の策定を試みた。木之川内ダムは、2009年完成を目標に現在築造中の畑地かんがい用のダムであり、堤高64.3m、堤頂長409.7m、堤体積1,501千m³の中心遮水型ロックフィルダムである。

a 想定した電極配置

高柴調整池における比抵抗トモグラフィ法の計測で明らかになった問題点を抽出した結果は、次のとおりである。

① 遮水ゾーンにしか電極が配置されていない

遮水材内部に3系列の電極が配置されており、遮水材内部の比抵抗変化についてはほぼ網羅できた。しかし、浸潤に最も関連する堤体上流側の貯留水の影響の評価が

難しいことが明らかになった。さらに、用いる電極配置の特性によっては、電極系の内側の変化（高柴調整池の場合、遮水材内部の比抵抗変化）と外側の変化（高柴調整池の場合、電極で取り囲んだ外側のランダムゾーンの比抵抗変化）との区別ができない場合がある可能性が示唆された。

② 遮水材の透水係数が 1×10^{-6} (cm/s) オーダーであるため、遮水材内部への浸潤に時間を要する（これは浸透流解析でも明らかとなった）。間隙水圧計が大きく変動する堤体上流側の比抵抗変化をモニタリングすることで、本手法の適用性が迅速に評価できる。

これらの問題点に対応する比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理を想定し、電極配置計画を策定した。Fig.4-78に木之川内ダムのゾーン区分および電極配置案を示す。電極は、堤体最大断面に配置する計画とした。上流ゾーンの浸潤状況を確認するため、上流側のゾーンごとに、L1~L5までの5測線の電極配置を計画した。各電極の座標はTable 4-7に示すとおりである。座標は、水平方向をx軸、標高をz軸として表示している。x座標の原点はダム軸とし、下流側を正とした。なお、電極は、電極間隔を均一に配置するのではなく、電極の設置施工性を考慮して標高4mピッチとした。

b 目的および手順

浸潤その他の現象により、堤体内部の任意の場所に比抵抗変動（特に低比抵抗化した場合を想定している）が生じた場合、どの程度までの比抵抗変動が認識できるかを事前に把握することを目的として、設計した電極配置における低比抵抗異常の検出精度を数値実験により検証した。検証は次の手順で行った。

(1) 盛土比抵抗値の設定

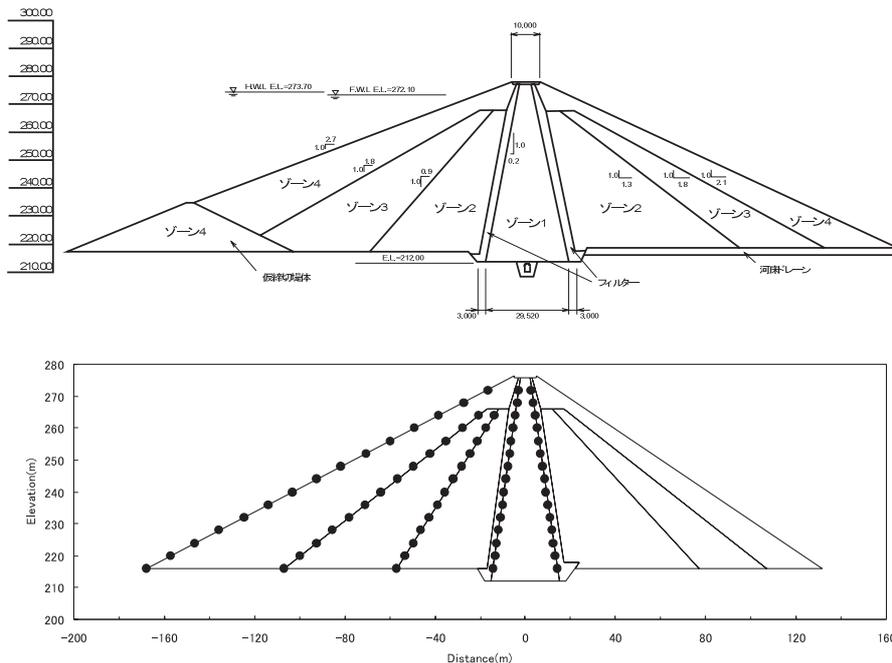


Fig.4-78 木之川内ダムのゾーン区分および電極配置案

Zone arrangement at Konokawachi rock fill dam and proposed electrodes array

Fig.4-79 に示すように、フィルダム堤体のゾーンを分割し、各ゾーンに次の比抵抗値を与え、初期モデルとした。盛立材料の比抵抗値は、上流側ゾーン①～③の比抵抗値 $300 \Omega \cdot m$ 、上流側フィルター④の比抵抗値を $1,000 \Omega \cdot m$ 、遮水材の比抵抗値⑤を $100 \Omega \cdot m$ 、下流側フィルター⑥の比抵抗値を $1,000 \Omega \cdot m$ 、下流側ゾーン⑦～⑨の比抵抗値を $300 \Omega \cdot m$ 、基礎地盤⑩の比抵抗値を $500 \Omega \cdot m$ と仮定した。

(2) 想定した低比抵抗異常 Case

Fig.4-79 の白色で示した領域に、比抵抗変動領域を設定する。ここでは、Case1～Case4 として、下記の Table 4-8 に示す条件を想定した。

(3) 観測される電位分布の順計算

上記のそれぞれの Case について、Fig.4-79 のモデルの中に比抵抗変動領域を組み込み、比抵抗変化が発生したときに理論上観測される電位分布を順解析 (FEM) に

より計算する。

(4) 観測値への変換

FEM により計算された電位分布に $\pm 5\%$ の正規分布ノイズを加えた値を、便宜上測定機を使って計測した場合の観測値と見なした。なお、抵抗が既知の標準抵抗を使用して現在野外計測に使用している測定機の計測精度を確認したところ、標準抵抗の $\pm 0.5\%$ 以内で計測できることを確認しているの、ここで与えた $\pm 5\%$ の正規分布ノイズは、測定精度以上のノイズを与えたと評価できる。なお、現地では周辺の電線などの影響も受ける可能性があり、公称での機械精度は $\pm 3\%$ 程度である。

(5) 解析条件の設定

次に、フィルダム堤体内部に、Fig.4-80 に示す比抵抗グリッドを仮定する。比抵抗トモグラフィによる解析では、これら各グリッドの比抵抗値が未知パラメータとなり、逆解析によりそれぞれの比抵抗値を同定することに

Table 4-7 L1～L5 の電極設置座標

coordinate of electronodes on line L1-L5

L1		L2		L3		L4		L5	
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
-14.185	216.000	14.185	216.000	-57.000	216.000	-107.000	216.000	-168.000	216.000
-13.370	220.000	13.370	220.000	-53.400	220.000	-99.800	220.000	-157.187	220.000
-12.555	224.000	12.555	224.000	-49.800	224.000	-92.600	224.000	-146.375	224.000
-11.740	228.000	11.740	228.000	-46.200	228.000	-85.400	228.000	-135.562	228.000
-10.925	232.000	10.925	232.000	-42.600	232.000	-78.200	232.000	-124.750	232.000
-10.110	236.000	10.110	236.000	-39.000	236.000	-71.000	236.000	-113.937	236.000
-9.295	240.000	9.295	240.000	-35.400	240.000	-63.800	240.000	-103.124	240.000
-8.480	244.000	8.480	244.000	-31.800	244.000	-56.600	244.000	-92.312	244.000
-7.665	248.000	7.665	248.000	-28.200	248.000	-49.400	248.000	-81.499	248.000
-6.850	252.000	6.850	252.000	-24.600	252.000	-42.200	252.000	-70.687	252.000
-6.034	256.000	6.034	256.000	-21.000	256.000	-35.000	256.000	-59.874	256.000
-5.219	260.000	5.219	260.000	-17.400	260.000	-27.800	260.000	-49.061	260.000
-4.404	264.000	4.404	264.000	-13.800	264.000	-20.600	264.000	-38.249	264.000
-3.589	268.000	3.589	268.000					-27.436	268.000
-2.774	272.000	2.774	272.000					-16.624	272.000
電極数	15	電極数	15	電極数	13	電極数	13	電極数	15
								計	71

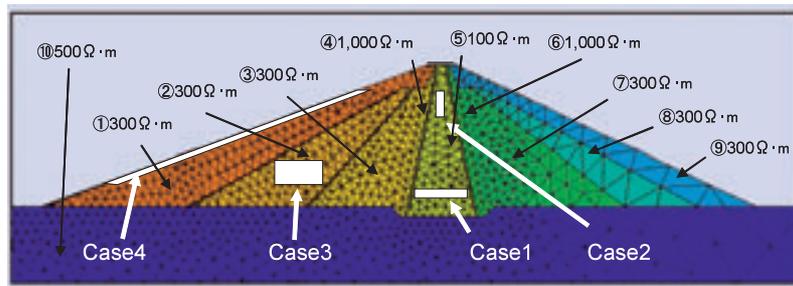


Fig.4-79 フィルダムの解析モデルおよび想定した低比抵抗変動領域

Resistivity of numerical model and assumed low resistivity zone

Table 4-8 検証に用いた Case 一覧

Numerical analysis case

想定ケース番号	比抵抗変化領域	発生した比抵抗値の変動幅
Case 1 遮水材 底部	X 座標 -10～10m Y 座標 220～222m	遮水ゾーン底部の横長の低比抵抗異常 $100 \Omega \cdot m \rightarrow 10 \Omega \cdot m$ に低下したケース
Case 2 遮水材 上部	X 座標 -2～2m Y 座標 250～260m	遮水ゾーン中央に縦長の低比抵抗異常 $100 \Omega \cdot m \rightarrow 10 \Omega \cdot m$ に低下したケース
Case 3 上流側ゾーン	X 座標 -65～-45m Y 座標 230～240m	浸潤などにより上流側ゾーンの比抵抗値が $300 \Omega \cdot m \rightarrow 100 \Omega \cdot m$ に低下したケース
Case 4 上流側ゾーン	上部 X 座標 -44～-40m 下部 X 座標 -100～-96m Y 座標 230m～260m	溝水初期に斜面に沿って比抵抗値が $300 \Omega \cdot m \rightarrow 100 \Omega \cdot m$ に低下したケース

なる。具体的には、まず、観測値から得られる見かけ比抵抗値を各グリッドの初期値として与え、FEMによる順解析を行う。順解析で求められた計算値と、実際の観測値との差を見て、この差が小さくなるように、各ブロックの比抵抗値を修正して、2回目のFEMによる順解析を行う。このように、計算値と観測値との差（残差の二乗和）が、ある範囲内に収束するまで順次繰り返し計算を行うことにより、比抵抗値を求める。

比抵抗グリッドの大きさを細かく分割すればするほど、詳細な比抵抗分布が求められる。しかし、決定すべきパラメータ数が増大するため、逆解析に時間がかかる、あるいは解が一つに定まらず、初期条件などの条件を変えるだけで最終出力結果が大幅に異なるなどの不具合が生じることもある。一方、荒く分割すれば、決定すべきパラメータ数が減少するため、計算が高速に実行でき、さらに安定性も確保される。しかし、微少な比抵抗変化が埋もれてしまう可能性がある。以上のように解析時間と解析精度、解析精度と解析の安定性は、それぞれトレードオフの関係があり、一概に決定することは難しい。今回の解析では、遮水材内部のグリッド間隔については、垂直方向、水平方向とも、5m間隔とした。上下流のランダムゾーンの水平方向のグリッド間隔は10mを基本として配置した。決定すべきパラメータ数は、水平方向35グリッド、垂直方向20グリッドの計700グリッドである。

(6) 逆解析

第IV章9.bで求めた「疑似」観測値を逆解析データとして入力し、逆解析を行う。このとき、事前に設定した情報（Fig.4-79に示されている各盛立材料の比抵抗値の情報）はいっさい入力しない。あくまで「疑似」観測値から比抵抗グリッドの比抵抗値を算定する。

(7) 結果の評価

例えばCase 1の場合でこれらの手順を順次行った場合、遮水ゾーン底部の比抵抗変動領域「X座標：-10～10m, Y座標：220～222m」周辺の比抵抗値が $10\Omega \cdot m$ 付近に算定された場合、比抵抗トモグラフィ法により比抵抗変動した領域を特定できる可能性がある、ということになる。

c 検証結果

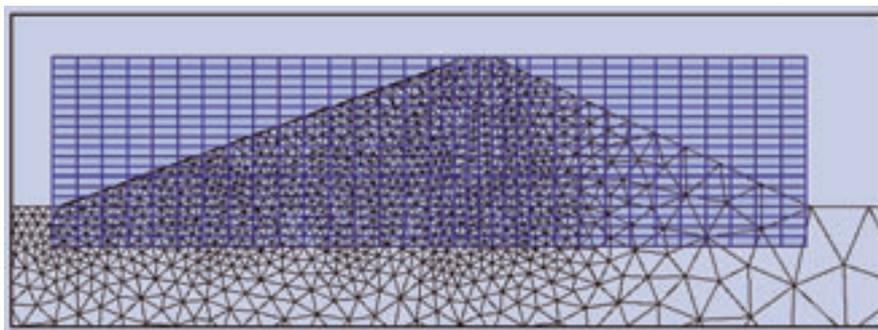


Fig.4-80 設定した比抵抗グリッド

Resistivity grid for analysis

(1) Case 0の結果

まず、Case 1～4の数値実験に先立ち、Case 0として、Fig.4-79に示す盛土材料比抵抗値のみを与え、FEMにより求めた電位分布に $\pm 5\%$ の正規分布ノイズを加えた値を逆解析し、比抵抗分布を求めた。これは、比抵抗変化がない場合のシミュレーションに相当する。結果をFig.4-81に示す。

この結果では、遮水材の比抵抗値が $140\Omega \cdot m$ 以下（設定： $100\Omega \cdot m$ ）、フィルター部分が $500\Omega \cdot m$ 以上（設定： $1,000\Omega \cdot m$ ）、上流ゾーンの比抵抗値が $250\sim 300\Omega \cdot m$ （設定： $300\Omega \cdot m$ ）、基礎地盤の比抵抗値が $450\sim 500\Omega \cdot m$ 以上（設定： $500\Omega \cdot m$ ）と計算された。逆解析では、解の安定化を図るため、「比抵抗値は急激に変化しない」という制約をかけている。このため、比抵抗値の差が大きいフィルター部と遮水材の比抵抗値がややずれて計算されたものの、ランダムゾーンや基礎地盤に関しては、あらかじめ設定した比抵抗値にほぼ一致し、堤体内部の比抵抗状況をうまく反映できている。ただし、電極を配置していない遮水ゾーンから下流側にかけては、正確に比抵抗値を特定できていない。特に、遮水ゾーン直下流に設置した $1,000\Omega \cdot m$ のフィルターが全く認識されていない。したがって、堤体下流側の比抵抗分布を計測する必要がある場合には、遮水材下流に設置したL2の外側に、さらにもう1測線電極を配置することが必要であると考えられる。

(2) Case 1の結果

Case 1の逆解析結果をFig.4-82に示す。白線で囲った長方形領域は、あらかじめ比抵抗値を $100\Omega \cdot m$ から $10\Omega \cdot m$ に低下させた領域を示している。Case 0の結果と比較すると、 $100\Omega \cdot m$ 以下を示す領域が遮水材内部に増大し、設定した比抵抗変動領域の部分では顕著な比抵抗値の減少が見られる。しかし、この比抵抗断面図だけでは、比抵抗が減少した領域を正確に判定することは難しい。例えばFig.4-81と比較して判断した場合、遮水材内部が全体的に低比抵抗化したように見える。また、設定した比抵抗変動領域の上流側にも、比抵抗値が低く観測される領域が出現した。

(3) Case 2の結果

Case 2の逆解析結果をFig.4-83に示す。白線で囲った

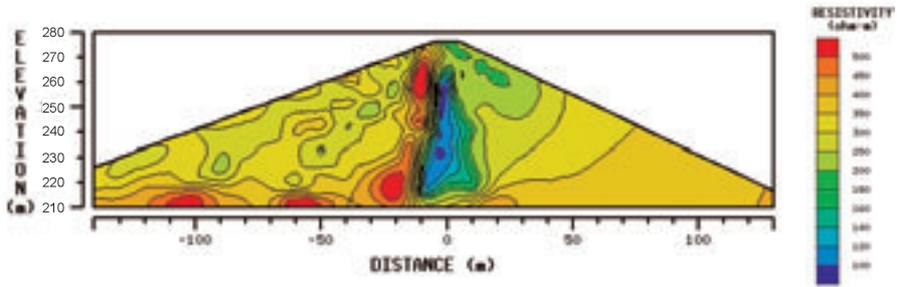


Fig.4-81 Case 0 (比抵抗変動領域を与えない場合) の比抵抗分布図
Resistivity distribution at the Case 0 (no resistivity change)

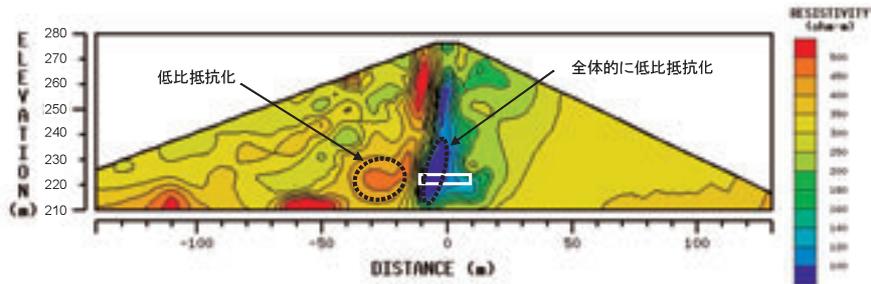


Fig.4-82 Case 1 (比抵抗変動領域 X=-10~10m, EL.=220~222m) の比抵抗分布図
Resistivity distribution at the Case 1 (resistivity change : X=-10~10m, EL.=220~222m)

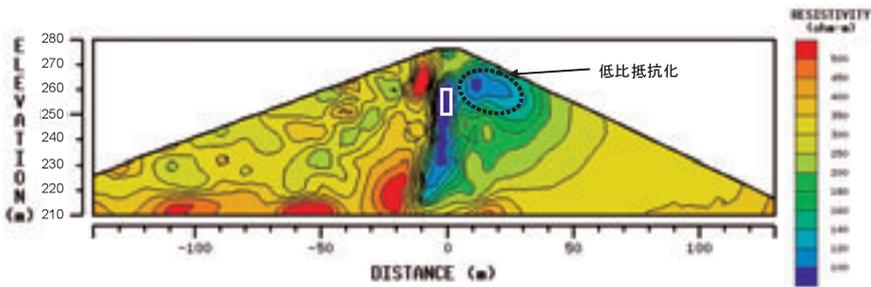


Fig.4-83 Case 2 (比抵抗変動領域 X=-2~2m, EL.=250~260m) の比抵抗分布図
Resistivity distribution at the Case 2 (resistivity change : X=-2~2m, EL.=250~260m)

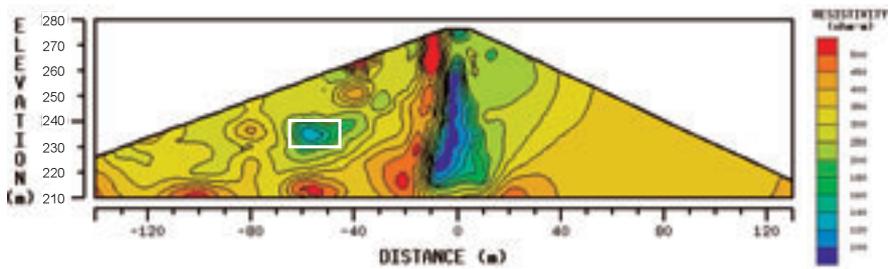


Fig.4-84 Case 3 (比抵抗変動領域 X=-65~-45m, EL.=230~240m) の比抵抗分布図
Resistivity distribution at the Case 2 (resistivity change : X=-65~-45m, EL.=230~240m)

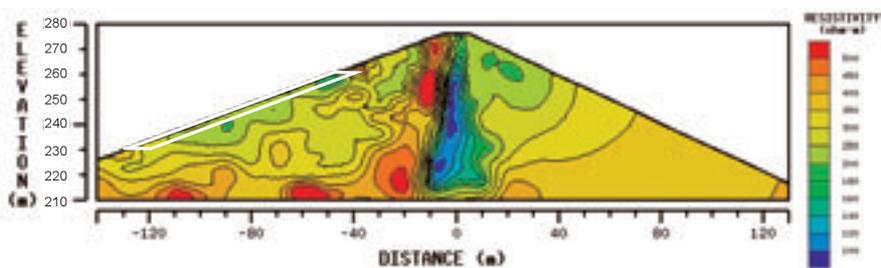


Fig.4-85 Case 4 (比抵抗変動領域, X=-116~-40, EL.=230~260m) の比抵抗分布図
Resistivity distribution at the Case 2 (resistivity change : X=-116~-40m, EL.=230~260m)

長方形領域は、あらかじめ比抵抗値を $100\ \Omega \cdot m$ から $10\ \Omega \cdot m$ に低下させた比抵抗変化領域を示している。Case 0 の比抵抗分布と比較すると、比抵抗値が低下した遮水材内部の領域が縦に伸びていることがわかった。さらに、設定した領域よりも下流側の比抵抗値が大きく減少することが明らかとなった。下流側の比抵抗値が減少した要因は、下流側に電極が設置されていないことであると考えられる。また、上流側の $1,000\ \Omega \cdot m$ に設定したフィルターゾーンは $500\ \Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗値として確認できるものの、下流側のフィルターゾーンについては、とらえられなかった。したがって、遮水材内部の比抵抗変動を可視化する上でも、遮水材だけでなく、その外側のランダムゾーンに電極を配置する意義は大きいと推測される。

(4) Case 3 の結果

Case 3 の逆解析結果を Fig.4-84 に示す。白線で囲った長方形領域は、あらかじめ比抵抗値を $300\ \Omega \cdot m$ から $100\ \Omega \cdot m$ に低下させた領域を示している。上流側には密に電極が入っているため、設定した領域がうまく逆解析によって求められている。ただし、Case 0 の比抵抗分布と比較すると、遮水材内部の比抵抗値も低下している。今回の解析では、各 Case の FEM による計算値に $\pm 5\%$ の正規分布ノイズを加えている。しかし、ノイズの大きさが各 Case により異なるため、これが逆解析の収束具合に微妙な影響を与えた可能性がある。

(5) Case 4 の結果

Case 4 の結果を Fig.4-85 に示す。白線で囲った平行四辺形領域は、あらかじめ比抵抗値を $300\ \Omega \cdot m$ から $100\ \Omega \cdot m$ に低下させた領域を示している。設定した領域がうまく逆解析により求められているが、電極の近傍に設定したにもかかわらず、本来 $100\ \Omega \cdot m$ に算定されるべき比抵抗値が、 $160\sim 200\ \Omega \cdot m$ に算定されており、精度が悪いことが明らかになった。逆解析では、見かけ比抵抗値を算出し、見かけ比抵抗値の比をとっている（第 II 章 b.3 参照）。比抵抗トモグラフィ法の場合は、電位分布が 3 次元的に球面状に広がることを仮定して見かけ比抵抗値を算出しているが、地表付近にある電極に関しては、地上へ電流が流れないため、半球面状に広がる。このことから、比抵抗トモグラフィ法の解析では、地表付近のデータの取り扱いが難しい。したがって、地表面

付近のデータについては、堤体盛立直後に、堤体を横断する地表面からの水平電気探査を行い、初期値をとっておくことにより、地表面付近のデータの解析精度を向上させることが必要であると考えられる。

(6) 下流ゾーンに電極を設置する効果

これまでの結果では、遮水ゾーンを取り囲むように電極を設置しているにもかかわらず、遮水ゾーン下流に設置した高比抵抗のフィルター部分を検出できなかった。さらに、遮水ゾーン内部に比抵抗異常を設定した Case 1 や Case 2 では、あらかじめ設定した箇所以外にも低比抵抗異常が見られるという結果になった。これらの問題を改善するためのひとつの手段として、堤体下流側 (Fig.4-79 に示す堤体下流ゾーン⑦外側) に電極を 13 個追加し、それによる比抵抗異常検出能向上に対する効果を検証した。配置した電極の位置を Fig.4-86 に示す。電極は、これまでと同様、標高 4m ピッチで設置した。

Fig.4-79 に示す盛土材料比抵抗値のみを与え、FEM により求めた電位分布に $\pm 5\%$ の正規分布ノイズを加えた値を逆解析し、比抵抗分布を求めた。結果を Fig.4-87 に示す。これは前述の Fig.4-81 に対応するものである。

この結果では、Fig.4-81 と比較して格段に精度が向上した。遮水ゾーンがほぼ $100\ \Omega \cdot m$ に再構成され、さらに、下流側に設定した $1,000\ \Omega \cdot m$ のフィルター部分が、あらかじめ設定した位置よりもやや下流側に広がっているものの、高比抵抗として検出された。

さらに、Case 1 と同様に、遮水ゾーン底部の横長の低比抵抗異常 ($100\ \Omega \cdot m \rightarrow 10\ \Omega \cdot m$) が発生した場合に、これを検出できるかを検証した。結果を Fig.4-88 に示す。これは前述の Fig.4-82 に対応するものである。図に示すように、下流に電極を設置しなかった場合と比較して、低比抵抗化した領域の位置を高精度でとらえることができた。このことから、遮水ゾーンの比抵抗領域を詳細にとらえるためには、遮水ゾーン内部だけでなく、その周辺も取り囲むように電極を配置することが非常に有効であるということが示された。

d 時系列トモグラフィ法による解析精度の向上

第 IV 章 9.c の検討では、それぞれ個別に行った逆解析結果から、想定した比抵抗変動領域の推定を試みた。しかし、解析結果のみで判断を行おうとすると、「変動した」と思われる領域を誤認する可能性があることが分か

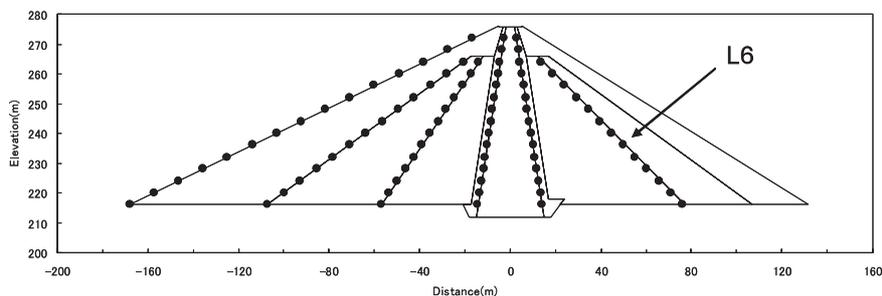


Fig.4-86 追加した電極 (L6 の 13 電極) の位置
Position of added electronodes (13 electronodes:L6)

った。そこで、Case 0 を「変化前データ」と仮定し、Case 1 と Case 2 において、個別解析と時系列トモグラフィにより比抵抗値が変動した領域を特定することを試みた。

(1) 時系列トモグラフィによる比抵抗分布 (Case1)

Case 0 を変化前の逆解析結果とし、Case 1 の FEM 計算値に ±5% の正規分布ノイズを加えた疑似観測値から個別に逆解析を行った比抵抗断面について、この変化率を求めた結果を Fig.4-89 に示す。これは、すなわち Fig.4-81 を基準としたときの Fig.4-82 の比抵抗断面の比抵抗変化率を求めたものである。図では、あらかじめ設定した比抵抗変動領域 (X=-10~10m, EL.=220~222m) において、比抵抗値が -20% 以上減少した領域が確認できる。しかし、それ以外の領域においても、比抵抗値の増減が至るところで生じているように解析されている。これは、±5% の正規分布ノイズの乗り方が Case 0 と Case 1 では異なり、そのわずかな差が逆解析時に蓄積された結果生じたものであると考えられる。

次に、Case 0 の比抵抗断面を基準断面とし、時系列トモグラフィにより求めた比抵抗変化率を Fig. 4-90 に示す。時系列トモグラフィによる解析では、「変化前に対し、変化後の比抵抗値は上昇しない」という制約を設けて実施した。図の結果では、設定した比抵抗変動領域のところで、変化率が -20% 以上に観測された領域がまとめて出現し、それ以外の領域では、ほとんど変化していない。しかし、Fig.4-89 と同じく、-20% 以上の比抵抗変化を示す領域は、設定した比抵抗変動領域に対し、非常に大きい領域となっている。比抵抗値を変化させた領域の高さが 2m であるのに対して、設定した比抵抗グリッドは高さ 5m を基準としていた。このことから、逆解析において、あるグリッドの比抵抗値を大幅に低下させるのではなく、ある領域の比抵抗値を少しずつ低減することにより、観測値と計算値との残差をあわせようとしたものと考えられる。したがって、より詳細な比抵抗変動をとらえようとする場合には、対象とする領域に細かく電極を配置する、あるいは想定される比抵抗変動箇所

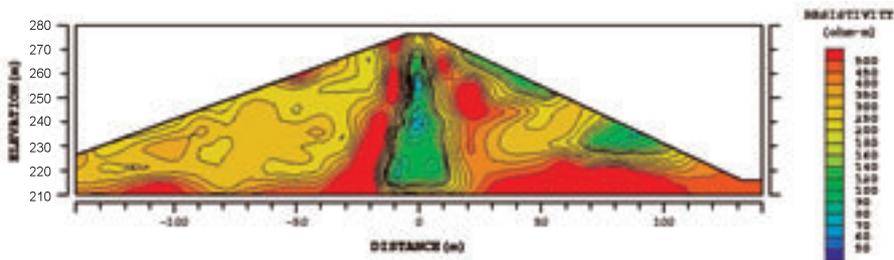


Fig.4-87 Case 0 (比抵抗変動領域を与えない場合) の比抵抗分布図
Resistivity distribution at the Case 0 (which has no resistivity change)

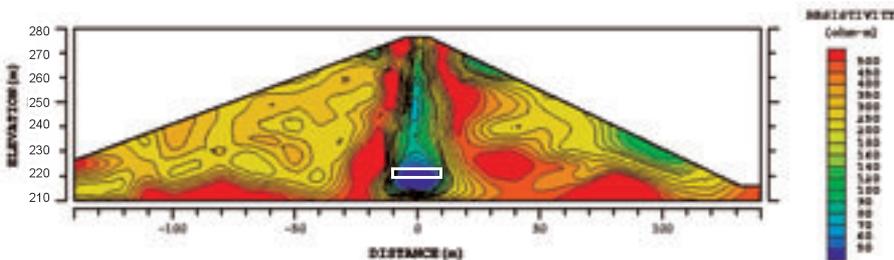


Fig.4-88 下流側に電極を設置した場合の Case 1 の比抵抗分布図
Resistivity distribution at the Case 1 (electrodes; L6 are set behind the dam)

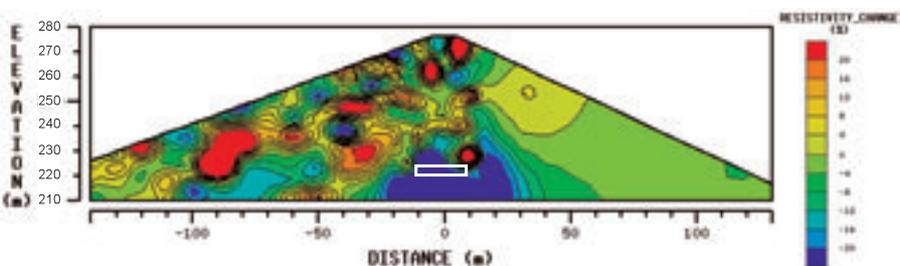


Fig. 4-89 Case 0 を変化前の比抵抗断面としたときの Case 1 の比抵抗変化率 (個別解析)
Change ratio of resistivity at the Case 1 when the resistivity at the Case 0 are previous

のグリッド間隔を小さくする、などの工夫が必要であることが分かった。

また、これらの結果から、制約をかけた時系列トモグラフィは、比抵抗値をモニタリングする上で非常に有効な手法と考えられた。ただし、実際の観測においては、比抵抗値が大きくなるか小さくなるかは、特定の条件（例えば塩水トレーサーを追跡するなど）がなければ不明である場合がほとんどである。したがって、事前に種々の調査を行ったり、あるいは局所的に電気伝導度のデータを取得したりすれば、より解析の精度を高めることが可能である。

(2) 時系列トモグラフィによる比抵抗分布 (Case2)

Case 0 を変化前の逆解析結果とし、Case 2 の FEM 計算値に±5%の正規分布ノイズを加えた疑似観測値から個別に逆解析を行った比抵抗断面について、この変化率を求めた結果を Fig.4-91 に示す。この結果では、Case 1 と同様に、個別解析において設定した比抵抗変動領域の周辺が、比抵抗変化率 -20%以上と解析された。しかし、

特に設定した領域の下流側にかけて低比抵抗化した領域が広がった。

一方、Case 0 の比抵抗断面を基準断面とし、時系列トモグラフィにより求めた比抵抗変化率を Fig.4-92 に示す。この結果でも、同様に堤体下流にまで低比抵抗化した領域が広がっている。堤体下流の比抵抗変化だけでなく、堤体遮水材内部の比抵抗変化をとらえる上でも、下流側に電極を設置する意義は大きいと考えられる。ロックフィルダムの場合、堤体の下流側はロック材を盛り立てるため、表面への電極設置は難しいが、張芝や吹き付けなどによって保護されている程度のアースダムにおいては、あらかじめ堤体内部に電極を埋設しなくとも、必要に応じて下流法面に電極を設置することが実用的と考えられる。下流側にも電極を配置することにより、比抵抗変動領域をより高精度に検出することが可能である。

e 比抵抗トモグラフィ法を安全管理に採用するに際しての留意点

比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理を進める上

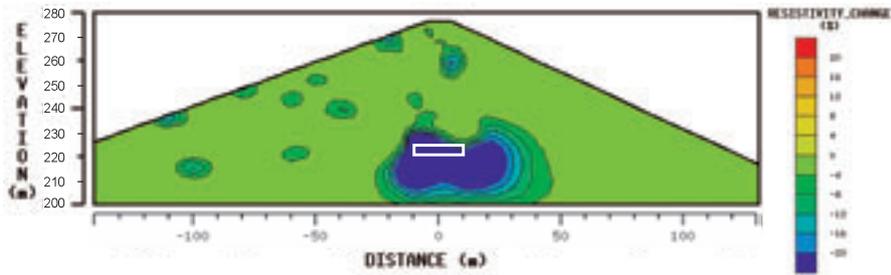


Fig. 4-90 Case 0 を変化前の比抵抗断面としたときの Case 1 における比抵抗変化率 (時系列トモグラフィ法)
Change ratio of resistivity at the Case 1 when the resistivity at the Case 0 are previous value(time series tomography)

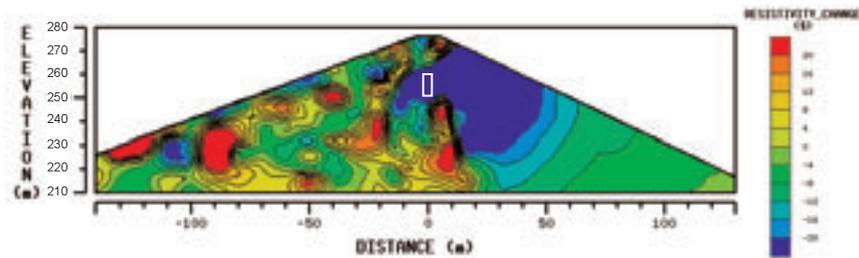


Fig. 4-91 Case 0 を変化前の比抵抗断面としたときの Case 2 の比抵抗変化率 (個別解析)
Change ratio of resistivity at the Case 2 when the resistivity at the Case 0 are previous value(normal inversion)

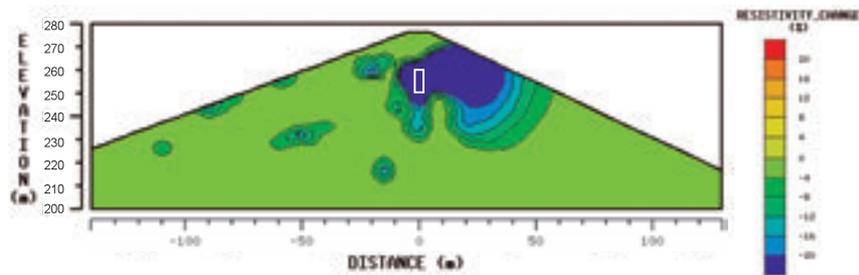


Fig. 4-92 Case 0 を変化前の比抵抗断面としたときの Case 2 の比抵抗変化率 (時系列トモグラフィ)
Change ratio of resistivity at the Case 2 when the resistivity at the Case 0 are previous value(time series tomography)

では、次のような事項を事前に明らかにする必要がある。

① 盛立材料や基礎地盤の比抵抗値の情報

今回はフィルダムの管理に重要な上下流断面の計測に重点をおいたシミュレーションを実施した。その結果比抵抗モニタリングによって、比抵抗値が変化した領域を実際の変化部を含む広い領域で予測できることが分かった。しかし、今回のシミュレーションでは、堤体内部の比抵抗値が $100\Omega \cdot m$ から $10\Omega \cdot m$ (90%以上) に変化すると仮定して行ったものである。実際には、遮水材の室内試験により事前にどの程度比抵抗値が変化する可能性があるか (例えば飽和度と比抵抗値, 粘土含有率と比抵抗値, 温度と比抵抗値の関係や, 河川水の電気伝導度, 周辺地山地下水の電気伝導度など) を明らかにして, 適用性をあらかじめ評価する必要がある。

② 最適な電極配置を検討するためのシミュレーションの実施

今回は, フィルダム標準断面から, 各ゾーンに電極 1 ラインを設定するという思想で, まず電極配置を決定し, その後シミュレーションを実施した。その結果, 遮水ゾーンだけでなく, その周辺まで取り囲む電極を配置することによって, 遮水ゾーン内部に発生する比抵抗異常をより高精度に検出できることが明らかになった。今後は, 電極間隔を今回よりも小さくあるいは大きくした場合にその性能がどうなるか, 上流側の電極ラインを減らした場合どうなるかなど, 様々なパターンでシミュレーションを行い, 微少な比抵抗変化でも確実にその位置や大きさを特定できる「最適な電極配置」を探ることも必要である。

③ ダム軸断面の電極配置計画の策定

今回は, 埋設計器の配置と大きく関連する上下流断面の解析を行った。しかし, 漏水や地震による被害など, 供用開始後に発生する「変状箇所」を特定することを考慮すると, 比抵抗変化の平面的位置 (右岸側か河床部か左岸側かなど) を特定することが重要になると考えられる。したがって, ダム軸断面においても今回のようなシミュレーションを実施し, 最適な電極配置に関して検討を行うことも必要である。

10 まとめ

第 IV 章では, これまで基礎地盤の比抵抗構造をとらえるために利用されてきた物理探査のひとつである比抵抗トモグラフィ法に着目し, これをフィルダム堤体の安全管理に応用するための基礎実験, モデル実験, 実証試験およびシミュレーションを実施した。その結果, 次のことが明らかとなった。

(a) 物理探査法のひとつである比抵抗トモグラフィ法をフィルダム堤体の安全管理に適用するシステムを考案し, 数値実験による検証を行った。①堤体遮水部の一

部の比抵抗値が減少した場合, ②堤体基礎地盤の一部の比抵抗値が減少した場合, についてシミュレーションを行った結果, 調査対象領域全体を取り囲むように堤体の底部に電極を設置することにより, 比抵抗値が変化した領域を精度よくとらえることができた。

(b) 比抵抗トモグラフィ法により, 風化マサ土の浸潤の状況をとらえることが可能か, 大型の鋼製容器を絶縁材層で囲った土層による室内実験を行った。その結果, 含水状態の変動を, 比抵抗値の変動として, 時間的かつ視覚的にとらえることができるという見通しが得られた。

(c) 実証試験を予定している高柴調整池遮水材を用いて, 堤高 105cm, 堤頂長 700cm の小規模な試験堤体を作成し, 比抵抗トモグラフィ法による比抵抗モニタリングを実施した。貯水前後での比抵抗変化領域を明確にするため, 変化率による比抵抗変動領域の可視化を試みた。その結果, 貯水後, 堤体表層から次第に浸潤が進行する領域がとらえられた。さらに, 落水後は, 上下流法面や天端から乾燥により比抵抗値が高くなる様子がとらえられた。

(d) 試験堤体の結果から, 温度変化により, 比抵抗値が変動する可能性があることを確認した。

(e) 東北農政局郡山土地改良建設事業所管内の高柴調整池において, 実証試験として比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理を導入した。基礎処理のグラウチング孔を利用して基礎地盤内にも電極を設置し, 上下流断面は遮水材上流側, ダム軸から上流側に 50cm の位置, 遮水材下流側の 3 測線, 計 47 個の電極を設置した。ダム軸断面は, 基礎地盤内に高ルジオン帯が確認されていた右岸側を中心に, 計 94 個の電極を設置し, 盛立完了から試験湛水期間中, 比抵抗トモグラフィ法による観測を行った。

(f) 基礎地盤を対象として実施した地表面からの水平電気探査および比抵抗トモグラフィ法により, 花崗岩が高比抵抗値, 閃緑岩がそれよりも低い比抵抗値を示す部分として区別できることが示された。基礎地盤の大局的な地質構造を調査する手段として, 水平電気探査が有効であった。さらに, 地表面からの電気探査では, 電極を設置している地表付近の情報は有効であるものの, 電極が配置できない地下深部の情報をとらえることは難しいと推測された。したがって, 地表面からの電気探査は, 「広大な範囲を荒く調査」する手法として, 比抵抗トモグラフィ法は, 「限られた対象領域を精度よく調査」する手法として, 目的に応じた使い分けが重要であることがわかった。

(g) 高柴調整池の盛立結果は, すべて盛立管理基準値を満足していた。途中, 遮水材の不足により, 購入材と周辺地山のマサ土とのブレンド材に切り替えたため, 標高 EL.307.25m を境に細粒分含有率が 20% 程度減少した。これにより, 盛土内部の比抵抗構造が EL.308m

付近を境に、EL.308m 以下は $200 \Omega \cdot m$ 以下の低い比抵抗、それ以上は $200 \Omega \cdot m$ 以上の高い比抵抗を示していた。

- (h) 試験湛水前の比抵抗トモグラフィ法による比抵抗モニタリングでは、その変動が $\pm 2.5\%$ 以内であり、大局的な比抵抗変動は見られなかった。堤体盛立期間中に、コアトレンチ内部は周辺地山の地下水により、飽和に近い状態であったためであると考えられる。また、今回、測温機能付きの間隙水圧計を設置し、堤体内部の温度を計測した結果、初期の堤体温度は盛立施工時期に大きく関与すること、さらに全体の温度がこの周辺の地下水温である $14\sim 15^\circ\text{C}$ にシフトしていることが示された。また、温度が大きく上昇した堤体上部で比抵抗値の減少が観測されたことから、温度変化も堤体の比抵抗変動に影響を与えるものと推測される。
- (i) 微少な比抵抗変化をモニタリングするため、基準断面から FEM により得られる計算値に、(変化後データ/変化前データ) という比を乗じ、これを変化後の基礎データとして逆解析を行い、基準断面と比較するという時系列トモグラフィを現場データに適用した。その結果、個別に解析を行って「変化率」を求めていた従来の方式では埋もれてしまっている微少な比抵抗変化をとらえることができ、本手法は比抵抗モニタリングに有効であることが示された。
- (j) 不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析結果によれば、1ヶ月間という短い初期湛水期間では、遮水材のごく表層部のみに浸潤し、貯水のほとんどは基礎地盤を介して堤体下流側に浸透していることが示された。
- (k) 試験湛水を開始し、満水した時の比抵抗変動は、特にコアトレンチ内部で比抵抗値が上昇する傾向がみられた。貯水の電気伝導度が $12\sim 17\text{mS/m}$ 、堤体の水平ドレーンおよび堤体右岸下流の地すべり土塊中から流出する水の電気伝導度が $24\sim 26\text{mS/m}$ であることから、貯水により比抵抗値が上昇する可能性が示唆された。
- (l) 九州農政局木之川内ダムを対象として、比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理を導入する場合の電極配置について検討した。その結果、遮水ゾーンだけでなく、その周辺まで取り囲む電極を配置することによって、遮水ゾーン内部に発生する比抵抗異常をより高精度に検出できることを示した。さらに、遮水ゾーン内部にのみ電極が設置された場合でも、時系列トモグラフィ法を用いることによって、比抵抗値が変化した領域を実際の変化部を含む広い領域で予測できることが分かった。

V 結 言

戦後の高度経済成長に伴い、農業土木分野では農業生産性の向上に資する農業農村基盤の整備、農業水利施設

の建設が進められてきた。特に、飲料水をはじめ、工業用水、農業用水、発電用水などの水をたたえ、われわれの生活を支えるダムの建設は、戦後から各地で事業が展開されてきた。しかし、近年は、公共事業費のコスト削減施策により、ダム建設に多額の費用を投じることができなくなりつつある。このような社会的背景から、今後新たにダムを建設する際には、できる限り建設コスト、維持管理コストを低減することが重要な課題となる。今ある既存のダムに関しては、補修や改修を含め、それらを永年的に利用できるような様々な予防保全的対策を講じることが重要となる。

建設コストを低減するためには、良好なダムサイトを選定する技術が不可欠である。今後ダムを建設する場合には、良好な基盤を有する適地を選定するとともに、施工時に問題となる可能性が高い局所的な地質構造（断層や地すべりなど）を施工前に把握することが重要となる。また、施工段階のコストを低減させるためには、これまで大量に廃棄していた一時掘削土なども有効活用し、合理化した施工技術や施工管理が必要である。さらに、供用開始後の維持管理にあたっては、近年築堤した大規模なダムでは間隙水圧計などの埋設計器による管理が行われているが、堤高の低いため池などでは、築堤年数が古く、計器が埋設されていない。また、設置されている場合でも、経年劣化などにより、長期的な安全管理に活用されていなかった。このため、供用開始後に発生する漏水などの機能低下の発生を長期的にモニタリングできる技術や、堤体を面的に管理することにより、漏水などの機能低下の位置を検出できる安全管理技術が求められている。このような技術が開発されれば、ダムを補修・改修する際にも、全面的改修するのではなく、部分改修ですませることが可能となり、ライフサイクルコストの低減が図られる。

本研究では、ダム築造に関して、①ダムサイトとしての適地選定、②基礎掘削から基礎処理、盛立に至る施工管理、③ダム供用後の安全管理、というダムの建設から管理にいたる各過程において、主として地質構造調査に適用されてきた比抵抗トモグラフィ法、地中レーダ法を応用することにより、建設コストやライフサイクルコストの低減を図る調査・診断技術を模索したものである。第Ⅱ章では、ダムサイトの適地を選定する、かつ、局所的な地質構造を明らかにする技術として、比抵抗トモグラフィ法をダムサイトに応用し、断層の存在が特定できることを示した。第Ⅲ章では、RCD コンクリートダムの施工管理技術として、地中レーダ法を応用し、RCD コンクリートの転圧直後にその盛立状況を管理できる技術を提案した。第Ⅳ章では、第Ⅱ章で利用した比抵抗トモグラフィ法を、堤体盛土の長期的な安全管理技術に適用するため、施工時に堤体内部に電極を埋設したフィルダムを築造し、試験湛水時における堤体内部の比抵抗変化モニタリングを試みた。

以下に、これらの研究成果を要約し、本研究の結論をまとめる。

a 本研究の総括

① ダムサイトとしての適地選定 (第Ⅱ章)

第Ⅱ章では、断層などの局所的な基礎地盤に関する情報をより詳細にとらえるため、地盤の電気の流れにくさを計測する比抵抗トモグラフィ法に着目した数値実験および現地実証試験を行った。まず、基礎地盤内の低比抵抗異常を効率よく検知できうる電極配置を明らかにするための数値実験を実施した。数値実験では、 $100\Omega \cdot m$ の均一土層中に $10\Omega \cdot m$ の低比抵抗異常が存在する2種類の数値モデルを想定し、2次元差分法モデリングにより、2極法、3極法、4極法の電極配置により得られる見かけ比抵抗値の特性を求め、4極法がもっとも低比抵抗異常に反応することを示した。さらに、順計算によって得られた比抵抗値に、ランダムノイズを乗じた値を逆解析した結果、3極法では、非対称性が発生すること、2、4極法では、あらかじめ $100\Omega \cdot m$ を設置した位置にそれを越える比抵抗値の値が出現するが、比抵抗異常の位置をおおむね把握できることを明らかにした。低比抵抗異常を斜めに配置した数値モデルの逆解析結果では、仮定した低比抵抗帯の傾きがより垂直に表現された形となり、しかも下部ほど低比抵抗帯が広がる傾向があることが明らかとなった。特に2極法、4極法では、仮定した低比抵抗帯の下側には、あらかじめ設定した $100\Omega \cdot m$ よりもかなり高い比抵抗値が偽像として出現する可能性があることを示した。逆解析における再現性を検証するために、比抵抗回復度という指標を提案し、各電極配置の逆解析結果を評価した結果、低比抵抗異常をとらえるには、4極法の採用が望ましいことを明らかにした。さらに元の比抵抗構造から逆解析により比抵抗異常の場所を推定するためには、初期モデルが重要であることが示された。

一方、御前山ダム基礎地盤を対象として行った比抵抗トモグラフィ法の実証試験では、より詳細な地質構造や地下深部の比抵抗構造を明らかにすることができた。また、地質調査ボーリングから存在が確認されていたF-1断層を、低比抵抗異常として認識することができた。

② 基礎掘削から基礎処理、盛立に至る施工管理 (第Ⅲ章)

第Ⅲ章では、地中浅部の情報を詳細に把握することができる物理探査法のひとつである地中レーダ法に着目し、RCD工法を採用するダムの施工管理手法への適用・実用化することを目的とした基礎実験、RCDコンクリートヤードにおける基礎実験、RCD施工現地実証試験を行った。

間隙比0.39の疑似ポーラスコンクリート供試体を用いた基礎実験では、完全に空洞でないポーラス部が面的に広がっていれば、中心周波数300MHz、500MHz、1GHzの3種類のいずれかのアンテナを有する地中レー

ダにより検知できることを示した。この結果を受けて、東北農政局管内の新宮川ダムを対象としてRCDコンクリートヤードにおける基礎実験と現地実証試験を行った。RCDコンクリートヤードにおける基礎実験では、振動ローラ4回転圧レーンと12回転圧レーンとの相違を検出することは困難であった。しかし、転圧していないレーンにおいて、間隙比0.39程度のポーラス部を検出することができた。転圧レーンに設置した $\phi 150mm$ の塩ビ管からの反射面までの往復反射走時を経時的に調査し、RCDコンクリートの比誘電率を計測した結果、打設直後12~14程度であった比誘電率は徐々に低下し、約800日後までには通常のコンクリートの比誘電率といわれる3~9にはほぼ類似した結果が得られることを示した。さらに、新宮川ダムを対象とした実証試験では、打設ブロックBL12の一部に間隙比0.24のポーラス部分を検出できた。現位置において変水位ピット法により透水係数を計測したところ、 $6.0 \times 10^{-6}cm/s$ であり、水密性に問題がないことを確認した。このポーラス部が発生した位置は、撒き出し・転圧施工を区切る境界部分であったことから、RCD工法においては、端部における施工を注意深く行わなければならないことを示した。

③ ダム供用後の安全管理 (第Ⅳ章)

第Ⅳ章では、フィルダム供用開始後の堤体の安全性を長期的にモニタリングできる技術として、フィルダム築堤時に堤体内部に電極と電線を埋設することにより、堤体内部の比抵抗値の変化を面的にモニタリングする技術開発に取り組んだ。比抵抗値のモニタリングには、第Ⅱ章で検討した比抵抗トモグラフィ法を採用し、基礎実験、モデル実験、実証試験および電極配置に関する考察を行った。

事前に行った数値実験では、調査対象領域全体を取り囲むように堤体の底部に電極を設置することにより、堤体遮水部や堤体基礎地盤に生じた比抵抗値の低比抵抗異常を精度よくとらえることができることを示した。大型の鋼製容器を絶縁材層で囲った土層を用いて、風化マサ土の浸潤の状況をとらえる室内実験を行った結果、風化マサ土の含水状態の変動を、比抵抗値の変動として、時間的かつ視覚的にとらえることができた。さらに実験の規模を拡大させ、実証試験を予定している高柴調整池遮水材を用いて、堤高105cm、堤頂長700cmの小規模な試験堤体を作成し、比抵抗トモグラフィ法による比抵抗モニタリングを実施した。基準断面からの変化率によって比抵抗変動領域の可視化を試みた結果、貯水後、堤体表層から次第に浸潤が進行する領域がとらえられた。さらに、落水後は、上下流法面や天端から乾燥により比抵抗値が高くなる様子がとらえられた。

これらの実験結果を受けて、東北農政局郡山土地改良建設事業所管内の高柴調整池において、実証試験として比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理を導入した。基礎処理のグラウチング孔を利用して基盤内にも電極を

設置し、上下流断面は遮水ゾーン上流側、ダム軸から上流側に50cmの位置、遮水ゾーン下流側の3測線、計47個の電極を設置した。ダム軸断面は、基礎地盤内に高ルジオン帯が確認されていた右岸側を中心に、計94個の電極を設置し、盛立完了から試験湛水期間中、比抵抗トモグラフィ法による観測を行った。この際、堤体内部の微小な比抵抗変化をモニタリングするため、基準断面からFEMにより得られる計算値に、(変化後データ/変化前データ)という比を乗じ、これを変化後の基礎データとして逆解析を行い、基準断面と比較するという時系列トモグラフィ法を現場データに適用した。その結果、従来の方式では埋もれてしまっている微小な比抵抗変化をとらえることができ、本手法は比抵抗モニタリングに有効であることが示された。

盛立から試験湛水までの期間の比抵抗モニタリングの結果では、堤体盛立期間中に、コアトレンチ内部は周辺地山の地下水により、飽和に近い状態であったため、大局的な比抵抗変動は見られなかった。一方、堤体内部温度が大きく上昇した堤体上部で比抵抗値の減少が観測されたことから、温度変化も堤体の比抵抗変動に影響を与える可能性が高いことが示された。

試験湛水を開始し、満水した時の比抵抗変動は、特にコアトレンチ内部で比抵抗値が上昇する傾向がみられた。貯水の電気伝導度が12~17mS/m、堤体の水平ドレーンおよび堤体右岸下流の地すべり土塊中から流出する水の電気伝導度が24~26mS/mであることから、貯水により電気伝導度が低い水が浸潤して比抵抗値が上昇する可能性が示唆された。比抵抗トモグラフィ法による比抵抗変動領域が堤体底部、特に遮水ゾーン上流側の底部に存在したことや、貯水前後の間隙水圧の差が遮水ゾーン上流側で大きかったことなどの結果から、試験湛水のような短期間における堤体内部への貯水の浸潤は、遮水ゾーン表層から徐々に浸潤する以外に、特に堤体底部から不均一に進行する浸潤形態も存在する可能性があることを示した。これは、不飽和・飽和領域を考慮した浸透流解析によっても可能性が確認された。

高柴調整池の実証試験で得られた知見を参考に、九州農政局木之川内ダムを対象として、比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理を導入する場合の電極配置について検討した。その結果、遮水ゾーンだけでなく、その周辺まで取り囲む電極を配置することによって、遮水ゾーン内部に発生する比抵抗異常をより高精度に検出できることを示した。さらに、遮水ゾーン内部にのみ電極が設置された場合でも、時系列トモグラフィ法を用いることによって、比抵抗値が変化した領域を実際の変化部を含む広い領域で予測できることが分かった。

b 今後の展開

本研究は、資源探査や地質構造調査で用いられている物理探査の技術を、施工管理や維持管理の手段として活用することに主眼をおいた工学的研究である。資源探査

や地質構造調査においては、地表面からは見えない資源や地層がどの部分にあるのかを、概略的に把握することが目的である。したがって、これらの調査を行う際には、綿密に調査計画を立案し、1回の大規模調査を実施するのが基本スタイルである。また、概査という性格上、求められる物性値は限定されない。調査対象としている資源や地層が、まわりの状態と異なる性質を示すものであればよいのである。このような観点から、物理探査で利用されている比抵抗トモグラフィ法や地中レーダ法では、「比抵抗値」あるいは「比誘電率」という物性値に着目した優れた技術である。本研究においても、基礎地盤を対象としてこれらの手法を適用したが、御前山ダムサイトの事例、高柴調整池ダムサイトの事例において、比抵抗値が地質構造と対応し、良好な結果が得られた。

しかし、これらの手法を施工管理や維持管理の手法として応用する場合には、管理者が求める「物性値」をとらえる必要が出てくる。特に、農業土木を始め、公共土木や建築分野への応用を図る場合には、設計に使える値、例えば「地盤の強度」、「密度」、「飽和度」、「透水係数」といった値が必要になる。今回適用した電気探査の一種である比抵抗トモグラフィ法では、対象とする領域の比抵抗値、つまり「電流のながれにくさ」の分布を推定するものである。今回行ったフィルダム堤体内部の比抵抗モニタリングでは、確かに「比抵抗値」が変化していること、また、その部分がおよそどの位置にあるかを特定することができた。今まで間隙水圧や土圧の分布で点としてしか評価できなかった堤体内部の物性値を、比抵抗値という物性値で面的に補完できた意義は大きい。しかし、この「比抵抗値の変動」がどういう状態を示しているのか、現時点では推定することは可能であるものの、照査できていない。こうした認識は、物理探査を土木分野へ適用する研究を行う上で、もっとも基本的な論点であり、現在、日進月歩で研究が進められている。環境が制御された室内実験レベルでは、ある程度他の物性値と比抵抗値との関連が示されてきているものの、現場へ適用する場合には、様々な要因が絡み合って存在しており、すべてを解明することは困難である。しかし、1回の調査では解明できないことも、継続的に他の現象とともにモニタリングすることで、問題源の特定が可能になる。

これらをふまえ、今回行った研究に対する今後の課題を整理する。まず、基礎地盤を対象とした比抵抗トモグラフィ法においては、ボーリング孔内の調査技術の充実と、それらを比抵抗トモグラフィ法の解析にも活用する技術開発である。ボーリング調査は「点」の調査ではあるが、見えない地下構造を直接目にするのできる手段であり、この情報は非常に貴重なものである。比抵抗トモグラフィ法は、ボーリングとボーリングとの間の見えない情報を補完するものであると考えられる。近年ではボーリング用のボアホールカメラなども利用されるようになり、直接孔内から地質情報を得ることが可能とな

りつつある。このようにして得られる情報を比抵抗トモグラフィ法の解析にも事前情報として組み込むことで、精度を高めることが可能である。

また、比抵抗トモグラフィ法の解析では、決定すべきパラメータが多いため、様々な制約を設けなければ安定した解を得ることが難しい。例えば、比抵抗値はなめらかに変化する平滑化制約などを設けているが、実際の地質構造は、断層や貫入岩などにより、急激に比抵抗値が変化する場合も起こりうる。このような場合には、平滑化制約を設けることが逆に偽像を発生させる原因となる。したがって、解析に関しては、精度と解の安定性を両方満足できるモデル構築に関する指針が必要である。

RCD コンクリートに適用した地中レーダに関しては、得られる反射波形の解釈がやや専門的であることがあげられる。これらの画像を自動的に認識できる処理が可能となれば、例えば調査を行いながら、転圧不足と考えられる画像の変化点でブザーを鳴らすなどの仕組みを取り付けることにより、施工しながらの管理も可能となる。さらに、反射画像までの深さを決定する媒体中の比誘電率を部分的に測ることが可能となれば、深度情報を特定することが可能になり、より使用性が良好となると考えられる。地中レーダは、物理探査の中でも波長がきわめて短く、分解能に優れる手法である。アンテナの周波数も深度を稼ぐための低周波帯から、構造物の配筋状態を調査する高周波帯のものまでラインアップされていることから、今後ますます土木分野への活用が期待される。

高柴調整池を対象とした比抵抗トモグラフィ法の研究に関しては、確認された比抵抗変動の要因のうち、どれがもっとも影響力があったのかを照査していくことである。例えば、堤体上部の比抵抗変動は、様々な研究事例を参照し、温度変化によるものと考えているが、文献によっては、数百℃の温度差では比抵抗変化が生じるものの、数℃の温度差のみでは比抵抗値が変化しないとの研究成果もある。これらを実際に高柴調整池の遮水材を用いた実験で照査することが重要である。また、砂質土を対象として提案されている Archie の式が、遮水材のような粘性土においても成立するのかどうか、検証していきたいと考えている。高柴調整池の実証試験に関しては、今後も比抵抗モニタリングを継続し、大局的な比抵抗構造変化が生じないか、また埋設した各種埋設設計器との相関がどうかなどの観測を継続するとともに、電線や電極の長期的な耐久性についても、照査していく必要がある。解析においては、これまで2次元的に行われてきたが、より詳細な比抵抗分布を調査し、モニタリングする上では、3次元的な解析も重要となると考えている。

今後、農業用ダムを始め、各種農業水利施設を設計する場合において、これまでの「仕様」に基づく設計ではなく、構造物に求められる性能（要求性能）を所有者あ

るいは管理者との協議の上で明確化し、構造物の保有性能が要求性能を満足していることを確認する設計体系である性能照査型設計への移行が進められている。したがって、今後新たに建設される構造物は、要求性能が満たされているかどうかを照査する作業が必要となる。特に構造物の耐久性に関しては、設計時点で照査することが非常に難しいことから、施工直後から継続的に耐久性をモニタリングしていく、すなわち「モニタリング施工」が実施されると考えられる。このような流れからすれば、今回実施した高柴調整池の比抵抗トモグラフィ法による堤体安全管理技術は、一種のモニタリング施工とも位置づけられると考えられる。本研究が、このようなモニタリング施工の一助として利用できるものとなれば幸いである。

参考文献

- 1) Archie (1942) : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, Vol.146, 54~62
- 2) 物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック「第7章 地中レーダ」, 401
- 3) 物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック「第15章 ジオトモグラフィ」, 770
- 4) Coggon, J.H. (1971) : Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method, Geophysics, Vol.36, No.1, 132-155
- 5) 大東秀光, 及川理人, 前川聡, 小林剛 (1994) : 地下レーダ記録からコンクリート背面の空洞厚を算出する方法—一時系列解析の適用—, 物理探査学会第90回学術講演会論文集, 451-454
- 6) Dey, A. and Morrison, H.F. (1979) : Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, Geophysics Prospecting, Vol.27, No.1, 106-136
- 7) Dines, K.A. and Lytle, R.J. (1979) : Computerized geophysical tomography, Pro. IEEE, 67, 1065-1073
- 8) 土木学会 (2002) : 2002年制定コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編], II-48
- 9) 福田和寛, 利岡徹馬, 竹中久, 長久 (1990) : 花崗岩岩盤の内部構造探査におけるレーダ技術の適用, 物理探査学会第82回学術講演会論文集, 388-393
- 10) 堀俊和, 森充広, 毛利栄征, 青山咸康 (2002) : 地中レーダによるため池の漏水経路の調査法, 農業土木学会論文集, No.218, 115-125
- 11) 藤崎修, 竹内睦雄, 川本治, 金喜俊 (1992) : 試錘孔電気探査のための数値モデリングの精度, 物理探査, Vol.45, No.4, 286-292
- 12) 檜野洋生, 高木正宗, 稲本暁, 緒方信一 (1999) : ダムサイトでの屈折法弾性波探査結果と評価事例, 農業土木学会誌, Vol.67, No.11, 7-10

- 13) 畑山元晴, 長束勇, 森充広, 黒田清一郎 (2001): 地中レーダによる RCD コンクリートの未充填部検出法の検討, 農業工学研究所技報, No.199, 83-90
- 14) 五十嵐亨 (1988): 地中探査レーダー, 地質と調査 No.1, 41-47
- 15) 笠井弘幸, 阿部信太郎, 鈴木浩一 (1996): 活断層の地中レーダ法によるイメージング: その現状と展望, 活断層研究, No.15, 73-86
- 16) 小島圭二, 神尾重雄, 石橋弘道, 内山成和, 斎藤秀樹, 島裕雅 (1989): ジオトモグラフィによる岩盤の画像化 (その2) —岩盤内の地下水の流れの画像化—, 応用地質, No.30, Vol.4, 179-188
- 17) 桑原徹, 北郷俊明, カルキーマダン, 山崎淳 (1997): アンケートに見る物理探査の現状・ニーズと有効利用, 土と基礎, Vol.49, No.9, 3-6
- 18) Langer, D.L. and Lytle, R.J. (1977) :Determining a subsurface electromagnetic profile from high-frequency measurements by applying reconstruction technique algorithms, Radio Science, 2, 249-260
- 19) 宮本均 (2002): 適切な施設の維持管理に向けた取り組みについて, 農業土木学会誌, Vol.70, No.5, 13-16
- 20) 松岡俊文 (1986): インバージョンにおける数値解法—最小二乗法を中心に—, 物理探査, Vol.39, No.6, 340-356
- 21) 松葉幸夫・谷村幸一 (1995): 高密度電気探査・比抵抗映像法による老朽ため池漏水調査, 全地連技術フォーラム'95講演集, 141-144
- 22) 森充広, 長束勇, 畑山元晴 (1999): 地下レーダ法の測定原理と適用事例, 農業土木学会誌, Vol.67, No.11, 65-72
- 23) 森充広・中里裕臣・長束勇・黒田清一郎 (1999): 非破壊探査によるダム管理システムの開発, 平成11年度農業土木学会大会講演要旨集, 96-97
- 24) 日本ダム協会 (1999): ダム年鑑, 1999版
- 25) 農林水産省農村振興局 (2003): 土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」[フィルダム編]
- 26) 新田邦弘, 笹原克夫, 土田庸夫, 利岡徹馬 (1992): 地下レーダーによる岩盤内部の割れ目調査例, 物理探査学会第86回学術講演会論文集, pp.321-325
- 27) 中里裕臣・長束勇・中島賢二郎 (2000): 比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムおよびその管理方法, 特開2000-338258
- 28) 中里裕臣, 奥山武彦, 森充広, 黒田清一郎, 下川弘晃 (1998): 地すべり地における比抵抗モニタリング, 第37回地すべり学会研究発表講演集, 253-256
- 29) 長束勇・中里裕臣・畑山元晴・森充広・利岡徹馬・櫻井健 (2000): 比抵抗トモグラフィ法によるため池の堤体安全監視システムに関する実験的研究, Journal of Rainwater Catchment Systems, Vol.6, No.1, 27-32
- 30) 西田薫・井上英二 (2000): 間隙水の比抵抗が岩石の比抵抗特性の及ぼす影響と並列回路モデルを用いた検討, 物理探査, Vol.53, No.2, 167-181
- 31) 農業工学研究所農村整備部施設管理システム研究室 (1993): ダム管理における問題点の把握と改善策の検討報告書
- 32) 大友秀夫 (1986): ジオトモグラフィ技術の現況, 物理探査, Vol.39, No.6, 58-71
- 33) 朴錫均, 魚本健人 (1998): 多重偏波方式のレーダによるコンクリート背面空洞の体積推定, 土木学会論文集, No.592, V-39, 13-24
- 34) P. Bois, M. La Porte, M. Lavergne, and G. Thomas (1972) :Well-to-well seismic measurements, Geophysics, Vol.37, No.3, 471-480
- 35) 島裕雅 (1989): 比抵抗トモグラフィの基礎と応用, 物理探査, Vol.42, No.6, 442-457
- 36) 島裕雅・梶間和彦・神谷英樹 (1995): 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
- 37) 杉本芳博 (1998): 2.5次元FEMによる線電流源周辺の電位計算, 物理探査, Vol.51, No.1, 55-69
- 38) 杉本芳博 (1995): 比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーのモニタリング—数値的検討—, 物理探査学会第92回学術講演会論文集, 57-62
- 39) 杉本芳博 (1999): 線電流源を使った比抵抗トモグラフィの基礎的研究, 北海道大学学位論文, 79
- 40) 鈴木敬一, 笠井弘幸, 西山英一郎 (1999): ステップ式連続波レーダ探査装置を用いた地中レーダ探査, 地質ニュース, No.537, 44-52
- 41) 鈴木浩一 (1998): 物理探査法の地質工学への適用 (その3) —硬質岩盤の透水性評価への適用例—, 物理探査, Vol.51, No.1, 83-95
- 42) 鈴木浩一, 東義則, 城森信豪 (1998): 512成分比抵抗法自動測定装置の開発, 物理探査, Vol.51, No.3, 210-218
- 43) 鈴木浩一 (1998): 物理探査法の地質工学への適用 (その3) —硬質岩盤の透水性評価への適用例—, 物理探査, Vol.51, No.1, 83-95
- 44) 鈴木浩一・楠健一郎・藤光康宏 (1995): ジオトモグラフィのダム基礎岩盤調査への適用, 物理探査学会第84回講演会論文集, 340-345
- 45) 関根一郎, 西牧均, 石垣和明, 原敏明, 斎藤章 (1996): 岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係, 土木学会論文集, No.541, III-35, 75-86
- 46) 菅野強, 佐々宏一 (1988): 孔間および地表孔間比抵抗探査モデリング, 物理探査, Vol.41, No.1, 1-17
- 47) 菅原誠 (2002): 既設フィルダムの電気探査調査について, 農業土木, No.626, 24-26
- 48) 災害科学研究所トンネル調査研究会 (2001): 地盤の

- 可視化と探査技術 比抵抗高密度探査法の実際, 鹿島出版会, 25
- 49) Shima, H. (1990) :Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centers, *Geophysics*, Vol.55, 682-694
- 50) 佐々木裕, N. E. Goldstein, M. Wilt (1985): 比抵抗の経年変化モニター, 物理探査学会第 73 回講演会論文集, 73-74
- 51) 高倉伸一 (2000): 粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学的特性の関係, 物理探査, Vol.53, No.5, 415-426
- 52) 高倉伸一 (1998): 2次元電気探査に用いる各種電極配置の評価, 物理探査学会第 99 回学術講演会論文集, 105-109
- 53) 竹内睦雄, 中山康, 川本治, 登内正治, 笠井弘幸 (1987): 地すべり調査における地中レーダ法の検討, 物理探査学会第 77 回学術講演会論文集, 183-184
- 54) 千葉昭彦, 熊田政弘 (1994): 花崗岩および凝灰岩供試体の比抵抗測定, 物理探査, Vol.47, No.3, 162-172
- 55) 千葉昭彦・熊田政弘 (1994) 花崗岩及び凝灰岩資料の比抵抗測定—間隙水の比抵抗が岩石比抵抗に及ぼす影響について—, 物理探査, Vol.47, No.3, 161-172
- 56) 土田庸夫, 前川聡, 畠山秀喜 (1994): 地下レーダーを搭載した専用探査車 (RAPIDAS) による道路トンネル覆工背面空洞探査例, 物理探査学会第 91 回学術講演会論文集, 125-128
- 57) 立石卓彦・大堀忠至・小原敏伸・石井英之 (2002): 不飽和・飽和域を考慮したフィルダムの湛水解析と管理, 雨水水資源化システム学会大会第 10 会研究発表会講演要旨集, 91-96
- 58) 植野修昌・新美孝之介・丹羽誠・松井保 (2000): 見かけ比抵抗を用いた盛土管理手法の開発と適用事例, 土と基礎, Vol.48, No.4, 29-32
- 59) 安中正実 (1996): 挙動観測による施設安全監視の重要性, 農業土木学会誌, Vol.64, No.12, 1-5
- 60) 吉田等・山口嘉一・今林豊 (1999): 高密度電気探査によるアースダム堤体内浸透調査, 土木技術 研究 41-2, 32-37
- 61) (財) 災害科学研究所トンネル調査研究会編 (2001): 地盤の可視化と探査技術 —比抵抗高密度探査法の実際—, 鹿島出版会

Research on Application of Nondestructive Prospecting Techniques in Course of Construction and Management of Dams and Reservoirs

MORI Mitsuhiro

Summary

There are many agricultural facilities in Japan, which are provisionally calculated as 25 trillion yen. Especially, it is said there are over 21,000 small earth dams for agriculture. In this research, the author applied nondestructive prospecting technique, mainly electrical resistivity tomography and ground penetrating radar in course of construction and management of dams and reservoirs. Using these techniques, it could reduce construction cost or life cycle cost.

First of all, numerical analysis to check the sensitivity of electrical anomaly was executed. It was found that the accuracy of inversion had been improved by surrounding the area with electrode nodes. For geophysical investigation of damsite, resistivity tomography using boreholes for well logging was applied. This technique could find the distribution of fault clearly compared to electrical resistivity survey only from ground surface.

In case of construction management of RCD concrete dam, ground penetrating radar was applied to check the state of compaction. It could find the anomaly, which was not filled with mortar and was not entirely void.

And in case of safety management of dams after working, resistivity tomography was applied. Electrode nodes for measurement were set during construction of fill dam, which enclose impervious zone. During test filling, a very little resistivity change was measured, which was caused by seepage of reservoir water or by changing of temperature.

Keywords: *nondestructive prospecting, electrical resistivity survey, ground penetrating radar, resistivity tomography, foundation of dams, RCD concrete, safety management of dams*