

# 河川堤防の安全性評価のための統合物理探査の適用

土木研究所 技術推進本部 特命上席研究員 稲崎 富士

## 1. はじめに

河川堤防は、最も古い土木構造物の一つであり、築堤により洪水被害から国土と国民を守ることは、古代から今日に至るまで国家の最優先的課題の一つであった。河川堤防は長年にわたって改築や補修が繰り返されてきており、外見は同様でも、内部の構造は延長方向にも横断方向にも不均質になっている。このような不均質内部構造が、洪水や地震時の破堤に関係していることは想像に難くない。近年、河川近傍の開発が進み、洪水や地震に耐える強い堤防を整備することが急務となってきた。そのためには、何らかの手法で堤防の安全度を評価することが求められる。従来、これには空中写真判読、全線にわたる目視点検、スポット的な確認ボーリングなどが採用されてきた。しかしこれらの方法で堤防内部の不均質構造や支持地盤の構造を把握することは極めて困難であり、これに代わる効果的かつ適用が容易な現場計測・調査手法の開発が求められていた。

この要請に応えるため、土木研究所では河川堤防の内部を連続的にイメージングし、浸透性と耐震性に関わる物性を評価することが可能な統合物理探査手法の開発と適用を進めている。これまでの調査研究の結果、牽引型比抵抗探査法と土研で開発したランドストリーマー方式の表面波探査法を組み合わせた統合物理探査が有効かつ経済的であることが明らかになってきた。

本発表ではこれらの手法の概要と直轄堤防での適用事例を紹介する。

## 2. 堤防統合探査の要件

非破壊調査の一つである物理探査では、堤防の内部構造や基礎地盤の構造を把握することが可能であるが、単一技術によつて的確に問題区間を抽出することは困難である。これに対し複数の手法を適切に組み合わせて実施し、統合的な解析を加えれば、検出能力を飛躍的に向上させることができる。しかしそれには経済性を向上させることが不可欠であった。そこで、1):非破壊計測手法であり、堤防の安全性に影響しないこと、2):堤防および地盤の物性評価指標として、S波速度、比抵抗あるいは密度分布を計測・解析する手法であること、3):探査深度として堤体内部および支持地盤の深さ 5m~20m 程度までを対象とする浅部探査法であること、4):異常部を識別できる十分な構造分解能を有すること、5):方法論およびデータ処理・解析過程が客観的であること、6):現地計測の作業性および計測機器の操作性に優れ、連続的イメージングが可能であること、7):普及促進の前提となる技術開示・マニュアル化が可能であること、という要件を基準に、いくつかの物理探査手法について、現地での適用実験を含めた調査検討を加えた。その結果、上記のランドストリーマー表面波探査法と牽引型比抵抗探査法の組み合わせが、これらの条件を充足する最適な構成であるという評価を得た。

### 3. 堤防統合探査手法の概要

#### 3.1 ランドストリーマー表面波探査法

表面波探査法とは、表層付近を伝わる表面波の速度分散特性から地盤のS波速度構造を推定する手法である。表面波の速度は通常周波数によって異なる分散性を有している。それが地盤構造、特にS波速度構造に依存することから、逆解析を行ないS波速度構造を推定する。S波速度は地盤材料の硬さの指標である剛性率に直接関係する物性値であり、地盤の動的解析に不可欠な基本情報の一つでもある。

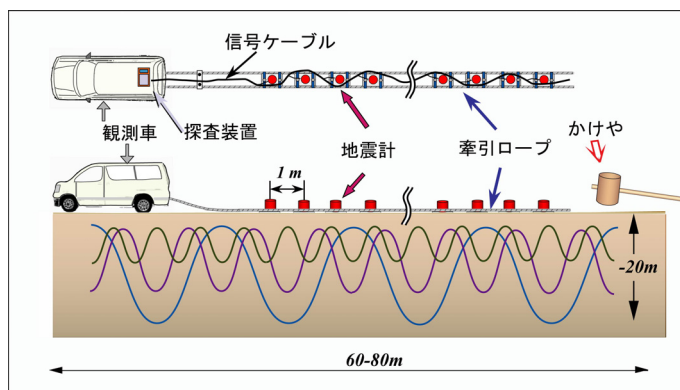


図-1 ランドストリーマー表面波探査法の概念図

上図-1に示すように、地表をかけやで打撃すると、表層部を表面波(レイリー波)が伝播する。これを1m間隔に配列した地震計アレイで測定する。ただし2次元的なS波速度構造断面を得るには、起振点、地震計アレイともに移動させて計測を繰り返す必要がある。従来はスパイク地震計を地面に植え込み固定させていたが、移動に伴い地震計を再設置する作業がネックとなっていた。これに対し、地震計アレイをロープに固定配列し、全体を牽引移動させれば、地震計の再配置を極めて効率的に実行することが可能となる。このように地震計アレイを一体化し、牽引できるようにしたツールが、土研で独自に開発した「ランドストリーマー」と称する現場測定装置である。本探査法では、4~5人の作業員構成で1日あたり1km程度の区間を探査することが可能である。

#### 3.2 牽引型比抵抗探査法

牽引型比抵抗探査法は電気探査の一種であり、電極に相当するダイポールケーブルを牽引移動させながら測定する特殊な装置を使用して地表付近の2次元比抵抗構造を把握する手法である(図-2)。従来の電気探査では、多数の電極棒を地面にあらかじめ植え込んでおく必要があった。2次元断面を得るには、表面波探査と同様に電極棒の再設置が必要となり、1日あたり数100m程度の区間しか測定できなかった。これに対し、この手法では車両等で装置を牽引しながら測定するので少人数でも

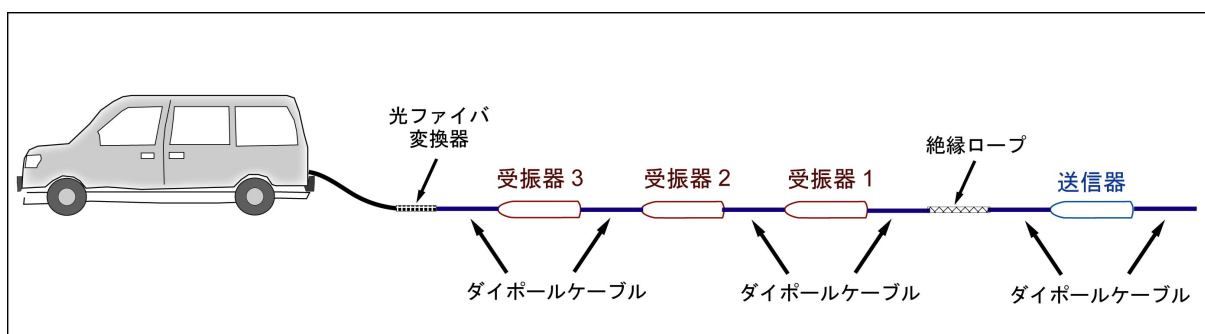


図-2 牽引型比抵抗探査の概念図

1日あたり数kmの区間の測定が可能で、極めて効率的な手法であるといえる。計測される物性値である比抵抗は、不飽和部では材料の粒度特性と間隙率に密接に関係していることが知られている。さらに粒度特性と間隙率は堤体材料の浸透特性を評価する重要な物性指標でもある。すなわち本探査で得られる比抵抗値から、堤体の浸透特性を推定することが可能となる。

#### 4. 探査結果例

これまで右図-3に示す関東地方の3箇所の直轄堤防の他に1箇所、合わせて4箇所において統合物理探査を土研独自で実施し、同探査法の適用性を検討してきた。そのうち、小貝川右岸 34km 地点付近約2km の堤防区間の探査断面を下図-4に示す。探査測線は比高約6mの堤防天端に設定した。

同中図は牽引型比抵抗探査取得データから逆解析によって求めた表層部の比抵抗構造断面である。同図には、堤体盛土に相当する上部約6m以浅が相対的に高比抵抗になっており、地山地盤では相対的に低比抵抗になっていることが示されている。地下水位は天端下約7m付近にあり、地山地盤部の低比抵抗は地下水で飽和されていることによるものであると考えられる。同下図は、ランドストリーマー表面波探査データから1次元逆解析によって求めた S 波速度構造である。堤体盛土に相当する表層6m程度までは、S 波速度( $V_s$ )は約140m/sと低い値を示している。推定さ

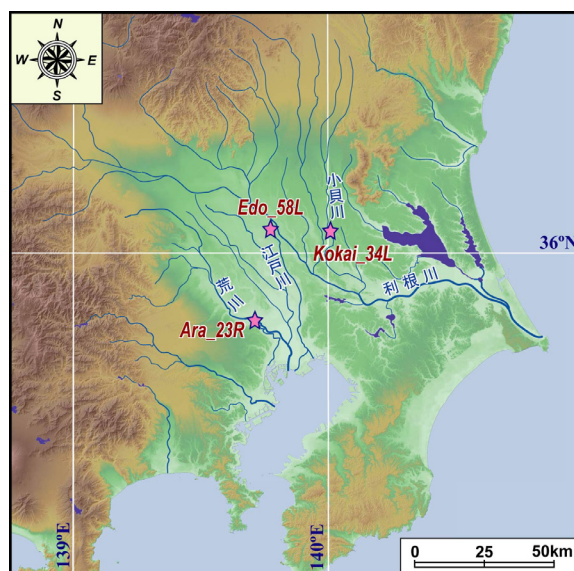


図-3 統合物理探査適用堤防位置図

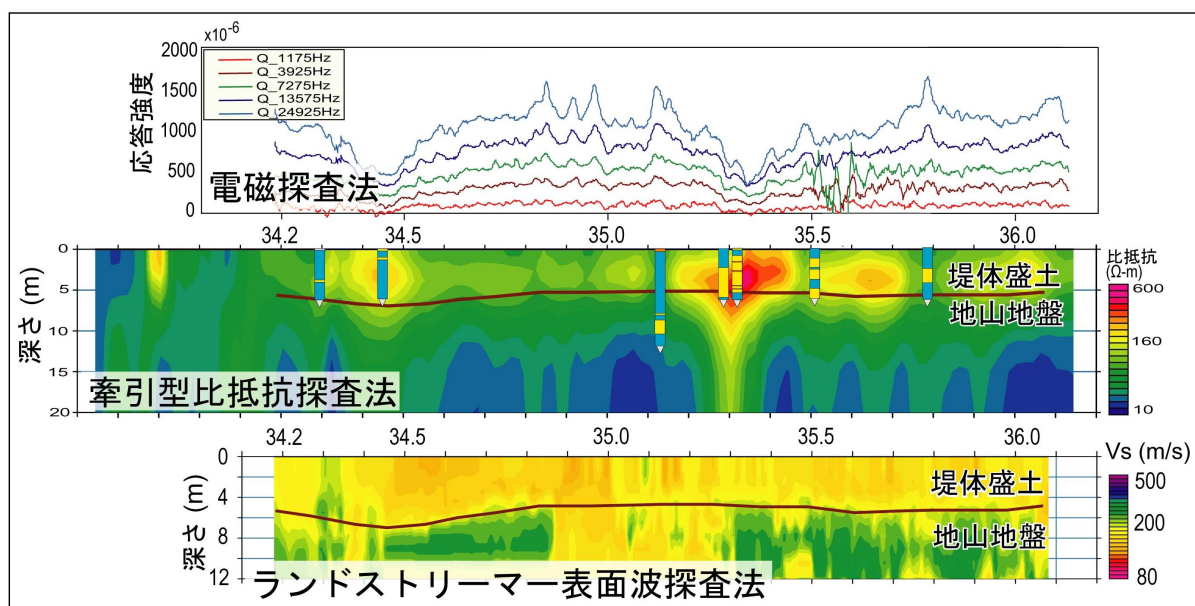


図-4 小貝川右岸 34km 区間統合物理探査結果断面比較

れた S 波速度分布は、比抵抗のそれと比べ変動幅はそれほど大きくないのが特徴的である。なお34.9から35.3km の区間では、下位の地山地盤でも Vs が小さな値を示している。この区間では比抵抗値も相対的に低い値を示しており、粘性土のような軟弱で含水比の大きな地盤が堤防盛土直下に分布していることが推定された。実際この区間は地形的には旧河道交差部に相当し、低 Vs、低比抵抗値という特徴は、旧河道充填細粒堆積物の存在を示すものと解釈される。

ところで比抵抗断面では34.4および35.3km 付近の堤体部に高比抵抗の異常が出現している。異常出現位置は同上図に示した電磁探査データの凹部（高比抵抗を意味する）とも極めて調和的であり、堤体内部の不均質構造を反映したものと評価された。一方で S 波速度構造では堤体盛土部はほぼ一様で、高比抵抗異常部に対応した S 波速度変化は認められなかった。この結果を受け比抵抗異常を示す位置において、堤体材料構成を把握することを目的とした簡易ボーリングが実施された。その成果を簡易柱状図として中図に重ねて表示してある。高比抵抗異常部の大部分では、粗粒砂あるいは礫の混入が確認されている。このことは、堤体部の比抵抗異常が主として材料の粒度特性に起因するものであること、逆にいえば比抵抗構造から粒度特性の「異常」部を検知できることを意味している。

## 5. まとめと課題

河川堤防の内部構造および下位地盤の構造と物性を連続的にイメージし、異常部を抽出することが可能な物理探査手法を開発し適用することを目的として現地評価テストを実施した。対象としたのはランドストリーマー表面波探査法、牽引式比抵抗探査法ほかである。評価テストの結果、両手法によって得られる S 波速度値と比抵抗値の組み合わせから、堤体材料の透水性と硬軟・締め具合を定性的に区分できることがわかった。図-5 にその区分の一例を示す。なお同

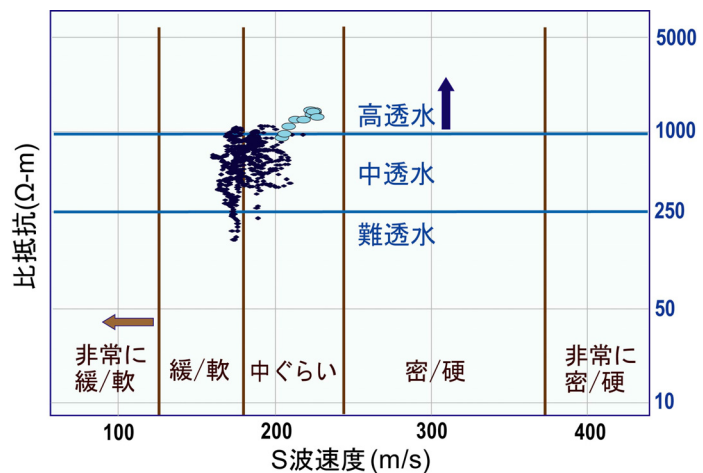


図-5 S 波速度値と比抵抗値を指標とした堤体材料（不飽和部）の透水性・硬軟評価基準例

図には千曲川右岸 56km 付近で実施した統合物理探査の結果を付加している。この区間では平成 18 年 7 月の出水時に堤体からの漏水、基盤漏水などが発生した。図中、青大丸は堤体漏水発生区間の物性値であり、特異的な高比抵抗・高 S 波速度を示している。すなわち、統合物理探査の結果から堤体漏水区間を識別できることがわかった。

今後、さらに適用例を付加して評価基準の確度を向上させるとともに、統合物理探査手法の河川堤防調査への適用手順をマニュアル化し、本手法の全国的な普及展開の促進に貢献したいと考えている。