

2.2 統合物理探査による河川堤防の内部構造探査技術に関する研究

研究予算：運営交付金（治水勘定）

研究期間：平 18-平 20

担当チーム：技術推進本部 特命事項担当

研究担当者：稲崎富士

【要旨】

河川堤防の改修補強を経済的・効果的に進めるためには、要改良区間を効率的に抽出することが必要とされる。堤体は外見的には均質に見えても、内部構造は横断方向・縦断方向ともに不均質である場合が多い。従来の連続的目視調査やスポット的ボーリング調査では、このような不均質構造を検出することは困難であった。そこで、非破壊調査手法である物理探査手法を数種類組み合わせ適用し、堤体および支持地盤内の弱点箇所を経済的かつ高確度で把握する現地探査技術を研究開発対象とし、その適用性・評価基準等について検討した。これまでの現地適用実験の結果、牽引型比抵抗探査法とランドストリーマー方式表面波探査法が作業性に優れ、かつ異常部の抽出に有用であることがわかってきた。つぎに統合探査で得られる比抵抗と S 波速度を指標として、堤体および支持地盤の物性を推定する手順について検討した。その結果、粒度分析などの現地計測結果と照合することで、浸透性と強度の空間的分布を定量的に推定することが可能であることがわかった。

キーワード：河川堤防，S 波速度，比抵抗，浸透性，強度。

1. はじめに

河川堤防の要改良区間を迅速かつ経済的に抽出することができれば、堤防の改修・補強を効率的に進めることが可能になる。堤体は外見的には均質に見えても、内部は横断方向・縦断方向ともに不均質な構造を有している。このような不均質内部構造が、浸透性や強度に影響を与え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、何らかの手段で堤防の安全性を評価することが求められる。従来これには、外力が一樣と考えられる一連区間を、過去の被災履歴および地形地質調査結果を基に区間細分し、代表断面を設定して安全性を照査する、という手順が採用されてきた。しかしこれまでの地形地質調査の密度や精度では、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。

非破壊的に 2 次元の地下構造をイメージすることが出来る物理探査手法は、このような堤防探査に極めて有効であると期待された。ただし従来の物理探査手法は、対象深度が数 10m～数 km と深く、また作業効率の面でも問題があった。そこで、探査深度

が地表から数 10m 程度、すなわち河川堤防の内部構造と支持地盤の構造把握を対象とし、それを連続的な断面として提供可能な物理探査技術について、実験を主体とした研究を実施した。調査研究の結果、牽引型比抵抗探査法と土木研究所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。そこでこの統合探査によって得られる比抵抗と S 波速度を指標として、堤体および支持地盤の物性を推定する手順について検討した。その結果、粒度分析などの現地計測結果と照合することで、浸透性と強度の空間的分布を定量的に推定することが可能であることがわかった。

2. 統合物理探査の役割

非破壊調査の一つである物理探査は、堤防の内部構造や基礎地盤構造の把握が可能であり、実際これまでも広く適用されてきた。しかし、単一探査技術で提供される物性分布は基本的に一種類であり、それのみで異常部を的確に抽出することは一般的に困難である。これに対し複数の手法を適切に組み合わせ実施し、得られた異なる物性情報に対して統合的な解析を加えれば、異常部の検出能力を飛躍的に向上させることができる。この点が「統合物理探査」

と称する第一の事由である。ところで堤防の安全性にかかわる不均質構造の空間的スケールは、基盤漏水や堤体浸透では数 10～100 m のオーダー、パイピングでは数 cm～数 m のオーダーと見積もられる。これらの構造を単一の測定条件で検出することは原理的に不可能であり、一般的には異なる測定装置・手法を用いるか、あるいは測定条件を変えて繰返し測定をする必要がある。このように、同一区間において概査から精査へと精度・分解能を高めるように繰返し測定を行なうことを前提としていることが、「統合物理探査」と称する第二の事由である。

「統合物理探査」では、上述のように多種類および多回測定を前提としている。したがって従来技術と同様な手法・測定法を用いる限りコストも大幅に増大し、適用が現実的に困難となる。そこで、経済性に優れ、堤防の安全性評価に必要な物性情報を提供できる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、土木研究所で開発したランドストリーマー方式の高精度表面波探査法と、電極を移動させながら連続的に測定可能な牽引式比抵抗探査法あるいは周波数領域電磁探査法と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¹⁾。統合物理探査の基本構成手法を表-1 にまとめるとともに、その概要を以下に記す。

高精度表面波探査は、表面波の分散特性から表層部の S 波速度構造を再構成する手法であり、土木研究所が開発したランドストリーマーを活用することで現場計測作業を高速化することが可能となった。通常の物理探査の計測では、一度に計測する区間は限られており、連続的な探査を実施するにはセンサ類を測線上で移動させることが必要である。従来表面波探査ではセンサを地面に固着させて信号を取得していたため、移動に伴ってセンサ類を設置し直す手間をかけなければならず、作業性に問題があった。これに対しランドストリーマーは、多数のセンサを一体化し人力での牽引を可能にしたものである。同ツールではセンサはベースプレートを通して地面と接地しているだけあるので、移動・再設置の手間を短縮でき、作業効率を大幅に向上させることができた。牽引式比抵抗探査では、土木研究所が保有するキャパシタ電極カップル型 OhmMapper ツールを使用した。このツールは電極を牽引移動させながら計測が可能で、従来の電極設置型比抵抗探査に比べ極めて高い作業性を期待できる。また電磁探査に利用

表-1 統合物理探査構成手法

探査手法	ツール	計測物性	探査深度
高精度表面波探査	Land Streamer	S 波速度	>15m
牽引式比抵抗探査	OhmMapper	比抵抗	<12m
電磁探査	GEM-2	導電率	<10m

した GEM-2 ツールは可搬型で全体重量も 5kg 程度と軽量なので、少人数で効率的に計測を実施できる利点を有している。

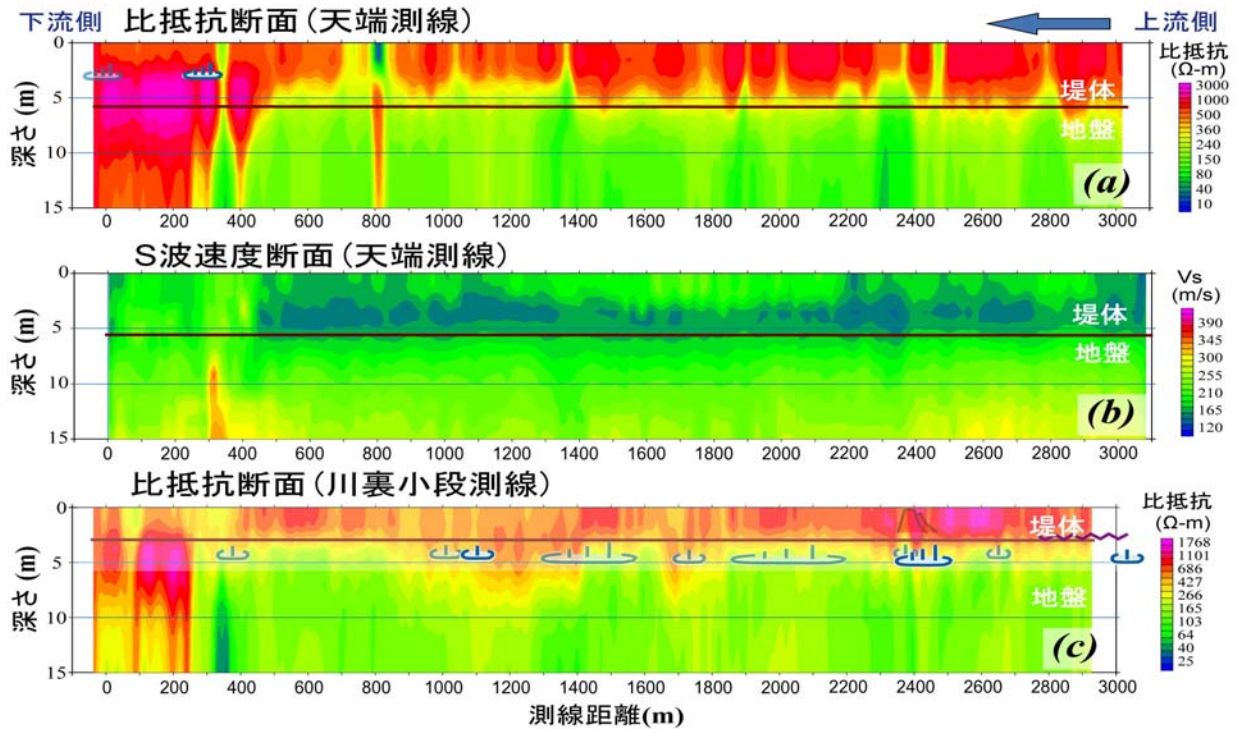
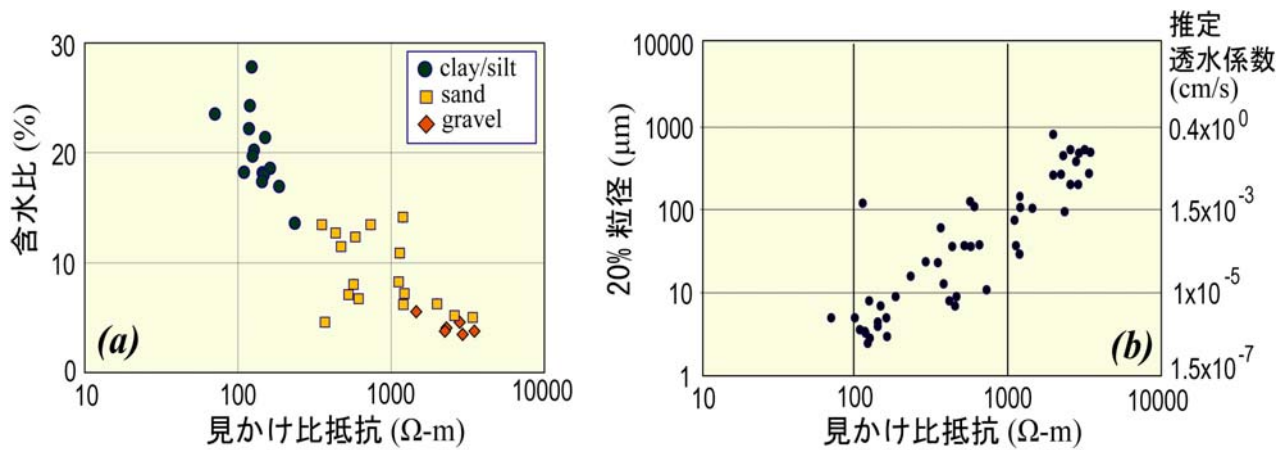
3. 統合物理探査結果の評価手順概要

これまでに、関東地方の直轄河川を主な対象として、5 河川 6 箇所ですべて統合物理探査の適用実験を実施した。適用実験にあたっては、現地作業性や構造再現性を評価することを目的とし、原則として現地計測から解析・断面解釈までを直営で実施した。

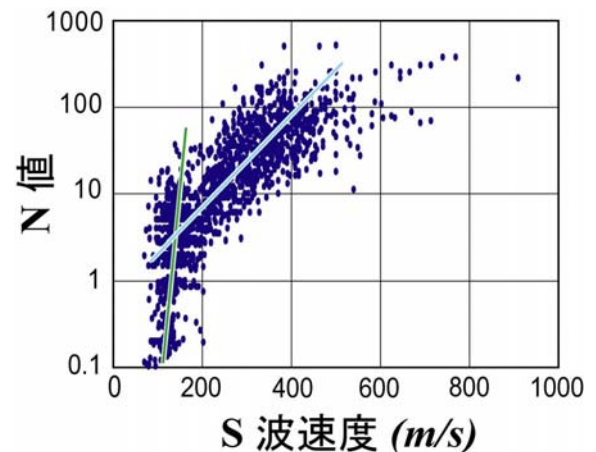
図-1 は、千曲川右岸 57km 付近での統合物理探査の結果として得られた比抵抗断面および S 波速度断面である²⁾。同区間では 2006 年 7 月の梅雨前線豪雨時に、数か所で基盤漏水や堤体浸透被害が発生した。被災区間ではその後浸透対策工事が施されている。なお探査測線は比高約 5m の堤防天端および約 2.5m の川裏側小段に設定した。同図(a), (b)の比抵抗断面上に過去の基盤漏水や堤体浸透箇所を投影してあるが、それらが基本的に高比抵抗部で発生していることがわかる。このことは比抵抗値を指標として浸透性の危険箇所を評価できることを示唆するものである。

この評価を適切に実施するには現地計測結果との照合が不可欠である。しかし浸透性や強度を現地で直接的に計測することは現状では困難である。そこで物性間の経験的な相関関係を利用して、これらを間接的に推定する手順について検討した。

統合物理探査の適用後、調査した堤体の一部区間が、樋管付替え工事のために 2 次にくわって開削され、堤体断面および基盤層上部が露頭した。この開削部において、堤体内部および基盤層を対象に小規模な S 波屈折法地震探査と直流比抵抗探査を実施し、直接的に S 波速度と比抵抗分布を計測した。また開削断面から堤体材料を採取し、その粒度特性等进行分析した。粒度分析には 62.5 μm 以上はふるいを、通過分はレーザー回折・散乱式粒度分析装置を使用した。開削斜面上での比抵抗測定には電極間隔 50cm のウェンナー配置による水平探査法を採用し、50cm 間隔の格子点約 200 点の比抵抗値を得た³⁾。開削部

図-1 千曲川右岸 57km 付近堤防統合物理探査結果断面比較（稲崎ほか³⁾に加筆）図-2 開削部堤体材料の見かけ比抵抗と含水比(a)および粒度(b)との関係（松尾ほか³⁾に加筆）

での堤体の見かけ比抵抗と含水比，および粒度特性（D20）との関係を図-1に示す．粒度と比抵抗の間には両対数尺表示ではあるが明瞭な相関関係があることがわかる．ところで不飽和土質材料では，細粒分含有率が透水性と関係があることが知られている．そこで Creager ほか⁴⁾の経験式と図-2に基づいて比抵抗断面から透水性分布を推定した．一方 S 波速度と N 値との間には図-3に示すような非線形の関係があることがわかってきた⁵⁾．この関係を利用すれば，S 波速度分布から N 値の空間分布を推定することが可能となる．以上の手順を踏まえて推定した N 値および透水性の二次元断面を図-4に示す．

図-3 S 波速度と N 値の関係（稲崎⁵⁾に加筆）

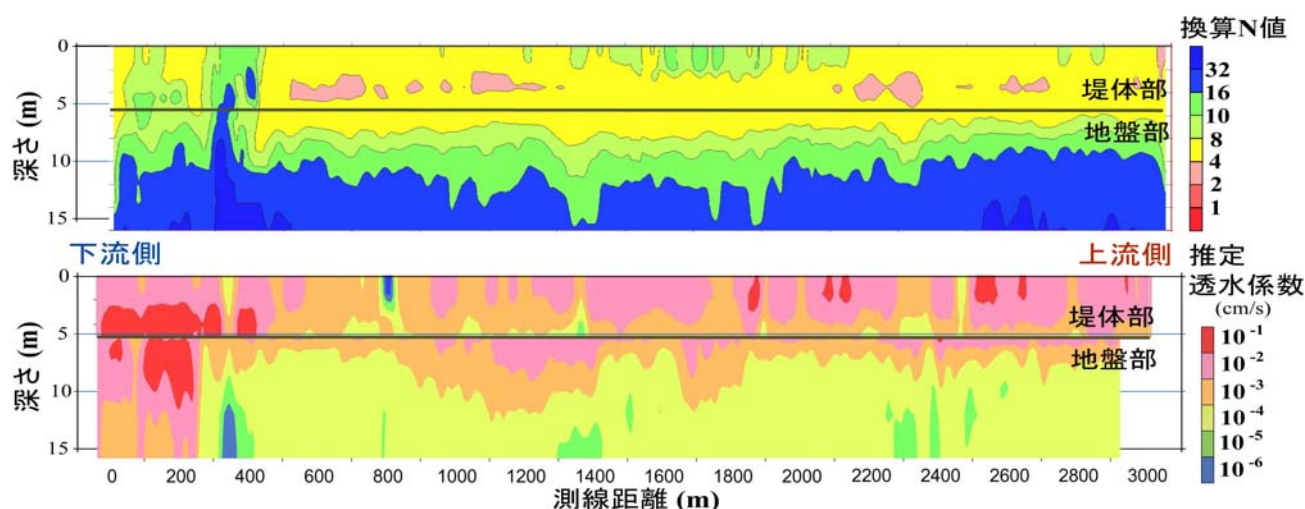


図-4 千曲川右岸 57km 付近堤防 N 値透水性推定断面図

堤体部の N 値は大部分で 10 以下であり、堤体下部の一部には 4 以下の緩いゾーンが存在している。一方支持地盤は基本的に 10 以上の値を示す。推定された透水性は特に高比抵抗を示した測線左（下流）側 400m の区間で 10^{-1} 乗のオーダーと推定された。支持地盤部にも $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 乗オーダーを示す部分が各所で認められるが、その位置は過去の漏水発生区間と概ね調和的であった。図-4 のように統合物理探査断面を透水性および N 値に置き換えることで、堤体浸透および基盤漏水の危険度が高い箇所、あるいは強度が低く、すべりや地震時の崩落の危険性が高い部分を明確に抽出することが可能であることが検証された。

4. まとめ

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ングし、異常部を効率的に抽出することが可能な現地調査手法として、ランドストリーマー型高精度表面波探査法と牽引型比抵抗探査法を組み合わせた統合物理探査が有用であることを示した。統合物理探査は、2 次元探査結果から堤体部および地盤内の脆弱部を的確に抽出することを目的としている。統合物理探査によって求められる比抵抗値や S 波速度値は、直接的には安全性評価の指標にならず、また地域的に特徴的な物性分布特性を有するとも想定される。そこで、堤体部と地盤部に区分して S 波速度値と比抵抗値の分布を分析し、つぎに粒度および透水性とこれらの物性値との相関性を推定してそれらの空間的分布から安全性を評価する、という手順をとることが有効であることがわかった。現地適用調査の結果は、この手順による統合

物理探査結果情報の活用によって、河川堤防の安全性評価が的確かつ経済的に実施できることを示した。

なおこの手法では、現位置計測による直接的な ground truth の取得とそれとの対比が不可欠であり、現位置において比抵抗、S 波速度、透水性等を直接測定可能な手法開発が求められている。

今後は提案した統合物理探査手法の適用手順および評価基準を確立し、河川堤防調査への適用を全国的に普及展開することを進めるとともに原位置計測手法の開発に着手する予定である。

参考文献

- 1) 稲崎 富士(2006): 統合物理探査による河川堤防の内部構造評価, 物理探査学会第 114 回学術講演会講演論文集, 234-237.
- 2) 稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会(2007): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その2), 物理探査学会第 116 回学術講演会講演論文集, 112-115.
- 3) 松尾公一・徳丸哲義・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会・稲崎富士・中西利典 (2007): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その6) —比抵抗・表面波探査結果と堤体物性の対比—, 物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集, 115-118.
- 4) Creager, W. P., Justin, J. D. and Hinds, J. (1944): Engineering for dams, Vol.III: Earth, Rock-fill, Steer and Timber Dams, John Wiley and Sons, 649p.
- 5) 稲崎富士(2005): 沖積層堆積物の S 波速度と土質特性の関係について, 物理探査学会第 113 回学術講演会講演論文集, 217-220.

DEVELOPMENT OF INTEGRATED GEOPHYSICAL INVESTIGATION TECHNIQUE FOR VULNERABILITY ASSESSMENT OF LEVEE

Abstract : Conventional safety assessment of levee systems usually starts from the behavioral segmentation of levee based on the damage events during past floods. Internal heterogeneity along levee body has been rarely taken into account in the segmentation process whereas the heterogeneity and resultant weak zones in physical properties are the major vulnerability factors. It was because of its difficulty in imaging levee body as well as underlying layers at low cost and high performance. It has been therefore required to develop an effective, inexpensive and easy-to-apply field survey method which enables to delineate the internal structure of levee body and underlying layers continuously. Geophysical methods are expected to play an important role in levee assessments. We tested combined geophysical methods at actual levees, and confirmed the advantages of the methods in field work, the resultant cost effectiveness, and their capability in detecting anomalies. We successfully identified anomaly structures in and beneath the levee.

Key words : river levees, S-wave velocity, resistivity, permeability, stiffness.