

河川堤防の内部構造調査における各種物理探査手法の適用性の検討

河川, 堤防, 現地調査, 物理探査

京都大学大学院 国際会員 岡 二三生, 小高 猛司, 木元小百合
淀川河川事務所 非会員 芝田 弘一, 服部 浩二
川崎地質(株) 正会員 北川 義治, 山田 茂治

1. はじめに

平成 16 年には集中豪雨が相次ぎ、多くの堤防が破堤した。破堤の主因の多くは越水であるが、越水から破堤に至るまでの侵食過程は、堤防の内部構造や浸透状況に密接に関連しており、それぞれの事例で異なる。河川堤防は現地発生浸漬土で構築される場合が多く、その構成材料は様ではなく、場合によっては局所的に空洞、ゆるみ等の弱部が存在する事例も多くみられる。弱部を有する堤防は浸透や地震に対しての安全性が低いことは当然のことながら、越水後の破壊過程においても不利である。本研究は堤防内部の診断技術の開発を目的とし、各種物理探査手法により堤体内部の構造調査を行った結果を示す。対象とした堤防は、源流に風化花崗岩地帯を擁する河川にあり、主たる構成材料は砂質土である。目視調査により、堤防天端の縦断方向に亀裂が見つかり、パルスレーダによる堤防天端付近の浅部調査により、延長 100m に渡りゆるみ領域の存在が確認された。本調査では、このゆるみ領域を含む延長 150m の河川堤防の縦断面を対象に、パルスレーダよりもさらに深部まで探査可能な物理探査手法を 3 種類用いて、河川堤防の内部構造の調査を実施した。また、従来のパルスレーダにより、堤防横断面の法面浅部の内部調査の結果も併せて示す。

2. 物理探査手法

本調査に用いた物理探査手法とそれぞれの特徴の概要を以下に示す。

1) **高密度表面波探査**：比較的深部までの堤防内部・基礎地盤の土層構造を概略的に把握することを期待して実施した。堤防縦断測線上に等間隔で受振器を多数設置し、一定間隔で起振した振動波形を多チャンネルで受振した。以上のデータを地点ごとの波形データ群に波形処理・編集し、鉛直方向の S 波速度分布を求め、最終的に測線下の鉛直断面を逆解析し、地下構造を推測した。

2) **連続波レーダ探査**：送信信号の周波数帯域幅を広く、かつ掃引時間を長くすることで、パルスレーダ探査より高分解能で地盤深部まで調査することが可能である。本調査では、プロファイル法で測線下の反射断面（時間断面）を得て、ワイド・アングル法で地中の電磁波の伝播速度分布を求めた。プロファイル法による反射断面の時間断面をワイド・アングル法で求めた伝播速度を用いて深度断面に変換した。

3) **EM 探査**：本調査ではスリングラム EM 探査を行い、一定間隔の送・受信コイルを持って、測線上を 2m 間隔で静止測定することにより、二次磁場の同相および離相成分を計測し、両成分の関係から地中の導電率あるいは比抵抗値を算出した。浅部探査には送・受信コイル一体型の装置を用いたが、深部探査ではセパレート型を用い、コイル間隔を 10m および 20m の 2 種類で測定することにより異なる深度の導電率情報も観測した。

なお、当該堤防では別途ボーリング調査を実施しており、いずれの調査の解析結果の解釈にも、適宜、N 値と土質性状のデータを反映させている。また、地下水位は、深度 6m 前後であった。

3. 調査結果

図 1～3 にそれぞれ、高密度表面波探査、連続波レーダ探査および EM 探査によって得られた解析結果を示す。また、図 4 は、最も堤防天端にゆるみ領域が確認された位置において実施した、パルスレーダ探査による堤防横断面の探査結果である。以下それぞれの手法において得られた結果について説明する。

1) **高密度表面波探査**：図 1 に解析結果を示す。図の上段は初期モデルとした計測速度値のプロット断面図、中段は初期モデルおよびボーリング地点における N 値をパラメータとしたインバージョン解析結果、下段は中段の断面図を基にして解釈した土質構造断面図である。地下 10m 以深はノイズにより S 波速度 160 m/s 程度の比較的高速な領域が一様に連続しており、本探査の限界深度を示している。図 5 は探査で得られた S 波速度と同地点であらかじめ実施していたボーリング調査による N 値との比較である。深度 4m 付近で N 値が若干大きくなり、7m 付近で再び若干小さくなっているが、その対応する部分では S 波速度も増減しており、両者は相関性があることが認められる。また、砂層において S 波速度が概ね大きく、粘土分の混入に応じて速度が小さくなる傾向が認められたが、S 波速度値から客観的に土質を分類できる程の変化ではなかった。表面波探査結果の特徴としては、土質の硬軟に顕著に相関していることがわかり、事前のパルスレーダ探査によって確認された堤防浅部のゆるみ領域は、この探査でも明確な低速度を示しており、本探査手法はゆるみ領域の診断にも有効と考えられる。また、それ以深の地盤構造の推定にも一定の効果を挙げている。

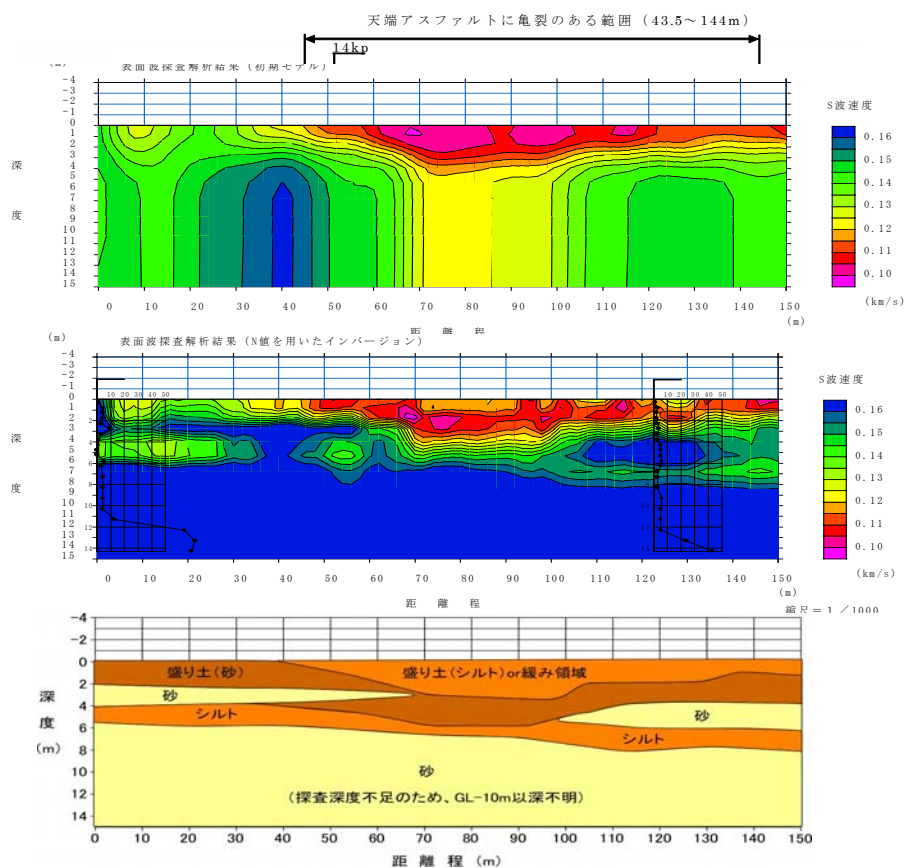


図1 高密度表面波探査結果

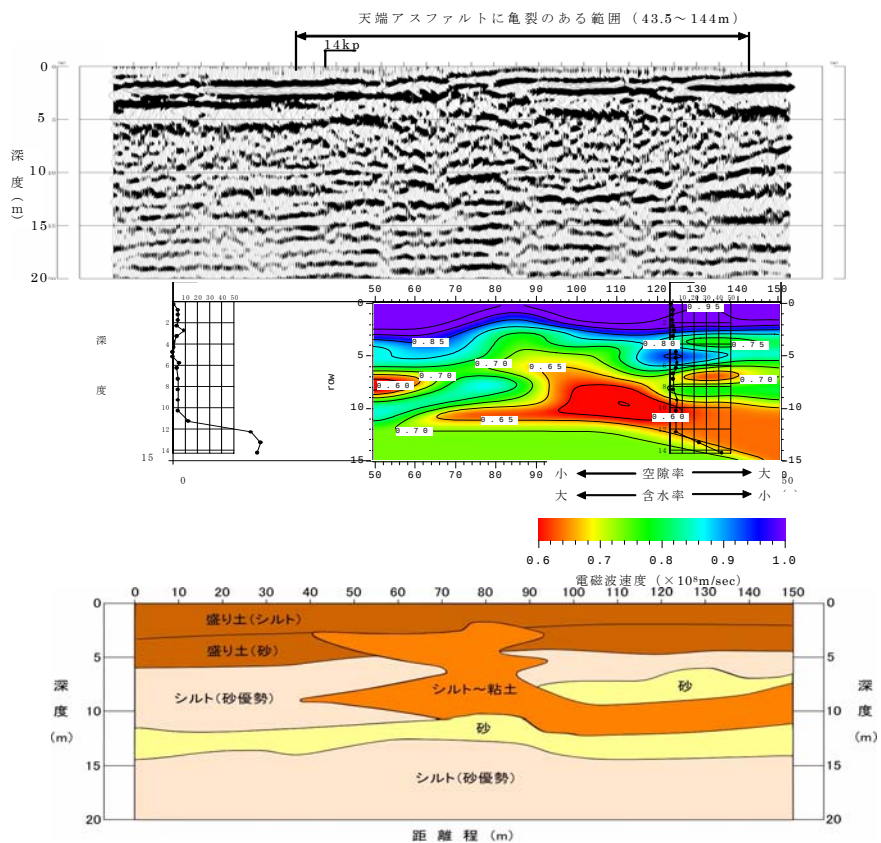
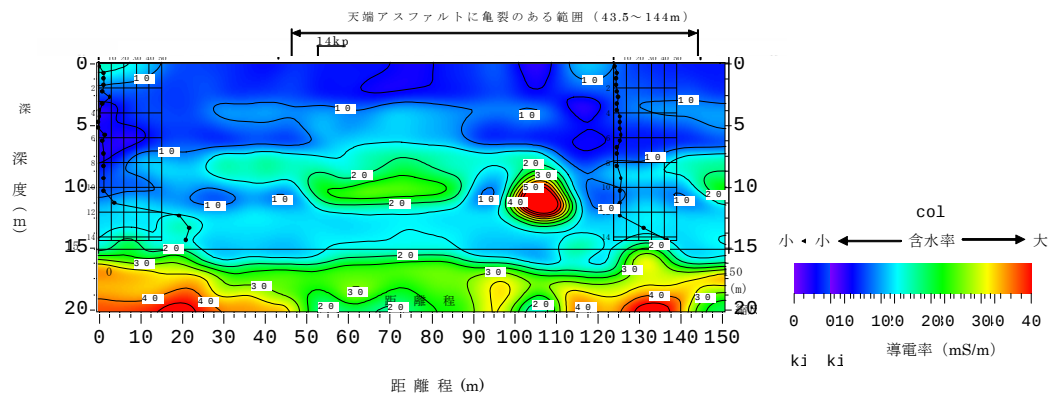
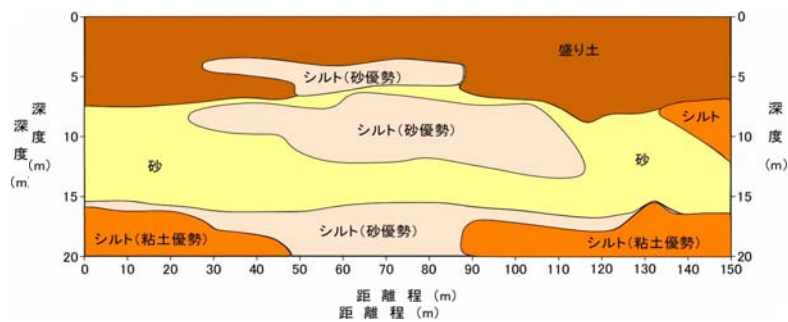


図2 連続波レーダ探査結果



(a) 二次元導電率断面図



(b) (a)の結果を基にして解釈した土質構造断面図

図3 スリングラム EM 探査結果

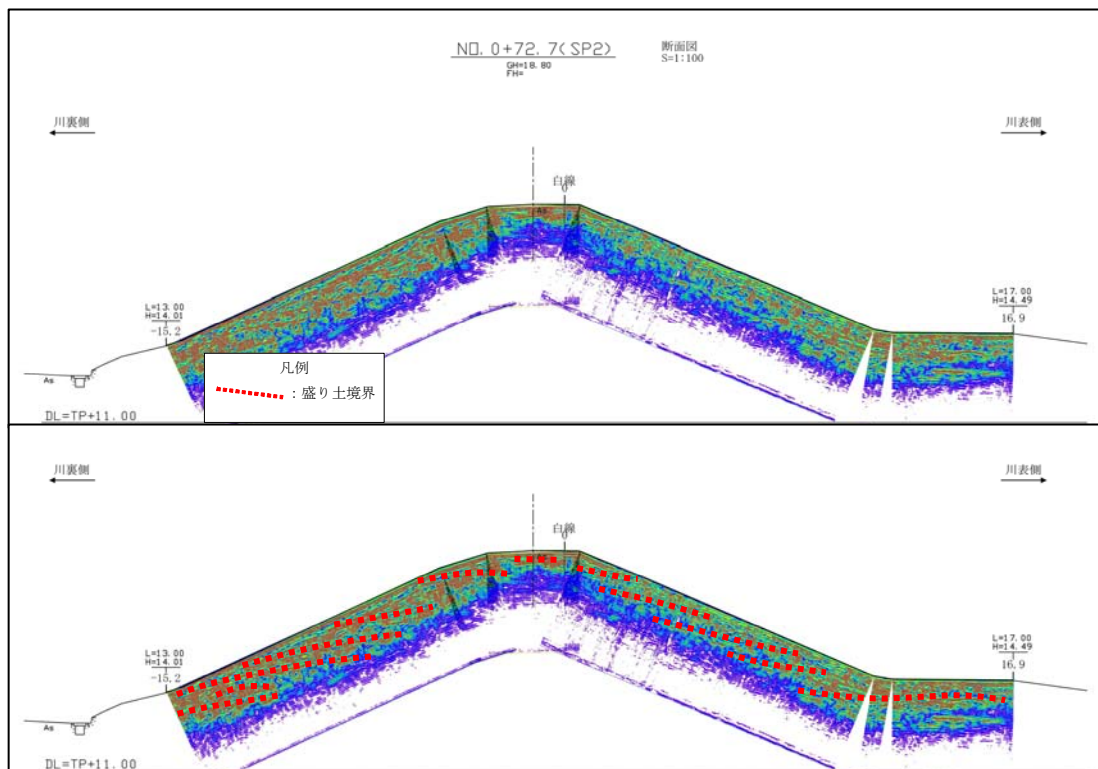


図4 パルスレーダ探査による堤防横断面の調査結果

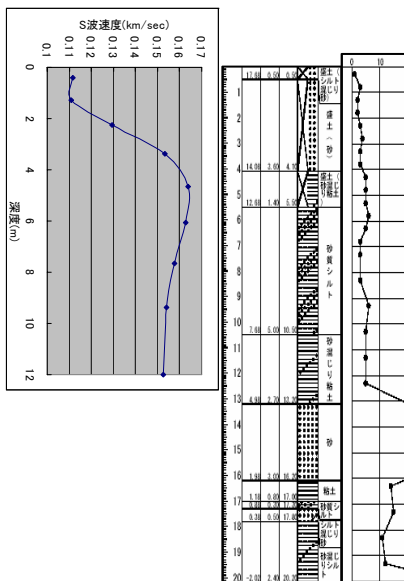


図 5 高密度表面波探査における
S 波速度とボーリング結果
との比較

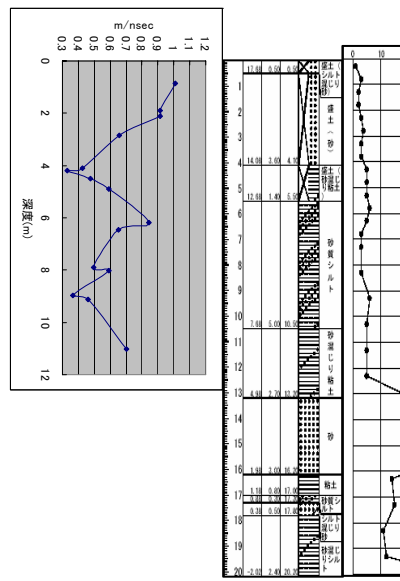


図 6 連続波レーダ探査における
電磁波速度とボーリング
結果との比較

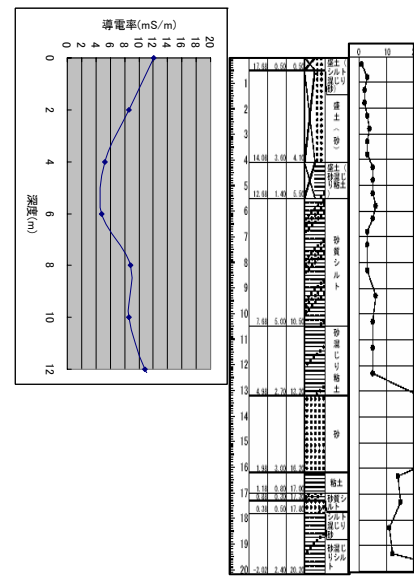


図 7 スリングラム EM 探査に
おける導電率とボーリン
グ結果との比較

2) 連続波レーダ探査：図 2 に解析結果を示す。図の上段はプロファイル法による反射面断面図，中段はワイドアングル法による電磁波速度構造断面図，下段は上中段の両断面図の結果を総合して解釈した土質構造断面図である。電磁波速度の高低は，空隙率の高低・含水率の低高を示す。図 6 に示すように，ボーリングによる土質区分の結果と比較すると粘土の混入に応じて電磁波速度が急激に低下する傾向が認められており，本調査の解析結果は粘土と砂の土質区分を検討するのに役立つ，比較的深部の地盤構造の推定にも効果があることがわかる。

3) EM 探査：図 3 に解析結果を示す。図の上段は二次元導電率断面図，図の下段は上段の図の結果を基にして解釈した土質構造断面図である。図 7 に示すボーリング地点での比較では，導電率と土質区分の間に相関性が認められており，砂で低導電率となり，粘土分の混入に応じて高導電率となる傾向が見られた。深度 8m 付近で N 値の上昇にあわせて導電率も上昇しており，地下水位以深では N 値との間にも概ね相関性が認められており，N 値の大小と導電率の低高が対応する傾向が見られた。粘土分が混入する割合が高くなることに伴って低導電率となり，土質区分の判定にも役立つ。この探査が深部調査に最も有効であったが，地下水位以浅の不飽和領域での分解能は若干低い。

4) パルスレーダによる堤防横断面調査：図 4 に得られた結果を示す。上図が調査で得られた反射面であり，下図はその反射面に盛土構造の解釈を付け加えたものである。図に示すように，ごく浅部においては高い分解能を示しており，ゆるみ領域や空洞を見つけるのには効果が高い。堤防天端の左側に若干盛土構造が異なると思われる箇所があるが，この位置の堤防縦断方向に光ファイバーケーブルが埋設されており，その埋め戻し土の部分が，他の既設盛土部と構造が異なっていると考えられる。

4. まとめ

今回の調査に用いた探査手法は，いずれも堤防内の構造調査に効果があることが確認できた。天端から比較的浅部にあるゆるみ領域などの軟弱領域を特定するには高密度表面波探査に分がある。しかし，物理探査のターゲットの重点を堤防全体の土質性状の把握におき，浸透や地震へ備えた堤防全体の安定性評価に用いるためには，より深部までの土質性状をある程度特定することができる他の 2 手法が適している。特に，図 1～3 に見るように，たかだか 100m ほどの延長であっても，堤防の内部性状は不均質であることが示され，膨大な延長の堤防において，堤体内部の弱部を見つけるには，今回のような非破壊の物理探査手法が有効であることがわかった。しかしながら，コスト面の問題もあり，調査目的，経費などを総合して物理探査手法を決定する必要がある。なお，本調査は，国土交通省の建設技術研究開発助成制度の研究課題「河川堤防の調査，再生と強化法に関する研究開発（代表：岡二三生，研究期間：平成 16 年度～平成 18 年度）」の一環で実施している。記して謝意を表する。

参考文献 地盤工学会編：地盤工学への物理探査技術の適用と事例，地盤工学・実務シリーズ 14，2001。