

河川堤防の維持管理における物理探査の効率的な適用方法

Application of Geophysical Exploration to River Levee

南部 光 広 (なんぶ みつひろ)

応用地質(株)

林 宏 一 (はやし こういち)

応用地質(株)

小 西 千 里 (こにし ちさと)

応用地質(株)

1. ま え が き

河川堤防の破壊は、「問題となる弱部」に外的要因が作用して発生することになるため、堤防の維持管理にあたっては、「問題となる弱部」を広い範囲から効率よく抽出する技術が不可欠である。しかしながら、地形検討、現地踏査のみでは把握内容に限界があり、以下の問題がある。

- 1) 堤防表面観察で確認できる変状は明瞭なものに限られる。
- 2) 地形判読では伏在構造・埋没地形確認に推定が含まれる。
- 3) 堤体材料の不均質分布把握が困難である。

ボーリング調査では、これらの把握精度は増すもののコストならびに時間の面で非効率である。したがって、堤防縦断方向の堤体および基礎地盤の土質構成や問題となる弱部を、全区間にわたって連続的に効率良く抽出できる手法として物理探査が有効である。すなわち、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物理探査を実施することは、物理探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。

本論文では、堤防調査への効率的物理探査手法として、牽引式電気探査と表面波探査とを述べるとともに、堤防縦断方向への調査結果適用にあたって、土質区分などの解釈手法についても、これまでの調査結果に基づいて提示する。

2. 調査手法の選定

図-1に調査の流れを示す。膨大な延長を有する堤防に対しては、堤体ならびに基礎地盤の地盤構成、土質特性を把握する上で物理探査は有効な手法である。同図に示すように、堤防への物理探査の適用としては、堤防縦断方向と横断方向への適用が考えられるが、縦断方向への適用に対して効率的な手法が適用できる。適用できる手法としては牽引式電気探査と表面波探査を組み合わせた手法が最も有効と考えられる。このうち、牽引式電気探査は地表に電極を設置する手間が不要となるため、従来の電気探査手法に比べて調査効率が圧倒的に高く、また舗装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して総合的に解釈を行うことにより、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。ただし、牽引式電気探査は法面などの斜面や、狭い場所では測定が難しい場合もある。このような場合には補完的に電磁探査を用いるのが有効と思われる。

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波速度の二次元断面が得られ、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、電気探査についても、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。このように、単独の手法ではなく複数の物

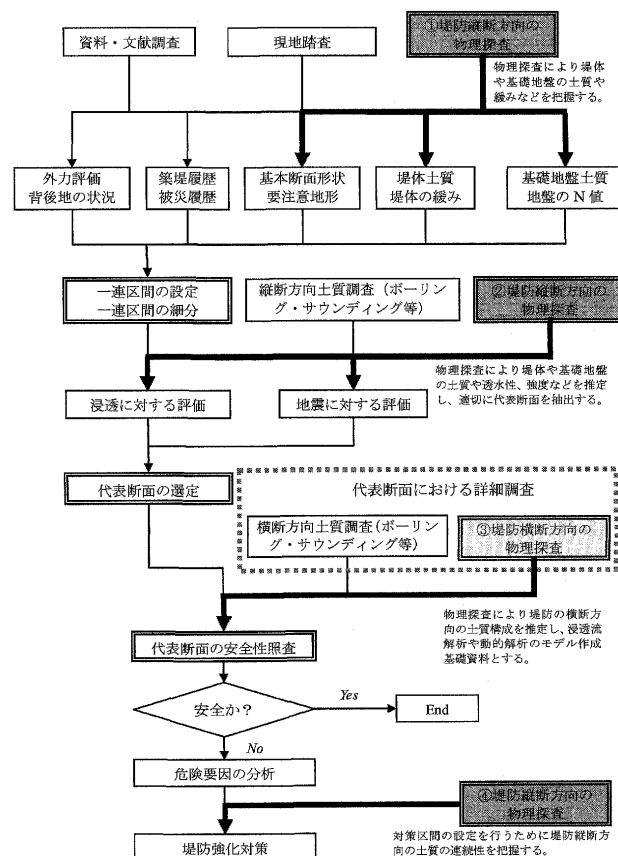


図-1 堤防調査の流れと物理探査手法の位置づけ

表—1 河川堤防の縦断方向の調査において把握すべき弱点項目と物性および有効な物理探査手法

弱点項目	弱点の要因	物性	有効な物理探査
高透水ゾーン	粗粒部	高比抵抗かつ低S波速度	牽引式電気探査, 電磁探査と表面波探査の組み合わせ
堤体および基礎地盤の軟弱部	強度	低S波速度かつ低比抵抗領域	表面波探査と牽引式電気探査, 電磁探査の組み合わせ
地盤構造の不陸	地山出現深度, 埋没谷の存在, 沖洪積区分	S波速度と比抵抗による土質判別, 物性の境界	表面波探査と牽引式電気探査, 電磁探査の組み合わせ, S波反射法地震探査
異常構造	河川堤防内埋設構造物	物性の境界, 比抵抗やS波速度の異常部	表面波探査, 牽引式電気探査, 電磁探査, S波反射法地震探査, 地下レーダ探査, 磁気探査他

理探査手法を組み合わせ測定し、異なる物性値を取得して総合的に解析することにより、地盤の密度の判定精度が高まり、「問題となる弱部」の推定の精度は高まる。例えば、「問題となる弱部」を推定するために必要な地盤の性状と物理探査で得られる物性値の関係は表—1のようにまとめられるが、いずれも複数の物性値を結びつけることにより精度が高まることが期待できる。

以上のように、探査深度や分解能を含めたそれぞれの物理探査の利点および欠点を理解した上で、単独の手法に頼らず、複数の手法を効果的に組み合わせた物理探査の計画を立案することが重要である。

河川堤防における物理探査手法の適用案を表—2に提示する。堤防の維持管理にあたっては、縦断方向の調査が最も物理探査の特徴が生かせると考えられるが、これに適用する調査手法としては前述した牽引式電気探査と表面波探査の2手法があげられる。

3. 表面波探査と牽引式電気探査の概要

3.1 表面波探査

表面波探査は弾性波探査の一種で、地盤の地表面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、地盤のS波速度分布を求める手法である。測定に当たっては、牽引式受振器アレイ（ランドストリーマー）を利用することにより、測定作業を効率よく進めることができる。すなわち、ランドストリーマーを一定間隔ごとに移動させて起振する作業を繰り返すことで、連続的なS波速度構造を得ることができる。土質地盤のS波速度は剛性率等に直接関係する物性値であり、S波速度分布から土質構成や強度特性を推定することができる。

3.2 牽引式電気探査

牽引式電気探査は、地盤に電流を流し、その電位応答を測定することにより、地盤の比抵抗構造を得る電気探査の一手法である。従来の電気探査は、電極棒を地面に打設する必要があるため、測定に手間と時間がかかる。これに対して、牽引式電気探査はキャパンター電極と呼ばれる非固定式の電極を用いて移動しながら測定するので、測定作業を効率的に行うことができる。土質地盤の比抵抗は粒度特性や飽和状態と関係があり、得られる比

抵抗構造から土質構成や地下水状況を推定することができる。

4. 堤体および基礎地盤の土質性状の評価方法

4.1 概要

比抵抗は主に物理特性、S波速度は強度特性と関係があるので、二つの物性値のクロスプロット解析を行うことにより土質構成や強度

度を定性的に評価することができる。さらに進めて定量的な評価を行うためには、クロスプロット解析結果とボーリングや土質試験結果などとの対比が必要である。また、流域の地形・地質観察結果や流路の変遷を考慮することも不可欠である。

4.2 安全評価断面図の作成

物理探査を実施し、それぞれの堤防において物理特性を指標とした安全性評価基準を設定することにより、客観的かつ効率的に弱部を抽出することができる。比抵抗断面に示された物性値は測線距離と深さに対する比抵抗である。また、S波速度断面に示された物性値は測線距離と深さに対するS波速度である。そこで、同一地点における、これらの物性値とボーリング柱状図や土質試験結果を対比させて、比抵抗およびS波速度と土質性状の関係を明らかにする。この関係を用いて堤体および基礎地盤の土質区分と締固め度を推定した安全評価断面図を作成する。口絵写真—4に具体的手順の例を示す。比抵抗断面(a)とS波速度断面(b)から、任意の地点の比抵抗とS波速度を抽出する。図(c)は、このようにして抽出した(a),(b)の両断面のすべてのデータを、S波速度を横軸に比抵抗を縦軸にとってクロスプロット図にしたものである。クロスプロット図において、ボーリング結果などを参照して土質区分と強度の境界を設定し、全体をいくつかの領域に区分する。このように区分した結果より、堤体ならびに基礎地盤について土質区分を行い、二次元断面として表示して安全評価断面図(d)とする。例えば距離程220 m、深度3 mの地点(丸印)の比抵抗は500 Ω mであり、S波速度は155 m/sである。この地点の物性は、クロスプロット図(c)の丸印の場所にプロットされる。ここでは、クロスプロット図における左上の領域(赤)は連続している可能性あり、安全性に問題がある区間として評価される。ここで、土質区分と強度より安全性評価のための区分を行う場合、各地区において土質構成が異なるので、同じ値でもって評価するのは難しい面がある。データの集積ができれば統一的な判断基準の作成は可能であるが、現時点では、そこまでの集積はできていない。このことより、閾値については各地区の土質特性に応じて決めることになる。口絵写真—4の例では、比抵抗450 Ω m、S波速度160 m/sを

表一 2 河川堤防における物理探査手法の適用方法

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物理探査手法	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まり具合	牽引式電気探査 表面波探査 電磁探査	堤防天端または小段上において、堤防縦断方向に牽引式電気探査と表面波探査を実施する。牽引式電気探査の実施が困難な場合は電磁探査を行う。 牽引式電気探査により得られる比抵抗と表面波探査により得られるS波速度から、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波速度をもとに、堤体土の締まり具合を区分する。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 電磁探査	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電磁探査を実施する。 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 牽引式電気探査 電磁探査	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、牽引式電気探査も併せて実施する。牽引式電気探査の実施が困難な場合は電磁探査を行う。 表面波探査によって得られたS波速度や牽引式電気探査によって得られた比抵抗をもとに、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 電磁探査	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電磁探査を実施する。 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。

境に四つの領域に区分できる。クロスプロット図における左上の領域（赤）は、ボーリングデータから緩んだ粗粒の材料からなると推定される。(d)の安全評価断面に

おいて同様な箇所が堤体下部に薄く連続している可能性あり、これらの区間は安全性に問題がある区間として評価される。

4.3 物理探査を組み合わせた解析・解釈の流れ

堤防縦断方向における物理探査の解析と評価の一般的な流れを、堤体および基礎地盤に分けて図-2および図-3に示す。また、口絵写真-5に評価の流れの概念を示す。クロスプロット図に用いて土質区分を行う際には、ボーリングやサウンディングデータ等も利用して、当該堤防に即した土質区分境界を設定する。それを基に推定土質区分図を作成する。

牽引式電気探査から解析した一次元比抵抗構造を連結して擬似的な二次元比抵抗断面を作成する。また、表面波探査結果から得られた一次元S波速度構造より、同様に擬似的な二次元S波速度断面を作成する。

S波速度とN値の間には、比較的良好な相関があることが知られており、例えば今井¹⁾によって次式が提案されている。

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

V_s : S波速度(m/s)

口絵写真-6はS波速度とN値との関係をプロットしたものであり、図中には式(1)も示している。これらの図よりS波速度をN値に換算することができ、換算したN値から相対密度などを推定することもできる。ただし、S波速度とN値の関係は土質や深度、年代によって異なるので、式(1)で換算した値はあくまでも目安である。個々の調査地において、多くのボーリングのデータがあれば、その調査地に合致するように換算式を作成することが望ましい。また、測定データが少ない場合、得られたS波速度とその調査地のN値の関係が同式に矛盾しないことを確認するべきである。堤防調査では調査区間が縦断方向に極めて長く、概略の土質分布や強度を得ることが重要である。このような調査目的の場合、二次元の断面(距離-深度-物性値)ではなく、距離-物性値の一次元のデータとした方が堤防弱部抽出などの評価に利用しやすい場合がある。また、物理探査の構造分解能を考慮すると、空間的な平均値で扱ったほうが妥当な場合も多い。さらに、堤体と基礎地盤では土質構成、飽和度および強度の差異が顕著で、特に堤体は不飽和、基礎地盤は飽和状態の場合が多く、堤防の安全性の評価においても堤体と基礎地盤に分けて評価することが多い。したがって、クロスプロット図の作成に際しても堤体と基礎地盤に分けて作成し、堤防の安全性評価を行う方が望ましい。天端や小段、法尻の複数測線で測定を行った場合は、天端のデータから堤体の平均値、小段や法尻のデータから基礎地盤の平均値を求めることができる。次に、物理探査結果より作成されたクロスプロット図より、土質性状を解釈するための判定基準を設定する。判定基準はボーリングやサウンディングの結果等を参考

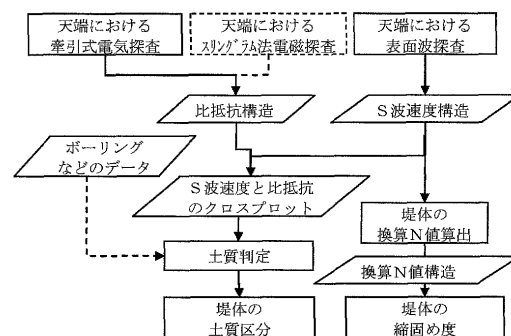


図-2 物理探査の解析・解釈の流れ(堤体)

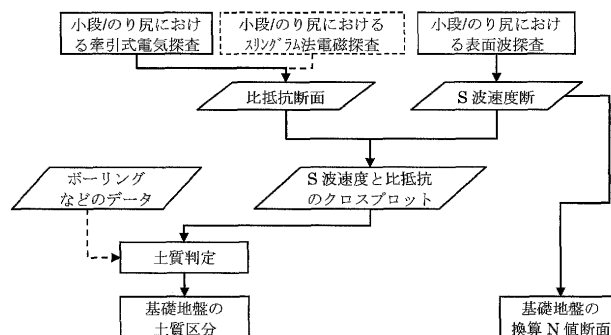


図-3 物理探査の解析・解釈の流れ(基礎地盤)

にして、比抵抗とS波速度の両物理値と土質との関係に基づいて区分設定する。この判定基準に基づいて解釈された堤防の土質区分をまとめて推定土質断面として作成する。比抵抗およびS波速度と土質の関係は、築堤材料や基礎地盤の地質あるいは地下水や河川水の水質等さまざまな要因で変化する。このことより、(i)同一堤防での物理特性と土質との関係、(ii)同一地域、もしくは基礎地盤および築堤材料が良く似た地域の物理特性と土質との関係、(iii)文献や公開データベース等による一般的な物理特性と土質との関係などを把握することが必要である。

5. む す び

河川堤防の縦断探査に対しては、牽引式電気探査と表面波探査とを組み合わせることにより、土質構成や土質物性値などを把握できることを述べてきた。今後、データを積み重ねていくことによって、より広範な地域のクロスプロット図を作成していくことができ、適用性はさらに増していくものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 今井常雄・麓 秀夫・横田耕一郎：日本の地盤における弾性波と力学的性質，第4回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 89～96，1975。

(原稿受理 2011.3.30)