



# 高密度電気探査手法による堤防内部 構造探査手法に関する共同研究報告書

平成 10 年 3 月

建設省 土木研究所 材料施工部 土質研究室  
中 央 開 発 (株)  
(株)ダイヤコンサルタント  
(株)建設技術研究所

Copyright © (1998) by P. W. R. I.

All rights reserved, No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# 高密度電気探査手法による堤防内部 構造探査手法に関する共同研究報告書

建設省土木研究所 材料施工部 土質研究室長

三 木 博 史

中央開発(株) 技術本部 エンジニアリング地質部長

鍛 治 義 和

(株)ダイヤコンサルタント 東京事業部物理探査部

西 田 薫

(株)建設技術研究所 水工本部 地質部長

中 島 史 樹

(いずれも代表者のみ)

## 要 旨

既設堤防内部の土質構造を高精度に調査するため、高密度電気探査手法を用いて堤防表面から内部の比抵抗値を測定・解析することにより、その内部の土質構造を探査するための技術を報告書としてまとめたものである。

キーワード：高密度電気探査、比抵抗探査、比抵抗トモグラフィ、堤防安定度診断

## ま え が き

浸透に対する弱点箇所を抽出し、河川堤防の安全性を的確に評価するためには、膨大な延長に及ぶ既設の河川堤防の内部構造を精度よく探査することが重要です。

建設省では、平成 4 年度から土木研究所と民間企業 3 社との間で共同研究を開始し、既設堤防の内部構造探査技術の一つとして高密度電気探査手法に着目し、その適用性について基本的な検討を行ってきました。また、堤防を探査対象とした場合の利用可能性と問題点を明らかにし、当技術の実用化に向けた技術開発を実施してきました。

当共同研究報告書では、既設堤防における危険要因、高密度電気探査手法の基本原則、調査計画・調査方法、比抵抗分布図の判読法、既設堤防の内部構造診断まで順を追ってわかりやすく解説しています。また、数例の適用事例を盛り込み、当技術の適用性と適用上の留意点を具体的に記述しているのが大きな特色です。

本共同研究報告書が、多くの現場で活用され、一層の技術の進展が図られることを期待しております。

# 「高密度電気探査手法による堤防内部構造探査手法に関する共同研究報告書」

## 共同研究担当者的名簿

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| 三 木 博 史 | 建設省土木研究所材料施工部土質研究室長     |
| 山 田 哲 也 | 建設省土木研究所材料施工部土質研究室*     |
| 古 田 光 弘 | 建設省土木研究所材料施工部土質研究室      |
| 野 口 典 孝 | 建設省土木研究所材料施工部土質研究室      |
|         |                         |
| 鍛 治 義 和 | 中央開発(株)技術本部エンジニアリング地質部長 |
| 杉 山 長 志 | 中央開発(株)事業推進本部探査計測部長     |
|         |                         |
| 西 田 薫   | (株)ダイヤコンサルタント東京事業部物理探査部 |
| 杉 本 芳 博 | (株)ダイヤコンサルタント東京事業部物理探査部 |
|         |                         |
| 中 島 史 樹 | (株)建設技術研究所水工本部地質部長      |
| 井 口 昭 則 | (株)建設技術研究所水工本部地質部       |
| 古 館 祥   | (株)建設技術研究所水工本部地質部       |

\* 現 企画部企画課長補佐

# 目 次

## ■まえがき

## ■共同研究担当者名簿

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1. 総則 .....                       | 1  |
| 1.1 堤体内部構造診断の現状と課題 .....          | 1  |
| 1.2 高密度電気探査手法とは？ .....            | 1  |
| 1.3 マニュアルの目的と適用 .....             | 3  |
| 1.4 研究の経緯 .....                   | 4  |
| 1.5 用語の解説 .....                   | 5  |
| 2. 高密度電気探査手法の堤防安定度評価への適用方法 .....  | 7  |
| 2.1 堤防の安定度評価の考え方 .....            | 7  |
| 2.2 高密度電気探査手法の有用性 .....           | 10 |
| 3. 堤防内部構造診断のための高密度電気探査手法の概要 ..... | 13 |
| 3.1 全体の流れ .....                   | 13 |
| 3.2 調査計画（→4章）.....                | 13 |
| 3.3 調査方法（→5章） .....               | 16 |
| 3.4 データ整理と解析（→6章） .....           | 18 |
| 3.5 堤防内部構造の判定（→7章） .....          | 19 |
| 3.6 成果品（→8章） .....                | 19 |
| 4. 調査計画 .....                     | 21 |
| 4.1 予備調査 .....                    | 22 |
| 4.1.1 既存資料の収集・検討 .....            | 22 |
| 4.1.2 現地踏査 .....                  | 22 |
| 4.2 調査計画の作成 .....                 | 22 |
| 4.2.1 測線設定 .....                  | 23 |
| 4.2.2 電極配置 .....                  | 23 |
| 4.3 計画作成時の留意点 .....               | 25 |
| 4.3.1 計測阻害条件 .....                | 25 |

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 4.3.2 | 安全対策              | 31 |
| 4.3.3 | 作業に必要な諸手続き        | 31 |
| 5.    | 調査方法              | 33 |
| 5.1   | 資機材の選定と準備         | 33 |
| 5.2   | 高密度電気探査           | 37 |
| 5.2.1 | 測定準備              | 37 |
| 5.2.2 | 測定                | 43 |
| 5.2.3 | データの品質管理          | 45 |
| 5.3   | 簡易測量              | 45 |
| 5.4   | 確認ボーリング調査         | 45 |
| 5.5   | 補足調査              | 45 |
| 6.    | データ整理と解析          | 47 |
| 6.1   | データの整理            | 47 |
| 6.1.1 | データ入力             | 48 |
| 6.1.2 | データの品質管理          | 48 |
| 6.2   | 解析                | 52 |
| 6.2.1 | データ補正             | 52 |
| 6.2.2 | 解析方法              | 54 |
| 6.3   | 解析結果              | 57 |
| 6.3.1 | 残差の検討             | 58 |
| 6.3.2 | 解析結果の出力           | 60 |
| 7.    | 堤防内部構造の判定         | 65 |
| 7.1   | 結果判読の際の着目点        | 66 |
| 7.1.1 | 比抵抗値からの土質特性の推定    | 66 |
| 7.1.2 | 土質材料における比抵抗値の影響要因 | 67 |
| 7.1.3 | その他の着目点           | 68 |
| 7.2   | 判定の手順と判定例         | 69 |
| 7.2.1 | 比抵抗分布図の予備評価       | 69 |
| 7.2.2 | 比抵抗値と土質特性との関係把握   | 70 |
| 7.2.3 | 最終判定              | 72 |
| 8.    | 成果品               | 73 |

|      |                              |     |
|------|------------------------------|-----|
| 付録—1 | 高密度電気探査手法による堤防内部構造探査事例 ..... | 83  |
| 1.   | 大型模型堤防によるモデル実験 .....         | 83  |
| 2.   | 関東地方・都市部の河川堤防における現場実験 .....  | 90  |
| 3.   | 中部地方の河川堤防における現場実験 .....      | 95  |
| 付録—2 | 高密度電気探査測定仕様決定表 .....         | 101 |
| 1.   | ダイポール・ダイポール法探査仕様決定表 .....    | 101 |
| 2.   | ウェンナー法探査仕様決定表 .....          | 102 |
| 付録—3 | 品質管理図の作成法 .....              | 105 |

# 1. 総 則

## 1.1 堤体内部構造診断の現状と課題

近年、河川堤防の安全性を的確に評価し、洪水時における弱点箇所を抽出する技術の向上が強く求められている。

河川堤防はその役割上、洪水時における大量の流下水を堤内地に浸入させることなく、安全に流下させる必要がある。そのため堤体は、粘性土などの水を通しにくい材料で築堤されていることが望ましい。しかし河川堤防は、嵩上げ（既設堤防上に更に盛土を行い堤防高を上げること）が繰り返行われていることが多く、なかには江戸時代に遡る築堤履歴をもつものもあり、堤体内部の土質構造が明らかでない場合がほとんどである。

現在、堤防の弱点部発見のための内部調査は、開削やボーリングなどにより行われているが、開削には膨大な費用がかかり、ボーリングでは堤体の面的な土質構造を把握しにくいなどの欠点がある。そのため、膨大な延長に及ぶ堤防の弱点箇所の抽出や安定度の評価を行うためには、堤防の内部構造を定量的かつ効率的に把握できる探査手法の確立が不可欠である。

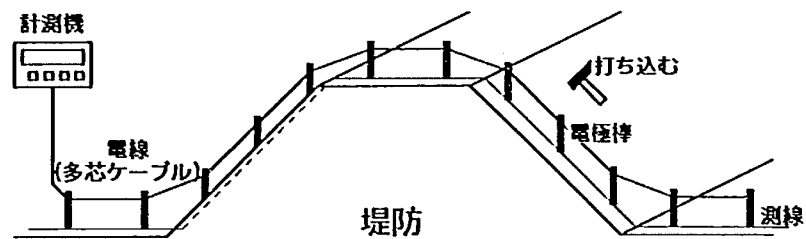
高密度電気探査手法は大地に直接電流を流し、その時に測定された電流および電位差を、逆解析することにより堤防断面の面的な比抵抗分布を求め、地盤の構造や状態を非破壊で短時間内に推定する探査手法である。本マニュアルは、既設堤防の安定度評価を実施するための非破壊探査手法として、この高密度電気探査手法の適用方法について記述したものである。

## 1.2 高密度電気探査手法とは？

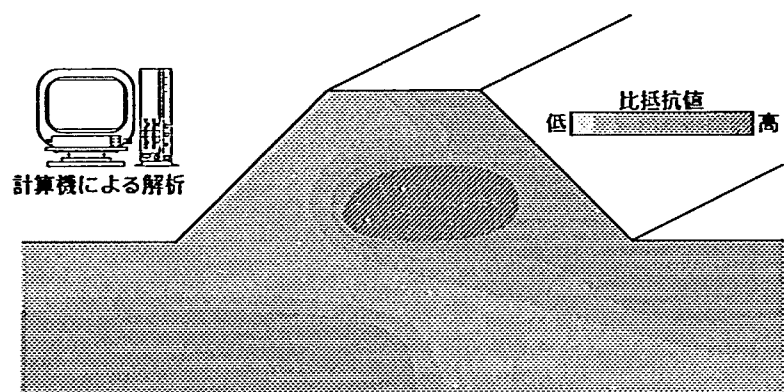
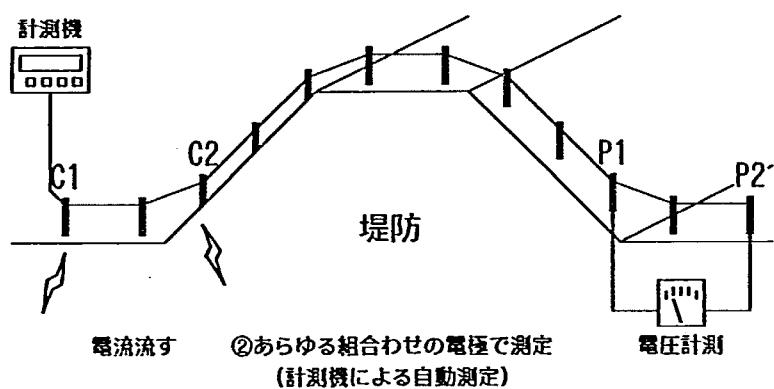
電気探査手法は、古くから地下水の調査などに用いられてきた手法である。近年は、コンピュータなどの進歩により、高度な逆解析が行えるようになり、地盤内の土質構造を2次元的に把握することが可能になっている。このような、逆解析を伴う電気探査手法のことを「高密度電気探査手法」と呼ぶ。

高密度電気探査は、基本的に以下の手順で行う（図1.1）。

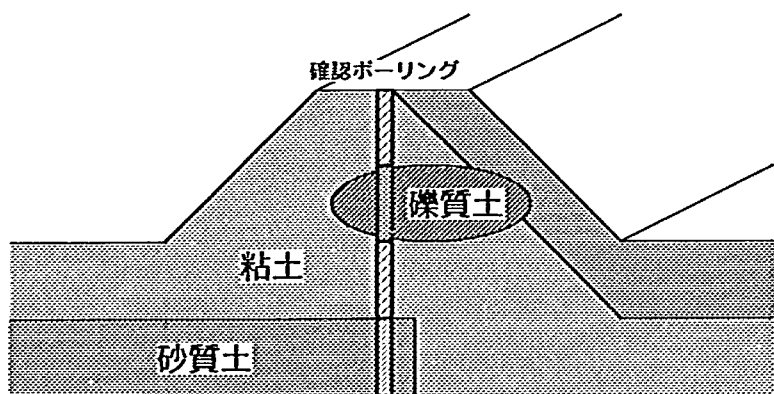
- ① 探査したい堤防断面に測線を設定し、電極を1.0～2.5 m 間隔に配置する（→4章）。
- ② ある一定の電流を電流電極間(C1-C2間)に流し、その時の電位電極間(P1-P2間)の電位差を測定する。得られたデータを1データとし、あらゆる電極配置の組み合わせで探査対象断面のデータを収集する（→5章）。
- ③ 得られたデータをコンピュータに入力し、逆解析手法を用いて対象断面の比抵抗値を逆算し、比抵抗分布図を作成する（→6章）。
- ④ 得られた比抵抗分布図は、堤防断面の比抵抗分布を忠実に表現している。一般に粘土は低比抵抗を示し、堤防で危険だとされる砂質土や緩んだ部分などは高比抵抗を示すため、比抵抗分布図と、1本の確認ボーリング結果から、堤防断面の土質構造や土質特性を正確に推定することができる（→7章）。



①測線に沿って電極を配置する



③逆解析による堤防断面の比抵抗分布の計算



④堤防断面の土質構造の推定

図 1.1 高密度電気探査手法の実施概要

以上の作業により、従来のボーリング調査のみによる作業に比べ、短時間に、安価で、精度のよい調査が可能である。また、1本の確認ボーリングのみで堤防断面の面的な土質構造が得られるため、多数のボーリングにより堤防の安全性を損なうことがないという長所もある。得られた堤防内部構造図は、堤防の安定度評価の際に重要な資料にすることができる。

なお、本研究グループでは本技術の実用化を目的とし、大地比抵抗計の改良により4極法の適用を可能にすることで作業性、安全性、探査精度の向上を図った。また、現場1次元解析ソフトを開発することで現場で迅速に結果を得ることを可能にし、調査費用の低減を図った。

### 1.3 マニュアルの目的と適用

#### (1) 目的

近年、河川堤防の安全性の向上に対する社会的な要請は益々高まっており、河川堤防の構造的な特性を勘案した堤防の安定度評価を図ることが望まれている。

堤防の構造は、礫質土から粘性土まで多様な土質材料を用いて繰り返し嵩上げや腹付けなどを行っているため、土層構造が複雑で変化に富んだものとなっている。また、基礎地盤についても、過去の河道の氾濫や変遷のために堤体同様、複雑な地層構成となっている。しかも、このような堤体や地盤の構造は場所によって著しく異なっており、その組み合わせによっては、堤防の安定性に大きな影響を与える場合もある。

現在では堤防の土質構造の調査は、堤防1断面に3～5本のボーリングを行い、土質柱状図から推定することにより行っている。しかし、このような調査には多大な経費がかかるうえ、面的な情報が得られず、また、多数のボーリングは堤防を傷つけることにもなり問題がある。

高密度電気探査手法は、堤防表面に電極を1.0～2.5 m 間隔に配置し、堤防に電流を流したときの応答から堤防断面の土層構成を探査する手法である。確認ボーリングを1本実施する必要があるが、従来のボーリング調査のみによる作業に比べ、短時間に、安価で、精度のよい調査が可能であり、得られた堤防内部構造図は、堤防の安定度評価の際の重要資料となる。

#### (2) 適用

本マニュアルは、上記の高密度電気探査手法を用いて、河川堤防内部の弱点部発見を行う際の技術的な標準について記載するものである。基本的に堤防の弱点部発見は、現地踏査、縦断方向（堤防に沿って）の高密度電気探査、横断方向（堤防を横切る）の高密度電気探査、確認ボーリングを順に実施することで行う。

堤防の安全性は、堤体のみならず基礎地盤の状態に大きく影響を受ける。そのため、電気探査を実施する場合には、測線延長を堤体幅の数倍は延長し、堤体下の基礎地盤も探査することが望ましい。

また、電気探査で堤防内に透水層などの危険要因が確認された場合や、砂質土、粘性土の区別などの相対的な構造が把握された場合、実際の土質の物性を調べるために必ず確認ボーリングを実施する必要がある。さらに、各種解析手法を用いて堤防の安定度評価を行う際には、確認ボーリングと共に現場透水試験、サンプリングなどを実施し、事前に必要な情報を得るとよい。

### (3) 適用上の留意点

高密度電気探査手法の実施により得られた堤防内部構造図は、堤防の安定度評価の際の資料として扱われ、重要性は極めて高い。そのため、当手法の適用に当たっては以下に示す項目に留意し、精度の高い資料を作成する必要がある。

- ・資料調査、現地踏査などの事前調査により、探査対象を明確にする。また、各種の計測阻害条件(天候条件、立地条件、ノイズ源、高・低比抵抗構造物、水位の存在、開削部)などに問題が確認された場合には、必要な対策を施す(→4章)。
- ・精度の高い計測を行うため、適切な機器選定、データ測定を行う。また、最終判読の際に重要となる、確認ボーリングを必ず実施する(→5章)。
- ・精度の高い解析を実施するため、測定データの品質管理を行い、データの精度を向上する。また、誤判読を避けるため、適切な図面出力を行う(→6章)。
- ・正確な堤防内部構造を推定するため、土質特性が比抵抗値に及ぼす影響を理解するとともに、確認ボーリングの情報を考慮して判読を行う(→7章)。

## 1.4 研究の経緯

本研究においては、従来の電気探査技術の高度化を目的とし、大地比抵抗計の改良により4極法の適用を可能にすることで作業性、安全性、探査精度の向上を図った。また、現場1次元解析ソフトを開発することで現場で迅速に結果を得ることを可能にし、調査費用の低減を図った。これらは、探査効率の向上、作業時間の短縮、探査精度の向上に主眼をおき、以下の経緯で各研究を実施して得られた成果である。

### ・大型模型堤防による室内モデル実験

実験棟内において、関東ロームと砂質土からなる4種類の構造の大型模型堤防を築造し、高密度電気探査の室内モデル実験を行った。様々な電極配置で測定、解析を行い、探査精度について検討した。その結果、堤防表面のみに電極を配置すれば、高精度に土層構造を推定可能であることがわかった。

### ・荒川河川堤防での現場実験

実際の河川堤防に高密度電気探査手法を適用する場合を想定し、各種電極配置で、縦断探査、横断探査を実施した。その結果、5本の確認ボーリング調査の実施により、探査結果の整合性を確認した。また、4極法による探査が、探査効率、作業の安全性、探査精度の面から優れていることがわかった。

### ・阿武隈川河川堤防での現場実験

堤防に1本の確認ボーリングと約20本のスウェーデン式サウンディングを実施し、探査結果が面的に高い精度で土質構造を表現することを確認した。また、スウェーデン式サウンディングでは貫入抵抗が低いことから粘土と判別するような場合でも、高密度電気探査を実施して得た高い比抵抗値から、ゆるい砂であることを判別できることがわかった。

#### ・木曽川河川堤防での現場実験

既に完全に堤体が開削されている場所付近に、高密度電気探査を適用した。その結果、測線を開削部から50 m 程度離せば影響が少ないこと、細粒分含有率と比抵抗値に密接な関係があることを確認した。

#### ・揖斐川河川堤防での現場実験

最終的に安定度評価までを実施することに主眼をおき、より実践的に探査を行った。堤防のり尻に約800 m の縦断測線を配置し、堤防延長方向で弱点と考えられる部分を抽出、該当部に約200 m 横断測線を配置し堤防断面の土層構成を把握した。確認ボーリングを5本実施し、縦断探査では基礎地盤内の礫質土の有無が探査できていること、横断探査では高精度に断面構造を表現できていることを確認した。また、横断の探査結果をもとに浸透流解析を行い、堤防の安定度を定量的に評価し、対策工の計画を行うための資料を作成した。

### 1.5 用語の解説

#### ・比抵抗 (値)

比抵抗 (値) とは、ある物質の電流の流れにくさを表す定数で  $\rho (\Omega \cdot m)$  で表される。電気探査手法はこの比抵抗値が、土質特性によって異なることを利用して探査を行うものである。

#### ・高密度電気探査

高密度電気探査の名称は、測定点を一定間隔に並べて密度の高い測定を行うことに由来する。

比抵抗値を探査の対象とするため「比抵抗探査」とか、2 次元的な分布を把握可能なため「2 次元比抵抗探査」、「比抵抗映像法」など、これらに類似する様々な名称が用いられているが、これらほとんどが正確な定義づけは行われていないまま用いられている。

本マニュアルでは、名称を「高密度電気探査 (手法)」に統一し、①電極を数メートル間隔で地表面に配置し、データを収集、②収集されたデータから逆解析手法を用いて、面的な比抵抗分布を出力するもの、と定義する。

#### ・比抵抗トモグラフィ

高密度電気探査手法の一種ではあるが、通常、高密度電気探査手法は、地表面に電極を配置するのに対し、比抵抗トモグラフィでは、ボーリング孔を用いて調査対象領域を取り囲む形で電極を配置し測定を行うという違いがある。調査原理は全く同じであるが、深部の探査精度が高いという特長を持つ。本マニュアルでは堤防に対してできるだけ非破壊で探査を行うことを目的としており、本手法に対しては言及していない。

#### ・比抵抗分布図

現地での比抵抗測定と後の逆解析により得られた堤防の比抵抗断面図。ほぼ実際の土質構造を反映した比抵抗分布が得られる。

#### ・見掛比抵抗

ある電極配置での測定値を、そのまま最も測定値が大きく影響を受ける部分の比抵抗値であるとみなした場合に、その測定値を見掛比抵抗値という。現地での測定値の妥当性確認の際や、比較的単純な土質構成の場合には、ある程度の指標になるが、最終的な評価の際には逆解析を行う必要がある。

#### ・逆解析（インバージョン）

通常、地盤条件（土質）などを与え、物体がどのような挙動を示すかを解析する「順解析」と異なり、まず、物体が示した挙動を測定し、そのデータをもとに地盤条件などを推定する解析を「逆解析」と呼ぶ。具体的に、電気探査手法では、地盤条件が比抵抗値、物体の示す挙動が地表面で測定した電位差にあたる。本マニュアル内では単に解析と記述した場合、逆解析のことを指す。

#### ・電流電極、電位電極

電極を配置した際に、電流を流す電極を電流電極、電位差を測定する電極を電位電極と呼ぶ。電極の配置法にもよるが、広間隔で電極を配置するほど、深い深度の比抵抗が得られる。

#### ・電極配置

代表的な電極配置として、2 極法、4 極法（ウェンナー法、ダイポール・ダイポール法など）がある。各電極配置法によって、必要測定データ数の多少や、必要電圧の高低、土質構造を強く認識する方向の違い（水平・垂直）があるが、基本的に4 極法が最も簡便かつ精度が良く、本マニュアルでは当配置手法を推奨している。

#### ・接地抵抗

電極を設置した際に、電極と大地との接点部分に発生する抵抗を接地抵抗という。接地抵抗が大きいと地盤に電流が流れにくくなるため、測定精度が落ちる。電極を設置する表土が粘土質である場合はそれほど接地抵抗は大きくないが、表土が乾燥砂、礫質土などの場合は、電極設置時に接地抵抗低減処理を実施して接地抵抗を下げておく必要がある。

#### ・横断方向、縦断方向

本マニュアル内では堤防に沿った方向を、縦断方向。堤防を横切る方向を、横断方向と呼ぶ。

#### ・堤内地、堤外地

一般的に、堤防頂点から河川の側を堤外地、民家など洪水から守られる側を堤内地と呼ぶ。

#### ・左岸、右岸

河川の流下する方向を向いて、右側を右岸、左側を左岸と呼ぶ。

## 2. 高密度電気探査手法の堤防安定度評価への適用方法

### 2.1 堤防の安定度評価の考え方

近年、河川堤防の安全性の向上に対する社会的な要請は益々高まっており、河川堤防の構造的な特性を勘案した堤防の安定度評価を図ることが望まれている。

堤防の構造は、図 2.1 に示すように礫質土から粘性土まで多様な土質材料を用いて繰返し嵩上げや腹付けなどをを行っているため、複雑で変化に富んだものとなっている。また、基礎地盤についても、過去の河道の氾濫や変遷のために堤体同様、複雑な地層構成となっており、図 2.2 に示すようにその組み合わせによっては、堤防の安定性に大きな影響を与える場合もある。

そのような河川堤防の安定度を評価するにあたっては、それが極めて長大な延長を有することを考えると、全川にわたって堤防の安定性を詳細に評価することは実際には困難であり、詳細に評価する箇所

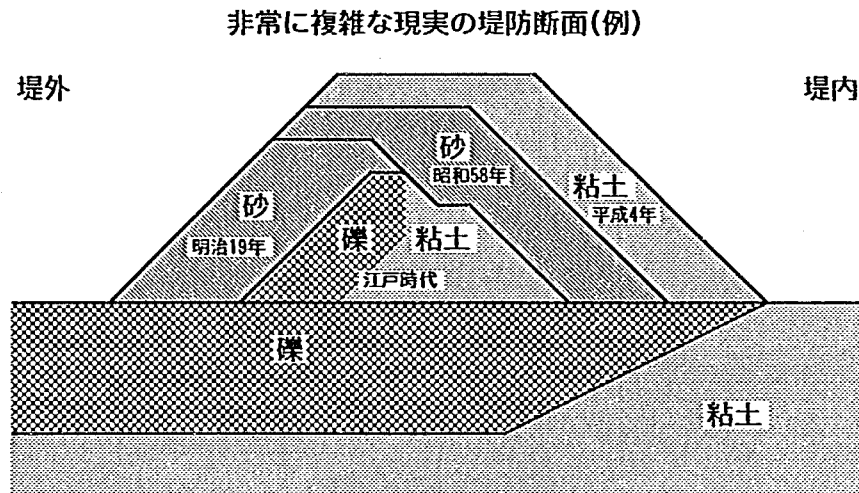


図 2.1 堤体断面例

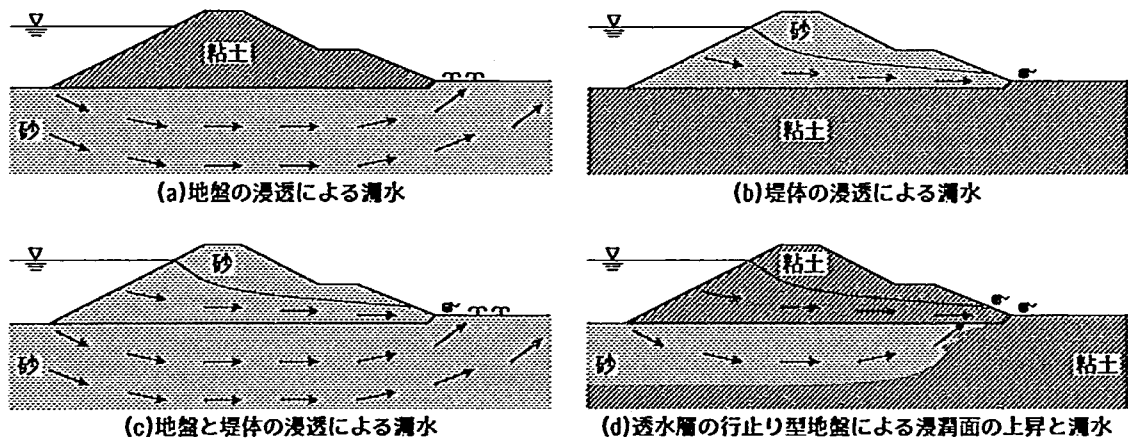


図 2.2 堤体と地盤の土質条件の組合せ

として弱点箇所あるいは安全性の低い堤防を抽出する必要がある。

図 2.3 に建設省で実施されている河川堤防総点検の内容と手順を示す。

- ① 総点検ではまず既存の各種の調査資料などを広く収集・整理して堤防とその周辺の実態を把握し、安全性を概略的に評価する。
- ② 概略評価をもとに堤防を縦断方向に細分し、背後地の状況なども考慮して強化すべき区間の優先順位を設定する。安全性評価結果図の作成事例を図 2.4 に示す。
- ③ 優先順位の高い区間から順次、詳細な点検を行うための調査を実施し、堤防の安全性を評価するとともに、必要に応じて堤防の強化も行う。

以上の手順により、堤防の強化も効率的かつ経済的に進めていくことが可能であると考えられる。

③の詳細点検においては、上述したようにすべり破壊やパイピング破壊に対する定量的な安定度評価を行うとともに、堤防強化対策工法の選定やその効果の検討を行うが、その際の詳細調査手法として基礎地盤を含めた堤防の内部構造探査手法が求められている。

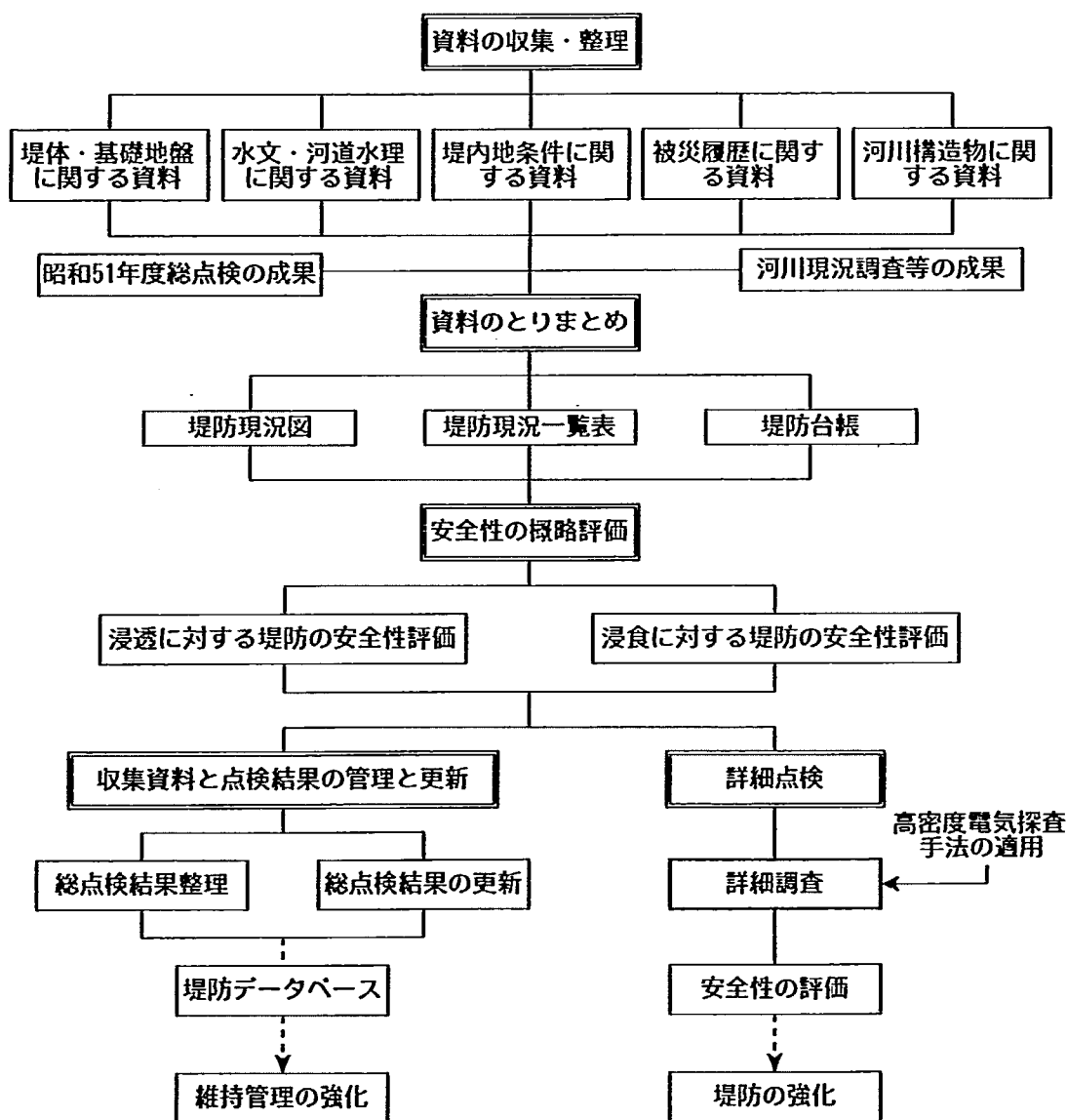


図 2.3 河川堤防総点検の内容と手順

|             |                |            |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|-------------|----------------|------------|---------|------------|----------|-------|-------|---------|---------|-------|-----|---------------------|---------|-------|-----|--------|-----|-------|--|
|             |                | 水系名        |         | 〇〇〇 川水系    |          | 河川名   |       | 〇〇〇 川   |         | 区間    |     | 143.0 km ~ 151.0 km |         | 整理番号  |     | 7 / 14 |     |       |  |
| 距 離 (km)    |                | 143.0      |         | 144.0      |          | 145.0 |       | 146.0   |         | 147.0 |     | 148.0               |         | 149.0 |     | 150.0  |     | 151.0 |  |
| 市 津 井       | 築 堤 名          |            | A 築 堤   |            | B 築 堤    |       | C 築 堤 |         | D 築 堤   |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             | 1. 築堤名にもとづく評価  | 堤体の土質      | 砂 質     |            |          |       | 砂 質   |         |         |       | 砂 質 |                     |         |       | 砂 質 |        |     |       |  |
|             |                | 基礎地盤の土質    | 砂 質     |            |          |       |       |         | 砂 質     |       |     |                     | 砂 質     |       |     |        |     |       |  |
|             |                | (1) 築堤意地形  |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 築 堤 年 代    |         |            |          |       |       |         | 昭和30年以後 |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 評 価        | ○       |            | ○        |       | ○     |         | ○       |       | ○   |                     | ○       |       | ○   |        | ○   |       |  |
|             |                | (2) 平均動水勾配 |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 高水位継続時間    |         |            |          |       |       |         | 48時間以上  |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 評 価        | ○       |            | ○        |       | ○     |         | ○       |       | ○   |                     | ○       |       | ○   |        | ○   |       |  |
|             |                | 質 状 の 状 況  |         |            |          |       |       |         | な し     |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 安全 性 評 価   | C       |            |          |       | C C   |         | C       |       | C C |                     | C       |       | C C |        | C C |       |  |
|             | 2. 被災履歴にもとづく評価 | 被災(漏水)履歴   |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 浸透対策工      |         |            | 崩壊止水矢板工事 |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 安全 性 評 価   |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
| 3. 安全性の概略評価 |                | C          |         |            |          | C     |       | C       |         |       |     | C                   |         |       |     | C      |     |       |  |
| 市 津 井       | 築 堤 名          |            |         |            | M 築 堤    |       |       |         | N 築 堤   |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             | 1. 築堤名にもとづく評価  | 堤体の土質      | 砂 質     |            |          |       | 砂 質   |         |         |       | 砂 質 |                     |         |       | 砂 質 |        |     |       |  |
|             |                | 基礎地盤の土質    |         |            | 砂 質      |       |       |         | 砂 質     |       |     |                     | 砂 質     |       |     |        | 砂 質 |       |  |
|             |                | (1) 築堤意地形  |         |            |          |       |       |         | 一 旧河道 一 |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 築 堤 年 代    | 昭和30年以前 |            |          |       |       |         | 昭和30年以後 |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 評 価        |         |            | ○        |       | ○     |         | ○       |       | ○   |                     | ○       |       | ○   |        | ○   |       |  |
|             |                | (2) 平均動水勾配 |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 高水位継続時間    |         |            |          |       |       |         | 48時間以上  |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 評 価        | ○       |            | ○        |       | ○     |         | ○       |       | ○   |                     | ○       |       | ○   |        | ○   |       |  |
|             |                | 質 状 の 状 況  |         |            |          |       |       |         | な し     |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 安全 性 評 価   | C       |            | C C C C  |       | C     |         | C       |       | C   |                     | C C C C |       | C   |        | C   |       |  |
|             | 2. 被災履歴にもとづく評価 | 被災(漏水)履歴   |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 浸透対策工      |         |            |          |       |       |         | ドレーン工   |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 安全 性 評 価   |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
| 3. 安全性の概略評価 |                | C          |         | C          |          | C     |       | C       |         | C     |     | C                   |         | C     |     | C      |     |       |  |
| 距 離 (km)    |                | 143.0      |         | 144.0      |          | 145.0 |       | 146.0   |         | 147.0 |     | 148.0               |         | 149.0 |     | 150.0  |     | 151.0 |  |
|             |                |            |         |            |          |       |       |         |         |       |     |                     |         |       |     |        |     |       |  |
|             |                | 作成年月日      |         | 平成 〇 年 〇 月 |          | 局名    |       | 〇〇〇〇〇 局 |         | 事務所名  |     | 〇〇〇〇〇 局             |         |       |     |        |     |       |  |

図 2.4 堤防安全点検例

## 2.2 高密度電気探査手法の有用性

上述したように、堤体と基礎地盤の組合わせは、多岐にわたっており、この複雑さが、堤防の安定性を定量的に評価することを困難にしている。堤防の安定度を評価するためには、縦断方向に沿って行う検討と横断方向について行う検討があるが、ここではそれぞれについて、現状の課題と高密度電気探査手法の有用性を述べる。

### (1) 縦断方向

図 2.4 に示したような安定性評価の結果として縦断方向に強化すべき区間を選定しても、それらの区間の中で基礎地盤を含めた構成を把握し、詳細設計を行うための代表断面を決定することは非常に難しい。一般的にボーリングやサウンディングなどの土質調査から、堤体および地盤の複雑な構造をある程度推測することは可能であるが、区間内の構造を面的かつ的確に把握するためには、相当数の調査を実施する必要がある。

それに対し高密度電気探査手法は、面的な比抵抗分布を求め、堤防の構造を非破壊で推定する探査手法で、図 2.5 のように、確認のための 1～2 本のボーリングと組み合わせることで、調査対象区間の連続した土質情報が得られ、縦断方向の断面構成の変化がわかるとともに、特に弱点となりやすい水みちが把握できる。

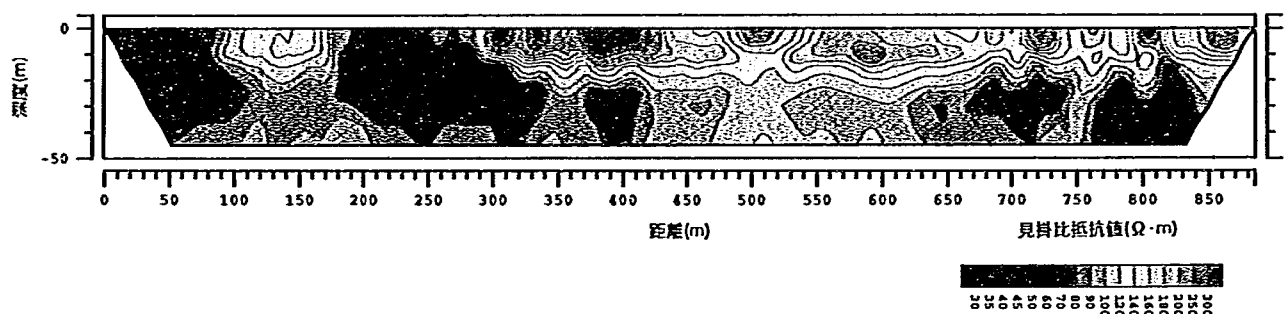


図 2.5 高密度電気探査手法による調査結果（縦断方向）

## (2) 横断方向

横断方向の探査には、その探査結果をもとに解析を行い安定度評価に利用するため、基礎地盤も含めた非常に高精度な情報が求められる。これも、一般的にボーリングやサウンディングなどの土質調査から、堤体および基礎地盤の複雑な構造をある程度推測することは可能である。しかし、図 2.1 に示した堤体断面に対して、2～3 本程度のボーリング調査を実施しても、堤体構成が複雑で断面全体について面的かつ的確に把握できない場合もある（図 2.6）。

一方、図 2.7 に示すように、高密度電気探査手法は複雑な地盤構成に対しても、確認ボーリングを併用することでより精度の高い土質情報が密に得られ、浸透流解析や安定解析を行うためのモデル作成などにも非常に有用である。

このように、従来の調査で複雑な土層構成を把握するためには、かなりのボーリングが必要となる。それに対し、高密度電気探査手法は縦断方向、横断方向ともに適用可能であり、1 本の確認ボーリングとの併用で内部構造を把握することが可能である。

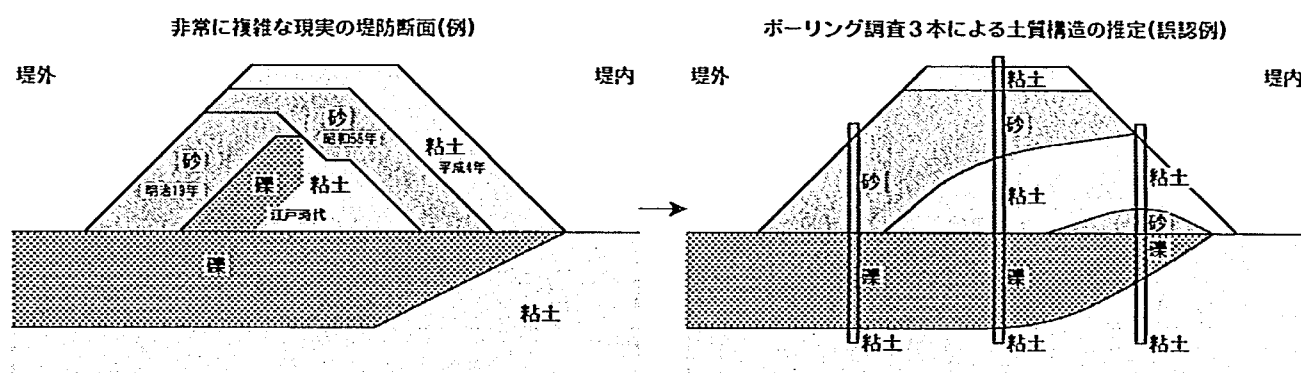


図 2.6 ボーリング調査による土質構造の推定（誤認例）

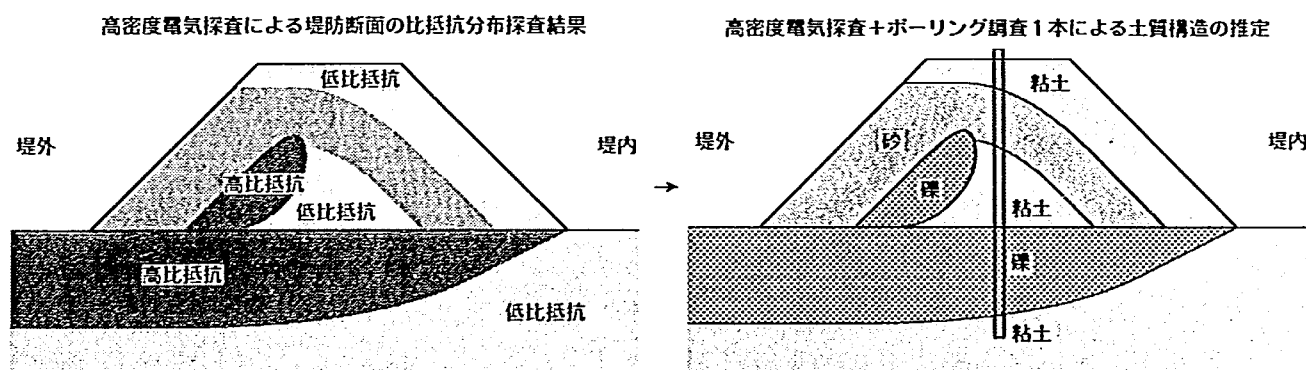


図 2.7 高密度電気探査手法による土質構造の推定



### 3. 堤防内部構造診断のための高密度電気探査手法の概要

堤防内部構造診断のための高密度電気探査手法は、2.1 堤防の安定度評価の考え方で記載したように、安全性の概略評価で評価が低い区間(D)に対する詳細点検に適用される調査手法である。

本マニュアルでは4章～8章にかけて、調査計画、調査方法、データ整理と解析、堤防内部構造の判定、成果品について各々詳細に説明しているが、本章では、堤防内部構造診断のための高密度電気探査手法の“全体の流れ”と“標準的な調査・解析・堤防内部構造の判定方法”を概説した。

#### 3.1 全体の流れ

堤防内部構造診断のための高密度電気探査手法の調査フローを図3.1に示す。

同フロー図に示すように、本手法では、まず、調査対象区間を縦断方向に高密度電気探査することにより堤防の土質縦断面構造を長区間にわたって調査し、次に、その結果に基づいて代表的な箇所あるいは弱点箇所と判定される地点で横断方向の高密度電気探査と、少なくとも1本のボーリング調査を計画・実施する。最終的に、高密度電気探査結果と確認ボーリング結果を総合して堤防内部土質構造を判定する。

本手法の特徴は、堤防の長区間にわたって土質構造が把握できること、段階的に調査を実施することにより代表的あるいは弱点箇所の横断方向の土質構造を詳細に把握できることである。

次節以降に、調査計画、調査方法、解析、堤防内部構造の判定方法、成果品の概要を記載する。

#### 3.2 調査計画（→4章）

##### (1) 予備調査

建設省で実施されている河川堤防総点検で整理された①堤防現況図、②堤防現況一覧表、③堤防台帳、④安全性評価結果図などの資料に基づき、堤防の概要、安全性を評価する際の課題（調査目的）を把握する。

また、現地踏査により、①必要な測線長確保の可能性、②電氣的ノイズや堤防天端の舗装状況などの測定環境、③植生、亀裂や湧水の有無など堤防表面の状況を確認し、調査計画に反映させる。

##### (2) 測線計画

図3.2に示すように、縦断方向と横断方向の高密度電気探査測線、およびボーリング調査地点を設定する。なお、高密度電気探査の横断測線とボーリング調査地点については、計画段階では予備調査で水の浸潤などの異常箇所が認められた場合にはその箇所に、それ以外の場合には縦断測線の中央に仮設定しておくこととし、縦断方向探査が終了した段階で、縦断探査結果で高比抵抗ブロック等異常箇所が検出された場合には、その地点に変更することを標準とする。

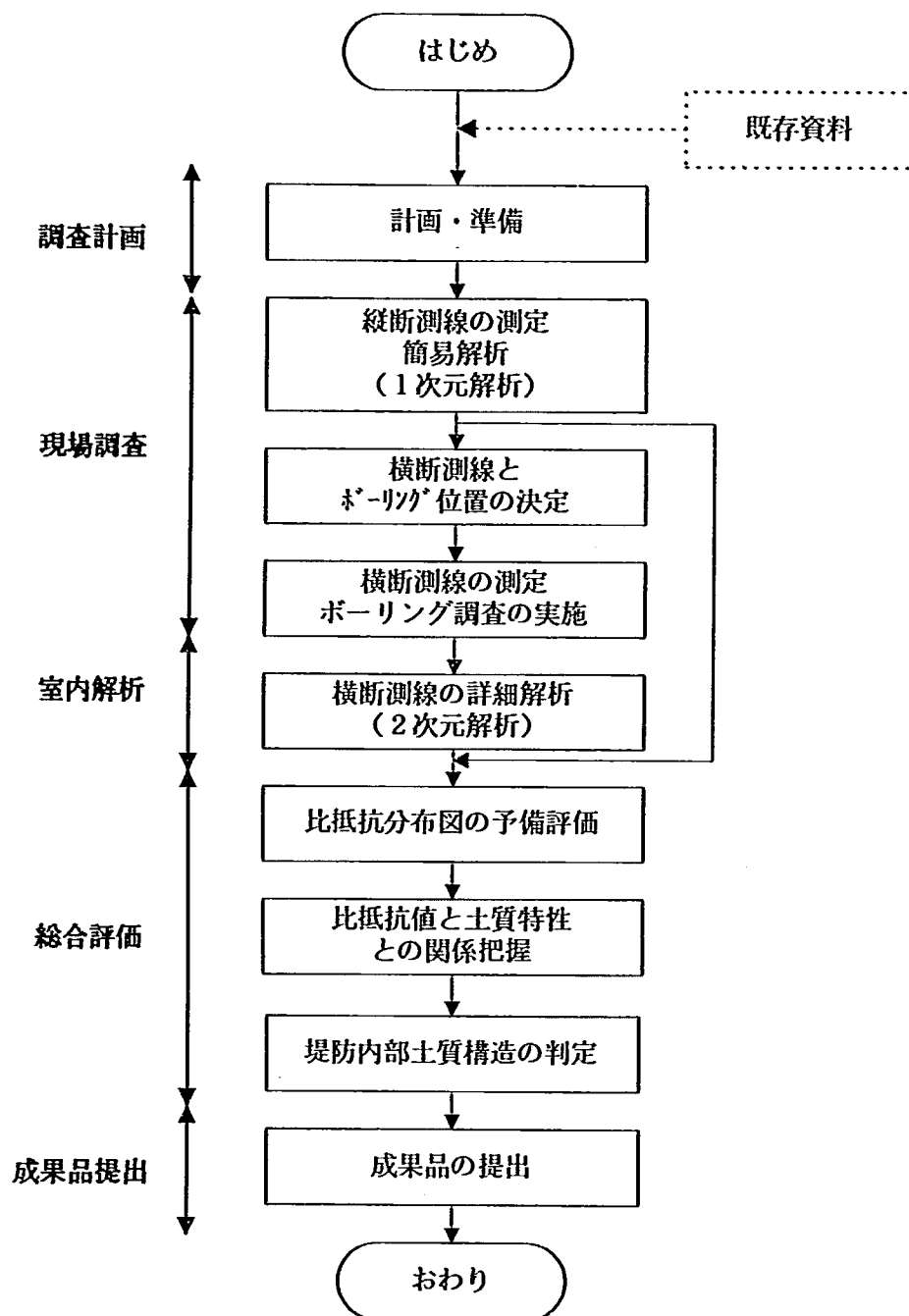


図 3.1 堤防内部構造診断のための高密度電気探査手法のフロー

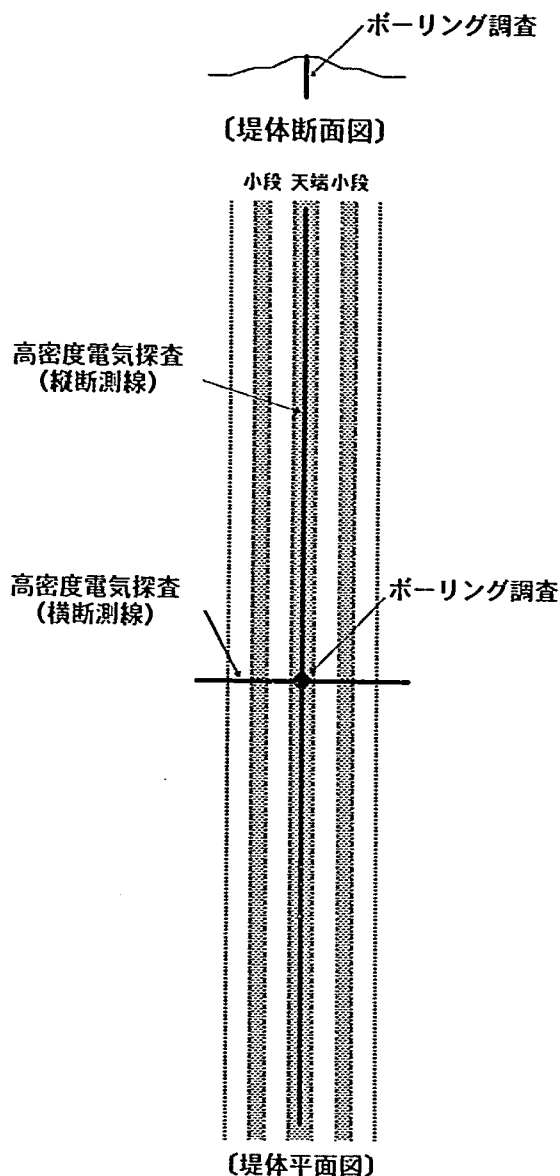


図 3.2 堤防内部診断の計画調査位置図の例

堤防内部診断の調査計画（調査項目、仕様など）の例

| 種 目     | 仕様および数量                                                                                                                                                                                            |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 高密度電気探査 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・測定方法；4 極法</li> <li>・測線配置；横断方面：約90 m×1 側線（電極間隔1.0 m、1 展開）<br/>縦断方面：約500 m×1 側線（電極間隔2.5 m、3 展開）</li> <li>・解析方法；横断方向：2 次元 FEM 解析<br/>縦断方面：1 次元簡易解析</li> </ul> |
| ボーリング調査 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ボーリング調査；標準貫入試験、サンプリングを含む<br/>φ86、深度 15 m</li> <li>・室内土質試験 ；試験項目：密度、含水比、粒度、コンシステンシー、その他<br/>試験間隔：1 m</li> </ul>                                             |

### (3) 電極配置と測線配置等の計画

高密度電気探査の電極配置、電極間隔、探査深度と測線長、探査深度については、下記仕様を標準とする。

- ① 電極配置：4 極法（ダイポール・ダイポール法、ウェンナー法等）を原則とする。

測定精度や安全性の点で優れていることから4 極法を原則とした。ただし、電氣的ノイズが高い場合など、状況に応じて2 極法の使用も可能なものとする。

- ② 電極間隔：縦断方向測線では2.0～2.5 m、横断方向測線では1.0 m を原則とする。

ただし、基礎地盤の調査が主体である場合には縦断方向の電極間隔を5.0 m にすることも可能である。しかし、基礎地盤の調査に限定するならば、堤体ののり尻付近の河川敷きに測線を設定すべきである。

- ③ 探査深度：探査深度は、土質構造を把握したい深度（探査対象深度）の約1.5 倍を標準とする。

例えば、高さ8 m の堤体とその下の基礎地盤5 m を調査したい場合、探査対象深度は天端から13 m となり、高密度電気探査の探査深度は $13\text{ m} \times 1.5 \div 20\text{ m}$  となる。

- ④ 測線長：縦断方向は最低限500 m 程度の測線長とし探査することが望ましい。また、横断方向については堤体幅と関連してくるが基礎地盤も調査対象とする場合には上記探査深度を考慮し、測線を両のり尻から20～30 m 程度延長しておくことが望まれる。

なお、測定の効率化を図るために縦断方向の測線展開を考慮した測線長とすることが望ましい。

### (4) 計画上の留意点

現場測定で効率のかつ精度の良いデータを取得するために、測定環境（→表4.2 測定阻害条件とその対策）、安全対策、作業に必要な諸手続きを調べ、調査計画に反映させる。

## 3.3 調査方法（→5 章）

### (1) 測定装置

高密度電気探査の測定システムの一例を図3.3 に示した。測定システムとして、以下の機能を有するシステムを使用することが望ましい。

- ① 印加電流：品質の良いデータを取得できる通電容量を有する装置
- ② 自然電位補償：自然電位の影響を除去できる機能
- ③ シグナルエンハンス機能：データのスタッキングが行え、S/N 比の向上を図れる機能
- ④ ノイズリダクション機能：ノッチフィルタ、バンドパスフィルタ等を有する機能
- ⑤ 取得データの品質管理機能：見掛け比抵抗図の作成や取得データのグラフ表示等の表示が可能な機能（一般のアプリケーションソフトの利用も可）
- ⑥ 簡易解析実施機能：縦断方向の測定結果に対する簡易解析の実施機能

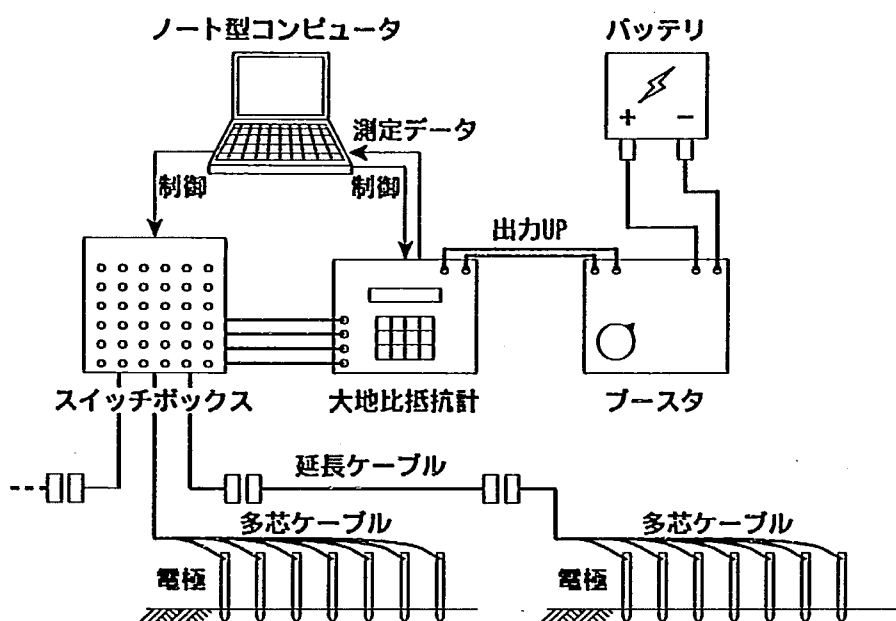


図 3.3 高密度電気探査の測定システムの例

## (2) 高密度電気探査の実施

高密度電気探査の現場作業手順を図 3.4 に示す。

測定の実施に当たっては、品質の高いデータを取得することを第一に考える。測定前には、データの品質に大きな影響を及ぼす接地抵抗の測定を行い、著しく大きな接地抵抗（目安値  $10\text{ k}\Omega$  以上）を示す電極に対しては接地抵抗の低減措置（→ 5 章）を取る必要がある。測定中あるいは測定後には、取得データのグラフ表示や見掛け比抵抗図等を図示し、現場で取得データの品質をチェックする（→ 5 章、6 章）。

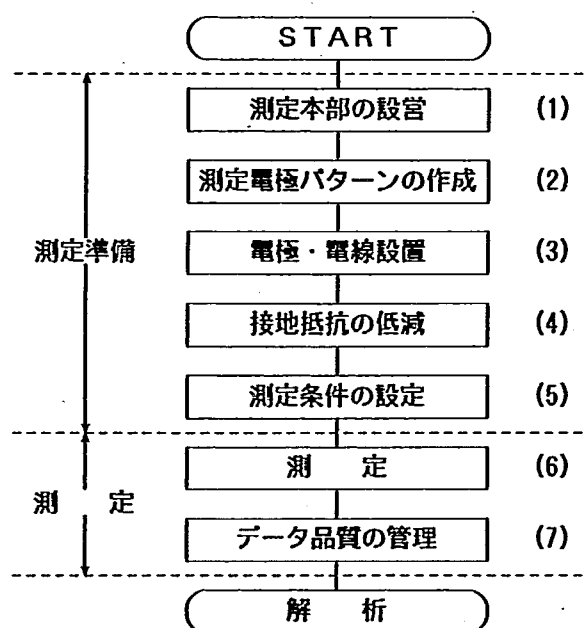


図 3.4 高密度電気探査の現場作業手順

### (3) 測量

測定電極の位置、堤防の断面形状の測量を行う。

### (4) 確認ボーリング

高密度電気探査から得られた堤防内部構造探査結果（2次元比抵抗断面）から堤防内部土質構造の推定を行うために、調査区間に対し少なくとも1本のボーリング調査を実施する。

なお、調査対象としている区間で既にボーリング調査が実施されており、堤体および基礎地盤の土質構成に関するデータがある場合には、その情報を活用してもよい。

## 3.4 データ整理と解析（→6章）

高密度電気探査の解析は、測定したデータ（ $V/I$ ）を最も忠実に表現しうる地盤の比抵抗構造を逆解析で求める手法である。解析作業は、データの整理作業、データ解析作業、解析結果の品質管理に細分される。

### (1) データ整理作業

データの整理作業では、測定データの並び換えと品質チェックを行い、解析のための入力データを作成する。

測定データの品質管理に当たっては、測定データが大量であることから品質管理図（→6章）により視覚的に品質管理を行う。

### (2) データ解析作業

データ解析は、主に縦断探査に適用する1次元解析と、主に横断探査に適用する2次元解析の違いによって電位計算法に違いがあるものの、基本的には図3.5に示したように測定電位と理論電位の残差が最小になるように比抵抗モデルを修正していく方法である。

### (3) 解析結果の品質管理

測定データの品質管理と同様に、解析についても品質管理が重要であり、解析結果について残差の検討を行い解析結果の妥当性を把握しておくことが必要である。

### (4) 解析結果の表示

解析結果は2次元比抵抗断面図として表示する。

2次元比抵抗断面図の配色については、堤防の安全性を損なう土質材料として礫質土や砂質土が挙げられ、また、礫質土や砂質土が高比抵抗を示す傾向にあることから、堤防内部構造診断のための高密度電気探査においては高比抵抗～低比抵抗を暖色系（赤系）～寒色系（青系）と配色することを原則とする。

なお、表示方法は“コンタ表示”、しきい値は“等差―等比混合分割法”を原則とする（→6.3.2 解析結果の出力）。

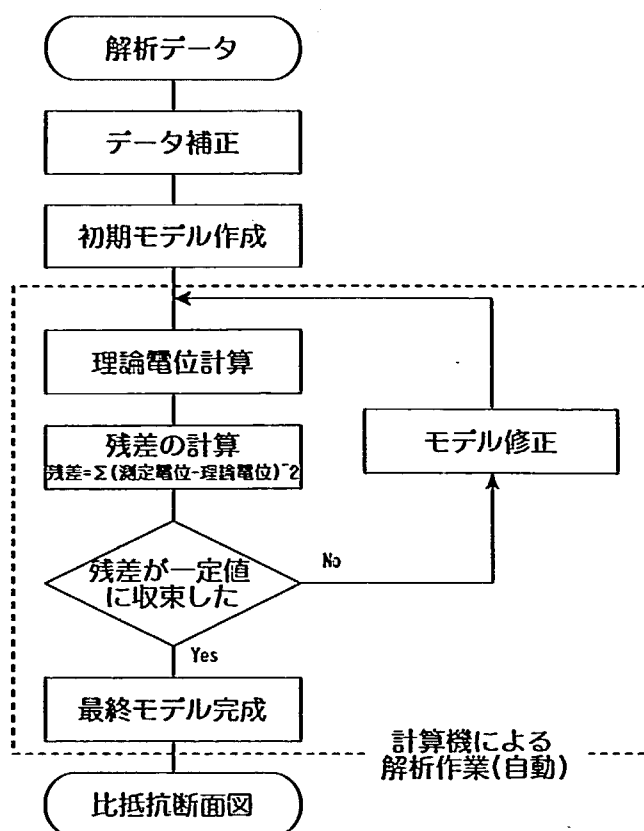


図 3.5 解析作業の流れ

### 3.5 堤防内部構造の判定（→7章）

高密度電気探査の逆解析で求めた比抵抗断面は、堤防内部の土質構造を2次元的に表現しているものと考えられ、堤防内部構造の診断への適用が期待されている。

しかしながら、比抵抗は堤防の築堤材料や基礎地盤の電気的な特性を表現しているものであるため、土質材料の含水比等の影響を受け易く、例えば、砂質土であっても含水比が高い場合には小さな比抵抗を示し、粘性土との判別が困難になる場合が生じる。したがって、高密度電気探査手法による堤防内部構造診断では、高密度電気探査に加え少なくとも1本のボーリング調査を実施し、ボーリング地点での比抵抗と土質材料の対比を行い、2次元比抵抗断面から堤防の土質構造断面を判定することを原則とする。

### 3.6 成果品（→8章）

調査結果は、成果品を様式（→8章）に従って提出するものとする。



## 4. 調査計画

本章では、高密度電気探査に関する調査計画について解説する。ここでいう調査計画は、図 4.1 に示すように 1. 予備調査、2. 調査計画の作成の手順で進める。その詳細を以下に示す。

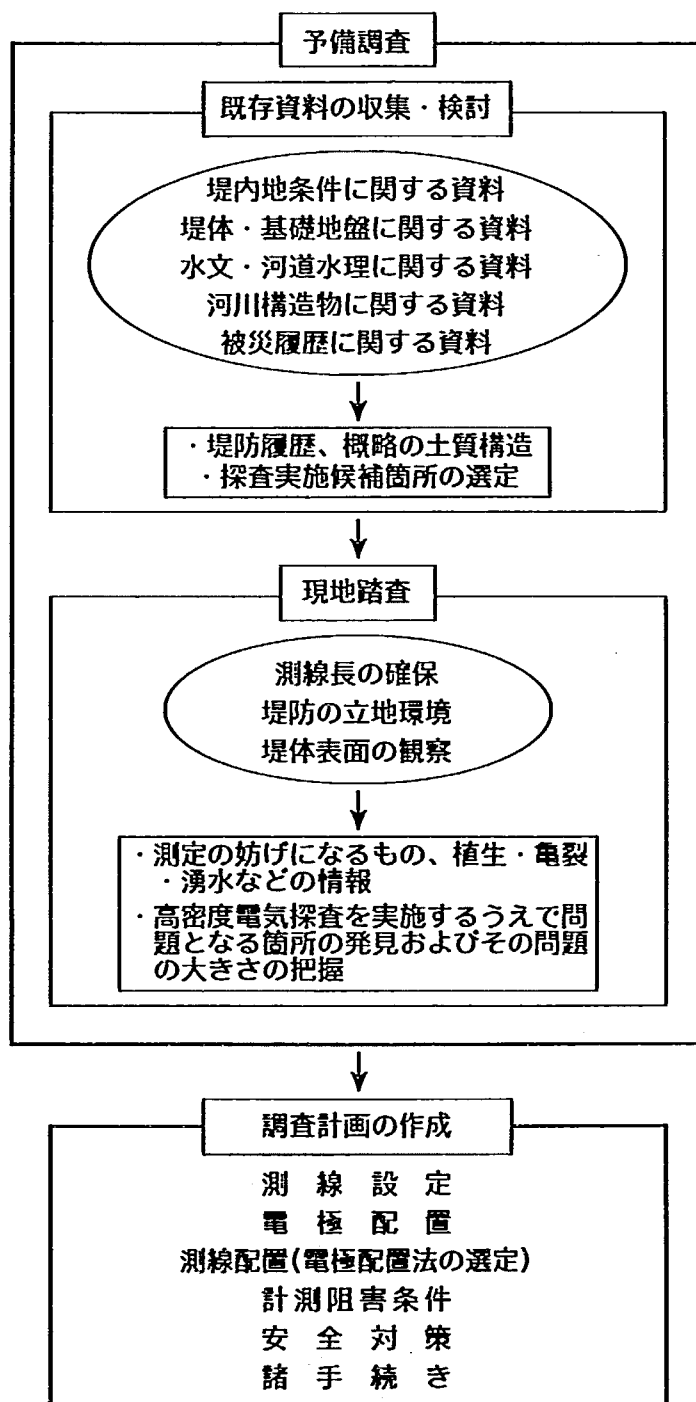


図 4.1 高密度電気探査の調査計画

## 4.1 予備調査

高密度電気探査手法によって求められる比抵抗断面は堤防内部構造の診断における重要な資料であり、より有益な探査結果を得るためにはしっかりとした調査計画を作成しなければならない。そのための予備調査として必要なのが、1. 既存資料の収集・検討、2. 現地踏査である。

### 4.1.1 既存資料の収集・検討

堤防の安定度評価を実施するにあたって、堤防の標準断面や1/2500程度の地形図を用意する。予備調査では、まずこれらを収集し、探査の目的や対象となる構造を明確にし、探査実施候補箇所の選定や実際に探査可能な箇所数の検討を行う。

### 4.1.2 現地踏査

既存資料整理によって探査候補地を絞り込んだら、現地踏査を行う。現地踏査は、計画測線を含む広い範囲の地域で、地形、地質、植生、土地利用、過去の被災状況や対策工などを調査し、既存資料による検討結果の確認と高密度電気探査を実施するうえで問題となる箇所の発見およびその問題の大きさを把握するために行う。

現地踏査は極めて重要な意味を持つ調査で、資料や現地観察事項に関する解釈や判断に高度の技術的知識を要するので十分な経験を有する技術者が担当し、探査の目的や問題点の大きさに応じて、場合によっては、繰返し行う必要がある。

現地踏査の主な観察ポイントとしては、以下の点が挙げられる。これらのポイントは、実際の調査計画に反映させる。

#### 1) 測線長の確保

現場での探査の際に用いる電極配置や探査深度によって測線長が決定される。現地では、近隣の家屋などを考慮して、十分な測線長が確保できるかどうかを確認する。

#### 2) 堤防の立地環境

堤防の周辺や内部には、電氣的ノイズ源となる施設や構造物（高圧線鉄塔・鉄道・樋管など）、あるいは電極設置を制限する施工（舗装路・張付けコンクリートなど）が存在することがあり、これらは測定障害物となる。これらを含めて堤防の立地環境を把握し、調査計画作成の参考とする。

#### 3) 堤体表面

植生の様子やのり面の状況（亀裂・湧水の有無など）を観察し、必要に応じてスケッチや写真撮影を行ってとりまとめる。

## 4.2 調査計画の作成

予備調査の結果を用いて、調査を阻害する条件などを考慮に入れつつ、以下に述べる要領に従って具体的な調査計画を作成する。

#### 4.2.1 測線設定

縦断探査では、広い探査範囲を効率よく測定するために比較的広い電極間隔（2.5 m 程度）を設定する。測線は、基本的に堤防天端にそって設定するものとするが、予備調査によって探査範囲が基礎地盤のみでよい場合は、堤防のり尻に設定してもよい。また、横断探査では詳細な測定データを得るため、電極間隔を狭く（1.0 m 程度）して測定を行う。

高密度電気探査は基本的には、まず縦断探査を行い、さらに横断探査によってその詳細を判断するという手順に沿って計画する。ただし、縦断方向あるいは横断方向のみの探査を実施することで成果が得られたり、概査段階からの縦横断の組み合わせや他の補足調査の実施が必要な場合は、適宜計画を変更する。

#### 4.2.2 電極配置

堤体内部構造探査における実用的な電極配置として、4 極法（ウェンナー法、ダイポール・ダイポール法）および2 極法があげられる。

各電極配置の特徴を表 4.1 にまとめる。

表 4.1 各電極配置の相対評価

| 電極配置              | 土構造との対応性 <sup>1)</sup> | 測定中の安全性 <sup>2)</sup> | 作業性 | 測定の難易度 <sup>3)</sup> |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-----|----------------------|
| 4 極法：ダイポール・ダイポール法 | 良好                     | 安全                    | 良好  | 普通                   |
| 4 極法：ウェンナー法       | 普通                     | 安全                    | 良好  | 普通                   |
| 2 極法              | 普通                     | 要注意                   | 普通  | 易                    |

- 1) 共同研究での成果から、2 極法より4 極法の方が、堤体の土質構造をより正確に捉えている（土質構造との対応性がよい）と判断できた。また、4 極法のうちウェンナー法よりダイポール・ダイポール法の方が土質構造との対応性が良いことがわかった。
- 2) 高密度電気探査では測定中に電流を地面に流すため、電流電極を作業者および第三者が触らないように十分注意し、安全を確保することが必須である。堤防には子供などの第三者がいることを考えると、遠電極が必要な2 極法より、遠電極が不要な4 極法の方が安全管理が容易である。
- 3) 測定の難易度については、一般的には測定する電位差が大きいほど測定が容易である。4 極法は2 極法に比べ測定電位差が小さく、測定の難易度は比較的高くなるが、堤防の高密度電気探査では探査深度が小さいこと、比抵抗計の測定精度を向上させることにより、4 極法でも十分な精度のデータが取得されるものと考えられる（ただし、電位ノイズが大きい場合には、2 極法を採用することも考慮する）。

以上より、4 極法（ウェンナー法、またはダイポール・ダイポール法）は、これまでの研究成果により安全面を含めた作業性や現場適用事例から得られたデータの品質などを考慮すると、堤体内部構造探査に適していると考えられる。ただし、現場状況によっては2 極法の使用も可能である。

以下に、具体的な電極配置を示す。

### 1) 探査範囲

図4. 2、図4. 3にダイポール・ダイポール法およびウェンナー法の探査範囲を示す。一般にダイポール・ダイポール法は、ウェンナー法と比較して、同一の測線長に対して広範囲かつ高密度な探査が可能である。

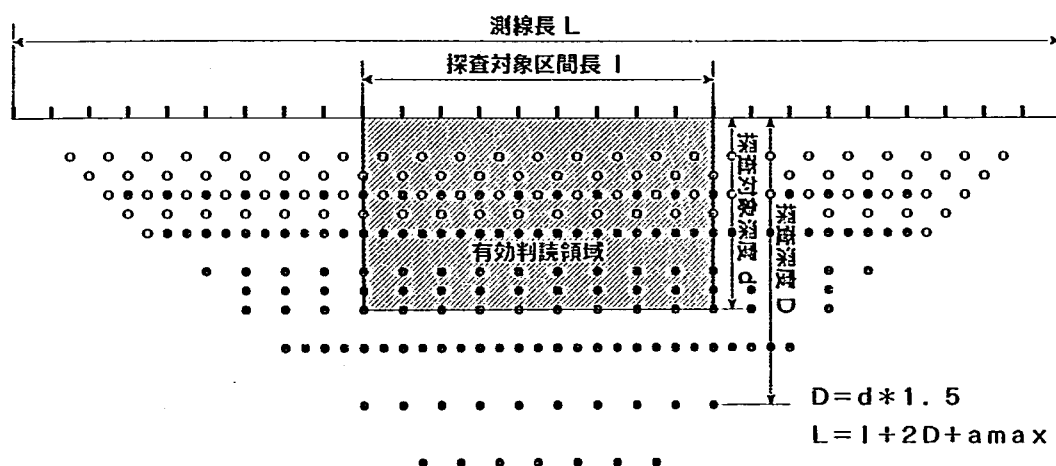


図4.2 ダイポール・ダイポール法における探査範囲および測線長

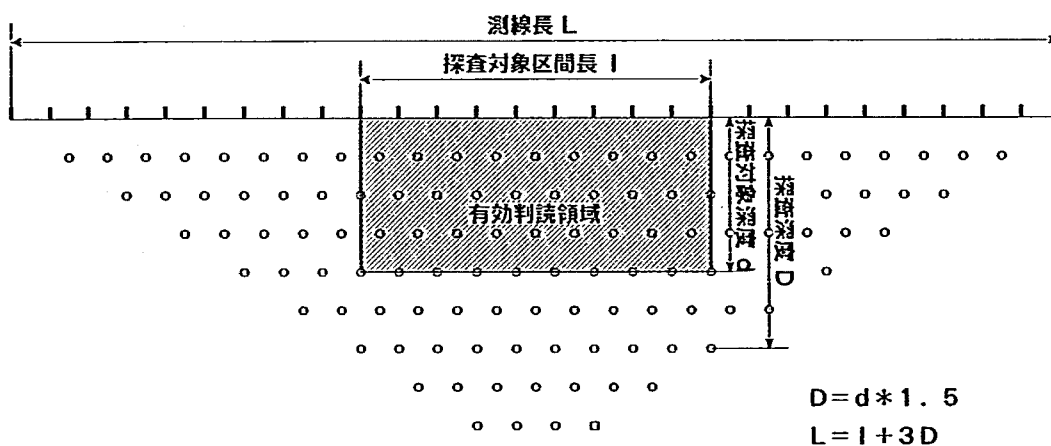


図4.3 ウェンナー法における探査範囲および測線長

### 2) 探査深度

探査深度までが解析の対象となるが、解析断面の底部では精度が落ちるので、本来探査を必要とする探査対象深度  $d$  の1.5倍程度の深度を探査深度  $D$  として設定する。堤防を対象とする場合、高さ5 mの堤防で（基礎地盤5 mを含めて）探査深度  $D$  を15 m、高さ8 mの堤防で（基礎地盤5 mを含めて）探査深度  $D$  を20 mとし、天端から計測すればよい。

### 3) 電極間隔

堤防内部の探査に適用する場合、堤防の縦断方向と横断方向の探査について別途検討する必要がある。電極間隔は、縦断探査で 2.5 m、横断探査では 1.0 m 程度が望ましい。なお、この電極間隔は、解析断面の地表付近の分解能に相当する。

### 4) 測線長

解析断面の両端では精度が低下するので、本来探査を必要とする範囲の両側に、電極配置に応じた距離を加えて、これを測線長とする。探査深度と測線長との関係は図 4.2、図 4.3 に示すようになる。

### 5) 展開数

探査範囲が広い場合、特に横断探査では測線を重ね合わせて探査を展開していく場合がある。このときの測線の重ね合わせる電極数  $m$  は、探査深度  $D$  によって決まり、これを考慮して計測に必要な展開数を決定する。

### 6) 遠電極

2 極法による測定を行うときは測線から離れた地点に遠電極を設ける必要がある。遠電極距離は通常、探査深度によって求まる最大の電極間隔の 10 倍以上とされ、少なくとも 5 倍以上離さなければ補正計算が不可能となる。

遠電極線の敷設ルートは、ノイズ源の近傍を極力避け、切断されることがないように現場踏査などの情報をふまえて選定する。また、測線と離れた箇所に設置するため作業上の安全面を十分考慮して計画を立てる。

### 7) ノイズ源の考慮

探査域周辺の施設や堤防内部の構造物などがノイズ源となり、測定値に悪影響をおよぼすケースが考えられる。そのような場合には、ノイズ状況を把握するための事前測定を行ったり、ノイズの比較的小さくなる夜間の測定も検討する。

## 4.3 計画作成時の留意点

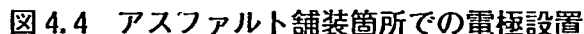
ここでは、調査計画を作成するにあたって留意すべき点を、1. 計測阻害条件、2. 安全対策、3. 作業に必要な諸手続きの 3 項目に分けて述べる。

### 4.3.1 計測阻害条件

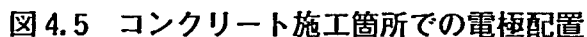
計測作業や測定データに影響を与える諸条件は(1)絶縁体・高比抵抗構造物、(2)産業設備からの漏洩電流、(3)低比抵抗構造物、(4)その他、に大別することができる。計画作成時にはこれらの影響をなるべく被らないよう留意するが、探査の目的上やむを得ない場合には、解析・解釈の段階で評価できるように現地踏査や事前測定、および計測時の品質管理などで影響度合いを把握しておく必要がある。

絶縁体や高比抵抗構造物として、電極設置を制限したり、接地抵抗の管理を難しくする主な構造物を以下に記す。

アスファルトは絶縁体であり、堤防道路のようなアスファルト舗装箇所に測線を設定した場合、そのままでは電極設置が不可能なため欠測となる。そのため、縦断方向の探査では、測線を道路ののり肩にずらすなどの対策が望ましい。また、横断方向には、交通量が多いなどのやむを得ない場合を除いてコアリングを実施して電極設置を可能にする（図 4.4）。



のり覆工や根固工などの護岸コンクリート施工箇所やこれに類する高比抵抗構造物が近傍にある場合の調査は、原則として避ける方が望ましい。ただし、調査計画上、高比抵抗構造物を含めて調査を行わざるおえない場合は、コンクリート施工箇所に、棒電極の打ち込みができないため金属板の貼付け電極とする（図4.5）。しかし、この方法では接地抵抗が、金属棒を打ち込んだ場合の3



～4倍以上高くなるが多いため、接地抵抗低減措置を施すとともに、データの品質管理に十分留意しなければならない。また、最終的な堤防内部構造の判定の際に参考になるように、コンクリート施工箇所の範囲、コンクリートに鉄筋が入っているか否か、などの詳細な情報を得ておく。

### ③ ジオテキスタイルなどの補強材

堤体に補強土工などが施されている場合には、当該区間が高比抵抗領域となることが多い。これは、堤体材料とジオテキスタイルなどの補強材との間隙に空気を含むためである。このような場合には、調査対象区間のうち補強材の影響の少ない堤体で調査するなどの代替案を計画する。しかし、補強土工などが施されている堤防での調査が避けられない場合には、解析結果の解釈にそなえて予備調査などで、施工法と施工範囲を明らかにしておく必要がある。また、コンクリート施工箇所と同様に偽像については十分に注意する。

## (2) 産業設備からの漏洩電流

堤体近傍で想定される主な産業設備からの漏洩電流を以下に記す。

### ① 高圧送電線

高圧送電線に対して測線を平行に設定すると、電磁誘導ノイズを受けやすくなり、データの品質が低下するおそれがある。よって、測線は高圧送電線になるべく直行させる形で配置するのが望ましい（図4.6）。また、鉄塔はアースされているため、十分離して測線を配置するようにする。

### ② 鉄道

列車通過時に漏洩電流によるノイズが生じる可能性がある。そこで、堤体近傍を鉄道が通過する場合は、その前後は測定を中断するなどの対策が必要となる。

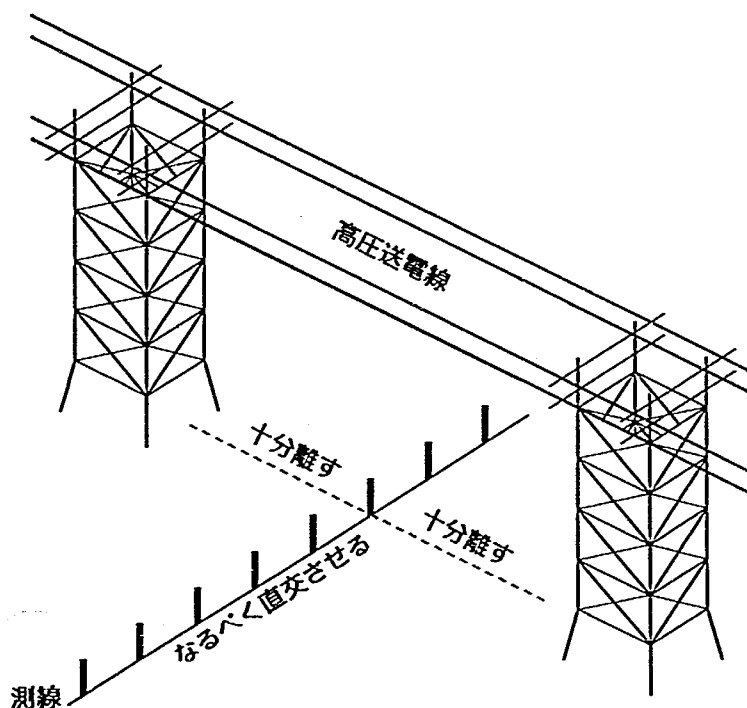


図4.6 高圧送電線近傍での測線配置

### ③ その他

①、②以外に変電設備や工場など大電力を扱う施設や電気溶接の作業場周辺などでもデータの品質が低下するおそれがある。このような場合には、①、②も含めて、以下の対策が有効である。

- ・ノイズに比べて大きな信号を取得できるように通電量を増大させる。
- ・ノイズレベルの小さくなる夜間に測定を実施する。
- ・事前計測によるノイズレベルの程度によっては、大地比抵抗計のノイズリダクション機能を利用して、ノイズをキャンセルする。

### (3) 低比抵抗構造物

測線の近辺に低比抵抗構造物があると電流がそこを集中して流れるため、堤体本来の比抵抗を求めることが難しくなる。低比抵抗構造物としては、銅矢板・鉄筋コンクリート構造物・ガードレール・堤防内部の埋設管などが考えられる。横断方向の探査では、計画時に測線を探査深度以上離し、これらを避けることが望ましいが、やむを得ない場合はなるべく構造物に対して測線を直交させるように配置を工夫する(図4.7)。また、縦断方向の探査でも、測線を探査深度以上離し、できるだけこれらを避けるようにする。

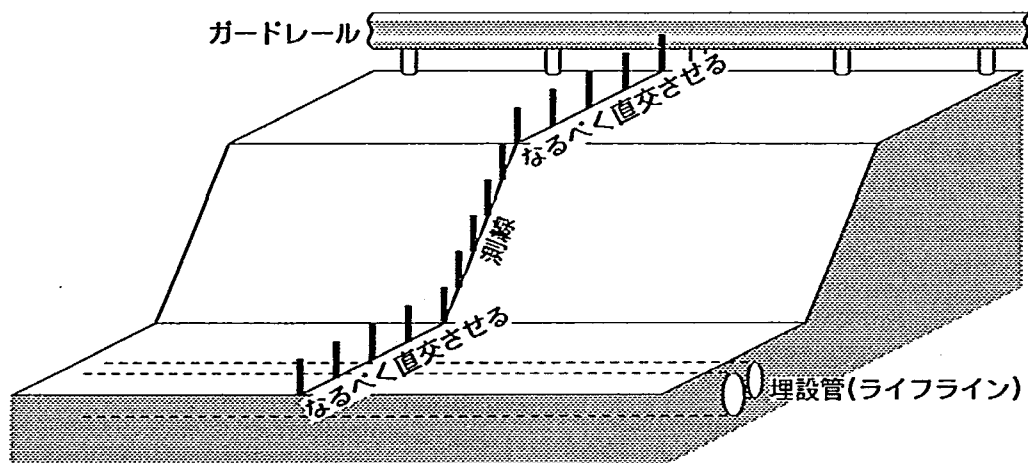


図4.7 低比抵抗構造物がある場所での測線配置

### (4) その他

その他の計測阻害条件を以下に示す。

#### ① 天候条件

土質材料の比抵抗値は、構成物質の粒径や間隙比などの他に間隙水の量や比抵抗値に大きく左右される。従って、堤防内の土中水分が定常時と異なる場合の計測には注意が必要である。

たとえば、降雨が堤体内に浸透する際には、降雨量や堤体土質の状態によっては、堤体内に浸潤線が発生する場合があります。比抵抗分布からの土質構造の推定を困難にするおそれがある。このような事態を防ぐため降雨直後はもちろんのこと、堤体内浸透が継続している期間の計測は避けるべきである。

## ② 水位

探査範囲に水位が存在する場合、洪水や降雨直後のように定常時と比べて水位が大きく変動している時点での計測は避けるべきである。また、水位の位置を把握しておくことが望ましい。

## ③ 樋門、開削部など

高密度電気探査手法を堤防内部構造診断に適用するにあたっては、測線の延長方向に地形・土質が連続していること、および測線と直交する方向で地形・土質が不規則に変化しないことが望ましい。

探査範囲の近くに用排水の樋門、河川の合流地点および開削部などがある場合には、その箇所では地形・土質が不連続となるので、その影響を避けるため測線を少なくとも探査深度以上、可能であれば 50 m 程度は開削部から離して配置する（図 4.8）。

これまでに述べた計測阻害条件とその対策についてまとめたものを表 4.2 に示す。

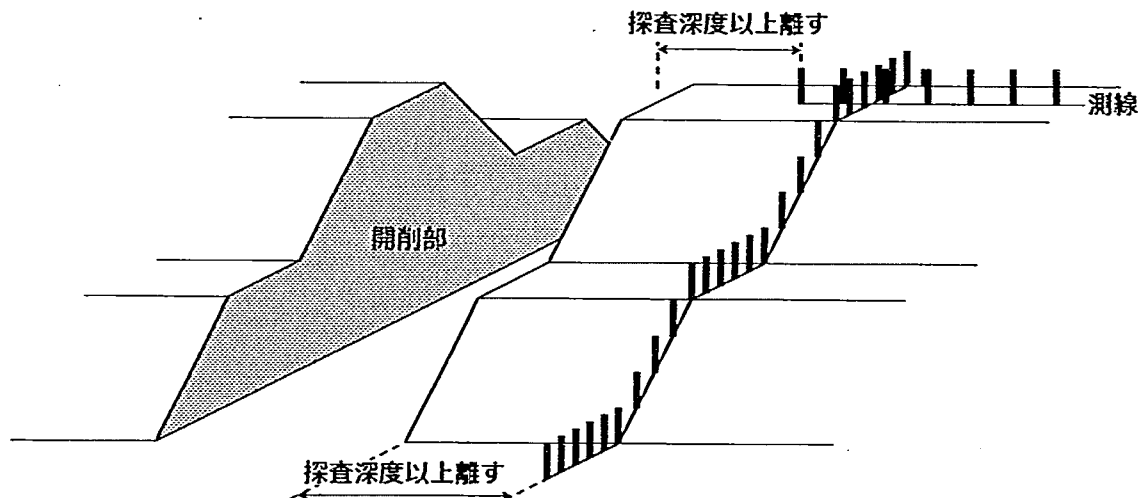


図 4.8 開削部近傍での測線配置

表 4.2 計測阻害条件とその対策

| 分 類                 | 項 目                                  | 内 容                                              | 対 策                                                                                        |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 絶縁体・<br>高比抵抗<br>構造物 | アスファルト舗装                             | ・絶縁体なので電極設置が不可能                                  | ・コアリングにより棒電極の打込みを可能にする                                                                     |
|                     | コンクリート施工                             | ・金属棒の打込みが不可能<br>・解析結果の解釈に影響を与える<br>・接地抵抗が高くなる    | ・金属板の貼付け電極を設置する<br>・施工範囲を把握しておく                                                            |
|                     | 補強材<br>(ジオテキスタイルなど)                  | ・解析結果の解釈に影響を与える<br>・接地抵抗が高くなる                    | ・塩水散布により接地抵抗を低減する<br>・施工範囲を把握しておく                                                          |
| 産業設備<br>からの漏<br>洩電流 | 高圧送電線                                | ・ノイズによりデータの品質が低下する                               | ・高圧送電線になるべく直行するように測線を配置する<br>・測線を鉄塔から十分離す                                                  |
|                     | 電車                                   | ・漏洩電流により測定値が乱れる                                  | ・電車通過前後は測定を中断する                                                                            |
|                     | その他<br>(変電設備、工場、電気<br>溶接現場)          | ・漏洩電流により測定値が乱れる                                  | ・ノイズレベルを事前に確認し、<br>通電量を増大する<br>・ノイズレベルの低下する夜間の<br>測定を検討する。<br>・大地比抵抗計のノイズリダク<br>ション機能を利用する |
| 低比抵抗<br>構造物         | 銅矢板・鉄筋コンクリ<br>ート構造物、ガードレ<br>ール・埋設管など | ・電流が集中して流れるため、土<br>中構造からの応答が得られない                | ・測線を探査深度以上離す<br>・構造物になるべく直交するよう<br>に測線を配置する                                                |
| その他                 | 天候条件                                 | ・雨水の浸透により堤防内の土中<br>水分が定常時と異なる場合、結<br>果の解釈に影響を与える | ・堤体内浸透が継続している期間<br>は測定を避ける                                                                 |
|                     | 水位                                   | ・間隙水の有無により土質の比抵<br>抗値が変化する                       | ・定常時から大きく変動している<br>ときは測定を避ける<br>・水位を把握しておく                                                 |
|                     | 樋門・樋管・開削部                            | ・地形・土質構造の不連続により<br>測定値が影響を受ける                    | ・測線を探査深度以上離す                                                                               |

#### 4.3.2 安全対策

高密度電気探査では、電流量にして10 mA~100 mA 程度、電圧にして10~200 V 程度の電流を大地に通電する。これらの電流量や電圧は感電する可能性があるため、測線上看張人を配置して通電中の電極に人や家畜が近づかないようにするといった対策を講じる。特に、高電圧を伴う測定では感電に対するより一層の注意が必要である。

2 極法による測定を計画する際には遠電極の安全対策も考慮する。遠電極は作業現場から隔った場所に設置するため、見張人を置くなど、注意を怠らないよう気をつけなければならない。

その他、現場測定によって生じる可能性がある事態については、必要に応じて関係者と協議しながら安全対策を検討する。

#### 4.3.3 作業に必要な諸手続き

測定作業を円滑に行うための手続きについて記す。代表的なものを以下に示すが、それ以外にも調査実施上必要なものがあれば、調査計画作成段階で行っておく。

- ・ 関係機関との調整

作業工程や安全対策、緊急時の連絡法などを協議しておく。

- ・ 河川管理者、道路管理者との調整

堤体や道路を横断して測線を設定する場合は、それぞれの管理者との間で現地踏査立入の時期、作業内容、作業範囲、安全対策および緊急時の連絡体制などを打ち合わせておく。

- ・ 地権者

測線設定や遠電極などで民地に立ち入る場合は、地権者と協議して了承を得る。



## 5. 調査方法

高密度電気探査手法は測線上に多数の電極を配置して、面的な情報を得る手法である。

本章では調査精度を確保するため、1. 必要な資機材の選定についての留意点、2. 測定作業の留意点、3. 確認ボーリングについて解説する。

### 5.1 資機材の選定と準備

高密度電気探査手法に必要な資機材を調査計画に沿って準備する。資機材リストの例を表 5.1 に示す。資機材を選択する時には、以下に示す機能を参考に選択する。

なお、これらの資機材の機能チェックは現場に行く前に行い、測定中に支障がないようにする。

#### (1) 大地比抵抗計

大地比抵抗計は通電量と電位差を計測し比抵抗値を求める機器である。使用する電極配置法によって、十分な測定電位差を確保するために必要な通電量は大きく異なるため、測定の仕様に見合った最大通電性能をもつ大地比抵抗計を適宜選択する必要がある。

一般に、ダイポール・ダイポール法やシュランベルジャー法では、通電量に対する測定電位差が小さいので他の電極配置よりも大電流を通電させ、精度良く測定する必要がある、それに見合う性能の大地比抵抗を選択する必要がある。ただし、堤防内部構造探査における探査深度は最大でも 20 m 程度なので、通常能力の比抵抗計で十分であることが多い。

それぞれの機能の仕様について簡単に述べる。

##### ① 定電流型・定電圧型

定電流型と定電圧型の 2 タイプがある。定電流型は電極の接地抵抗や電源電圧の変動に関わらず一定の電流を大地に通電する方式で、定電圧型は一定の電圧を大地に加える方式である。堤防内部構造探査における探査深度を考えれば、いずれのタイプを選択してもさしつかえない。

##### ② 通電波形

交替直流（電流の極性が周期的に交替する矩形波、図 5.1）や低周波交流（図 5.2）を用いるのが一般的である。

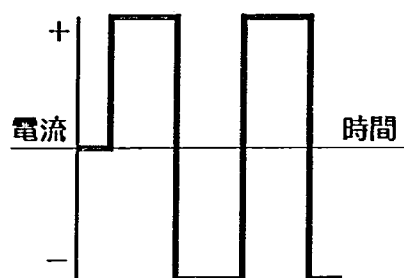


図 5.1 交替直流

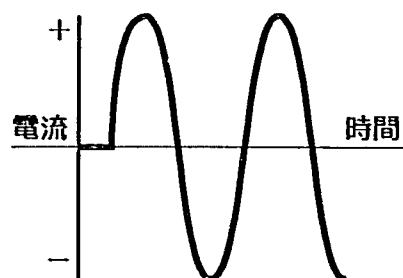


図 5.2 低周波交流

表 5.1 資機材リスト例

| 項 目     | 名 称                                                                                                | 備 考                                                                                                                                                            |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 測定機器    | 大地比抵抗計<br>ノート型コンピュータ<br>スイッチボックス<br>バッテリー                                                          | 測定状況にあったものを選択<br>測定機器の制御およびデータ記録用<br>一度に使用する電極数分のチャンネルを確保<br>12 V のカーバッテリー                                                                                     |
| 電極・電流   | 電極棒<br>貼付け電極<br>多芯ケーブル<br>延長ケーブル<br>遠電極ケーブル                                                        | 長さ 30 cm 直径 1 cm 程度の金属棒<br>5 cm×5 cm 程度の金属板<br>電極端子付きで 20 芯程度のもの<br>測線と測定機器の中継用<br>2 極法に必要、単芯ビニル線                                                              |
| 工具その他   | ハンマー<br>修理工具<br>デジタルマルチメータ<br>テスター<br>充電器<br>カメラ<br>トランシーバ<br>安全対策具<br>照明器具<br>テント<br>測量器具<br>伐採器具 | 棒電極打込み用<br>ニッパ、ラジオペンチなど<br>電位波形の観察用<br>導通チェック用<br>バッテリーの充電用<br>現場状況の撮影用<br>2 極法の遠電極設置等などに有用<br>安全標識、ロープなど<br>夜間測定用<br>雨、ほこりからの機器の保護用<br>レベル、箱尺、巻尺など<br>ナタ、カマなど |
| 材料・消耗品  | 木杭<br>フロッピーディスク<br>ビニルテープ<br>塩<br>ベントナイト<br>軍手<br>野帳<br>写真フィルム                                     | 測量用<br>データ保存用<br><br>接地抵抗の低減用<br>貼付け電極板の貼付け材                                                                                                                   |
| 現場解析用機器 | ノート型コンピュータ<br>小型発電機                                                                                | 現場での 1 次元解析用。ソフトを含む<br>コンピュータ用の電源。300~500 W 程度                                                                                                                 |

### ③ 自然電位補償

地盤には自然状態における電位勾配があり、これを自然電位と呼ぶ。自然電位の影響(図5.3)を除くためには測定値から自然電位を差し引く必要があり、これを自動で行う機種を用いる。

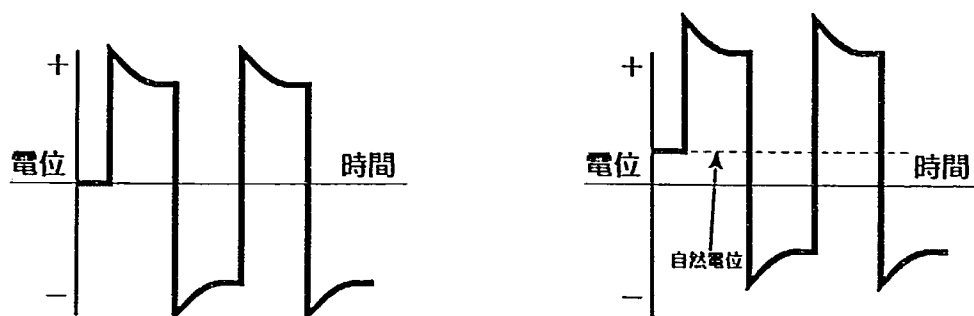


図 5.3 自然電位の影響

### ④ シグナルエンハンス機能

重複測定 (スタッキング) が一般的である。これは同一の電極配置で繰り返し測定を行い、信号成分を強調して高精度のデータを取る方法である。ノイズが正規分布をする場合には  $n$  回のスタッキングにより  $\sqrt{n}$  倍の精度向上が期待できる。

### ⑤ ノイズリダクション機能

商用電源などの特定周波数のノイズの影響を防止するためのノイズリダクション機能として、狭帯域バンドカットフィルタ (ノッチフィルタ)、バンドパスフィルタ、位相検波回路などがあり、これらの機能をもつものを用いることが望ましい。

## (2) ノート型コンピュータ

ノート型コンピュータは、大地比抵抗計およびスイッチボックスの制御、データの記録などに用いる。大地比抵抗計およびスイッチボックスの制御を自動化することにより、電極の切替えや計測のタイミング調整などの煩雑な機器操作の手間を省ける。また、測定データの記録も自動的に行われるため、測定者の人為的ミスを未然に防ぐことができる。

また、カラーディスプレイを装備しているノート型コンピュータを用いる場合は、あらかじめ測定補助プログラムを準備しておくことにより、現場で視覚的なデータチェックが可能となり、測定データの品質管理を充実することができる。

## (3) スイッチボックス

ノート型コンピュータから自動制御できるものを用意する。また、内蔵されたスイッチ (リレー) が測定に見合った耐電圧や電流容量を有していることを確認する。

測定には一度に使用する電極数だけチャンネル数が必要となるため、スイッチボックスはチャンネル数の多いものを測定に必要な台数分用意する。

#### (4) バッテリ、ブースタ

通常の測定では 12 V のカーバッテリーで十分である。測定が長時間にわたる場合には、カーバッテリーを複数準備するか、必要に応じて 500 W 程度の発電機などを用意する。

また、大きな電圧に高める必要があるため、ブースタなどを用意する。ブースタの能力は測定仕様に見合ったものにする。

#### (5) 電極・電線

一度に使用する電極数に合わせて電線を用意する。

##### ① 電極

電極は基本的に長さ 30 cm、直径 1 cm 程度の棒電極を用意する。コンクリート構造物などに電極を設置する必要がある場合は、金属板の貼付け電極も用意する。2 極法測定時には遠電極分も合わせて数量を確認する。

##### ② 電線

大地に通電して測定を行うには測線上に設置した全ての電極から電線でスイッチボックスに接続する必要がある。このとき作業効率を考え、電線には多芯ケーブルを用いる。例えば多芯ケーブルの芯数は 20 芯程度が便利で、測定の仕様にあった端子間隔のものを用意する。また、長大な測線に備えて延長ケーブルも用意しておくといよい。

また、2 極法による測定を行うときには、遠電極用の単芯線も必要である。

#### (6) 工具・材料・消耗品

電極打ち込み用のハンマー、断線修理用の工具などを準備する。金属板の貼付け電極を使用するときには粘土、ベントナイトなどの貼付け材も用意しておく。また、接地抵抗の低減を行う場合には使用する塩水も用意する。

横断探査で地形測量が必要な場合はレベル、箱尺、巻尺などの資機材も準備する。また、電気伝導度計で河川水や湧水の抵抗値を測定しておく、最終的な結果判読の参考となる場合もある。

導通チェックのためのテスターの他、通電波形を観察するためにデジタルマルチメータを用意すれば、測定電位の波形を観察でき、測定データの品質管理に役立つ。

#### (7) 解析機器

測定機器の他に現場での 1 次元解析に必要なシステム一式などを用意する。

## 5.2 高密度電気探査

高密度電気探査の測定作業のフローは、図 5.4 に示す電極・電線設置などの準備作業、測定、およびデータの品質管理といった工程からなる。本節では、具体的な作業内容について要点を解説する。

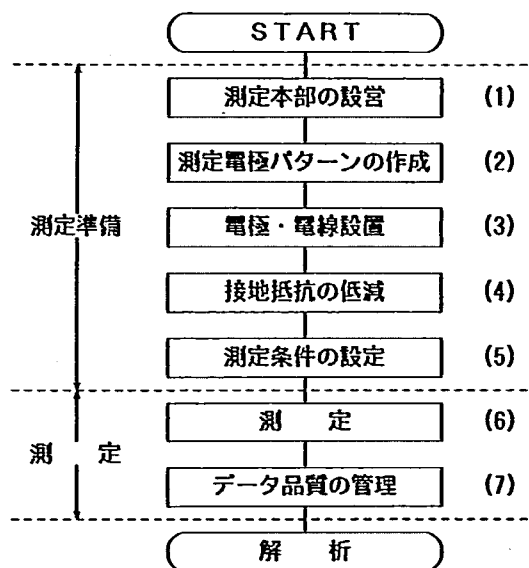


図 5.4 測定作業のフロー

### 5.2.1 測定準備

#### (1) 測定本部の設営

本部機材は、一般交通や通行を妨げない平坦な場所に設置する。また、日射、水滴や降雨による影響がないように、車中に設置するなど作業環境に留意する。その時、機器の接続ミスや動作不良がないことを確認して測定に備える。測定システムの例を図 5.5 に示す。

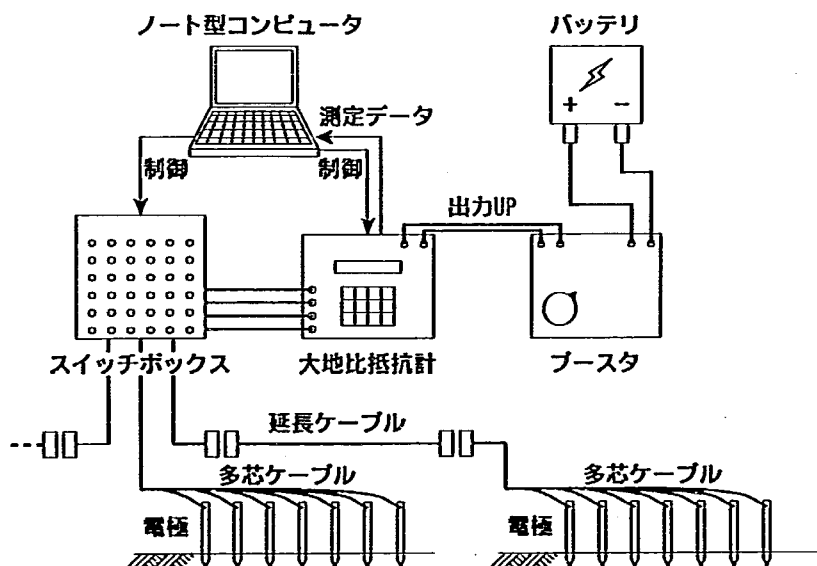


図 5.5 測定システムの例

## (2) 測定電極パターンの作成

測定本部の設営に続き測定時の電極組み合わせパターンを作成する。このとき、電極配置や使用電極に応じて電極組み合わせパターンを自動作成するプログラムがあれば、現場状況による変更（例えば、障害物による測線長・電極数の減少など）にも柔軟に対応できる。

電極組み合わせパターンの切り替えをコンピュータ制御により自動で行う場合には、作成した電極組み合わせパターンをファイル（テキストファイルなど）として用意する。なお、電極の切り替えを手動で行う場合には、電極組み合わせパターンをデータシート（印刷物）の形で事前に用意する。

ここでは、ウェンナー法とダイポール・ダイポール法を用いる場合について説明する。また、長大な測線を測定する場合の展開の重複についてもあわせて説明する。なお、測定前には付録－２の探査仕様決定表に数値を埋め込み、探査仕様を決定しておく必要がある。

### ① ウェンナー法

ここでは、電極間隔  $a=b \sim 8b$  の場合を例に測定手順を説明する（図 5.6）。

- 1) 測線始点から  $a=b$  の場合には 1 番目と 4 番目の電極に通電し、2 番目と 3 番目の電極間で電位差の計測を行う。
- 2) 電極を並行移動して、その組について測定を行う。これを測定終点まで繰り返す。

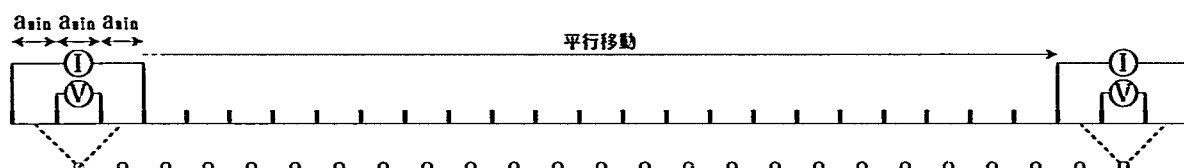


図 5.6 a

- 3)  $a=b$  での測定が全て終了したら、 $a=2b$  の測定を再び測線の始点から測定する。

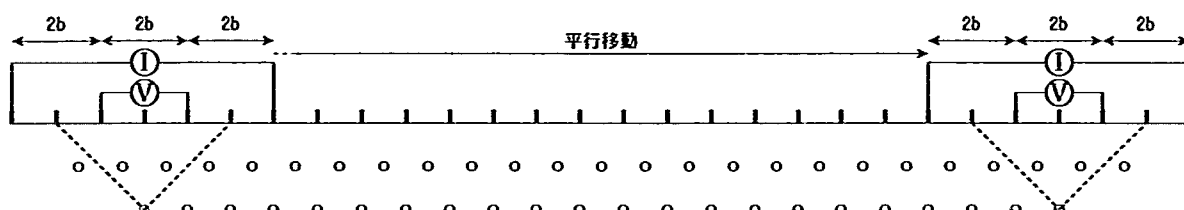


図 5.6 b

4) このようにして  $a$  を順次拡大して、 $a=8b$  になるまでの計測を行う。

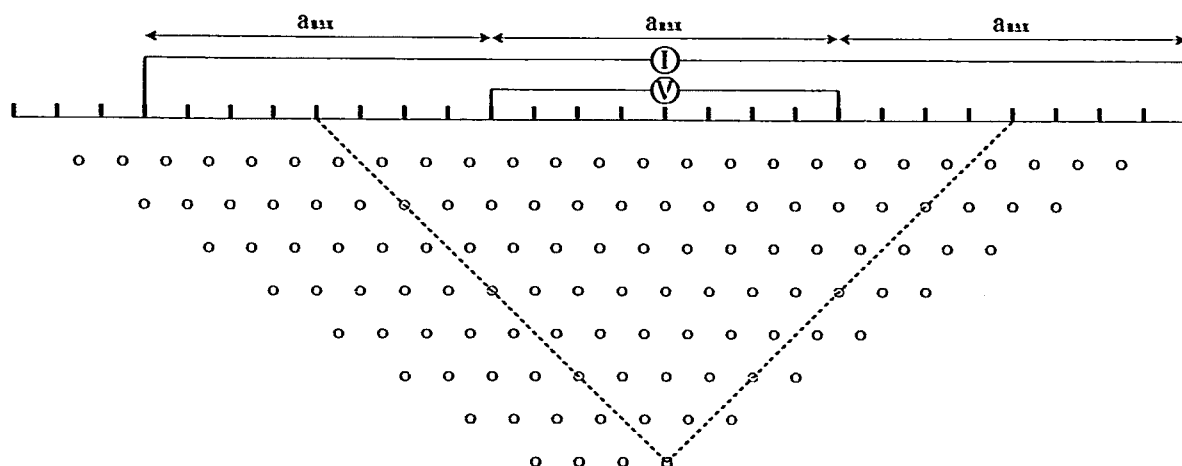


図 5.6 c

## ② ダイポール・ダイポール法

ダイポール・ダイポール法では、電流電極 C1、C2 と電位電極 P1、P2 の間隔  $a$  をダイポール長といい、電流電極と電位電極の内側の距離をダイポール長の整数倍に広げて測定を行う。このときの倍数  $n$  を隔離係数という。

ここでは、隔離係数  $n=1 \sim 5$  の場合を例に測定手順を説明する (図 5.7)。

1) 測線始点の最小ダイポール長  $a_{min}$  の電極 (1 番目と 2 番目の電極) に通電し、 $n=1$  の場合の電極組 (3 番目と 4 番目の電極間) で電位差の測定を行う



図 5.7 a

2) 電流電極組を固定したまま、 $n$  を順次増やしながらそれぞれの電位差を測定する。

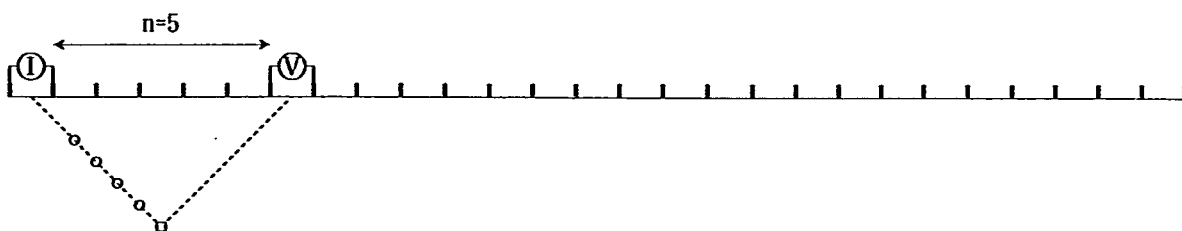


図 5.7 b

- 3)  $n = 5$  まで測定が終わったら、電流電極組を 2 番目と 3 番目の電極に並行移動して、その電流電極組に対する  $n = 1 \sim 5$  の電位差を測定する。

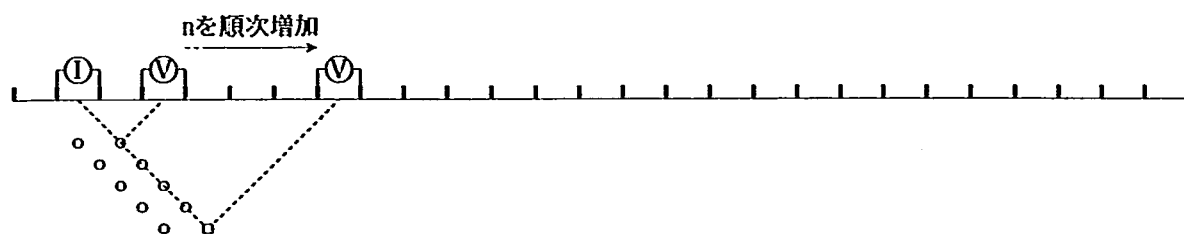


図 5.7 c

- 4) 上記 3) の作業を測線終了まで繰返す。

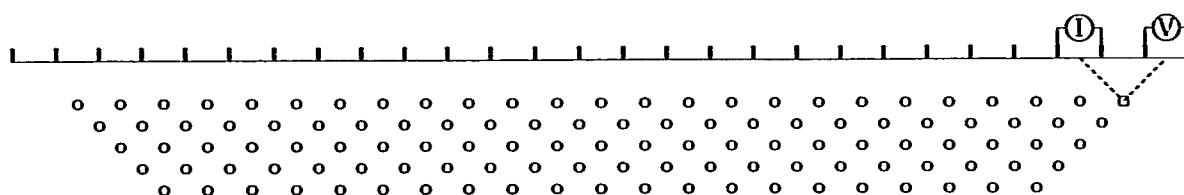


図 5.7 d

- 5) 最小ダイポール長  $a_{min}$  での測定が全て終了したら、次にダイポール長を  $2b$  とし、再び測点始点から通電し、 $n = 1$  の場合の電極組で電位差の測定を行う。

- 6) 電流電極組を固定したまま並行移動して、その電流電極組に対する  $n = 1 \sim 5$  の電位差を測定する。

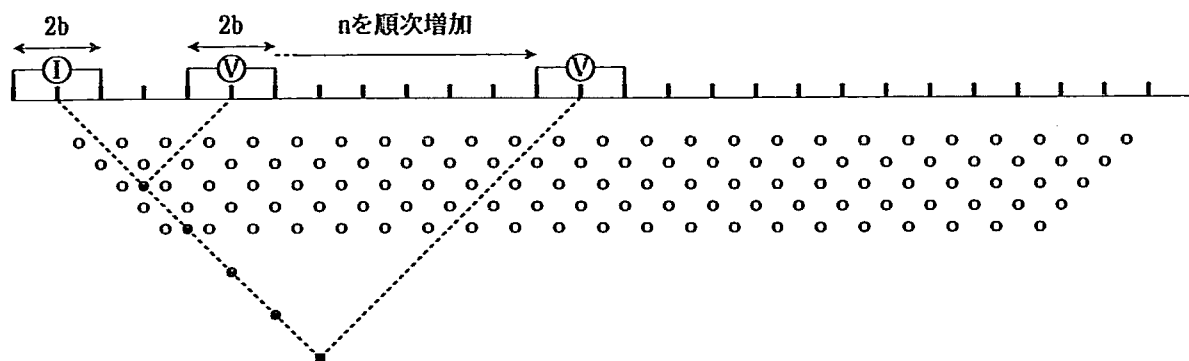


図 5.7 e

7) ダイポール長を  $2b$  から順次広げ、最大ダイポール長  $a_{max}$  までの計測を行う。

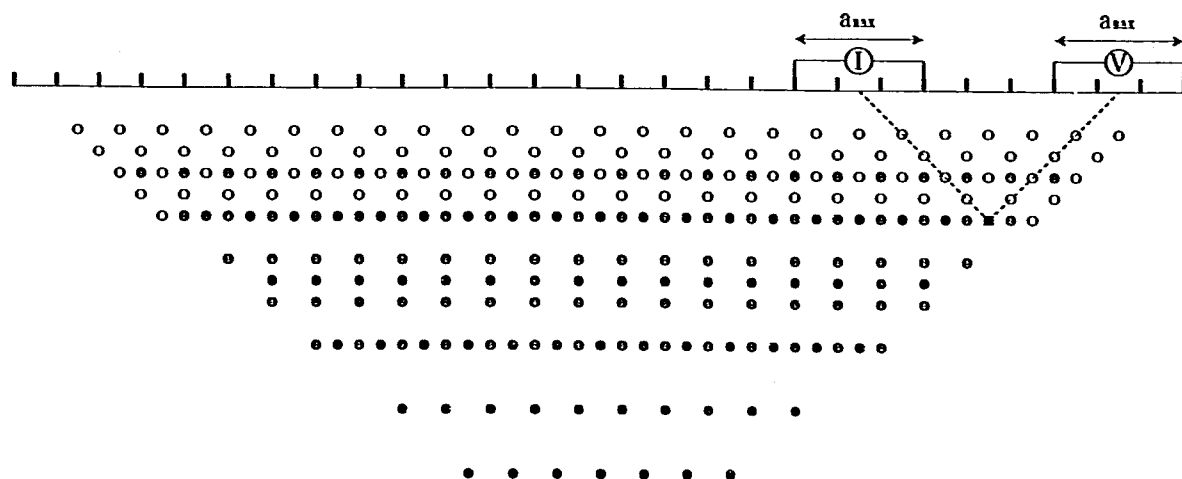


図 5.7 f

### ③ 展開の移動

縦断探査では、長大な測線を数展開に分けて測定する場合がある。この時、展開と展開の間には重複部分を設けてデータの欠落が起きないようにする（図 5.8）。ただし、重複部分のデータは一度測定するだけでもよい。

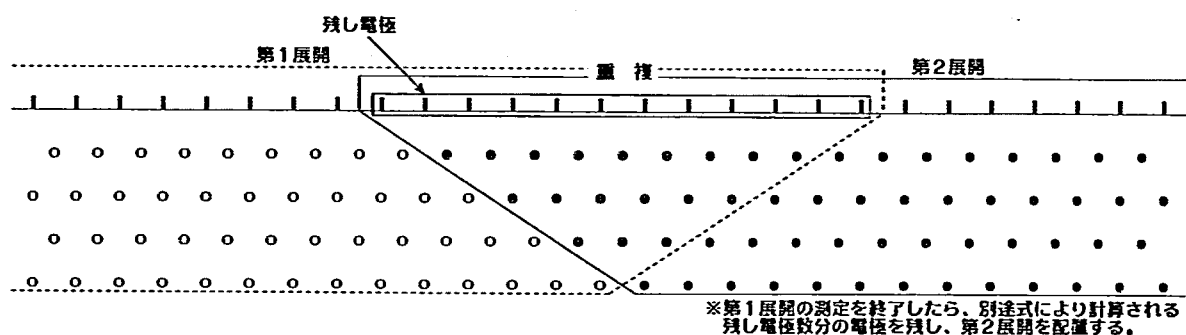


図 5.8 展開の移動

### (3) 電極・電線設置

電極は測量などによってあらかじめ定めた地点に設置する。打ち込みが可能であれば棒電極を用いるが、この時打ち込み深さに注意する。解析の上では電極は点とみなされるので、打ち込み深さは深くても 10 cm 程度にとどめておく。また、棒電極の設置が不可能な箇所には金属板の貼付け電極をベントナイトなどで設置する。電極の周辺には散水を行い、大地との通電状態を良好にする。

次に、電極に電線を接続して測定本部まで延長する。多芯ケーブルを用いてケーブル同士をコネクタ接続する場合には、コネクタ部分が濡れて短絡したりしないように注意する。

2 極法の場合は測線上の電極設置の他に遠電極の設置が必要になる。この時は測定本部から離れた作業となるので、導通や接地抵抗のチェックにはトランシーバにより連絡を取り合うと便利である。

#### (4) 接地抵抗の低減

河川堤防における測定では様々なノイズの混入が予想されるため、高品質なデータの取得には適切な接地抵抗の低減措置は欠かせない。

各電極の接地抵抗は大地比抵抗計により測定し、一定の値（目安としては5～10k $\Omega$ ）を超えた電極については接地抵抗の低減を行う。

接地抵抗を低減するには、電極周辺の乾燥箇所に塩水等を散布して地盤の通電性を改良する。また、砂礫など間隙の大きい箇所にはベントナイトなどで粘性を高めた水を散布する。

#### (5) 測定条件の設定

データ測定に際してはスタッキング回数指定などの条件を設定しなければならない。測定の条件設定機能は大地比抵抗計の機種によって異なるが、ノイズの混入が予想される現場でも、大地比抵抗計のノイズリダクション機能や測定の条件を適切に設定することで、データ精度を向上させることができる。代表的なものを例に挙げて解説する。

##### ① 電位サンプリング範囲の設定

矩形波を用いた交流電流であっても、地盤の電極近傍の分極作用などの影響により電位の波形は、きれいな矩形波にならない場合がある。測定時には電位波形の乱れている部分を避けてサンプリング範囲を設定する（図 5.9）。

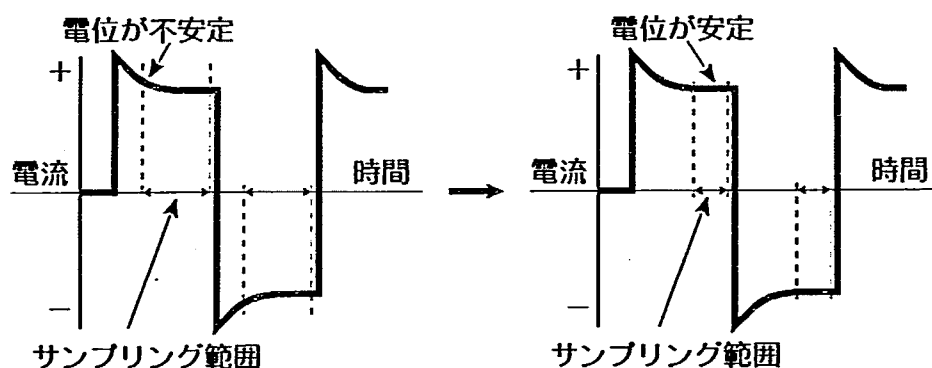


図 5.9 電位サンプリング範囲の設定

##### ② 通電周期の調整

地盤の分極が著しかったり、接地抵抗の低減が不十分であると、電位波形が安定するまでの時間が増大する。この場合は、通電周期を長くして、電位サンプリングのタイミングを遅らせる（図 5.10）。

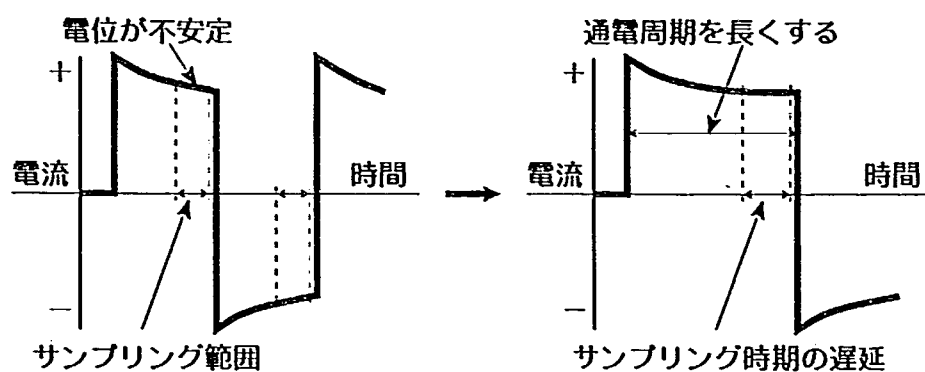


図 5.10 通電周期の調整

### ③ スタッキング回数の設定

測定データのノイズの影響が見られる場合には、スタッキングを行うことにより、ランダムノイズを除去できる。理論的には、 $n$  回のスタッキングに対して  $\sqrt{n}$  倍の精度向上が期待できるが、実用的なスタッキング回数は通常 3 ～ 4 回程度である。

これらの諸条件は、本測定の前に適当な電極組を選んでテスト計測を行い、測定値や電位波形の形状などに基づいて設定する。

## 5.2.2 測定

### (1) 測定の実施

測定作業のフローに沿って測定準備ができたら測定を開始する。測定時には作業上の安全を確保するとともに、測定値を観察して正常な計測が行われていることを確認する。

### (2) 測定中の留意点

測定作業は電極を通じて大地に電流を流すため、安全面には十分注意する。

例えば、電極に人や家畜が触れぬように見張人を配置し、堤防道路を横断して測定するときには看板などで電気探査作業中であることを周知する。この他に、現場の状況に合わせて必要な対策を施す。

### (3) 測定中のデータ品質管理

測定中には、以下の項目に沿って個々のデータの良否を判断し、精度の高い測定を行うようにデータの品質管理を行う。

#### ① 出力の調整

測定時には電流と電位差の値を大地比抵抗計で観察し、自然電位やその他のノイズ成分に対して測定電位差が小さくなりすぎないように出力を適切に調整する。

## ② 異常データの検出

測定精度の向上を図るには、現場測定の段階で異常データや測定不良によるデータの欠落を防止することが重要である。異常データを検出するには、例えば繰り返し測定（スタッキング）による測定値間の標準偏差値などに着目する。大地比抵抗計にはスタッキング時に測定値間の標準偏差を自動算出する機種があり、これを用いる場合には標準偏差値の大きさから異常データ検出できる。

異常データおよび精度の疑わしいデータについては、その症状に合わせた対策を施した後に再測定を行う。データ異常の代表的な症例とその対策法を表 5.2 に示す。

表 5.2 データ異常の代表的な症例とその対策法

| 症 例                        | 原 因                                                                                       | 対 策                                                            |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 電流値が 0mA を示す               | ・ 電流電極線が断線している<br>・ 電流端子が外れている                                                            | ・ 電流電極線の導通をチェックし、断線や端子外れを補修する                                  |
| 電位差が 0mV あるいは異常に小さな値を示す    | ・ 電位電極線が短絡している                                                                            | ・ 電位電極線の導通および絶縁をチェックする。特に、ケーブルやスイッチボックスのコネクタが濡れていないかを調べる       |
| 電極間隔によらず電位差が同じ値を示す         | ・ 電位電極線が短絡している                                                                            | ・ 電位電極線の導通および絶縁をチェックする。特に、ケーブルやスイッチボックスのコネクタが濡れていないかを調べる       |
| 電極間隔が広がるにつれ電位差が大きくなる       | ・ ケーブルやスイッチボックスの結線を間違えている                                                                 | ・ 結線の順番を確認する                                                   |
| スタック間標準偏差の値が大きい            | ・ 突発的なノイズの影響を受けている<br>・ 自然電位などのノイズ源に比べて測定電位差が小さい<br>・ 特定の電極に関連して起こる場合は、電極の接地不良あるいは端子の接触不良 | ・ 再測定を行う<br>・ 出力を上げて再測定を行う<br>・ 接地抵抗を下げる、または導通をチェックし、不良箇所を補修する |
| 同一測定深度で隣接するデータに比べて値が著しく異なる | ・ ケーブルやスイッチボックスの結線を間違えている<br>・ 突発的なノイズの影響を受けている<br>・ 特定の電極に関連して起こる場合は、電極の接地不良あるいは端子の接触不良  | ・ 結線の順番を確認する<br>・ 再測定を行う<br>・ 接地抵抗を下げる、または導通をチェックし、不良箇所を補修する   |

### 5.2.3 データの品質管理

測定終了時に取得したデータの品質を再度改めて評価する。これにより検出された異常データについては必要に応じて再測定を行う。

現場でのデータ品質管理には大地比抵抗計の能力などにより限界があるが、この時点でのデータ品質の確認作業が解析結果の良否を左右するため、可能な限り多様な方法でデータの品質管理を行えるように準備をしておくことが望ましい。

例えば、測定値をグラフ化するプログラムや市販の表計算ソフトをあらかじめ用意しておけば、品質管理を充実させて不良データを少なくでき、解析精度の向上につながる。なお、データの品質管理については6章で述べる。

### 5.3 簡易測量

横断測量では解析時に地形測量計算を行うため、簡易測量を行って電極の正確な位置および地形の変化点の座標値を記録しておく。また、縦断・横断とも測線と河川の基準点との関係位置を記録しておく。

### 5.4 確認ボーリング調査

土の比抵抗は、細粒分含有率、含水比、間隙比などの要因により変化する。そのため、高密度電気探査手法によって得られた堤防の比抵抗断面と土質特性との対応を確認する必要がある。

従って、電気探査測線上の代表地点で天端（堤防道路が存在する場合には堤外地側ののり肩付近）から基礎地盤も含め最低限1本のボーリング調査（標準貫入試験および粒度試験を含む）を必ず実施し、土質柱状図を作成する。このとき、後に作成される縦断および横断比抵抗断面に解析結果を重ねる必要があるため、正確にボーリング位置を記録しておく。

なお、調査対象としている地点での既存のボーリング資料がある場合にはその情報を活用してもよい。

### 5.5 補足調査

比抵抗断面と土質特性との対応をさらに詳しく検討する場合には、電気検層・河川水の比抵抗測定・堤防土質材料の比抵抗測定などの補足調査を適宜行う。

また、横断方向の比抵抗断面をもとに浸透流解析などで堤防の安定度評価を行う場合には、解析に必要なパラメータを設定するための調査・試験（現場透水試験や乱さない試料による土質試験など）を適宜実施する。



## 6. データ整理と解析

本章では、現場から測定データを持ち帰ってから、比抵抗分布を求めるまでの作業内容について記述する。しかし、これらの作業内容は作業に用いる機器などに大きく依存するため、具体的に記述することが困難である。そこで、本章では必要な作業項目について、汎用的な記述を主とした。既存の汎用機器を組み合わせ探査を行う際には、機器などの取扱説明書を参考に本章の記述に従って作業を進める必要がある。

### 6.1 データの整理

解析に先立ち、現場で測定された生データを、解析プログラムに合ったフォーマット（書式）に変換したり、不良データを削除するなど、データの整理を行う必要がある。データ整理作業の流れを図6.1に示す。

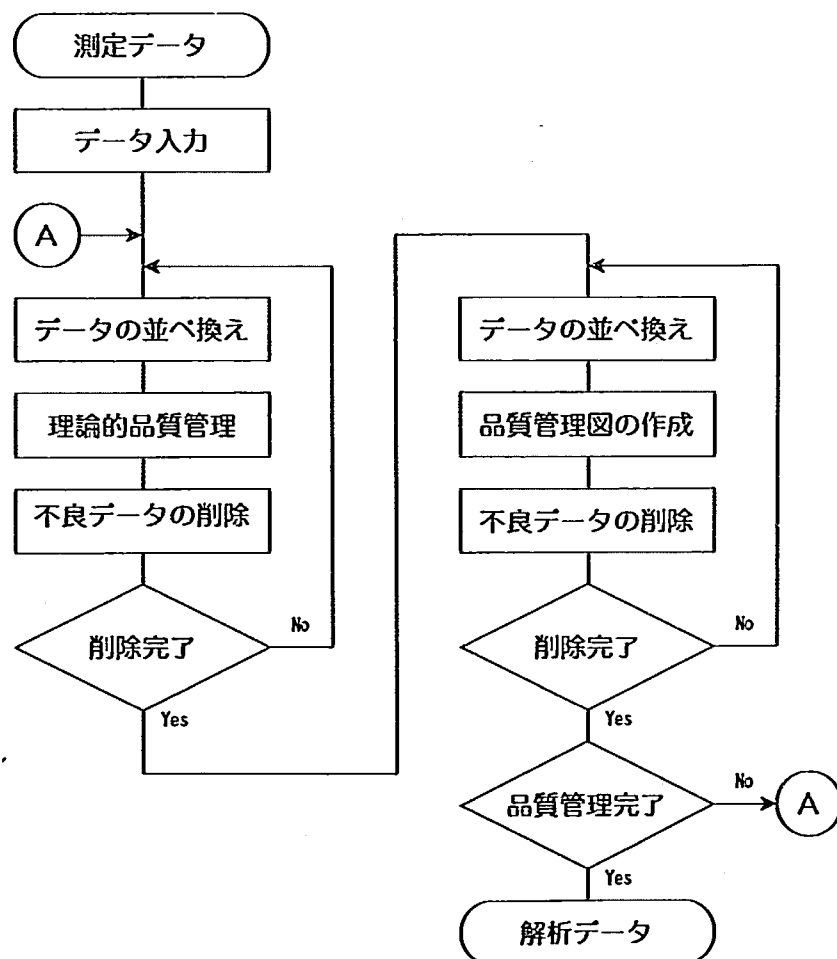


図 6.1 データ整理作業の流れ

### 6.1.1 データ入力

現場で測定された生データを持ち帰り、コンピュータに入力する。測定データをデータシートに記入した場合は、キーボードからコンピュータにデータ入力する必要があるが、通常、測定データは測定機によりフロッピーディスクなどに記録されるため、そのままコンピュータに読み込ませることができる。

### 6.1.2 データの品質管理

現場で測定された生データには、ノイズなどに起因する不良データが混じっていることがある。そのため、5章で述べたように、現場での測定時にデータの妥当性をチェックしたり、同じ電極配置で重複して測定したりして、データの信頼性を高めることが望ましい。

測定データは電極周辺の土質構造を反映して様々な値をとるが、近傍のデータと比較してひとつのデータだけが特異な値を示した場合は、ノイズなどに起因する不良データの可能性が高い。このような不良データは解析精度を低下させる原因となるので、あらかじめ削除する。

本節では、現場で測定された生データから、不良データを削除するための品質管理手法について記述する。

なお、縦断探査の際には、迅速性が要求されるため、基本的に現場でのデータの品質管理はごく簡単に実施できるもののみ行う。しかし、事前に準備をしておけば、ノート型コンピュータなどでも見掛比抵抗分布図を作成できるため、比較的高度な品質管理を行うことが可能である。

#### (1) データの並べ換え

通常、現場測定では、測線始点から終点に向かって電極を順次移動して測定することを基本としている。しかし、データの品質を向上させるなどの理由により、同じ電極配置で重複して測定したり、一部区間の再測定などを行うと、記録されるデータの順番が乱れることになる。

基本的にデータの品質管理は、近傍のデータと比較し、特異な値を示したデータを削除することで行う。そのため、不良データを検出するためには電極配置順にデータを並べ換える必要がある。具体的には、一般の表計算ソフトに生データを入力して並べ換えるとよい（→付録-3）。

#### (2) 測定データのチェック

##### a) 異常データのチェック

生データ中に異常なデータが存在する場合、これを不良データとして削除し、解析精度を高めることが望ましい。以下に不良データの検出方法について述べる。

##### ① 重複データによる検出

同じ電極配置で重複して測定されたデータは、理論的には同じ値を示すはずである。何らかの原因により測定値間に大きな差がみられる場合には、近傍のデータと比較し、適正なデータ以外を削除する。

##### ② データの相反性による検出

電流電極と電位電極の配置を逆にして測定したデータは、理論的には同じ測定値を示すはずで

ある。何らかの原因により測定値間に大きな差（例えば20%以上）がみられる場合には、近傍のデータと比較し、適正なデータ以外を削除する。

### ③ データの標準偏差による検出

重複測定（スタッキング）による測定データの精度向上方法には、2通りの方法がある。①のように重複測定したデータを測定回数分だけ記録しておき、後に手動で適正なデータ以外を削除する方法と、大地比抵抗計にスタッキング（重複測定）回数を測定パラメータとして指定しておき（→5章）、自動的に指定回数分だけ重複測定して平均化したデータを記録させる方法である。

後者の場合、平均化したデータと共にその標準偏差が記録されていることが多く、標準偏差が大きい場合は対応する測定データのばらつきが大きいことを示している。そのため、標準偏差が一定レベルを超えているデータを削除することで異常データを除くことが可能である。

### b) 品質管理図によるチェック

近傍のデータと比較してひとつのデータだけが特異な値を示した場合は、ノイズなどに起因する不良データの可能性が高い。こういった不良データを検出するためには、品質管理図を作成して視覚的に不良データを検出することが望ましい。以下に代表的な品質管理図の作成法について述べる。

#### ① 2次元表示

測定データの2次元表示による品質管理手法としては、見掛け比抵抗分布図が用いられる。これは、各測定データの見掛け比抵抗表示点に、見掛け比抵抗値に対応する色のブロックを表示し、周囲と比較して特異な色を示したデータを検出するものである（図6.2a）。通常、見掛け比抵抗分布図を作成する際は、地表形状を考慮してコンタ表示するのが一般的だが、品質管理を目的とする際は地表を水平とし、ブロック表示したほうが特異点を発見しやすい。

#### ② 1次元表示

測定データの1次元表示による品質管理手法には、以下に示す4種類の手法がある。

##### ・共通電極間隔表示（4極法）

縦軸に測定抵抗値、横軸に4電極の中心位置をとり、同じ電極間隔で得られたデータを折れ線グラフで表示し、特異点を検出する（図6.2b）。同じ電極間隔で得られたデータは同じ深度の情報を反映していると考えられるので、水平方向の連続性を検討することができる。

##### ・共通電流点表示（2極法、3極法）

ある電流電極配置で電流を流した時の測定抵抗値を、電位電極位置の順番に並べて折れ線グラフ表示し、特異点を検出する（図6.2c）。グラフの縦軸は測定抵抗値、横軸は電位電極番号である。

##### ・共通電位測定点表示（2極法）

ある電位電極配置での測定抵抗値を、電流電極位置の順番に並べて折れ線グラフ表示し、特異点を検出する（図6.2d）。グラフの縦軸は測定抵抗値、横軸は電流電極番号である。

##### ・共通中心点表示（2極法,3極法,4極法）

ある位置に電極中心が位置するデータを深度順に並べて折れ線グラフ表示し、特異点を検出する。グラフの縦軸は深度、横軸は測定抵抗値である。

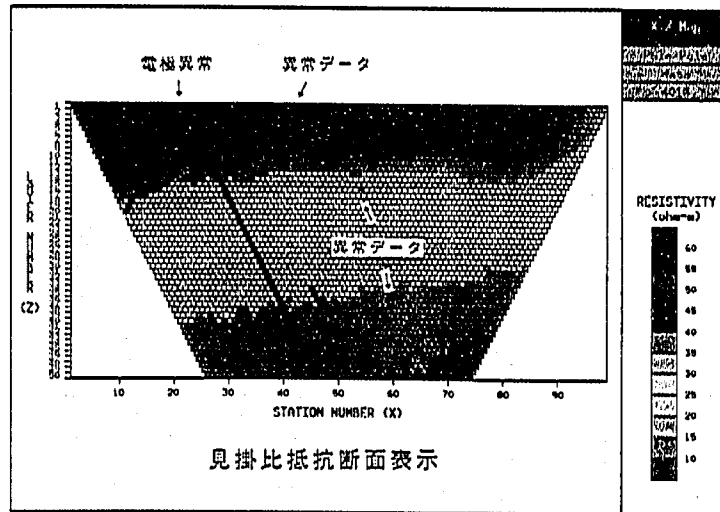


図 6.2 a

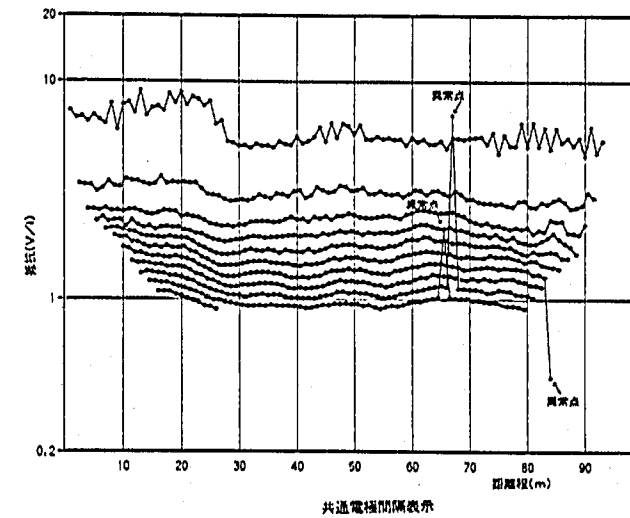


図 6.2 b

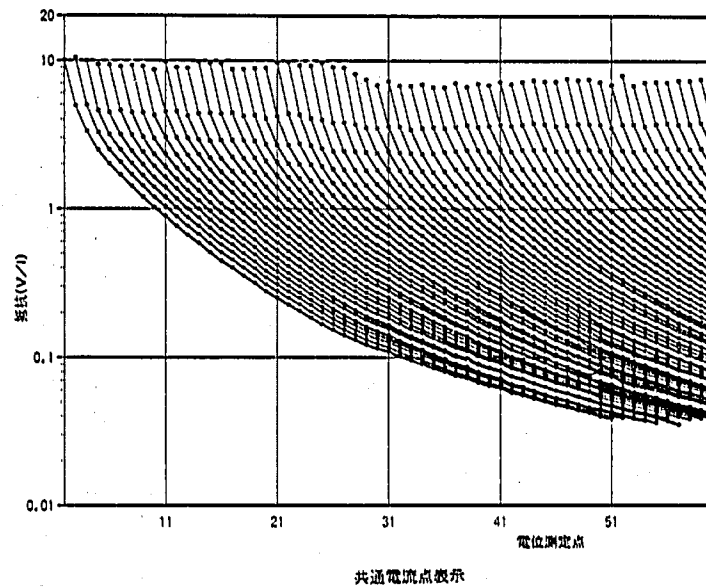


図 6.2 c

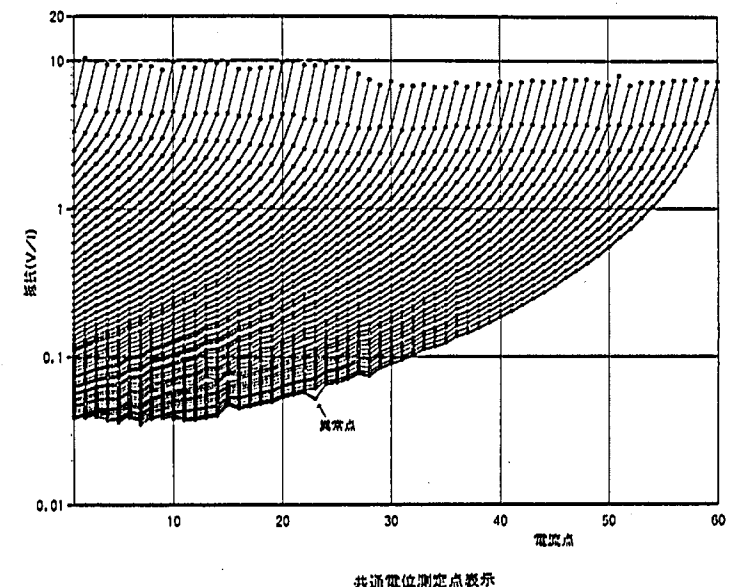


図 6.2 d

図 6.2 代表的な品質管理図

基本的には見掛比抵抗分布図（2次元表示）を作成して品質管理作業を行ったほうが、特異点を発見しやすい。また、見掛比抵抗分布図は地山の概略的な土質構造を表しているため、次節6.2で解析を実施する際の解析パラメータ（初期モデルなど）を与える際の参考資料になり有用である（この場合は地表形状を考慮したコンタ表示が適している）。

しかし、2次元表示には表示用のソフトが必要となるため、ソフトがない場合には1次元表示を積極的に利用することが望ましい。これらは一般のグラフ作成ソフトで作成可能である（→付録-3）。

これらの品質管理手法は必ずしもすべての項目を実施する必要はないが、可能なら複数の品質管理手法を組み合わせ実施し、不良データを削除することが望ましい。

## 6.2 解析

解析には、主に現場で実施する1次元解析と、主に室内で実施する2次元解析がある。

1次元解析は、主に縦断探査を行う際に用いられ、現場で迅速に土質構造を推定し、堤防の弱点部など横断探査を行う断面を決定するために実施する。現場で即座に横断探査を行う断面を決定する必要上、ノート型のコンピュータなどを使用して解析を行う必要があり、必要メモリ容量が小さく計算時間も短い1次元解析で行われる。また、現場でなんらかの問題が発生した際に即座に再測定できる長所がある。

2次元解析は、主に横断探査を行う際に用いられ、室内で詳細な土質構造を推定し、堤防の安定度評価や対策工の設計を行う際の資料とするために実施する。室内で行うため、EWS<sup>®</sup>などの高速なコンピュータが利用可能であり、地形の起伏の考慮や、オフセット補正などの各種データ補正を行い、精度の高い2次元解析を実施することができる（※EWS=Engineering Work Station=技術者用高性能パーソナルコンピュータ）。

解析作業は、1次元解析、2次元解析の違いによって電位計算法に違いがあるものの、基本的な解析フローは共通である。図6.3にフローを示す。

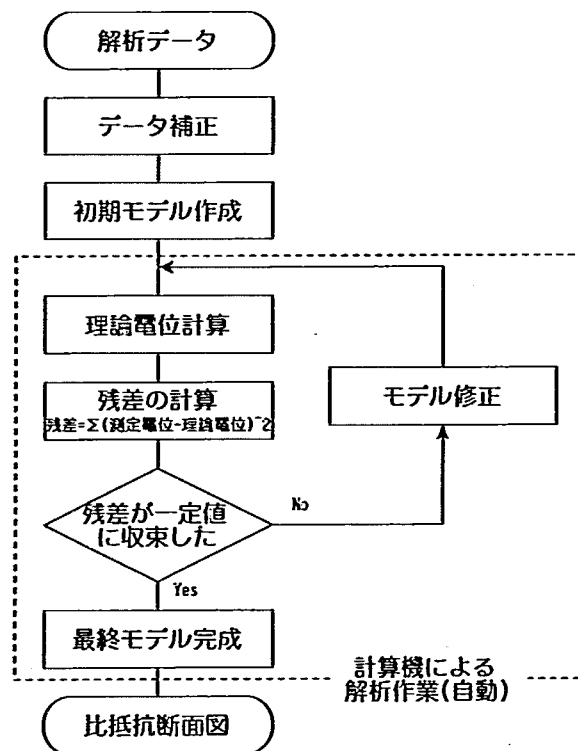


図 6.3 解析作業の流れ

### 6.2.1 データ補正

1次元および2次元解析におけるデータ補正としては、①オフセット補正、②地形補正、③遠電極補正などがある。これらは、通常、実施の必要のない場合が多いが、測定の都合で必要になることもある。

### (1) オフセット補正（1次元、2次元解析に適用）

堤防のような構造物を探索する際には、通常、問題にならないが、構造物などの存在により電極配置位置に制限を受け、やむを得ず電極を測線側方に数mずらす場合がある（図6.4a）。

解析では、電極が一直線上にあることを前提としているため、側方にずれた電極で測定されたデータにあらかじめ補正計算を適用することによって、電極配置位置のずれの影響を除去しておく必要がある。補正計算は次式による。

$$[\text{補正データ}] = [\text{補正前データ}] \times \frac{[\text{電極が測線上にある場合の理論電位}]}{[\text{実際の電極配置での理論電位}]}$$

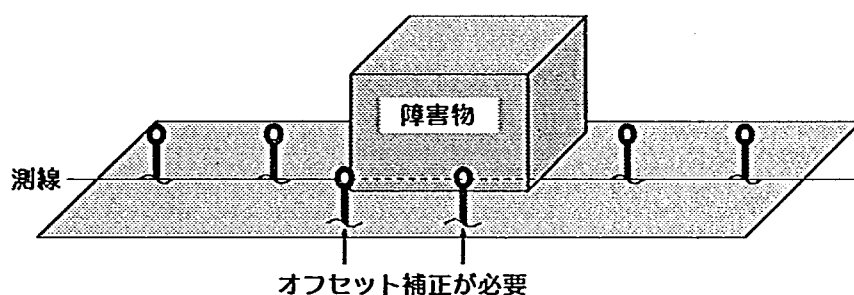


図6.4a オフセット補正の必要な電極配置

### (2) 地形補正（2次元アルファ・センタ法解析に適用）

堤防のような構造物を縦断方向に探索する際には、通常、問題にならないが、測線上に起伏が存在するため、やむを得ず電極を凹凸状に配置する場合がある（図6.4b）。

通常の2次元有限要素解析を用いる場合は、解析モデル作成の際に、測線方向の地形の起伏が考慮されるため、地形補正は必要ない。

アルファ・センタ法のような特殊な2次元解析法は、地表が平坦であることを前提としているため、該当データにあらかじめ補正計算を適用することによって、地形の起伏の影響を除去しておく必要がある。補正計算は次式による。

$$[\text{補正データ}] = [\text{補正前データ}] \times \frac{[\text{地形が水平な場合のシミュレーション電位}]}{[\text{地形を考慮したシミュレーション電位}]}$$

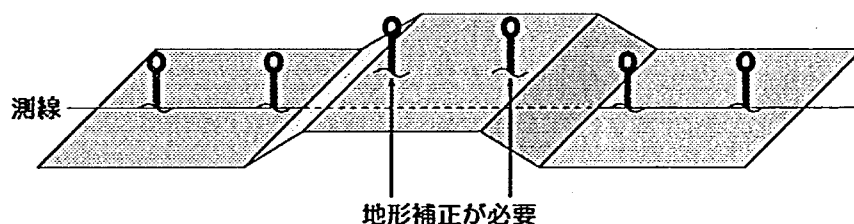


図6.4b 地形補正の必要な電極配置

### (3) 遠電極補正（1次元、2次元解析に適用）

2極法や3極法を用いて探査を行う場合、遠電極の位置は、通常、測定する最大電極間隔の10倍以上測線から離して配置することが必要であるが、構造物などの存在により電極配置位置に制限を受け、やむを得ず、遠電極を測線近傍に配置する場合がある。

遠電極を近傍に配置した影響を除去するには、遠電極を測定する最大の電極間隔の最低5倍程度は測線から離して配置し、全てのデータにあらかじめ補正計算を適用する必要がある。補正計算は次式による。

$$[\text{補正データ}] = [\text{補正前データ}] \times \frac{[\text{遠電極が無限遠にある場合の理論電位}]}{[\text{実際の遠電極配置での理論電位}]}$$

これら補正の際の理論電位は地盤が無限に均質の比抵抗値をもつと仮定して求める。場合によっては補正前にFEMによる仮解析を行い、仮解析結果の比抵抗分布をから理論電位を求め、補正の精度をより高めることも行われる。

## 6.2.2 解析方法

解析作業は、1次元解析、2次元解析の違いによって、目的が大きく異なる。以下に、主に縦断探査に用いられる1次元解析と、主に横断探査に用いられる2次元解析について記述する。

### (1) 1次元解析

1次元解析は、ある位置に電極中心が位置するデータを深度順に並べ換えたものを用いて、各地点毎に垂直解析を行い、表示段階でこれを並べて比抵抗分布を2次元表示するものである。

地表が平坦であることを前提とした解析であるため、起伏上に測線を配置する横断探査には向かないが、地表が平坦で土質構造も概ね水平に分布している場合には、比較的短時間で精度の良い解析が期待できるため、縦断探査を行う際に用いられる。

#### ① 解析法（電位計算法）

1次元解析は地盤を水平な多層構造であると仮定して各地層の比抵抗と層厚を求める解析法である。コンピュータを用いる場合、主にリニアフィルタ法を用いて解析が行われる。

リニアフィルタ法には、主に、非線形最小二乗法による逐次修正法と、ダイレクトインバージョンの2種類の計算方法がある。非線形最小二乗法による逐次修正法は、設定した初期モデルに対して予測される測定データの値を逆算し、逆算結果と測定データとの差（残差）が小さくなるように初期モデルを修正していき計算を行う手法である。理論的には残差が零（または極小）になった時のモデルが、最も測定データをよく説明する比抵抗断面（解析結果）となり、そこで計算を終了する。

一方、ダイレクトインバージョンは、表層から順次比抵抗値を求めていく方法である。この手法は計算速度は速いものの、深部になるにつれてノイズの影響が蓄積されるという欠点がある。最近ではノート型コンピュータでも十分に高速な計算が可能であり、ほとんど用いられることない。

本研究グループでは、非線形最小二乗法による逐次修正法を用いた1次元解析ソフトの開発により、速度、精度の面から高密度電気探査手法の堤防への適用性を著しく高めた。本マニュアルでは解析手法として、本解析手法を想定して記述しており、堤防へは本解析手法を適用することが望ましい。

## ② 初期モデルの作成

水平多層構造を仮定してリニアフィルタ法による逐次修正法解析を行うためには、地層の数や層厚とその比抵抗値を、あらかじめ初期モデルに解析パラメータとして与える必要がある。通常、初期モデルの比抵抗値は平均的な値を与えたり、見掛け比抵抗値を参考に与えておく。

コンピュータが解析値の残差を収束させる過程で行うモデル修正法には以下に示す2種類の方法があり、解析前に指定する必要がある。

### ・スムーズインバージョン (図 6.5 a)

スムーズインバージョンは地層の数を多数与え、各地層の比抵抗値を未知数として計算を行う解析手法である。滑らかな比抵抗分布が得られるために地層境界を人間が判読する必要があるが、初期モデルの与え方によって結果が左右されにくく、的確な比抵抗分布を算出するという長所がある。

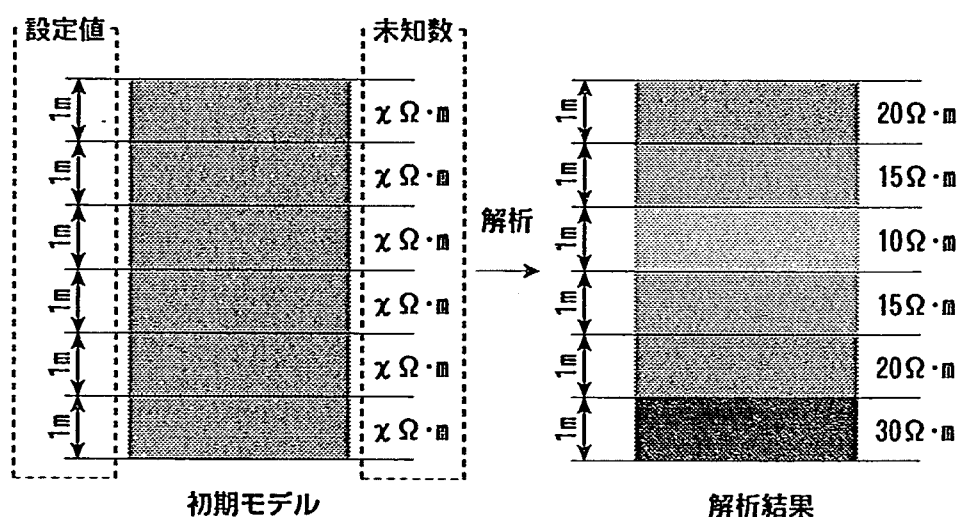


図 6.5 a スムーズインバージョンの解析イメージ

### ・層構造インバージョン (図 6.5 b)

層構造インバージョンは各地層の比抵抗値と地層の境界深度を未知数として計算を行う解析手法である。通常、地層の数は3～5層程度で行うことが多い。初期モデルの与え方によっては実際と異なる比抵抗分布を算出するために各地層の比抵抗値の設定は慎重に行う必要があるが、地層境界のはっきりとした比抵抗分布が得られるという長所がある。

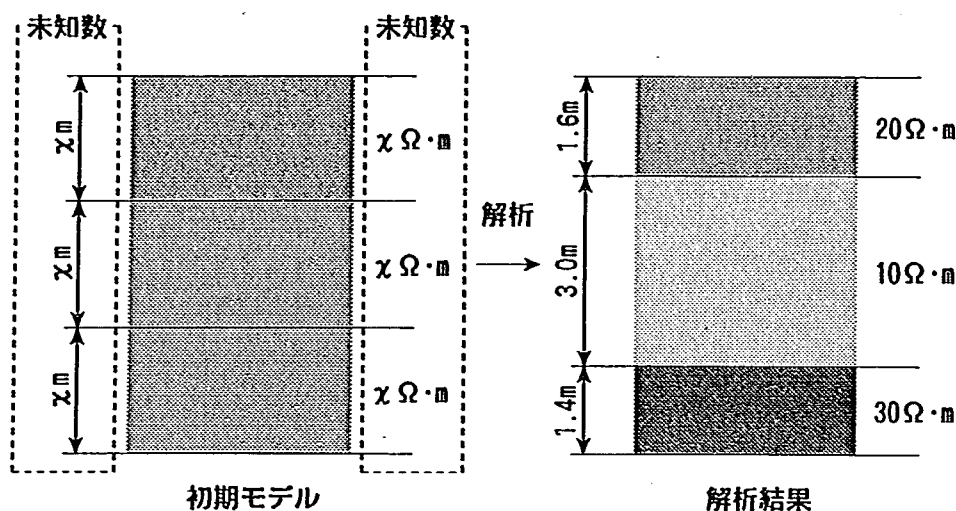


図 6.5 b 層構造インバージョンの解析イメージ

1次元解析では、1次元解析結果を並べて2次元表示する都合上、微妙なノイズの影響で地層境界が大きく移動してしまう層構造インバージョンよりも、横方向に滑らかにつながった解析結果が得られるスムーズインバージョンを採用することが望ましい。

## (2) 2次元解析

2次元解析は、2次元的な広がりをもつすべての測定データを同時に用いて解析を行い、比抵抗分布を2次元表示するものである。

主に有限要素法を用いた解析を行うため、解析には比較的長時間を要し、迅速性が要求される縦断探査には向かないが、地形の起伏を考慮した精度のよい解析ができるため、横断探査を行う際に用いられる。

### ① 解析法（計算法）

2次元解析には非線形最小二乗法による逐次修正法が用いられる。解析の流れは1次元解析とほぼ同じであるが、電位計算の方法が異なる。2次元解析で用いられる、各種電位計算法およびその特徴を表 6.1 に示す。

堤防の横断探査の際には、起伏の激しい測線を設置する都合上、有限要素法が最も適している。

### ② 初期モデルの作成

初期モデルには、均一な比抵抗分布、1次元解析結果もしくは見掛け比抵抗分布などを与えることが多いが、通常は見掛け比抵抗分布を与えておけばよい（縦断探査を2次元解析で実施する際には、1次元解析結果を初期モデルとして与えると、残差の収束が速いといわれている）。

### ③ 初期モデルの修正

初期モデルを現実の比抵抗モデル（最終結果）に近づける（残差を収束させる）ため、コンピュータは非線形最小二乗法を用いて初期モデルの修正を繰り返す。しかし、単純に非線形最小二乗法を適用して計算を進めると、残差が収束せず、発散して、最終結果が求められないことが多い。そこ

で、通常の解析ソフトでは、収束を途中で打ち切ったり、平滑化などの制約条件を与えて計算を安定化させ、発散を防止する機能が付加されている。これらの機能は解析ソフトによって異なるが、通常、各種パラメータ（イタレーション回数、平滑化方法、ダンピング係数など）を与える必要がある。しかし、パラメータの与え方によっては解析結果に差異が生じることになるため、留意しておく必要がある。

表 6.1 2次元電位計算法の種類と特徴

| 解 析 法               | 特 徴                                                                                                                                                                                             |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 有限要素法               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・複雑な地形形状に対応可能</li> <li>・計算に比較的長時間を要す</li> <li>・コンピュータに必要とするメモリ容量が大</li> <li>・過去の調査実績が比較的豊富</li> <li>・市販ソフト、研究機関から配布されているソフトなど比較的多くのソフトが存在している</li> </ul> |
| 有限差分法               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・計算時間は有限要素法に比べ短時間</li> <li>・起伏のある地形に対しては有限要素法のような柔軟な対応が不可能</li> </ul>                                                                                    |
| $\rho a - \rho u$ 法 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・探査断面を抵抗回路網でモデル化して計算</li> <li>・有限差分法の一つ</li> <li>・有限要素法に比較して汎用性の面で劣る</li> </ul>                                                                          |
| アルファセンタ法            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・計算時間は短時間で、パソコン程度で解析可能</li> <li>・過去の調査実績が比較的豊富</li> <li>・起伏のある地形に対しては地形補正が必要</li> <li>・市販ソフトでは4極法に未対応</li> </ul>                                         |

### 6.3 解析結果

本節では、比抵抗断面図を解析後、結果の妥当性の確認方法と、判読を行うための図面出力方法について述べる。図 6.6 に解析結果出力作業の流れを示す。

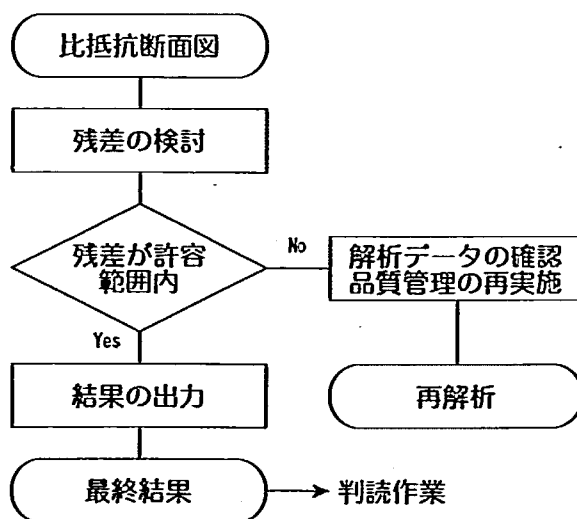


図 6.6 解析結果出力作業の流れ

### 6.3.1 残差の検討

解析の結果得られた比抵抗値と、測定データとの差を残差と呼び、残差は結果の信頼性を表すひとつの指標である。本節では、残差を審査することで、適正な解析が行われたかどうかを検討する手法について記述する。以下に示す検討項目の実施によって明らかな問題が発見された場合、必要に応じてデータの削除（一点および区間）や解析パラメータの変更を行って再度解析を実施することが望ましい。また、検討によって改善した項目は解析結果に併記しておき、判読の際の参考資料にするとよい。

#### (1) 最終残差の検討

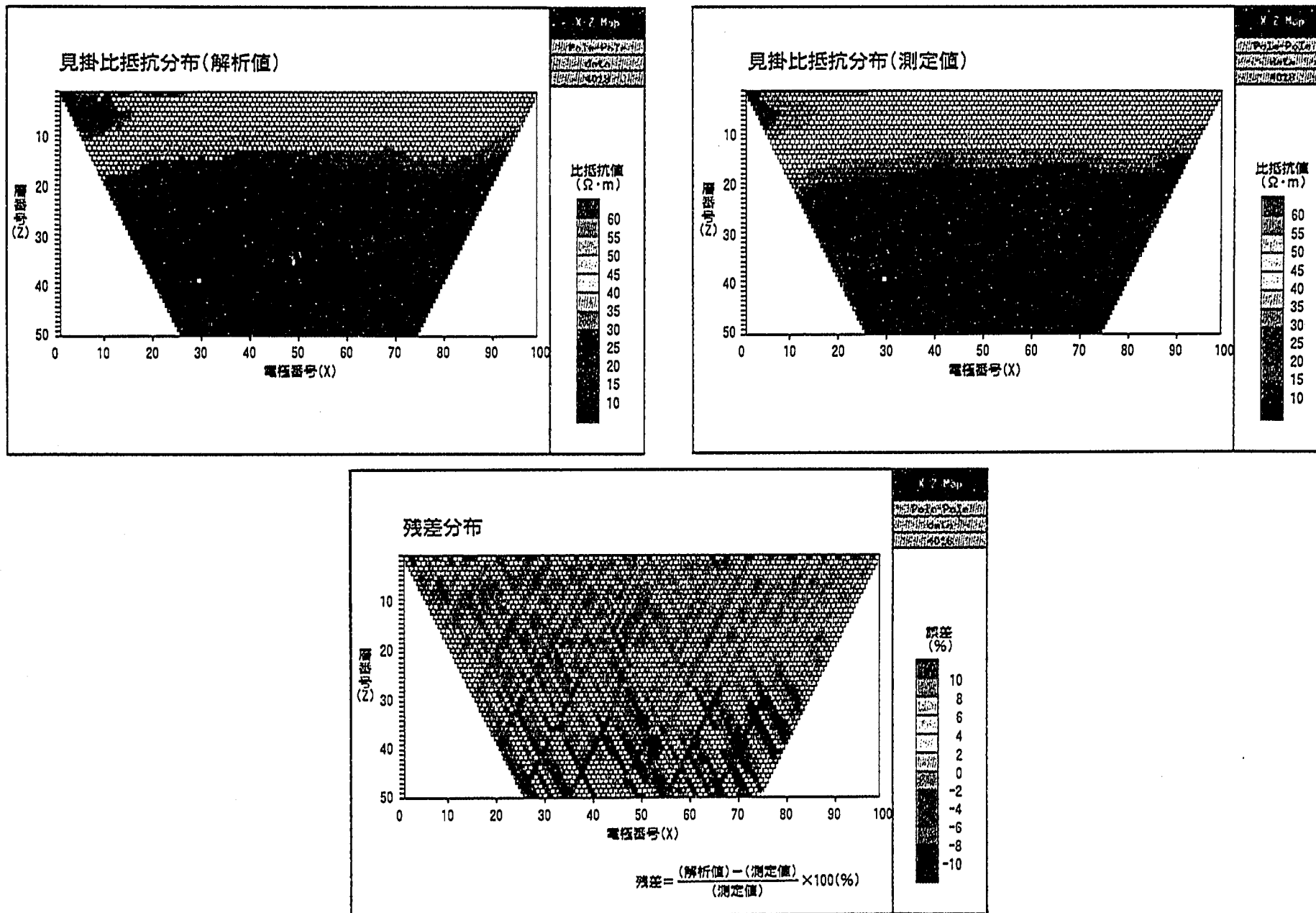
解析の結果得られた比抵抗値と、測定データとの差を各点について求め、全ての差を2乗平均したものを残差と呼ぶ。コンピュータは残差を収束させる方向に、初期モデルの修正を繰り返して解析を進めるが、最終的に残差が一定値以下にならなくなり、解析が終了する。最終的な残差が小さいほど、推定した比抵抗分布と測定データとの整合性がよく、結果の信頼性が高いといえる。測定データに大きなノイズを含んでいた場合は、大きな残差が残ることが多いが、実際には残差が数%以内であれば、十分な精度の解析が行われたことを示している。

4極法の場合は測定の原理上、測定電位差が小さく測定データ中にノイズ成分の占める割合が高くなりがちであるため、2極法に比較して残差が大きく残る傾向がある。そのため、ノイズを多く含んだ測定データを解析した場合、10%程度の残差が残ることもある。しかし、残差が20%以上で収束しない場合は、測定データの順番や解析パラメータを間違えている可能性が高いため、解析データを再度確認する。

#### (2) 残差分布の検討

解析の結果得られた比抵抗値と、測定データとの差を各点について求め、その大きさを分布図として出力した残差分布図（図6.7）を作成することで、大きな残差を示したデータの分布が明らかになる場合がある。

特定の電極を用いて測定されたデータのみ大きな残差を示している場合や、特定の領域のみ大きな残差を示している場合は、電極の異常や、特定のノイズ源に影響を受けた可能性が高い。このような測定データを含んだまま解析を行うと、全体の結果に悪影響を及ぼすことがあるため、該当部のデータを削除して再度解析を行うことが望ましい。



### 図 6.7 残差分布図による検討

### 6.3.2 解析結果の出力

最終的な解析結果はカラーで印刷出力する。本節では各種表現手法について記述したが、判読時に必要な情報を落とすことなく、判読がしやすいように出力することが基本である。実際の作業では、数パターンの表現手法で出力を行っておき、判読に備えることが望ましい。

#### (1) 表示領域

表示領域は各データの見掛け抵抗表示点の分布範囲とする。なお、各データの見掛け抵抗表示点の位置は種々の電極パターン毎に図 6.8 のように定められており、これに従って表示領域を設定する。高密度電気探査では様々な電極配置で測定するため、全てのデータを合わせると図 6.9 のように台形を逆にした形状の表示領域となることが多い。

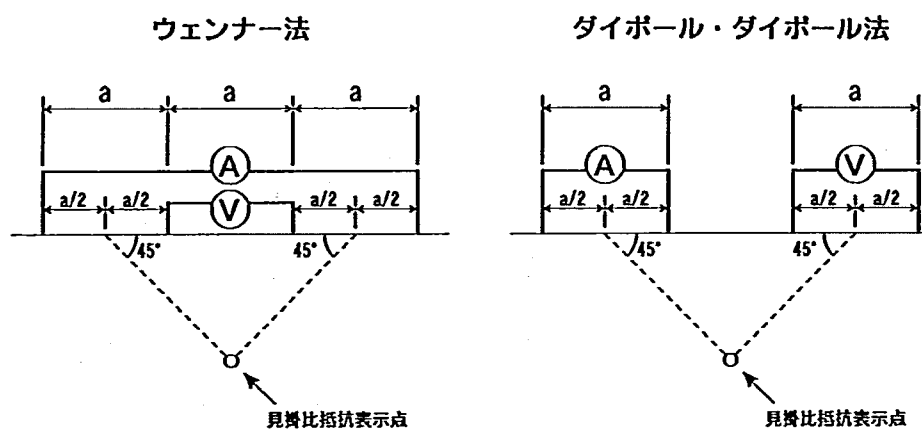


図 6.8 見掛け抵抗の表示点位置

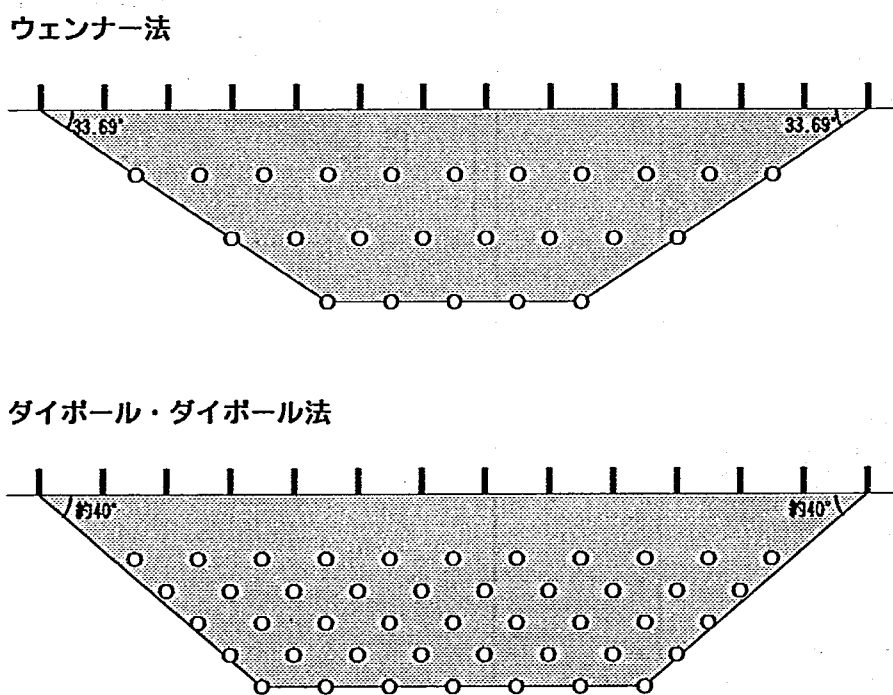


図 6.9 解析結果の表示領域

## (2) 表示方法の選択

表示方法には、主に以下の3とおりがある。

### ① ブロック表示 (図 6.10 a)

解析点毎に比抵抗値に対応した色の四角形を配置する方法である。各解析点の位置と値が把握できるため、各解析値を分析するには有用だが、表示がモザイク状であるため地質境界がはっきりせず、判読作業には向かない。

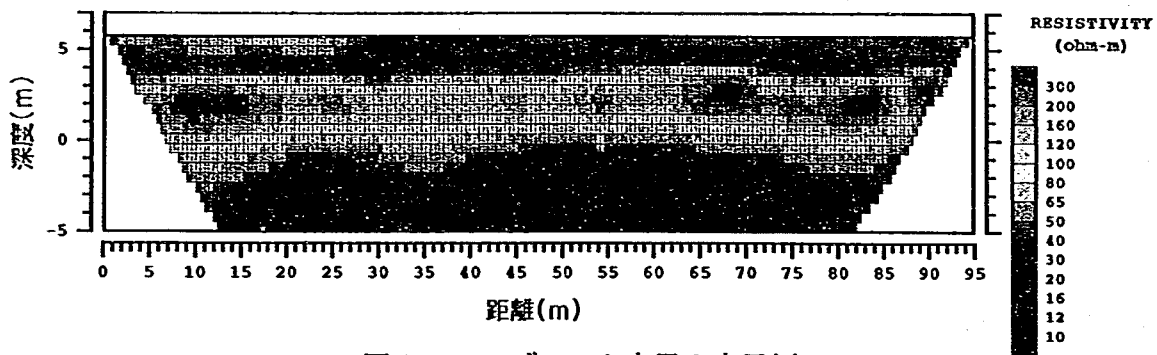


図 6.10 a ブロック表示の表示例

### ② コンタ表示 (図 6.10 b)

解析点間をスムーズな線で補間しその間を比抵抗値に対応した色で塗りつぶす方法である。補間線の引き方によっては失われる情報があるため注意が必要だが、地層境界の連続性を把握しやすく、判読作業に向く。

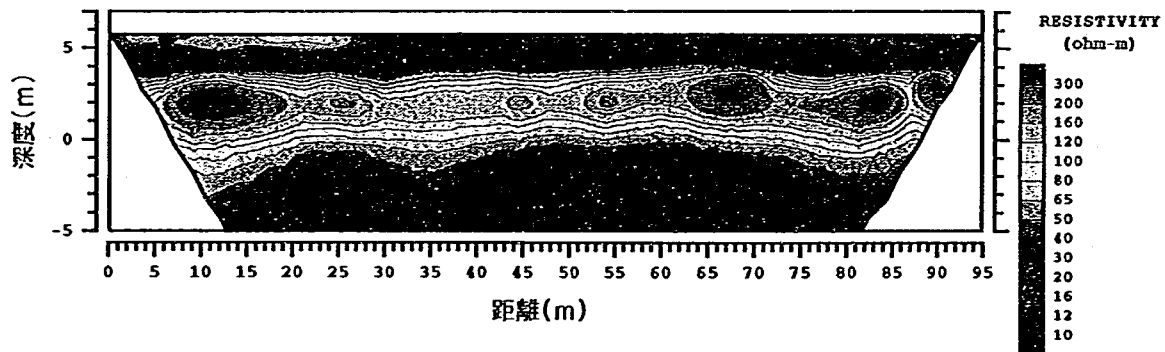


図 6.10 b コンタ表示の表示例

### ③ グラデーション表示 (図 6.10 c)

コンタ表示の一種であるが、補間線を引かず、滑らかに色をつないで表示する方法である。コンタ表示では補間線を地層形状そのものと誤解してしまう場合があり、その際にはグラデーション表示が参考になる。

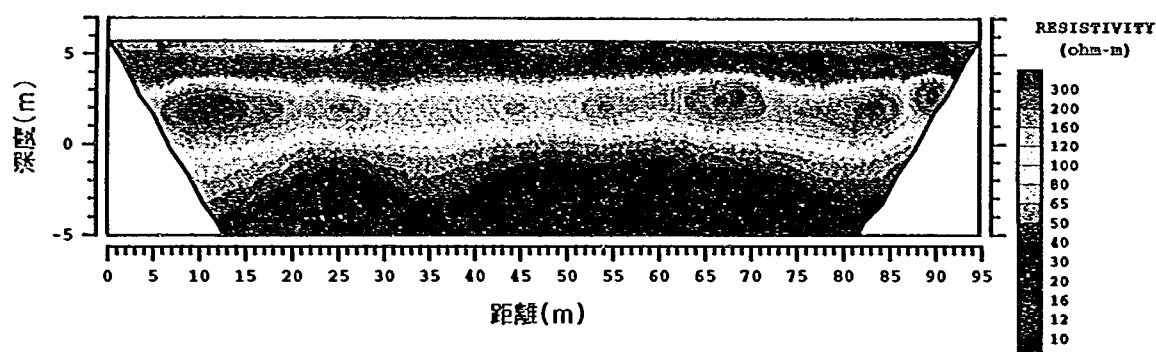


図 6.10 c グラデーション表示の表示例

一般的にはコンタ表示のほうが、視覚的に理解しやすく、通常はコンタ表示を最終成果とすればよい。

### (3) しきい値の選択

比抵抗分布を色で表現する際には、連続する比抵抗値を数グループに分割して色を割り当てる必要があるが、土質判読がしやすいように分割を行うことが非常に重要である。

通常、任意の値を持つ数値群を分割する際には、ある一定の数値を境に分割を行うが、その境の数値のことをしきい値（閾値）と呼ぶ。

しきい値の与えかたとしては、等差分割法、等比分割法などがあるが、与えかたによっては情報が欠落してしまう場合もある。そのため、しきい値の与えかたが異なる数パターンで図を出力しておき、土質判読をしたのち、最も土質構成を表現している図を最終成果とすればよい。以下に、代表的な分割法を示す。

#### ① 等差分割法（図 6.11 a）

比抵抗値の最大値と最小値の間を均等分割するようにしきい値を与える方法である。最大値と最小値の差が大きいと、一般的に砂と粘土の境界とされる  $100\Omega\cdot m$  付近の分割数が少なくなり、情報が失われがちになるため、注意が必要である。

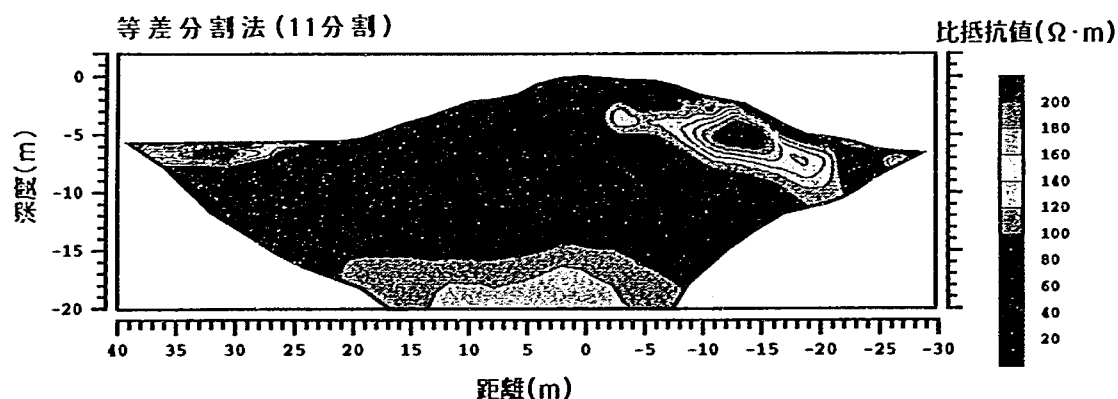


図 6.11 a 等差分割法（11 分割）

## ② 等比分割法 (図 6.11 b)

比抵抗値の最大値と最小値の間を等比分割するようにしきい値を与える方法である。厳密に等比分割すると、しきい値が区切りのよい数値にならないため、見づらくなる。

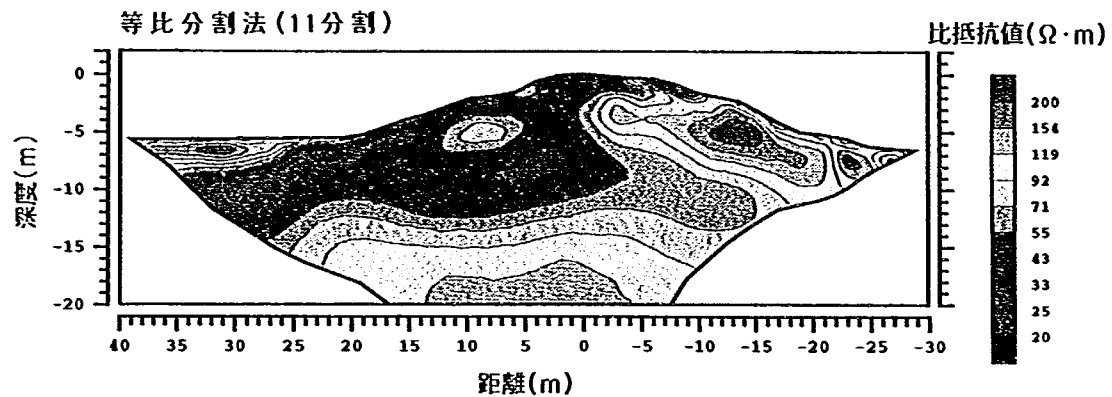


図 6.11 b 等比分割法 (11 分割)

## ③ 等差—等比混合分割法 (図 6.11 c)

等差分割と等比分割との長所をとった分割法である。対数 (log) 目盛のように、例えば  $0 \sim 100 \Omega \cdot m$  までを  $10 \Omega \cdot m$  の等差分割、 $100 \sim 1000 \Omega \cdot m$  までを  $100 \Omega \cdot m$  の等差分割といった具合に、大域的には等比分割に、局所的には等差分割にしきい値を与える方法である。通常は粘土と砂質土の境界である  $100 \Omega \cdot m$  付近の比抵抗値の変化が重要であるため、本手法を用いておけば大きな問題はない。

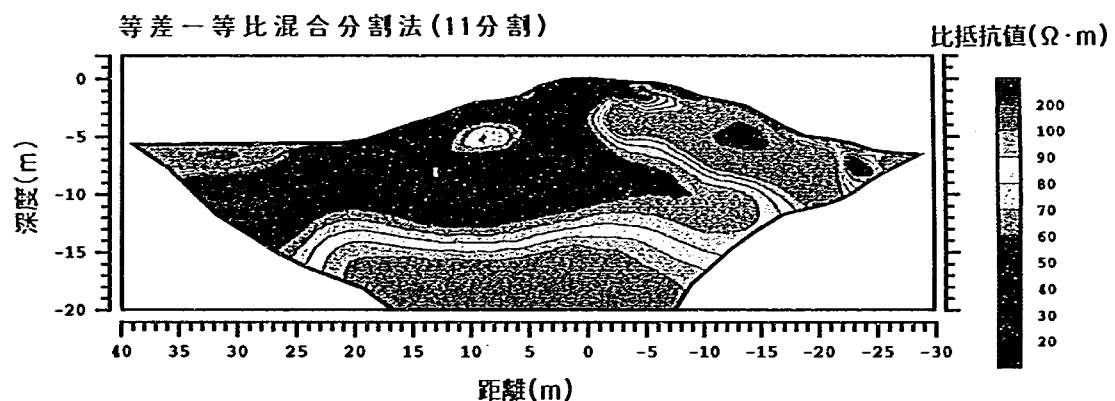


図 6.11 c 等差—等比分割法 (11 分割)

## ④ その他の分割法 (図 6.11 d)

使用する色の頻度が一樣になるようなしきい値設定や、任意のしきい値設定を行い、調査領域の土質区分に対応させることもある。これらは必要に応じて実施すればよい。

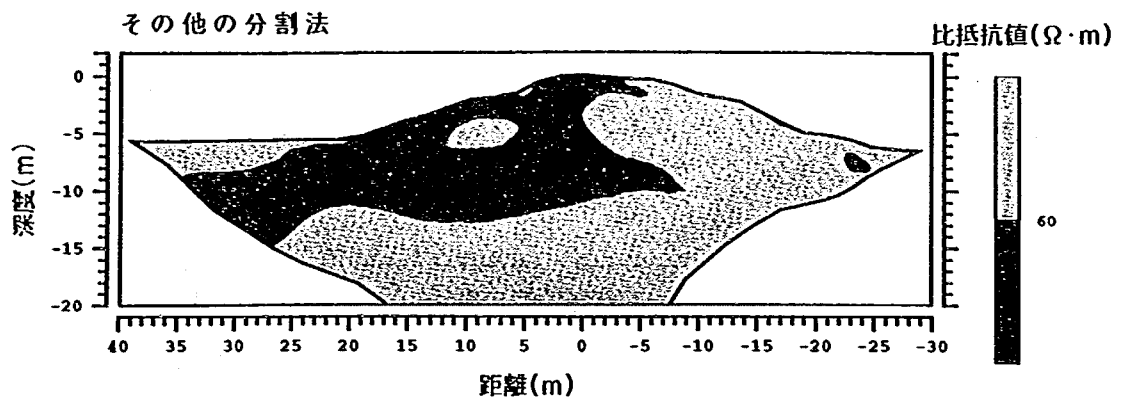


図 6.11 d 土質区分に対応させた分割法

#### (4) 色の選択

通常のカラーコンタ表示では比抵抗値の高低を、レインボーカラー(白～赤～黄～緑～水～青～黒)で表現する。配色は調査対象により異なるが、本マニュアルでは、礫層や砂層に対応する高比抵抗部を暖色(黄～赤側)、粘性土や地下水の分布に対応する低比抵抗部を寒色(水～青側)で表示することを推奨している。

これは堤防において危険部を示すことが多い礫層や砂層を、刺激色で表示する意向であるが、現存する調査結果資料がすべての同じ表現方法で記されているとは限らないので、既存の調査結果資料の判読を行う際には注意する必要がある。

## 7. 堤防内部構造の判定

堤防を対象とした高密度電気探査手法の目的は「堤防の安定度を評価するための重要資料の作成」であり、できるだけ正確な堤防断面の土質構造図を作成することである。

高密度電気探査の実施により得られた比抵抗分布図は、堤防断面の比抵抗値の分布を示しているものであり、堤防断面の土質構造を示しているわけではない。そのため、一連の計画、測定、解析作業を精度よく実施しても、比抵抗分布図から土質構造図を作成する（判読）作業を誤れば、全く現実と異なる堤防断面の土質構造図を作成することになる。ここで作成された堤防断面の土質構造図は、起こりうる災害形態の予測や浸透流解析による定量的評価など、堤防の最終的な安定度評価の実施の際に用いられるため、判読作業の重要性は極めて高い。

本章では、計画、測定、解析の作業により得られた、最終比抵抗分布図をもとにして、できるだけ正確な堤防断面の土質構造図を作成するための手法について記述する。作業のフローを図7.1に示す。

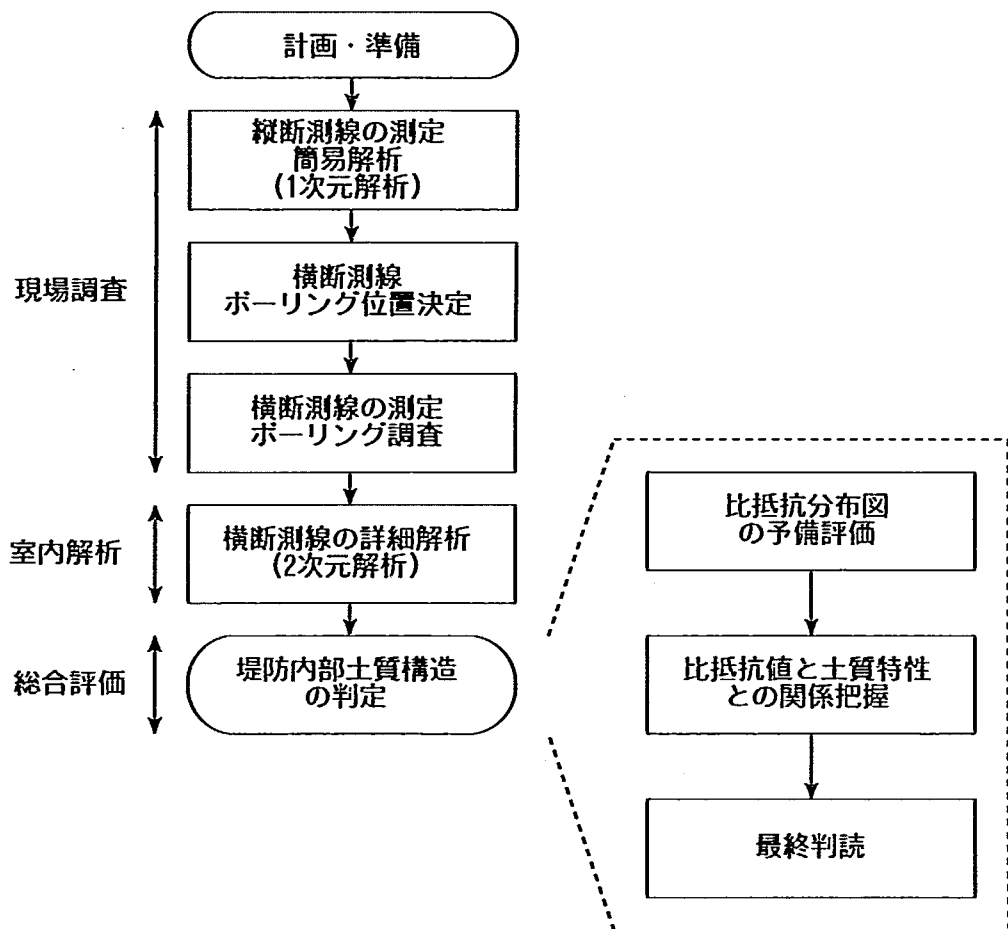


図7.1 堤防内部構造診断（総合評価）のフロー図

## 7.1 結果判読の際の着目点

高密度電気探査の実施により得られた比抵抗分布図は、堤防断面の比抵抗値の分布を示しているものである。比抵抗値は土質特性と密接な関係にあるが、粘土、砂質土、礫質土などの土質分類のみに依存して比抵抗値が決定されるわけではないので、比抵抗分布は堤防断面の土質構造と必ずしも一致しない。そのため、比抵抗分布図から堤防断面の土質構造を推定（判定）する際には、比抵抗値と土質特性との関係を明らかにしておく必要がある。本マニュアルで最低1本の確認ボーリングの実施を推奨しているのは、比抵抗分布図とボーリング柱状図を重ね合わせることで、比抵抗値と土質特性との関係を明らかにするためである。本節では、比抵抗値の影響要因や土質材料が示す比抵抗値の目安などについて記述する。

### 7.1.1 比抵抗値からの土質特性の推定

土質材料の比抵抗値は様々な要因に影響を受けるが、粘土であれば比抵抗値が  $100\Omega\cdot\text{m}$  以上を示すことはない、というような目安値も存在する（図7.2、図7.3）。以下に目安値を用いた、比抵抗値からの土質特性の推定方法について示す。

#### ① 砂質土、礫質土と考えられる領域

比抵抗値が  $100\Omega\cdot\text{m}$  以上を示した領域は、砂質土又は礫質土と考えられる。砂質土と礫質土の分別は非常に難しいので、比抵抗分布図とボーリング柱状図の重ね合わせ図を参考に、上述した土質材料における比抵抗値の影響要因を考慮のうえ判断する。

| 土質分類         | 含水状況     | 比抵抗 ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) |     |      |
|--------------|----------|-------------------------------|-----|------|
|              |          | 10                            | 100 | 1000 |
| 粘性土<br>(シルト) | 飽和度が低い場合 |                               |     |      |
|              | 飽和度が高い場合 |                               |     |      |
| 砂質土          | 飽和度が低い場合 |                               |     |      |
|              | 飽和度が高い場合 |                               |     |      |
| 礫質土          | 飽和度が低い場合 |                               |     |      |
|              | 飽和度が高い場合 |                               |     |      |

図 7.2 飽和度に着目した土質分類と比抵抗値の関係

| 土質分類         | 比抵抗 ( $\Omega\cdot\text{m}$ )   |
|--------------|---------------------------------|
| 粘性土<br>(シルト) | $10\sim 70\Omega\cdot\text{m}$  |
| 砂質土          | $50\sim 150\Omega\cdot\text{m}$ |
| 礫質土          | $80\sim 200\Omega\cdot\text{m}$ |

図 7.3 土質分類と比抵抗値の関係（従来より提案されている関係）

## ② 粘性土（シルト、火山灰質粘性土を含む）と考えられる領域

比抵抗値が $20\Omega\cdot m$ 以下を示した領域は、粘性土と考えられる。また、堤体部で $70\Omega\cdot m$ 以下を示した場合も、粘性土と考えられる。これは、通常水位がみられない堤体部に、含水比の著しく高い砂質土や礫質土が存在することは、あまりないと考えるためである。

## ③ その他の領域

大きな問題となるのが、堤防地盤などで水位の位置がはっきりしない場合である。水位以下では砂質土や礫質土も $20\sim 70\Omega\cdot m$ の値をとることがあり、粘土か否かの判断が難しい。そのような場合には、比抵抗分布図とボーリング柱状図（水位情報を含む）の重ね合わせ図を参考に、上述した土質材料における比抵抗値の影響要因を考慮のうえ判断する。

### 7.1.2 土質材料における比抵抗値の影響要因

比抵抗分布図の判定にあたっては以下に示すような、土質特性における比抵抗値の影響要因を十分に理解しておき、誤判定のないように留意しなければならない。図7.4に土質特性と飽和度の違いに起因する、比抵抗値の変化傾向について示す。

#### ・細粒分含有率

細粒分は電氣的に活性であることから通電性が高く、含有率が高いほど比抵抗値は小さくなる。これは、砂や礫に比較して、粘土の比抵抗値が小さいことのひとつの要因である。

#### ・含水比、飽和度

純水は電気を通さないが、地下水や河川水には鉱物質が多く溶け込んでおり、非常に通電性が高い。比抵抗値は水質にもよるが、 $10\sim 50\Omega\cdot m$ 程度の値を示す。そのため、砂質土や礫質土では同じ土質材料でも含水比が高くなるにつれ、比抵抗値は小さくなる。

#### ・間隙比、間隙率

砂質土や礫質土の場合、比抵抗値は間隙比および間隙の充填物の影響を受ける。間隙の充填物のほとんどが空気である場合（飽和度が低い場合）、間隙比が高いほど、比抵抗値が大きくなる傾向がある。一方、間隙の充填物のほとんどが水である場合（飽和度の高い場合）、間隙比が高いほど、比抵抗値が小さくなる傾向がある。

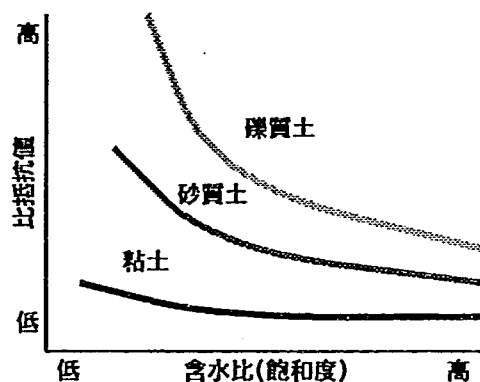


図7.4 土質特性と飽和度の違いに起因する、比抵抗値の変化傾向

### 7.1.3 その他の着目点

その他、調査阻害要因などの判別も含めた、土質構造推定（判定）の際の留意点を以下にまとめて示す。

#### ① 堤体にジオテキスタイルなどの測定を阻害する物体が存在する場合

ジオテキスタイルで堤体が補強されている場合には、敷設部が高比抵抗領域として検出されることがある。その場合は、測定を阻害する物体の配置状態を確認しておき、誤判定のないようにする。

#### ② 低比抵抗領域の判断

低比抵抗領域は一般的には粘性土だと考えられるが、砂質土などにおいても飽和度が高い場合や細粒分含有率が高い場合には低比抵抗を示すため、含水状態、水位の位置などを考慮のうえ判定する必要がある。本マニュアルでは最低限1本のボーリング調査を実施し、比抵抗値と土質特性の比較を行うことを必須項目としているため、既存資料や後述の重ね合わせ図を参考にして判断を行う必要がある。

#### ③ 高比抵抗領域の判断

高比抵抗領域は、砂質土または礫質土だと考えられる。一般的には、礫質土の方が砂質土の比抵抗よりも大きい、はっきりとした境界は存在せず、砂質土でも含水比が著しく低い場合には  $1000\Omega \cdot m$  以上を示すことがあるため、既存資料や後述の重ね合わせ図を参考にして判断を行う必要がある。

#### ④ サウンディング結果を考慮する場合

例えば、スウェーデン式貫入試験結果で砂混じりシルトと判断された箇所が、高比抵抗を示した場合、緩い砂である可能性がある。このように、サウンディング結果を判別に用いる場合、貫入抵抗のみから土質の判別を行うのではなく、比抵抗値も勘案して判別を行うと、より詳細な情報を得られることもある。

#### ⑤ 基礎地盤の評価

基礎地盤は、地下水位以下で飽和しているか、高含水比であることが多いことから、比抵抗分布図だけでは土質判定が難しいため、既存資料や後述の重ね合わせ図を参考にして判断を行う必要がある。

## 7.2 判定の手順と判定例

本節では、具体的な結果判定の具体的手順と、判定手順に沿った判定例を示す。判定例は、過去何度か嵩上げが行われていると思われる、堤体高さ6mの典型的な河川堤防を対象とした。

### 7.2.1 比抵抗分布図の予備評価

予備評価の前に、判定の対象として有効な領域を確定する必要がある。有効判定領域は計画の段階で探査範囲とした領域であり、図中に明示しておくといよい。

予備評価は、比抵抗分布図の概略評価という位置付けで、大まかな比抵抗分布を見渡し、その特徴から概略的に土質分布を把握する作業である。

堤防の土質材料は  $10 \sim 1000 \Omega \cdot m$  の比抵抗値を示すものがほとんどである。また、比抵抗分布図は堤防の土質構造を何らかの形で反映していることが多い。そのため、以下のような傾向が比抵抗分布図に現れている場合は、予備評価としてのコメントを比抵抗分布図に記入しておく。

縦断解析および横断解析で得られた比抵抗分布図を参照し、以下の項目について予備評価作業を行う。

- ・比抵抗値が  $1000 \Omega \cdot m$  以上の値を示す（ある程度まとまった）領域がある  
飽和度が非常に小さく間隙比の大きな砂質土や礫質土が存在する
- ・局所的に高比抵抗を示す領域がある  
ジオテキスタイル、高水敷コンクリートなど高比抵抗構造物が敷設されている
- ・著しい線状構造が現れるなどの現象がみられる

測定データにノイズなどが乗っていた、特定の電極が不良であった

#### 判定例

- ・比抵抗値を確認すると、概ね  $20 \sim 200 \Omega$  程度に納まっており、堤防の土質材料として一般的な値を示していると考えられる。
- ・特に著しい線状構造が現れるなどの現象はみられず、ノイズの影響はそれほど受けていないと考えられる。
- ・河川敷きの表層部に  $200 \Omega \cdot m$  以上の高比抵抗領域（赤）がみられるが、現地踏査により該当部付近に高水敷コンクリートの存在を確認しており、その影響だと推定される。
- ・おおまかな比抵抗分布状況から、堤体内は堤外地側と堤内地側とでかなり異なる土質が分布していると考えられる。主に堤外地側には低比抵抗領域が分布することから粘性土の存在が推定され、堤内地側には高比抵抗領域が分布することから砂質土の存在が推定される。基礎地盤は水位の存在が不明のため詳細は解らないが、比較的高比抵抗領域が分布することから砂質土である可能性が示唆される（図7.5）。

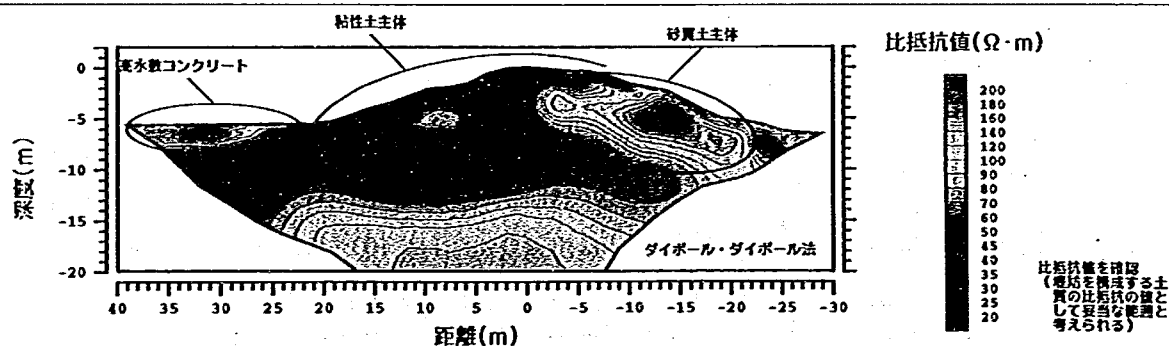


図 7.5 比抵抗分布図の予備評価結果 (例)

### 7.2.2 比抵抗値と土質特性との関係把握（比抵抗分布図とボーリング柱状図の重ね合わせ図作成）

堤防の土質材料の比抵抗値には目安値が存在することは前述した。しかし、目安値を用いた判別では、何 $\Omega \cdot m$ を粘土と砂質土の境界値にするべきか判断に迷うことが多く、地下水以下では粘土と砂質土、礫質土の比抵抗値が接近し、さらに判断が難しくなる。そのような場合には、比抵抗分布図とボーリング柱状図の重ね合わせ図を作成することで、直接、土質性状と比抵抗値の対応関係を確認することが可能になり、より信頼性の高い判定を行うことができる。

しかし、単純な対応関係から境界値を決定すると、礫質土と粘土を逆に解釈するなどの大きな誤りを犯すことがある。そのため、柱状図による判定と目安値による判定の両面から判断し、目安値と大きく異なる結果を得た場合は、原因を追求しておく必要がある。以下に重ね合わせ図の作成要領を示す。

#### ・必要な図面

重ね合わせ図の作成の際に必要な図面としては、比抵抗分布図（横断、縦断）、ボーリング柱状図（水位の記載があるものが望ましい）の2点は最低必要である。他にサウンディングなどの補足調査を実施している場合は、適宜用意しておくといよい。

#### ・位置、縮尺合わせ

必要な図面が揃ったら、図面を重ね合わせるために縮尺を揃える必要がある。最終的な図面の大きさには特に規定はないが、明瞭に図面を読み取ることができる程度でよい。ボーリング深度が深い場合には大きな図面にまとめたほうがよく、その大きさに合わせて各図面の縮尺を合わせる。

また、位置合わせは誤判定を避けるため、ズレが生じないように慎重に行う必要がある。そのためには、補足調査を実施する際に、調査地点の情報をできるだけ緻密に記録しておく。また、ボーリング、サウンディング調査を実施する際には、深度方向の測定管理をしっかりと行い、縦方向のズレを可能な限り減らすことが必要である。

#### ・重ね合わせ図の判定

基本的に柱状図から地層の境界を読み取り、それに対応する比抵抗値を境界部に記入して、比抵抗値と土質性状の関係を把握する。その際、土質性状に対して妥当な比抵抗値を示していることを確かめる。明らかな粘土質層に対して高比抵抗値を示しているような場合は、測定から解析、図化、重ね合わせが正常に行われているかどうか再度確認する必要がある。

また、柱状図と比抵抗分布に若干の食い違いが生じることは、探査精度などの面から避けがたい問題なので、判定時に考慮する必要があるが、全体的に上下に境界がずれている時にはボーリングの深度方向にズレがないか検討しなす。

#### 判定例

重ね合わせ図（図7.6）をもとに、以下のような対比を行った。

- ① 表層部約2mについては、ボーリング柱状図では砂質土（礫混じりシルト混じり砂～礫混じり砂）となっているが、50 $\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗を示している。若干シルト分が多いなどの理由により、この程度の比抵抗を示したものと考えられる。
- ② 深度3.00～4.25mの砂質土（シルト質砂：砂は中粒度主体）は、100～110 $\Omega \cdot m$ の比抵抗を示す。
- ③ 深度4.25～9.00mの粘性土（砂混じりシルト、シルト）は、30～60 $\Omega \cdot m$ の比抵抗を示す。
- ④ 深度9.00～15.45mの砂質土（砂）は、70～200 $\Omega \cdot m$ の比抵抗を示す。
- ⑤ ボーリング調査による坑内水位は8.35mである。しかし10m以深の砂層の比抵抗が100～200 $\Omega \cdot m$ を示していることから、実際の地下水位はさらに低いものと考えられる。

比抵抗断面(一部)

ボーリング柱状図

比抵抗断面(一部)

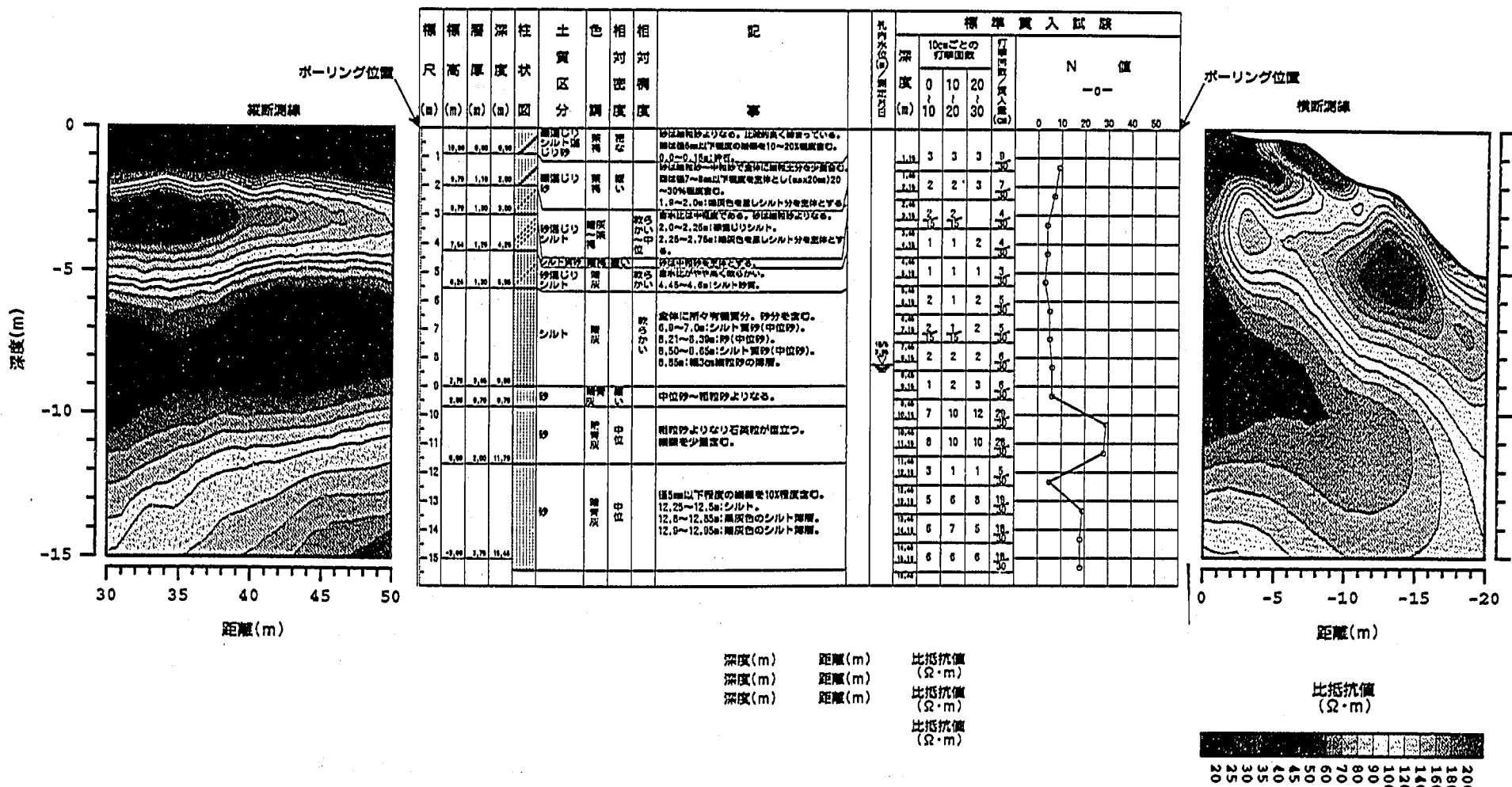


図 7.6 比抵抗分布図とボーリング柱状図の重ね合わせ図作成結果 (例)

### 7.2.3 最終判定

重ね合わせ図から得た調査地点における比抵抗と土質との関係、既存資料、現地踏査結果など、あらゆる情報を考慮に入れ、調査地点における堤防内部土質構造を最終判定する。

#### 判定例

最終的に以下のような判定を行い、最終判定とした。

- ① 前出の重ね合わせ図（図7.6）をもとに、スウェーデン式貫入試験結果などから、 $60\Omega\cdot m$ を粘性土と砂質土との境界とした。
  - ② 堤内地圃の高比抵抗領域（特に $200\Omega\cdot m$ 以上を示す箇所）は、スウェーデン式貫入試験結果より、砂音はするものの貫入抵抗が小さいことから砂混じり粘土と判定されていたが、比抵抗の値から考えてゆるい砂であると判断した。
  - ③ 現地踏査により河川敷きには高水敷コンクリートの敷設を確認しており、河川敷き表層の $200\Omega\cdot m$ 以上の高比抵抗領域は高水敷と判断した。
  - ④ その他、表層付近の高比抵抗部位は、地表面の目視により砂、あるいは礫の存在を確認した。
- 以上の判定により、得られた最終判定図を図7.7に示す。

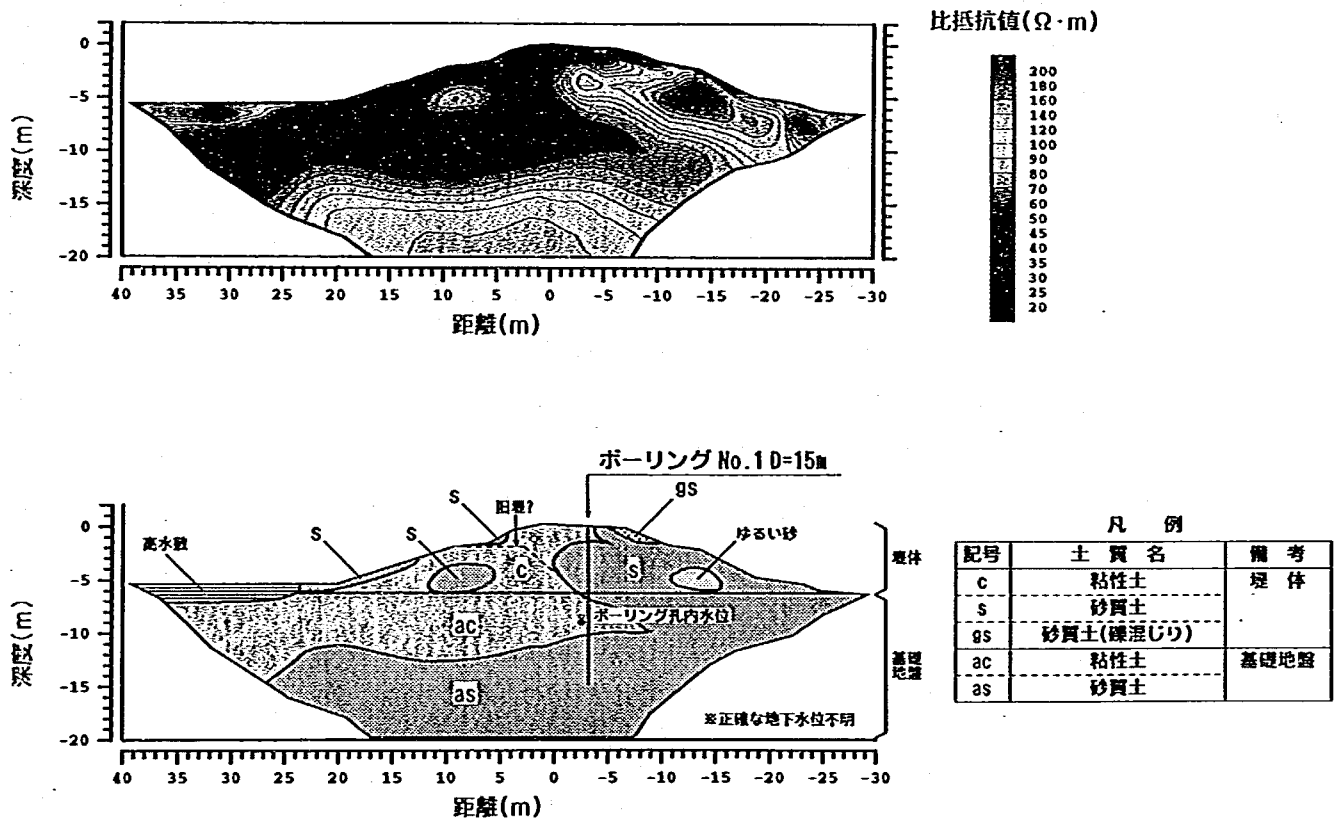


図7.7 最終判定結果（例）

## 8. 成果品

一連の探査、解析、出力により得られた結果は、内容を理解しやすいように平易に、項目を余すことなく成果品としてまとめなければならない。本章では、報告様式と作成例を示し、成果品の作成法について記述した。成果品は、以下の書式にまとめ提出する。

- ・ 報告様式—1：業務名、業者名、堤防管理者、調査年月日、各種堤防条件、測定日の気象、全景写真、備考他
- ・ 報告様式—2：調査位置図（縮尺1：25,000と縮尺1：2,500程度）
- ・ 報告様式—3：縦断探査図、縦断探査仕様、測定器仕様
- ・ 報告様式—4：横断探査図、横断探査仕様、ボーリング仕様
- ・ 報告様式—5：見掛比抵抗断面図（縦横断）  
※測定データ品質チェック用
- ・ 報告様式—6：解析結果（縦横断）
- ・ 報告様式—7：確認ボーリングとの重ね合わせ図
- ・ 報告様式—8：最終診断図、考察
- ・ その他、必要に応じて、ボーリング柱状図、土質試験結果など

報告様式－1

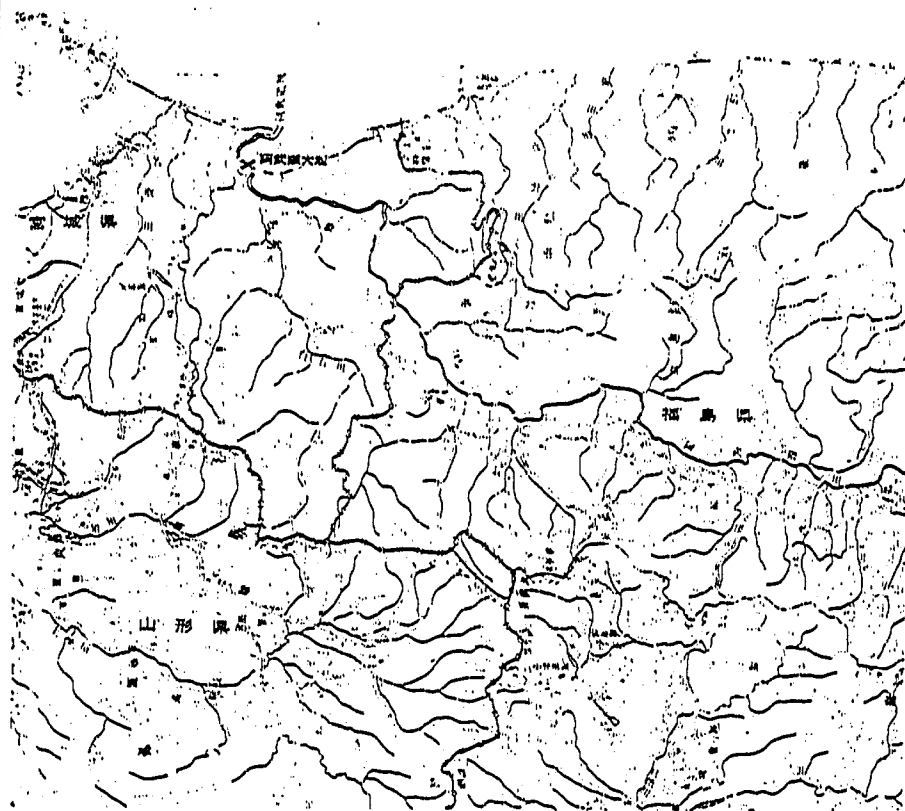
|       |                                 |           |                        |      |        |
|-------|---------------------------------|-----------|------------------------|------|--------|
| 業 務 名 | 河川堤防の高密度電気探査業務                  | 業 務 名     | 〇〇コンサルタント(株)           | 調査阻害 | ガードレール |
| 堤防管理者 | 〇〇地建〇〇工務事務所                     | 調査年月日     | 1999 年〇月〇日             |      |        |
| 河 川 名 | 〇〇川 (一級河川)                      | キ ロ 程     | 右岸〇. 〇km～〇. 〇km～〇. 〇km |      |        |
| 堤 防 高 | 7.3 m (H.W.L: 6.5 m+余裕高: 0.8 m) | の り 勾 配   | 約 1 : 3.0              | 備 考  |        |
| 天 端 幅 | 約 5 m                           | の り 面 状 況 | 芝付け                    |      |        |
| 設 地 幅 | 約 50 m                          | 天 端 状 況   | 砂利道                    |      |        |
|       |                                 |           |                        |      |        |

全 景 写 真



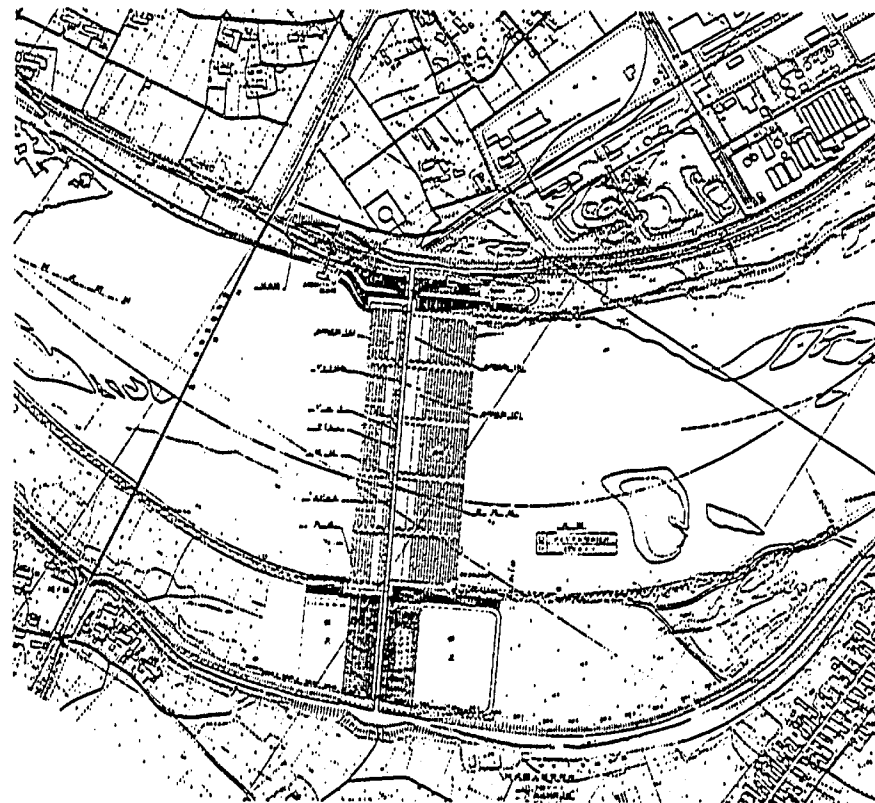
報告様式— 2

調査概略位置図



1 : 25,000

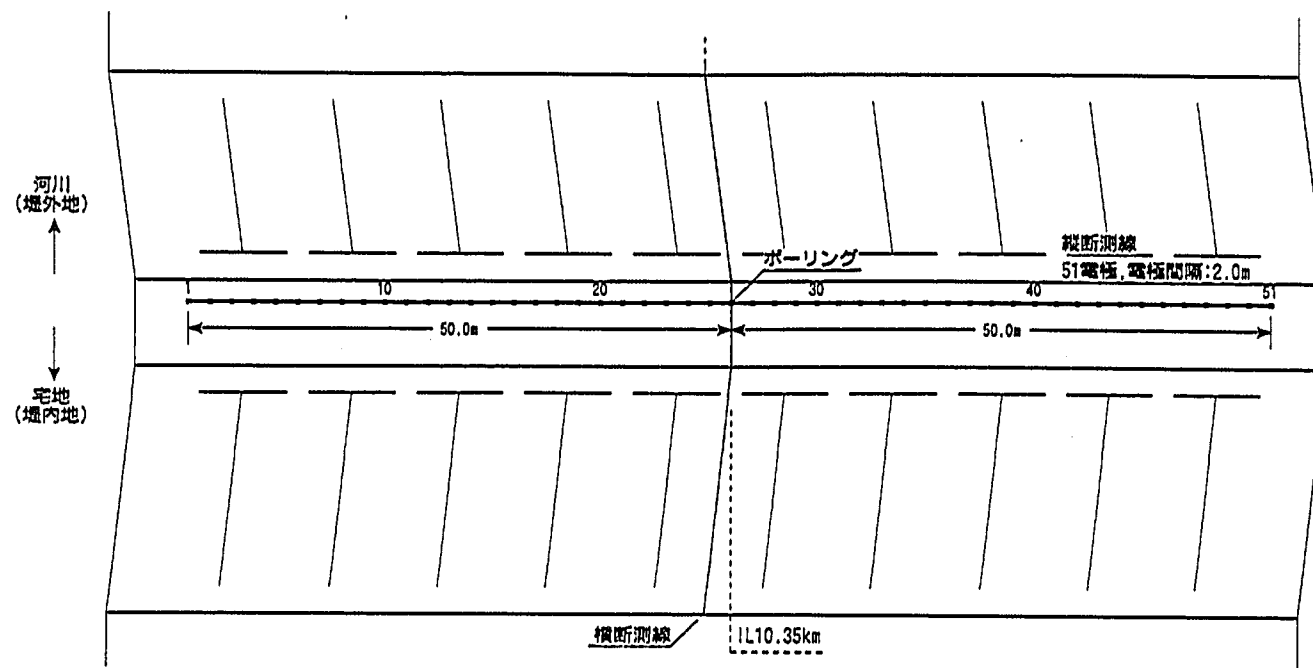
調査詳細位置図



1 : 2,500

報告様式－ 3

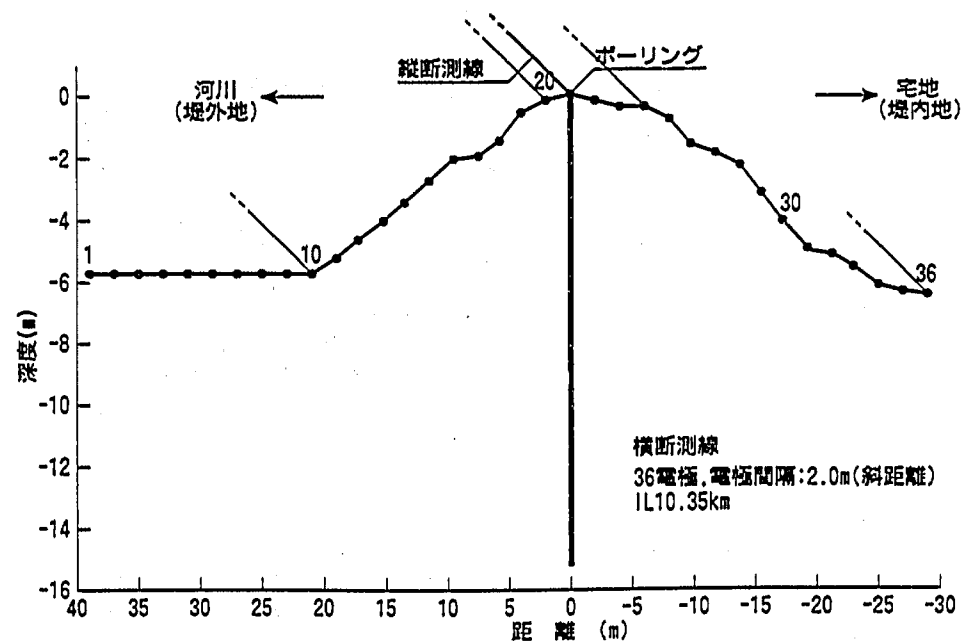
|             |                                          |         |                 |       |                 |
|-------------|------------------------------------------|---------|-----------------|-------|-----------------|
| 電 極 配 置     | ダイポール・ダイポール法                             | 電 極 間 隔 | 2.0 m (水平距離)    | 展 開 数 | 1 展開 (1 展開51電極) |
| 測 線 延 長     | 100 m (有効探索延長: 〇m)                       | 測 定 深 度 | 〇m (有効探索深度: 〇m) |       |                 |
| 測定器仕様       | PZ-110 N 比抵抗計、定電流型 (10 mA)、低周波交流、位相検波回路付 |         |                 |       |                 |
| 縦断探索図 (平面図) |                                          |         |                 |       |                 |



備 考

報告様式-4

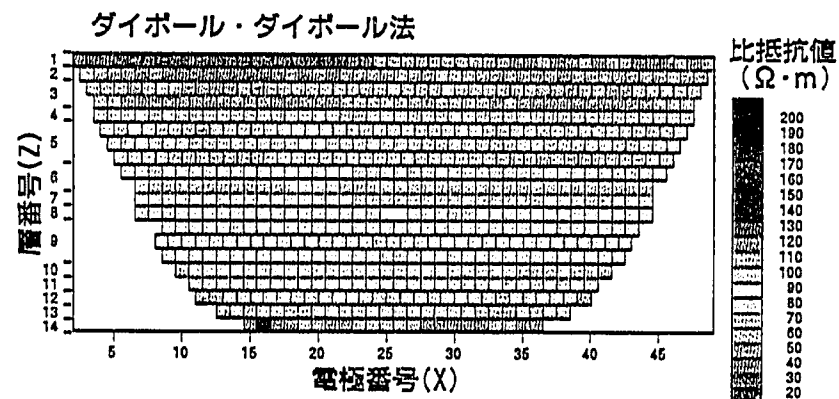
|             |                                                      |         |                    |       |                  |
|-------------|------------------------------------------------------|---------|--------------------|-------|------------------|
| 電 極 配 置     | ダイポール・ダイポール法                                         | 電 極 間 隔 | 2.0 m (斜距離)        | 展 開 数 | 1 展開 ( 1 展開36電極) |
| 測 線 延 長     | 70.0 m (有効探索延長：○m)                                   | 測 定 深 度 | 約 20 m (有効探索深度：○m) |       |                  |
| ボーリング仕様     | 掘削深度 15.45 m (うち基礎地盤 5 m)、孔径 φ116 m、シンウォールサンプリング φ86 |         |                    |       |                  |
| 横断探索図 (横断図) |                                                      |         |                    |       |                  |



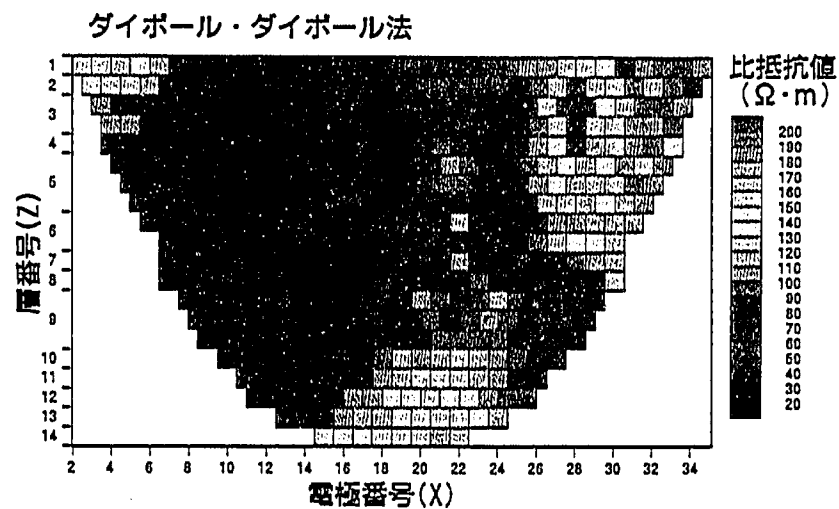
備 考

報告様式- 5

見掛け比抵抗断面 (縦断探索)



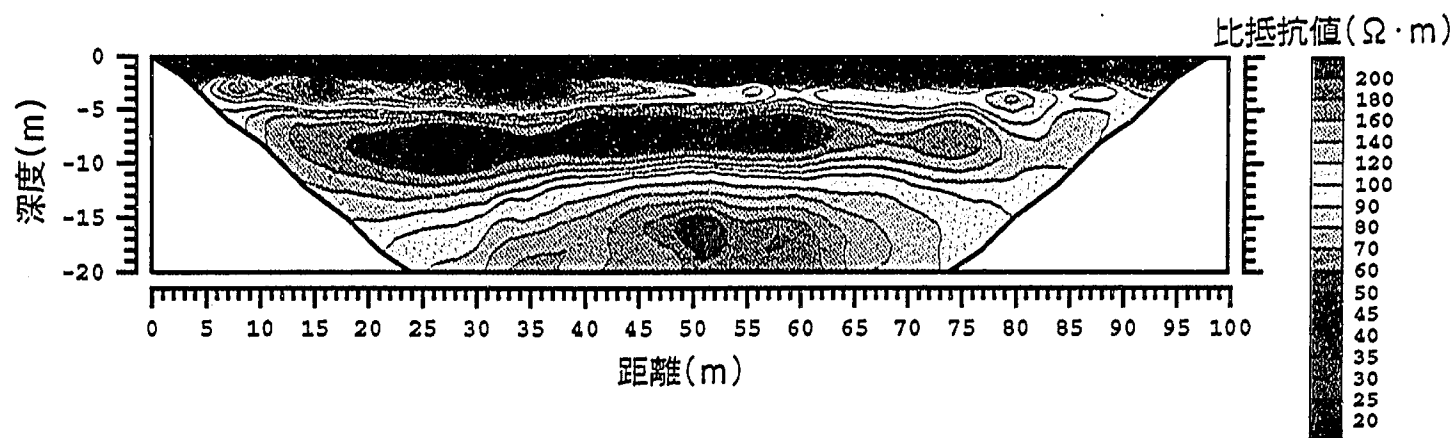
見掛け比抵抗断面 (横断探索)



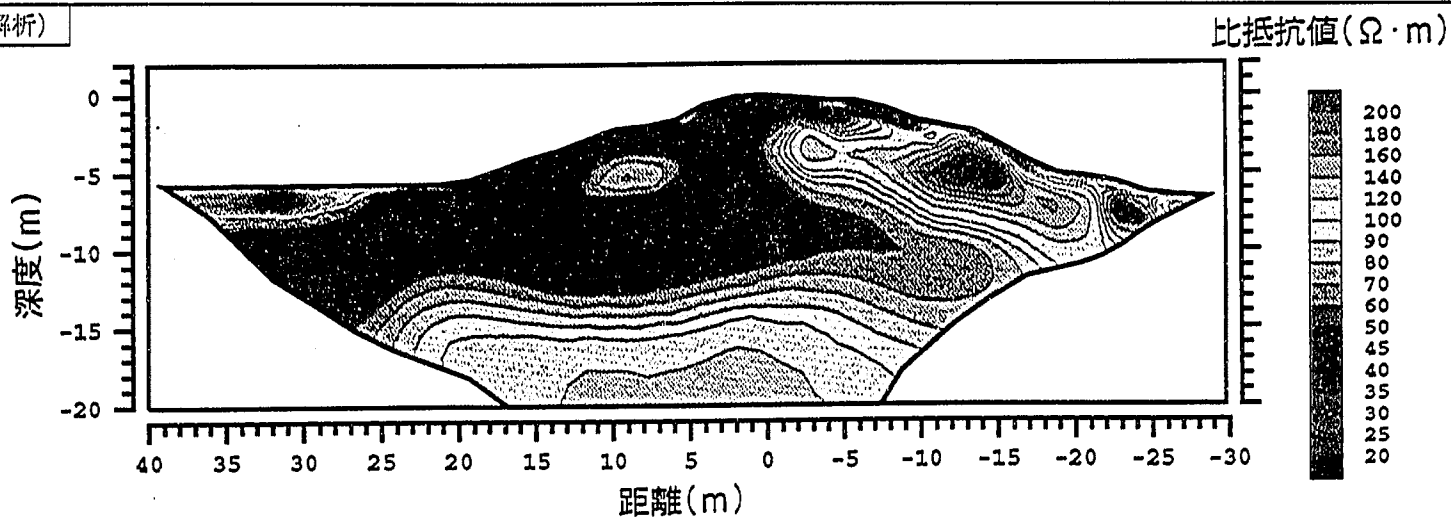
備考

報告様式— 6

解析画像 (縦断解析)

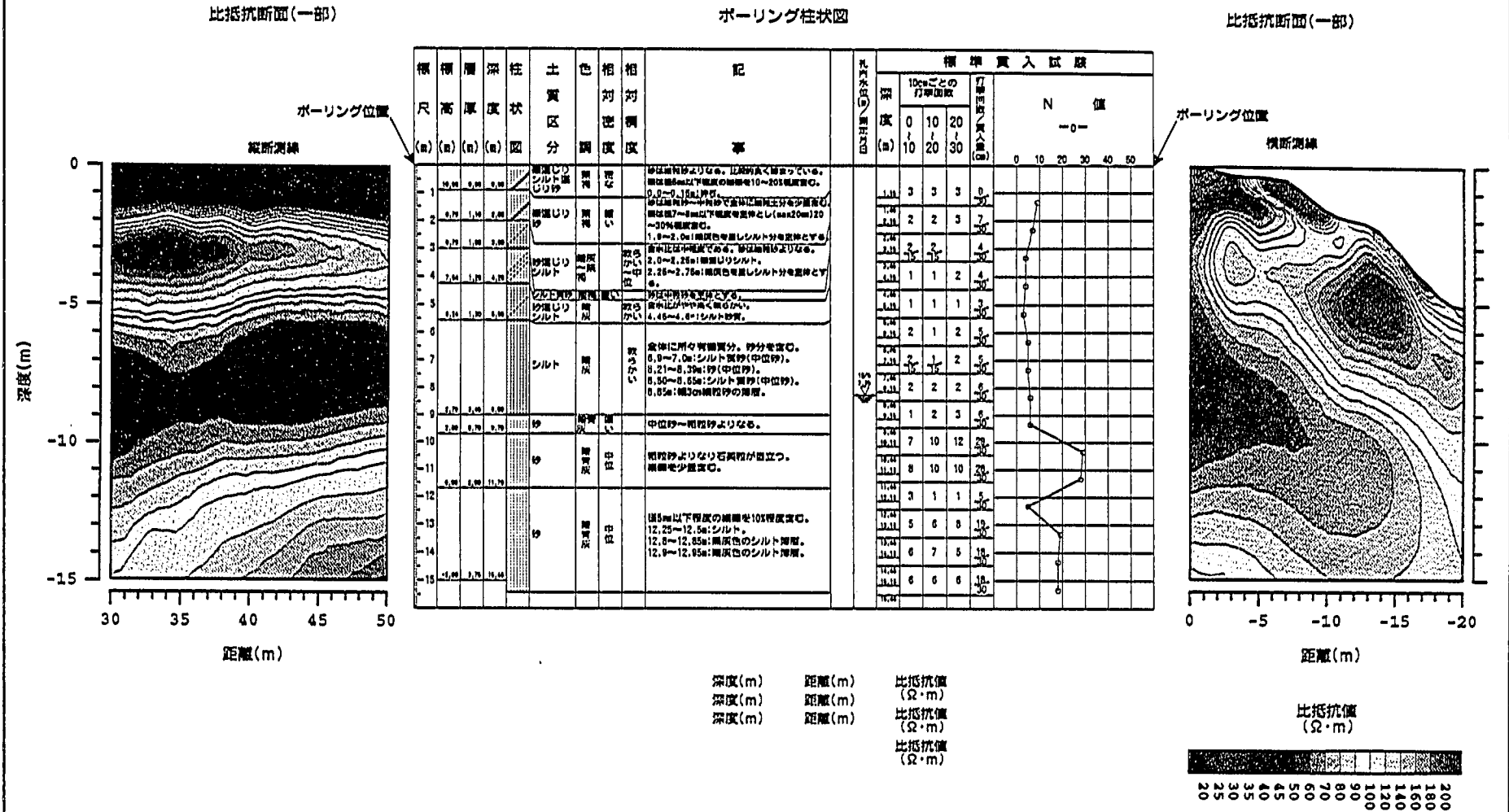


解析画像 (横断解析)

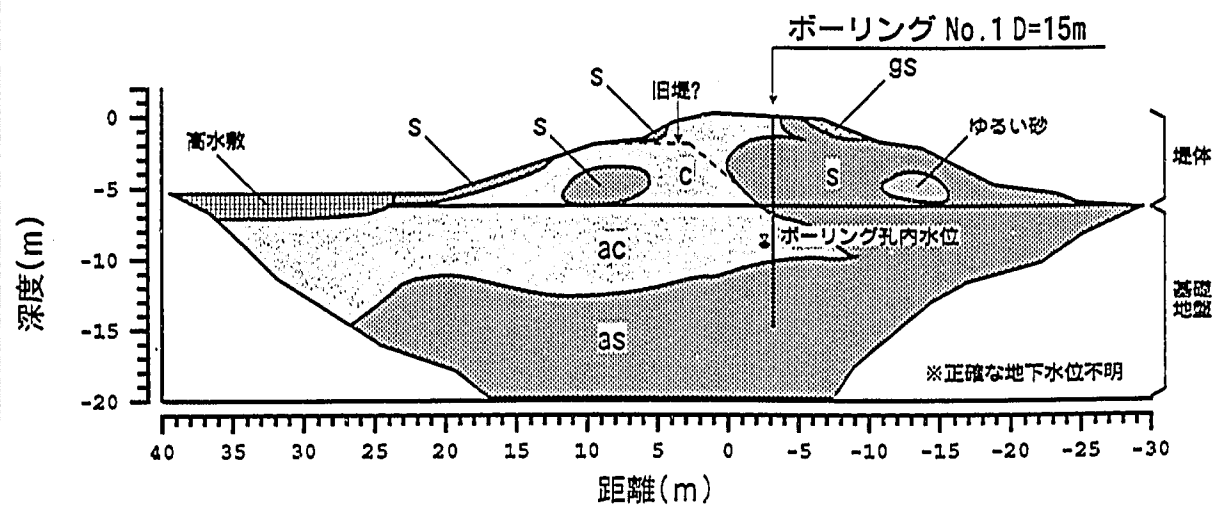
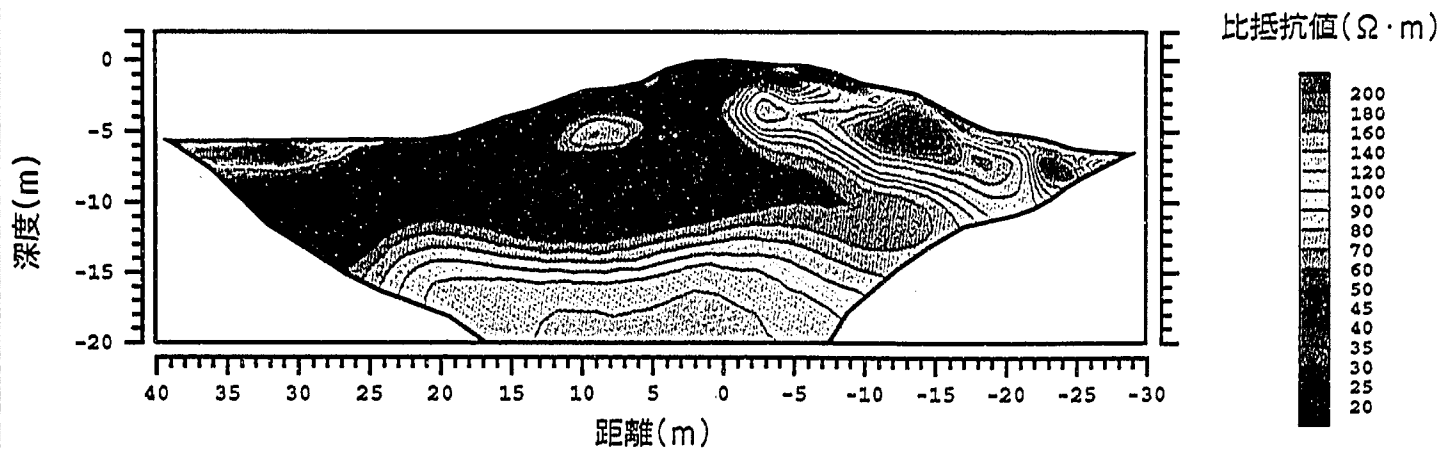


備考

確認ボーリングとの重ね合わせ図



最終診断図



| 凡 例 |           |      |
|-----|-----------|------|
| 記号  | 土 質 名     | 備 考  |
| c   | 粘性土       | 堤 体  |
| s   | 砂質土       |      |
| gs  | 砂質土(礫混じり) |      |
| ac  | 粘性土       | 基礎地盤 |
| as  | 砂質土       |      |



## 付録一 1 高密度電気探査手法による堤防内部構造探査事例

### 1. 大型模型堤防によるモデル実験

#### 1.1 目的

高密度電気探査手法の堤体土層構造の把握に対する適用性を検討する目的で、大型模型堤防によるモデル実験を実施した。モデル実験の具体的な目的は以下のとおりである。

- ① 高密度電気探査手法とは、どのようなものであるか。
- ② 高密度電気探査手法により既知の堤体土層構造(粘性土、砂質土)をどの程度把握することができるか。
- ③ 測定データの品質管理をどのようにすればよいか。

#### 1.2 実験要項

- ① 測定日：平成5年6月21日～6月25日
- ② 実験場所：建設省土木研究所盛土実験棟内
- ③ 調査項目：高密度電気探査：4測線（横断、各モデル1測線）

確認試験：築堤材料の室内物理試験、比抵抗測定

#### 1.3 大型模型堤防の概要

実験に使用した大型模型堤防は図1.1に示したように、ロームと山砂で構築された基礎地盤上に、高さ3 m、幅12 m、天端幅3 m、のり面勾配1:1.5の諸元で、4種類（モデルA～D）の土層構造の堤体を築堤したものである。各モデル堤体の延長は5 mとし、モデル間には絶縁シートを設け隣接するモデルの電氣的影響を除去した。なお、のり面勾配を確保する目的で、川砂ののり面はジオテキスタイルで補強した。

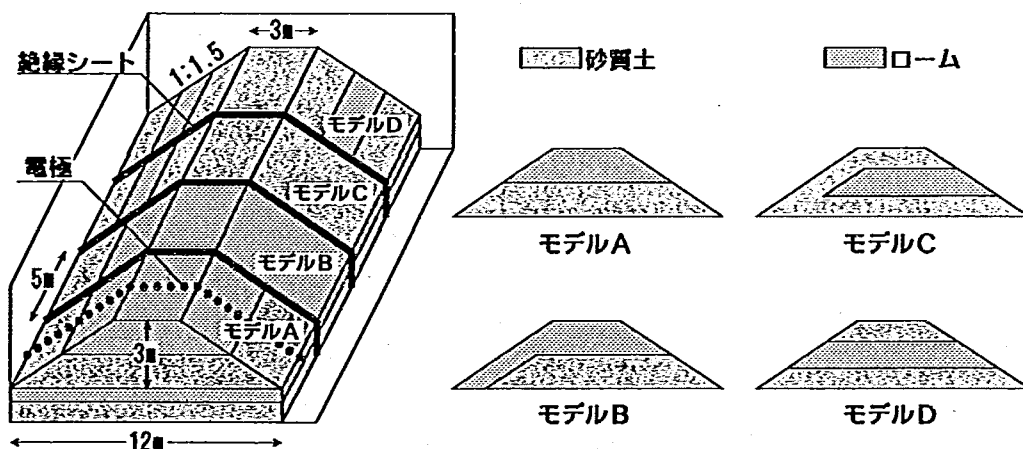


図1.1 実験用大型模型堤防の概要図

## 1.4 測定・解析仕様

### (1) 測定仕様

測 線 配 置：模型堤防の横断方向（図1.1参照）

測 線 長：12m（水平距離）

電 極 間 隔：0.25m（水平距離）

電極設置方法：高密度電気探査では電極を点電極と仮定して解析が行われる。モデル実験では地表電極の間隔を 0.25 m と極端に短くしたため、電極として図 1.2 に示したような 5 cm×5 cm の鉛板電極を使用し、接地抵抗をよくするために鉛板電極周辺にベントナイトを充填した。

電 極 配 置：2 極法

遠 電 極：模型堤防の 200 m 北側の地点に電流遠電極、200 m 南側の地点に電位遠電極を設置した。設置状況を図1.3に示す。

使 用 装 置：McOHM-21、SYSCAL-R 2

### (2) 解析仕様

解析データ数：2503データ

解 析 手 法：FEM、比抵抗映像法、 $\rho_a - \rho_u$ 法

### (3) 確認試験

土質試料の比抵抗測定：模型堤防の築堤材料を用いた供試体の物理試験および比抵抗試験を実施した。

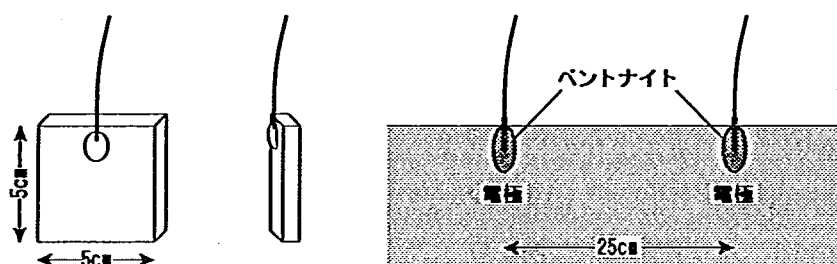


図1.2 測定電極の設置方法

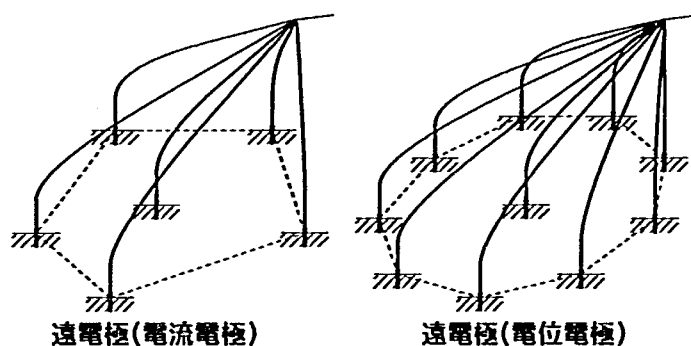


図1.3 遠電極の設置状況

## 1.5 実験結果

### 1.5.1 データの品質確保に関連する実験結果

高密度電気探査では測定データの品質を確保するための基本として、流す電流を大きくし測定電位を大きくすることが挙げられる。本実験では、印加電圧と電流の関係、接地抵抗と電流の関係、接地抵抗とデータ品質の関係を確認した。

#### ① 印加電圧と電流の関係 (図1.4)

- ・ 印加電圧の増加に伴い電流は増大する。
- ・ 接地抵抗が小さいほど印加電流の増加に伴う電流の増加は大きくなる。

#### ② 接地抵抗と電流の関係 (図1.5)

- ・ 同じ電圧を印加した場合、接地抵抗の増加に伴い電流は減少する。

#### ③ 接地抵抗とデータ品質の関係 (図1.6)

2 極法では、電位電極と電流電極を入れ替えて測定しても測定値 ( $V/I$ ) は同じである (相反性が成り立つ)。測定電位電極と電流電極を入れ替えた場合の測定値差を測定値で除した値を相反エラーとし、データの品質を評価する指標とした。

- ・ 接地抵抗の増加に伴い相反エラー (データの品質) のばらつきは大きくなる。
- ・ 接地抵抗が  $5 \text{ k}\Omega$  以下になると、相反エラーのばらつきがほぼ一定となる。

したがって、接地抵抗を  $5 \text{ k}\Omega$  以下に押さえることが理想である。

### 1.5.2 測定結果

- ・ 測定時間：McOHM-21使用、データ数 2503～2556 個、3 チャンネル同時測定、スタック回数 2 回という測定条件で、測定時間は 7 時間～7 時間30分程度であった。
- ・ 測定時の接地抵抗は、全電極で  $5 \text{ k}\Omega$  以下であった。
- ・ 電流は、 $10 \text{ mA} \sim 50 \text{ mA}$  であった。
- ・ 全てのデータについて、相反エラーは数%以下であ

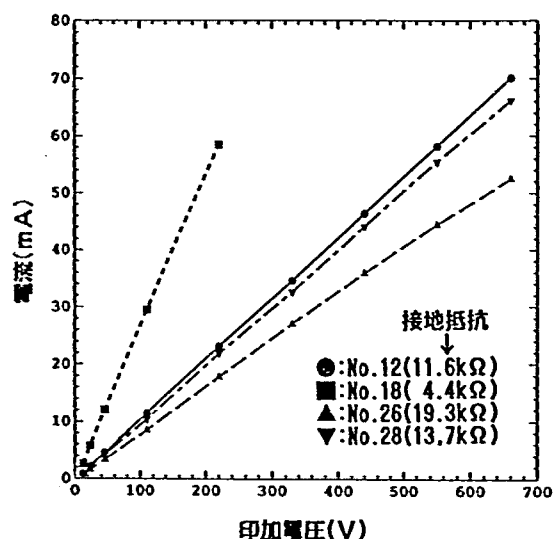


図 1.4 印加電圧と電流の関係

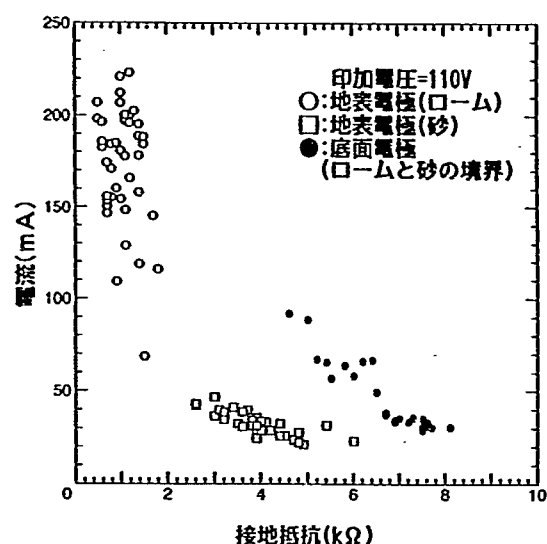


図 1.5 接地抵抗と電流の関係

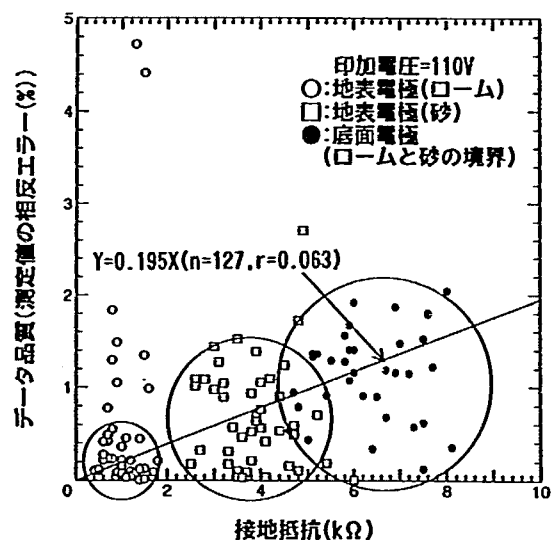


図 1.6 接地抵抗とデータ品質の関係

り良質な測定データと判断できた。

- ・全ての測定データは良質な品質を有していると判断し、全てのデータを用いて解析を実施することとした。

### 1.5.3 解析結果

- ・FEM 解析に用いた解析メッシュを図1.7、得られた解析結果を図1.8に示す。
- ・モデル C で中間層の砂層の分布状況が若干不明瞭な点もあるが、各モデルともに堤体の土層構造を反映した比抵抗構造を示した。このことより、比抵抗構造から土質分布を推定することが可能であると考えられる。
- ・実験結果より、堤体の砂層（川砂）と粘性土層（関東ローム）の比抵抗値は以下の値を取るものと思われる。このことより、比抵抗値から川砂と関東ロームを判別することが可能であると考えられる。  
砂層（川砂）：200～1000Ω・m  
粘性土層（関東ローム）：30～100Ω・m
- ・ジオテキスタイルを敷設した箇所は、部分的に1000Ω・m 以上の高比抵抗を示すことがあった。

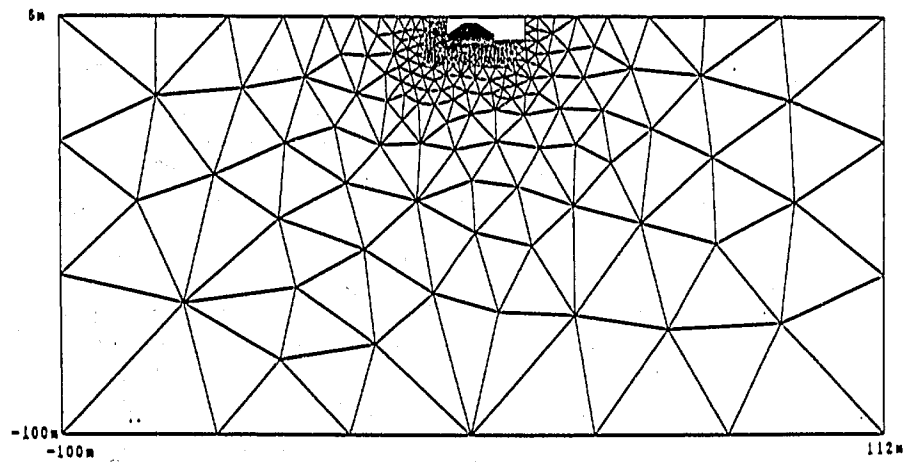
### 1.5.4 土質試料の比抵抗測定結果

土質試料の飽和度の変化による比抵抗の変化を調査するため、図1.9に示すようなテストピースを作成し、直接比抵抗を計測した。結果を図1.10に示す。

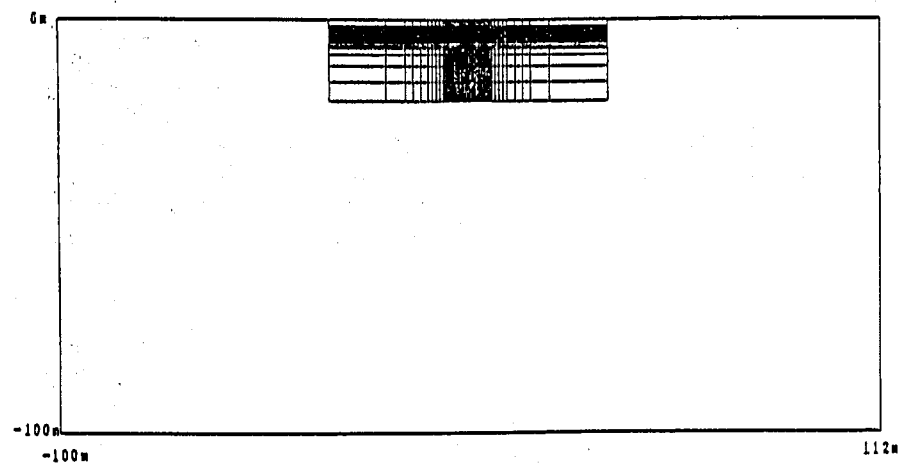
- ・土質材料の比抵抗は、含水状態の影響を大きく受ける。
- ・土質試料の比抵抗測定では、飽和度が100%近くなると、砂と粘土の比抵抗の差が小さくなる。

## 1.6 適用性に関する検討結果

- ・比抵抗構造から土質分布を推定することが十分可能であること、比抵抗値から川砂と関東ロームを判別することが可能であることから、高密度電気探査手法は堤防内部構造診断の手法として高い適用性があることが判明した。
- ・測定データの品質の向上には、測定電極の接地抵抗を低減することが有効であることがわかった。

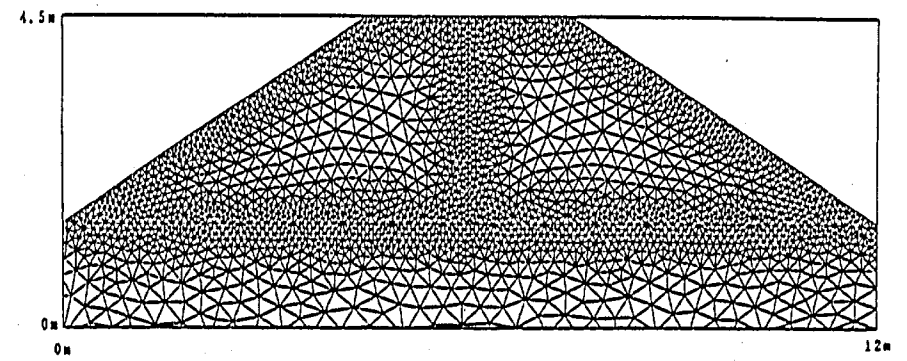


メッシュ図

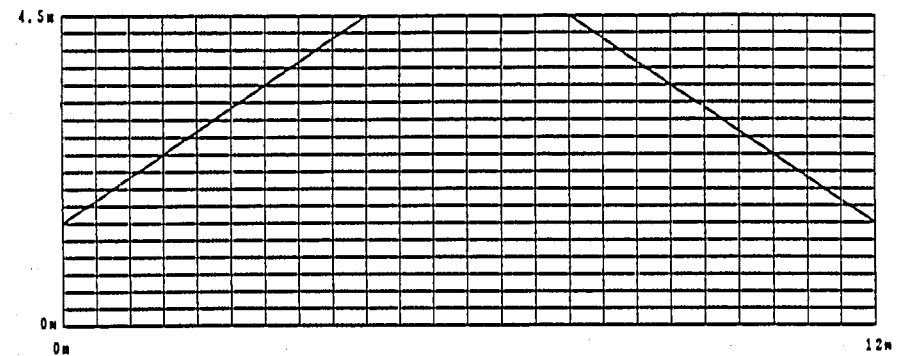


グリッド図

図 1.7a FEM 解析のメッシュ図とグリッド図 (全解析領域)



メッシュ図



グリッド図

図 1.7b FEM 解析のメッシュ図とグリッド図 (堤体)

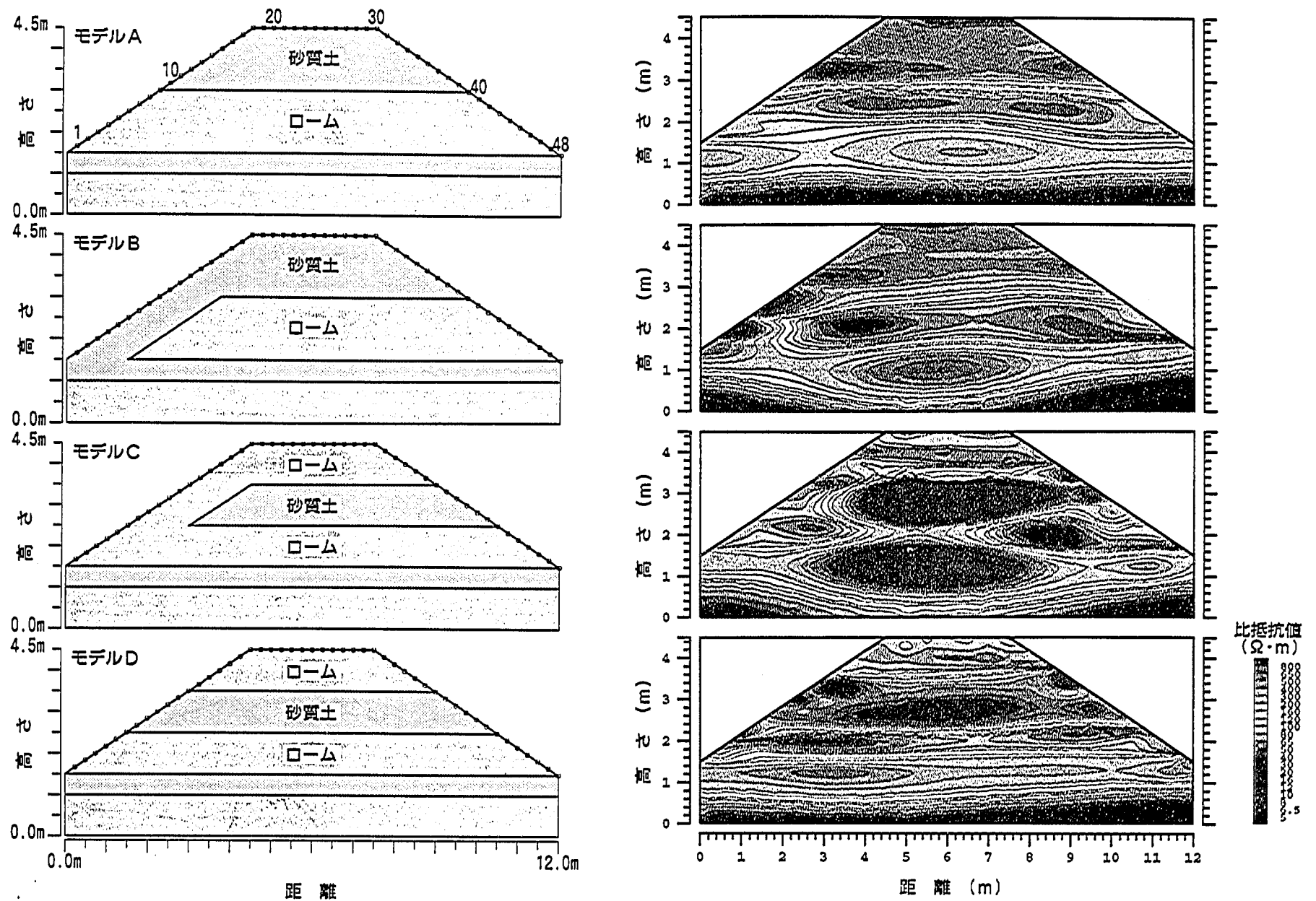


図 1.8 実験に用いた堤体モデルとその FEM 解析結果

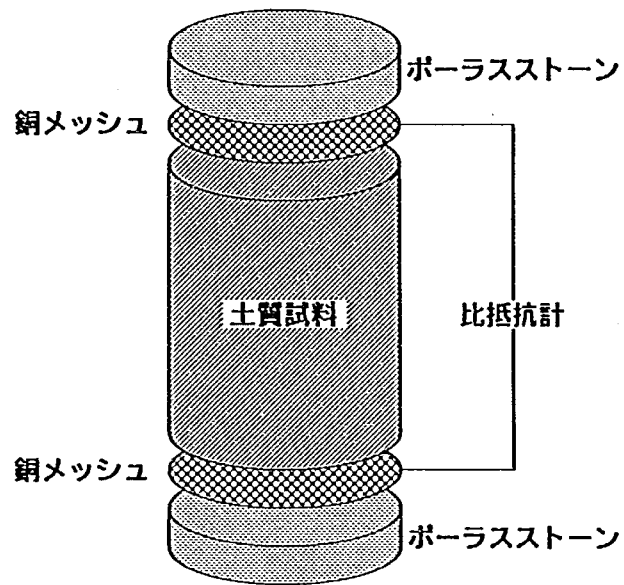


図 1.9 築堤材土質試料の比抵抗測定方法概要図

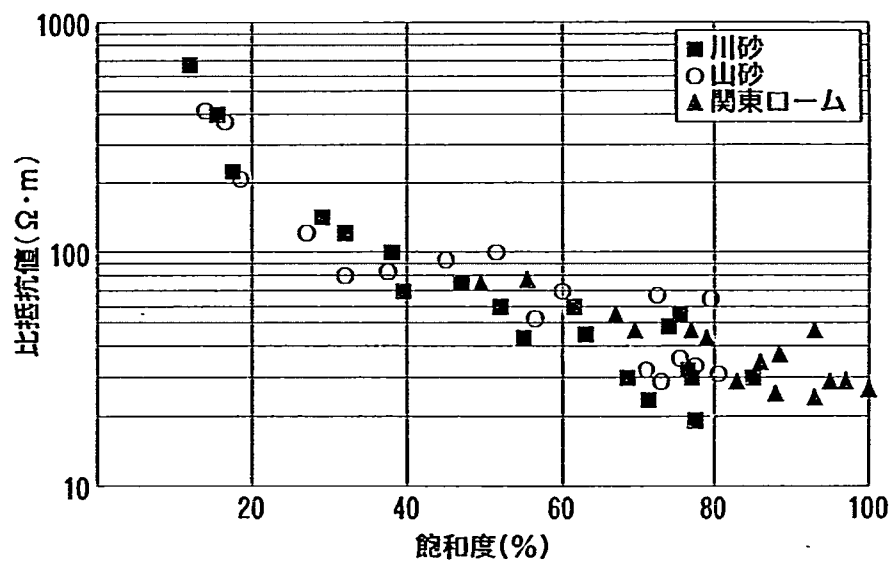


図 1.10 土質試料の飽和度による比抵抗の変化

## 2. 関東地方・都市部の河川堤防における現場実験

### 2.1 目的

大型模型堤防によるモデル実験で、高密度電気探査手法による比抵抗構造から土質分布を推定することが可能であること、比抵抗値から砂質土と粘性土を判別できることが判明した。そこで次ステップとして、実堤防において高密度電気探査手法の土層構造把握に対する適用性を確認する目的で現場実験を実施した。具体的な目的は以下のとおりである。

- ① 実堤防の内部土層構造を高密度電気探査手法で把握できるか。
- ② 2極法、4極法（ダイポールダイポール法、ウェンナー法）の堤防調査における安全性、土層構造の再現性を比較する。

### 2.2 実験要項

- ① 測定日：平成6年6月7日～6月8日
- ② 実験場所：都心部の河川堤防（11.0 km 地点、左岸、堤体高さ：約6 m）
- ③ 調査項目：高密度電気探査：2測線（縦断、横断）  
確認調査：堤体天端からのボーリング調査：10 m × 5 本  
サンプリング、室内物理試験  
スウェーデン式サウンディング（横断方向）  
ボーリング孔を利用した孔内比抵抗測定

### 2.3 測定・解析仕様

#### (1) 測定仕様

測線配置：堤防の縦断方向と横断方向  
測線長：縦断方向98 m、横断方向50 m（水平距離）  
電極間隔：縦断方向1.0 m、横断方向1.0 m（水平距離）  
電極設置方法：ステンレス棒電極  
電極配置：2極法、4極法（ダイポール・ダイポール法、ウェンナー法）  
使用測定器：2極法：多チャンネル比抵抗測定器（CKC 製、50 ch 同時測定）  
4極法：McOHM-21

#### (2) 解析仕様

解析手法：FEM、比抵抗映像法、 $\rho_a - \rho_u$ 法

## 2.4 実験結果

### (1) 縦断方向

図 2.1 にボーリング調査から想定した堤防縦断方向の土質断面図を示した。縦断方向に関しては各層ともほぼ水平に盛土されていると推定され、土質構成は上部から道路用の碎石(Fs)、ローム層(BLm)、第一砂質土層(Bs 1)、粘性土層(Bc)、第二砂質土層(Bs 2) および第三砂質土層(Bs 3) に層状に区分される。

図 2.2 には、ダイポール・ダイポール法、ウェンナー法、2 極法の FEM 解析の結果を示した。図 2.1 と図 2.2 から以下のことが分かった。

- ・各手法とも、表層部のローム層(BLm)と粘性土層(Bc)は比抵抗が $50\Omega\cdot m$ 以下と小さく、第一砂質土層(Bs 1)は $50\sim 100\Omega\cdot m$ と比抵抗が高くなっており、堤体の土層構造とよく対応している。
- ・全般的には、ダイポール・ダイポール法は他の方法に較べ土層構造の表現性に優れており、比抵抗値と土質の対応もよく、土質の深さ方向の変化についてもボーリング調査結果と非常によく対応している。
- ・高密度電気探査のいずれの方法においても堤体内に局部的に高比抵抗部が現れており、この高比抵抗部は礫と考えられる。したがって、高密度電気探査によりボーリング調査だけでは分布を把握しきれない局所的な礫の混入を検出することが可能である。

### (2) 横断方向

図 2.3 に 1 本のボーリング調査とスウェーデン式サウンディングから想定した堤防横断方向の土質断面図を、図 2.4 に高密度電気探査の FEM 解析結果を示した。

これらの高密度電気探査による比抵抗分布図から、粘性土層(BLm、Bc)に挟まれた砂質土層(Bs 1)がおおむね読み取れる。ただし、河川側小段下ののり面にはブロック張りが施されており高比抵抗になっている。また、堤体のり面も高比抵抗になっているが、これは日射や風の影響で堤体表面が乾燥しているためと考えられる。

## 2.5 適用性に関する検討結果

実堤防において高密度電気探査手法の土層構造の把握に対する適用性を検討するために、都市部の河川堤防について詳細なボーリング調査およびスウェーデン式サウンディングを実施して土層構造を推定し、高密度電気探査手法による縦断方向、横断方向についての測定結果と比較した。また、測定方法においても簡便化を図るために、2 極法で用いた遠電極を必要としない 4 極法(ダイポール・ダイポール法とウェンナー法)の測定を行い、2 極法の結果と比較した。

その比較検討の結果、以下のような知見が得られた。

- ① 縦断方向については 4 極法でも 2 極法でも解析で得られた比抵抗分布はおおよそその土層構造を表現しており、その中でもダイポール・ダイポール法は比抵抗値と土質との対応もよく、土質の深さ方向の変化についてもボーリング調査結果と非常によく対応している。

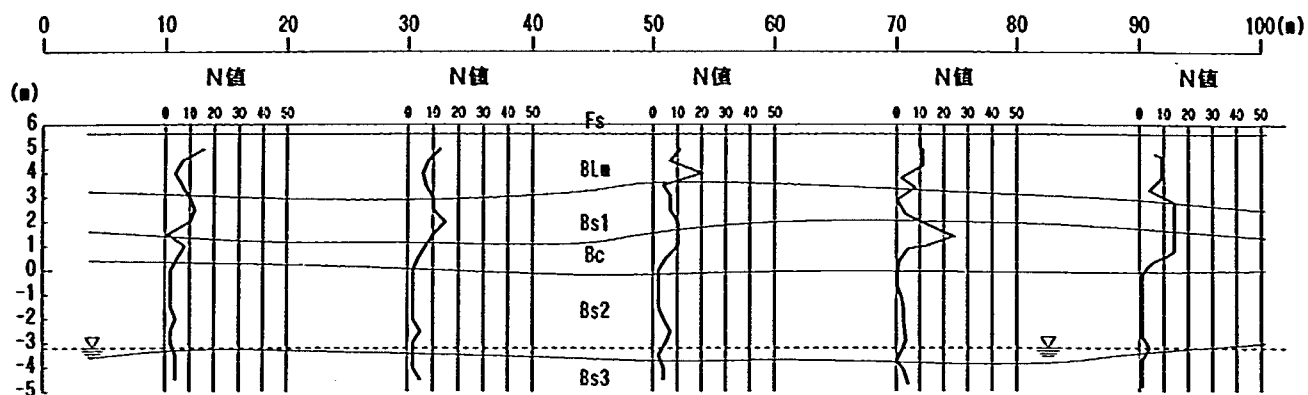


図2.1 ボーリング調査から推定した土質断面図（縦断方向）

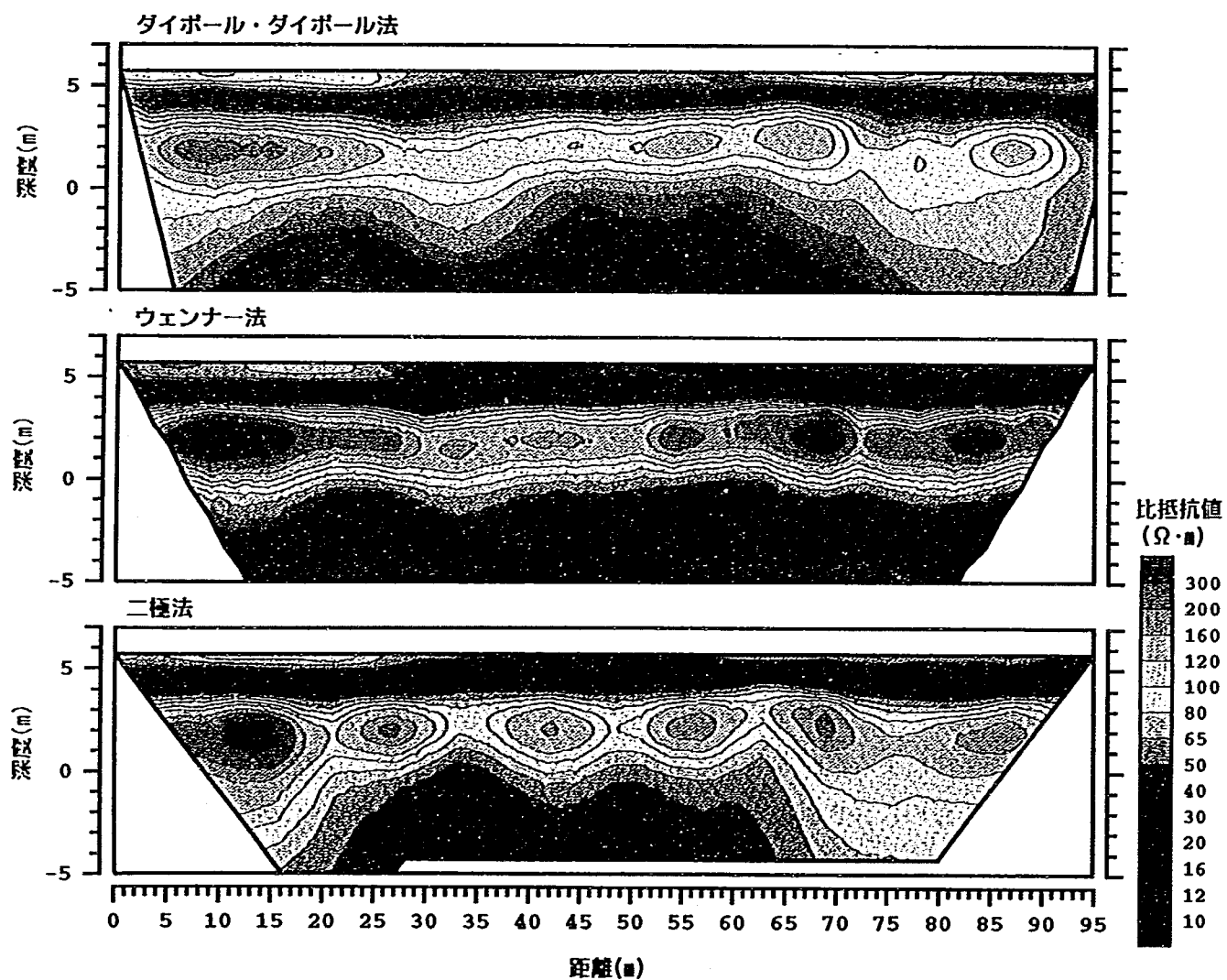


図2.2 各種電極配置を用いた場合の比抵抗分布図の違い

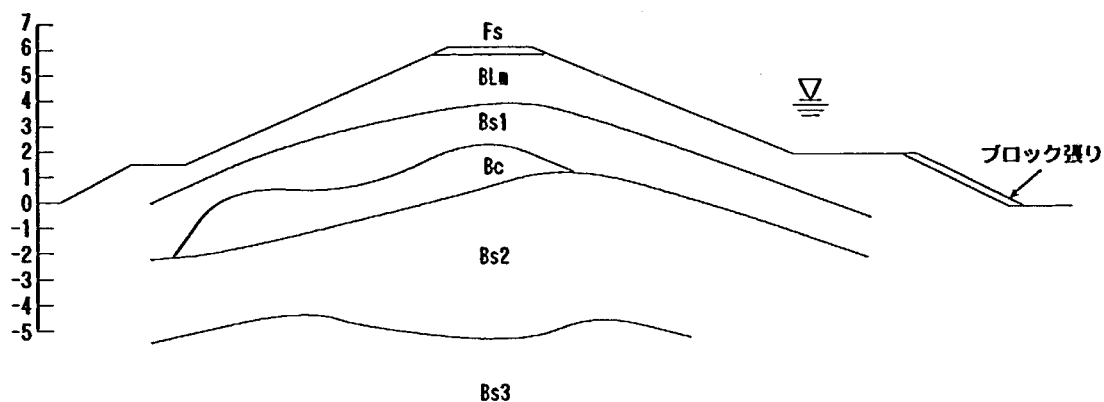


図2.3 ボーリングおよびスウェーデン式サウンディングから推定した土質断面図（横断方向）

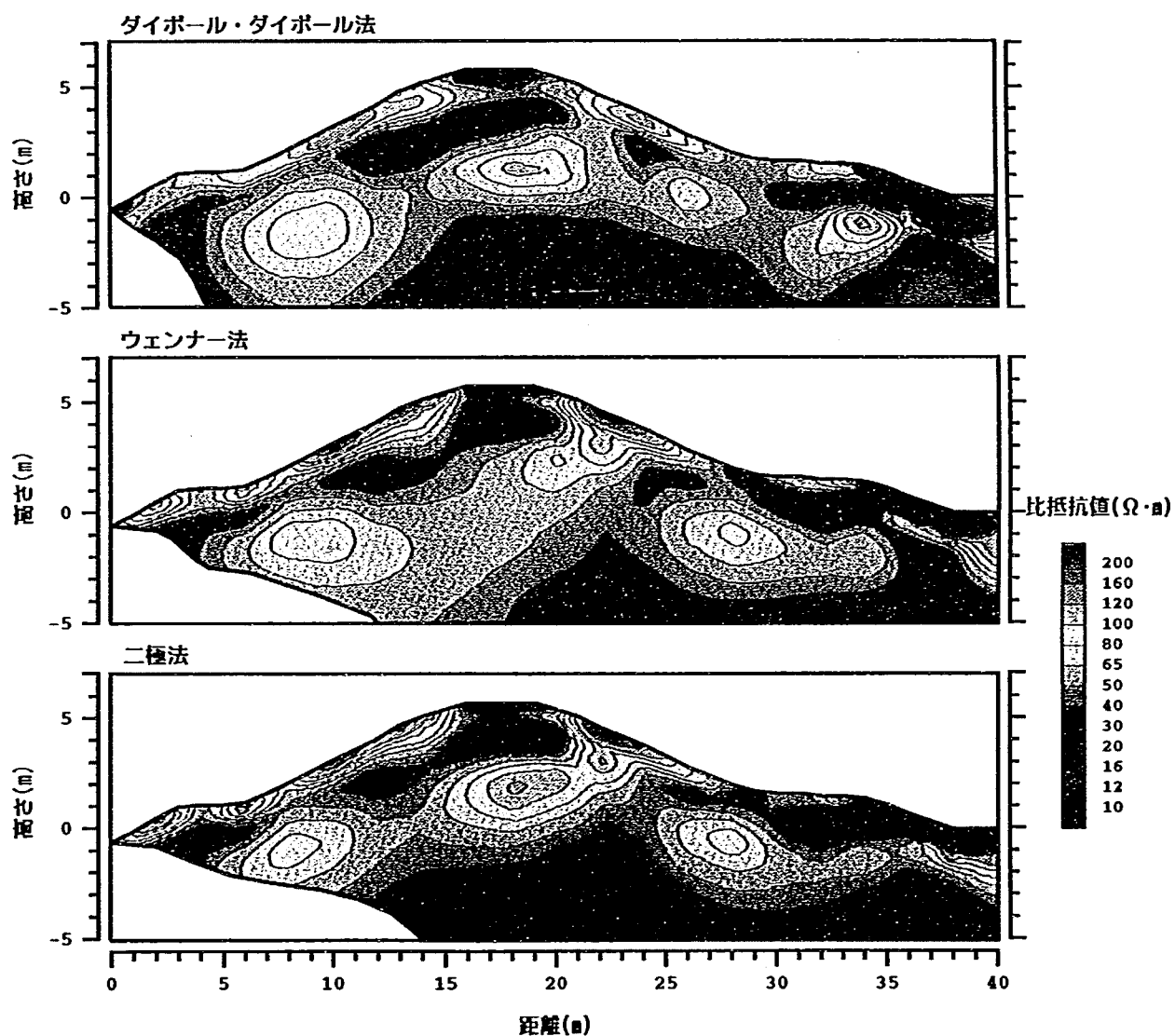


図2.4 各種電極配置を用いた場合の比抵抗分布図の違い

- ② 横断方向については、比抵抗構造が縦断方向に較べて土層構造を十分に把握しているとは言い難いが、のり面ブロック張りの影響等の検討が必要である（偽像の検討）。
- ③ 実堤防においても、比抵抗分布図は各ボーリング地点の土質を表わしていること、ボーリング調査では確認できなかった礫の局所的な分布を高比抵抗分布として把握できたことから、実堤防においても高密度電気探査手法はボーリング間の土層構造の変化を面的に捉える手法として期待できることが分かった。
- ④ ボーリング孔での比抵抗測定で得られた比抵抗値と採取した土質試料の比較を行い、砂質土と粘性土の比抵抗頻度分布図を作成し、図 2.5 に示した。同図から、粘性土の比抵抗値はおおよそ  $50\Omega\cdot\text{m}$  以下であること、砂質土の比抵抗値はばらつきがあることが分かった。砂質土における比抵抗値のばらつきについては、細粒分の影響、含水比の影響が考えられる。

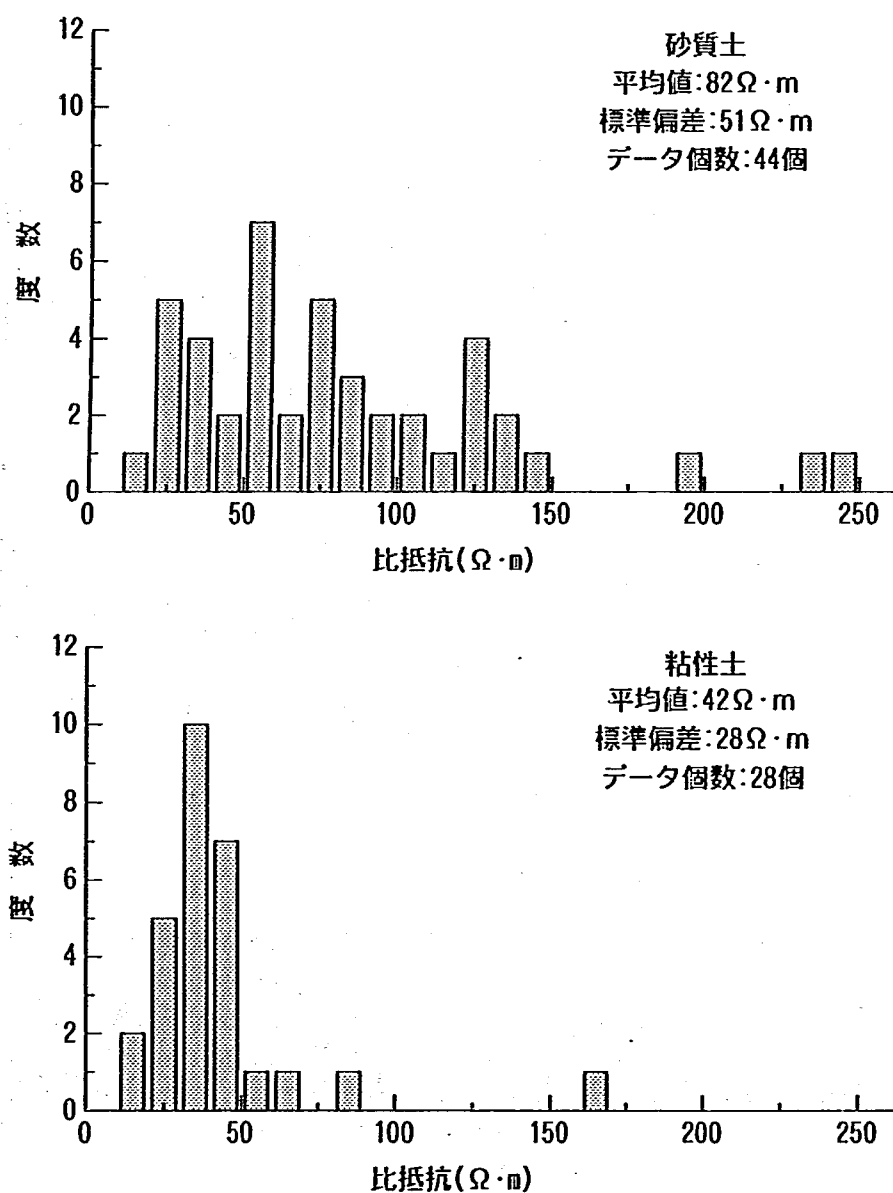


図 2.5 砂質土と粘性土の比抵抗分布図  
 (ボーリング孔を利用した比抵抗測定による)

### 3. 中部地方の河川堤防における現場実験

#### 3.1 目的

各地の河川堤防での現場実験により本手法の探査精度が確認されたため、より現実的な適用を目的として現場実験（および浸透流解析による堤防の安定度診断）をおこなった。具体的な項目は次のとおりである。

- ① 縦断探査により、探査対象延長で安定度の低い部位を発見する。
- ② 横断探査および確認ボーリング調査により、詳細な堤防断面を作成する。
- ③ 得られた堤防断面をモデル化し、浸透流解析により、洪水時の安定度診断をおこなう。

#### 3.2 実験要項

- ① 測定日：平成9年2月
- ② 実験場所：中部地方の河川堤防（38.4 km地点、左岸、堤防高さ：約6 m）
- ③ 調査項目：高密度電気探査：2測線（縦断、横断）

確認調査：堤体天端、のり尻からのボーリング調査：20.00 m×5本  
サンプリング、室内物理試験  
ボーリング孔を利用した現場透水試験

#### 3.3 測定・解析仕様

##### (1) 測定仕様

測線配置：堤防の縦断方向と横断方向

測線長：縦断方向800 m（水平距離）、横断方向70 m（実距離）

電極間隔：縦断方向5.0 m（水平距離）、横断方向2.0 m（実距離）

電極設置方法：金属棒電極

電極配置：ダイポール・ダイポール法

##### (2) 解析仕様

解析手法：FEM

#### 3.4 実験結果

##### (1) 縦断方向

図 3.1 に縦断測線配置図、図 3.2 に比抵抗分布図、図 3.3 にボーリングによる土質柱状図を示す。  
図 3.2 と図 3.3 から以下のことがわかった。

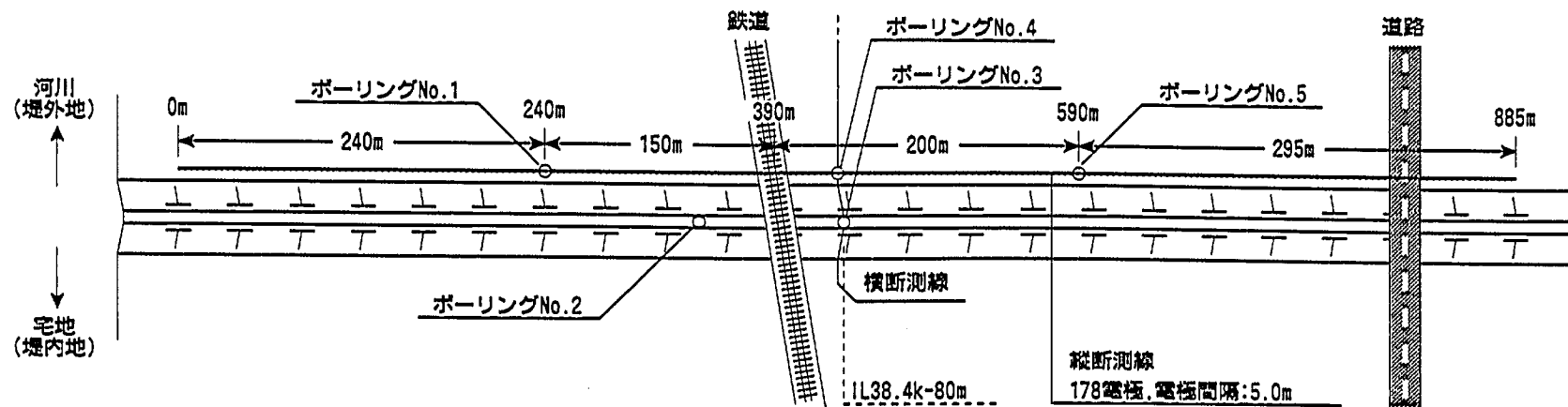


図 3.1 縦断側線配置図

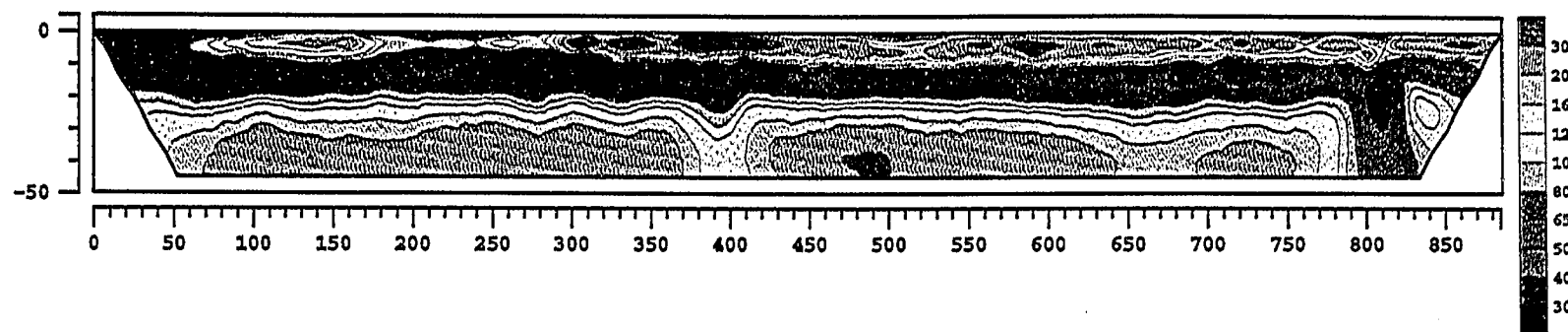


図 3.2 縦断比抵抗分布図

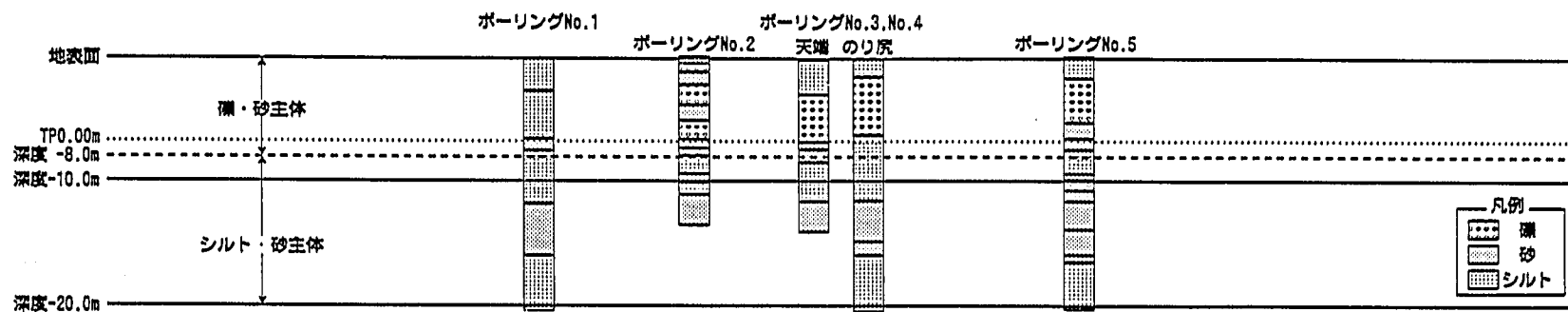


図 3.3 ボーリング柱状図

- ・縦断探査は、基礎地盤について縦断方向に安定度の低い部位を発見する目的で実施した。そのため、のり尻へ測線を配置したり、電極間隔を5.0 mと非常に広めに設定するなど、通常と異なる探査条件で計測している。これは、探査対象を基礎地盤のみに絞ったこと、それほど詳細な情報を必要としなかったことなどの理由による。
- ・土質柱状図には、表層から8 m程度までに礫および砂、8 m以深はシルトおよび砂などの分布がみられた。このことは比抵抗分布図とも対応しており、表層から8 m程度までに  $300 \Omega \cdot m$  を超える高比抵抗領域、8 m以深からは  $100 \Omega \cdot m$  を下回る低比抵抗領域の分布がみられた。以上のことから、土層構造と比抵抗値は比較的よい整合があるといえる。
- ・縦断方向には390 mと590 m付近に  $300 \Omega \cdot m$  を超える高比抵抗領域が大きく分布していることから、旧河川に起因する河床礫の存在が予測され、このことは土質柱状図からも確認された。一方、240 m付近に高比抵抗領域の切れ目がみられるが、土質柱状図からも礫が発見されず、非常によい整合が得られたといえる。
- ・以上の探査結果より、横断測線の配置を440 mに決定した。高比抵抗領域の中心である390 mへの配置も考慮したが、該当部は堤防道路の関係で十分な延長の測線を配置することが難しかったためである。

## (2) 横断方向

図3.4に横断測線配置図、図3.5に比抵抗分布図を示す。これらの図より以下のことがわかった。

- ・横断探査は、縦断探査により発見された弱点部の断面形状を得るために実施した。探査により得られた比抵抗断面は、浸透流解析、安定解析に反映するため、可能な限り詳細な情報を得ることが必要である。そのため、電極間隔を2.0 mと狭く設定し、情報密度を高めた。また、堤外地側に測線を若干延長し、基礎地盤の情報も得られるような探査条件とした。
- ・ボーリング No.3 の土質柱状図から、表層～標高+10.5 m程度までシルト混じり砂礫、標高+10.5～+4.0 m程度までシルト、標高+4.0～0.0 m程度まで砂礫の分布がみられた。このことは比抵抗分布図とも対応しており、表層～標高+10.5 m程度に  $200 \Omega \cdot m$  以上の高比抵抗領域、標高+10.5～+4.0 m程度に  $80 \Omega \cdot m$  以下の低比抵抗領域、標高+4.0～0.0 m程度に  $80 \sim 200 \Omega \cdot m$  の領域が分布がみられた。一方ボーリング No.4 についても、土質柱状図および比抵抗分布図より、表層から1.5 m程度までのシルトを低比抵抗領域、1.5 m以深での砂礫を高比抵抗領域として判読され、土層構造と比抵抗値には非常によい整合があるといえる。
- ・標高0 m以深に関しては、高密度電気探査の探査特性に起因して、比抵抗分布図の探査精度が低下してくる領域であり、広く分布している  $120 \sim 65 \Omega \cdot m$  程度の比抵抗値を判断基準にすることには疑問が残る。一方で、5本のボーリング柱状図は、標高0.0 m～-4.7 mまでにシルト、標高-4.7 m～-9.2 mまでに細砂、標高-9.2 m以深にシルト、と標高0 m以深に関してすべて同様の傾向を示しており、信頼性が高いと考えられる。そのため、標高0 m以深に関しては、ボーリングにより得られた土質柱状図を参考に判断することにした。

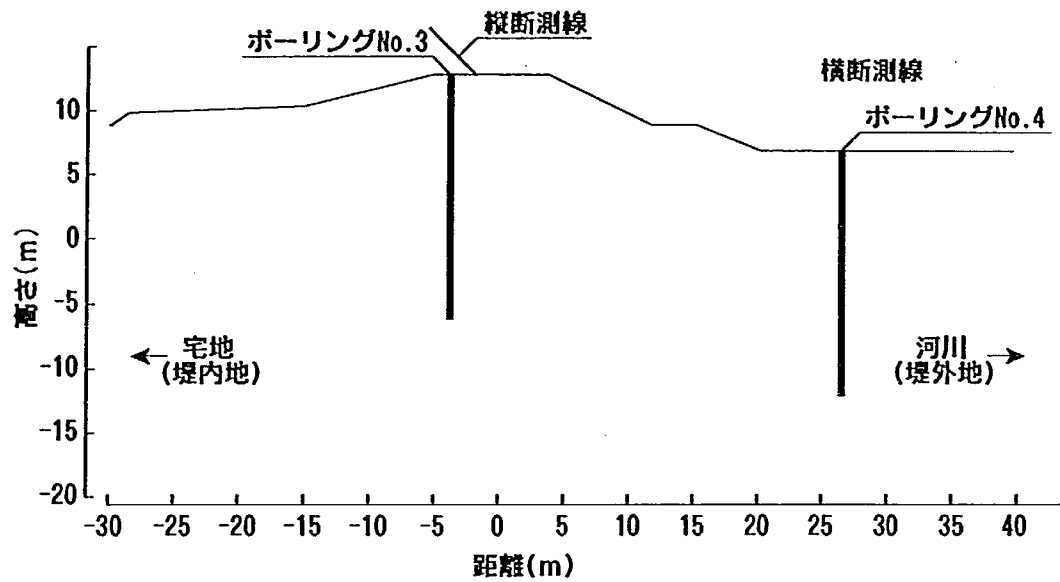


図 3.4 横断側線配置図

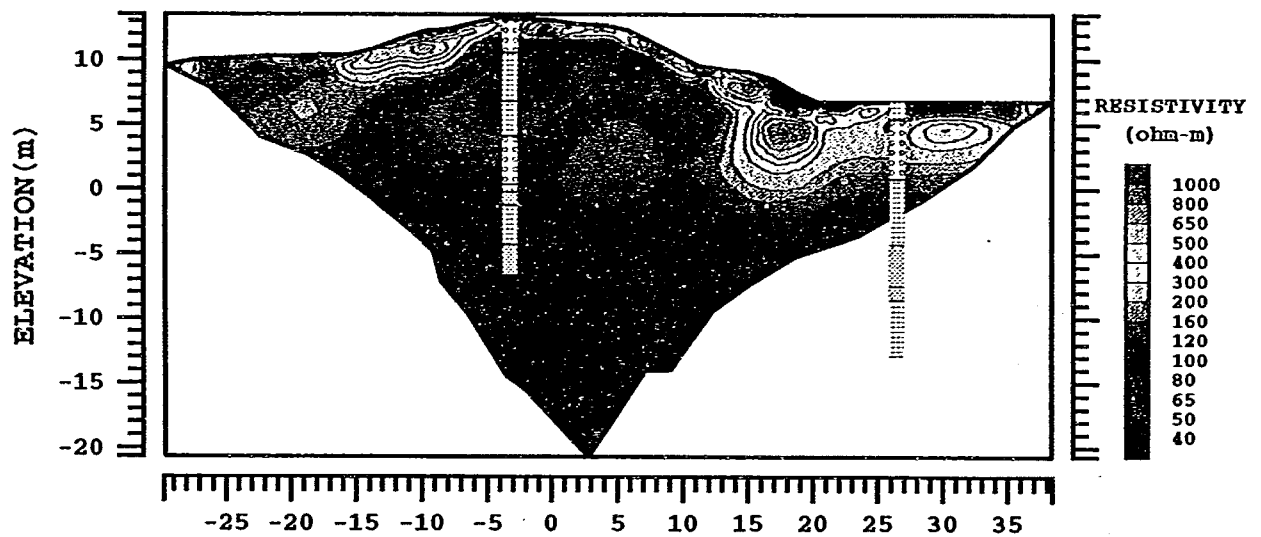


図 3.5 横断比抵抗分布図

・以上の結果から、堤防断面の内部構造を推定したものを図 3.6 に示す。なお、この推定図に関しては、浸透流解析を実施することを考慮して、礫の領域を広めにしたり、堤防の大きさを小さめにしたり、土質構成を直線的に評価するなど、浸透現象に関して全体的に危険側のモデルを構築しているため、通常の評価方法と異なることに注意する。

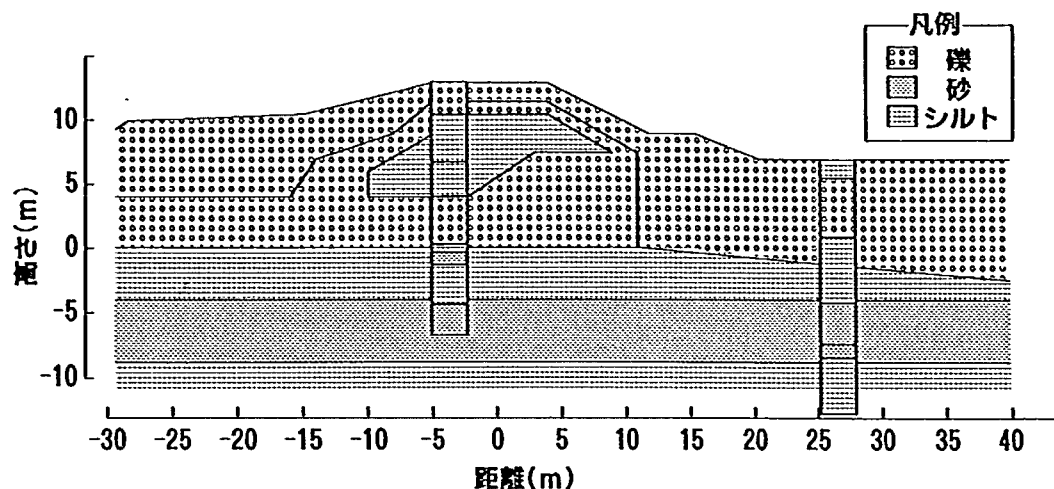


図 3.6 横断土質評価図

### 3.5 探査精度ならびに土質判別に関する検討結果

高密度電気探査手法の実践的な適用を考慮して、試験調査を行った結果、以下のことが得られた。

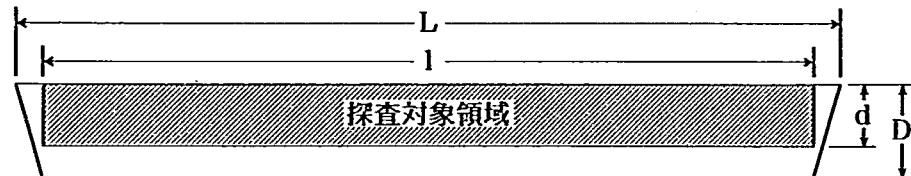
- ① 縦断探査により、探査対象延長の中で安定度の低い部位を発見することは可能であるとの結論が得られた。探査の結果、所々に高比抵抗領域が発見されたため確認ボーリングを実施した結果、高比抵抗領域には礫の存在が確認され、高比抵抗領域の切れ目には礫が発見されず、非常に結果の整合性がよかった。
- ② 横断探査および確認ボーリング調査により、詳細な堤防断面の作成は可能であるとの結論が得られた。探査の結果、比抵抗分布と確認ボーリングの柱状図とに非常によい整合性がみられた。



## 付録－2 高密度電気探査測定仕様決定表

### 1. ダイポール・ダイポール法探査仕様決定表 (例)

・探査対象区間長が1000m、探査対象深度が20mの場合に、ダイポール・ダイポール法を用いて計測を行う際には、以下の仕様に基づいて計測を行う。



探査対象区間長(1) = ① 1000 m  $\div$  ③の倍数に切上げ ⑤ 1000 m  
 探査対象深度(d) = ② 20 m  
 電極間隔(b) = ③ 2.5 m 0.5の倍数が望ましい  
 最大隔離係数(nmax) = ④ 5 通常5でよい

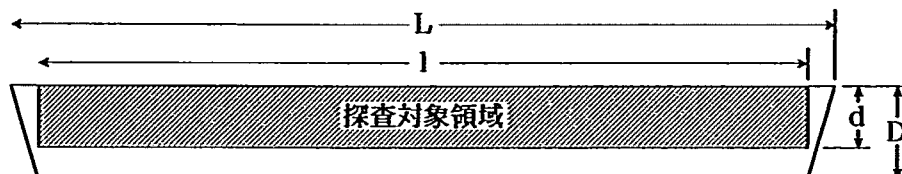
探査深度(D) = ②  $\times$  1.5 = ⑥ 30 m = ③の倍数に切上げ ⑦ 30 m  
 最大ダイポール長(amax) = ⑦  $\times$  2  $\div$  (④ + 1) = ⑧ 10 m = ③の倍数に切上げ ⑨ 10 m  
 測線長(L) = ⑤ + ⑦  $\times$  2 + ⑨ = ⑩ 1070 m  
 のべ電極数 = (⑩  $\div$  ③) + 1 = ⑪ 429 電極

※以下、手持ちの電極数が⑪に満たない場合、複数展開にするための計算

残し電極数 = ⑨  $\times$  (④ + 2)  $\div$  ③ = ⑫ 28 電極  
 手持ち電極数 = ⑬ 100 電極  
 展開数 = (⑪ - ⑫)  $\div$  (⑬ - ⑫) = ⑭ 5.6 展開 = 整数に切上げ ⑮ 6 展開  
 最終展開電極数 = ⑪ - (⑮ - 1)  $\times$  (⑬ - ⑫) = ⑯ 69 電極

## 2. ウェンナー法探査仕様決定表 (例)

・探査対象区間長が1000m、探査対象深度が20mの場合に、ウェンナー法を用いて計測を行う際には、以下の仕様に基づいて計測を行う。



$$\text{探査対象区間長}(l) = \text{① } 1000 \text{ m} \quad \overset{\text{③の倍数に切上げ}}{\div} \text{⑤ } 1000 \text{ m}$$

$$\text{探査対象深度}(d) = \text{② } 20 \text{ m}$$

$$\text{電極間隔}(b) = \text{③ } 2.0 \text{ m} \quad \overset{\text{0.5の倍数が望ましい}}{\div}$$

$$\text{測定深度}(D) = \text{②} \times 1.5 = \text{⑥ } 30 \text{ m} \quad \overset{\text{③の倍数に切上げ}}{=} \text{⑦ } 30 \text{ m}$$

$$\text{最大電極間隔}(a_{\max}) = \text{⑦} = \text{⑧ } 30 \text{ m}$$

$$\text{測線長}(L) = \text{⑤} + \text{⑦} \times 3 = \text{⑩ } 1090 \text{ m}$$

$$\text{のべ電極数} = (\text{⑩} \div \text{③}) + 1 = \text{⑪ } 546 \text{ 電極}$$

※以下、手持ちの電極数が⑪に満たない場合、複数展開にするための計算

$$\text{残し電極数} = (\text{⑧} \times 3) \div \text{③} = \text{⑫ } 45 \text{ 電極}$$

$$\text{手持ち電極数} = \text{⑬ } 100 \text{ 電極}$$

$$\text{展開数} = (\text{⑪} - \text{⑫}) \div (\text{⑬} - \text{⑫}) = \text{⑭ } 9.1 \text{ 展開} \quad \overset{\text{整数に切上げ}}{=} \text{⑮ } 10 \text{ 展開}$$

$$\text{最終展開電極数} = \text{⑪} - (\text{⑬} - 1) \times (\text{⑮} - \text{⑫}) = \text{⑯ } 51 \text{ 電極}$$

# 1. ダイポール・ダイポール法探査仕様決定表

$$\text{探査対象区間長}(l) = \text{①} \text{ m} \quad \div \quad \overset{\text{③の倍数に切上げ}}{\text{⑤}} \text{ m}$$

$$\text{探査対象深度}(d) = \text{②} \text{ m}$$

$$\text{電極間隔}(b) = \text{③} \text{ m} \quad \text{0.5の倍数が望ましい}$$

$$\text{最大隔離係数}(n_{\max}) = \text{④} \quad \text{通常5でよい}$$

$$\text{探査深度}(D) = \text{②} \times 1.5 = \text{⑥} \text{ m} \quad \overset{\text{③の倍数に切上げ}}{=} \text{⑦} \text{ m}$$

$$\text{最大ダイポール長}(a_{\max}) = \text{⑦} \times 2 \div (\text{④} + 1) = \text{⑧} \text{ m} \quad \overset{\text{③の倍数に切上げ}}{=} \text{⑨} \text{ m}$$

$$\text{測線長}(L) = \text{⑤} + \text{⑦} \times 2 + \text{⑨} = \text{⑩} \text{ m}$$

$$\text{のべ電極数} = (\text{⑩} \div \text{③}) + 1 = \text{⑪} \text{ 電極}$$

※以下、手持ちの電極数が⑪に満たない場合、複数展開にするための計算

$$\text{残し電極数} = \text{⑨} \times (\text{④} + 2) \div \text{③} = \text{⑫} \text{ 電極}$$

$$\text{手持ち電極数} = \text{⑬} \text{ 電極}$$

$$\text{展開数} = (\text{⑪} - \text{⑫}) \div (\text{⑬} - \text{⑫}) = \text{⑭} \text{ 展開} \quad \overset{\text{整数に切上げ}}{=} \text{⑮} \text{ 展開}$$

$$\text{最終展開電極数} = \text{⑪} - (\text{⑮} - 1) \times (\text{⑬} - \text{⑫}) = \text{⑯} \text{ 電極}$$

## 2. ウェンナー法探査仕様決定表

$$\text{探査対象区間長}(l) = \text{①} \text{ m} \quad \overset{\text{③の倍数に切上げ}}{=} \text{⑤} \text{ m}$$

$$\text{探査対象深度}(d) = \text{②} \text{ m}$$

$$\text{電極間隔}(b) = \text{③} \text{ m} \quad \overset{\text{0.5の倍数が望ましい}}{}$$

$$\text{測定深度}(D) = \text{②} \times 1.5 = \text{⑥} \text{ m} \quad \overset{\text{③の倍数に切上げ}}{=} \text{⑦} \text{ m}$$

$$\text{最大電極間隔}(a_{\max}) = \text{⑦} = \text{⑧} \text{ m}$$

$$\text{測線長}(L) = \text{⑤} + \text{⑦} \times 3 = \text{⑩} \text{ m}$$

$$\text{のべ電極数} = (\text{⑩} \div \text{③}) + 1 = \text{⑪} \text{ 電極}$$

※以下、手持ちの電極数が⑪に満たない場合、複数展開にするための計算

$$\text{残し電極数} = (\text{⑧} \times 3) \div \text{③} = \text{⑫} \text{ 電極}$$

$$\text{手持ち電極数} = \text{⑬} \text{ 電極}$$

$$\text{展開数} = (\text{⑪} - \text{⑫}) \div (\text{⑬} - \text{⑫}) = \text{⑭} \text{ 展開} \quad \overset{\text{整数に切上げ}}{=} \text{⑮} \text{ 展開}$$

$$\text{最終展開電極数} = \text{⑪} - (\text{⑮} - 1) \times (\text{⑬} - \text{⑫}) = \text{⑯} \text{ 電極}$$

## 付録－3 品質管理図の作成法

本節では、本文中の6.1.2データの品質管理、(3)品質管理図の作成で述べた、②一次元表示による品質管理手法の具体的な作成法について記述する。

以下に、ウインドウシステム上の表計算ソフトにより、ダイポール・ダイポール法電極配置で測定したデータに対して、共通電極間隔表示で品質管理図を作成した例を示す。

### ① データの入力

表計算ソフトを起動し、ファイル(F)ー開く(O)で測定データを読み込む。入力した測定データの書式が以下と異なる場合は、測定電極番号、通電電流、測定電位のデータがどこに読み込まれているかに注意する(図－1)。

### ② 見掛け抵抗等の計算

グラフ作成の際に必要な各パラメータを計算する。例では、G列に電極間隔、H列に電極中心位置、I列に見掛け抵抗値を配置した。具体的には、

G 4に  $ABS(ABS(A4+B4)/2-ABS(C4+D4)/2)$

見掛け抵抗値の表示点深度の計算

H 4に  $ABS(ABS(A4+B4)/2+ABS(C4+D4)/2)/2$

4電極の中心点の電極番号の計算

I 4に  $E4/F4$

見掛け抵抗値の計算

を、各々入力し、最下行までコピーする(図－2)。

| 品質管理                                             |                  |      |      |      |         |        |  |  |  |
|--------------------------------------------------|------------------|------|------|------|---------|--------|--|--|--|
| ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ワークシート(W) ヘルプ(H) |                  |      |      |      |         |        |  |  |  |
| データ(D) ウィンドウ(W) ?                                |                  |      |      |      |         |        |  |  |  |
| A1 B1 C1 D1 E1 F1 G1 H1 I1                       |                  |      |      |      |         |        |  |  |  |
| 1                                                | ダイポール・ダイポール法電極配置 |      |      |      |         |        |  |  |  |
| 2                                                | 電流電極             | 電位電極 | 通電電流 | 測定電位 |         |        |  |  |  |
| 3                                                | P1               | P2   | C1   | C2   | (μV)    | (μA)   |  |  |  |
| 4                                                | 38               | 40   | 42   | 44   | 22.97   | 72.79  |  |  |  |
| 5                                                | 39               | 41   | 43   | 45   | 77.51   | 148.38 |  |  |  |
| 6                                                | 40               | 42   | 44   | 46   | 34.04   | 82.73  |  |  |  |
| 7                                                | 41               | 43   | 45   | 47   | 73.22   | 162.45 |  |  |  |
| 8                                                | 42               | 44   | 46   | 48   | 48.24   | 88.96  |  |  |  |
| 9                                                | 43               | 45   | 47   | 49   | 53.32   | 147.40 |  |  |  |
| 10                                               | 44               | 46   | 48   | 50   | 66.93   | 142.27 |  |  |  |
| 11                                               | 45               | 47   | 49   | 51   | 130.95  | 106.13 |  |  |  |
| 12                                               | 46               | 48   | 50   | 52   | 248.45  | 223.84 |  |  |  |
| 13                                               | 47               | 49   | 51   | 53   | 235.92  | 120.42 |  |  |  |
| 14                                               | 48               | 50   | 52   | 54   | 1340.45 | 556.05 |  |  |  |
| 15                                               | 49               | 51   | 53   | 55   | 430.96  | 130.04 |  |  |  |
| 16                                               | 50               | 52   | 54   | 56   | 1123.19 | 344.75 |  |  |  |
| 17                                               | 51               | 53   | 55   | 57   | 1323.58 | 248.12 |  |  |  |
| 18                                               | 52               | 54   | 56   | 58   | 1255.52 | 256.67 |  |  |  |

図－1 データの入力

| 品質管理                                                  |                  |      |      |      |         |        |      |        |        |
|-------------------------------------------------------|------------------|------|------|------|---------|--------|------|--------|--------|
| ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ワークシート(W) ヘルプ(H)      |                  |      |      |      |         |        |      |        |        |
| データ(D) ウィンドウ(W) ?                                     |                  |      |      |      |         |        |      |        |        |
| I4 J4 K4 L4 M4 N4 O4 P4 Q4 R4 S4 T4 U4 V4 W4 X4 Y4 Z4 |                  |      |      |      |         |        |      |        |        |
| 1                                                     | ダイポール・ダイポール法電極配置 |      |      |      |         |        |      |        |        |
| 2                                                     | 電流電極             | 電位電極 | 通電電流 | 測定電位 |         |        |      |        |        |
| 3                                                     | P1               | P2   | C1   | C2   | (μV)    | (μA)   | 電極間隔 | 電極中心位置 | 見掛け抵抗  |
| 4                                                     | 38               | 40   | 42   | 44   | 22.97   | 72.79  | 4.00 | 41.00  | 0.3156 |
| 5                                                     | 39               | 41   | 43   | 45   | 77.51   | 148.38 | 4.00 | 42.00  | 0.5223 |
| 6                                                     | 40               | 42   | 44   | 46   | 34.04   | 82.73  | 4.00 | 43.00  | 0.4115 |
| 7                                                     | 41               | 43   | 45   | 47   | 73.22   | 162.45 | 4.00 | 44.00  | 0.4507 |
| 8                                                     | 42               | 44   | 46   | 48   | 48.24   | 88.96  | 4.00 | 45.00  | 0.5423 |
| 9                                                     | 43               | 45   | 47   | 49   | 53.32   | 147.40 | 4.00 | 46.00  | 0.3618 |
| 10                                                    | 44               | 46   | 48   | 50   | 66.93   | 142.27 | 4.00 | 47.00  | 0.4704 |
| 11                                                    | 45               | 47   | 49   | 51   | 130.95  | 106.13 | 4.00 | 48.00  | 1.2331 |
| 12                                                    | 46               | 48   | 50   | 52   | 248.45  | 223.84 | 4.00 | 49.00  | 1.0910 |
| 13                                                    | 47               | 49   | 51   | 53   | 235.92  | 120.42 | 4.00 | 50.00  | 1.9531 |
| 14                                                    | 48               | 50   | 52   | 54   | 1340.45 | 556.05 | 4.00 | 51.00  | 2.4107 |
| 15                                                    | 49               | 51   | 53   | 55   | 430.96  | 130.04 | 4.00 | 52.00  | 2.2577 |
| 16                                                    | 50               | 52   | 54   | 56   | 1123.19 | 344.75 | 4.00 | 53.00  | 3.2577 |
| 17                                                    | 51               | 53   | 55   | 57   | 1323.58 | 248.12 | 4.00 | 54.00  | 5.3344 |
| 18                                                    | 52               | 54   | 56   | 58   | 1255.52 | 256.67 | 4.00 | 55.00  | 5.0474 |

図－2 見掛け抵抗値等の計算

### ③ データの並べ替え

データの順番を正すため、データの並べ替えを行う。

まず、G、H、I列のデータが存在する範囲を選択し、編集(E)→コピー(C)を実行、そのまま編集(E)→形式を選択して貼り付け(s)、文字/数値(v)を指定し、②で計算した結果を数値化する(図-3)。

次に、データ(D)→並べ換え(s)で、最優先されるキー(s)に列G(電極間隔)、昇順(A)、2番目に優先されるキー(T)に列H(電極中心)、昇順(C)を指定し、並べ替えを実行する(図-4)。

| 品質管理                                  |                                   |    |    |    |       |        |      |       |         |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----|----|----|-------|--------|------|-------|---------|
| ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) マル(M) |                                   |    |    |    |       |        |      |       |         |
| データ(D) ウンドゥ(W) ?                      |                                   |    |    |    |       |        |      |       |         |
| G4 3 4                                |                                   |    |    |    |       |        |      |       |         |
| =ABS(A8S(A4+C4)/2-ABS(C4+D4)/2)       |                                   |    |    |    |       |        |      |       |         |
| A                                     | B                                 | C  | D  | E  | F     | G      | H    | I     |         |
| 1                                     | ダイポール・ダイポール法電極配置                  |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 2                                     | 電圧電極 電位電極 通電電圧 測定電位               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 3                                     | F1                                | F2 | C1 | C2 | (V)   | (A)    | 電極間隔 | 電極中心  | 電極間隔比抵抗 |
| 4                                     | 38                                | 40 | 42 | 44 | 22.97 | 72.75  | 4.00 | 41.00 | 0.3125  |
| 5                                     | 39                                | 41 | 43 | 45 | 77.51 | 143.38 | 4.00 | 42.00 | 0.5223  |
| 6                                     | 形式を選択して貼り付け                       |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 7                                     | 貼り付け                              |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 8                                     | すべて(A) 数式(D) 文字/数値(V) 書式(O) メモ(M) |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 9                                     | しきい値(I) 加算(S) 減算(S) 乗算(M) 除算(D)   |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 10                                    | OK 貼り付け 貼り付け(O)                   |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 11                                    | 43.00 0.4115                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 12                                    | 空白セルを無視(N) 行の入れ替え(E)              |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 13                                    | 44.00 0.4507                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 14                                    | 45.00 0.5423                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 15                                    | 46.00 0.3618                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 16                                    | 47.00 0.4704                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 17                                    | 48.00 1.2331                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 18                                    | 49.00 1.0810                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 19                                    | 50.00 1.9591                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 20                                    | 51.00 2.4107                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 21                                    | 52.00 2.3577                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 22                                    | 53.00 3.2577                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 23                                    | 54.00 5.3344                      |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 24                                    | 55.00 5.0474                      |    |    |    |       |        |      |       |         |

図-3 データの数値化

| 品質管理                                  |                            |    |    |    |       |        |      |       |         |
|---------------------------------------|----------------------------|----|----|----|-------|--------|------|-------|---------|
| ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) マル(M) |                            |    |    |    |       |        |      |       |         |
| データ(D) ウンドゥ(W) ?                      |                            |    |    |    |       |        |      |       |         |
| G4 3 4                                |                            |    |    |    |       |        |      |       |         |
| =ABS(A8S(A4+C4)/2-ABS(C4+D4)/2)       |                            |    |    |    |       |        |      |       |         |
| A                                     | B                          | C  | D  | E  | F     | G      | H    | I     |         |
| 1                                     | ダイポール・ダイポール法電極配置           |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 2                                     | 電圧電極 電位電極 通電電圧 測定電位        |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 3                                     | F1                         | F2 | C1 | C2 | (V)   | (A)    | 電極間隔 | 電極中心  | 電極間隔比抵抗 |
| 4                                     | 38                         | 40 | 42 | 44 | 22.97 | 72.75  | 4.00 | 41.00 | 0.3125  |
| 5                                     | 39                         | 41 | 43 | 45 | 77.51 | 143.38 | 4.00 | 42.00 | 0.5223  |
| 6                                     | 並べ替え                       |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 7                                     | 最優先されるキー(S) 昇順(A) 降順(D)    |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 8                                     | OK 貼り付け 貼り付け(O)            |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 9                                     | 43.00 0.4115               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 10                                    | 2番目に優先されるキー(T) 昇順(A) 降順(D) |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 11                                    | 電極中心 貼り付け(O)...            |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 12                                    | 44.00 0.4507               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 13                                    | 45.00 0.5423               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 14                                    | 46.00 0.3618               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 15                                    | 47.00 0.4704               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 16                                    | 48.00 1.2331               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 17                                    | 49.00 1.0810               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 18                                    | 50.00 1.9591               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 19                                    | 51.00 2.4107               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 20                                    | 52.00 2.3577               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 21                                    | 53.00 3.2577               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 22                                    | 54.00 5.3344               |    |    |    |       |        |      |       |         |
| 23                                    | 55.00 5.0474               |    |    |    |       |        |      |       |         |

図-4 データの並べ替え

#### ④ データのグラフ化

並べ替えたデータをグラフ化して品質管理図を作成する。

まず、H、I列のデータが存在する範囲を選択して、挿入(I)→グラフ(H)→埋め込みグラフ(O)で、散布図(S)を指定し(図-5)、③で並べ替えた結果をグラフ化する(図-6)。

グラフ化したら、必要に応じて縦軸を対数軸に変更すると見やすくなる。

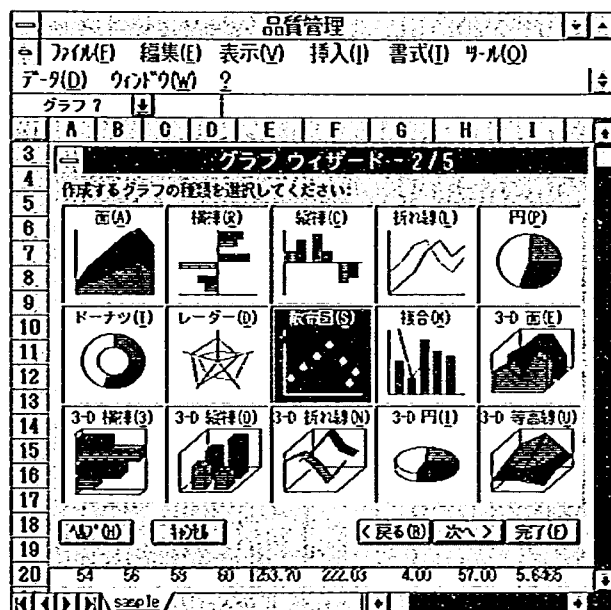


図-5 散布図の指定

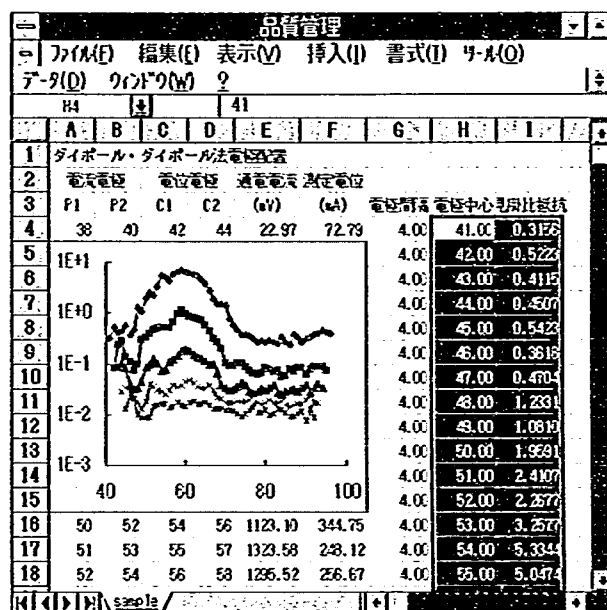


図-6 グラフ化の結果

品質管理図を作成したら、水平方向の連続性を検討し、特異な点を発見したらデータを削除するなどして、データの品質を向上する。