

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

研究担当者：金子正洋、稲崎富士

【要旨】

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になっている。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。これまでの堤防の安全性評価は、数 100m 間隔でのボーリング調査と離散的に採取されたコア試料の土質分析、あるいは数 100m 区間に数点の原位置試験結果に依拠しており、このような堤防の不均質性を把握評価するには空間分解能が決定的に不足していた。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、堤防内部の連続的物性構造断面を提供でき、縦断方向では数 10m オーダー、横断方向では数 m オーダーの不均質物性構造も捉えられることから今後の「切れ目のない」堤防安全性評価への適用が期待されている。

統合物理探査によって求められる堤防の内部物性情報は、基本的には S 波速度値と比抵抗値である。これらから堤防システムの浸透ないし地震に対する安全性を評価する場合、透水係数などの浸透特性示標に変換し、その分布構造をモデル化して数値解析することが求められる。その技術開発の第一段階として、堤防開削面において稠密な統合物理探査を実施し、開削面から採取した堤体材料の土質特性との関連性について検討した。また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について、実堤防での調査実験を通じて探査装置の開発を含めた測定技術の開発・確立を推進した。それらの結果、統合物理探査によって求められる物性値が土質特性とよい相関性を有していること、また 1m 程度以下の不均質異常構造を稠密統合物理探査によって把握できること、さらに高速比抵抗探査装置を用いた経時変化モニタリングによって、堤体表層不飽和帯内での空間的な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、を明らかにすることができた。

キーワード：統合物理探査，稠密探査，高速比抵抗探査，3D 経時変化モニタリング。

1. はじめに

河川堤防は人工的に構築された連続的盛土構造物の典型であり、さらに繰り返し改築されてきた歴史的構造物であるという特徴を有している。住民の安全と資産を洪水氾濫被害から守ることを本来的な目的としている堤防システムは、計画高水位以下の水位の流水条件下で安全性が確保・維持されることが求められる。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危険性がある。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「最少律」の考え方が採用されるべきである。2012 年矢部川破堤などの最近の非越流型防破堤事例は、局所的な不均質構造が堤防システムの安全性を支配する主要な要因であることを端的に示している。

堤防システム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は本来的に不均質であり、横断方向には数 m のオーダーで、縦断方向にも数 10m オーダーで材料構成が異なることが明らかになってきている。堤防横断樋管の撤去新設に伴う堤防開削断面において、堤防が累帯構造を呈し、様々な地盤材料で構成されていることがしばしば観察される。さらに従来標準貫入試験ボーリングで採取された試料に対する土質試験結果も、ばらつきが大きく代表値としては使用に耐えないことがわかってきた。このことは、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樣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を意味している。線形構造物である河川堤防の内部物性情報を連続的に取得し、それから堤防システムの安全性を連続的に評価することが可能な手法を開発・適用することが喫緊の技術的課題となっていた。

河川堤防内部の不均質構造や基礎地盤の物性を効率的に把握することが可能な調査手法を開発し、現行の堤防安全照査体系に組み込むことができれば、河川堤防の質的整備をより効率的に推進することが可能になる。非破壊調査の一つである物理探査は、地盤内部構造をイメージングする基本技術であり、地盤工学分野にも広く活用されてきている。この物理探査の手法を活用すれば河川堤防の弱点箇所を効率的に検出できると期待されていた。そこで土木研究所では、いくつかの物理探査手法を組み合わせることで河川堤防内部構造探査に適用する「統合物理探査技術」の開発と実用化を推進し、堤防縦断方向に存在する数 10m 規模の異常部を検出することが可能であることを明らかにしてきた¹⁾。また堤防開削部において事前に統合物理探査を実施し、さらに開削後の堤体および基礎地盤部で詳細な比抵抗探査と表面波探査等を実施するとともに採取試料の物性を計測して比較検証することで、統合物理探査結果に基づいて堤防の透水特性等を評価する指標の確度向上を図ってきた²⁾。これまでの検討の結果、構成要素技術としてランドストリーマーを用いた高精度表面波探査と、牽引式比抵抗探査あるいはスリングラム電磁探査を組み合わせた統合物理探査が効果的であること、堤体および基礎地盤の S 波速度構造と比抵抗構造が、透水係数や土質特性などと相関性を有していること、その相関性に基づいて区分値を設定し、浸透に対する弱点箇所を抽出する手順を構築してきた^{3),4)}。

統合物理探査結果から堤防システムの内部不均質

構造を把握し、安全性を評価する場合、適用する探査によってイメージングされた物性構造が実際の構造をどの程度的確に反映しているかを検証する“Ground truthing”という手順を経ることが不可欠である⁵⁾。堤防システムが有する不均質性の影響は、統合物理探査と従来の地盤調査手法とでは異なっていると考えられる。たとえば統合物理探査が提供する物性値は、縦断方向数 m×横断方向 1m×深度方向 1m 程度の直方体(ボックス)の平均的な物性値の空間的連続体であるのに対し、標準貫入試験値は深さ方向 30cm、径 4cm の微小領域の物性を反映した値に過ぎない。原位置透水試験値も深さ方向 50cm、径 76mm の試験孔の周辺 10cm 程度以下の領域の透水特性に支配される局所物性値として扱うべきである。それらを特定の延長区間に対する代表値として取り扱うことを可能にするためには、上述の“Ground truthing”とは逆の過程、すなわち物理探査等の連続的空間情報に基づく空間的補間が不可欠なのである。

これらの技術的課題に関連して、26 年度は堤防システムの極表層の物性構造を詳細稠密に把握する手法の確立を目途とした地中レーダ (GPR) 探査および稠密統合物理探査の現地適用検討を試みた。さらに昨年度に引き続き、高速比抵抗探査システム⁵⁾を用いた堤体表層不飽和帯への降雨浸透過程をリアルタイムでモニタリングする手法の適用性を検討した。以下にその成果概要を記す。

2. 現地統合物理探査

2.1 現地統合物理探査の概要

平成 26 年度には、表-1 に示す 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実施した。

表-1 26 年度に実施した現地統合物理探査計測箇所と検討探査・現地計測技術

河川系	堤防箇所	実施時期	区間長	適用探査手法・現地計測技術(太字は 25 年度焦点検討手法)
阿賀川	樋管撤去開削予定箇所	H26/09 H27/01	250 m	統合物理探査, 比抵抗トモグラフィ , S 波トモグラフィ , SH 波反射法探査
小貝川	東日本大震災被災後修復箇所	H26/09	1.9k m	統合物理探査による長期変動把握
木曾川	樋管撤去開削予定箇所	H26/10	50 m 3.5x 11.5m	統合物理探査, 比抵抗トモグラフィ , S 波トモグラフィ , 3D 比抵抗経時変化モニタリング
小貝川	高水時漏水区間	H26/11 H26/12	60x 100m	GPR , 稠密統合物理探査
揖斐川	地盤改良区間	H27/01	200km	統合物理探査
揖斐川	左岸 16.2K 附近	H27/01	2 m	統合物理探査, ハイブリッド表面波探査

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 26 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が、本成果報告ではそのうち運営費交付金によって遂行した現地探査適用研究の結果を以下に示す。なお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。

表-1 木曽川堤防樋管撤去区間における現地探査項目および測定条件⁶⁾

測線/探査項目	測定条件
縦断測線	L=47.5 m
表面波探査	1m 間隔 48 点
直流比抵抗探査	0.5 m 間隔 96 点
横断測線	L=25 m
比抵抗トモグラフィ	0.5 m 間隔 48 点
S 波トモグラフィ	1 m 間隔 26 点
3D 測線	W3.5m×L11.5m
経時変化モニタリング	0.5m 間隔 8 測線 44 回/2 日間

2.2 木曽川堤防樋管撤去区間における統合物理探査

木曽川左岸側において農水省管轄の宮田導水路の改修に伴う堤防開削が予定されていた二線堤防区間で、各種物理探査の適用性を検討するための計測実験を実施した。探査測線配置を図-1 に、各測線の測定条件等を表-1 に示す。撤去予定の樋管と交差するように堤防縦断測線を堤防天端の川表側のり肩部に設置した。また小規模な横断測線を配置し、比抵抗および SH 波トモグラフィ探査を実施した。縦断測線の表面波探査における地震計/発振間隔は 1m、直流比抵抗探査における電極間隔は 0.5m とした。また横断測線の地震計間隔は 1m、電極間隔は 0.5m に設定した。これに加え縦断測線起点側の天端端から川表側堤防のり部にかけて延長 11.5m の横断方向測線を 8 本配列し、3D 比抵抗経時変化計測を実施した。この探査では、天端部に溝を掘って堤体に注水し、降雨を模した注入水の堤体内部への浸透過程のイメージングを試みた(図-2)。

横断測線のトモグラフィ探査解析断面を図-3 に示す。手法評価のために、現地計測・データ取得からトモグラフィ解析処理に至る一連の過程を直営で実施した。同図に示されるように、堤防のり表層部は低 S 波速度かつ高比抵抗で特徴づけられる。この地域では当該測定の前日に日雨量 80mm を越える大雨が観測されているが、のり表面は乾燥してい

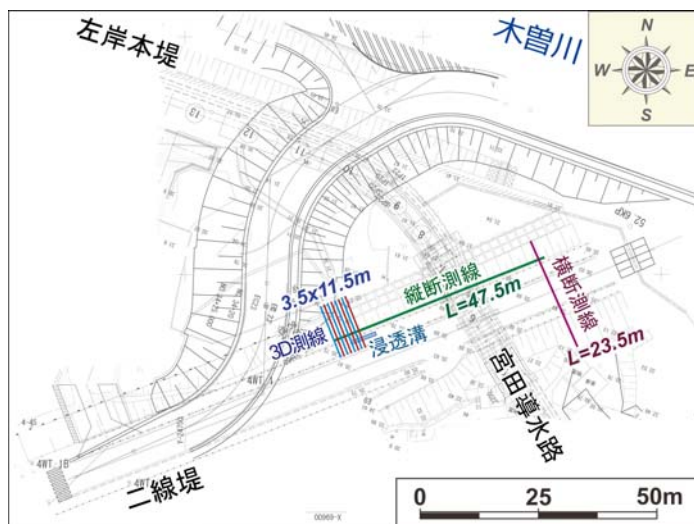


図-1 木曽川堤防樋管撤去区間における探査測線配置図⁶⁾

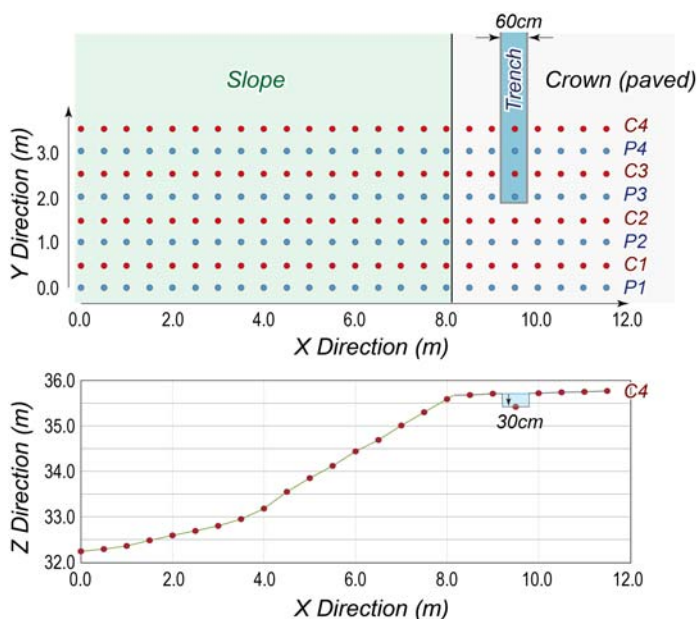


図-2 3D 比抵抗経時変化計測測線配置図⁶⁾

た。このことは表層部の透水性が大きいことを示唆している。一方天端舗装道路下の堤体内部は中 S 波速度かつ低比抵抗で特徴づけられる。堤体盛土部が締まった粗粒材料で構成され、かつ湿潤状態であることが推定された。

3D 比抵抗経時変化計測では、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、その溝内に注水した水が表層部堤体内に浸透する過程を、比抵抗変化としてイメージングした。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。なお注入開始後 25 時間経過した時点からは注入水を溢水させ、測線を展開した川表側のり表面を流下するように制御した。この注水浸透間に初期状態を含めて 44 次をわたって 3D 測線配置で比抵抗を計測した。注水状況およびモニタリング実施ステージを図-4 に示す。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-5 は、初期状態 (BG02) を基準として、比抵抗の変化率を差分インバージョンによって求めた結果を時系列的に並べたものである。3D 比抵抗差分インバージョンには AGI 社の EarthImager3D を使用し、まず初期モデルを求めた後に基準値以下の不良データを除去し、次に再解析して最終解とした。なお各々のイ繰り返し計算回数は 8 回、除外データは約 5% 程度以下、収束時の RMS 誤差は 2% 以下、L2 ノルム

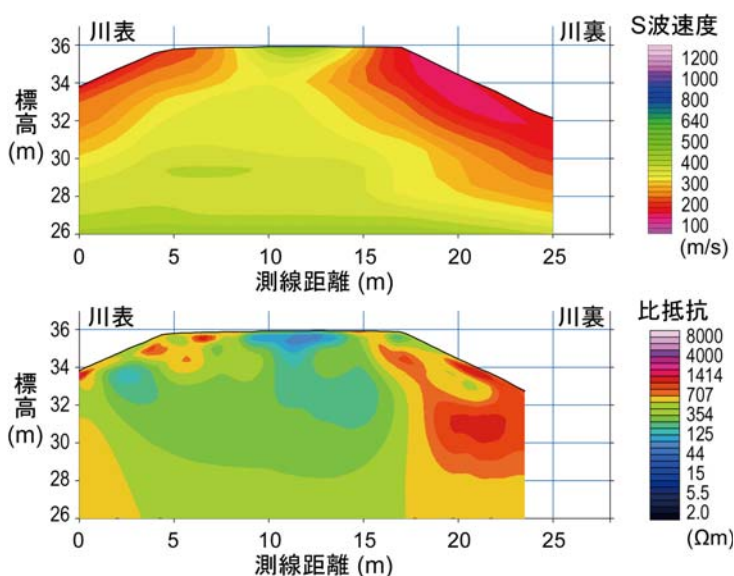


図-3 横断測線トモグラフィ探索結果断面
(上) : SH 波速度断面 ; (下) : 比抵抗断面

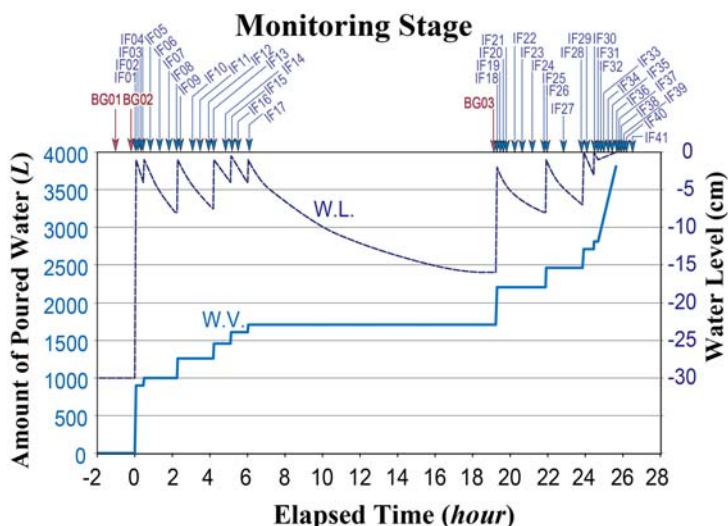


図-4 天端溝注水量およびモニタリングステージ⁶⁾

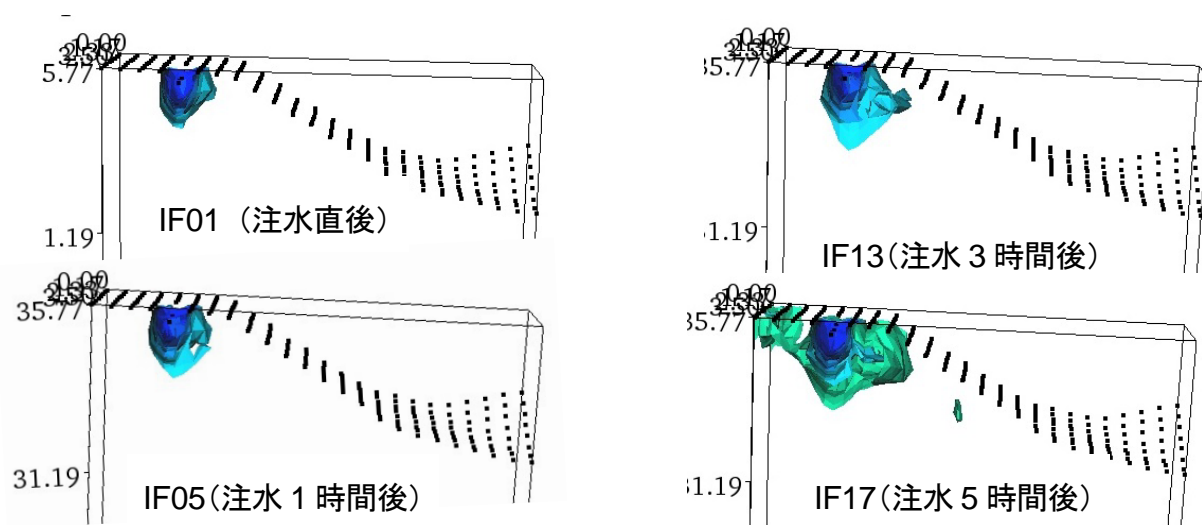


図-5 注水による比抵抗変化領域の時空間的拡大 (-12%~-30%の 4 面表示)⁶⁾

値は 0.5 程度に収束した。最終解の取得に要した計算時間は、Windows8.1 64bit core i7 PC で概ね 30 分程度であった。これらの計算処理示標も結果断面の信頼性を評価する重要な示標であり、直営で測定から処理解析まで実施することにより、高品質で信頼性の高い成果を得ることができた。

図-5 には、注水によって堤体表層部の不飽和帯が湿潤し、比抵抗値が相対的に低下したゾーンが注入溝から下方とりの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、従来の半球を前提とした原位置不飽和透水試験の妥当性を評価できる可能性があることも明らかになった。今後、不飽和材料の湿潤状態すなわち体積含水率と比抵抗変化率との関係の実験的検討および原位置不飽和透水試験過程の 3D 比抵抗モニタリングによる浸潤領域のイメージングの課題に取り組む予定である。

2.3 稠密統合物理探査による堤防漏水箇所の浅部地盤調査

平成 26 年 10 月 6 日に関東地方を通過した台風 18 号によって、茨城県つくば市では 24 時間降水量 226mm の大雨を観測した。この大雨により小貝川の水位が上昇し、左岸堤防 54.6k 付近の川裏側法尻部および堤内地盤（水田内）で漏水が発生した。図-6 (a) は下館河川事務所による痕跡水位の調査結果をもとに、漏水箇所周辺の浸水域を再現したものである。Google Earth の画像および関東地方整備局河川部が作成した 2m メッシュの DSM データを使用し、浸水範囲を水位に応じて青～白色で着色し鳥瞰図表示している。樋管横断部の川裏側田圃 2 面で浸水深が大きくなっていることがわかるが、このうち北側の田圃内と堤脚部畦畔で漏水・湧水が発生した。このうち堤脚部の相対的大規模漏水箇所では月の輪工が構築された。特徴的であるのは田圃内での湧水で、これは河川管理用の監視カメラ映像でも一列の湧出波紋として記録されている（同図 (b)）。しかしこの列状の湧水は、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

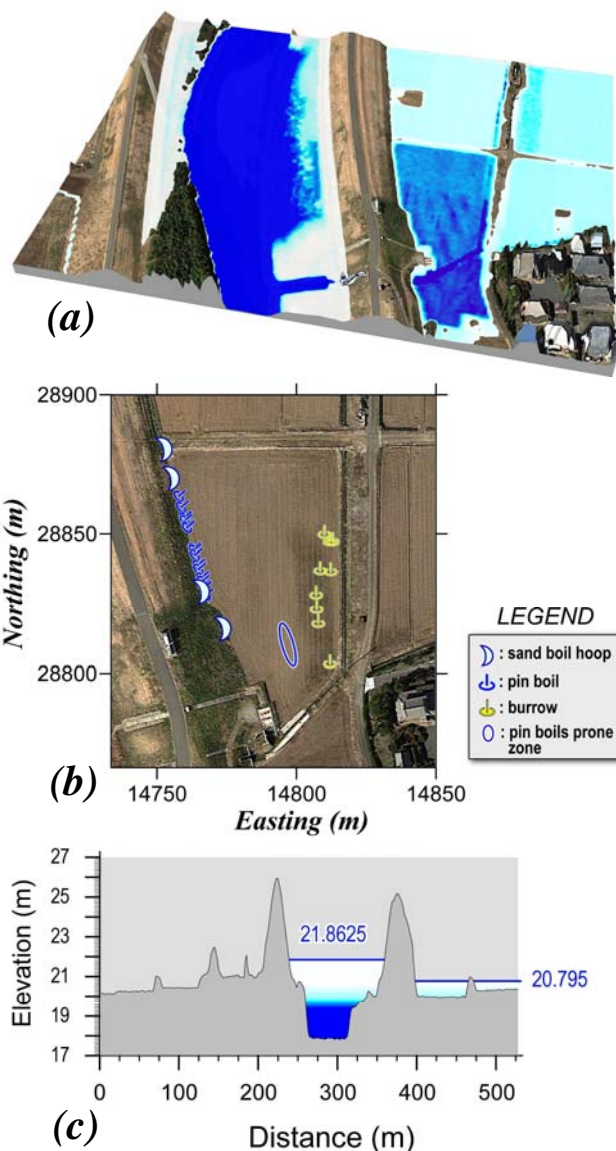


図-6 堤防漏水箇所の漏水状況。
(a): 浸水域鳥瞰図（痕跡水位より推定）
(b): 漏湧水箇所分布
(c): 漏水箇所東西横断面図

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は、堤防川表側からの距離が 60m 程度以上あり、水位差約 1m（同図(c)）から計算される動水勾配は極めて小さな値となる。河川事務所による被災後の緊急調査等によって、漏水箇所周辺には厚層 4m 程度の砂礫層の存在が確認されているが、その透水係数は 1.5×10^{-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⁷⁾。

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 $\pm 2\text{cm}$ 、 1cm ピッチでの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。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。

GPR 探査によって求めた砂礫層上面標高分布および稠密統合物理探査測線を図-7 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 35cm 程度に頂部を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、その形状から古い時代の堤防ないし古道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、砂礫層が浅部に出現する部分に位置することもわかった。加えて田圃南側の湧水多発部は、砂礫層上面深度が 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。

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-8 は、田圃中央部 1P03/G006 測線の解析断面である。GPR 断面には 2 箇所で台形の土塁状地形が鮮明に捉えられているが、比抵抗探査断面(同図(b))にも同位置に高比抵抗異常が捉えられている。さらに S 波速度断面(同図(c))でも、と当該箇所は相対的高 S 波速度部としてイメージされている。図-9 に示した田圃南側 1P01/G125 測線断面にも田面直下に埋没する埋没地形が明瞭に捉えられている。湧水多発部は、測線距離で $15\sim 20\text{m}$ 付近にあたるが、この部分では高比抵抗・高 S 波速度体が極浅部にまで進展しており、この異常体が田圃内湧水の浸透通過層となっていたと解釈することができる。

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

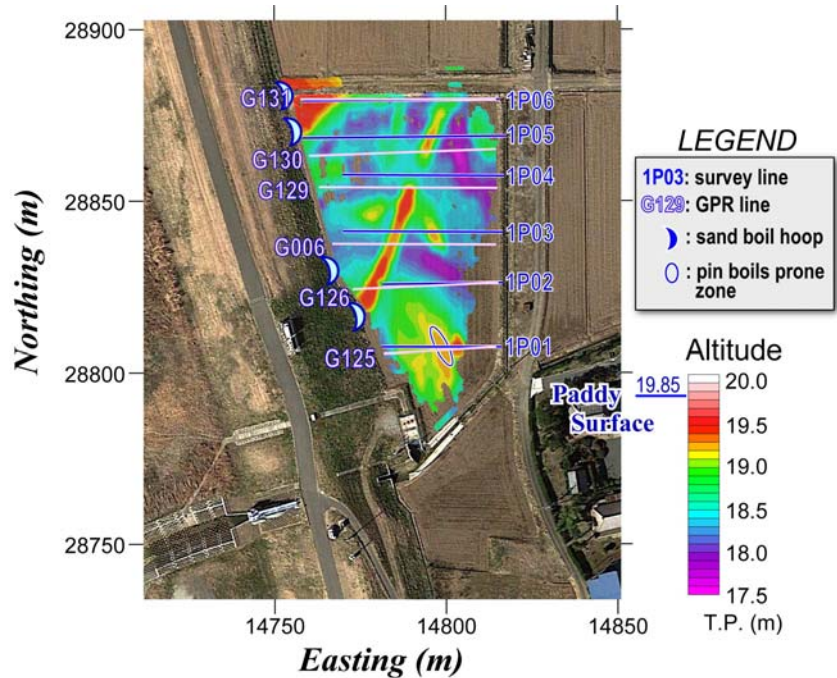


図-7 GPR 探査で求めた漏水発生田圃内砂礫層上面標高および稠密統合物理探査測線配置図。

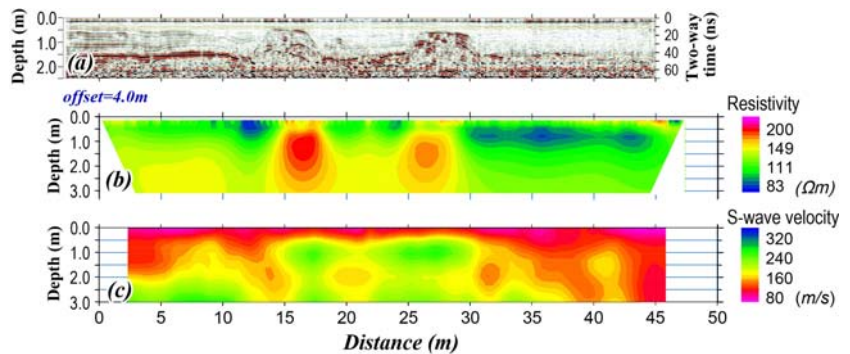


図-8 1P03 測線稠密統合物理探査結果断面および GPR 探査断面 (a): GPR 断面 ; (b): 比抵抗断面 ; (c): S 波速度断面

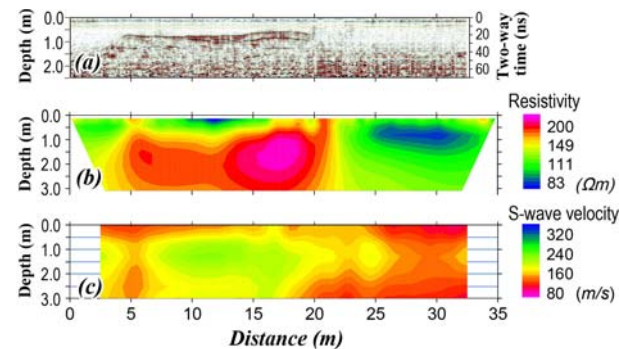


図-9 1P01 測線稠密統合物理探査結果断面および GPR 探査断面 (a): GPR 断面 ; (b): 比抵抗断面 ; (c): S 波速度断面

以浅のより小規模な異常体を捉えられることがわかった。

探査を実施したこの堤防区間では、堤防直下の砂礫層は捉えることができたものの、現場測定透水係数は、小さな導水勾配条件下での漏水発生を説明することが困難であり、ダルシー則が適用できない「水みち」、パイピングにより漏水が発生したと考えられる。稠密統合物理探査によっても、径5cm程度以下と想定される水みちそのものを捉えることは困難であるが、水みち・パイピングを形成する可能性の高い部分を高ポテンシャルゾーンとして把握することは可能であり、現地での詳細な調査・対策工への有用な情報を適用できると期待される。

2.4 堤体材料特性と物理探査測定データの関連性の統計的検討

統合物理探査の空間的解像度は、上述のように標準的な測定条件下では測線方向・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となる。

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⁸⁾。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。ただし従来の粒度分析法(JIS A-1204)は、分析間隔が粗く、

また等間隔補間処理を施さないために分析結果を加積曲線でしか表せないという重大な欠陥があり、さらに分析後の試料保管に関する基準がなく、通常では分析試料は破棄されトレーサビリティが確保されないという、分析手法としては致命的な欠陥も有していた。そこで、ふるい試験の間隔を密にするとともに細粒分はレーザー回折・散乱分析装置を用いて分析し、両者の結果を併せることでこれらの問題を解決し、分析後の試料も回収保存する、稠密かつ高品質な粒度分析法⁹⁾を適用した。

現地測定物理探査データのうち、点データとして試料分析結果との対比が容易な見かけ比抵抗値と、各種土質特性との関係を図-10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(a)は、見かけ比抵抗と20%粒径(D20)との関係を示す。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。同図にはこれまで提示してきた近似直線が重ね書きされている。なおこの図では右上にプロットされるデータほど含水率が低く、反対に左下(低比抵抗かつ低D20)ほど含水率が高くなるという、これまでも確認されている関係が表れている。この関係は同図(c)に示した見かけ比抵抗と細粒分含有率(Fc)との相関図にも明瞭に認めることができ、一見すると比

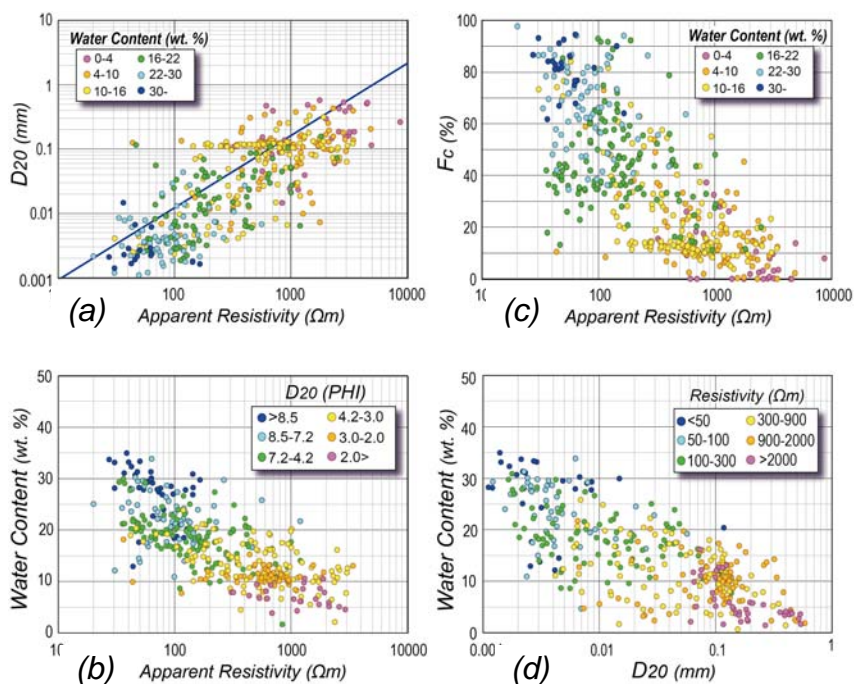


図-10 堤体材料の土質特性と比抵抗値との関係⁸⁾

(a) 比抵抗とD20, (b) 比抵抗と重量含水率, (c) 比抵抗とFc, (d) D20と重量含水率。

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。実際、同図(b)に示すように見かけ比抵抗は含水率と負の相関を示す。しかし未固結土質材料においては、含水率と20%粒径あるいは細粒分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。したがって、見かけ比抵抗値から20%粒径、ないし透水係数を推定する経験式は依然として有効であると結論することができる。

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¹⁰⁾。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。

平成27年度は、その技術的課題検討の一環として、まず高速比抵抗探査装置を用いた堤防不飽和帯への水の浸透過程の3D経時変化モニタリングを実施した。その結果、浸潤前線の3次元的な形状とその時間変化を詳細に把握できることがわかった。堤防不飽和帯での水の挙動は、これまで不攪乱で詳細に把握する方法がなかった。高速比抵抗探査によって4次元での不飽和浸透過程の解明が可能となり、今後の定量的モデル解析への貢献が期待される。

土木研究所近傍を流れる小貝川の堤防で、台風通過時の大雨の影響で堤防漏水が発生した。この漏水には川裏側地盤の不均質構造が起因していると疑われたが、従来のボーリングやサウンディングを主体とする地盤調査では、原因となる不均質地盤構造を捉えることができなかった。そこで土木研究所において稠密統合物理探査を適用した。その結果、表層3m以浅の詳細な地盤構造を捉えることができ、漏水発生箇所は砂礫層が極浅所に分布していることを把握することができた。従来の統合物理探査技術の測定条件を工夫し、さらにGPR探査を組み合わせることで、漏水に関わる不均質

地盤構造を捉えることが可能であることが実証され、今後の被災箇所での原因調査等への活用が期待される。

統合物理探査が提供する物性データと従来の地盤調査データとの不適合問題を検証することを目的として、堤防開削面上の同一箇所でも詳細統合物理探査と試料採取・土質試験を実施し、両者の関連性について統計的に検討した。その結果比抵抗値と土質特性とは明瞭な相関性を有すること、とくに不飽和堤体材料では粒度特性を反映することが確認された。このことは統合物理探査データから不飽和帯の透水特性を推定することの方法論的妥当性を裏付けるものである。今後直接的に不飽和帯と透水係数を推定する方法を検討する予定である。またS波速度と土質特性との関連性についての検討の深化も求められる。

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(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.
- 3) 稲崎富士・林 宏一・河川堤防の統合物理探査適用委員会(2010):河川堤防調査への統合物理探査の活用,地盤工学会誌,Vol. 58, No. 8, 34-37.
- 4) 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.
- 5) 今村杉夫・稲崎富士・北 高徳・坂西啓一郎(2013):符号分割多点同時通電による高速比抵抗探査装置の開発と適用,物理探査学会第128回学術講演会講演論文集,203-206.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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,物理探査学会第130回学術講演会講演論文集,247-250.
- 9) 稲崎富士(2012):液状化サイト採取コア試料の堆積学的特徴評価,第22回環境地質学シンポジウム講演論文集,155-160.
- 10) 関東地方整備局(2012):統合物理探査の今後の河川堤防調査に資する知見,29p. http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000075195.pdf (2015.06.25 cited)

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

Budgeted : 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 the author has begun to be utilized as the vulnerability assessment of levee systems in Japan. 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 is featured as inherently inhomogeneous because of its man-made structure but also of historical structure repeatedly restored. The inhomogeneity would affect both integrated geophysical survey results and geotechnical survey data mainly provided by drilling. To provide more reliable geophysical data emulative to the geotechnical data, it is needful to enhance both time and spatial resolution of geophysical data. We then proposed and tested the following newly proposed techniques, that is, 3D time-lapse monitoring of water infiltration into the vadose zone of a levee using a high-speed DC resistivity measurement tool, dense integrated geophysical surveying composed of GPR, surface wave survey method, and DC resistivity method for delineating 3D near-surface geology up to 3 m at an underseepage site. Accordingly, it was demonstrated that high-speed DC resistivity measurement was quite helpful to estimate permeability characteristics of the vadose zone in a levee body. We also investigated the relationship between soil characteristics and geophysical properties measured and sampled at excavation sites of levee systems. As a result, clear relationships were identified between resistivities and the specific grain size characteristics.

Key words: Integrated geophysical investigation, dense geophysical survey, high-speed DC resistivity measurement, 3D time-lapse monitoring.