

## 1.3 堤防システムの浸透安全性・耐震性評価技術に関する研究③

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ 物理探査技術

研究担当者：金子正洋・稲崎富士

### 【要旨】

長大な管理区間延長を有する河川堤防の整備改修・維持管理を効率的に推進するには、要改良区間すなわち安全性が不足する区間を効率的かつ高確度で把握することが不可欠である。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縦断方向にも横断方向にも不均質となっている。土木研究所が主体となって開発してきた統合物理探査技術は、このような不均質内部物性構造を連続断面として効率的かつ経済的に把握することができるという特長を有している。さらに統合物理探査技術は、堤防不飽和部の浸透による非可逆的・非線形的な物性変化を 4 次元的に捉えることも可能であり、今後の「切れ目のない」堤防安全性評価への適用が期待されている。

平成 23 年度から 27 年度までの 5 箇年で実施された当該研究のなかで、物理探査技術担当では 2011 年東北地方太平洋沖地震で被災を受けた堤防をはじめ、全国 34 堤防区間で 44 次にわたる現地堤防探査および統合物理探査適用研究を実施した。適用性を検討した物理探査・現場計測手法は 14 手法に達した。その中には土木研究所で新たに考案・開発した計測装置や現場計測手法も含まれる。

地震で被災した堤防区間および漏水発生区間で稠密統合物理探査を適用した結果、特に樋門樋管部などでは数 10m-数 m オーダーで基礎地盤構造や堤体内部構造が変化すること、その局所的不均質構造が地震被害や漏水被害の主要因となったことを明らかにすることができた。従来のボーリング調査やサウンディング調査では捉えることが困難な小さなスケールの不均質構造を、統合物理探査では把握可能であることを検証した。また樋門改修等に伴う堤防開削箇所 8 箇所において開削前・開削後調査を実施し、統合物理探査の結果断面の検証と開削面採取試料物性試験を実施した。その結果、特にトモグラフィ探査手法が堤体の横断方向の不均質構造の高解像度把握に有効であること、不飽和堤体試料の土質特性と物理探査計測特性に強い相関があることを明らかにすることができた。さらに時空間的により高い分解能を得るための稠密統合物理探査技術開発の一つとして、4 次元比抵抗トモグラフィ計測技術開発を、探査装置の開発を含めて計画的に推進した。その結果、堤体表層不飽和帯内での降雨浸透過程を、現地においてリアルタイムでモニタリングできること、経時変化モニタリング結果から非線形不飽和浸透特性の空間分布を把握評価することが可能であることを明らかにすることができた。

キーワード：統合物理探査、S 波速度、比抵抗、不飽和浸透特性、3 次元経時変化モニタリング。

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

近年豪雨時の破堤や地震による河川堤防の崩壊事例が相次いで発生しており、河川堤防の洪水時の浸透安全性、地震時の耐震性ならびに地震後の治水機能の保持が水災害の防止における喫緊の課題となっている。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縦断方向にも横断方向にも不均質である。これまでの詳細調査によって、その不均質性のオーダーは縦断方向で数 10m、横断方向では数 m 程度であることがわかってきた。また基礎地盤も、特に下流部の蛇行域では河道変遷を反映して局所的に不均質になっていることがわかってきた。このような不均質

内部構造が、浸透安全性や耐震性の主要規制要因となっていることは容易に想定される。従来の数 100m 間隔でのボーリング調査や離散的に採取されたコア試料の土質分析手法は、不均質性の把握評価に対する空間分解能が決定的に不足しており、より効率的かつ経済的に河川堤防の不均質構造を把握することが可能な現場調査手法の開発と適用が期待されていた。これに対し土木研究所において技術開発・普及展開を図ってきた統合物理探査技術は、堤防内部の物性構造を連続断面として提供できるという特長を有している(図-1)。さらに堤防不飽和部の浸透による非可逆的・非線形的な物性変化を 4 次元的に捉えることも可能であることから、今後の「切れ目のない」堤防安全性評価への適用が期待される。

河川堤防の安全性を評価するには、何らかの現地調査計測を実施することが必要不可欠である。これまでに、河川堤防の全区間にわたって概略点検を実施して弱点区間を抽出し、つぎに詳細点検によって浸透やのりすべりに対する安全性を照査するという、2段階の安全性評価が実施されてきている。詳細点検の実施間隔は200m～1km程度であり、この区間内での堤防物性構造は均質であると仮定されてきた。しかし堤防システムを構成する堤体盛土、基礎地盤、樋門・樋管等の横断構造物はより小さなオーダーで不均質であり、従来の安全性照査の考え方、すなわち堤体も基礎地盤も細分区間内は一様と見なすことができる、代表断面での照査結果は代表値として細分区間内全体に適用できる、という工学的前提が成立しえないことがわかってきた。

図-1は、従来のN値ボーリングに対する統合物理探査の優位性を示す概念図である<sup>1)</sup>。延長200m、堤防高さ10m、堤防断面200m<sup>2</sup>の細分区間に対して、堤体部の情報が得られるN値ボーリングは高々1本程度であり、基礎地盤を含めた深さ15mを対象とした場合、得られるN値データも15点に過ぎない。ノンコアボーリングの場合、試料採取・観察区間は全長の30%にしかならない。1深度区間の現場透水試験が反映する体積(～1×10<sup>2</sup> m<sup>3</sup>)は堤防システムの体積(細分区間で1×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>程度)に対して凡そ1/10<sup>7</sup>程度にしかならない。これに対し統合物理探査は、深さ15m程度までの区間を2m×1m×12深度程度の体積の情報を得ることができると考えられている<sup>1)</sup>。通常は堤防天端に測線を設定して2手法を適用するので、1細分区間に対して、2,400の連続したボクセルデータを提供することができる。情報量では100倍以上、堤防システムの体積比に関しても3/100程度にまで大きく改善される。

堤防システムの本来機能が局所的にであっても失われた場合、すなわち堤防システムが一部で損壊した場合、堤内地側に洪水氾濫被害が広範囲に及ぶ。したがって堤防の安全性評価にあたっては、最も弱い箇所がシステム全体の安全性を律するという「最小律」の考え方を適用することが求められる。図-2は、安全性評価を堤防縦断方向の連続的情報に基づいて実施することの重要性を示す概念図である<sup>2)</sup>。基盤漏水や地震時の液状化は外力に対して最も局所安全率の低い箇所で生起する。離散的な調査をA点、あるいはB点で実施しても、局所安全率は1以上を示し、評価区間全体を安全と誤って評価することになる。評価対象区間

内で最小安全率箇所(図-2のC点)を見出すには、連続的な断面情報とそれに基づいた安全性評価の手順を経ることが不可欠である。そして統合物理探査はそのような連続的な断面情報を最も経済的・効率的に提供することができる現場計測手法の一つであるといえることができる。

### 1.2 研究内容と各年度実績概要

上述のように背景と課題を整理した上で、本研究では①:堤防及び構造物周辺堤防の被災メカニズムの解明、②:堤防基礎地盤の複雑性を考慮した合理的調査方法の提案、③:河川堤防をシステムとして浸透安全性・耐震性を評価する技術の提案、の3項目を研究達成目標に設定した。つぎにその達成目標に対し、物理探査技術担当では、①に関連して「被災事例分析による要求性能の整理」、「物理探査手法を用いた経時変化モニタリングによる脆弱過程のモデル化、危険度指標化」、「堤防の浸透安全性・耐震性の評価手法の検討」を、②に関連して「統合物理探査手法の検討(探査結果を用いた地盤物性推定方法)」、「堤防基礎地盤の複雑性を考慮した合理的調査方法の検討」、「基礎地盤の浸透安

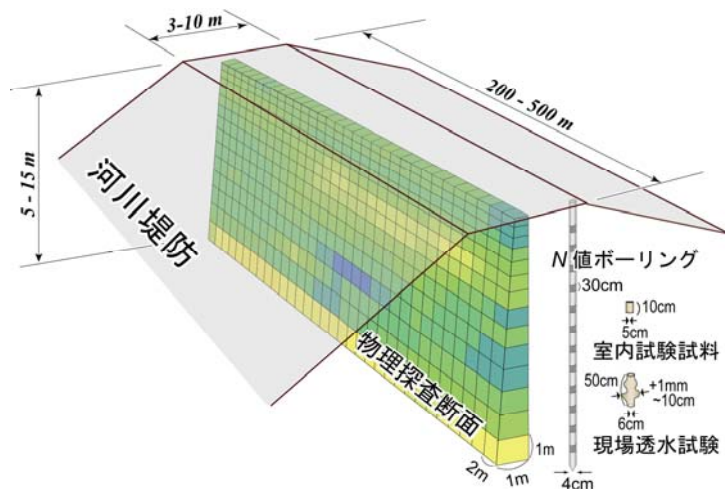


図-1 連続的2次元物理探査断面と離散的1次元N値ボーリングとの情報量比較概念図(文献<sup>1)</sup>に加筆)。

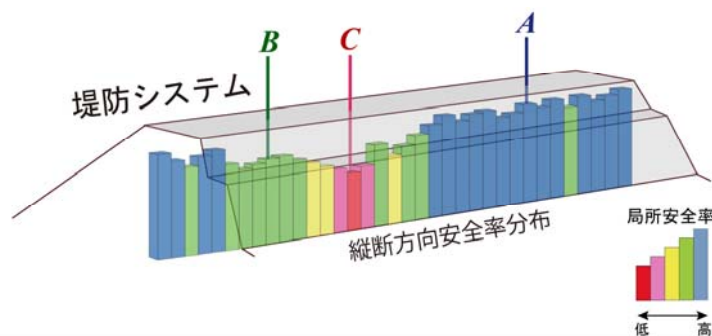


図-2 堤防システムの局所安全率の縦断方向分布と「最小律」の概念図(文献<sup>2)</sup>に加筆)。

全性の評価手法の検討」を、具体的な研究内容として分担し、計画的に研究を遂行してきた。

平成 23 年度から 27 年度までの 5 年間の研究期間の中で、全国 13 河川 34 堤防区間において 44 次にわたる現地堤防探査および統合物理探査適用研究を実施した。図-3 に、本研究の一環として現地計測調査を実施した 13 河川の堤防箇所を示す。適用性を検討した物理探査・現場計測手法は 14 手法に達した。この中には本研究において新たに考案・開発した計測装置や現場計測手法も含んでいる。またこの 5 年間で原著論文 1 本、英文国際会議プロシーディングス 23 本、国内学協会での口頭発表等 35 本、PR 誌等への寄稿 2 本、合計 61 件の研究成果公表を行なった。

研究成果の実用化と早期普及に向けた取り組みの成果としては、平成 24 年度に「河川堤防の統合物理探査—安全性評価への適用の手引き—<sup>3)</sup>」を物理探査学会と共同で刊行した。また土研新技術ショーケースや関東地整主催技術講習会等に積極的に参加し、統合物理探査技術の普及に努めた。

つぎに各研究年次の研究成果を概述する。

23 年度は、同年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、震源域に近い東北地方のみならず関東地方の河川堤防も甚大な被害を受けたことから、地震被災堤防区間を主対象に 7 河川 11 堤防区間において 14 次にわたる統合物理探査と他の現地計測調査を組み合わせた被災メカニズム調査を実施した。このうち関東地方においては、一見無被災の堤防区間を含めて 5 河川 9 堤防区間において各種探査を実施した。加えて中部地方の 2 河川の堤防区間で統合物理探査を実施した。これらの堤防現地探査に要した延べ日数は 32 日に及んだ。

24 年度には、6 河川 7 堤防区間において統合物理探査を主とする現地計測調査研究を 10 次にわたって実施した。このうち 5 区間は堤防横断樋管撤去・改修箇所にあたり、開削前後に統合物理探査を含む現場計測を実施している。これらの堤防現地探査に費やした延べ日数は 39 日に及んだ。このほかに、統合物理探査に関わるアウトリーチ活動の一環として、技術講習、現場技術指導等に延べ 14 日間を充てた。なお 24 年度からは中部地整河川部と統合物理探査に関する共同調査研究を開始している。

25 年度には、6 河川の 8 堤防区間において統合物理探査を主とする現地計測を 10 次にわたって実施した。このうち 3 箇所は、河川横断橋梁架設に伴う堤防開削箇所にあたり、開削前後に統合物理探査を含む現地計

測を実施している。これらの堤防現地探査には、本研究に加え河川財団研究助成金および平成 25 年度河川砂防技術開発受託経費も充当し、総合的な調査研究を実施した。このほかに、統合物理探査に関わるアウトリーチ活動の一環として、技術紹介および講習会等を 5 回実施している。

26 年度には、4 河川の 6 堤防区間において統合物理探査を主とする現地計測を 9 次にわたって実施した。これに加えて土研構内に設置した模擬堤防において高速比抵抗探査システムの基本特性評価試験を実施している。また、これまでに堤防開削箇所で行った開削面での物理探査および採取試料の土質試験結果を取りまとめ、堤体材料物性の関連性について統計的検討を加えた。このほかに河川堤防統合物理探査に関わるアウトリーチ活動として、土木研究所新技術ショーケースや物理探査学会ワンデーセミナー等において技術紹介あるいは技術講習を計 5 回実施した。

27 年度は、2 河川の 2 堤防区間において 3 回の統合物理探査を主とする現地計測調査を実施するとともに土研構内に設置した模擬堤防において 3 次元比抵抗経時変化モニタリング実験を数次にわたり実施した。また研究最終年度にあたり、河川堤防をシステムとして捉え、浸透安全性・耐震性を総合的に評価する技術の提案に向けたとりまとめを実施した。このほかに海外の学会において、招待講演として我が国の河川堤防統合物理探査に関わる技術紹介を 2 回実施している。



図-3 研究期間(23-27年度)中に現地堤防統合物理探査を実施した河川

2. 研究開発成果

2.1 年次別代表的研究成果

2.1.1 平成 23 年度研究成果

2011 年東北地方太平洋沖地震によって、関東地方整備局管内においても 900 箇所以上で河川堤防被害が生じた。なかでも利根川下流部で 247 箇所、荒川下流部で 23 箇所、小貝川では 113 箇所ですべての堤防の沈下、のり崩れ、亀裂等が発生した。このうち利根川下流部は、1654 年のいわゆる利根川東遷によって河道が付け替えられ、関東山地から大量の砂質土が流下・堆積する環境に変わった。さらに明治以降に河道が固定され、堤防がその砂質土の上に構築された<sup>4)</sup>。荒川下流部も 1911 年以降に人工的に開削された河川であり、堤防築堤年代が比較的新しいという特徴がある。小貝川は典型的な低平地河川であり、その蛇行した河道を直線化した区間、あるいは引き堤区

間の堤防に地震被害が集中した<sup>5)</sup>。さらに樋門・樋管設置部で局所的な堤防沈下・のり崩れが発生したことも特徴的であった。

小貝川右岸 36.6K 付近(図-4)では、約 150m の区間で堤防天端が最大 70cm 沈下し、堤体が川裏側に傾動し、それに伴い川裏側に堤防縦断方向に開口亀裂が数条にわたって発生した。被災は、地形図等からは旧河道を埋めて堤防を直線的に付け直したと想定される区間に特徴的に発生している。実際にこの区間では、川裏側に旧堤、旧河道の一部が張り出して残存していることが知られている。また堤外地側の河跡湖縁部で 50cm 程度の落差を伴うクラック群が出現し、表層地盤が河跡湖側に変位する地盤変動が認められている(図-4)。この堤防区間において統合物理解査に加えてオールコアボーリング、コーン貫入試験を実施し、表層の不均質構造を詳細に把握した。

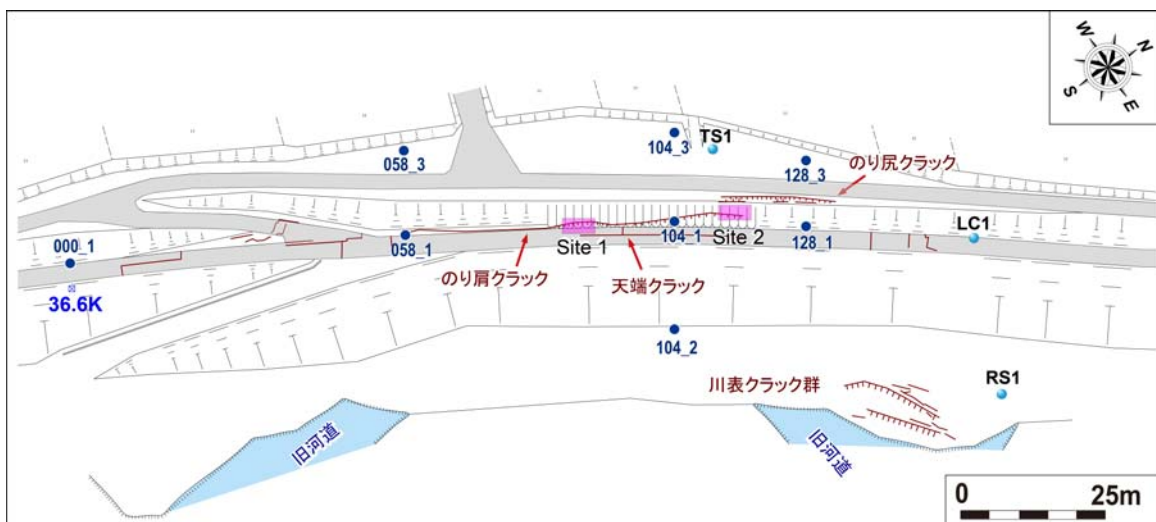


図-4 2011 年東北地方太平洋沖地震による小貝川 R366 測線付近の堤防被害と各種地質調査・物理解査位置図<sup>6)</sup>

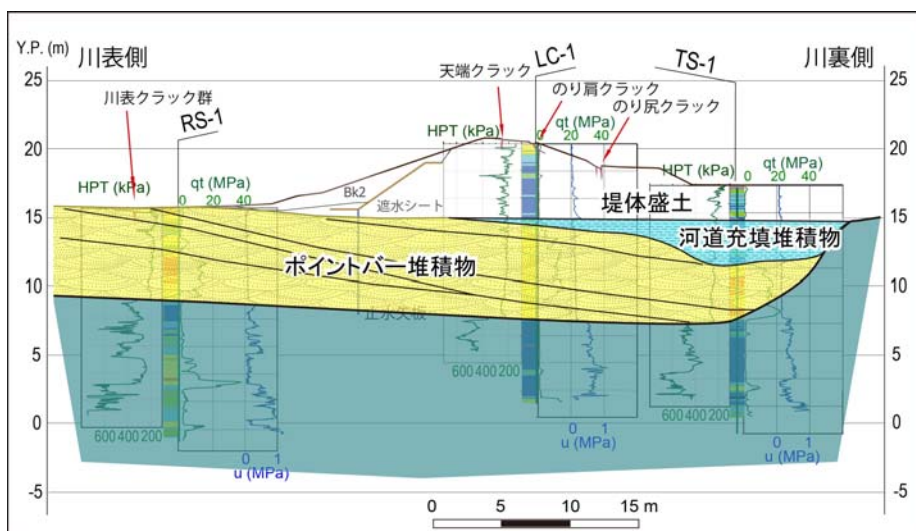


図-5 CPT プロファイルにもとづく堤防横断推定地質断面<sup>6)</sup>

図-5 にコーン貫入試験プロフィールから推定した横断方向の推定地質断面を示す。

この堤防区間では堤防川裏側のり面に認められた開口クラックを対象にセメントベントナイト(CB)を用いたグラウト試験が実施された。この実験に合わせて、その効果を判定するための地中情報を得ることを目的とし、グラウトの前後に小規模 3D 比抵抗探査を実施した<sup>6)</sup>。探査の諸条件を以下に概掲する。

- 1) 探査サイト Site1: 下流側裏のり  
Site2: 上流側裏のり
- 2) 探査範囲 グラウト実施部を含む 6.5m×4m の範囲
- 3) 探査時期 CB 注入前後
- 4) 探査日程 2011 年 5 月
- 5) 電極配置 縦断方向:0.5m×14 本,  
横断方向:1m×5 測線

今回の測定では、図-6 に示すように各サイトでの測定範囲を堤防縦断(X)方向 6.5m×横断(Y)方向 4m とし、X 方向に 0.5m, Y 方向に 1m 間隔で合計 70 本の電極を設置し測定した。アスファルト舗装の道路部分については、ドリル削孔後に塩水を散水して接地抵抗の低減に努めた。

CB 注入には予め小口径の注入孔をさく孔しておき、注入管を地表から 1m の深さまで挿入し、注入圧を 0.2MPa、注入量を 10~12L/min に保持しながら地表部あるいは周辺から CB 剤が流出した時点で終了する、一般的なグラウト注入の手順によった。各注入孔の注入量は 4L~281L と大きな変動が認められたが、地表開口クラック位置との関係は明瞭ではなかった。なお注入した CB の比抵抗は現地での測定により 1Ωm 程度と見積もられたことから、注入改良部分は比抵抗値の大幅な低下が生じると期待された。

図-7 は、上流側に位置する Site 2 の CB 注入前後の比抵抗断面を堤防縦断方向(X 軸方向)のスライス断面として比較表示したものである<sup>6)</sup>。のり表層部の比抵抗は 80 Ωm 以下から 500 Ωm 程度を示している。CB 注入前の比抵抗分布は、天端に近い(Y=0m)ほど比抵抗が低く、のり尻にかけて比抵抗が増加する傾向が認められる。Site 2 では Y=1~2m 間に逆向き(天端向き)滑落面を有する開口幅最大 20cm に達するクラックが X 軸にほぼ平行して伸長しており、注入した CB の一部はこの開口クラック部に漏出しプールを形成した。また一部はのり尻部から漏出した。このことからのり面浅部に、低角の開口面が存在することが示唆された。注入後の比抵抗断面においては 3~5 列目(Y=2~Y=4m)部分の比抵抗が著しく低下したことがわかる。このサイトにおける CB 総注入量のう

ち、90%近くが Y=1.5m の部分から注入されており、この比抵抗低下は CB 選択注入領域、すなわちクラックの存

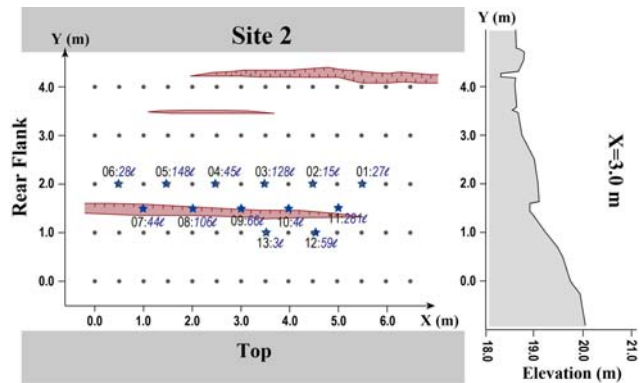


図-6 Site2における3D比抵抗探査電極配置とセメントベントナイト注入量分布<sup>6)</sup>

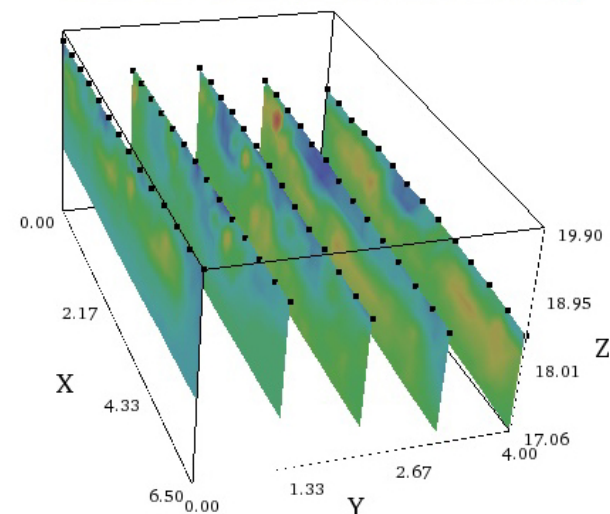
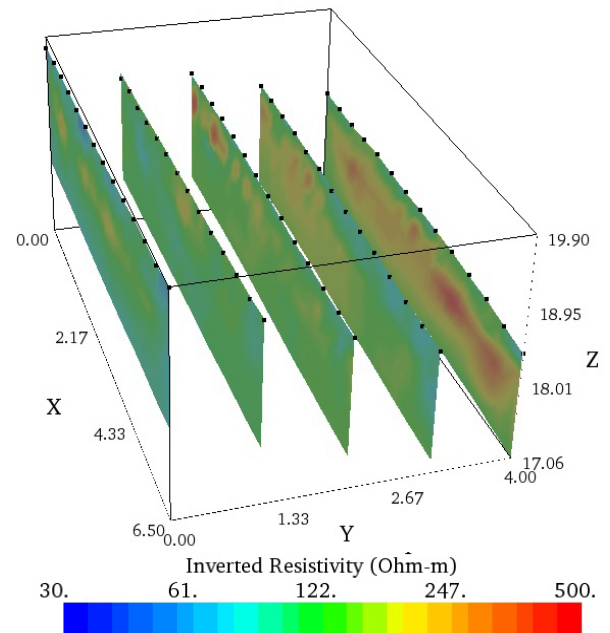


図-7 Site2におけるCB注入前後の比抵抗スライス断面比較<sup>6)</sup> (注入前:上, 注入後:下)

在位置を捉えていると判断することができる。このサイトではのり肩クラックが低角でのり尻方向に進展していると推定することができる。

2011年の出水期前に、この被災堤防区間周辺の3地点においてコーン貫入試験(CPT)およびHPTによる注入試験を実施した。HPTは、プローブ側面から一定量(今回測定では300 mL/minとした)を注入し、その注入圧を連続測定する。透水性が高い層準では低い値を、粘性土層では逆に高い値を取ることから、CPTデータと組み合わせることで解析することによって、液状化を引き起こす高透水ゾーンを把握することができる。3地点(図-4参照)を結んだ推定地質断面構造を図-5に示す。川裏表層部に層厚5m程度のくさび状の粘性土層が分布し、その下位に層厚4~6m程度の砂層が出現した。この砂層は堤防横断方向によく連続し、河道蛇行部に典型的に発達するポイントバー堆積物に比定することができる。地下水水位以下にあることから高透水ゾーンを形成していると推定された。この砂層は、周面摩擦比が小さく、貫入抵抗が相対的に高く、かつ注入圧が小さいことで特徴づけられる。3地点のCPT/HPTの作業時間は深さ15m程度までであれば1日で済み、経費も相対的に安価であるので断面解析、高透水ゾーンの把握に極めて有効であることが実証された。

低平地河川の下流域の樋門・樋管横断部では、抜け上りなどの地盤変状がしばしば見いだされる。変状の程度が大きいと、横断構造物周辺地盤にゆるみ域が生じ、連通してパイピングなどを引き起こす危険性がある。樋門樋管周辺発生変状は局所的に分布する場合が多く、ボーリングやサウンディングなどの離散的な調査ではそれを捉えられない可能性があり、連続物性断面を提供できる物理探査の適用が期待されていた。その一環として、樋管横断部の川裏側小段上道路に比高約20cmに達する抜け上りが発生していた樋管において、GPRを用いた詳細調査を実施した。川裏側道路上に設定した約30mのGPR探査測線断面を図-8に示す。同図に示されるように、樋管抜け上りに伴って、両側約7mのゾーンに変形が集中して発生している。さらに樋管直近部の舗装体の中に、最大厚さ約5cm、幅約5mの空洞が成長していると判定した。樋管抜け上りに伴う上下

変位は下部ほど大きく、舗装の粘弾塑性変形によって表層部に空洞が発生したと解することができる。この空洞の一部は、表面にまで達する開口クラックからも観察することができた。GPRは極めて高分解能であり、数cm程度の異常構造をも検出することが可能である。護岸背面空洞や天端舗装直下のクラックの分布調査に有用であることが確かめられた。

### 2.1.2 平成24年度研究成果

24年度は、前述のように樋管撤去堤防開削区間を主対象に7堤防区間で10次にわたる現地適用研究を実施した。適用した手法は統合物理探査に加え、堤防横断トモグラフィ探査法、新たに考案したハイブリッド表面波探査法、開削面高周波表面波探査など9種類を数えた。こ

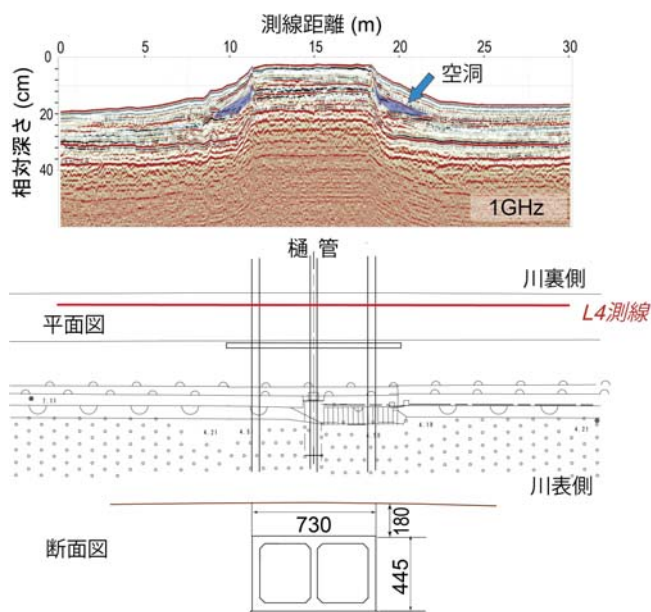


図-8 GPRによる樋管横断部表層変状把握例

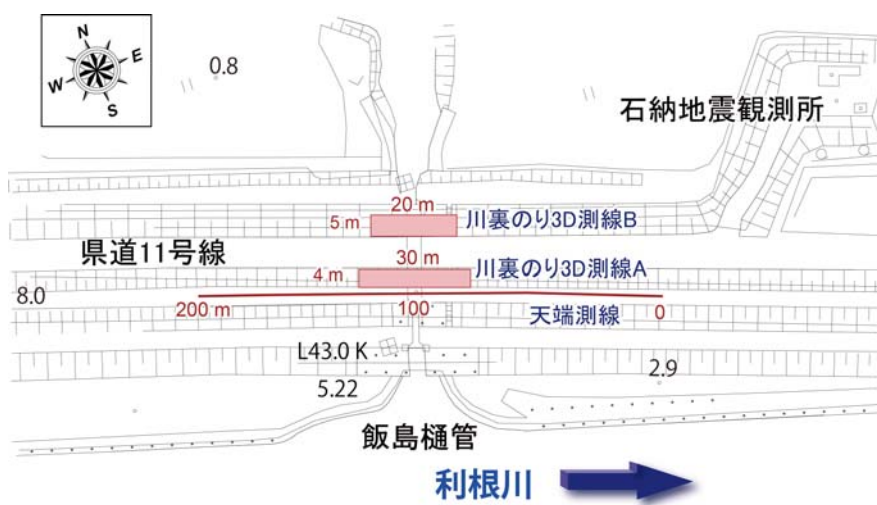


図-9 利根川左岸43K付近飯島樋管部における統合物理探査測線位置図<sup>7)</sup>

のうち、23年度から継続して実施した利根川左岸43K付近飯島樋管部における適用検証結果を以下に示す。

飯島樋管は、2011年東北地方太平洋沖地震によって樋管直上の堤防道路で約14cm、川裏側取付け護岸で最大15cmの沈下が発生した。また川表側擁壁が下流側に移動するとともに傾動し、約30cm程度開口した。このため樋管部を開削し、樋管を補強し護岸等を付替える復旧工事が予定された。そこでまず堤防の開削に先立ち、樋管部において小規模な統合物理探査と川裏側のり部において高密度3D比抵抗探査を実施し、その結果を開削断面において検証することを試みた<sup>7)</sup>。

開削前の統合物理探査測線の位置を図-9に示す。天端測線ではランドストリーマー表面波探査に加え牽引式比抵抗探査を実施した。川裏のり測線では小規模高密度3D比抵抗探査を実施した。天端測線の統合物理探査断面を図-10に示す。同図からは、樋管部の物性構造が他の区間とは大きく異なっていることが示されている。この断面をS波速度140m/s、比抵抗250Ωmを基準値として物性的に4区分した。赤色および黄色で表示される高比抵抗低S波速度部および高比抵抗中S波速度部は相対的に緩み度が高い領域として比定することができる。この暖色系表示部分が樋管部と上流区間の堤体上部に特異的に出現していることが特徴的である。樋管部に他とは異なった材料が使用されていることは、開削前に実施した小規模高密度3D比抵抗探査によっても支持されたが、開削後の堤体観察によっても確認された。それを、図-11を用いて説明する。同図(a)は、開削前に川裏のりA測線で実施した小規模高密度3D比抵抗探査の結果断面の一つを示したものである。同図には、樋管直上部にのみ高比抵抗体が再現さ

れている。この高比抵抗体は下流側(断面右側)で大きな値を示し、上流側にゆるく傾動しているようにみえる。また同図(b)、(c)は、堤体を縦断方向に開削した際に出現した樋管上部の堤体内部のモザイク写真と地質スケッチである。樋管中心(測線距離程100m)から上下流に15mの区間、標高で4~7mの部分に他とは明確に識別可能な細粒砂が出現した。その出現位置は同図(a)の高比抵抗体の分布と極めて調和的であり、この高比抵抗体が樋管直上部にのみ使用されていた細粒砂と対応していること

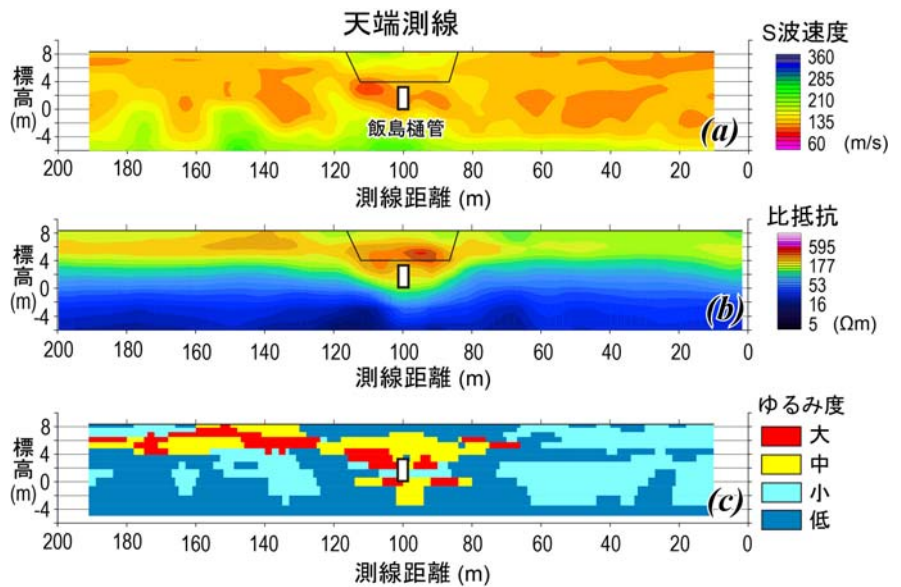


図-10 飯島樋管部開削前天端測線統合物理探査結果断面図。(a): S波速度断面; (b): 比抵抗断面; (c): ゆるみ度評価断面<sup>7)</sup>

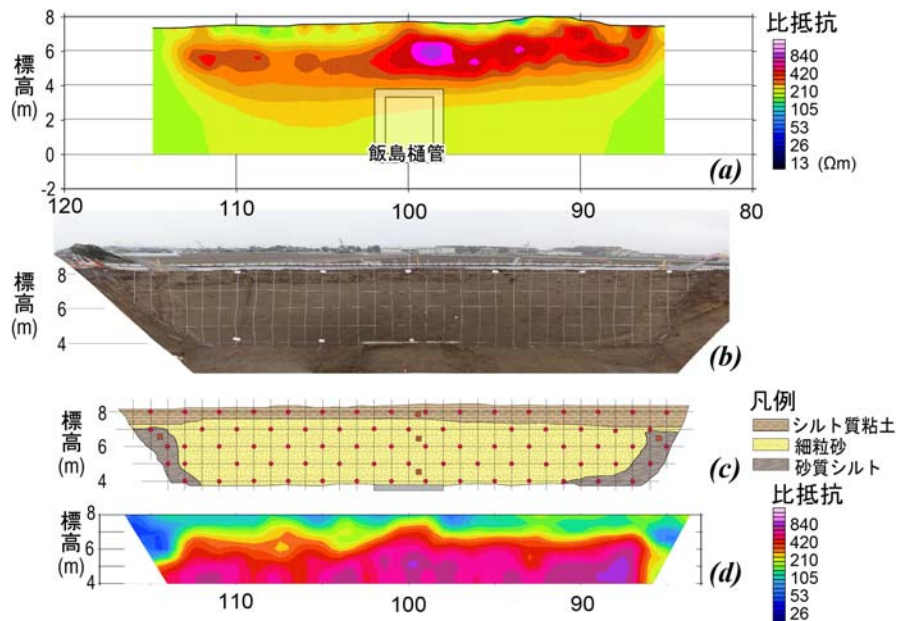


図-11 飯島樋管部天端縦断方向開削前後探査結果比較。(a): 開削前川裏のりA測線比抵抗断面; (b): 開削面モザイク写真; (c): 開削面地質スケッチ; (d): 開削面比抵抗マップ<sup>7)</sup>

が明らかになった。つぎに開削面上の 282 点で見かけ比抵抗を測定し、表面の比抵抗分布図を作成した。その結果を同図(d)に示すが、この細粒砂層部分のみが特異的に高比抵抗であることが確認された。またその構造も、同図(a)に示した地表からの探査結果と調和的であった。このことは、地表からの統合物理探査および高密度比抵抗探査によって、堤体内部の異質な部分を高精度で捉えることができることを実証するものである。

2.1.3 平成 25 年度研究成果

25 年度は、前述のように 8 堤防区間で 10 次にわたる現地適用研究を実施した。適用した手法は統合物理探査に加え、新たに開発した高速電気探査装置を用いた非定常浸透過程比抵抗モニタリングなど 7 種類について検証した。このうち、橋台設置に伴い、一部開削された堤防に対する比抵抗トモグラフィ探査の開削断面との比較検証例を示す。

岐阜県安八郡安八町揖斐川左岸 40.0KP 付近におい

て、大安大橋橋台設置に伴う堤防部分開削工事が実施された。この開削工事前に、横断方向に測線を設定し、比抵抗トモグラフィ探査を実施した。また横断測線内でコーン貫入試験も実施している。サウンディング調査結果を含めた比抵抗トモグラフィ探査断面を図-12 に示すが、サウンディング結果からは堤体表層約 1.5m が非常に硬質であり新たに築層された最新期築堤であること、その下に低比抵抗を呈する旧堤体が埋もれていることが推定された。川裏側に新たに腹付された堤体は、同様に高比抵抗であり粗粒材料が使用されていると推定された。

図-13 は、橋台設置のために部分開削された川表側堤防の開削面で測定した比抵抗分布である。対応する部分を図-12 に白線で示している。両者の比抵抗構造は極めて調和的であり、開削を伴わないトモグラフィ探査によって、堤体内部物性構造を高解像度でイメージングできることが確かめられた。

開削面で採取した試料に対して土質分析を行ない、開

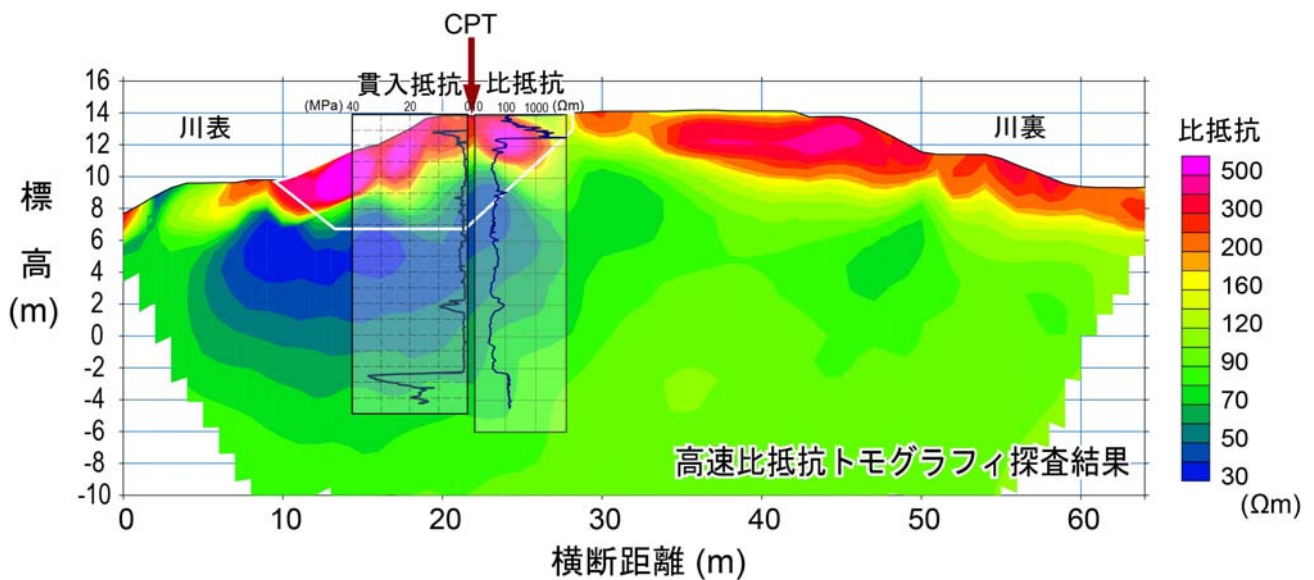


図-12 揖斐川堤防開削部横断測線比抵抗トモグラフィ探査断面

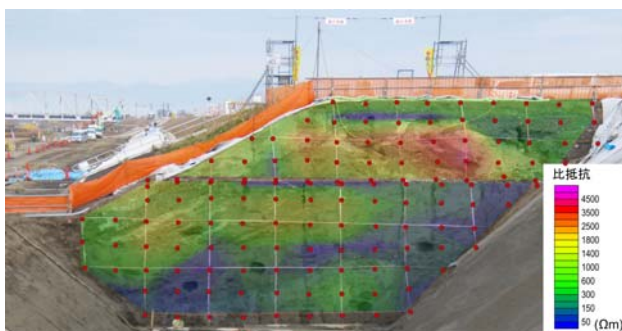


図-13 揖斐川堤防開削面比抵抗分布

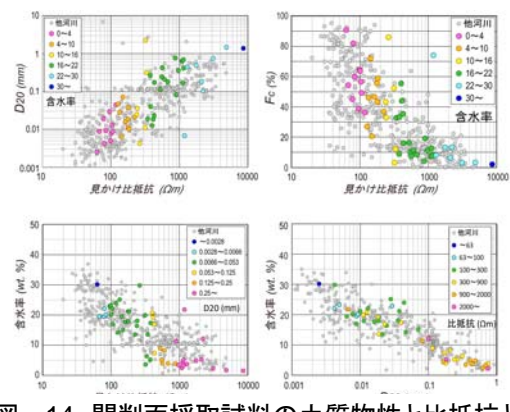


図-14 開削面採取試料の土質物性と比抵抗との相関<sup>8)</sup>



削面測定比抵抗値と比較した<sup>8)</sup>。結果を図-14に示す。なお同図では含水率や20%粒径などの土質特性を第3の属性として色分け表示している。

同図左上は、見かけ比抵抗と20%粒径(D20)との関係を示したものである。両者には両対数軸上ではあるが明瞭な相関関係があり、前者から後者を経験的に推定することが可能であることがわかる。同図左下は含水率と比抵抗の関係であるが、右下方にプロットされるデータほど含水率が低く、反対に左上(低比抵抗かつ低D20)ほど含水率が高くなるという、明瞭な関係が表れている。同様の関係は同図右上に示した見かけ比抵抗と細粒含有率( $F_c$ )との相関図にも明瞭に認めることができ、一見すると比抵抗が基本的に含水率に支配されているように理解することが可能である。しかし未固結土質材料においては、含水率と20%粒径あるいは細粒含有率とは独立した事象ではなく、相補的な関係性を有していると考えられる。天水あるいは河川水の影響を受ける環境下では間隙水の導電率は大きな変動を示さないと見なすことができるので、同図は見かけ比抵抗値から20%粒径、ないし透水係数を推定することが可能であることを裏付けている。

#### 2.1.4 平成26年度研究成果

26年度は、前述のように6堤防区間で9次にわたる現地適用研究を実施した。これに加え、土研構内に構築した模擬堤防で3次元非常浸透過程比抵抗モニタリングを実施している。適用検証した現場計測技術は、4次元高速比抵抗探査など7種類に上る。

このうち、堤防機能強化の一環として基礎地盤の改良処理の効果判定に統合物理探査を適用した事例を示す。橋台設置に伴い、一部開削された堤防に対する比抵抗トモグラフィ探査の開削断面との比較検証例を示す。

現地検証を実施したのは、揖斐川左岸2.2KP付近の堤防改良区間の一部である。この区間では堤防機能強化を目的として、セメントスラリー深層混合処理柱状改良体施工による地盤改良が実施されていた。そこで地盤改良

効果を統合物理探査によって把握できるかを評価することを目的とした比較計測を実施した。測線配置を図-15に示す。地盤改良ゾーン上にL01測線を、ほぼ並行して改良ゾーン外にL02測線を設定して牽引式電気探査法と固定展開式ハイブリッド表面波探査による統合物理探査を実施した。探査結果を図-16に示すが、改良ゾーン内外で、特にS波速度構造が大きく変化していることがわかる。すなわち、未改良部ではS波速度が200m/s程度以下であるのに対し、改良ゾーンでは400m/s以上の値を示す。一方比抵抗構造には顕著な差異は認められない。特に表層6m程度までの構造はほぼ同じであった。これは探査区間が河口感潮域に位置し、地下水の導電率が極めて大きいことによると思われる。ただしL01測線断面では深部に高比抵抗異常が出現することが特徴的である。なおL02測線S波速度断面には、測線の下流側で盛土層内の下部、深さ6m-3m付近に $V_s=400\text{m/s}$ 程度の高速度層が出現している。伊勢湾台風によって損壊を受けた堤防区間に投入された玉石濃集部に比定することが可能である。

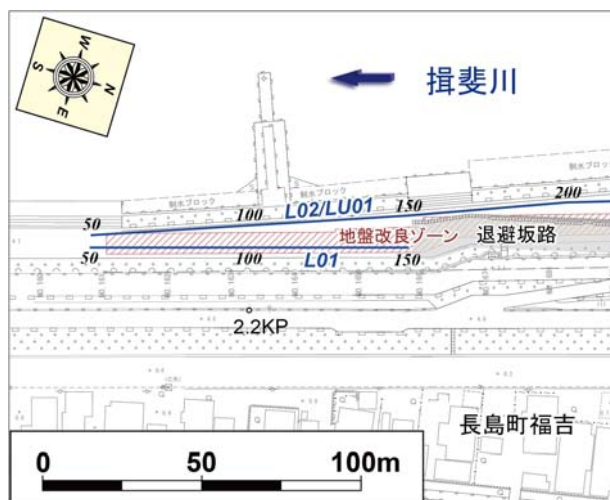


図-15 揖斐川左岸2.2K付近地盤改良部における統合物理探査測線位置図

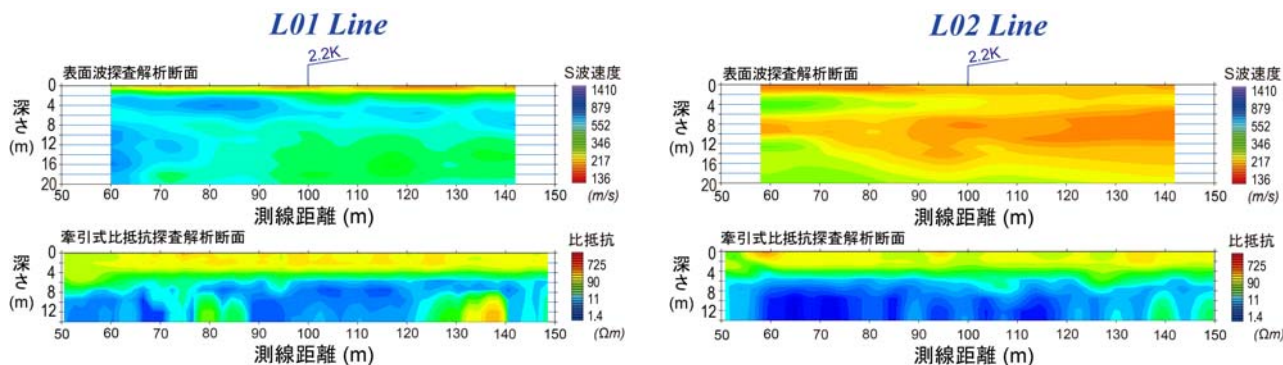


図-16 地盤改良ゾーン内(左)と外(右)での統合物理探査断面比較

2.1.5 平成 27 年度研究成果

27 年度は、前述のように 2 堤防区間で 3 次わたる現地適用研究を実施した。これに加え、土研構内に構築した模擬堤防で 3 次元非定常浸透過程比抵抗モニタリングを実施している。適用検証した現場計測技術は、ハイブリッド表面波探査、開削面での土壌水分測定、ブロックサンプリングなど 10 種類に達した。

このうち、阿賀川右岸 5.6KP 付近の山崎樋管開削部で

実施した開削前後の統合物理探査の比較検証結果を以下に示す<sup>9)</sup>。

図-17 は、開削前に堤防天端に測線を設定して実施した統合物理探査の結果断面である。測線は川表側天端のり肩に設置した。堤防は横断方向にも不均質であるので、開削面調査結果と対比する場合はこれらの断面は川表のり肩直下付近の物性を反映していることに注意する必要がある。表面波探査断面は、堤体部が表層の薄い中

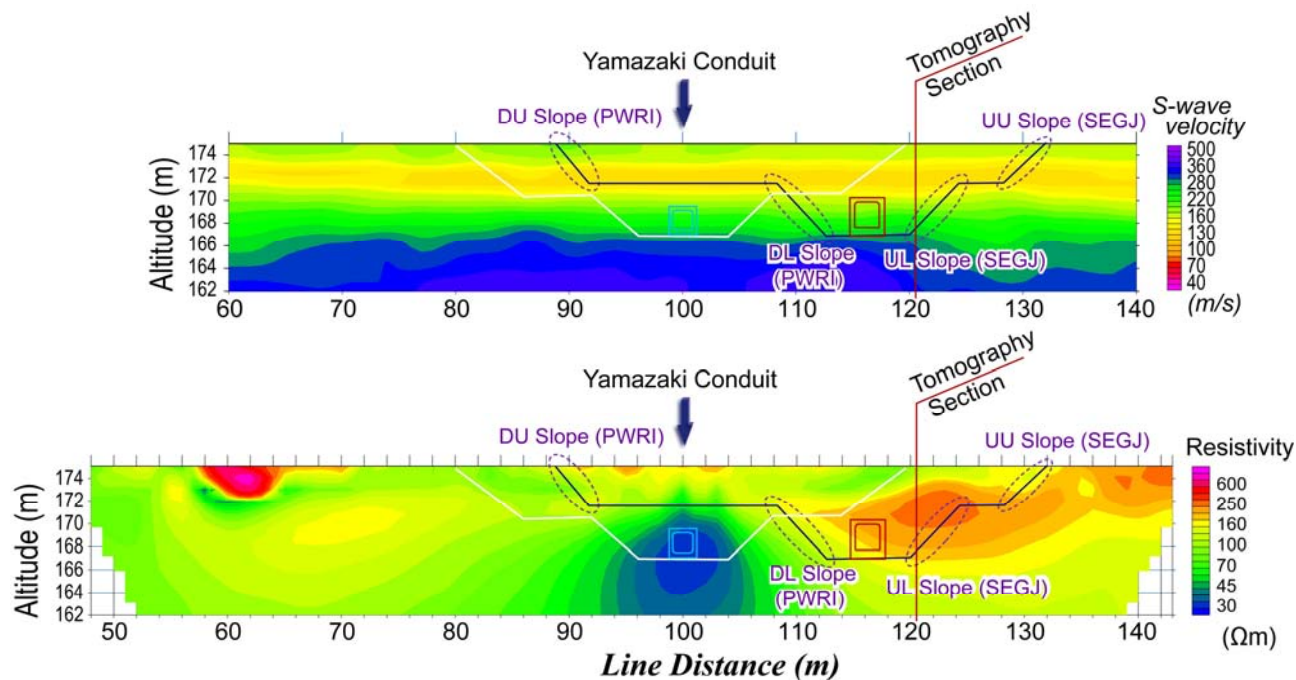


図-17 山崎樋管部開削前統合物理探査断面。上：表面波探査断面；下：高密度電気探査断面<sup>9)</sup>

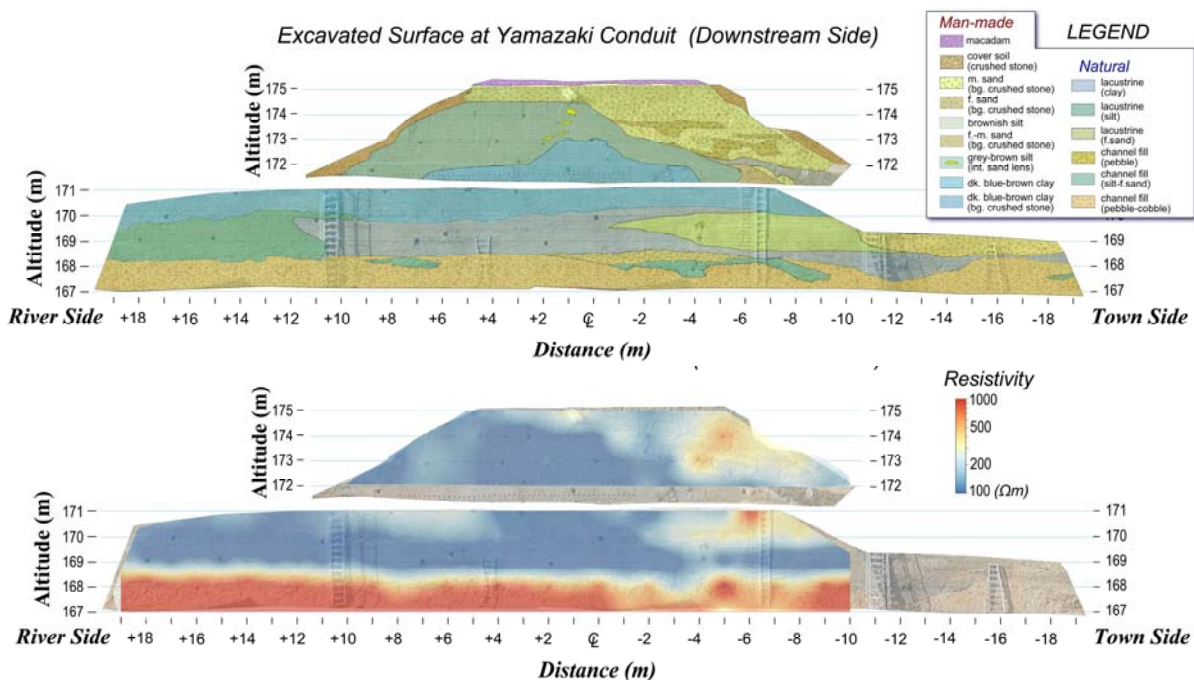


図-18 山崎樋管開削部下流側開削面地質スケッチ(上)および開削面比抵抗分布(下)

速度層, 中位の低速度層の 2 層構造でとなっていることがわかる。基礎地盤の出現標高は約 170m と推定した。基礎地盤層は, 167m 付近を境に上位中 S 波速度層と下位の高 S 波速度層に区分することができる。一方比抵抗探査断面には, 測線右側(上流側)堤体部に, 高比抵抗体がレンズ状に分布していることが示されている。また測線距離 60m は堤防と県道の接合部にあたり, 局所的に粗粒の路盤材料が使用されていると推定された。一方既設樋管部は最表層を除いて高比抵抗となっており, 樋管埋め戻し時に相対的に細粒の材料が使用されたことがうかがえる。

図-18 は, 下流側開削面の地質観察スケッチ(上)と面上の 230 点で計測した比抵抗値から作成した開削面比抵抗分布図である。ここで, 開削面上部と下部との間には約 20m のオフセットがあること, 斜面の分布構造を垂直面に投影していることに注意を要する。開削面観察に基づいて築堤履歴や層序を解釈し, 人工層を 9 区分, 自然地層を 6 相に区分解した。まず人自不整合(盛土と自然地盤の境界)は標高約 170m に認められる。ただし川裏側では 168m 付近まで部分的に掘り下げられている。基礎地盤層の上位 2m は, 湖成のシルト粘土層ないし細粒砂層で構成されている。1611 年会津地震の際に当地に形成された「山崎新湖」の堆積物に比定することができる。標高 168m 以深には礫質支持のチャネル充てん砂礫層が出現する。この構造は, 同図下に示した開削面比抵抗分布にも明瞭に現れている。また多少の深度誤差はあるものの, 図-17(上)の S 波速度断面とも調和的である。堤体盛土層では, 川裏側に腹付された砂礫層が特徴的である。この砂礫層は天端直下まで連続することから, 堤防改築・拡張時に新たに付加された部分と解釈される。また縦断方向比抵抗断面(図-17(下))からは, 上流側開削面と下流側開削面とでは, 観察される層相・構造が異なると想定された。実際, 上流側開削面では標高 170~173m にかけて緩い細粒砂質盛土が分布していた。さらに下位にはチャネルバー堆積物が分布し, 湖成シルト粘土層を削剥してチャネル充てん砂礫層を覆っていた。このような構造がレンズ状の高比抵抗体として捉えられていたと考えることができる。

開削面調査では, 出現した構造が堤防縦断方向に連続するか, 局所的な構造化を判断することができない。このように縦断断面と対比することで, 開削部の特徴づけが可能となる。統合物理探査の利点を検証することができた。

## 2.2 研究内容別代表的研究成果

本節では研究実施計画に掲げた個別の研究内容・課題に関連した研究成果を概説する。なお「被災事例分析による要求性能の整理」の研究成果に関しては, 2.1.1 および 2.1.2 で紹介したのでここでは省略する。

### 2.2.1 物理探査手法を用いた経時変化モニタリングによる脆弱過程のモデル化・危険度指標化課題研究成果

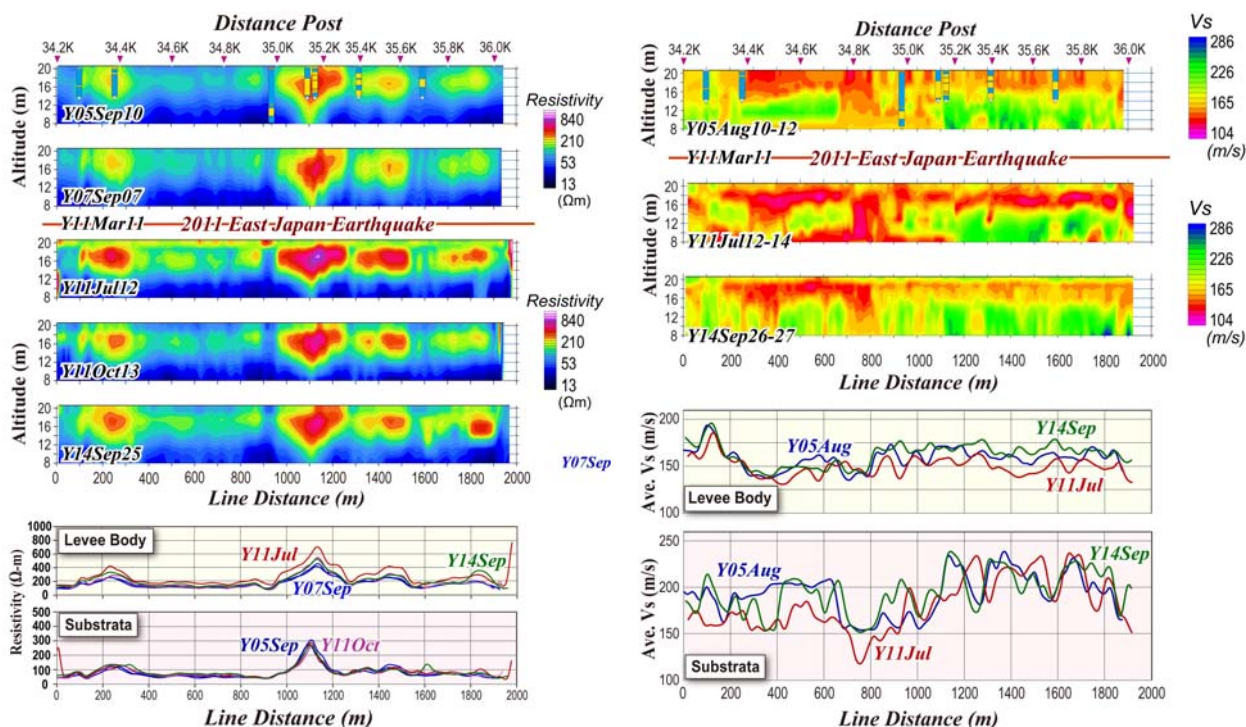
#### (1) 地震被災堤防の物性変動長期モニタリング

堤防の状態の変化には, 浸透漏水や地震時崩壊などの短時間過渡的変動のほか, 中長期的な劣化がある。土構造物の典型である河川堤防は, たとえ外見的に変状が認められなくても, 内部物性構造は人為的改変, あるいは洪水や地震営力によって確実に劣化が進行していると考えらるべきである。このような経年劣化の進行度合いやその部位を把握するには, 同じ計測調査を繰り返し適用してモニタリングすることが不可欠である。

本項では, 2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した堤防区間において同地震を挟んで 10 年間におよぶ長期モニタリングを実施してきた事例を示す。

小貝川左岸 34.2KP 付近の堤防区間において 2005 年 8 月より統合物理探査を繰り返し実施してきた<sup>10), 11), 12)</sup>。地震を挟んだ同区間の統合物理探査断面を図-19 に示す<sup>12)</sup>。同図左は比抵抗断面, 同右は S 波速度断面である。また 2 次元断面を堤体部と基礎地盤部に分割し, 各々の平均比抵抗・平均 S 波速度を計算して 1 次元プロファイルとして表示した(同図下)。この図に示されるように, 堤防内の比抵抗構造および S 波速度構造は地震を境に一変していることがわかる。比抵抗は地震後に全域的に高比抵抗化し, 地震後も一定期間継続して 3 年半を経て徐々に元の状態に戻りつつあるようにみえる。地震を挟んで高比抵抗化したのは当初より相対的高比抵抗部として捉えられられていた部分だけであり, 地震による含水状態の変化(脱水)が捉えられていると解釈することができる。なおこのような高比抵抗化は堤体部にのみ現れ, 基礎地盤部の比抵抗はほとんど変化していない。基礎地盤部は基本的に飽和状態にあるために変動しなかったと考えられる。

S 波速度断面(同図右)においても, 比抵抗断面ほど明瞭ではないものの, 地震に伴う S 波速度低下が局所的に発生していることが示されている。1 次元プロファイル(同図右下)から, S 波速度の低下が堤体部では相対的に高 Vs 部で顕著であること, 一方基礎地盤部では相対的低 Vs 部で速度低下が生じたこと, を判読することができる。このように物性変動部位を 2 次元断面上で特定できることが, 統合物理探査による長期モニタリングの特徴である。堤体・基礎地盤の土質構成と対比することで, 地震による



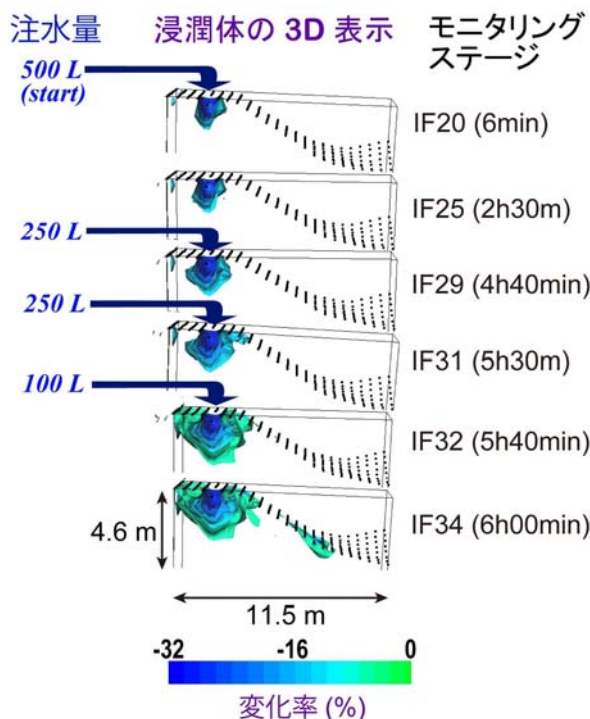
図一十九 長期繰り返し統合物理探査による2011年東北地方太平洋沖地震被災堤防の物性構造の変化<sup>12)</sup>。  
 左上:比抵抗断面, 左下:1次元平均化比抵抗プロファイル, 右上:S波速度断面, 右下:1次元平均化S波速度プロファイル。

脆弱化に対するポテンシャルを評価することが可能になると期待される。今後、既往地盤資料の収集解析、試料採取と各種試験の実施によって地震危険度の空間分布を定量評価する手順を構築する予定である。

(2) 堤防内降雨浸透過程 3次元モニタリング

土木研究所では、ほぼリアルタイムで多チャンネルの比抵抗を測定可能な高速電気探査装置を開発した<sup>14)</sup>。この高速電気探査装置を活用することで、浅部の3次元比抵抗構造を把握することが可能であり、さらに繰り返し測定を実施することで経時変化を含めた4次元的な解析が可能となる。そこで堤体表層部の不飽和帯への降雨の非常浸透過程を比抵抗変化として捉え、堤防の浸透による脆弱過程を3次元的にモニタリングする基礎実験を堤防で実施した。

まず堤防天端川表側肩部に延長6m、幅60cm、深さ約30cmの溝を掘削し、その溝内に清水を注水して堤体表層部堤体内に浸透する過程を3次元比抵抗探査でモニタリングした<sup>13)</sup>。溝への注水は約26時間の間に12回に分けて実施し、合計4,000Lを堤体内に自然浸透させた。この注水浸透間に初期状態を含めて44次にわたって3次元測線配置で比抵抗を計測した。なお最短での繰り返し時間は、12組の測線組み合わせ、合計6,912点の応答電位計測という条件で約5分であった。



図一二十 3D比抵抗経時変化モニタリングによりイメージングした堤体表層部の浸潤体の成長過程。  
 (文献<sup>13)</sup>に加筆)

まず初期状態の3次元比抵抗分布を計算し、次に注水によって比抵抗がどの程度変化したかを初期状態からの変化率として計算・表示した。モニタリング結果を図-20に示す。注水によって堤体表層部の不飽和帯が湿潤化し、その浸潤した領域が注入溝から下方とのり方向に伸張していることが明瞭に示されている。この湿潤体は、注入直後は半球状ではなく下方にやや伸長した楕円球状を呈していたが、注水3時間後以降は形状がいびつになり、のり傾斜方向と天端中央部に層状に伸長した。このように高速比抵抗探査装置を用いることで、堤体表層の不飽和帯内での水の浸透過程をほぼリアルタイムでモニタリングできることがわかった。また湿潤体が半球状ではなく、層境界あるいは高透水層に選択的に進展していることがうかがえる。従来の原位置不飽和透水試験では半球状あるいは円筒状の浸潤を仮定していたが、実際には不定形の形状で進展することがわかった。今後、不飽和材料の体積含水率と比抵抗変化率との関係の室内実験で明らかにするとともに原位置不飽和透水試験と3次元比抵抗モニタリングを組み合わせることで、不飽和透水係数の空間分布を推定する手法開発に取り組む予定である。

2.2.2 統合物理探査による地盤物性推定方法課題研究成果

2.1.3 項で示したように、統合物理探査で得られるS波速度、比抵抗はN値や粒度、あるいは浸透特性と密接な関係がある。ただし統合物理探査の空間解像度は、測線方向・上下方向ともに数m程度と見積もられ、得られる値

はその領域の平均的な物性情報として扱われる。これに対し土質調査ボーリングは上下方向の解像度は高いが、N値などの計測データは連続的でなく局所的な物性変動の影響を大きく受ける。堤防盛土などの土工構造物においては空間的変動の度合いがより大きくなり、それらのある区間・深度の平均的物性値として取り扱うことは困難である。したがって、物理探査断面と既往の土質調査ボーリング結果等を対比する際は、細心の注意を必要とする。両者を対比させるにはスケールを適合させ、数10cmのオーダーで原位置試験と物理探査を適用することが求められる。これを達成するために、これまでに河川堤防の開削断面10箇所において比較計測試験を実施してきた。断面上での計測点数は総計で2000以上、分析試料数は530以上に達した。これらをデータベース化するとともに、現地計測結果と土質分析結果との対比を試みた<sup>8)</sup>。なお土質分析にあたっては、開削面において、物理探査測定点近傍の堤体材料を採取し、土研に持ち帰って直営で乱した試料に対する標準的な試験を実施した。さらに両者の関係を多変量解析し、統合物理探査結果から土質区分を推定する近似式を提案した<sup>8)</sup>。この推定式の妥当性を検証することを目的として、堤防の開削部で開削前に実施した統合物理探査結果からの土質区分推定を実データと対比した。結果の一例を図-21に示す。開削面を詳細に観察し、層相を14区分した。また累重関係から築層ステージを4区分することができた。この箇所では開削前に詳細点検が実施され、天端でボーリング調査が

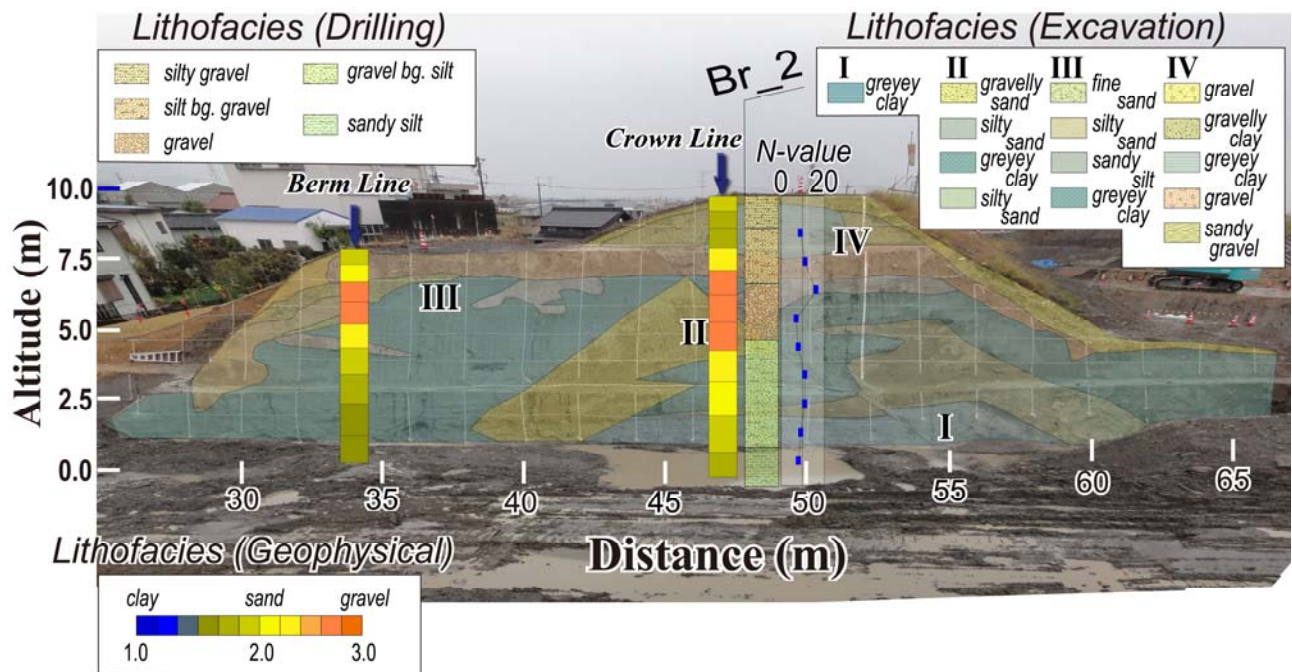


図-21 堤防開削面地質スケッチおよび統合物理探査からの土質推定結果対比<sup>14)</sup>

行なわれている。また天端でと川裏小段上で統合物理探査を実施していた。ボーリング調査結果から解釈された柱状図は同図左上の凡例に示すように、天端から標高 4m までを礫ないしシルト混じり礫と判定しており、実データとの整合性が低い。これに対し、統合物理探査データから推定した層相は、開削面地質スケッチとより整合的である。この対比結果は、従来のボーリング調査と比べても、統合物理探査からより整合的に堤体内土質構成を推定できることを実証するものである。

### 2.2.3 堤防の浸透安全性・耐震性の評価手法の検討課題研究成果

前述のように、従来の堤防の安全性評価は、細分区間内を一様と仮定し、その中で詳細点検を実施してその結果を代表断面として用いていた。しかし堤防が極めて不均質で上記のような過程が成立しないことが明らかになってきており、連続的情報に基づいた安全性評価の手法構築が急務となっていた。

2.1.3 項および前項で示したように、統合物理探査で得られる S 波速度、比抵抗は N 値や粒度、あるいは浸透特性と密接な関係がある。この関係を利用して、図-22 に例示するように統合物理探査断面から直接的に堤防の浸透安全性や地震時の液状化危険度を連続的 2 次元断面として評価することが可能になってきている<sup>15)</sup>。この評価には統合物理探査結果のデータベースを利用する<sup>16)</sup>。データベース上で対象河川、堤防区間を設定し、さらに周辺の土質調査・試験結果も参照する。そのうえで地震動レベルを入力する(同図上)ことで、浸透安全性評価断面(同図中)や液状化危険度(FL)断面(同図下)を自動的に計算表示する。これらの推定に使用する土質試験データも随時更新追加が可能であり、またそれに伴う推定式の修正も可能なシステムとなっている。現在は閉鎖的環境での利用にとどまっているが、データ保有者の承諾が得られればデータベースを含めて公開が可能な段階に至っている。

### 2.2.4 堤防基礎地盤の複雑性を考慮した合理的調査方法の検討課題研究成果

出水時の基盤漏水は浸透経路長が最短

で動水勾配が最大になる堤防川裏のり尻部で発生することが一般的であるが、堤防から離れた後背地で発生する可能性があることが知られている。そして後背地での漏水は、大規模な破堤被害を引き起こす危険性が高い。

2014 年 10 月 6 日の台風通過に伴う出水時に小貝川

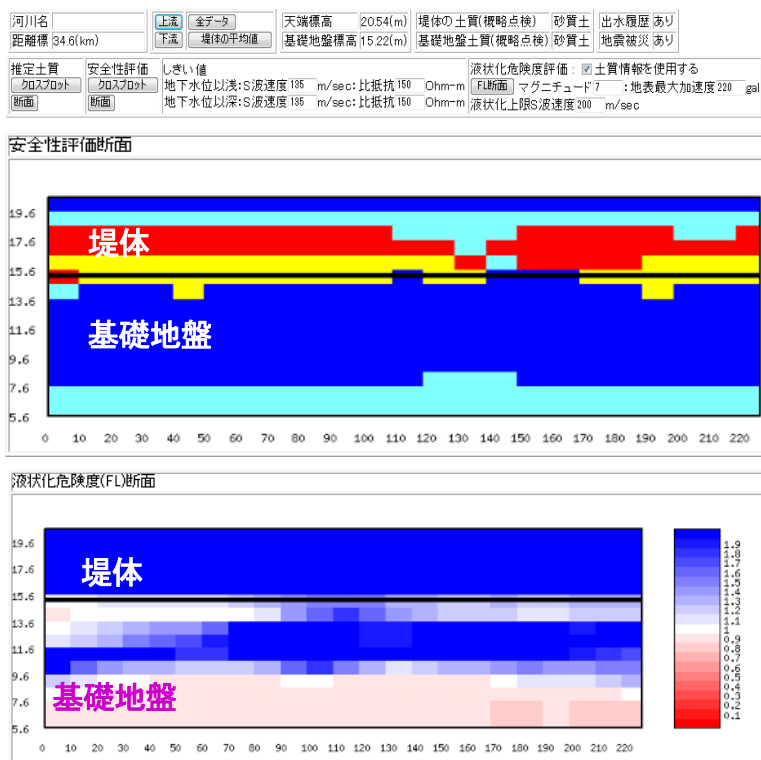


図-22 統合物理探査データからの 2 次元連続的浸透安全性評価断面(中)および液状化危険度評価断面(下)の作成表示システムの表示例<sup>15)</sup>

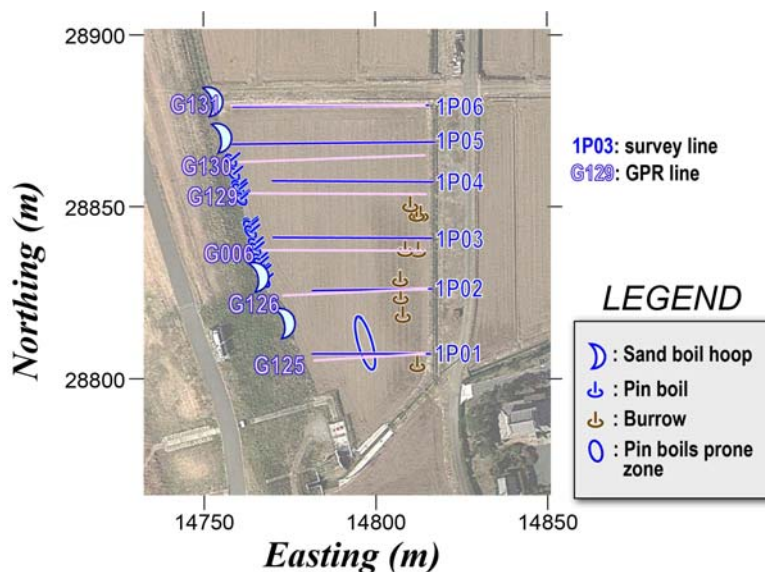


図-23 出水時の堤防川裏側漏水位置および形態区分

(文献<sup>17)</sup> に加筆)

左岸堤防 54.6KP 付近の川裏側堤脚部および堤内地盤(水田内)で漏水が発生した(図-23)。このうち堤脚部の相対的大規模の漏水箇所では月の輪工が構築され漏水対策が施された。特徴的であるのは後背地の田圃内での湧水で、川面側堤防堤脚からは最大で 90m 以上離れた位置に出現した。しかしこのうちの南北方向に列状に連なる湧水は、既存のザリガニの巣穴(burrow)からの湧水であることが、その後の我々の詳細調査によって確認された。一方田圃南側の青色楕円で囲った湧水多発部(Pin boils prone zone)は、出水時の水頭差が 1m 程度と小さかったにもかかわらず、堤防川表側から 60m 程度離れた位置に発生した。河川事務所による被災後の緊急調査等によって、漏水箇所周辺堤防直下には層厚 4m 程度の砂礫層の存在が確認されたが、その透水係数は  $1.5 \times 10^{-4}$  m/s 程度であり、田圃内の湧水の発生を説明することができなかった。そこでこのような特異な堤内地での漏水発生原因を明らかにすることを目的として、湧水発生田圃内で稠密な GPR 探査および統合物理探査を実施した<sup>17)</sup>。

GPR 探査には土木研究所で試作した詳細調査用 GPR システムを使用した。このシステムは測位精度  $\pm 2$ cm、測線上を 1cm 間隔でデータ取得が可能である。測線は南北方向にほぼ 50cm 間隔で約 120 本、東西方向に 8 本設定した。取得したトレース数は田圃内で約 60 万点に達した。また稠密統合物理探査測線は東西方向に合計 6 本設定し、50cm 間隔での高精度比抵抗探査と表面波探査を実施した(図-23)。

GPR 探査によって求めた被覆土層下面(砂礫主体基礎地盤層上面)標高を図-24 に示す。同図に示すように、田圃上面層の電磁波速度を 7cm/ns と仮定して

深度変換すると、田面直下の深さ約 25cm 程度に頂部に有する線状の埋没地形を鮮明に捉えることができた。この線状構造は、1947 年以降の空中写真との比較から、1950 年代以降に形成された小径と用排水路と解釈することができる。また月の輪工を構築した漏水箇所のうち 3 箇所は、基礎地盤層が浅部に出現する部分に位置するこ

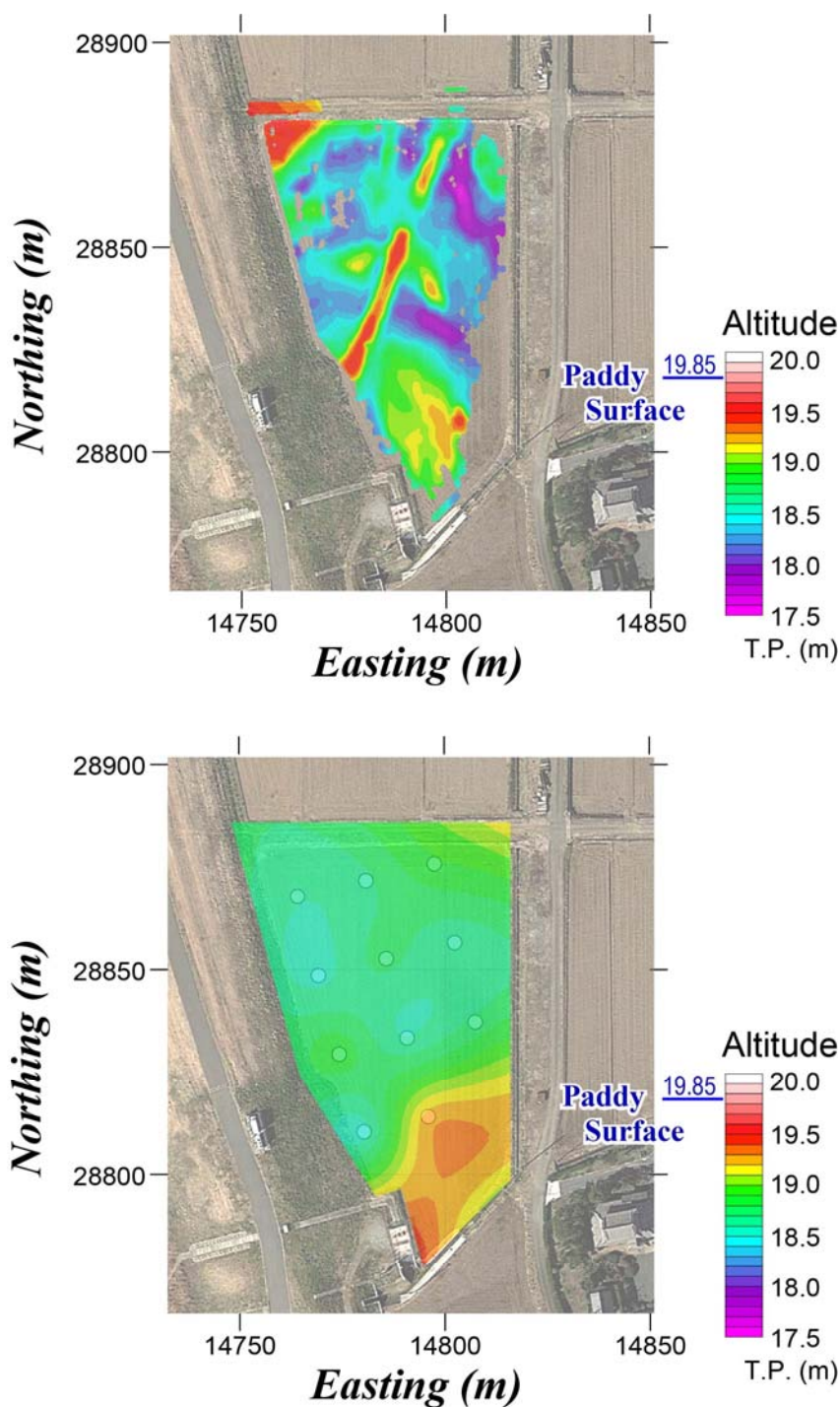


図-24 漏水発生川裏田圃内 GPR 探査による被覆土層下面(基礎地盤上面)標高分布(上)と SWS による基礎地盤上面推定コンター図(下)の比較 (文献<sup>17)</sup>に加筆)

ともわかった。加えて田圃南側の湧水多発部は、砂礫層上面深度が 25~50cm 程度の細長いマウンド状の埋没地形の直上に位置することがわかった。

湧水が発生した田圃内で 9 点、周辺を合わせ 15 点でサウンディング(SWS)調査が実施されている。図-24 下はそのデータから作成した基礎地盤上面標高コンター図である。田圃南側の基礎地盤の高まりをかりうじて捉えているものの、湧水多発部の原因を説明できる程度の空間解像度を有していない。基盤漏水やパイピングなどは複雑な基礎地盤構造に規制されて発生する現象であり、従来のボーリング調査やサウンディング手法ではそれらの原因構造を把握することが極めて困難であること、GPR 探査に代表される稠密物理探査によって、小スケールの不均質構造を把握できることを実証した。

つぎに、稠密統合物理探査断面と、ほぼ同じ位置の GPR 探査断面を比較する。図-25 は、田圃北端部 1P06/G131 測線の解析断面である。GPR 断面には堤防側(左端)で極浅所にまで上昇する基礎地盤層上面境界が明瞭に捉えられている。この境界は東に向かって沈降し、測線距離 40-45m 付近では比高 80cm 程度の土塁状地形が鮮明に捉えられている。

これまで土木研究所が実施してきた統合物理探査の測定条件では、測線方向に 10m 程度、深度方向にも数 m 程度の拡がりを持つ相対的に規模の大きな異常体を捉えることが限界であった。これに対し今回適用した稠密統合物理探査では、深さ 1m 以浅のより小規模な異常体を捉えられることができ、複雑な構造を有する基礎地盤の調査手法として活用できることが検証された。

GPR 探査をはじめとする稠密統合物理探査の結果から 3 次元の浅部基礎地盤構造をモデル化することができる。物理探査結果の 3 次元モデル化と 3D 表示は、石油資源探査など深部を対象とした分野ではすでに一般的な手順となっているが、浅部を対象とした地盤調査では研究開発が進んでいなかった。しかし CIM に代表される建設関連情報の 3 次元モデル化の取り

組みの急速な進展を受けて、浅部を対象とした物理探査分野でも導入開発が求められていた。そこで GPR 探査データを主とし、2 次元断面情報である稠密統合物理探査断面情報やスコープ画像情報などを統合して扱い、WEB 上で 3 次元表示するシステムを開発した<sup>2)</sup>。

その表示例を図-26 に示す。同図によって、複雑な構造を有する浅部堤防基礎地盤構造と漏水発生箇所の位置関係を空間的に理解することが容易となった。また稠密統合物理探査の相互の関連性の解釈評価にも有用である。

### 3. まとめ

この間技術開発と普及に取り組んできた河川堤防統合物理探査技術は、連続的断面情報に基づく堤防システム

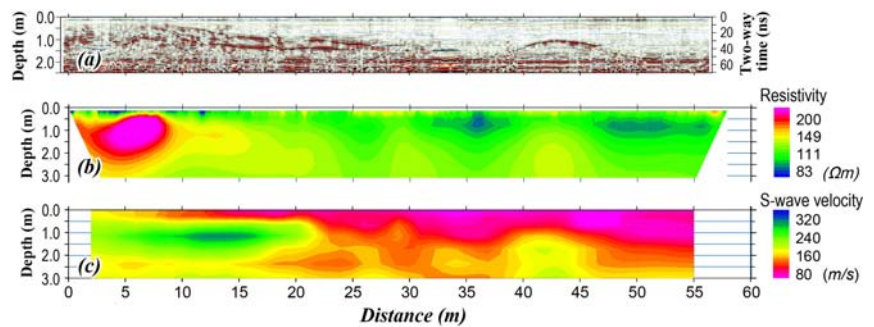


図-25 1P06 測線稠密統合物理探査結果断面および GPR 探査断面  
(a) : GPR 断面 ; (b): 比抵抗断面 ; (c): S 波速度断面  
(文献<sup>17)</sup> に加筆)

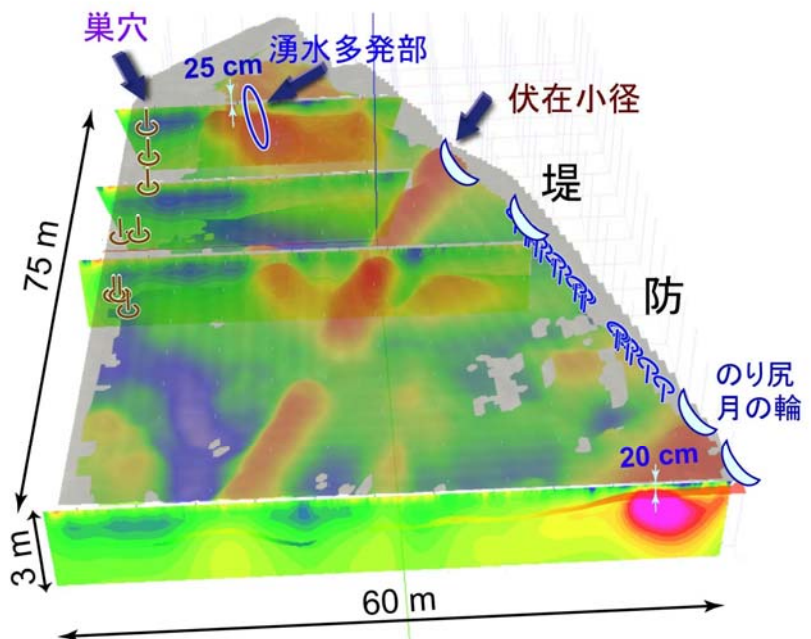


図-26 稠密統合物理探査結果の 3 次元モデル化と WEB3D 表示例  
(文献<sup>18)</sup> に加筆)



の安全性評価を可能にする唯一の手段として今後の堤防維持管理・健全度評価に重要な役割を果たすことが期待されている。一方で従来の土質調査データや詳細点検結果との不適合も指摘されている。これは原理的に統合物理探査が空間の平均物性を提供するのに対し、各種土質試験は限られた領域の局所物性を提供すること、そして土工構造物の典型である河川堤防は、本質的に不均質の度合いが大きいことによると考えられた。両者の関連性を明らかにするには、統合物理探査の時間的空間的解像度をより一層向上させることが必要となる。

統合物理探査が提供する情報は、比抵抗や S 波速度に代表されるような地盤の物理情報であり、浸透特性や耐震性、液状化強度などの工学的物性を評価するには両者の関係性を明らかにする必要がある。たとえば 2.2.1 項で示した 3D 比抵抗経時変化モニタリングで得られる情報は浸潤に伴う比抵抗の変化の程度であり、それを非定常不飽和透水係数に変換するには原位置透水試験を組み合わせて実施するか、あるいは室内試料試験等によって両者の関係を明らかにするとともに、それを説明できる土質物理モデルを構築することが必要とされる。次期中期計画期間中に予定している研究では、これらを研究開発目標に設定するとともに、より小さなスケールの不均質構造に支配されると考えられるパイピングやのりすべりに関わる現場計測手法を考案開発し、危険度評価へ反映するための調査研究の実施を計画している。

## 参考文献

- Inazaki, T. (2013): Recent advances in the near-surface geophysics for the detailed structural imaging and the geotechnical characterization, *Proceedings of 2013 International Joint Symposium among CERI, NIRE and IEGS*, CD-ROM, 8p.
- 稲崎富士(2015): 舗装・盛土の内部物性構造を可視化する—非接触・非破壊計測技術の開発—, 平成27年度土木研究所講演会講演集, 21-32, 土木研究所
- 土木研究所・物理探査学会(編) (2013): 河川堤防の統合物理探査—安全性評価への適用の手引き—, 120p, 愛智出版.
- 稲崎 富士, 太田 陽子, 丸山 茂徳 (2014): 400年を越えて続いた日本史上最大最長の土木事業—関東平野における河川改修事業を規制したテクニクな制約—, 地学雑誌, 123(4), 401-433.
- 豊原裕子 (2013): 統合物理探査結果と地質調査の検討, 関東地方整備局, 平成25年度スキルアップセミナー関東, 6p.
- 稲崎 富士, 今里 武彦, 岡本 信之, 石山 博 (2012): 東日本大震災被災堤防における小規模3D電気探査, 物理探査学会第126回学術講演会講演論文集, 216-219.
- Inazaki, T. (2013): Ground truthing for the verification of integrated geophysical surveying for the safety assessment of levee systems, *Proceedings of the 26th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2013)*, 6p
- 稲崎富士 (2014): 開削部詳細調査に基づく堤体材料特性と物理探査測定データの関連性について, 第130回物理探査学会学術講演会講演論文集, 247-250.
- 稲崎富士, 木佐貫 寛, 青池邦夫 (2016): 統合物理探査による河川堤防基礎地盤効能のイメージング, 物理探査学会第134回学術講演会講演論文集, 39-42.
- 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.
- 稲崎 富士 (2011): 物理探査による東日本大震災被災堤防区間の物性的特徴, 物理探査学会第125回学術講演会講演論文集, 17-20
- 稲崎富士(2016): 統合物理探査による河川堤防内部物性構造の長期モニタリング, 物理探査学会第134回学術講演会講演論文集, 43-46.
- 稲崎富士・坂西 啓一郎・今村 杉夫(2015): 実堤防における不飽和帯浸透過程の比抵抗経時変化モニタリング, 物理探査学会第132回学術講演会講演論文集, 79-82.
- Inazaki, T. (2016): Contributions of near surface geophysics to the understanding of spatial heterogeneous levee systems, *Summit on Dams and Levees, Workshop Proceedings of the 29th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2016)*, 5p.
- 林 宏一・稲崎富士・北尾 馨・北 高穂 (2013): 河川堤防におけるS波速度と比抵抗のクロスプロットを用いた土質の統計的な推定, 物理探査学会第128回学術講演会講演論文集, 174-177.
- 林 宏一・稲崎富士・北尾 馨・北 高穂 (2013): 河川堤防の安全評価のための統合物理探査のデータベース, 物理探査学会第128回学術講演会講演論文集, 170-173.
- 青池邦夫・稲崎富士・金子正洋(2015): 詳細物理探査による河川堤防漏水箇所の浅部地盤構造調査, 物理探査学会第132回学術講演会講演論文集, 67-70.
- Inazaki, T., Aoike, K., and Kaneko, M. (2016): Detailed geophysical imaging of the shallow surfaces at an underseepage site behind a levee, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2016)*, 6p.

## Research on the seepage and seismic vulnerability assessment of levee systems by means of integrated geophysical surveying

**Budget** : Grants for operating expenses  
General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Geology and Geotechnical  
Engineering Research Group

**Author** : KANEKO Masahiro, INAZAKI Tomio

**Abstract:** Integrated geophysical surveying developed and proposed by PWRI has been playing an important role for the vulnerability assessment of levee systems in Japan. Actually, the surveying has been applied to a total of 700 km long levee sections, including 150 km long urgent safety surveys for the levees attacked by the 2011 East Japan Earthquake in the Kanto Plain, and 50 km long research phase surveying conducted by ourselves. Characteristic features of the technique are in combination of seismic and electrical methods, in multi-stage application of geophysical surveying, and in joint inversion of geophysical survey results with reference to geotechnical data. The geophysical properties evaluated by these methods, S-wave velocity and resistivity, are used to evaluate permeability, stiffness and seismic resistance. Levee system, a typical man-made earthen structure, is featured by strong inhomogeneity as small as a few tens of meters. The inhomogeneities or small scaled local anomalies would affect the vulnerability potential of levee system. Regretfully, conventional geotechnical surveying represented by boring could not have provided enough data to distinguish such local anomalies. In contrast, the integrated geophysical investigation, especially tuned for obtaining high-resolution data, can provide detailed and reliable information on internal heterogeneous structure of levee systems. To enhance resolution in not only space but also in time, we developed a high-speed multichannel DC resistivity measurement tool and utilized it to 3D time-lapse monitoring of water infiltration into the vadose zone of a levee. 3D GPR was also employed to identify the near surface structure around levee up to 3 m. We developed a Web3D display system for rendering 3D geophysical models. It was quite helpful to understand the near surfaces in and around levee systems comprehensively based on 3D geophysical data in combination with geotechnical data.

**Key words:** Integrated geophysical investigation, S-wave velocity, resistivity, infiltration characteristics in the vadose zone, 3D time-lapse monitoring.