

## 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。しかし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組み合わせ適用し、堤体および基礎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。その結果、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を組み合わせ適用することで、浸透性・強度的に問題のある区間を効率的に抽出できることがわかった。さらにこれらの手法の普及展開をはかることを目的とし、現地計測および解析検討の過程のマニュアル化を進めた。

キーワード：河川堤防、弱点箇所、牽引型比抵抗探査、ランドストリーマー、表面波探査、S波速度。

### 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。既往の被災事例をみても、安全と判定された区間で、計画高水位以下の洪水でも漏水などの浸透現象が数多く発生している。

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。安全性にかかわる情報を取得する手段としては、空中写真判読による治水地形区分、全線にわたる目視観測、局所的な確認ボーリングなどが採用されてきている。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ングする

ことができる物理探査手法は、このような堤防探査に極めて有効であると期待される。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基礎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。

### 2. 統合物理探査手法の選定

河川堤防調査における物理探査の適用段階としては、把握すべき不均質構造のスケールを基準にすると以下の3つの段階が想定される。すなわち、1)：堤体の縦断（長手）方向に測線を設定し、堤体内部の物性を連続的な断面（2次元断面）として提供する連続的概査。2)：連続探査で抽出された堤体弱点部・異常構造部において、その内部構造・物性を詳細にイメージングする部分詳細探査。そして3)：堤体内部をサウンディングし、スポット的な物性構造を直接的に計測・評価する局所的計測である。第1, 第2段階の探査が基本的に表面からの非破壊調査として位置づけられるのに対し、第3段階は低侵襲計測、あるいはground truth計測と称される計測技術である。当該研究では、研究期間およびニーズを考慮し、上記1)の段階である堤防連続的探査の開発と普及展開を目標とした。

ところで上記第 1 段階の堤防探査に適用される物理探査技術は、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あるいは下位地盤構造（地表～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、という条件を満たすことが求められる<sup>1)</sup>。以上の条件に適合する手法として、右表-1 に示す 3 手法を堤防連続探査手法として選択し、現地実験によって適用性を検討した。

表中の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<sup>2)</sup>。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紹介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。求められる 2 次元 S 波速度構造は、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構造であり、地盤の動的解析に不可欠な基本情報の一つとして利用できる。また S 波速度値は N 値との相関性が高いことが知られている。したがって S 波速度値から換算 N 値を求め、N 値による従来の基準に沿った土質地盤評価も可能である。

比抵抗探査とは、人工的に地盤に電流を流し、この時発生する電位分布を測定して解析を加えることにより地盤の比抵抗構造を求める電気探査手法の一つである。従来の方法では、通電させるために多数の金属製の電極棒を地面にあらかじめ植え込み、結線しておく必要があった。この作業に多大な時間と労力を要するため、1 日あたりの測定はこれまでは

表-1 堤防連続探査選定手法

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	<20m
牽引型比抵抗探査	OhmMapper	比抵抗	<12m
電磁探査	GEM-2	比抵抗	<10m

数 100m 程度が限界であった。これに対し今回採用した牽引型比抵抗探査では、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。同探査には、土木研究所が保有するキャパシタ電極カップル型 OhmMapper を使用した。

電磁探査では、時間変動する電磁場を人工的に発信し、これにより大地に誘導される電磁場を測定することにより、地下の比抵抗分布を求める。このうち、一对の送受信ループコイルを用い、大地に誘導される一次および二次磁場の周波数応答特性から比抵抗構造を解析する手法を周波数領域電磁探査と称する。上述の牽引型比抵抗探査は相対的に高比抵抗地盤で有用であるのに対し、本探査は逆に低比抵抗地盤で相対的に S/N の高い結果を得ることができる。ただし可探深度は本手法のほうがやや浅い傾向がある。また送電線等からの雑音の影響を受けやすい。手持ち型の小型水平ループを用いた測定装置が開発されており、それを用いれば、2 名程度で 1 日あたり数 km の区間の測定が可能である。

### 3. 現地適用探査による手法検討

研究期間中に関東地方を中心に、6 河川 11 箇所直轄河川堤防において統合物理探査を土木研究所独自で実施し、統合探査法の適用性を検討してきた(表-2)。探査総延長は、30km に達した。現地作業性や構造再現性を評価することを目的とした適用実験であるため、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。

#### 3.1 現地適用探査事例

小貝川左岸 34km 付近の統合物理探査結果と当該区間の堤防点検結果を合わせて図-1 に示す<sup>3),4)</sup>。この区間では最近堤防詳細点検が実施され、安全性が評価されているが、概略点検の段階では、堤防の構成土質は粘性土、基礎地盤のそれは砂質土で一様と推定されていた(同図上端)。地形判読では、34.2K より下流部は台地、34.2～35.4k 間は氾濫原、35.4k

から上流区間は自然堤防に区分されている(同図上)。これらの情報および過去の被災履歴から当該区間の堤防の安全性は大部分が C, 35.4K 付近が D と判定されていた(同図中)。同図下に牽引型比抵抗探査によって求められた比抵抗構造を示す。同断面では、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、基礎地盤では相対的に低比抵抗になっていることがわかる。地下水位は天端下約 7m 付近にあり、基礎地盤の低比抵抗は地下水飽和によるものであると考えられる。また 34.2K より下流側では全深度域で低比抵抗となっているが、この部分は非盛土区間であり、表層部は主として更新統の粘性土からなる原地盤が分布している。ところで比抵抗断面には 34.4K および 35.2K, 35.6K 付近の堤体部に高比抵抗の異常部が認められる。この比抵抗異常部は同一測線区間で実施された電磁探査でも認められており<sup>5)</sup>、堤体内部の不均質構造を反映したものと推定された。そこで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を実施した。その結果を簡易柱状図として比抵抗断面に重ねて表示してある(柱状図で暖色系表示部が粗粒材料に対応)。高比抵抗異常部の大部分では、高透水性の粗粒砂あるいは礫まじり砂が確認された。このことは、不飽和帯にある堤体部における比抵抗異常が、主として堤体材料の粒度組成に起因するものであること、逆にいえば比抵抗異常

表-2 堤防統合物理探査適用実績

河川名	測線名/(測線長)	適用手法
小貝川	34L/32L/01L (1.9/2.0/3.0km)	牽引型比抵抗探査 高精度表面波探査 電磁探査,GPR
江戸川	57L (2.3km)	牽引型比抵抗探査 高精度表面波探査
千曲川	56R (3.1km)	牽引型比抵抗探査 高精度表面波探査 電磁探査
荒川	22R (3.0km)	牽引型比抵抗探査 高精度表面波探査
黒部川	01R/04L (4.7/6.7km)	牽引型比抵抗探査
米代川	07L/21L/42R (0.5/1.6/1.4km)	牽引型比抵抗探査 高精度表面波探査

から透水性を左右する粒度特性の異常部を検出することが可能であることを意味している。

高精度表面波探査から求めた S 波速度構造が同図下端に示されている。堤体盛土に相当する表層 6m 程度までは、S 波速度(Vs)は約 140m/s と低い値を示している。推定された 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が、34.3K 付近、34.8K~35.1K 間付近では、下位の基礎地盤部

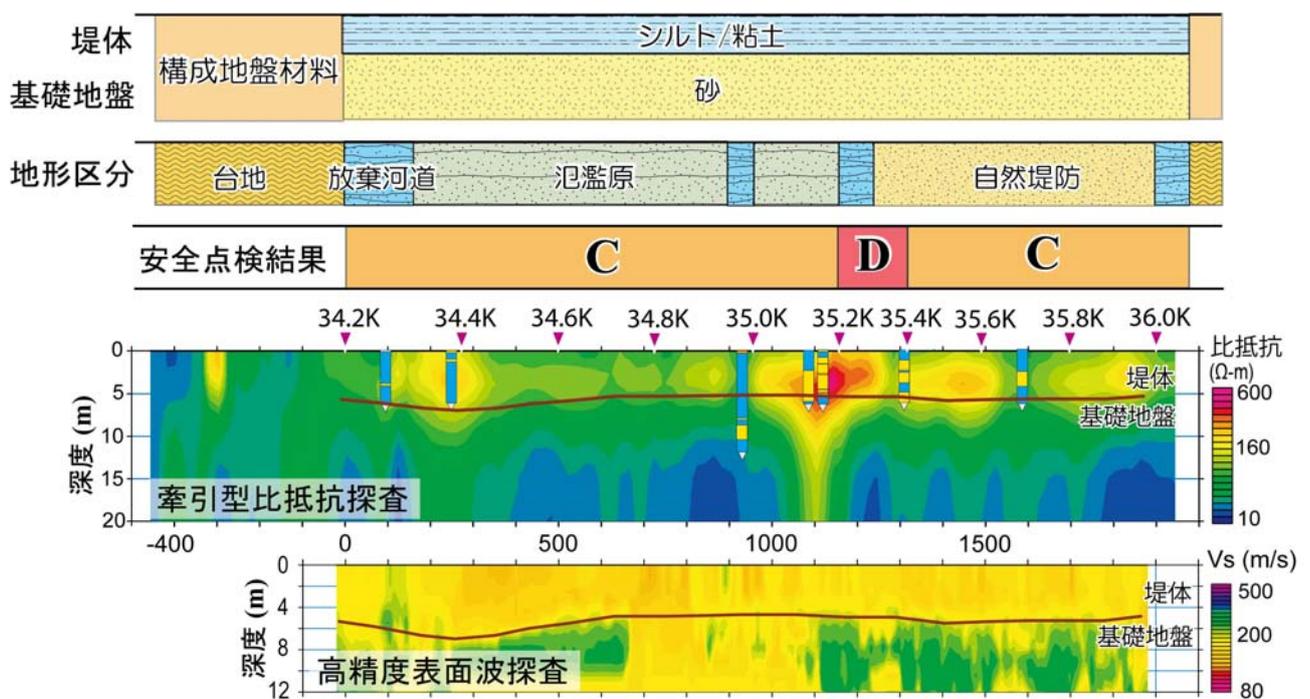


図-1 小貝川左岸堤防での統合物理探査結果<sup>4)</sup>

で相対的に S 波速度値が低い値を示している。この区間では基礎地盤部の比抵抗値も相対的に低い値を示しており、細粒で含水比の大きな地層が堤防盛土直下に分布していることが推定された。この区間は地形的には旧河道交差部に対応しており、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。このように高精度表面波探査の結果から、土質材料特性、堆積相を推定可能であることがわかった。

### 3.2 探査手法の再現性検討

牽引型比抵抗探査およびランドストリーマーを利用した高精度表面波探査によって、堤体および基礎地盤部の比抵抗と S 波速度を評価できることがわかった。それらはチェックボーリングや地形判読結果と調和的であった。しかし、どの程度の分解能で、またどの程度の確からしきで物性情報を得ることができるかについては不明であった。そこで従来の手法と比較計測を実施し、再現性等について検討を加えた。

図-2 は、千曲川右岸 57km 付近で実施した比抵抗探査の比較計測結果である。堤防天端の同一区間において、牽引型比抵抗探査(a)と従来方式である直流比抵抗探査の結果(b)を比較したものである。なお牽引型比抵抗探査に要した計測時間が数時間であったのに対して、直流型比抵抗探査では約 1.5 日を要した。同図に示されるように、再現された比抵抗断面は構造的にも再現比抵抗値の点でもよく一致しており、牽引型比抵抗探査は再現性の点において問題なく利用可能であることが検証された。

つぎに高精度表面波探査手法について検討した。千曲川堤防の開削部において、高精度表面波探査と従来方式である S 波屈折法探査を同一測線上で実施した。前者から推定した S 波速度構造と、後者から屈折法解析によって求めた S 波速度構造を図-3 に示す。両者は解析対象である表層部の S 波速度構造については 5% 以下の誤差で対応していた。この結果は、高精度表面波探査によって地盤の S 波速度構造を的確に把握できることを実証するものである。

前節で示したように、統合物理探査で求められる比抵抗は地盤材料の粒度特性を反映した指標として取り扱うことが期待されている。実際不飽和の地盤

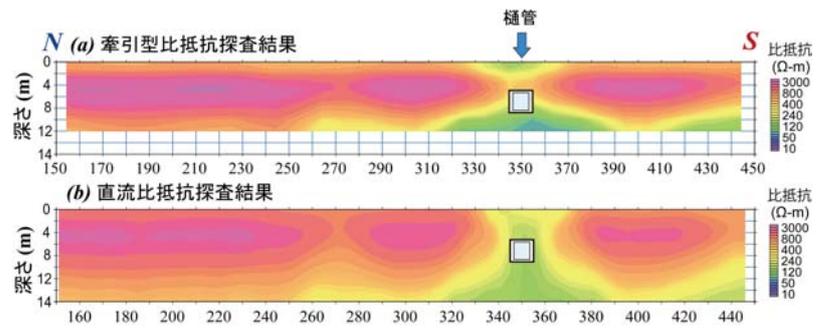


図-2 千曲川右岸堤防での比抵抗探査比較結果<sup>5)</sup>

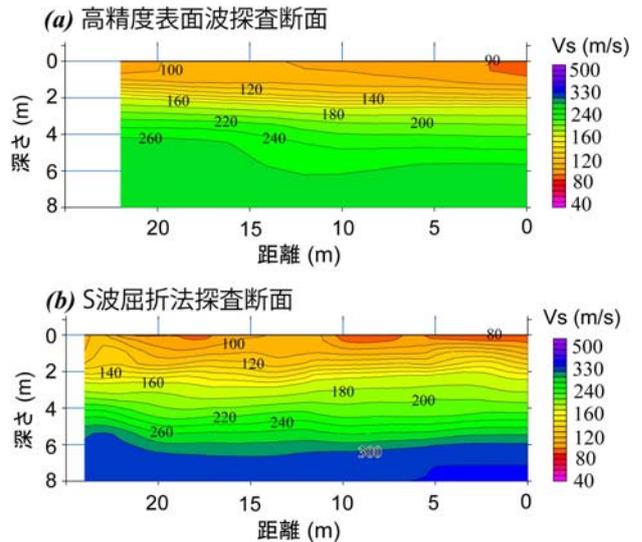


図-3 堤防開削部での S 波探査比較結果<sup>6)</sup>

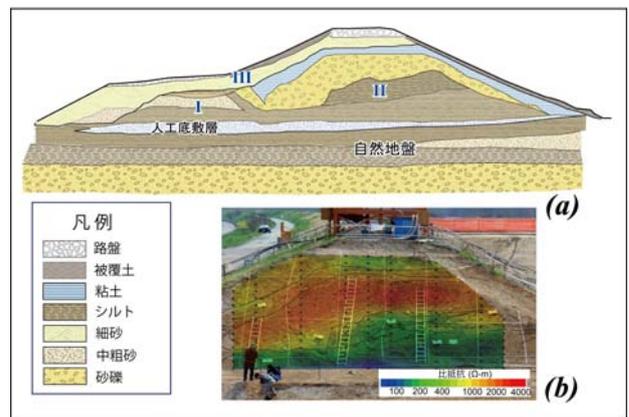


図-4 堤防開削部での比抵抗マッピング結果<sup>5)</sup>

材料に対しては、比抵抗は主として粒度と間隙率に依存することが知られている。そこで堤体材料においても、このような関係が認められるか否かを実堤防において確認した。図-4 は、堤防開削部において堤体部の比抵抗マッピングを実施した結果を示したものである。開削地点では、堤体の中央部に極めて粗粒の砂礫材料が出現した。また下部はシルト質の材料で構成されていた(同図(a))。開削面におい

てほぼ 1m 間隔の格子点で比抵抗を測定し、開削面の比抵抗分布を求めた結果を、カラー表示した(同図(b))。比抵抗が堤体構成材料の粒度特性とよく対応していることがわかる。

### 3.3 探査結果からの材料特性評価過程検討

本研究で開発対象とした、牽引型比抵抗探査および高精度表面波探査で構成される統合物理探査によって、信頼性の高い地盤物性情報が効率的かつ経済的に取得できることが明らかになった。また求められる地盤物性情報、すなわち比抵抗と S 波速度データが、他の地盤物性情報とも高い相関性を有し、前者から後者を合理的に推定できることが明らかになった。ところで統合物理探査の最終目標は、堤防の安全性に関わる物性である浸透性や強度特性を推定することにある。調査ボーリングや採取試料試験などではこれらの物性を直接的に求めることは可能であるが調査間隔が粗く、不均質な構造を有する堤体および基礎地盤の物性分布を把握することが困難であった。そこで現場計測によって、空間的に稠密に求めることができる地盤物性情報を利用するわけである。現場計測物性を組み合わせ、それらから浸透特性や強度特性などの評価すべき物性を直接的に推定する手順は一般にジョイントインバージョンと称されているが、現時点では必要とされる先験的情報が少なく、技法的に確立していない。一方、現場計測物性と材料物性、および材料物性と評価対象物性との関連性については、これまで多くの検討結果が報告されている。そこで、材料物性を仲介して計測物性から評価対象物性を推定する過程を検討した(図-5)。

堤防の高比抵抗部が粗粒材料部と対応していることを図-1 で示したが、一般的に堤防内部から構成材料を採取することは困難である。そこで樋管付替えのために堤防が開削された箇所(図-4)において、開削断面の比抵抗分布を測定するとともに堤体材料を採取し、その粒度特性を分析した。図-6 に細粒分含有率の指標の一つである 20%粒径(D20)と比抵抗値との関係を示す。同図では両対数尺表示を採用しているが、粒度と比抵抗との間に明瞭な相関関係があることがわかる。一般に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。そこで一般的に利用されている Creager, et al.<sup>8)</sup> の経験式をあてはめることで、比抵抗値から透水性を推定することが可能となる。この図から、たとえ



図-5 計測物性からの評価物性推定過程

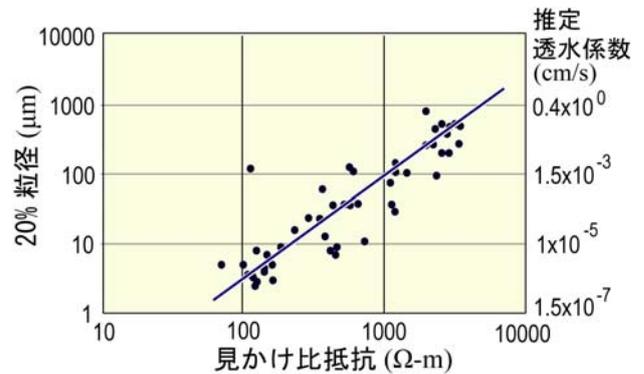


図-6 見かけ比抵抗と粒度特性との関係<sup>7)</sup>

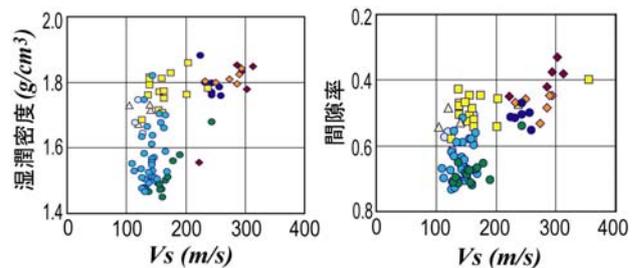


図-7 S波速度と土質特性との関係<sup>9)</sup>

ば見かけ比抵抗値が 1000Ω-m の堤体部分の透水係数は  $10^3$  乗のオーダーであると見積もることができる。

S 波速度が N 値や土質特性と高い相関性を有していることも以前から知られている。図-7 は、東京湾岸部の沖積層分布域で掘削された 5 孔のボーリング孔で得られた S 波速度と湿潤密度、間隙率との関係を示したものである。相関性は高くはないが、砂質土(暖色系)では S 波速度が大きくなるほど密度が大きくなる、あるいは間隙率が小さくなる傾向が認められる。このことは、S 波速度が大きくなるほど締固め度も大きくなることを意味している。

### 3.3 探査結果からの浸透性等の評価

以上に示したように、現場計測物性は土質特性と関連性を有しており、またそれらの土質特性から浸透性や強度に関わる物性を評価することも一般的に

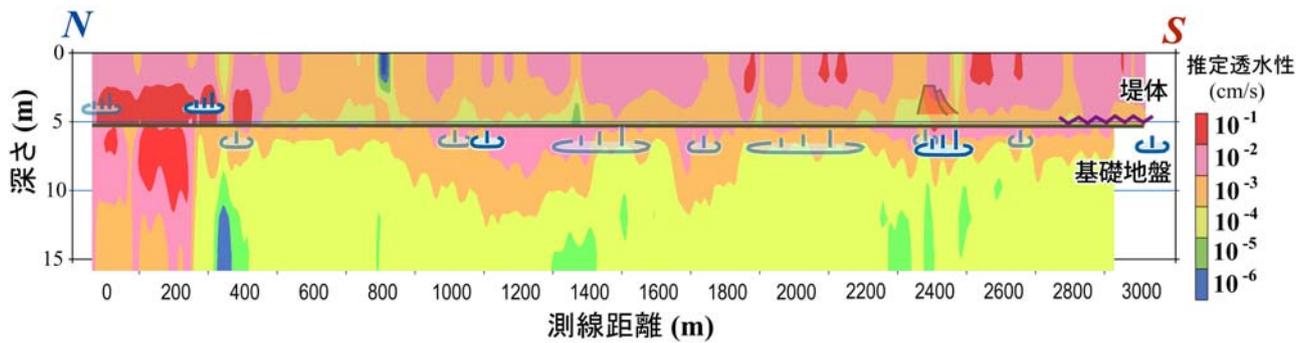


図-8 現場計測データからの透水性分布推定例<sup>10)</sup>

採用されている．そこで計測データから評価対象とする物性の空間分布を推定した．

図-8は、比抵抗とS波速度分布から図-6,7の関係式を利用して堤体と基礎地盤の透水性分布を推定したものである．同図からは、堤体浸透および基盤漏水の危険度が高い箇所を明確に抽出することができる．なお基本的に不飽和帯に位置する堤体と地下水面以下にある基礎地盤部とは異なった関係式を用いている．同図には最近発生した漏水被災箇所を投影してあるが、高透水と推定された箇所と漏水発生箇所が整合的であることがわかる．

図-9は、これまで実施した統合物理探査によって得られた堤体および基礎地盤部のS波速度と比抵抗の関係を示したものである．両者は正の相関性を示し、堤体部に比べ基礎地盤部はばらつきが小さいことがわかる．この図には、透水性と稠密度を判断する基準が示されており、このような基準例を利用することで堤防の安全性を評価することが可能となる．

#### 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し、異常部を抽出することが可能な物理探査手法として、ランドストリーマー型高精度表面波探査法、牽引型比抵抗探査法を選定し、両手法を組み合わせた統合物理探査を実堤防で実施した．その結果、これらの探査で求められる比抵抗、S波速度のいずれを指標にしても、堤体部分と基礎地盤とを明瞭に識別できることがわかった．さらに堤体と基礎地盤部の不均質構造を鮮明にイメージできることも明らかにされた．統合物理探査によって抽出された不均質部、特に高比抵抗異常部は、粗粒材料で構成されている箇所と対応しており、また漏水被害発生箇所と整合的であった．この

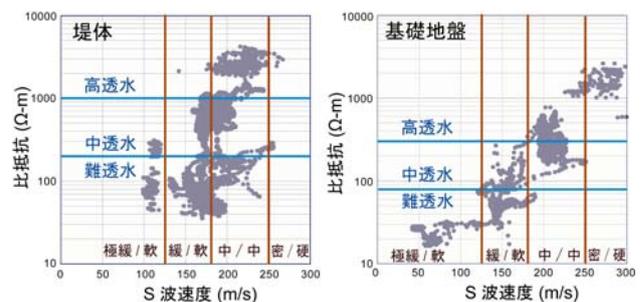


図-9 S波速度と比抵抗計測データを指標とした浸透性・強度判定基準例<sup>11)</sup>

ことは、統合物理探査結果から、堤防の安全性を評価することが可能であることを意味している．

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、対象地盤や河川特性によって地域的に特徴的な物性分布特性を有すると想定される．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、という手順を採用した．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る．この課題に関しては、簡易ボーリングによるサンプリング、サンプリング孔を利用した比抵抗検層について予察的な検討を実施し、その有効性を検証した．今後は提案した統合物理探査手法の適用基準を整備し、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、統合物理探査結果から安全性を評価する際に使用する判定基準の信頼度向上のための先験的な物性データの原位置取得法の検討とその活用方法について検討を加える予定である．

## 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) 林 宏一・岡田 聡・鈴木 晴彦・稲崎 富士 (2003): ランドストリーマーを用いた表面波探査, 物理探査学会第 108 回学術講演会講演論文集, 298-301.
- 3) Inazaki, T. (2007): Integrated geophysical investigation for the vulnerability assessment of earthen levee, *Proceedings of the 20th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2007)*, 8p.
- 4) 稲崎 富士(2007): 河川堤防の安全性評価のための統合物理探査の適用, 平成 19 年度国土交通省国土技術研究会, 自由課題(一般部門)論文集, 4p.
- 5) Inazaki, T., Hayashi, K., Watanabe, F., Matsuo, K., Tokumaru, T., and Imamura, S. (2008): Ground truth verification of an integrated geophysical investigation for the assessment of an earthen levee, *Proceedings of the 21th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2008)*, CD-ROM, 8p.
- 6) 林 宏一・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 5) - 開削面における S 波速度測定による表面波探査結果の検証 -, 物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集, 111-114.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 稲崎 富士 (2008): 河川堤防安全性評価への統合物理探査情報の活用, 河川技術論文集, Vol. 14, 85-90, 土木学会水工学委員会.
- 11) 稲崎 富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2008): 河川堤防安全性評価への統合物理探査の利用, 最新の物理探査適用事例集, 105-112, 物理探査学会.

## **DEVELOPMENT OF INTEGRATED GEOPHYSICAL INVESTIGATION TECHNIQUE FOR VULNERABILITY ASSESSMENT OF LEVEE**

**Abstract** : Geophysical investigation is expected to play an important role in the vulnerability assessment of levee, because the conventional visual inspection and spot drilling technique is inadequate to detect internal anomalies of levee. Indeed, internal heterogeneity of levee body and substrata has been rarely taken into account in the conventional safety assessment of levee systems, whereas the structural heterogeneity or the anomaly of physical properties is thought to be one of the major vulnerability factors of the levees. It was mainly because of the difficulty in imaging levee body as well as substrata at low cost but with 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 systems continuously. We then tested several geophysical methods at actual levees, and confirmed the advantages of the following methods through the field work, in the viewpoints of cost effectiveness and their capability in detecting anomalies. The geophysical techniques consist of surface wave method using Land Streamer, capacitively-coupled resistivity method using OhmMapper, and supplemental multi-frequency electromagnetic survey method. Field tests showed that anomaly structure in and beneath the levee systems was successfully identified by means of the combination of above methods.

**Key words** : river levees, vulnerability assessment, integrated geophysical investigation, capacitively coupled resistivity method, surface wave method, resistivity, S-wave velocity.