

河川堤防における非破壊調査手法の研究

－非破壊調査手法の検討と物理探査の適用－

小西 千里・林 宏一・阿部 知之・田中 敏彦

A study of nondestructive investigation methods for a levee

- A study and an application of geophysical methods -

Chisato Konishi, Koichi Hayashi, Tomoyuki Abe and Toshihiko Tanaka

Abstract

For a safety evaluation of a levee, it is important to estimate materials of the body and foundation of the levee. However, the total distance of the existing levee is too long to carry out investigations. Therefore an effective and low-cost investigation method is desired now. For the purpose of the development of cost effective investigation for the levee, we conducted the field experiment of nondestructive investigation using various kinds of geophysical prospecting at Kuwano river in Tokushima prefecture. Applied methods are electrical methods (Ohmmapper, dipole-dipole array), electromagnetic method (GEM-300), and surface wave method. Electrical and electromagnetic methods have been used to estimate resistivity of the body and foundation of the levee. The surface wave method has been used to estimate shear wave velocity and the stiffness of the levee.

In this paper, various survey results are shown and two procedures are explained. One is a way to discriminate soil materials using crossplot of shear wave velocity and resistivity of the ground. The other is a way to develop a new geological profile using existing geological information and obtained geophysical prospecting results. Additionally, an effective investigation method for a levee survey is also proposed.

Keywords: levee, nondestructive investigation, geophysical methods, Shear wave velocity, resistivity

(要 旨)

河川堤防の安全性評価においては、堤体や基礎地盤の土質等の地盤情報を的確に把握することが重要であるが、対象とする堤防の延長距離が長いことから、効率的かつ低コストの調査手法の開発が求められている。筆者らは河川堤防における効率的な調査手法の開発を目的として、徳島県の桑野川堤防において各種非破壊調査手法の適用性に関する比較調査を実施した。適用した非破壊調査は、電気探査（牽引式電気探査、ダイポール・ダイポール法）電磁探査（GEM300）、表面波探査の3種類の物理探査である。電気探査と電磁探査は、地盤の比抵抗分布から堤体と基礎地盤の土質分布を推定することを目的として実施した。表面波探査は、地盤のS波速度分布から堤体と基礎地盤の土質、および地盤の概略的な強度分布を推定することを目的として実施した。

本論文では、各探査の結果を示すとともに、得られた比抵抗とS波速度から堤体および基礎地盤の土質区分を行う方法と、既存の推定土質断面図を元に探査結果を考慮した土質断面図を作成する方法を提案した。また、堤防調査における非破壊調査の有効な適用方法についても提案した。

キーワード：河川堤防，非破壊調査，物理探査，S波速度，比抵抗

1. はじめに

河川堤防は治水施設の根幹をなすものであり、洪水等で堤防がその機能を喪失または低下することを回避するため、順次点検が行われている¹⁾。堤防点検にあたっては、まず既往報告書、旧地形図、地形分類図、築堤履歴、被災履歴といった既存資料を整理することにより、安全性検討箇所選定のための調査が行われる。この調査結果は現況堤防縦断面図として整理され、この結果をもとにして安全性検討の代表断面が選定される。

次に安全性照査のための調査が行われる。河川堤防の浸透による被害は、降雨および河川水の浸透により堤体内の浸潤面が上昇し起こるすべり破壊（浸潤破壊）と、基礎地盤の浸透圧の上昇によるパイピング破壊（浸透破壊）が主なものである。これらの浸透に対する安全性の照査のためには、照査を行う断面の土質構成、透水特性、強度特性が必要とされる²⁾。現状これらの特性を求める方法として、ボーリングなどによる点の調査を実施しているが^{3) 4)}、堤防の築堤履歴や河道の変遷の歴史等を考えれば、堤体材料の不均質性や基礎地盤の複雑さをボーリング調査のような点のみの調査で把握することには限界があると考えられる。また、膨大な延長をもつ既存河川堤防に対しては調査費用が増大するという経済的な問題もある。

こうした課題を補う手法として、非破壊調査によって堤体や基礎地盤の土質分布状況を効率的かつ連続的に把握することができれば、堤防の安全性を評価する上できわめて有効な情報となる。また、非破壊的な物理探査手法と従来のボーリング調査を組み合わせることで、これまでの手法に比べ、効率的に精度よく、低コストで堤防の安全性を評価できると考えられる。

そこで、河川堤防における効率的な調査手法の開発を目的として、徳島県の桑野川堤防において各種物理探査を実施し、それらの適用性について検討した。

2. 河川堤防における非破壊調査のニーズ

河川堤防は長い治水の歴史の中で土により築造されてきた構造物であり、以下に示すような特性を有している。

- 連続する堤防は長い延長をもつ線状構造物である。
- 堤防は、築造箇所の選択ができないため、多種多様な地盤条件の上に築造されている。（旧河道・落堀跡・自然堤防縁辺部など堤防の安定上問題となる地形の上を通過することを余儀なくされる。）
- 堤体は種々の土質材料から構成され、内部の土質構成は複雑である。

堤防の調査においては、これらの特性を十分に考慮して調査を行う必要がある。ここでは、河川堤防の調査において考慮すべき事項をまとめ、非破壊調査手法の主なニーズを示す。

2.1 堤防縦断方向の土質構成の把握

堤防の浸透に対する安全性を評価する上では、堤体と基礎地盤の土質構成を可能な限り詳細に把握する必要がある。また地震時の液状化の問題を考える場合にも土質構成を詳細に把握することは重要である。

現状では、ボーリング調査が1～2kmの間隔で実施されているが⁵⁾、必ずしも十分とはいえず、またこれ以上密な間隔で調査を実施することも効率性や経済性の点で難しい面がある。したがって、非破壊調査によりボーリング調査結果を補完して、より連続的に堤防の縦断方向の土質構成を把握できれば、詳細調査区間の選定や安全性評価の精度向上にも役立つ、その意義は大きいと考えられる。

2.2 堤防横断方向の土質構成の把握

河川堤防の多くは、古くは自然状態の河道に合わせて築堤したことに始まり、以後は災害のたびごとに、嵩上げや拡幅等を繰り返して現在の姿に至っている。築堤材料や施工方法も時代によって様々であり、堤体内の横断方向の土質構成は、築堤履歴に応じてきわめて複雑な状況にあることが多い。

河川堤防の浸透に対する安全性の詳細点検では、堤防横断方向に3本以上のボーリング調査を実施して堤体内の土質構成の把握を行うことを基本としているが⁶⁾、築堤履歴に関する情報が少ない状態でボーリング調査結果のみをもとにして横断方向の土質構成を推定することは、困難な場合が多い。また、ボーリング調査を3本以上実施することはさらに調査費用を必要とする。したがって、非破壊調査によりボーリング調査結果を補完して堤防横断方向の土質構成を把握できれば、個々の検討断面に対する安全性評価をより適切に行うことが可能となるほか、調査経費の面からも有利となり、その意義は大きいものと考えられる。

2.3 弱点箇所の抽出

河川堤防の安全性を評価する上では、洪水や地震に対して問題となる弱点箇所を広範囲にかつ効率的に抽出することが求められる。

これらの弱点箇所を確実に把握するには、点の調査では限界があるため、線的あるいは面的な調査手法を適用することが望ましく、非破壊調査手法の適用が期待される。例えば、浸透に対して問題となる弱点箇所としては、以下のものがあげられる。

(1) 要注意地形の分布箇所

要注意地形には以下のものがある。

① 旧河道

新しい旧河道では砂・礫の河床堆積物がそのまま残り、古い時代に形成された旧河道では昔の河床の砂・礫の上

にシルト質の土砂（粘性土等）が覆っている。この粘性土は工学的には強度がきわめて弱く、堤防裏のり側にこの旧河道の粘性土があった場合には法すべりの原因となりやすい。また、旧河道に砂礫が堆積する場合には、洪水時には現河床から河川水が流入し、あるいは降雨水が旧河道沿いに地下水として流れるので、堤内側に高い水圧が作用することになる。したがって、高水時にはこの旧河道沿いに漏水やボイリングを起こしやすい。

② 落堀・旧落堀

過去の破堤でできた池または池の跡で、現在も池または湿地帯で残っているものもあるが、埋められたものも多い。これらが堤防に接して存在していると、地形的に標高が低いので漏水を生じやすい。また、降雨で湛水しやすいために裏のり側の堤体のり尻の強度を低くする原因となる。

③ 旧川微高地

かつての河川の中に形成された砂州などの微高地で、地質は砂、礫の透水層で構成されることから、高水時に基盤漏水の原因となることが多い。

(2) 基礎地盤内の異物や空洞

地中に丸太、材木、石、コンクリート塊等の異物が存在すると、洪水時に弱点箇所になりやすい。このような異物は、旧落堀や旧水路跡などに存在する可能性がある。

また、過去にパイピングが生じた箇所などでは、地中に空洞が残っている場合があり、高水時に漏水やパイピングの発生原因となりやすい。

(3) 構造物周辺の堤体内の緩みや空洞

樋門や水門等の構造物周辺では、設置後に堤防の沈下が発生し、堤体内に緩みや空洞が発生する場合がある。この部分は、高水時に漏水やパイピングの発生原因となりやすい⁷⁾。

(4) 護岸背面等の空洞や堤体内の異物

護岸の変状等に伴い、護岸背面の土砂が吸出しを受け、護岸背面に空洞が生じることがある。また、施工時期が古い堤防では、築堤時の異物（ガレキ、木）が残存している可能性がある。これらの存在は、高水時に緩み域や空洞を拡大させ、パイピングを助長する恐れがある。このような箇所では、侵食に対して護岸機能が失われる恐れがある。

以上より、河川堤防の調査・設計体系における非破壊調査のニーズを総括すると表-1、図-1のようになる。

3. 非破壊調査の適用実験

先にまとめた堤防調査における非破壊調査のニーズに対して物理探査手法の適用性を検討するため、実際の堤

防において現場実験を実施した。

3.1 現場実験を行った地点の概要

各種物理探査の適用性評価実験を実施した地点は、徳島県阿南市を流れる那賀川の支流である桑野川の左岸、距離標 60k～78k の区間である。那賀川流域は日本有数の多雨地帯といわれており、支流の桑野川でも豪雨による洪水被害が起こっているが、既存資料によれば調査区間の堤体には被災履歴はなく、護岸・根固めの被災が記録されているのみである。

桑野川の堤防は昭和23～36年に築堤されたものであり、築堤履歴は明らかではない。調査区間には2箇所の樋門が存在する。調査区間を図-2に示す。

3.2 物理探査の適用性評価実験

3.2.1 実施内容

桑野川で適用した物理探査手法は、電気探査（牽引式電気探査、ダイポール・ダイポール法）、電磁探査（GEM300）、表面波探査である。電気探査や電磁探査は、地盤の比抵抗分布から堤体と基礎地盤の土質分布を推定することを目的として実施した。表面波探査は、地盤のS波速度分布から堤体と基礎地盤の土質分布、および地盤の強度分布を推定することを目的として実施した。

今回の実験では、測定上および現場条件の制約等から堤防縦断方向の測線を中心に測定を行った。縦断方向の測線は、アスファルト舗装した堤防天端上と、堤内側と堤外側の堤防法尻の合計3測線を設けた（図-3）。堤防横断方向の測定は比抵抗電気探査のみを部分的に行った。

今回の現場実験で適用した物理探査手法とその目的を表-2に示す。

表-1 堤防の安全性照査・設計に係る現状の調査手法と非破壊調査適用のニーズ

Table 1 Existing investigation methods and requirements for nondestructive methods to assess and design levees

現象	調査対象	調査によって把握すべき事項	非破壊調査適用のニーズ	参照図	
地震	一般堤防部	縦断方向	●液状化層の分布範囲・層厚 ●砂質土のN値・粒度特性	●ボーリング地点間の土質構造の把握	図-a
		横断方向	●液状化層の分布範囲・層厚 ●砂質土のN値・粒度特性	●ボーリング地点間の土質構造の把握	図-b
浸透	一般堤防部	縦断方向	●堤体内の土質区分 ●基礎地盤における透水層の分布範囲・層厚 ●旧河道等の要注意地形の分布範囲	●ボーリング地点間の土質構造の把握	図-c
			●異物（木片、瓦礫等）の有無	●資料調査・現地観察では把握できない異常箇所の検出	
	横断方向	●堤体の土質構造 ●透水層および被覆土層の分布状況	●ボーリング地点間の地層の連続性や境界面の位置に関する推定精度の向上	図-d 図-e	
	構造物周辺	●樋門等構造物周辺における緩みや空洞の存在の有無・大きさ	●空洞の広がりや局所的な異常箇所の検出	図-f	
	堤防表のり面	●護岸背面の空洞の有無・大きさ	●現地観察では把握できない空洞の広がり	図-g	

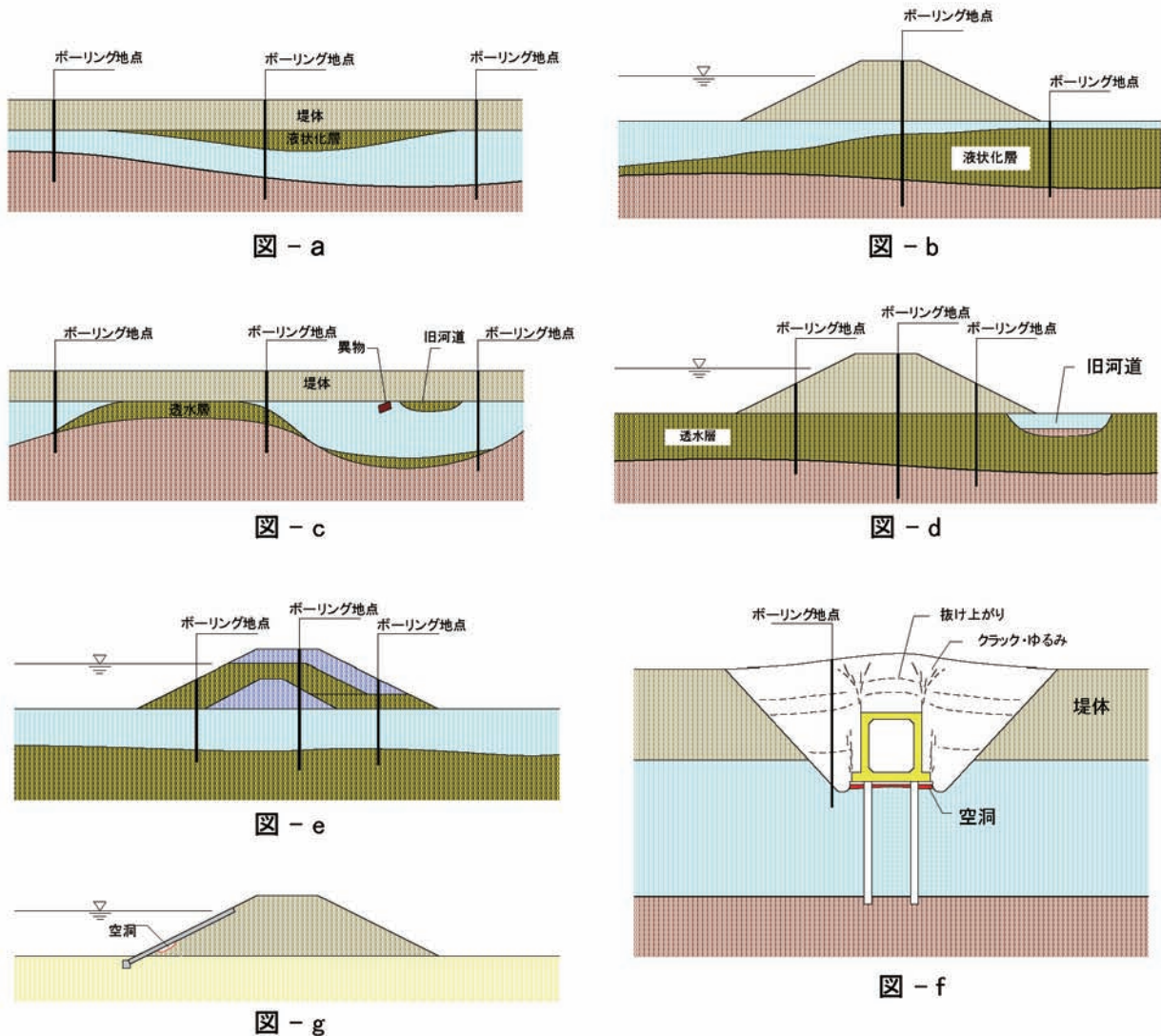


図-1 表-1の参考図

Fig.1 Description of Table 1

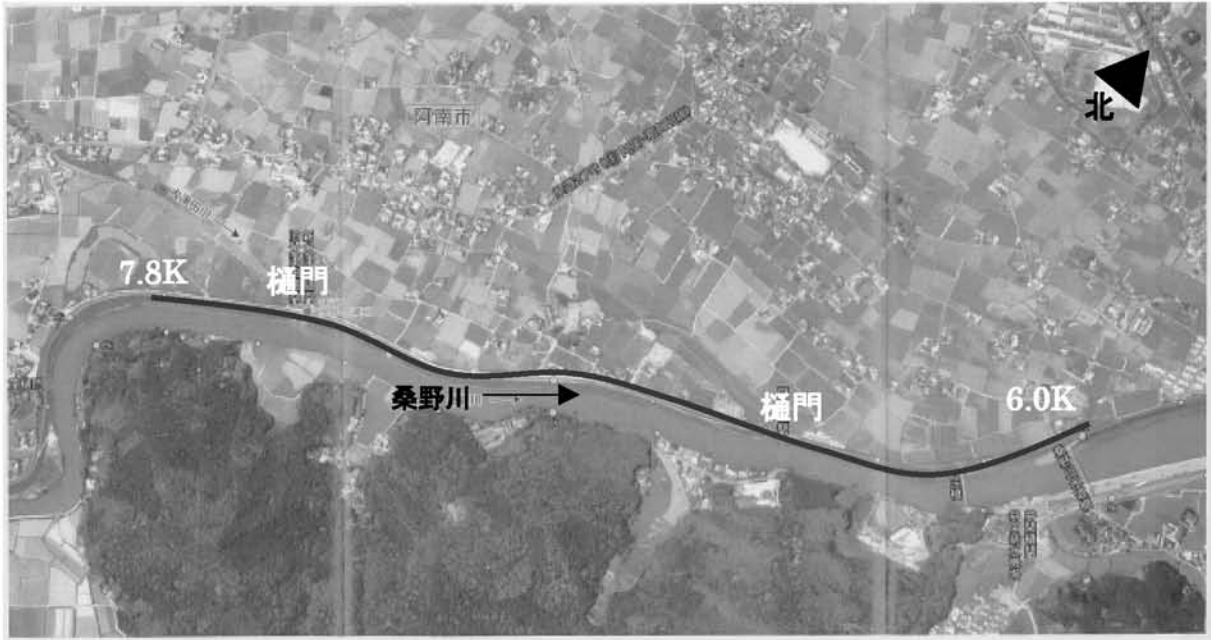


図-2 調査測線区間
 (桑野川航空写真 撮影：平成16年4月 縮尺 1:6500 国土交通省四国地方整備局 那賀川河川事務所⁸⁾に加筆)
 Fig. 2 Survey line

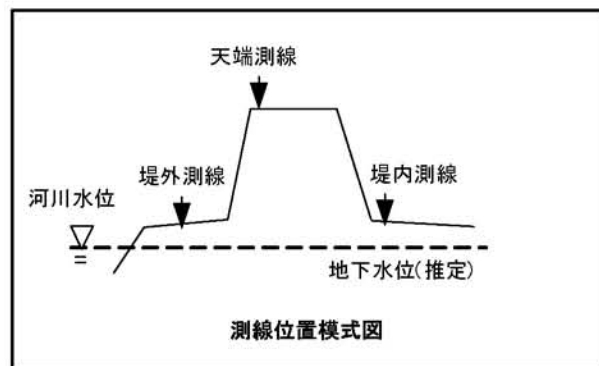


図-3 調査測線位置模式図(断面図)
 Fig. 3 Survey line (Profile)

表-2 適用した物理探査手法とその目的
 Table 2 Applied geophysical methods and their objectives

探査手法	得られる物理量	目的
牽引式電気探査	比抵抗	堤体および基礎地盤の土質区分
表面波探査	S波速度	堤体および基礎地盤の土質区分, 堤体の締まり具合の把握
EM探査 (GEM300)	導電率 (比抵抗)	堤体および基礎地盤の土質区分
比抵抗電気探査	比抵抗	堤体および基礎地盤の土質区分, 牽引式電気探査による探査結果との比較対比

3.2.2 各種物理探査手法の説明

各手法の原理・特徴、および今回の実験で考慮した事項などについて以下にまとめる。

■ 牽引式電気探査（オームマップパー）

牽引式電気探査（以下、オームマップパーと記す）は、従来の電気探査のように電極棒を打設する必要がない新しい電気探査手法である⁹⁾。したがって、得られる物理量としては、従来の電気探査と同様に比抵抗分布である。しかし、電極棒を打設する必要がないため作業効率ははるかに優れているという特徴があり、堤防調査のような長大測線で最も効果的な手法と期待される。ただし適用事例がそれほど多くないため、今回は測線のある区間において従来の電気探査を同一測線で実施し、従来の電気探査結果との比較を行った。

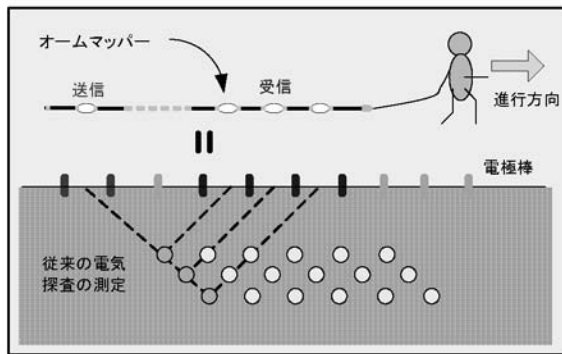


図-4 オームマップパー測定模式図

Fig. 4 Ohmmapper survey

■ 表面波探査

表面波探査は、地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を多チャンネルで測定・解析することにより、深度20m程度までの地盤のS波速度を求める技術である¹⁰⁾。S波速度は物質の硬さなど工学的な目安となる剛性率に関係する物理量であり、地盤の動的特性の把握・検討などには不可欠なパラメータである。

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots (1) \text{ 式}$$

V_s : S波速度, G : 剛性率, ρ : 密度

表面波探査を用いることで、広範囲のS波速度構造を容易に把握することが可能となる。表面波探査は、河川堤防の調査においても適用例が増えつつある。

■ EM探査

今回利用したGEM-300のシステムは、電磁探査法のひとつであり、周波数領域での電磁誘導現象を利用したものである¹¹⁾。GSSI社製のGEM-300は、19m長の棒状樹脂の中に、一方に送信コイル、他方に受信コイルが配置されており、測定者が1人で測定できる簡易なシステム

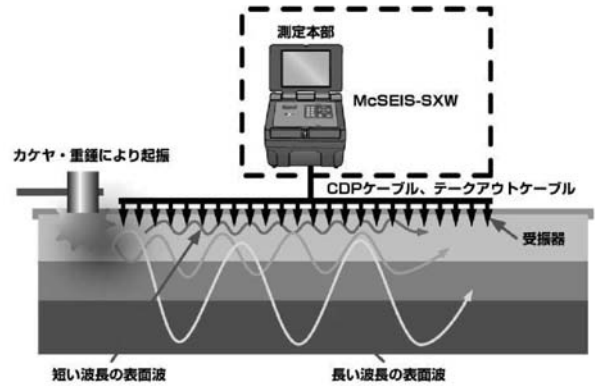


図-5 表面波探査測定模式図

Fig. 5 Surface wave methods

となっている。

EM探査では、地盤中に金属物のような導電性の高い物質があると周辺地盤との間に大きなコントラストが生じるため、導電性物質の埋設位置を検出することができる。そのため、これまでは金属探査などに多く利用されている。ただし今回は、得られる導電率（比抵抗の逆数）から地盤の土質分布を推定することを試みた。

■ 比抵抗電気探査

二次元比抵抗電気探査は、直流比抵抗法に基づく探査技術である。これは地盤に人工的に電流を流し、それによって生ずる電位分布を測定して、地盤内の電気比抵抗の分布を解析する方法である。地盤の比抵抗は、土質の種類（土粒子の比抵抗）や地層水比抵抗、間隙率、および飽和度等により変化する。すなわち、比抵抗はこれら土質パラメータの関数と考えられる。したがって、地盤の比抵抗からこれらの土質パラメータを推定することができる。

電気探査は、電極の配置方法によってポール・ポール法（二極法）、ポール・ダイポール法（三極法）、ダイポール・ダイポール法（四極法）といった測定方式があるが、今回の調査ではダイポール・ダイポール法による測定を行った。

3.3 物理探査結果

3.3.1 縦断方向の各種物理探査結果

堤体を対象として行った天端測線の各種物理探査結果を図-6に、基礎地盤を対象として行った測定のうち、堤外測線の結果を図-7に示す。EM探査で得られた導電率（比抵抗の逆数）の結果は用いた3つの周波数それぞれプロファイル図として図化した。なお、得られた導電率は相対的な値であり、見掛け導電率として表した。オームマップパー、表面波探査の結果はそれぞれ断面図として表示した。

EM探査、オームマップパーはともに地盤の電気的な特性

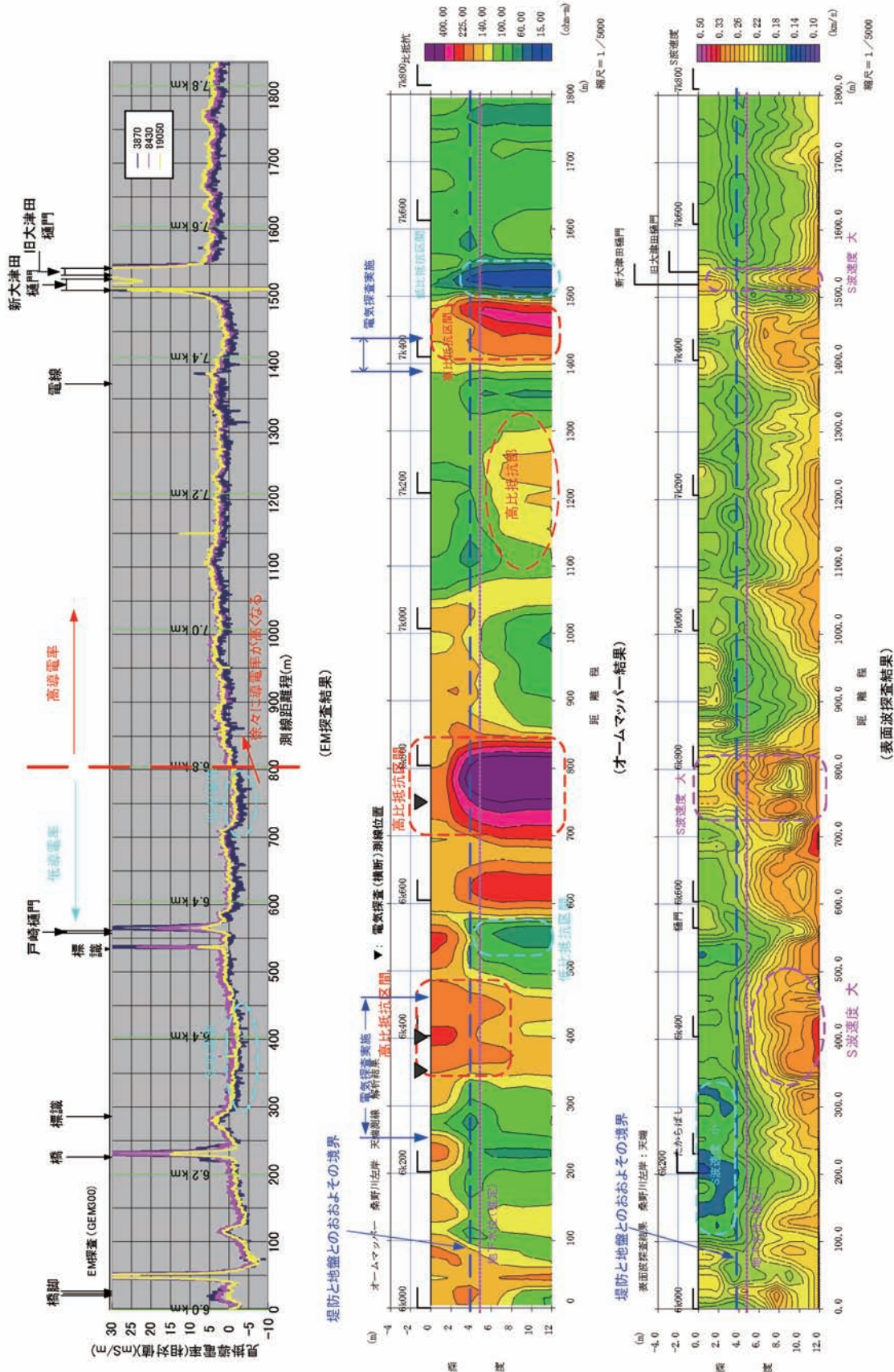


図-6 各種物理探査結果 (天端測線)
 Fig. 6 Result of applied geophysical methods (Crown of the levee)

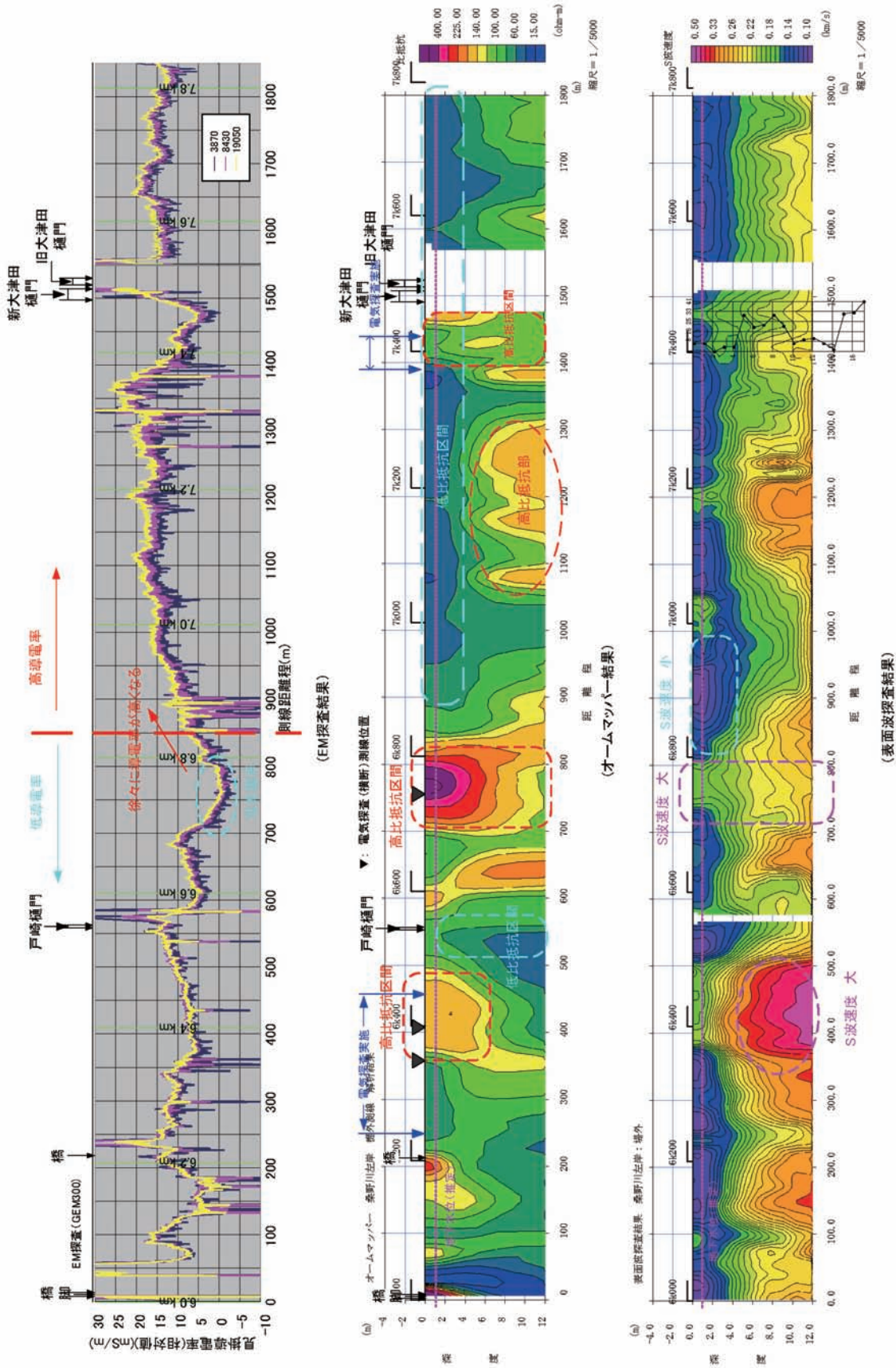


図-7 各種物理探査結果 (堤外測線)
Fig. 7 Result of applied geophysical methods (Riverside)

を測定しているものであるが、探査深度が異なっている。EM 探査はごく表層部の比抵抗変化を反映していると考えられ、オーム Mapper は深度 10m 程度までの比抵抗構造を反映していると考えられる。

以下、各種物理探査結果について述べると共に、オーム Mapper と比抵抗電気探査結果との比較を行う。

(1) 天端測線（堤体）の結果

EM 探査の結果の大きな傾向としては、距離程 800m 付近から導電率が高くなる傾向が見られる。また部分的に低導電率を示す区間も見られる。オーム Mapper の結果と比較すると、高導電率を示す区間で低比抵抗（つまり高導電率）、低導電率を示す区間が高比抵抗となっており、両者の結果がよく対応している。したがって、EM 探査が比較的地盤の比抵抗構造を捉えていることがわかる。なお、EM 探査結果中にスパイク状に導電率が大きくなっている部分がいくつか見られるが、これらは橋や道路標識、樋門など金属物が付近に存在した位置に対応している。

オーム Mapper の結果に堤体と基礎地盤のおおよその境界線を記入したが、堤体は基礎地盤よりも比抵抗がやや高くなっており、これは飽和度の違いによるものと考えられる。

表面波探査結果では、堤体下の基礎地盤の方が S 波速度は大きく、オーム Mapper の結果で特に高比抵抗を示す位置（距離程 700～800m）で S 波速度が大きい。また、距離程 100～300m で小さな S 波速度を示している。

(2) 堤外測線（基礎地盤）の結果

堤外測線の EM 探査の結果は、天端測線と比べて変化が大きく、スパイク状のノイズも多く含む。大きな傾向としては、距離程 850m 付近から導電率が高くなる。これは、天端測線の場合とほぼ同様である。同じ区間のオーム Mapper の結果は低比抵抗を示しており、両者はよく

対応した結果となっている。

オーム Mapper の結果では、距離程 400m 付近と 700～800m で特に高比抵抗を示している。

表面波探査結果では、オーム Mapper の結果で高比抵抗を示した位置で S 波速度が大きな値を示している。一方、距離程 900m 付近は S 波速度が小さな値を示す。

距離標 7k400 付近には既存データとして標準貫入試験による N 値を併せて示したが、S 波速度と N 値はよく対応している。

オーム Mapper と表面波探査結果には推定の地下水位を表示したが、地下水位深度を境に物性が大きく異なるということはない。

3.3.2 オーム Mapper と比抵抗電気探査の比較

オーム Mapper の結果との比較を目的として行った縦断方向の比抵抗電気探査のうち、堤体天端測線の結果を図-8に示す。比抵抗探査結果の距離程 290～350m の位置において浅部に高比抵抗の層が見られるが、同じ位置のオーム Mapper の結果にも同様に浅部に高比抵抗の層が見られる。また、距離程 350m 以降で比抵抗が高くなっている傾向もオーム Mapper の結果と同様であり、最も高比抵抗を示す位置も同一である。一部、比抵抗探査でみられる細かな変化はオーム Mapper では捉えられていないが、概ね両者は同様の結果を示していると判断できる。

基礎地盤測線の結果においても、比抵抗電気探査とオーム Mapper の結果はほぼ同様の結果を示した。したがって、堤体や基礎地盤（表層部）の土質区分を概略的に把握する目的に対しては、通常の比抵抗探査と同様に扱えると判断できる。

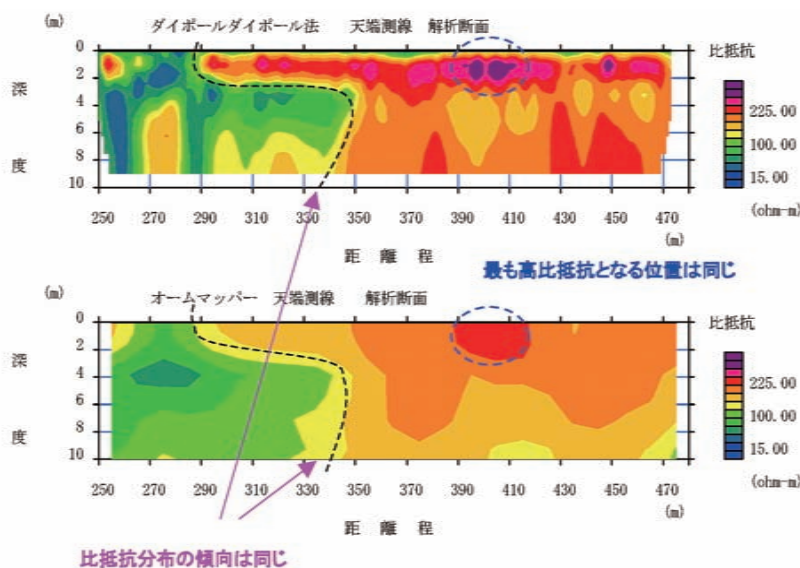


図-8 従来の電気探査とオーム Mapper の結果の比較（上：通常の電気探査 下：オーム Mapper）

Fig. 8 Comparison between traditional resistivity method and Ohmmapper (Top: Resistivity method Bottom: Ohmmapper)

4. 探査結果に基づく堤体・基礎地盤の評価

ここでは、各種物理探査結果から堤体・基礎地盤を評価する。堤体は土質構成と締固め度について、基礎地盤は土質構成、旧河道のような要注意地形の抽出についての評価が重要である。なお、地盤の比抵抗（導電率）を求める探査としてオームマップ、EM探査、比抵抗電気探査と複数の探査を実施したが、EM探査は探査深度が浅いこと、比抵抗電気探査は全区間で測定を行っていないことから、ここではオームマップにより得られた比抵抗を用いることにする。

4.1 堤体の評価

堤防堤体の評価において重要な事項は、①堤防断面の土質構成、②土層の締固め度、③個々の土層の透水性とせん断強度であるが、物理探査手法から直接的にこれらの指標を求めることはできない。しかしながら、透水係数やせん断強度については現状では難しいものの、土質構成や締固め度については、物理探査で得られる地盤の比抵抗やS波速度といった物性値から間接的にそれらを推定することが可能である。ここでは物理探査結果を用いて堤体の土質構成と締固め度を推定する。

(1) 堤体の土質構成

一般に、間隙率と水分飽和度が同じであれば土質地盤の細粒分が多いほど比抵抗は低くなる。一方、細粒分が少なくなる、または礫質な部分が多くなるほど比抵抗は高くなる。これは細粒分が多いほど粘土鉱物が多くなるためと考えられている。したがって、電気探査により得られる地盤の比抵抗が低くなることは、粘土鉱物が多くなることと考えられるため、地盤の比抵抗値から堤体土質を推定することが可能である。図-9に地質・土質と比抵抗の関係¹²⁾を示す。

(2) 堤体の締固め度

地盤のS波速度は地盤のN値との関連があり、地盤の締め具合を反映していると考えられるため、地盤が緩んでいる場合にはS波速度は小さな値を示す。したがって、S波速度の大小から地盤の締固め度を推定することができる。図-10はS波速度とN値の関係を示したもので、両者の間にはいくつかの経験的な関係式が求められている。代表的なものに今井他(1975)¹³⁾がある。今井他(1975)の経験式を以下に示す。

$$N = \left(\frac{V_s}{97} \right)^{\frac{1}{0.314}} \dots (2) \text{ 式}$$

このような経験式を用いることによりS波速度から地盤のN値を算出することができる。また、算出された地盤のN値から、Terzaghi-PeckによるN値と相対密度の関

係(表-3)¹⁴⁾などを用いて地盤の相対密度を推定することができる。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \dots (3) \text{ 式}$$

D_r : 相対密度

e : 間隙比

e_{\max} : 最大間隙比

e_{\min} : 最小間隙比

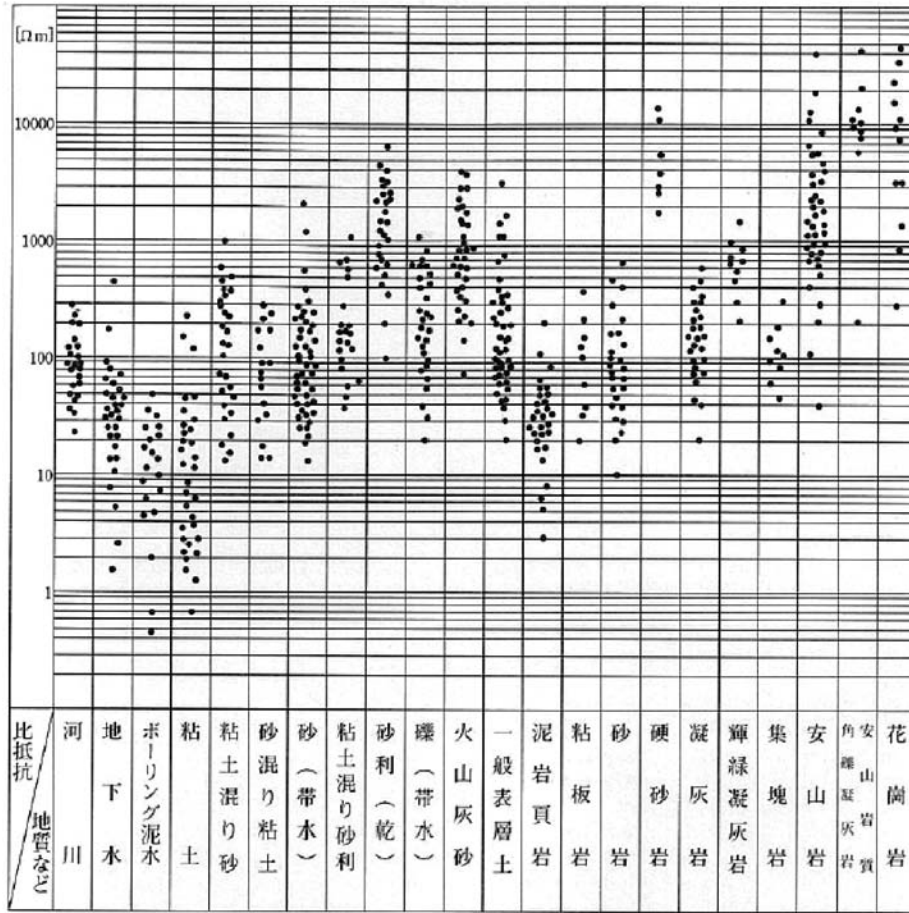


図-9 地質・土質と比抵抗の関係¹²⁾

Fig. 9 Resistivity of various kinds of rock and soil

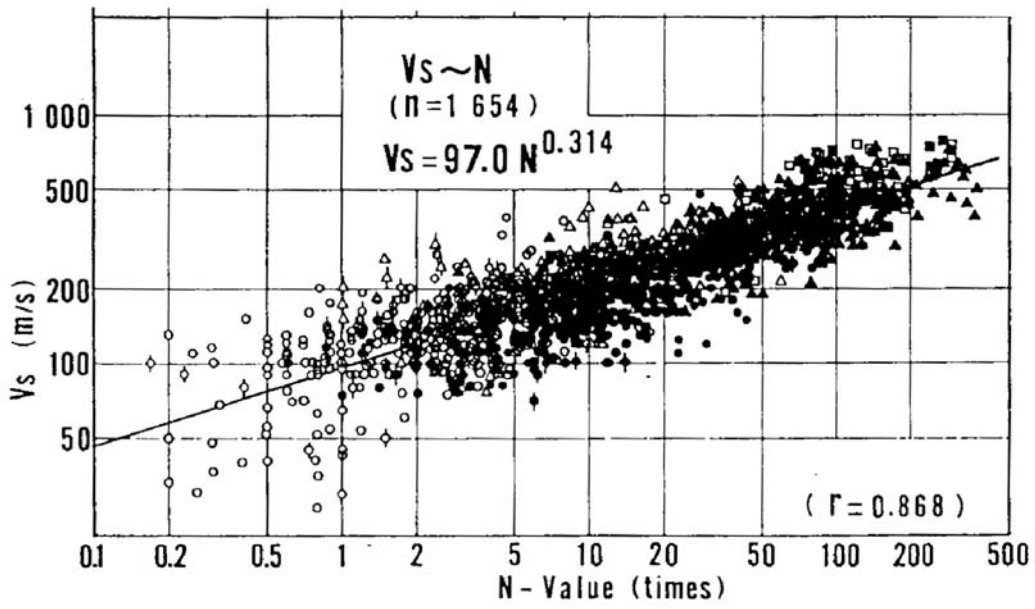


図-10 S波速度とN値の関係 (今井他 1975)¹³⁾

Fig. 10 Relationship between Vs and N-Value

表-3 Terzaghi-PeckによるN値と相対密度(砂質土の場合)¹⁴⁾
 Table 3 Terzaghi-Peck N-value and relative density (sandy soil)

N値	相対密度 (Terzaghi-Peckによる)
0~4	非常に緩い (very loose)
4~10	緩い (loose)
10~30	中位の (medium)
30~50	密な (dense)
50以上	非常に密な (very dense)

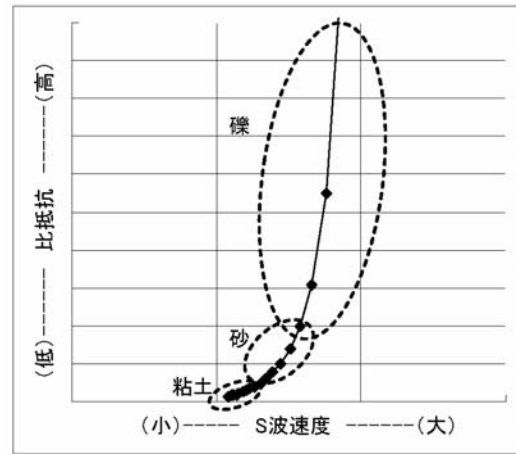


図-11 S波速度と比抵抗の関係の概念図
 Fig. 11 Typical relationship between Vs and resistivity

(3) 堤体の土質と締固め度の同時区分

S波速度と比抵抗の2つのデータを用いて、堤体土質と締固め度を同時に区分することを試みた。

まず、砂の比抵抗を表す式として知られているアーチーの式を用いて比抵抗の変化の様子を調べる。アーチーの式は(4)式で表される関係式で、地盤の比抵抗は、地盤中の間隙にある水の比抵抗と間隙率、および飽和度によって決まるというものである。

(アーチーの式)

$$R = R_w \cdot \frac{a}{\phi^m} \cdot S^n \dots (4) \text{ 式}$$

ここで、Rは地盤の比抵抗、R_wは間隙水の比抵抗、φは間隙率、Sは飽和度、a,m,nは定数である。ここでは一般的な値としてa=1, m=2, n=2を用いた。

アーチーの式からわかるように、地盤の比抵抗は多くのパラメータによって変化する物性であるが、間隙水の比抵抗、飽和度が一定と考えれば、間隙率の関数と見なすことができる。洪水時のように水が流動している場合や沿岸域を除けば、堤防付近の間隙水はそれほど劇的には変化していないと考えられるため、間隙水比抵抗と飽和度が一定という仮定もそれほど乱暴な仮定ではないと思われる。一方、S波速度も間隙率の関数と見なすことができるため、S波速度と比抵抗の関係は図-11のような傾向を示すと考えられる。

堤体内のS波速度と比抵抗のデータのクロスプロットを図-12に示す。用いたデータは、天端測線で実施した表面波探査結果の深度3.5mまでの平均S波速度と、オームマップの結果の深度3.8mまでの平均比抵抗値である。

図-11のような関係をもとに、図-12のクロスプロットから土質と締固め度を区分することを考える。比抵抗データの最大値は340ohm-m程度であり、礫質土とするには比抵抗の値がやや小さい。そのため、

境界値を110ohm-mとして、粘性土と砂質土に土質を区分した。データ中に一部、S波速度が大きくなるにつれて比抵抗が低くなる傾向を示すデータが見られた。これは、鉄筋を含むコンクリートの構造物を示していると判断した。

砂質土の中には、粘性土と判断した部分よりも小さなS波速度を示す部分がみられた。このような部分は砂質でかつ緩んだ堤体部と判断でき、堤体の安全性を考えた場合には要注意箇所と考えられる。逆に、砂質土の中でもS波速度が特に大きい部分も見られた。このような部分は、その場所だけでは健全な堤防と判断できるが、緩んだ部分と隣あう位置にあれば、境界部分が逆に弱くなることも考えられる。このような考えのもとで、砂質土と判断した部分から、境界値を0.175km/sと0.230km/sとしてさらに土質を区分した。この値はそれぞれN値が1と15程度に相当する。

図-13に土質区分に用いた表面波探査とオームマップの結果、および土質区分結果図を示す。

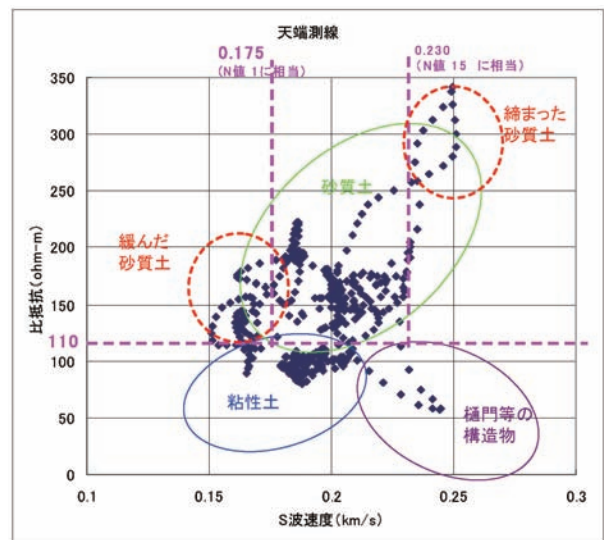


図-12 S波速度と比抵抗のクロスプロット(天端測線)
 Fig. 12 Vs and resistivity crossplot (Crown)

4.2 基礎地盤の評価

基礎地盤の土質が砂質土や礫質土の場合には、洪水中にパイピングを生じる可能性がある。そのため、基礎地盤を評価する場合にも堤体と同じく土質の推定が重要となる。また、旧河道や落掘のような要注意地形の分布箇所を特定することが重要となる。ここでは、天端測線のデータと同様に、オームマップによる比抵抗と表面波探査によるS波速度のクロスプロットから基礎地盤の土質区分を試みた。また、物理探査結果に基づいて要注意地形の分布箇所の推定を行った。最後に、物理探査結果をもとに既存の地質断面図を更新し新たな地質断面図を作成した。

(1) 基礎地盤の土質構成

図-14 に堤外測線の表層部分のS波速度と比抵抗のクロスプロットを示す。比較として、天端測線の同様のデータもあわせて示す。なお、用いたデータは天端測線の場合と同様、表面波探査結果の深度35mまでの平均S波速度と、オームマップの結果の深度38mまでの平均比抵抗値である。

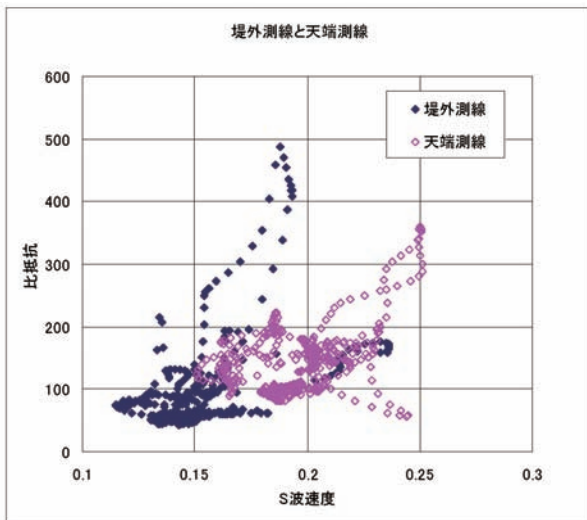


図-14 S波速度と比抵抗のクロスプロット (天端, 堤外測線)
Fig. 14 Vs and resistivity crossplot (Crown, Riverside)

図-14 から、堤外測線と天端測線とではデータの分布がやや異なることがわかる。これは、堤外測線では地下水位が高く地盤の飽和度が高いため、比抵抗の値が低くなっていることによる。また、S波速度も全体的に小さくなっており、これは締め具合が堤体よりも低いか、または堤体と基礎地盤では構成土質材料が異なることによると考えられる。ただし、データの分布は天端測線とは異なるものの、粘土、砂、礫と変化する傾向は図13と同様であり、S波速度と比抵抗のクロスプロットから表層部分の土質を推定できると考えた。

距離標7.4kの位置にある既存のボーリング土質柱状図によれば、当該地点の土質は地表から砂、シルト、砂礫が分布し、地表付近から4m程度までの物性は砂層とシル

ト層の物性を反映していると考えられる。図-15のクロスプロットでは、7.4kのデータのみ色を変えて表示したが、7.4kのデータはやや高い比抵抗を示しており、粘性土というよりは砂質土と粘性土の中間の値を示していると考えられる。そこで、粘性土と砂質土の境界値を80ohm-m、砂質土と礫質土の境界値を250ohm-mと推定し、基礎地盤の表層の土質区分を試みた。比抵抗値から砂質土と推定される部分でも、S波速度は大きい部分と小さい部分が存在するため、ゆるい砂質土、締まった砂質土として区別した。

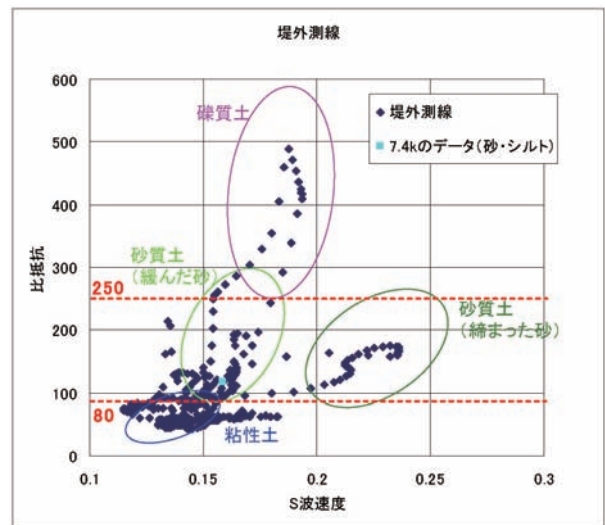


図-15 S波速度と比抵抗値のクロスプロット (堤外測線)
Fig. 15 Vs and resistivity crossplot (Riverside)

このようにして推定した基礎地盤の表層部の土質区分結果を図-16に示す。

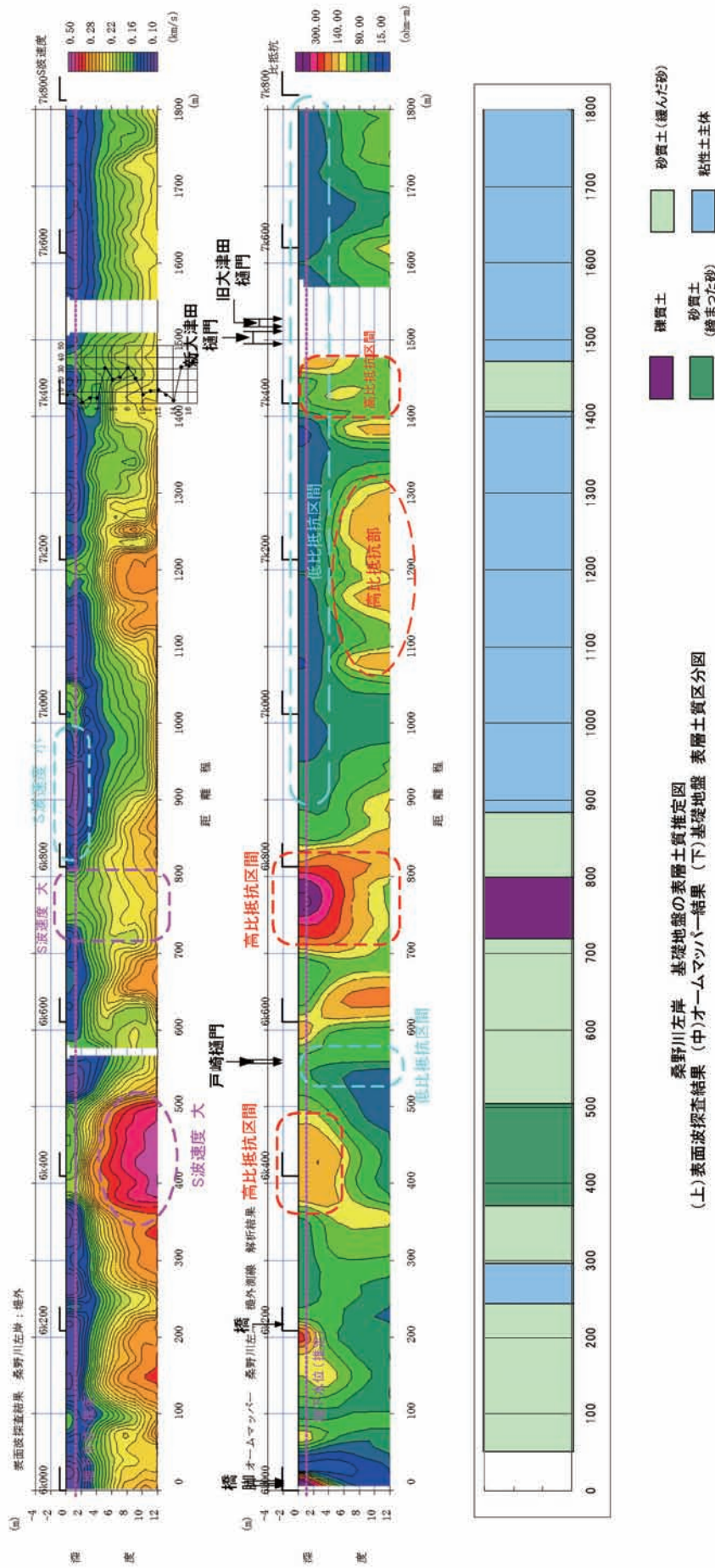


図-16 基礎地盤の表層土質推定図
 (上) 表面波探査結果 (中) オームマップ結果 (下) 基礎地盤表層土質区分図
 Fig. 16 Estimated soil material of shallow part of the ground

(2) 要注意地形の分布

図-17に航空写真と基礎地盤を対象に行った堤内および堤外測線の表面波探査の結果(断面図)を示す。また、図-18に同じく航空写真と基礎地盤を対象に行った堤内および堤外測線のオームマップの結果を示す。

既存資料によれば、調査範囲(左岸60k~78k)内には旧河道が3箇所存在する。しかし、治水地形分類図では不明であり、航空写真および現地踏査により旧河道位置を推定したが、物理探査結果には特徴的な変化は見られなかった。

物理探査結果を航空写真とあわせて見ることにより、最も高比抵抗を示す位置が谷の出口にあたることから、山から流れ出した礫質土が堆積しているのではないかということが推測される。

(3) 探査結果に基づく推定地質断面

ここでは、今回の物理探査の結果からこれまで述べてきたS波速度と比抵抗のクロスプロットによる土質推定手法を用いて基礎地盤の地質断面図を推定し、既往の推定地質断面と比較する。

既存資料にある推定地質断面(図-19(a))では、上流側にかけて沖積粘土層(Ac)の下面が傾斜しAc層が厚く堆積している。Ac層の下部は、沖積砂礫層(Ag)となり、Ag層の下部は逆に下流に向かって傾斜している。Ag層の下部は、粘土・砂互層(AcおよびAs)、洪積砂礫層(Dg)となっている。

このような推定地質断面図とオームマップから得られた比抵抗断面(図-19(b))、表面波探査から得られたS波速度断面(図-19(c))を見比べると、推定地質断面に比べて探査結果の方が変化に富んでいる。これらの物理探査の結果が地質情報を反映していると考え、物理探査の結果を用いてより詳細な地質断面図を作成することが可能と考えられる。そこで、ここでは以下の手順に基づいて、新たな地質断面図を作成した。

① 断面全体について、比抵抗とS波速度のクロスプロットを作成する(図-20)。これまで行ってきたクロスプロットは、特定の深度までの平均値を用いてきたが、ここでは水平方向4m、深度方向約1mの大きさのセル一つ一つについて比抵抗とS波速度を抽出してクロスプロットを行った。

② 図-15に示した基礎地盤に対するクロスプロットと同様に、各セルのデータを分類する(図-20)。ここでS波速度については、74km地点のNo2のボーリングデータを参考に、S波速度240m/s以上は洪積砂礫層と分類した。S波速度200m/s~240m/sの範囲では、比抵抗 $80 \Omega \cdot m$ 以下は硬い粘土、比抵抗 $80 \Omega \cdot m$ 以上は沖積砂礫層と分類した。

③ 図-20に示した分布を断面に戻す(図-19(d))。図中の地盤分類の色は図-20の各点の色と同じである。

④ 図-19(d)に示した分類図を層区分して最終的な地質断面図とする(図-19(e))。なお、No2のボーリングで

は深度10~15mの範囲でN値が小さく、沖積粘土層と砂層の互層と分類されているが、図-19(d)に示した分類ではこのN値の低い層は見られない。ここでは、ボーリングの土質分類を用いて、深度10m以深に沖積粘土層と砂層の互層が存在するとした。

既往の推定地質断面(図-19(a))と物理探査結果から推定した地質断面図(図-19(e))を比較すると、堤体下の沖積粘土層が下流側で薄くなる点や、砂礫層上面が下流側で浅くなる点など、大局的な傾向は一致していることがわかる。しかし、物理探査から推定した断面では測線の下流側には浅部に砂層が存在することや、洪積砂礫層の上面深度が場所によって大きく異なる点など、既往の推定地質断面に比べて詳細な情報が得られている。現時点では開削調査などが行われていないため、上記の推定が正しいかどうかは不明であるが、このような複数の物理探査手法とボーリングのデータを併せて解釈する手法は、堤防沿いの基礎地盤の連続的な断面を得る手法として有効であると考えられる。

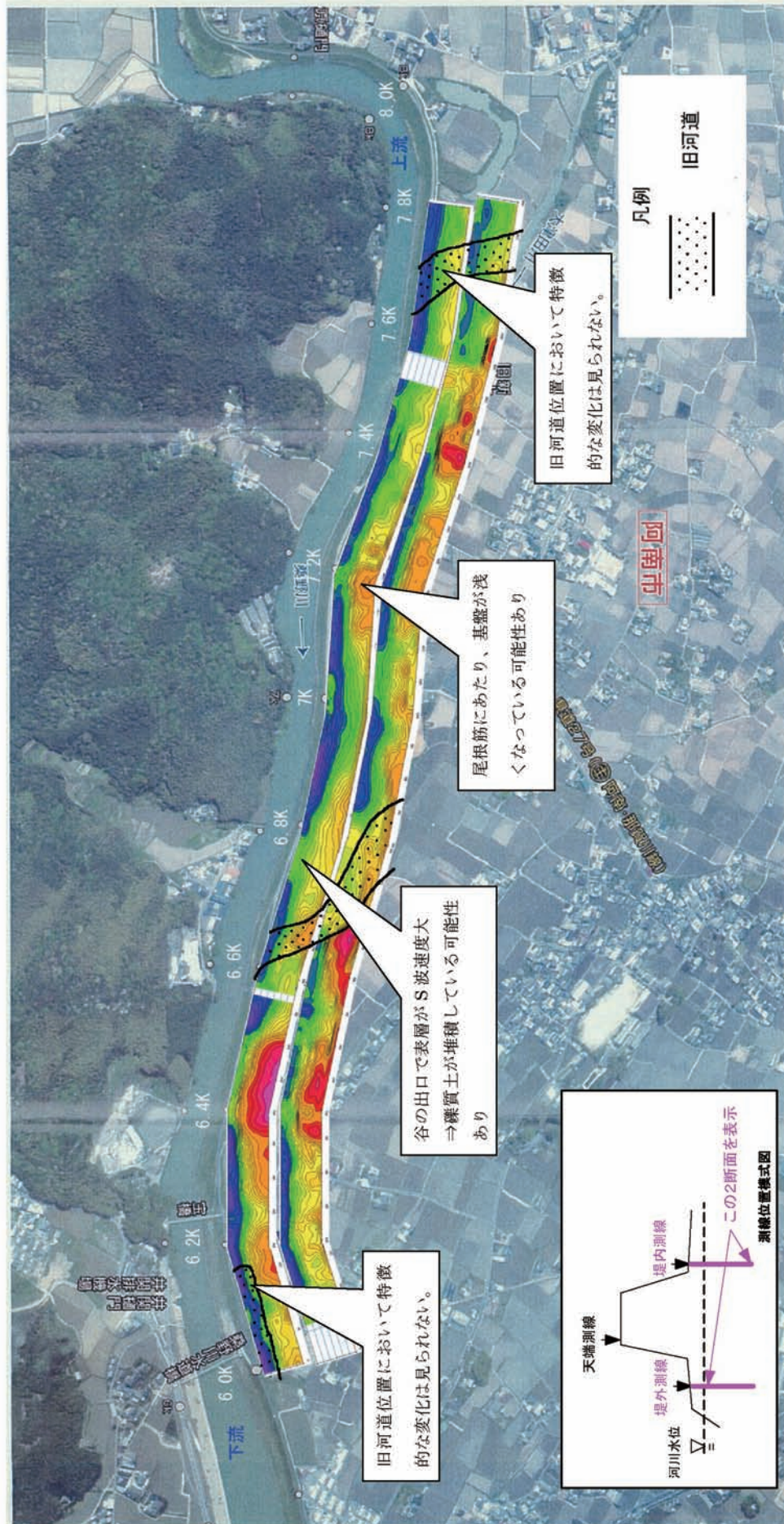


図-17 航空写真などの既往資料および現地踏査から推定した旧河道範囲(表面波探査により得られたS波速度断面(堤外測線(上), 堤内測線(下))を重ねて表示)

Fig. 17 Estimated old river channel according to an aerial photo and survey on the surface (The surface wave method results are overlaid, Top: Riverside, Bottom: Inland)

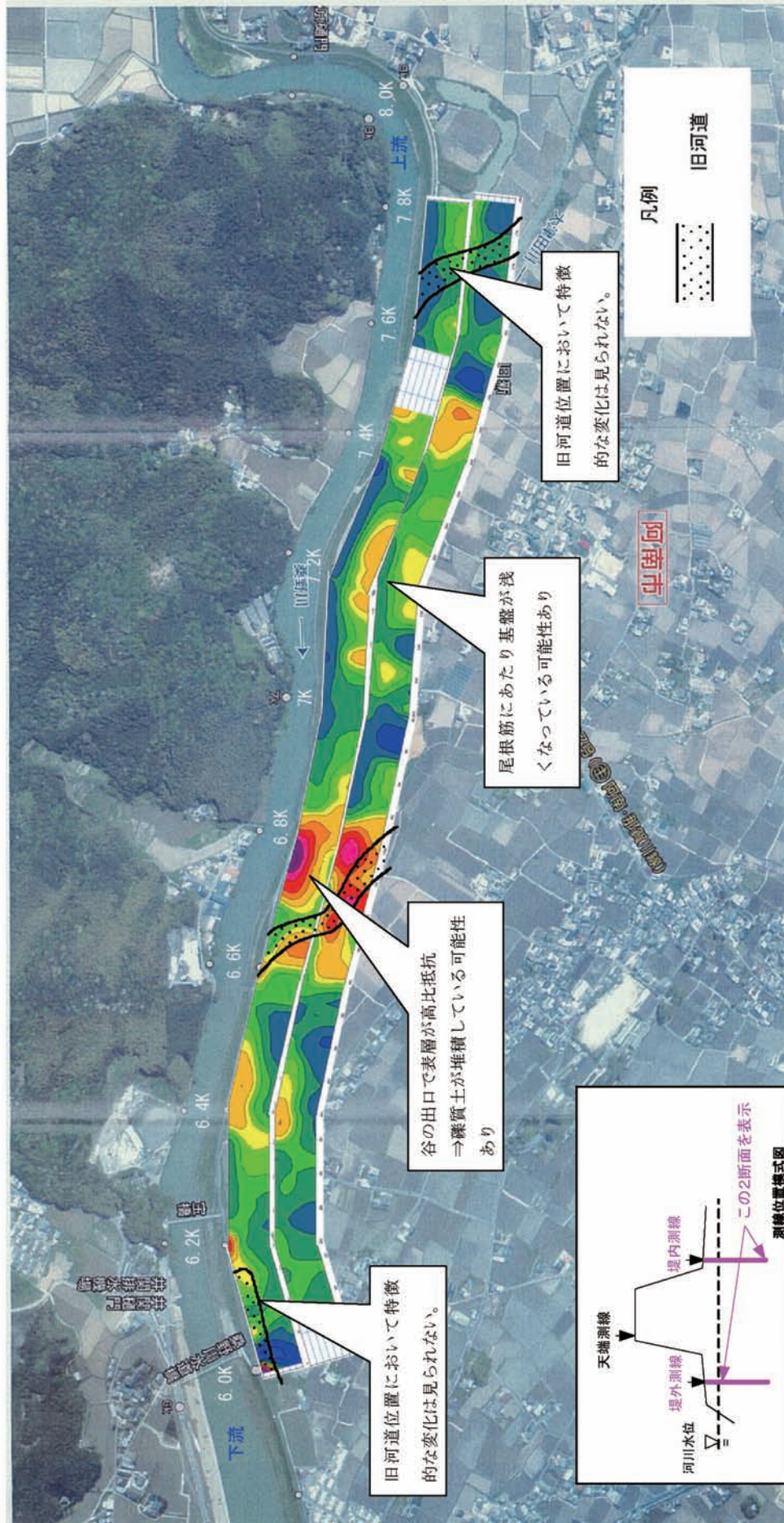


図-18 航空写真などの既往資料および現地踏査から推定した旧河道範囲（オームマップパーにより得られた比抵抗断面（堤外測線（上）、堤内測線（下））を重ねて表示）

Fig. 18 Estimated old river channel according to an aerial photo and survey from the surface (The ohmmapper survey results are overlaid, Top: Riverside, Bottom: Inland)

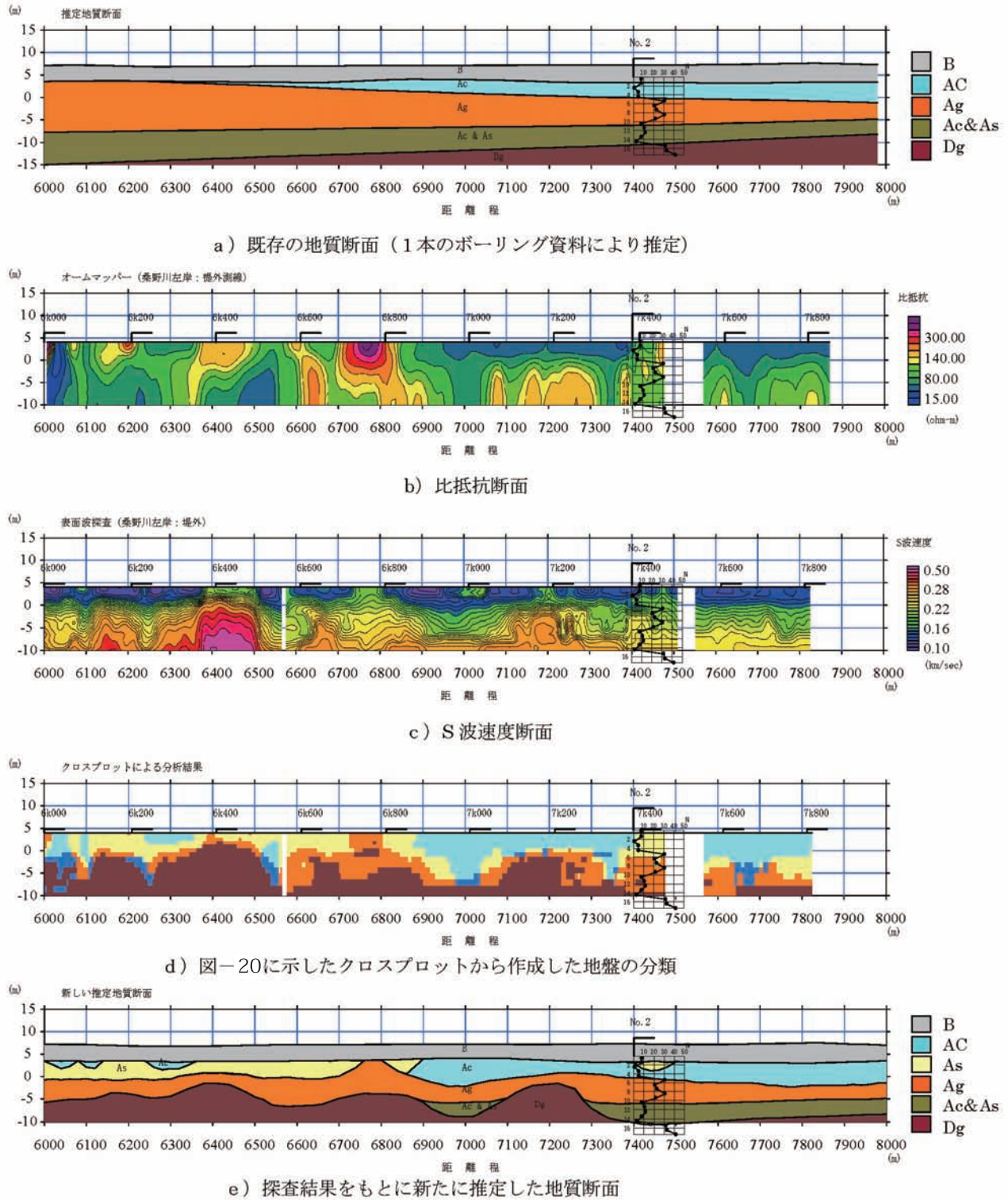


図-19 探査結果をもとにした新しい地質断面の作成手順

Fig. 19 Procedure of making a new geological profile based on geophysical survey results

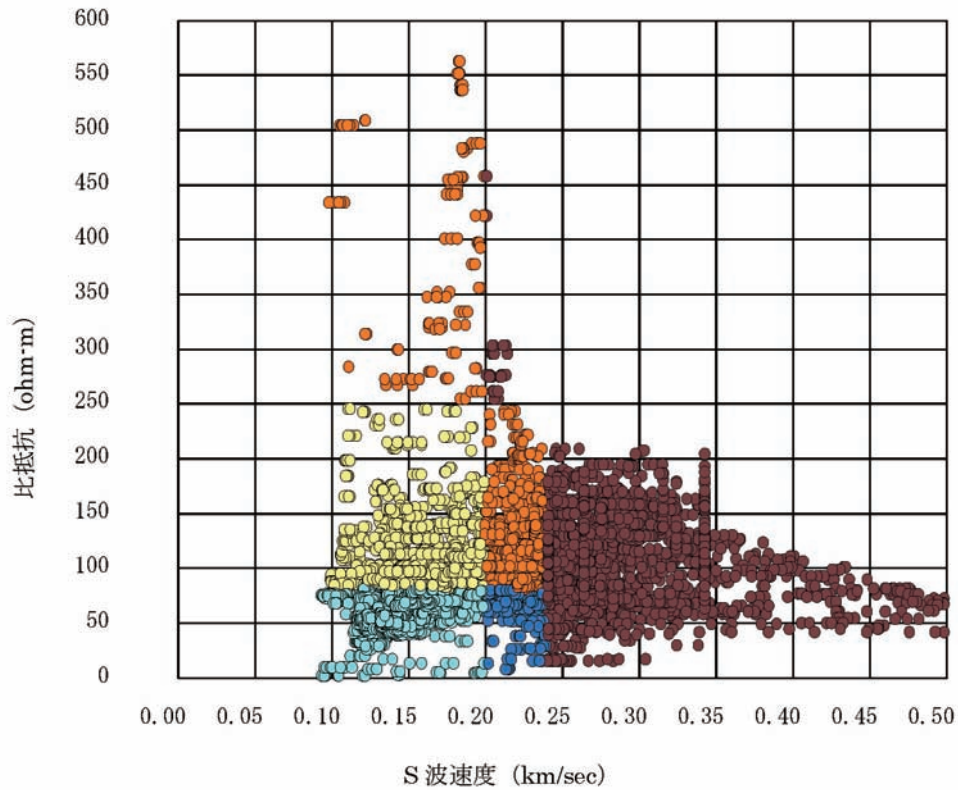


図-20 S波速度と比抵抗のクロスプロット

Fig. 20 Vs and resistivity crossplot

表-4 土質区分に用いた物性値の範囲

Table 4 Vs and resistivity ranges used for the soil discrimination in the study

土質区分	S波速度(km/s)	比抵抗(ohm-m)
洪積砂礫層(Dg)	$V_s > 0.24$	-
	$0.2 < V_s < 0.24$	$R > 250$
沖積砂礫層(Ag)	$0.2 < V_s < 0.24$	$80 < R < 250$
	$V_s < 0.20$	$R > 250$
沖積砂層(As)	$V_s < 0.20$	$80 < R < 250$
沖積粘土層(Ac)	$V_s < 0.24$	$R < 80$

5. 物理探査の適用性の評価

本実験を行った時点では堤体や基礎地盤に関して提示されている資料が十分ではないため、実際の土質との対比などによる各調査手法の客観的な評価を行うことは困難である。最終的な評価は今後の開削調査の結果を踏まえて行う予定であるが、現時点で本実験地において提示されている情報との比較や、これまでに行ってきた他の調査地での調査実績などを考慮して、今回の実験によって新たに得られた知見や現時点における各調査手法の評価についてまとめる。

5.1 各調査手法の結果のまとめ

■オームマップパー

電気探査より分解能は劣るものの、ほぼ同じような比抵抗構造が得られた。既存資料や表面波探査結果との比較などからも概ね堤体および基礎地盤の土質構造を把握できた。特に堤体および基礎地盤の土質の推定には表面波探査との併用が有効と考えられる。

■表面波探査

既存のボーリング結果とは概ね整合しておりN値とS波速度の相関も良いことから、堤体および基礎地盤の強度をある程度把握できたと考えられる。オームマップパーの結果とも整合しており、概ね堤体および基礎地盤の土質構造を把握できた。特に堤体および基礎地盤の土質の推定にはオームマップパーとの併用が有効と考えられる。

■EM探査

EM探査により得られた相対的な導電率は、既存の資料やオームマップパーの結果と概ね対応している。ただし、絶対的な比抵抗値を求めることは困難である。

■比抵抗2次元探査（電極設置方式）

既存資料や表面波探査結果との比較などからも概ね堤体および基礎地盤の土質構造を把握できた。

5.2 総合評価

今回の実験に用いた各探査手法の長所・短所、制約条件、探査効率などを表-5にまとめた。

先に述べたように、現時点では調査結果を客観的に評価する十分な資料がないことから、これまでの適用実績なども考慮して各手法を評価する。

表面波探査については、調査の簡便性、堤体や地盤の強度を把握する能力がある点に加えて、これまでの調査実績^{15) 16) 17) 18)}も考慮して有効と評価できる。

オームマップパーはこれまでの適用実績は少ないが、今回の調査を通じて概ね電気探査と同等の結果が得られる見通しが得られた。これより、オームマップパーは、長い延長を短時間に実用上十分な精度で土質を区分する手法として評価できる。

EM探査については、これまでの堤防調査に対する実績も少なく、今回の調査でも現時点では有効性を評価する十分な資料がないために、現時点での評価は困難である。

6. 河川堤防調査における非破壊調査の適用方法に関する提案と今後の課題

今後の非破壊調査の適用方法について、現時点で考えられる方向性と今後の課題を示す。

6.1 堤防縦断方向の土質構造の把握

堤体および基礎地盤の土質区分や土質構造を縦断方向に概略的に把握することを目的として非破壊調査を実施することは、非破壊調査の特徴や有効性を最も生かすことができる適用方法と考えられる。

堤体に対しては、土質判別の容易さ、調査効率等から考えると、オームマップパーによる比抵抗探査が最も優位と考えられる。今回の調査ではその有効性はまだ確認されていないが、既往の適用事例^{19) 20)}によると土質判定の適合度は比較的高いと考えられる。また、地表に電極を設置する手間が不要となるため、従来の比抵抗探査手法に比べて調査効率が圧倒的に高く、また舗装道路上でも測定できることが最大の特徴である。さらに、表面波探査を同時に実施すれば、堤体の密度に関する情報も加わるため、堤体土質をより多角的に判別することが可能となる。

一方、基礎地盤に対しては、地下水位が地表近くから分布している場合が多く、そのような条件下では、比抵抗を利用した探査より表面波探査の適用性が高いと考えられる。表面波探査では、S波速度の2次元断面が得られ、一般的には各土層の硬軟の違いが明瞭なほどその適用性は高い。また、比抵抗探査についても、砂礫層など顕著に大きな比抵抗を示す地層が分布するような状況が想定される場合には、併せて実施しておくことが有効と考えられる。

実際の調査において非破壊調査を有効に利用する方策としては、以下の方法が考えられる。

- ①堤防天端、堤外側および堤内側小段（堤防の規模が小さく小段がない場合にはのり尻）の3測線について、堤防縦断方向にオームマップパーによる比抵抗探査と表面波探査を実施する。但し、堤防のり小段またはのり尻の測線については、既往の地質調査結果等から、基礎地盤の比抵抗の変化が小さいことが想定される場合には、オームマップパーによる比抵抗探査は省略する。
- ②探査結果をもとに堤体と基礎地盤の縦断方向の概略の土質分布を推定する。
- ③推定された堤体土質および基礎地盤の縦断方向の土質分布から、浸透に対する安全性を評価するための

表-5 適用した物理探査手法のまとめ
Table 5 Summary of applied geophysical methods

探査手法	探査目的	得られる物理量	今回の調査における技術的課題	今回の調査結果の評価	長所	短所	制約条件	技術的成熟度	備考	探査効率 (今回の調査の実績。括弧内は作業人数)
牽引式電気探査 (オームマツパ ー)	堤体および基礎地盤の土質区分	比抵抗	電極棒を用いた通常の比抵抗電気探査との比較	比抵抗探査の結果とほぼ一致する結果が得られた。堤体および基礎地盤の土質を反映した結果が得られていると考えられる。	測定が簡便である。	分解能が低い。	法面などでは適用が難しい。	最近開発された技術であり実績は少ない。	表面波探査との併用が有効と思われる。	1700m/日 (2~3人)
表面波探査	堤体および基礎地盤の土質区分、締め固め度の把握	S波速度	ボーリングや開削結果などとの比較事例の蓄積	堤体および基礎地盤の土質を反映した結果が得られていると考えられる。	堤体や基礎地盤の強度を評価できる。	透水性や飽和度の評価は難しい。	探査深度は15m程度である。	実績は増えてくる。	オームマツパーとの併用が有効と思われる。	400m/日 (2~3人)
EM探査 (GEM300)	堤体および基礎地盤の土質区分、浅部のアノマリー検出	比抵抗	堤防調査に対する本格的な適用	相対的な土質の違いは把握できたが定量的な評価は困難である。	測定が簡便である。	定量的な評価が困難である。	金属物の影響を受けやすい。	実績は増えてくる。		2500m/日 (1人)
比抵抗電気探査	堤体および基礎地盤の土質区分	比抵抗	オームマツパーとの比較。開削結果との比較	堤体および基礎地盤の土質を反映した結果が得られていると考えられる。	堤体の土質を評価できる。	飽和度や金属物の影響を受ける。	電極棒を打ち込む必要がある。	成熟している。		140m/日 (3~4人)

区間設定や安全性照査を実施する断面を選定する。また、旧河道等の要注意地形が分布する箇所では、それらの分布範囲を推定する。

- ④選定した代表断面においてボーリングまたはサウンディングによる横断方向の詳細調査を実施する。

6.2 堤防横断方向の土質構造の把握

堤体の横断方向の土質構造を把握することは、築堤履歴が複雑であればあるほど難しく、堤防横断方向に数本のボーリングを実施したとしても正しく推定することは困難な場合が多い。したがって、このような目的に対して非破壊調査を適用することは、ニーズとしては高いものと考えられるが、これまでの経験では満足な結果が得られない場合が多い。堤体は、一般的に表層付近は乾燥状態に、中心部では湿潤状態にあることから、同じ土質であってもその含水状態により比抵抗が大きく変化し、探査結果の解釈を著しく難しいものになっている。そのため、数本のボーリングあるいはサウンディングを併用せざるを得ず、結果としてコスト縮減にはあまり寄与しない可能性が高い。したがって、現時点における非破壊調査の適用性は、堤防横断方向の調査よりも堤防縦断方向の調査のほうが高いと考える。

6.3 構造物周辺の緩みや空洞の検出

樋門等構造物の周辺部における緩みや空洞の有無を把握する目的に対しては、対象とする構造物を中心に、堤防縦断方向に表面波探査および比抵抗探査を実施することにより、異常箇所を抽出できる可能性がある。この場合の比抵抗探査は、詳細な情報を得るために電極方式とし、電極間隔をできるだけ密に設定する必要がある。

6.4 堤体内や基礎地盤内の異物や空洞の検出

堤体内あるいは基礎地盤内に異物や空洞が存在することは稀であり、これらを何も情報が無い状態で検出することは困難と考えられる。この種の調査は、たとえば堤防に変状や漏水等が発生した際に、その原因調査の一環として、範囲を限定して実施するケースが想定される。

この種の探査には、通常地中レーダが適用されているが、原理的にはEM探査の適用も可能と考えられる。レーダ探査の適用性を高めるために、周波数の異なる複数のアンテナを用いたり、周波数可変の装置を用いたりする等の工夫が行われている例もある。

以上より、河川堤防における非破壊調査手法の適用案について表-6にまとめる。

6.5 今後の課題

今後の課題としては、以下の事項が挙げられる。

- ・ 調査事例の蓄積が少ないことから、探査結果から土質判定を行う場合の解釈技術が不足している。
- ・ 堤体の浸透やすべりの問題では、のり面表層付近の土質が大きな影響を及ぼす。そのため、オームマップについては、のり面上でも縦断方向にケーブルを牽引できるようにするなど、測定方法の改良等が必要である。
- ・ 現状では横断方向を効率よく測定できる手法がない。将来的には、新しい非破壊調査手法の開発、各種の調査手法の組合せ、解釈技術の向上等により、堤体の横断方向の土質構造をより高精度でかつ効率的に把握できる調査手法の実用化が期待される。
- ・ 旧河道等の要注意地形が分布する箇所において、非破壊調査の結果とボーリング等による調査結果を対比した事例を蓄積し、非破壊調査結果の解釈技術を向上させる必要がある。
- ・ 抜け上がりが確認されている樋管での非破壊調査結果と、開削調査やボーリング、サウンディング等による詳細な調査結果とを対比した事例を蓄積し、非破壊調査結果の解釈技術を向上させていくことが必要である。

7. まとめ

堤防における効率的な非破壊調査手法としての物理探査の適用性評価実験を行った。電気探査、表面波探査などの複数の探査を行ったところ、それら探査結果同士はよく対応する結果となり、信頼性の高い結果であると判断できる。しかしながら、物理探査結果のみでは堤防の評価には用いることができないため、物理探査結果から堤防の評価に必要な物性や状態を抽出するための解釈技術が重要である。今回実験を行った現場では今後堤防開削が予定されており、実際の土質と探査結果との比較を行う予定である。このような事例を収集・分析することにより、今後はより有効に物理探査を適用することが可能になると考える。

謝辞

現場実験を実施するにあたり、国土交通省四国地方整備局那賀川河川事務所に現場を提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

表-6 河川堤防における非破壊調査手法の適用方法(案)

Table 6 An application of nondestructive investigation for levee(proposal)

調査対象		調査によって把握すべき事項	適用性が高いと考えられる非破壊調査手法	堤防調査への適用方法(案)
堤体	縦断方向	堤体土の土質区分および締め具合	牽引式比抵抗探査(オームマップパー) 表面波探査	堤防天端または小段上において、堤防縦断方向にオームマップパーと表面波探査を実施する。 オームマップパーにより得られる比抵抗分布をもとに、堤体土の縦断方向の土質区分を行う。また、表面波探査により得られるS波速度分布をもとに、堤体土の締め具合を区分する。探査結果の解釈に当たっては、既往のボーリング資料や築堤工事に関する資料を十分に活用する。 探査結果は、区間設定や詳細点検を実施する断面の位置選定等に利用する。
		堤体内の異物・空洞等の有無	レーダ探査 EM探査	堤防天端または小段上において、堤防縦断方向にレーダ探査またはEM探査を実施する。 アノマリーを示し、異物や空洞が存在する可能性が高いと判定された箇所については、想定される存在深さに応じて開削またはボーリング、サウンディング等を実施して確認を行う。
	横断方向	土質構成(築堤履歴)	比抵抗2次元探査(電極設置方式)	ボーリング調査やサウンディングを補完するために、堤防横断方向に測線を設定して、電極設置方式の比抵抗2次元探査を実施する。電極間隔はできるだけ密にとる。 得られた堤体内の比抵抗分布をもとに、堤体内の土質構造を推定する。探査結果の解釈に当たっては、築堤履歴に関する既存資料等を参考にする。
基礎地盤	縦断方向	堤防沿いの土質構造	表面波探査 牽引式比抵抗探査(オームマップパー)	堤防のり尻付近において、堤防縦断方向に表面波探査を実施する。地盤の比抵抗が比較的高い場合には、オームマップパーも併せて実施する。 表面波探査によって得られたS波速度分布やオームマップパーによって得られた比抵抗分布をもとに、透水層や液状化層の分布範囲や層厚の変化、被覆土層の有無や層厚等を推定するほか、旧河道等の要注意地形の分布範囲を推定する。調査結果の解釈に当たっては、既往のボーリング資料を十分に活用する。 探査結果は、区間設定や詳細点検を実施する断面の位置選定等に利用する。
		異物・空洞等の有無	レーダ探査 EM探査	堤防のり尻付近において、堤防縦断方向にレーダ探査またはEM探査を実施する。 アノマリーを示し、異物や空洞が存在する可能性が高いと判定された箇所については、想定される存在深さに応じて開削またはボーリング、サウンディング等を実施して異物の確認を行う。
構造物周辺		樋門等構造物周辺堤防内の緩みや空洞の有無	比抵抗2次元探査(電極設置方式) 表面波探査	対象とする構造物を中心に堤防縦断方向に測線を設定し、電極設置方式の比抵抗2次元探査および表面波探査を実施する。 得られた比抵抗分布やS波速度分布をもとに、不連続な部分や異常な部分が認められた場合には、ボーリングやサウンディングによる詳細な調査を実施する。

参 考 文 献

- 1) 宇野尚雄 (2006) : 河川堤防を対象とした最新の点検・診断技術, 地質と調査, 第3号, pp.24-29.
- 2) 財団法人 国土技術研究センター (2004) : 中小河川における堤防点検・対策の手引き (案), JICE 資料第 104006 号.
- 3) (社) 日本河川協会 (1997) : 建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説.
- 4) 建設省河川局 (1995) : 河川堤防耐震点検マニュアル・解説.
- 5) 国土交通省 (2002) : 河川堤防設計指針.
- 6) 財団法人 国土技術研究センター (2002) : 河川堤防の構造検討の手引き.
- 7) 国土交通省河川局治水課 (2001) : 樋門等構造物周辺堤防点検要領.
- 8) 桑野川航空写真 撮影: 平成 16 年 4 月 縮尺 1:6500 国土交通省四国地方整備局 那賀川河川事務所.
- 9) 小西千里, 林宏一, 山下善弘 (2005) : 電極棒を用いない牽引式電気探査手法「オームマップ」の適用実験と今後の展開, 応用地質技術年報, No.25, pp.47-60.
- 10) 林宏一, 鈴木晴彦, 斎藤秀樹 (2001) : 人工振源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用, 応用地質技術年報, No.21, pp.9-39.
- 11) 山下善弘, 利岡徹馬 (1998) : 浅部電磁法マッピング装置 (GEM-300) の現場適用実験結果について, 物理探査学会第 99 回学術講演会講演予稿集, pp.175-179.
- 12) 島裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹 (1995) : -建設・防災・環境のための新しい電気探査-比抵抗映像法, 古今書院.
- 13) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎 (1975) : 日本の地盤における弾性波速度と力学的特性, 第 4 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.89-96.
- 14) Terzaghi, K. & R.B.Peck (1948) : Soil Mechanics in Engineering Practice.
- 15) 鈴木晴彦, 林宏一, 中山文也, 石田章司, 中山修 (2001) : 人工振源を用いた表面波探査の土木調査への適用, 物理探査学会第 105 回学術講演会論文集, pp.9-12.
- 16) 鈴木晴彦, 佐藤信一, 辻孝広 (2002) : 人工振源を用いた表面波探査の土木調査への適用 (その 2) 河川堤防調査への適用事例 - 物理探査学会第 106 回学術講演会, pp.9-12.
- 17) 岡田聡, 林宏一, 泊耕一, 井上宗雄, 藤野隆 (2003) : 表面波探査の河川堤防への適用例, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.39-40.
- 18) 関沢元治・佐藤伸吾, 中山修・鈴木善友, 勝山明雄, 小松田孝寿, 杉浦達也, 太田史朗, 平塚智幸 (2004) : 宮城県北部地震による河川堤防被害調査について, 河川技術論文集, Vol.10, pp.261-266.
- 19) 小西千里, 林宏一, 田中敏彦, 三明崇史 (2006) : 牽引式電気探査手法 (OhmMapper) を用いた堤体土質の把握について, 物理探査学会第 114 回学術講演会講演予稿集, pp.242-245.
- 20) 田中敏彦, 藤村尚, 植田光明 (2006) : 牽引式電気探査 (オームマップ) による堤防評価の一例, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.131-132.