

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：稲崎富士

【要旨】

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。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」を開発し、その実用化を推進してきた。統合物理探査によって、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。また堤防開削部において事前に実施した統合物理探査結果と開削後の堤体および基礎地盤部で実施した詳細な比抵抗探査と表面波探査等の結果を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性を評価する指標の確度向上を図ってきた。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。

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ことから、その内部構造は本来的に不均質である。開削面調査計測結果や既往のボーリング調査結果も、そのような不均質性を反映したものとなっている。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不均質構造をどの程度の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。そこで本研究では、堤防システムの縦横断方向の 2 次元断面構造をイメージングする統合物理探査の要素技術として、新たにハイブリッド表面波探査技術、高速比抵抗探査技術を考案開発するとともに、地中レーダ (GPR) を加え、それらの適用性を現地で検証した。またこれまでに実施した開削面調査計測結果を再解析し、計測調査手法の確立化を図るとともに堤防システムの不均質構造の規模や物性のばらつきについて検討を加えた。その結果、ハイブリッド表面波探査によって深さ 50m 程度までの物性断面を得られること、GPR によって堤体上部の粗粒材料分布域、護岸ブロック背面あるいは樋管函体背面の空洞の有無をイメージング可能であること、高速比抵抗探査によって堤体内部へ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が明らかになった。

キーワード：統合物理探査、ハイブリッド表面波探査、高速比抵抗探査、GPR、開削面調査計測

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されてい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、堤内地側の洪水氾濫被害は広範囲に及ぶ。したがって堤防の安全性評価にあたっては、最も弱い環

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。しかし堤防高が計画高水位に達していない、など外見でも容易に脆弱性を判定できる場合はまれであり、洪水負荷時の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 段階の安全性評価手順が採用されてきた。しかしこのような手順によって、的確

に堤防システムの弱点箇所を抽出し、安全性を確実に評価できているわけではなく、実際に「安全」と評価された区間で堤防被害が発生する事例も出来している。また既設樋管等の撤去に伴い開削された堤防内部の断面観察調査等によって、堤体の内部が極めて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た。さらに従来の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ない場合がある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可能性が指摘されていた。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

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性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。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は異なっていると考えられる。そこで本研究では、堤防システムの縦横断方向の 2 次元断面構造をイメージングする統合物理探査の要素技術として、新たにハイブリッド表面波探査技術、高速比抵抗探査技術を考案開発するとともに、地中レーダ (GPR) を加え、それらの適用性を現地で検証した。またこれまでに実施した開削面調査計測結果を再解析し、計測調査手法の確立化を図るとともに堤防システムの不均質構造の規模や物性のばらつきの程度について検討を加えた。その結果、ハイブリッド表面波探査によって、深さ 50m 程度までの物性断面を得られること、GPR によって堤体上部の粗粒材料分布域、護岸ブロック背面あるいは樋管函体背面の空洞の有無をイメ

表-1 25 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)
揖斐川	橋台設置工事開削箇所	H25/09 H25/12	400 m 10x8 m	統合物理探査, 比抵抗トモグラフィ , ハイブリッド表面波探査 , CPT/HPT/SCPT , 開削面調査計測・採取試料分析
木曾川	橋台設置工事開削箇所	H25/09	100 m	統合物理探査, ハイブリッド表面波探査 , 比抵抗トモグラフィ , 浸透過程比抵抗モニタリング
小貝川	樋管部ブロック護岸および内部	H25/08 H26/01	60 m	GPR
千歳川	右岸 23K 付近	H25/10	2.5 km	統合物理探査
城原川	右岸 8K 付近	H25/12	1.5 km	統合物理探査, ハイブリッド表面波探査 , GPR
丹野川	L1.2K 付近	H26/02	2 m	CPT/HPT/SCPT , 開削面調査計測・採取試料分析

ージング可能であること、高速比抵抗探査によって堤体内部へ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、高周波表面波探査によって開削面上でのS波速度測定が可能であること、が明らかになった。

2. 現地統合物理探査

2.1 現地統合物理探査の概要

平成25年度には、表-1に示す6河川の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。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について、新たに考案・適用検討した要素技術（表-1中の太字表記技術）に焦点を当てて以下に示す。なおこのほかに、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。

2.2 揖斐川堤防橋台設置開削区間における統合物理探査検証

岐阜県安八郡安八町西詰地先揖斐川左岸 40.0KP 付

近において、揖斐川新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、堤防天端縦断方向に約400mの測線を配置し、統合物理探査を実施した。さらに測線内の2地点で、堤防天端からサウンディング調査を実施した（図-1）。また開削箇所において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ている。サウンディング調査結果を含めた縦断測線の統合物理探査結果断面を図-2に、横断測線の比抵抗トモグラフィ探査断面を図-3に示すが、サウンディング結果からは堤体表層約1.5mが非常に硬硬であり新たに築層された最新期築堤であること、その下位に旧堤体が分布するが、その境界付近が物性の急変により空洞化していることが推定された。また統合物理探査結果は、堤体盛土部に相当する表層から10m程度までの物性構造が縦断方向に不均質であり、約200mの区間長に細分できることを示している。すなわち、河川距離程40.0KP付近より下流側は堤体下半部が相対的低S波速度、上半部が高S波速度を呈し、逆に比抵抗は上半部が高比抵抗、下半部が相対的低比抵抗を示す2層構造が特徴的である。これに対し40.0KP付近から40.2KP付近までの区間は、比抵抗は2層構造を有しているがS波速度は一般的な層構造を示さない。42.0KP付近から上流側は比抵抗構造のみ求められているが、下流側とは異なった構造を示すことがわかる。このように、縦断方向の統合物理探査断面が

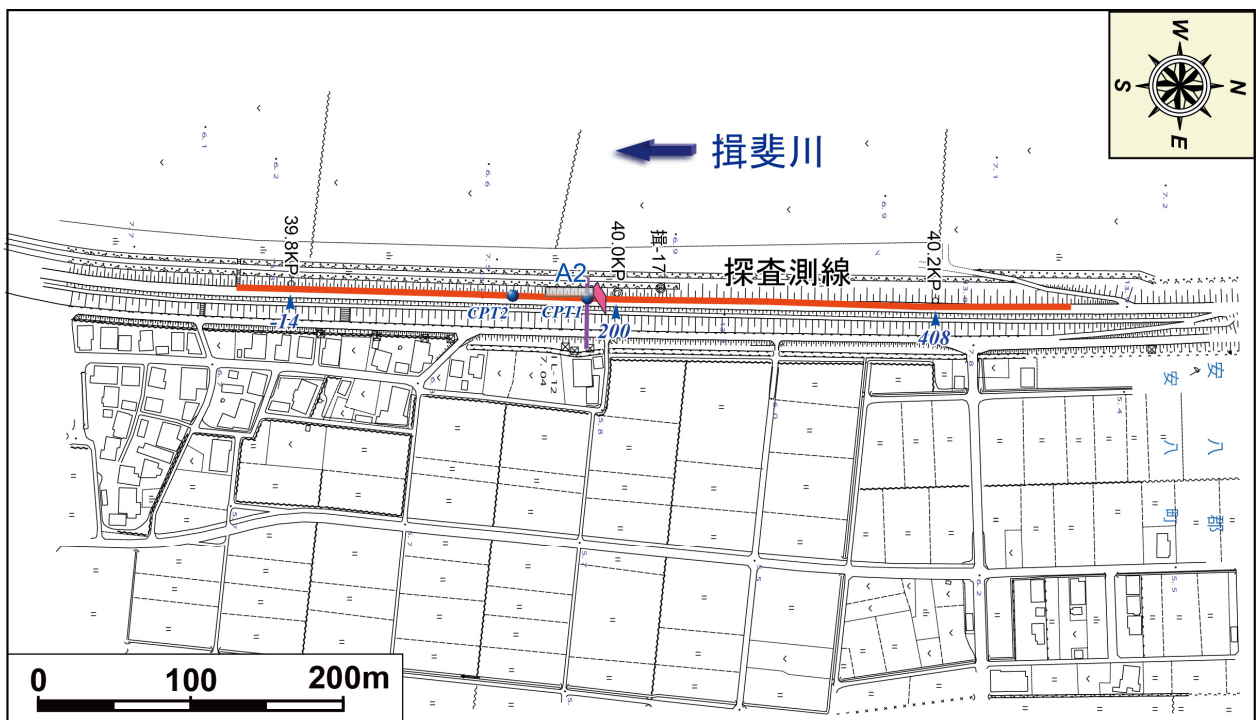


図-1 揖斐川堤防開削前縦断測線およびサウンディング計測位置図

ら、堤防内部の実際の不均質物性構造を基にした区間細分が可能である。

ところで図-2 上に示した S 波速度構造は、従来のランドストリーマー表面波探査に加えて受動式表面波探査の結果を合成したものである。両者を組み合わせることで、より深部までの構造把握が可能となった。ランドストリーマー表面波探査による探査深度は凡そ 15m 程度であり、堤防高が高い場合には基礎地盤部の構造把握が困難となるという弱点があり、堤防下に補助測線を設定するなどの対応を必要としていた。これに対し受動式表面波探査では、後述するように深さ 50m 程度までの構造を把

握することができ、天端に設定した単独の測線でも基礎地盤部の構造把握が可能であることがわかった。このように同一測線上で通常の表面波探査と受動式表面波探査を組み合わせることで、測定結果を合わせて解析する方法を新たに考案し、「ハイブリッド表面波探査」と名付けた。受動式表面波探査には、ランドストリーマー表面波探査とは異なる測定システムを用意する必要があるが、現場測定自体は単純であり、少数の要員でも実施可能である。なお図-2 および図-3 中には CPT/HPT で得られた貫入抵抗と比抵抗プロファイルを重ねて示してあるが、それらが統合物理探査断面と整合的であることがわかる。たとえ

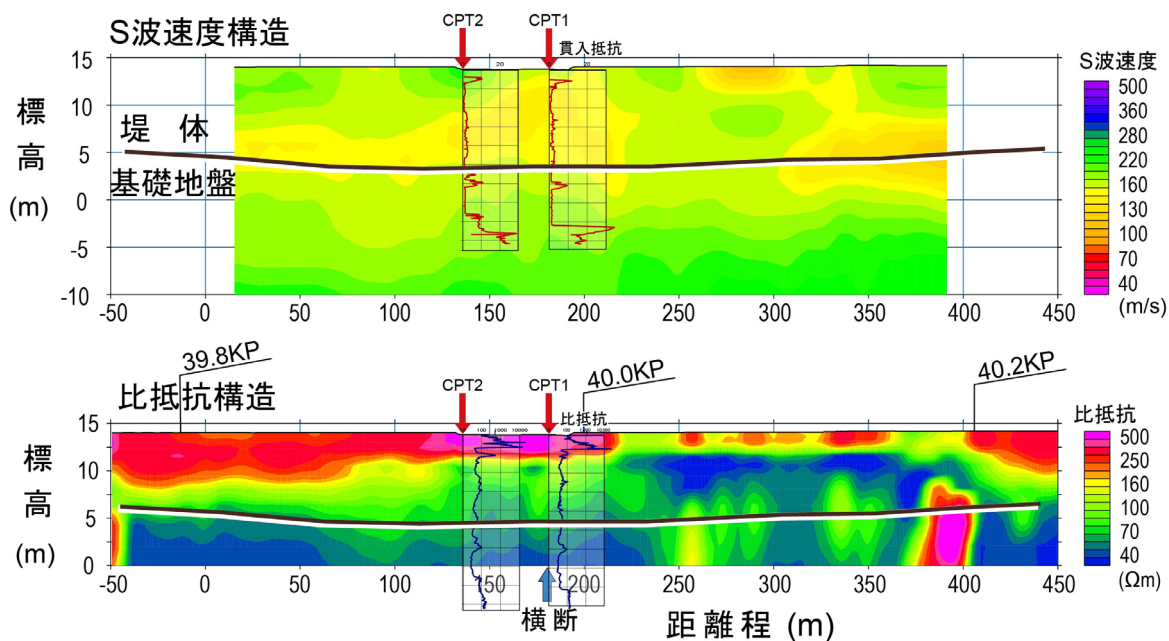


図-2 揖斐川堤防開削部縦断測線統合物理探査断面

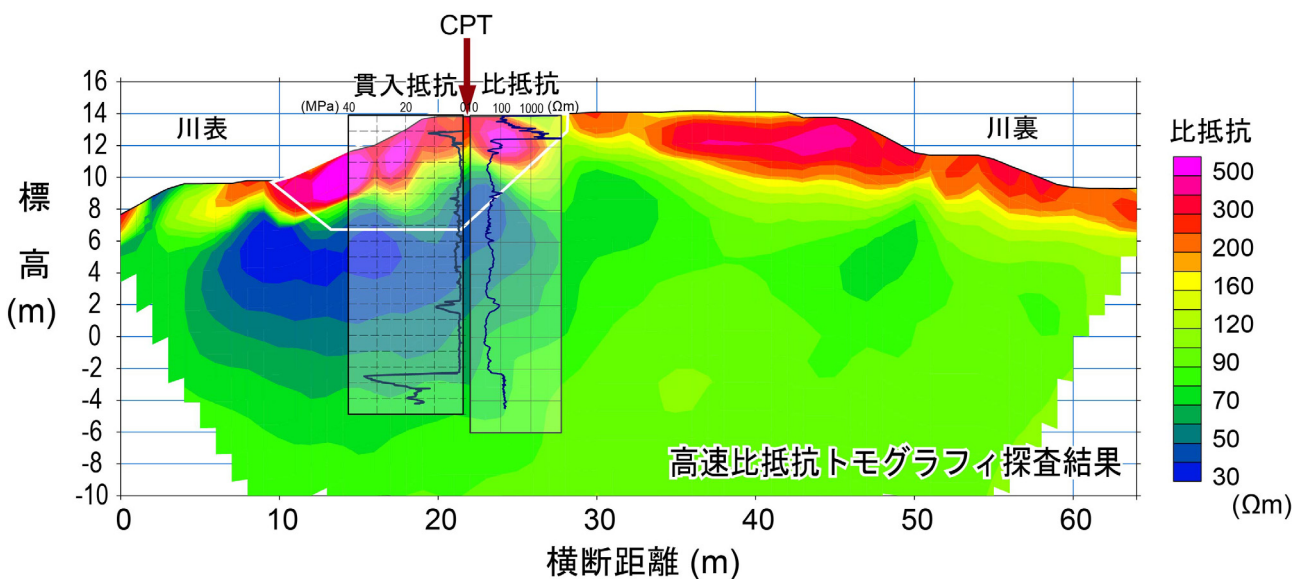


図-3 揖斐川堤防開削部横断測線比抵抗トモグラフィ探査断面

ば貫入抵抗値は表層部および標高-3m 以深で高い値を示すが、この部分は S 波速度値も大きくなっている。またサウンディングによる比抵抗プロファイルも地表からの比抵抗探査結果とよく一致している。この両者の調和的結果は図-3 の横断測線断面にも認められる。比抵抗トモグラフィ探査断面では、堤体表層部約 2m が極めて高い比抵抗値を示しているが、川裏側の高比抵抗体は橋台設置工事に伴い新たに腹付けされた盛土部に対応している。一方川面側の高比抵抗体は天端部で斜め下方に傾斜している。開削後の堤体内部観察により、この高比抵抗体は、粗粒材料からなる旧堤体の表層部であることがわかった。なお横断測線での比抵抗トモグラフィ探査は、電極の設置を含めて約 2 時間で測定することができた。詳細点検では一般に堤体部でのボーリング調査は 1 地点に限られ、堤体横断方向の不均質構造を把握することができない。これに対し比抵抗トモグラフィ探査では短時間にかつ安価に堤体内部構造を把握することが可能であることを改めて検証することができた。

図-4、図-5 はサウンディング計測結果プロファイルを示したものである。HPT (Hydraulic Profiling Test)は、プローブ側面から一定流量の水を地中に注入し、その注入圧を測定することにより、地盤の透水性の違いによる特性を計測するサウンディング手法である。このプローブには電気伝導度を計測するための電極が装備されており、電気的特性と透水特性の異なった側面から地盤の透水特性を推定することができる。一方 CPT (Cone Penetration Test) は、先端抵抗(qc)、間隙水圧(u)、周面摩擦(fs)を測定するセンサを内蔵した特定の規格のコーンを専用の

貫入装置を用いて定速で地中に貫入させ、基本的に鉛直方向の地盤の物性プロファイルを取得するサウンディングの一手法である。コーンの形状や測定方法に関しては国際的な規格が定められ、国内においても地盤工学会が「地盤工学会基準:電気式静的コーン貫入試験方法(JGS1435-2003)」を提唱している。我が国では標準貫入試験が地盤調査の主流となっているが、海外では連続的かつ多種類の物性を計測可能な本手法が重視されている。最近、土壌汚染調査や液状化地盤調査に広く利用されるようになってきている。近年では CPT の他に揮発性ガス成分の測定や透水特性を計測するプローブも利用されるようになり、それらを総称してダイレクトプッシュ技術と称されるようになってきている。

図-4に示すように、堤体表層部約 1.7m までは極めて

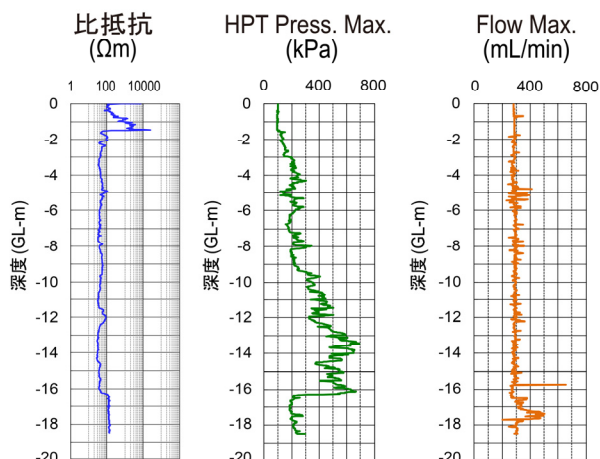


図-4 揖斐川堤防開削部天端実施 HPT1プロファイル

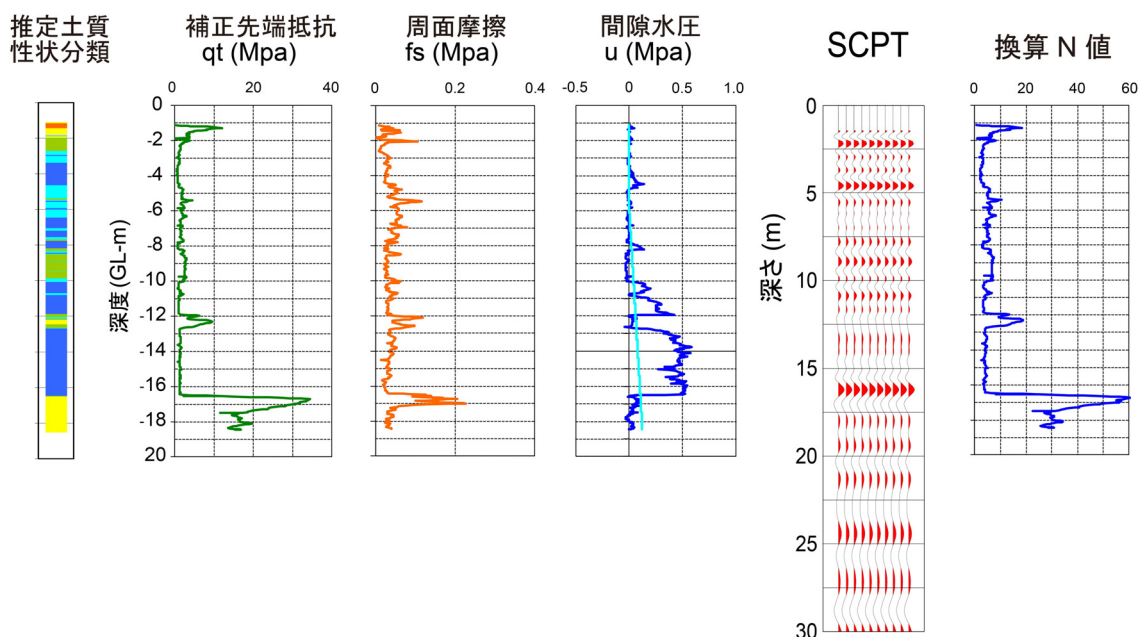


図-5 揖斐川堤防開削部天端実施 CPT1プロファイル

高い比抵抗値を示し、この部分が空隙の多い粗粒の材料で構成されていることが推定された。注入圧は深さ 16m 付近まで増大するが、その直下で急激に低下する。この部分から下位には中粒の砂層が出現しており、同層が高い透水性を有していることが確認された。その上部においても深さ 5m 付近, 8~10m 付近, 12m 付近で部分的に注入圧が低下しており、その層準にやや透水性の高い砂層が分布すると推定された。図-5 に示した CPT プロファイルにも当該層準において先端抵抗値が上昇するとともに間隙水圧が平衡水圧以下に低下し、砂層の出現が裏付けられた。また深さ 1.8m 付近までは大きな先端抵抗値が記録されており、HPT 計測結果と同様に表層部に粗粒の盛土材が分布することがわかった。なお同図には先端抵抗値ほかから推定した換算 N 値プロファイルも示してある。通常の土質調査ボーリングとは異なり、連続的な N 値プロファイルが得られていることが特徴的である。また同図中の SCPT (Seismic Cone Penetration Test) は、50cm 間隔で測定された VSP (Vertical Seismic Profiling) 測定記録から S 波反射係数の深度分布を求めたものである。16m 付近が強い反射係数を有していることが示されているが、その深さは砂層上面境界とよく一致している。また図-2 の S 波速度構造断面においてもこの深さで S 波速度が大きくなっており、SCPT によって S 波速度構造の急変部の把握が可能であることが確認された。なお堤防天端部において 2 地点で実施した CPT/HPT/SCPT の計測に要した時間は、貫入マシンの搬入および計測後の原状復帰まで含めてほぼ 1 日であった。土質調査ボーリングに比べて高い作業性を有していることが改めて検証された。

2.3 木曽川堤防橋台設置開削区間における統合物理探査検証

木曽川左岸、愛知県一宮市で施工中の新濃尾橋左岸橋台設置工事箇所において統合物理探査を主とする小規模な現地調査計測を実施した。この区間では川裏側に仮締切堤が盛立てられており、工事区域がフェンス等で区画されていたことから区域内に収まるよう、縦断測線の延長は 95m とした。このように測線長が短いことから、

探査手法としては電極設置型直流比抵抗探査と固定展開式表面波探査を採用した。また横断方向に補助測線を設定し、トモグラフィ探査を実施するとともに人工的に堤体に注水し、浸透過程を比抵抗探査によって繰り返し計測する浸透モニタリング計測を実施した。当該箇所での測線配置図を図-6 に示す。

縦断測線の表面波探査における地震計/発振間隔、および直流比抵抗探査における電極間隔は 1m とした。また横断測線の地震計間隔、電極間隔は 0.5m に設定した。直流式比抵抗探査には、土木研究所において新たに導入した多チャンネル同時通信型高速電気探査装置⁵⁾を使用した。この装置は、同時に 24 電極に通電することができ、加えて 24 電極の電位応答を同時に測定できる。符号分割型信号を送信することで、約 30 秒の間に 576 点のデータを取得することが可能である。従来の電気探査装置では同程度のデータ取得に 1 時間程度を要していた。このために同時刻の比抵抗構造を把握することが原理的に不可能であった。これに対し本装置を使用すれば、ほぼリアルタイムに全電極組み合わせのデータを取得することが可能となり、浸透過程や浸透時のパイピング現象などの過渡的な比抵抗変動を捉えることが可能になると期待された。

固定展開式表面波探査は、測線上に 1m 間隔で 96 個の低周波地震計を設置し、かけ矢による打撃振動データを取得する従来の能動的表面波探査に加え、環境雑音を測定する受動式表面波探査を実施した。両者は測定ツール、測線展開は共通しており、測定条件・解析手順が異なるだけであり、前述のようにこの手法をハイブリッド表面波探査と称している。

浸透モニタリング計測では、まず堤防天端川表側肩部に延長 8m、幅約 30cm、深さ約 20cm の溝を人力で

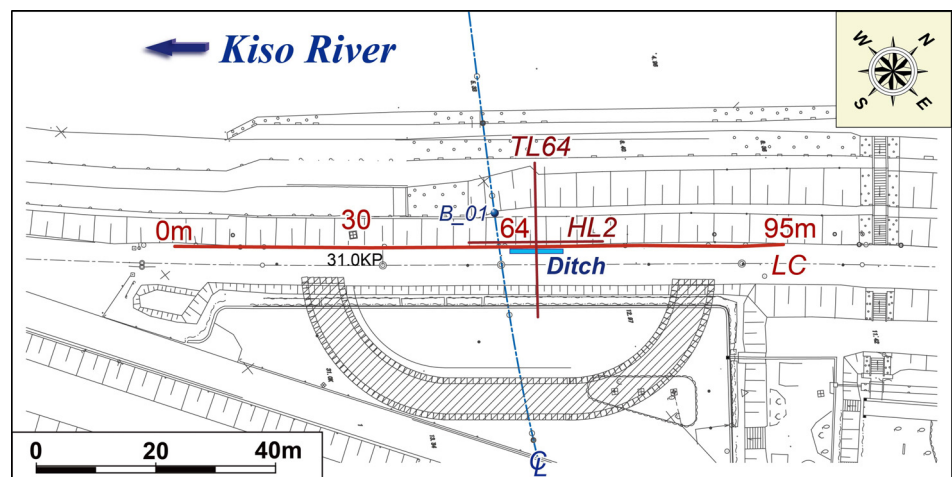


図-6 木曽川堤防開削前統合物理探査計測測線配置図

掘削し、その溝を水で満たし、地表から堤体内に浸透する過程を比抵抗探査でモニタリングした。溝への注水は約 20 時間の間に 7 回に分けて実施し、合計 1,800L を堤体内に自然浸透させた。溝の配置および注水状況を写真-1 に示す。この浸透時に直交測線 TL64、縦断測線 HL2 を主対象に 22 次にわたって浸透に伴う比抵抗変化を解析した。

図-7 は、天端測線で実施した統合物理探査断面である。探査断面では、まず堤体部（標高 5m 以上）の上半部に 1,000Ωm を越す高比抵抗帯がイメージングされていることが特徴的である。なお測線距離 20m より左側でこの高比抵抗帯が垂れ下がっているのは、この区間に設置されていた工事区域防護柵の影響による偽像である。一方ハイブリッド表面波探査では深さ 50m 程度までの S 波速度構造が再構成されている。橋台設置に伴って堤体部で実施された土質調査ボーリング結果と対比すると、相対的高 S 波速度部が高 N 値砂質土層の分布と整合的であることがわかる。能動的表面波探査では深さ 15m 程度までしか S 波速度構造を再構成することができなかったが、同図はハイブリッド表面波探査によって、天端部に設置した単一測線での測定でも堤体部のみならず基礎地盤部までの S 波速度構造を再現できることを実証している。なお堤体盛土は表層 2~3m が高比抵抗・高 S 波速度で、下半部は中比抵抗・中 S 波速度で特徴づけられる。開削時の堤体内部観察結果によると、標高 11m 以浅は、4.7mm 以上の礫分が 40%以上を占めるよく締まった砂礫層で構成されていることがわかった。前節で示した揖斐川新橋架設部堤防と同様に、天端道路を供用する際に嵩上げされた路盤・路床などに比定される。なお開削時の写真記録からは、この路盤・路床は最表層 1m 程度、その下位は灰白質で粘土分を含む粗粒盛土に細分することができる。

図-8 は、溝への注水による堤体内部への浸透過程を比抵抗変化率としてイメージングしたものである。まず注水前に初期状態を測定し、散水後のある時刻に測定した比抵抗分布との比をとり、比抵抗変化の空間分布を画像化している。なお比抵抗が低下した部分は寒色系で、増大した部分は暖色系で色分けしてある。同図上の縦断測線断面を見ると、注水後 43 分後には溝の直下部の比抵抗が大きく低下したことがわかる。この比抵抗低下部は同図下の直交測線断面にも明瞭にとらえられている。この図から、天端注水による浸潤前線が約 1m 下方にまで進展したことを読み取ることができる。重力影響下であるが、この浸透過程モニタリ



写真-1 堤体注水用溝設置状況

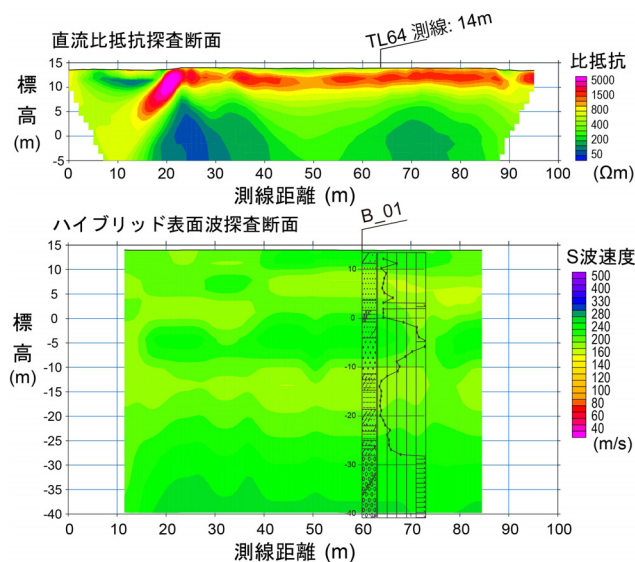


図-7 木曾川堤防開削部縦断測線統合物理探査断面

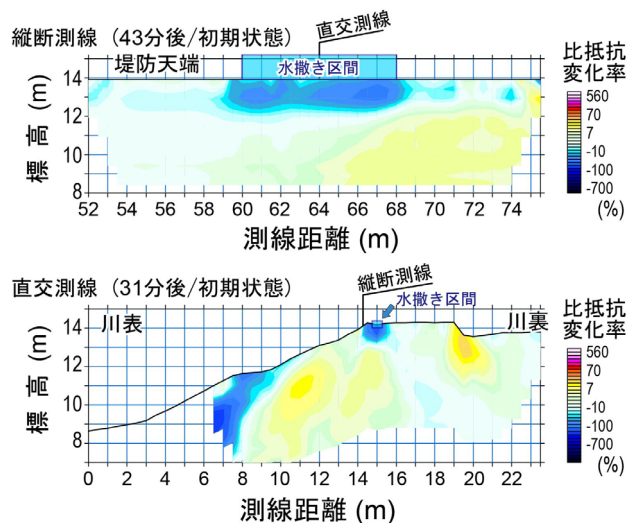


図-8 木曾川堤防開削部浸透過程モニタリング計測結果例

ング計測によって堤体不飽和帯での降雨浸透の過程をモデル化することが可能である。不飽和帯の透水係数は体積含水率または飽和度の関数として定義され、強い非線形性を示すことが知られている。したがって直接的に透水係数を推定することは困難であるが、浸潤前線の下方進展速度を示標とすると、この計測結果から 10^{-4} m/s のオーダーの不飽和透水係数を見積もることができる。なおさらに時間を経過した変化率断面を再構成すると、浸潤前線が側方に進展する状況をモニタリングすることができた。浸透水の拡がりや堤体上部の盛土境界に規制された可能性を指摘することができる。なおこのモニタリング計測では、注水区間を短い区間に限定している。実際の降雨時には堤体全面で一様な浸透と浸潤前線の進展が想定される。今後さらに大規模な浸透モニタリング、あるいは実際の降雨時のモニタリング計測の実施を予定している。

2.4 城原川堤防における統合物理探査検証

佐賀県神埼市を南流する城原川の右岸堤防において統合物理探査を実施した。測線区間位置を右図-9に示す。JR 長崎本線直上流の日出来橋付近 8K000 距離標を起点とし、上流側川寄橋までの約 1.5km の区間である。

城原川は、背振山地に端を発し、扇状地を形成せず

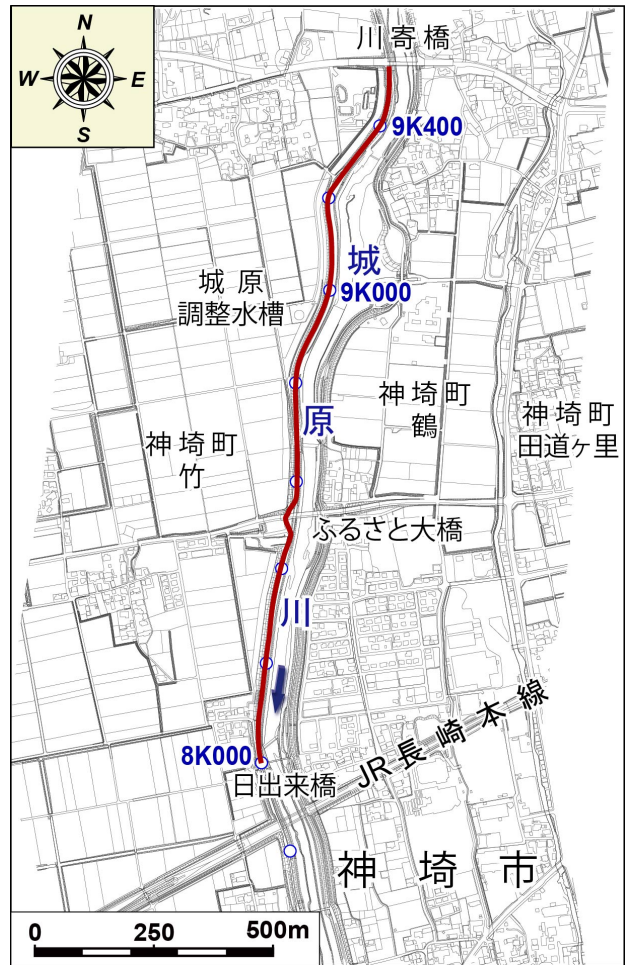


図-9 城原川堤防統合物理探査計測測線位置図

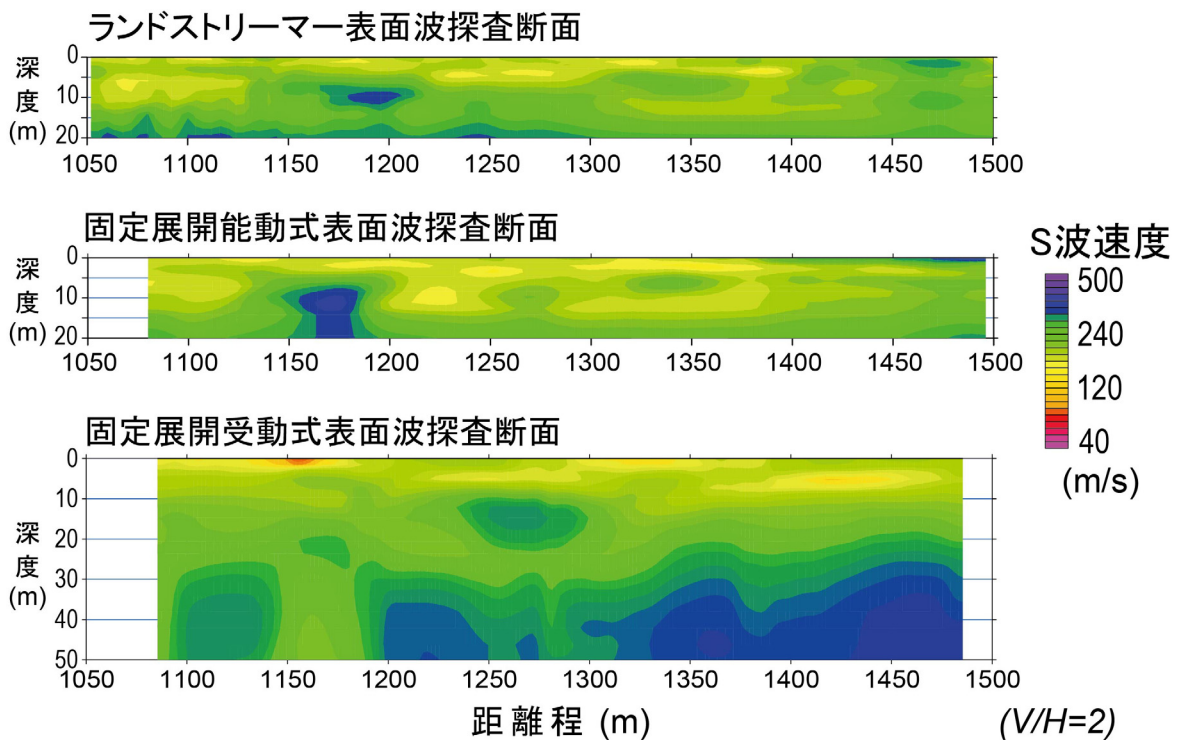


図-10 ランドストリーマー表面波探査とハイブリッド表面波探査結果断面の比較

に直流し、有明海に達する前に筑後川と合流する延長約 32km の中小河川である。測線設定区間では、一部で河床レベルが周辺後背地面より高く、「天井川」を形成している。また、「野越」と称される越流区間が存在することが特徴的である。野越は北部九州地域に集中し、約 400 年前以降に構築されたとされることから⁶⁾、野越が現存する区間を含む堤防は、築堤年代がかなり古く、劣化が進んでいることが懸念された。また既往調査では、堤体は粗粒材料を主体とし、漏水の危険性が高い部分があることも判明していた。

この堤防探査においては、従来の統合物理探査に加

えて、新たに考案したハイブリッド表面波探査の適用性を検証するとともに堤体内部構造イメージへの GPR の適用性を検討した。図-10 は、従来のランドストロリーマー表面波探査とハイブリッド表面波探査の結果断面を比較したものである。ハイブリッド表面波探査では、1m 間隔で 144 個の地震計を配置し、能動式探査と受動式計測を組み合わせる。固定展開区間の計測が終了したら 96 点分を移動して同様の計測を繰り返す、という測定方式を採用した。3 回の展開移動で約 430m の区間をカバーした。この計測に要した時間は約 1 日であった。一方従来のランドストロ

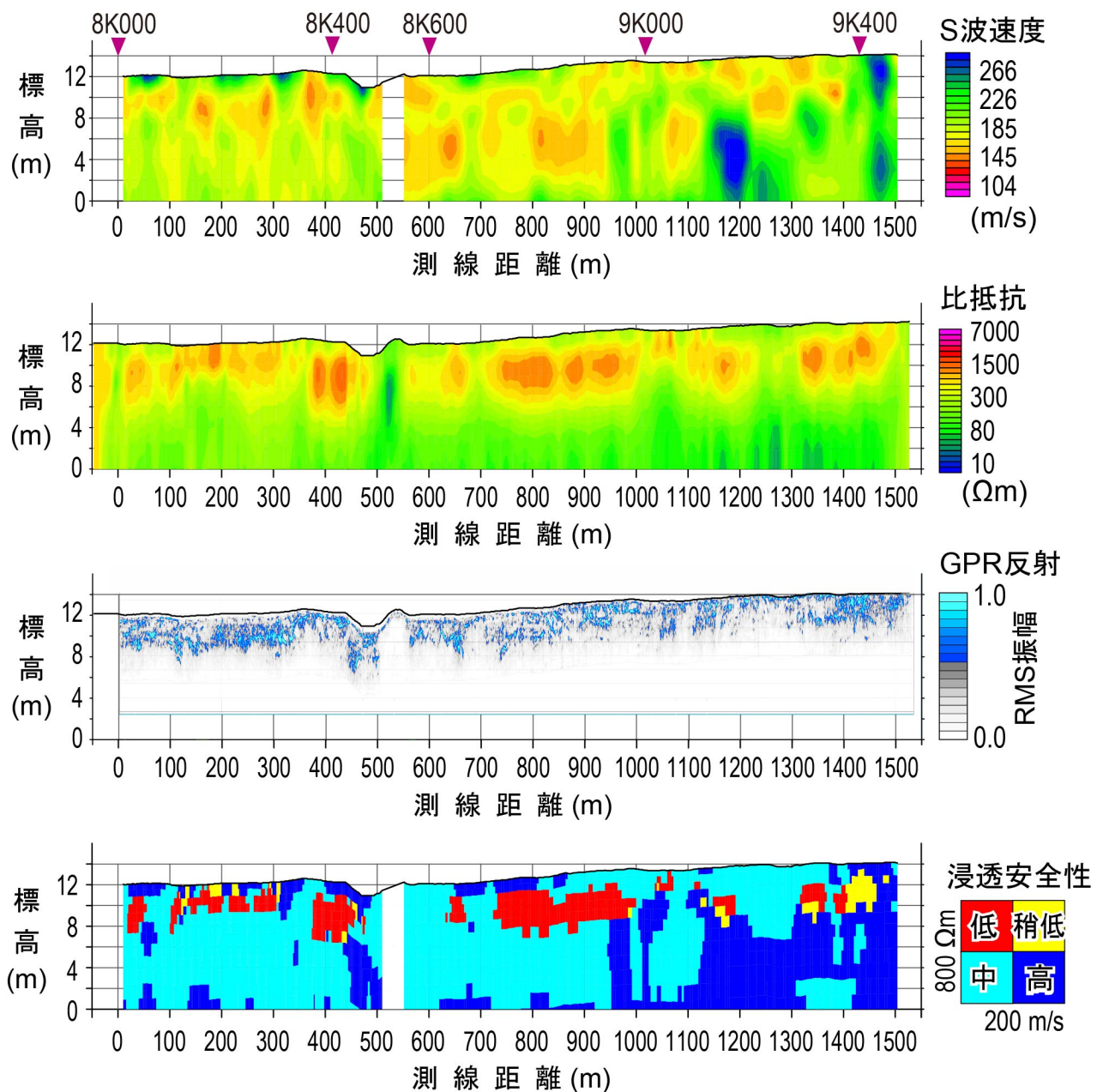


図-11 城原川堤防統合物理探査断面および浸透安全性推定断面

一マ表面波探査で同区間を測定するのに要した時間は約0.5日であった。図-10に示したS波速度構造断面を比較すると、ランドストリーマ表面波探査断面と固定展開能動式表面波探査断面とは似通った構造を示すことがわかる。ただし両者とも深さ20m程度までしかイメージングできていない。一方固定展開受動式表面波探査断面では深さ50m程度までの構造を復元できており、寒色系で表示される基盤の分布を明瞭にとらえることができています。ただし表層部の速度構造に対しては平均化処理が施されているため、空間解像度が低く、小規模な不均質構造は捉えられていない。そこでこれらの断面を合成処理し、浅部の空間解像度を確保するとともに、探査深度も向上させる。それがハイブリッド表面波探査の特徴である。

図-11は縦断測線の統合物理探査断面と、それらから定性的に評価した浸透の安全性分布断面を示したものである。S波速度断面では堤防の表層部は高いS波速度を示すものの、深さ1ないし2m以深に、部分的に暖色系で色分けされた低S波速度の部分がパッチ状に分布することが特徴的である。比抵抗探査断面においても堤防上部に高比抵抗体がパッチ状に分布していることが示されている。同図中のGPR断面は、散乱反射強度の強い部分を強調処理したものである。表層から2m程度までの領域に、部分的に散乱反射強度が強い区間が表れているが、その区間は高比抵抗異常体の分布とほぼ重なる。GPRの散乱反射は成層構造が乱れた部分、あるいは礫層など物性が大きく変化する部分で卓越することが知られており、この断面においても堤体内上部の砂礫層の分布をとれたものと解することができる。

図-12は、統合物理探査の結果から、この測線区間での堤体と基礎地盤部のS波速度と比抵抗との関係を表したものである。一般的に高比抵抗を特徴とするが、さらに堤体部が相対的に高比抵抗、基礎地盤部では比抵抗が小さくなっていることがわかる。一方S波速度では両者とも150~200m/sの間に3/4程度が集中し、その他は高S波速度側に偏移する。データベース化した他河川堤防での土質特性との関係と比較すると、図-13に示すように城原川の分布は千曲川中流域堤防の分布とほぼ重なる。この千曲川堤防区間では高水時にしばしば基盤漏水、堤体浸透が発生し、その後大規模な止水対策が施された。当該区間の堤防も、砂、砂礫を主体とする部分が存在し、一部には透水性の高いゾーンが分布することが懸念された。そこで比抵抗値800Ωm、S波速度200m/sを基準値として浸透に対する

安全性を定性的に4区分し、その空間分布を求めた。図-12に示されるように、この区分で安全性が低いと評価する第2象限にプロットされるデータは、基本的に堤体部に分布する。このことから堤体の一部に部分的にはあるが高透水ゾーンが分布することが推定された。また図-14に示した各地堤防の堤体材料の粒

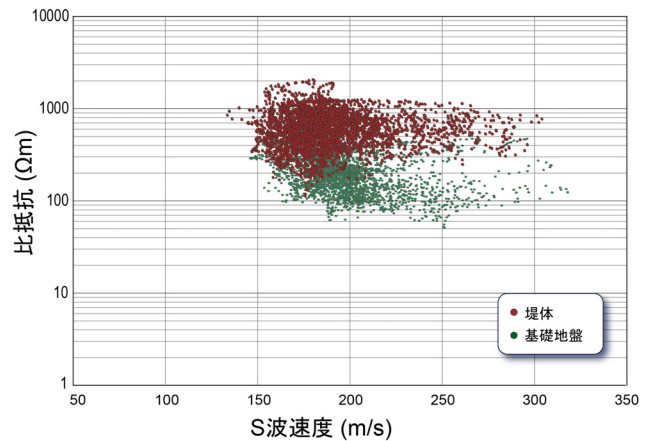


図-12 城原川堤防のS波速度と比抵抗の関係図

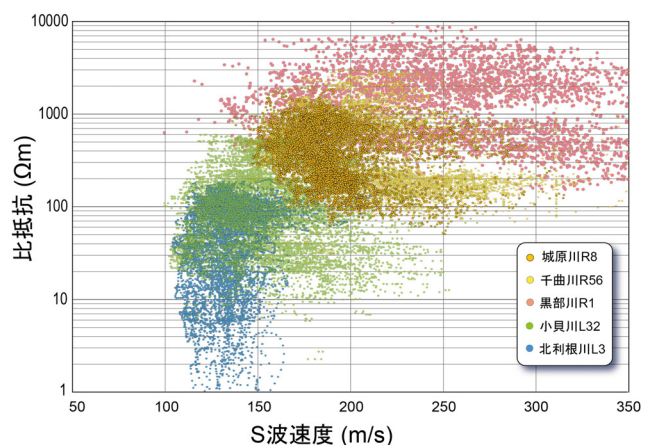


図-13 各地堤防のS波速度と比抵抗の関係図

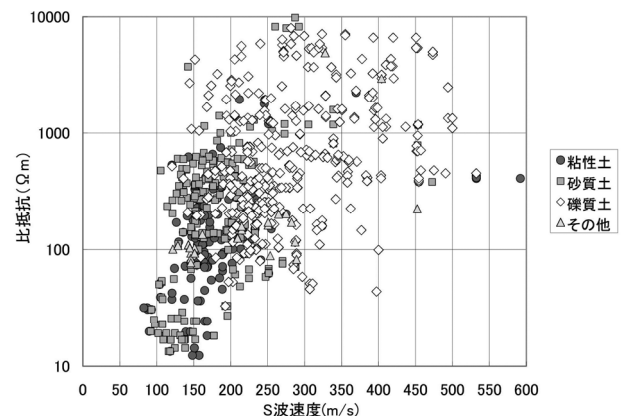


図-14 各地堤体材料の粒度特性とS波速度および比抵抗との関係

度特性と S 波速度および比抵抗との関係図からは、S 波速度 200m/s 以下、比抵抗 800Ωm 以上の領域にプロットされる堤体材料は大部分が砂あるいは礫であった。この統計的なデータからも、城原川測線区間の堤防の堤体材料が砂礫からなるという推定が合理的であることが裏付けられる。今後、それらの区間でトモグラフィ探査、浸透過程モニタリング探査等を実施するとともに既往の土質調査データを収集し、比較検討することで、浸透安全性評価の信頼性を向上させることが可能であり、今後の課題としたい。

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によって、堤防システムの縦断方向の不均質構造のイメージングとそれに基づく安全性評価が可能であることを明らかにしてきた。一方で統合物理探査の要素技術について、より信頼性を向上させる必要があることもわかってきた。そこであらたにハイブリッド表面波探査手法を考案し、適用検証した。その結果、短い測線であれば同手法でもほぼこれまでと同程度の作業効率で現場計測が可能であること、より深い領域までのイメージングが可能で、長大堤防においても天端測線のみで基礎地盤構造を把握可能であることがわかった。また高速比抵抗探査装置を試作し、堤防内部への降雨浸透過程のモニタリング計測に適用した。現地での簡易的な計測の結果、同装置を用いることで堤体内部への浸透の過程を数分間隔で繰り返しモニタリング計測可能であること、比抵抗変化率を示標に浸潤前線の進展をイメージングできることがわかった。GPR でイメージング可能な探査深度は 2m 程度と見積もられ、堤防探査には利用されてこなかった。これに対し天端からの探査に適用したところ、堤体浅部に分布する粗粒材料の集中域を検出可能であることがわかった。さらに樋管周辺のり部のブロック張り護岸背面の空洞の有無の把握、横断樋管コンクリート函体背面の空洞の把握にも適用できることがわかった。また堤防横断トモグラフィ探査によって、堤防弱点部の不均質内部物性構造を把握できることもわかった。これらにより、まず縦断方向の統合物理探査によって堤防システムの連続的な物性の特徴と異常箇所を抽出し、次にトモグラフィ探査およびサウンディング調査計測等によって抽出した異常部の内部構造を把握する、さらに浸透透水特性を評価する比抵抗モニタリングを適用し、不飽和浸透流解析のための物理モデルを構築する、という一連の現場計測手順を構築するこ

とができた。比抵抗トモグラフィ探査と経時変化モニタリング手法は基礎地盤中のパイピングの発生とその進展過程の把握、堤体内部侵食の動態モニタリング等にも活用が期待される。また GPR は、樋門樋管周辺空洞の検出とグラウト効果評価に適用が期待される。

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 高穂・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) 田辺敏夫・大熊 孝 (2001): 城原川流域における野越の役割と効果に関する研究, 土木史研究, Vol. 21, 147-158.

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 : INAZAKI Tomio

Abstract: Integrated geophysical surveying the author developed and proposed 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 improve the reliability of geophysical method, it is needful to develop new techniques and to tune-up the measurement parameters suitable to delineate anomalies. We then proposed and tested newly proposed techniques, hybrid surface survey method, high-speed DC resistivity measurement, and GPR at actual levee survey sites. As a result, we could successfully identify small-scaled anomaly structures in and beneath the levee systems. Furthermore, it was demonstrated that high-speed DC resistivity measurement was useful to monitor the infiltration process of surface water into the levee body.

Key words: Integrated geophysical investigation, hybrid surface wave survey, high-speed DC resistivity measurement, ground penetrating radar, excavation site investigation.