

1.5 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】

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方のみならず関東地方でも多くの堤防区間で深刻な被災が発生したが、そのなかには以前に統合物理探査を適用していた堤防区間も含まれていた。そこで地震後に同一堤防区間で再計測を実施したところ、被災区間が相対的に低S波速度かつ低比抵抗であること、地震後に堤体のS波速度が全般的に低下していることがわかった。さらに被災堤防区間において統合物理探査を適用し、被災のメカニズム、あるいは原因となる内部弱点箇所を見いだせるかを検証するための現地調査を実施した。加えて外見的には無被災の堤防区間においても統合物理探査を適用し、内部損傷の有無と程度を把握できるか検討した。その結果、被災箇所の基礎地盤の多くが低S波速度かつ低比抵抗で特徴づけられること、被災箇所の多くが旧河道や樋管横断部に位置しており、その場合堤体部が他の箇所と異なる特徴的な物性構造を有していること、が明らかになった。土木研究所において開発・実用化を進めてきた統合物理探査技術は、当初浸透に対する弱点箇所の効率的把握を目的としていたが、地震後の損傷の有無の把握、さらには耐震性の評価にも有効であることがわかった。

キーワード：統合物理探査、東日本大震災、脆弱性評価、比抵抗、S波速度

1. はじめに

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、地中情報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。これに対し土木研究所では、いくつかの物理探査手法を組み合わせて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方式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確立してきた^{3),4)}。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震には、震源域に近い東北地方の河川堤防だけでなく震央から300km以上離れた関東地方の河川でも深刻な堤防被害が発生した⁵⁾。関東地方整備局管内での被災箇所は940箇所へ達し、なかでも利根川下流部では245箇所、小貝川では110箇所へ堤防の沈下、のり崩れ、亀裂等が発生した。このうち堤防の損壊程度が大きく堤防機能を損なう被災を受けた区間に対しては緊急の復旧対策が講じられ、さらに被災メカニズムを明らかにするための地盤調査が実施された。その結果大部分の堤防被災は基礎地盤あるいは堤体の液状化によって生じたとの評価が下され⁵⁾、大規模被災区間に対しては2012年の出水期までに切返しをともなう本格復旧対策が実施されることとなった。しかし関東地方で940箇所を数える堤防被災箇所の全箇所において地盤調査が実施されたわけではなく、また一見無被災の堤防区間においても地震によるゆるみ等が生じている可能性も指摘された。

土木研究所において技術的確立とその適用普及を進

めてきた統合物理探査技術は、前述のように河川堤防の内部不均質構造を非破壊かつ高分解能でイメージングすることができる。この手法を 2011 東北地方太平洋沖地震(以後、東日本大震災と略称)で被災した堤防区間に適用すれば、被災区間の不均質地盤構造を明らかにするとともに、計測された物性分布から、地震被災のメカニズム解明に貢献する情報を提供できると期待された。そこで、実際に東日本大震災で被災した堤防区間に統合物理探査を適用し、被災区間の物性を明らかにするとともに地盤調査データを収集してそれらと対比し、被災区間の物性的特徴と被災のメカニズムを明らかにすることによって統合物理探査技術による堤防の耐震機能の評価という課題への適用性について検討した。

小貝川左岸堤防 35K 付近では 2005 年から繰り返し統合物理探査を実施してきた。2011 年の東日本大震災では、35.0K 付近の旧河道交差部(図-1 参照)約 60m の区間で堤防被害が発生した。この区間では堤防とほぼ平

2. 現地統合物理探査

2.1 現地統合物理探査の概要

平成 23 年度には、表-1 に示す 7 河川 11 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。ただしこの日数には準備作業としての機材点検調整、取得データの自前での処理解析および取りまとめは含まれていない。これらの現地探査のうち、表-1 中に太字で示した 4 堤防区間の探査結果を以下に示す。

2.2 小貝川 L350 における地震被災前後の統合物理探査結果比較

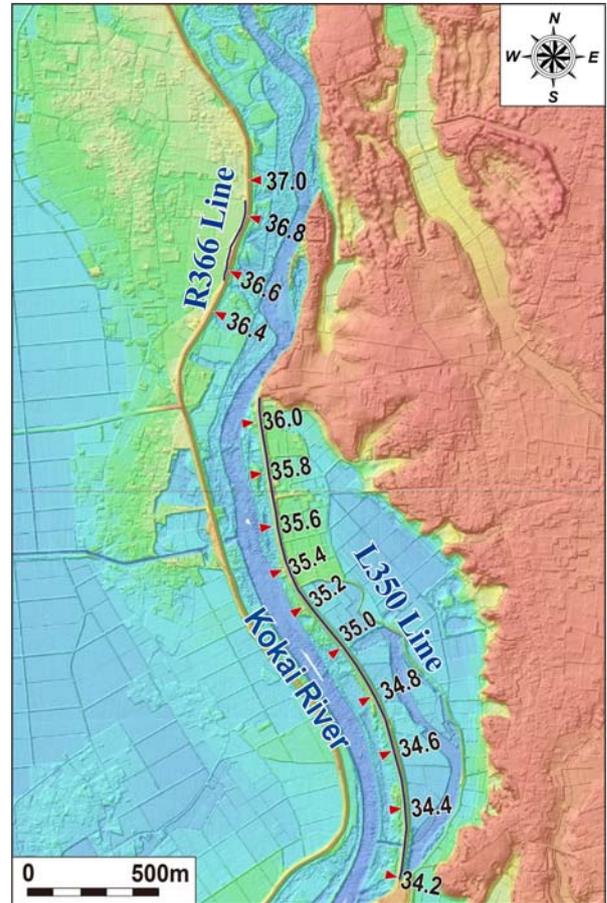


図-1 航空機レーザー測量による小貝川中流部の DEM と探査測線⁶⁾

表-1 平成 23 年度に実施した現地統合物理探査計測箇所と探査対象

河川系	堤防箇所	区間長	適用探査手法	探査対象事象
小貝川	L320	1.6 km	統合物理探査	地震被災未見
	L350	1.9 km	統合物理探査, スリングラム電磁探査	局所地震被災
	R366	300 m	統合物理探査, 3D 比抵抗探査, CPT/HPT	地震亀裂沈下被災
	R392	450 m	統合物理探査	地震亀裂沈下被災
	L420	300 m	統合物理探査, オールコアボーリング, S 波検層	地震亀裂沈下被災
江戸川	L580	3.0 km	統合物理探査	地震表のりすべり
藤井川	L010	0.9 km	統合物理探査	基盤漏水
北利根川	L030	3.0 km	統合物理探査, スリングラム電磁探査	地震亀裂被災
利根川	飯島樋管部	200 m	統合物理探査, 3D 比抵抗探査, 比抵抗マッピング	地震樋管部変状
牛淵川	R090	200 m	統合物理探査, 比抵抗トモグラフィ, 比抵抗マッピング	部分開削
揖斐川	城南樋管部	30 m	GPR(地中レーダ)	樋管部抜け上り

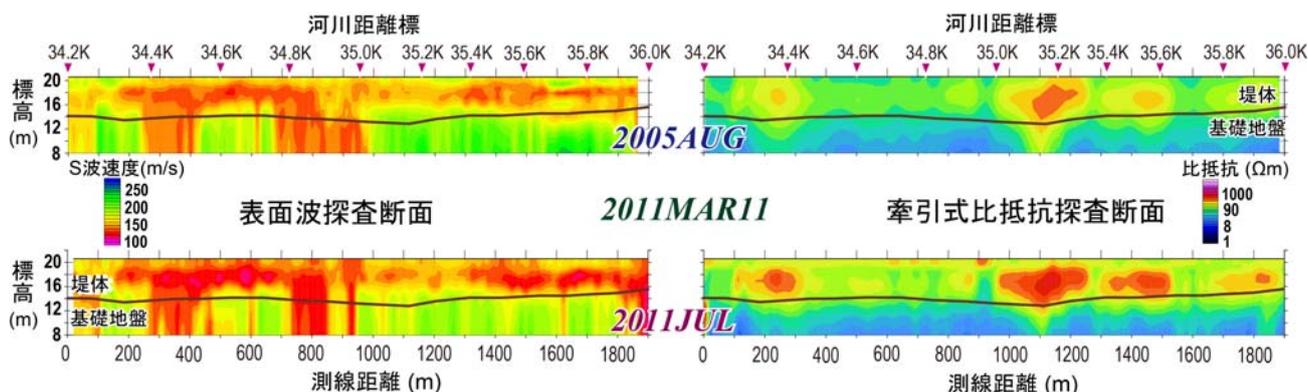


図-2 東日本大震災前後における統合物理探査断面の比較(小貝川 L350 測線)

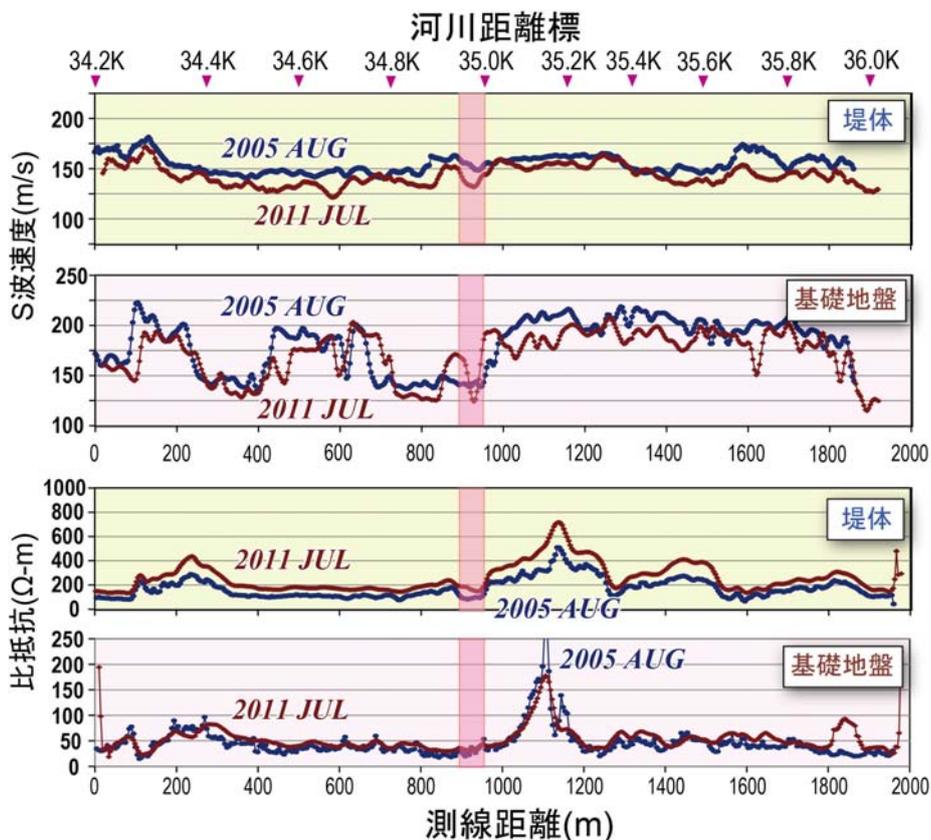


図-3 東日本大震災前後における小貝川 L350 測線沿い平均物性の比較⁷⁾

行するクラックが天端川表のり肩部、川裏側のり、両側のり尻部で多数発生し、天端が相対的に約 60cm 沈下した。川裏側のり面、のり尻部のクラックは開口して段差が生じており、河跡湖側に向かって堤体の変位したと推定される。なお被災直後には緊急対策工事が実施され、約 2 週間後には原型復旧された。

東日本大震災前後に実施した統合物理探査結果を図-2 に比較して示す⁷⁾。地震前の探査は 2005 年 8 月に実施している。地震後の探査は 2011 年 7 月に実施した。測定区間の堤防は 1960 年代に現在に位置に築堤され、高水敷との比高は約 6m である。ランドストリーマー表面

波探査法で求めた S 波速度断面(同図左)を比較すると、全般的な構造は似通っており、旧河道と交差する 34.2K 付近および 35.0K 付近に加え、34.4K 付近では基礎地盤の S 波速度が相対的に低く(赤色)再現されている。また牽引式比抵抗探査で求めた比抵抗断面(同図右)も基本的には類似した構造を示すことがわかる。図-2 は、統合物理探査の再現性の高さを裏付けている。ただし注意深く比較すると、地震後において S 波速度が全域的に低下していること、比抵抗値は逆に高くなっていることがわかる。そこで断面を堤体部と基礎地盤部に分け、それぞれの測線に沿った平均的な物性値を求めた。結果を図-

3に示す。同図には、地震後に堤体と基礎地盤部のS波速度が全域的に低下したことが明瞭に示されている。一方基本的に飽和状態にある基礎地盤部の比抵抗値には変化は認められないが、堤体部の比抵抗値は全般的に上昇していることがわかる。含水状態に変化、すなわち間隙水の排出があったと推定することが可能である。この堤防区間において地震被害が顕著であったのは、同図にピンクで影を付けた35.0K付近の約60mの区間であったが、この区間が測定区間のなかでも最も低S波速度かつ低比抵抗の区間の一つであったことがよくわかる。このような堤体および基礎地盤の物性が地震時の被害発生の原因となったこと解釈することが可能である。

2.3 小貝川 R366 における地震被災後の小規模 3D 比抵抗探査

東日本大震災によって、小貝川右岸 36.6K 付近の区間(図-1)においても約150mの区間において堤防天端が最大70cm沈下し、かつ川裏側に傾動し、それに伴い

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⁶⁾。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
- 6) 測定方法 Mixed Dipole-Gradient 法

今回の測定では、図-5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。なお、測定に使用する電極は、塩水を散水して接地抵抗を5kΩ以下に低減させた。また、アス

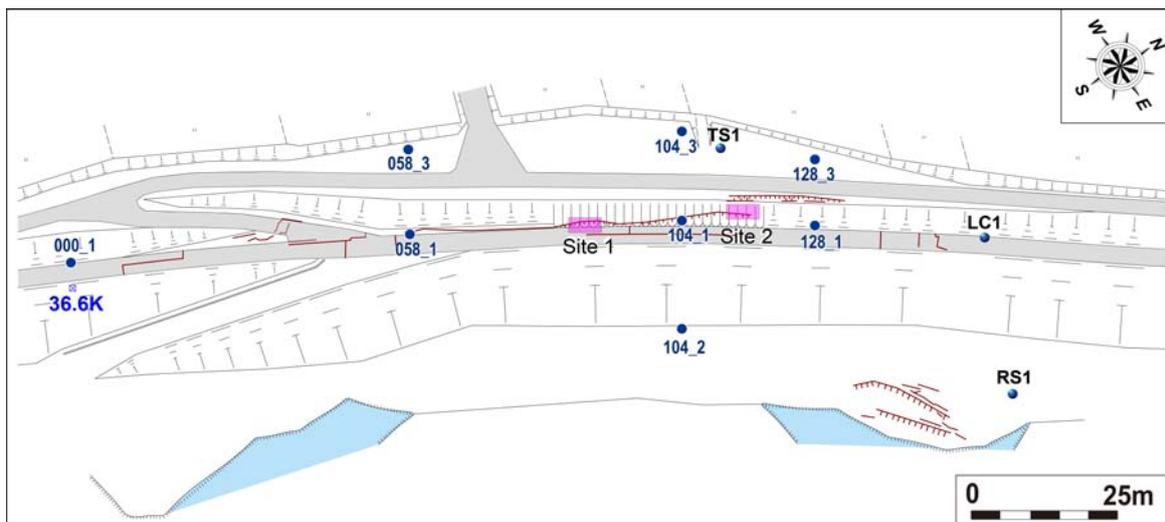


図-4 東日本大震災による小貝川 R366 測線付近の堤防被害と各種地質調査・物理探査位置図⁶⁾

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程度の落差を伴い、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)。この堤防区間では統合物理探査に加えてオールコアボーリング、コーン貫入試験が実施され、表層地質の不均質構造が詳細に把握されている。

堤防川裏側のり面に認められた開口クラックを対象に

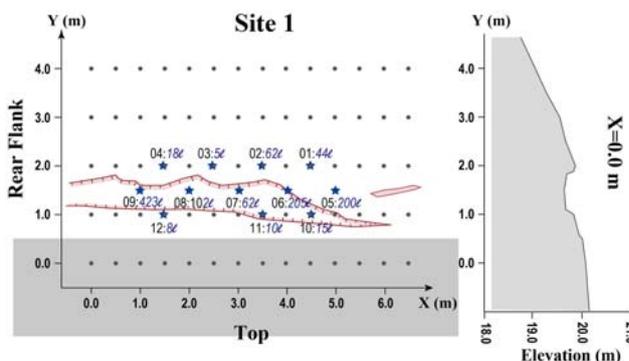


図-5 Site1における3D比抵抗探査電極配置とセメントベントナイト注入量分布⁶⁾

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 3L~423L 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-6 は、下流側に位置する Site 1 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⁶⁾。のり表層部の比抵抗は 30 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 1 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 1m 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 1~3 列目(Y=0~Y=2m)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在位置を捉えていると判断することができる。

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て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捉えることができる。3 地点(図-4 参照)の計測結果を並べて図-7 に示す。堤体および川裏表層部に層厚 5m 程度の粘性土層が分布し、その下に層厚 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、地下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

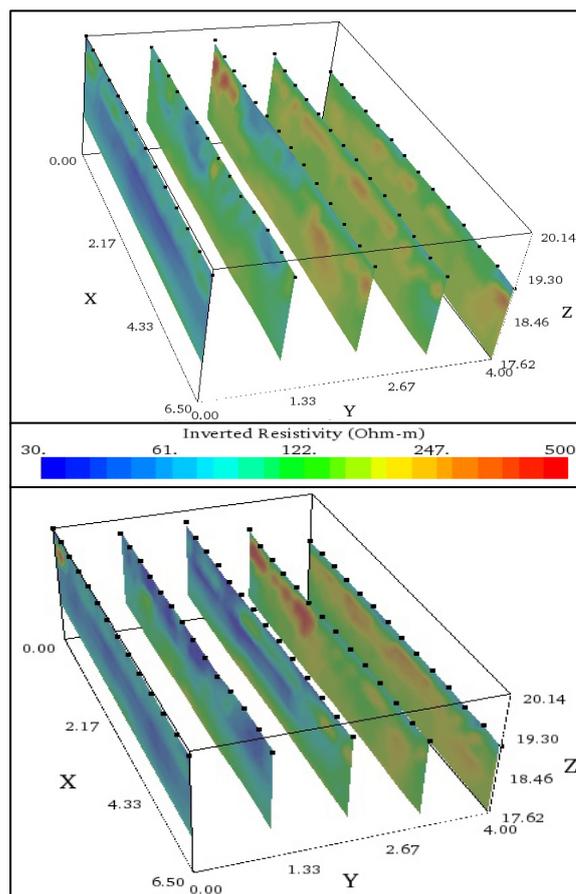


図-6 Site1 における CB 注入前後の比抵抗スライス断面比較⁶⁾ (注入前:上, 注入後:下)

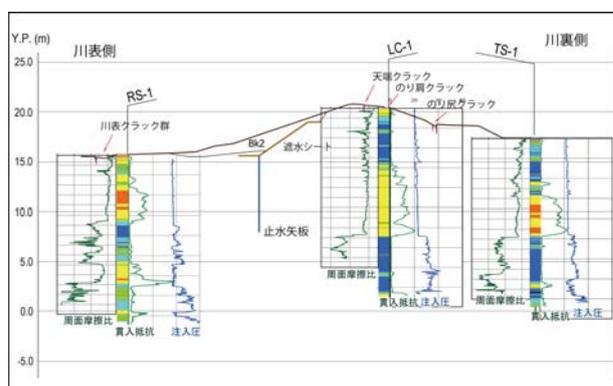


図-7 R366 測線付近で実施した CPT/HPT 計測結果と推定柱状図

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。

2.4 藤井川 L010 における統合物理探査

東日本大震災によって震央に近い関東平野北部那珂川流域の河川堤防は大きな被害を受けた。その中で那珂川の支流藤井川の当該区間の堤防は外見적으로는無被災であった。しかし 2011 年 9 月の出水期に計画高水位を超

過する高水が発生し、当該区間において漏水被害が発生した。その一部は堤防拡幅区間、すなわち浸透経路長が長い区間においても認められた。その原因として堤体部の透水性が局所的に高いことが疑われた。そこで堤体および基礎地盤の浸透に対する物性構造を把握することを目的として統合物理探査を実施した。現地探査は 2011

年 11 月に実施した。なおこの現地探査は関東地整の現地見学会と技術者講習、土木研究所の技術普及活動を兼ねて実施され、現場作業は関東技術事務所職員と共同で実施した。また現地見学会には約 30 名の技術者が参加し、現地においてまた場所を変えた講習会の会場において活発な質疑が展開された。

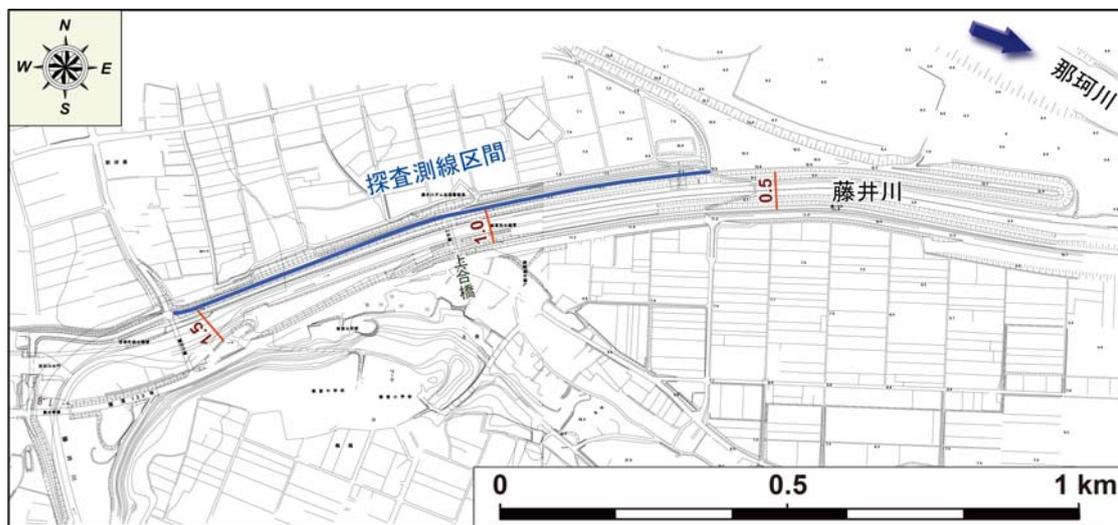


図-8 藤井川 L010 測線設定位置図

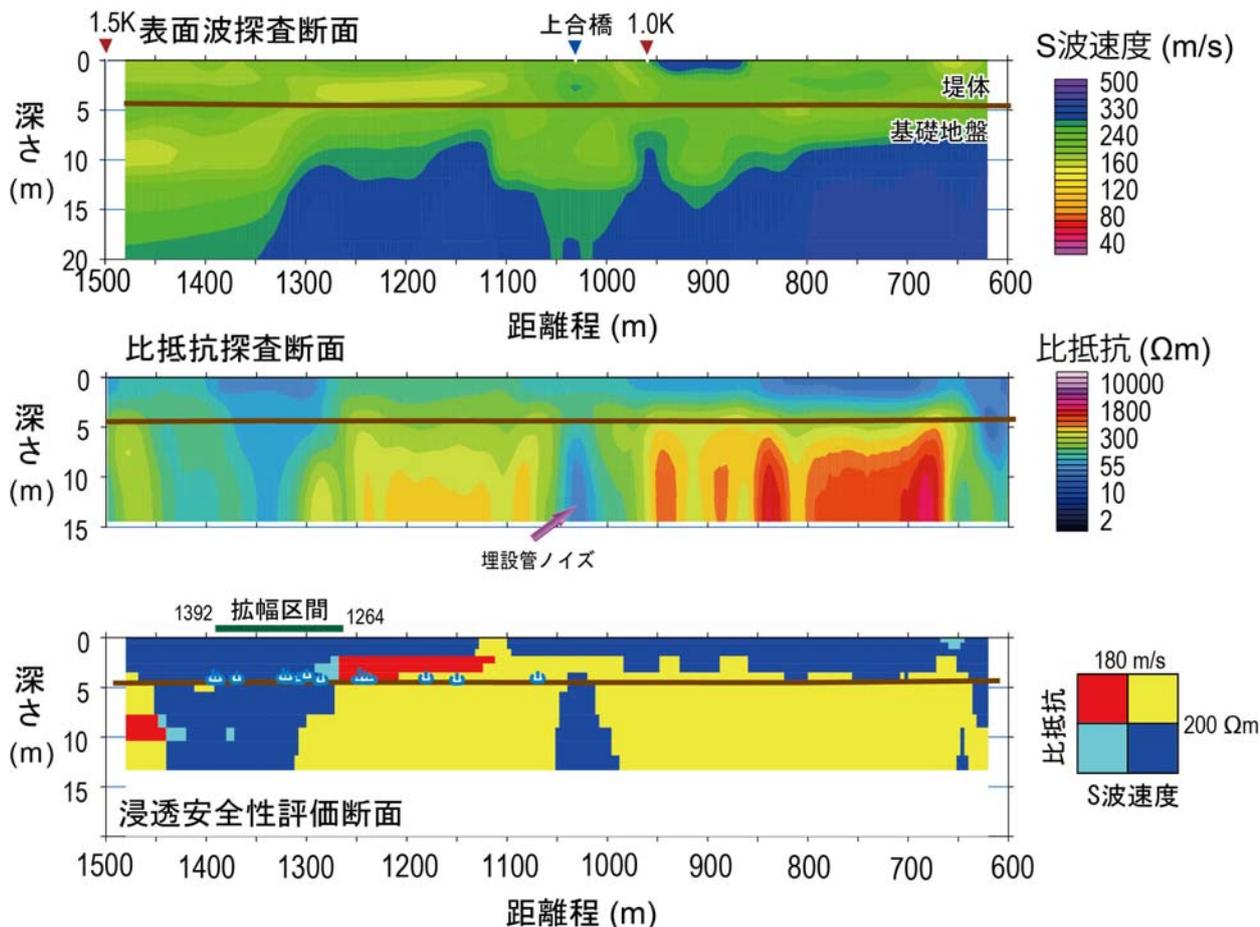


図-9 藤井川 L010 測線統合物理探査結果断面図。上:S 波速度構造；中:比抵抗構造；下:浸透安全性評価断面

測線位置を図-8に、また統合物理探査結果断面図を図-9に示す。測線長は約900mで、那珂川との合流地点から上流の河川距離程0.5~1.5K間の左岸堤天端に設置した。統合物理探査結果断面では、まず堤体部が相対的に低比抵抗、基礎地盤部が局所的に1,000Ωmを上回る高比抵抗であることが特徴的である。図-10に、藤井川での計測物性の分布と、関東平野の他の河川および東北地方の米代川の計測物性の分布とを比較して示すが、荒川や小貝川の物性値に比べると、藤井川のそれは相対的に高比抵抗高S波速度領域に分布することがわかる。S波速度も大きな値を示し、特に基礎地盤深部では300m/s以上の高速度を示し、砂礫質地盤で構成されていることが示唆された。実際この堤防区間で実施されたボーリング調査では部分的にN値50以上に達する砂礫層の存在が確認されている。一般に高比抵抗かつ低S波速度を呈する区間は緩んだ砂あるいは礫質土に対比が可能であり、図-9の浸透安全性評価断面図において赤色で着色した部分が砂礫質土、すなわち高透水部であると評価される。この区間では確かに漏水被害が発生している(図-9に漏水位置記載)。しかし、測線距離1264mから上流側においても漏水の報告がある。この区間は拡幅区間であり、浸透経路長が通常区間の2倍以上に達す

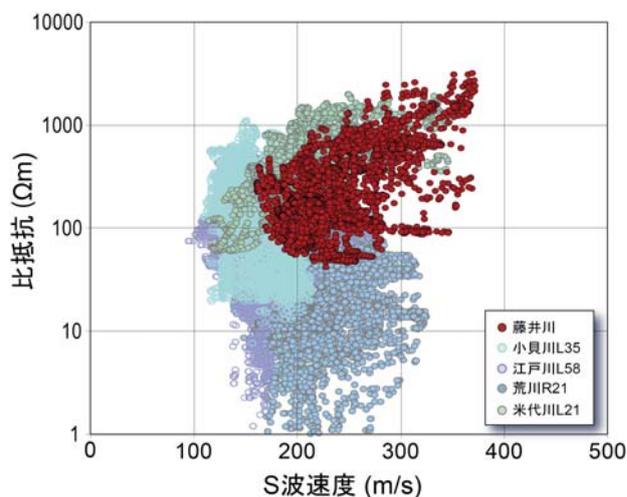


図-10 藤井川L010測線部の計測物性の分布と他河川との比較

る。計測物性では低比抵抗高S波速度部に相当し、低透水帯と評価される。これらから、この区間の川裏側堤防のり尻で認められた漏水は、堤体浸透によるものではなく、降雨浸透が排出された可能性が高いことが推定された。

2.5 飯島樋管部における統合物理探査

利根川左岸約42K付近の香取市石納地先に位置する

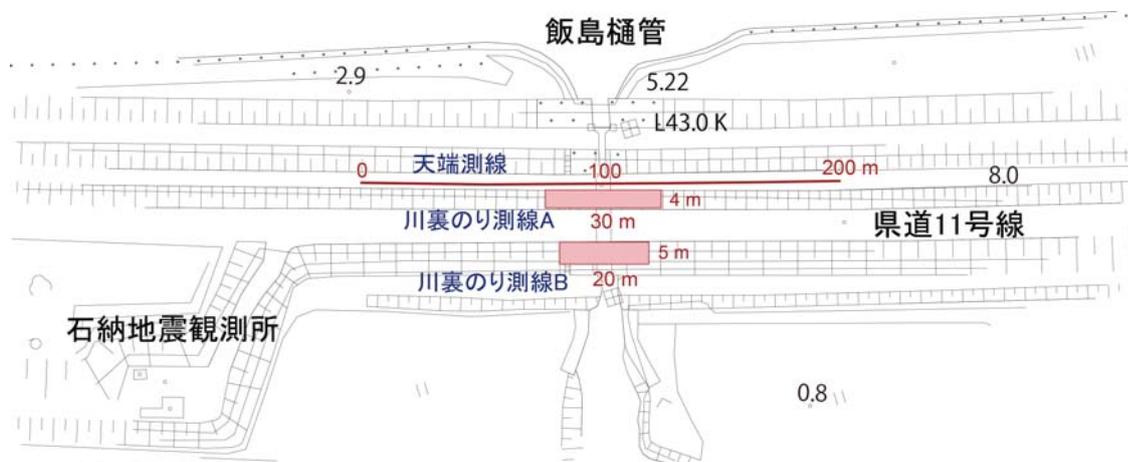


図-11 利根川左岸42K付近飯島樋管部における統合物理探査測線位置平面図

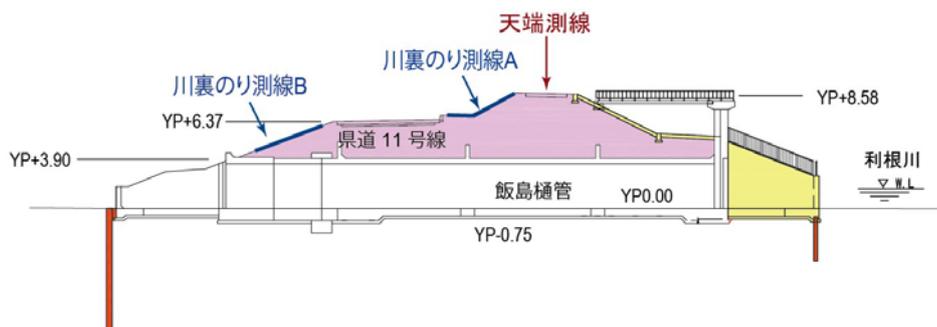


図-12 飯島樋管部における統合物理探査測線位置断面図

飯島樋管は、東日本大震災によって樋管直上の堤防道路で約14cm、川裏側取付護岸で最大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け替える復旧工事が予定された。そこで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。なお開削前の現地計測は2012年3月初旬に実施されたが、関東地方整備局の堤防復旧技術検討委員会の現地見学会の視察対象として組み込まれ、統合物理探査技術の普及の機会としても位置づけられた。

開削前の統合物理探査測線の位置を図-11および図-12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。川裏のり測線では電極間隔1mないし1.5mの条件で小規模高密度3D比抵抗探査を実施した。打設電極数は川裏のり測線Aでは5列100本、川裏のり測線Bでは6列120本であった。

開削前に天端測線で実施した統合物理探査結果断面を図-13に示す。同図ではまず、比抵抗断面(同図(b))において樋管の上部が他の区間とは大きく異なっていることがわかる。具体的には、比抵抗が600Ωmと高い値を示す。一方でS波速度は100m/s程度と極めて低い。こ

のことは、樋管の周辺、特に天端下の樋管上部の部分がかなり緩んでいることを示唆している。ただし、樋管施工時にゆる砂・粗粒材料を使用し締固めが不充分であった、あるいは地震後の緊急対策として実施したグラウト工事の影響で高比抵抗になった、可能性も残されていた。しかし地震後のグラウト注入は小規模(川裏側3孔合計830L)であったことからその影響は小さく、通常は低比抵抗になることから原因からは除外される。地震時に堤体が緩んだか否かについては地震前の探査比較データが存在しないため判定が困難である。樋管部に他とは異質の材料が使用されていることを捉えているか、については開削によって明らかにすることができる。そこで開削前の統合物理探査結果の評価段階では原因の特定は捨象し、特徴的な物性構造の空間的な分布をわかりやすく表現するために、ゆるみ度評価断面図を作成した。この図では堤体部(深さ8.3m以浅)に対してはS波速度140m/s、比抵抗250Ωmを基準値として断面を4区分し、高比抵抗低S波速度部を「赤」で、高比抵抗高S波速度部を「黄色」で、低比抵抗低S波速度部を「水色」、低比抵抗高S波速度部を「青」で色分け表示している。赤および黄色で示されている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。なお地下水で飽和しているとみなすことが可能な基礎地盤部分に対してはS波速度140m/s、比抵抗100Ωmを基準値としている。

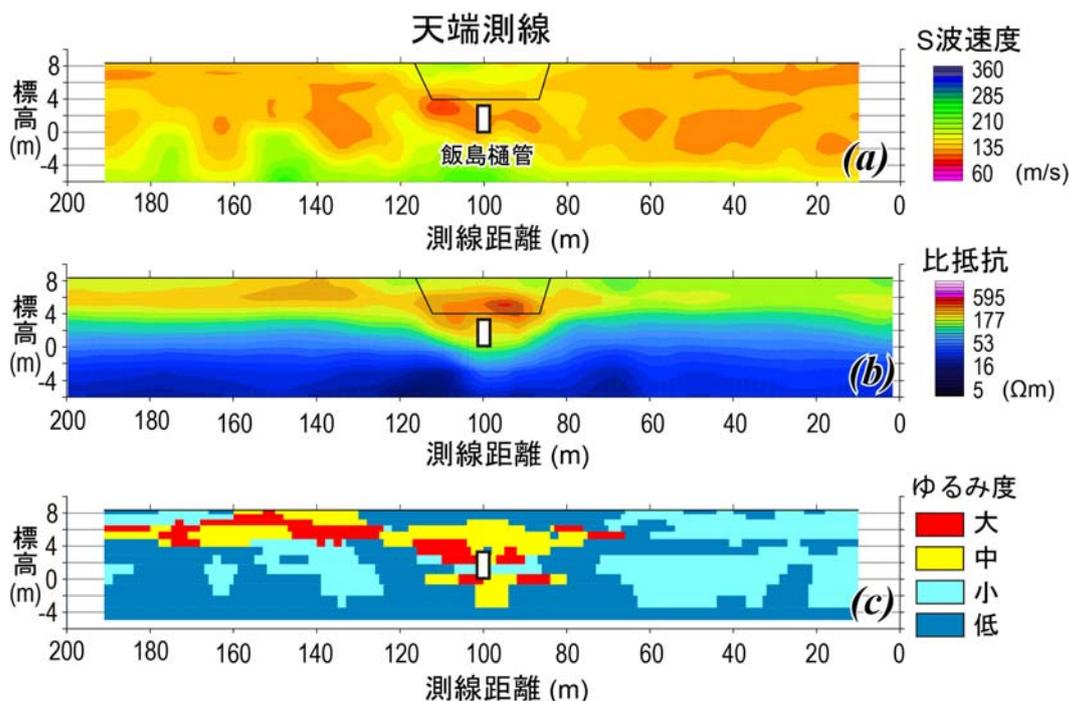


図-13 飯島樋管部開削前天端測線統合物理探査結果断面図。(a):S波速度断面; (b):比抵抗断面; (c):ゆるみ度評価断面

堤防天端からの統合物理探査によって、樋管直上部、かつ上流側肩部が最も緩んでいるか、他とは異質な材料が使用されていると推定した。この推定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。また開削後の堤体観察によっても確認された。以上を、図-14を用いて説明する。

図-14(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、裏のり部のうち、最も天端に近い縦断方向の測線下の比抵抗断面である。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見える。この特徴は図-13(b)に示した天端からの探査結果ともよく一致していた。図-14(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、表面のふい抵抗マップを作成した。その結果を図-14(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確度で捉えることができることを示している。

3. 堤防システムの浸透安全性・耐震性評価への統合物理探査技術の適用性

3.1 全線的調査の位置づけ

堤防システムの浸透に対する安全性は、局所的な高透水ゾーンが存在に支配されることは明らかであり、現行の堤防詳細点検においても基礎地盤および堤体の内部透水性分布を仮定して2次元あるいは3次元の非定常浸透流解析を適用する手順が標準化されている。また東日本大震災による堤防システムの被害は特定の箇所が生起しており、その原因が特定の基礎地盤構造あるいは堤体内部構造にあるという仮定は極めて合理的なものとして受け入れられている。しかし現行の堤防概略点検、詳細点検は、そのような弱点箇所を抽出するには問題があり、より効率的かつ高確度で弱点箇所を抽出可能な調査技術の開発とその現地適用が求められてきた。その際留意すべきこととして、堤体を構成する材料も基礎地盤も基本的に

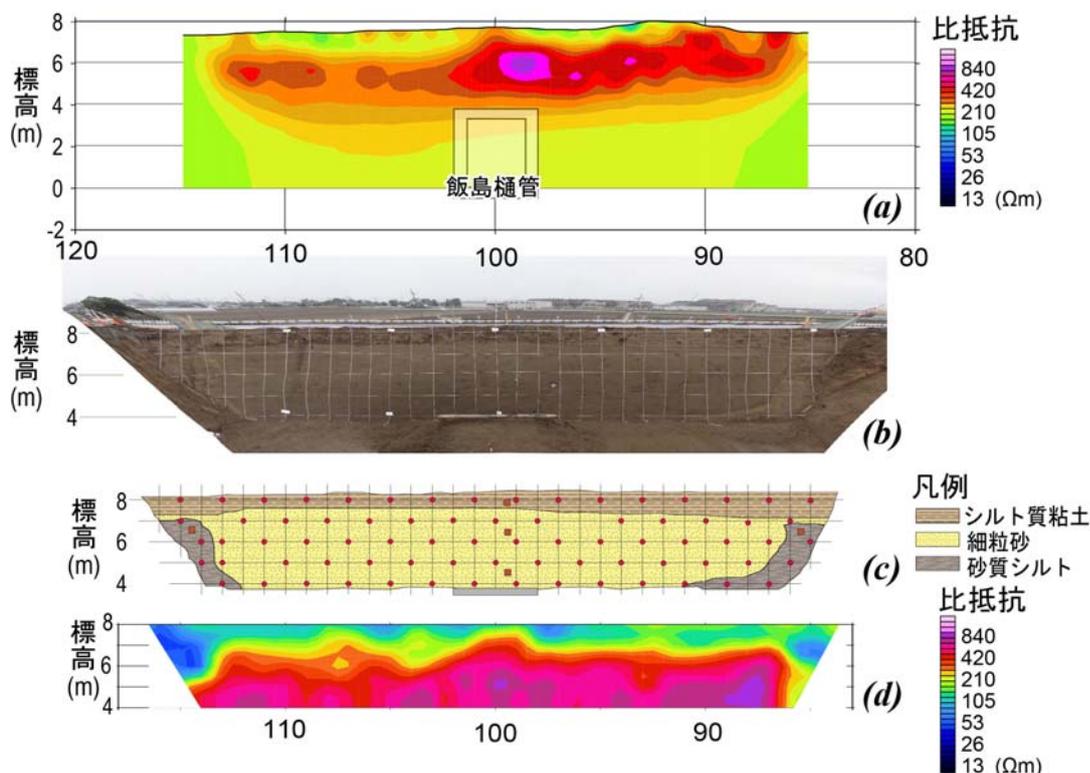


図-14 飯島樋管部天端縦断方向開削前後探査結果比較。(a):開削前川裏のり A 測線比抵抗断面; (b):開削面モザイク写真; (c):開削面地質スケッチ; (d):開削面比抵抗マップ

は未固結かつ不均質な土であることがあげられる。土質材料は本質的に均質ではなく、その強度や物性をコンクリートや鋼材のように確率論的に推定することができない、という材料特性がある。特に堤体部は人工的に構築されているため、この不均質性の程度が著しくなる。不均質性の程度やその空間的分布を記載することができない場合、サンプリングによる全体の特性の推定、いわゆる標本抽出法は適用できない。特に安全に対する材料特性を評価しようとする場合、不均質材料は「最小律」の概念が採用されるべきである。堤防システムの浸透に対する安全性、耐震性を評価する場合においても、最小律の概念に従い、最も安全性が低い箇所を特定し、その箇所の安全性を定量的に評価し、対策の要否とその経済的工法を提案することが求められる。

一般的に材料の安全性等の評価には、標本抽出法を適用すべきではないことは広く受け入れられている。農産物の残留農薬調査がその典型で、非破壊あるいは低侵襲性的手段で全数が調査される。健康診断や各種試験検定も全数調査の典型例としてあげられる。河川堤防に対する統合物理探査の適用は、これらと同様に非破壊的全数(全線)調査として位置づけられるものである。

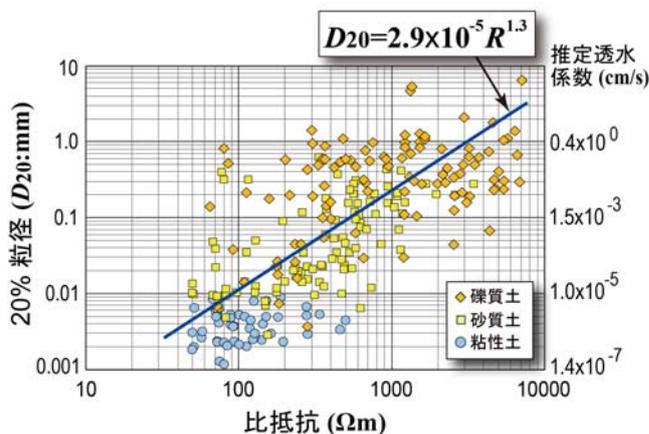
3.2 統合物理探査による弱点箇所の抽出

不均質集団に対する全数調査手法には、いくつかの制約条件がある。最も重要な条件は、その調査によって対象集団あるいは構成要素の特性が変化することを最小限にとどめる、という点であり、上述のように非破壊あるいは低侵襲性の手法であることが前提となる。加えて調査によって対象集団の特性を的確に把握できるものでなければならない。母集団の不均質性に対する感度が低い、あるいは直線性が確保できない手段は適当ではないことは言うまでもない。河川堤防に対する全数調査法についても、

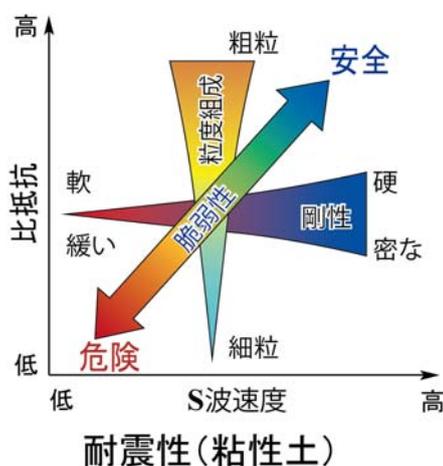
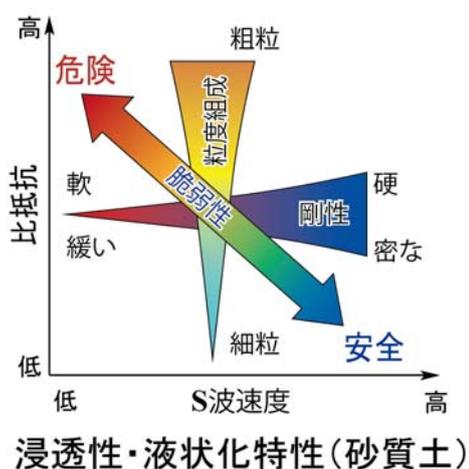
- 1) 非破壊あるいは低侵襲性の計測手法であり、堤防の安全性に影響しないこと
 - 2) 測定作業から結果出力までのトータルコストが低いこと
 - 3) 現地測定の作業性がよく、測定装置の操作が容易で、データ解析処理も簡便であること
 - 4) 探査深度 20m 程度までを対象とする探査法であること
 - 5) 堤防の弱部となる異常部を識別できる十分な構造分解能を有すること
 - 6) 堤防の安全性評価に必要な物性情報(特に S 波速度および比抵抗)の連続イメージングが可能であること
 - 7) 測定装置および解析ソフトが入手可能で、技術的ノウハウが開示されていること
- という条件が提唱されており²⁾、これらを満たす手法とし

て表面波探査と牽引式比抵抗探査またはスリングラム法電磁探査とを組み合わせる統合物理探査が提案された。

統合物理探査で計測される物性情報は堤防システム内部の S 波速度と比抵抗値である。これまでの検討解析



図一15 比抵抗と 20%粒径を介した透水係数との関係



図一16 統合物理探査結果に基づく浸透安全性・耐震性評価の概念図

によってS波速度値は標準貫入試験によるN値とも相関性があり、また間隙率などの土質特性とも高い相関性を有することが知られている⁸⁾。また比抵抗値は対象の含水状態に大きく影響されるものの、全体として透水性と相関を有することがわかっている(図-15)。

これらの関係から、堤防システムの浸透に対する安全性と耐震性を評価する。この評価における管理基準の考え方を示したものが図-16である。S波速度が小さく、比抵抗が大きき値を示す断面領域で砂質土が分布すると想定される箇所は浸透に対する安全性が低いと評価する。地下水位以深の場合、地震時の液状化に対する安全性も低いと判断する。一方S波速度が小さく、比抵抗も小さな値を示す断面領域で粘性土が分布すると想定される場合は耐震性が低いと判断する。これらの判断基準となるS波速度値と比抵抗値については、現段階では相対的な閾値を各河川において設定しているが、より広範囲に統合物理探査を適用し、それらの結果を蓄積してデータベースを構築し、堤防システムに対する各種土質試験結果等と比較検討することで、より系統的な評価基準を設定することが可能になると期待される。

4. まとめ

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方のみならず関東地方でも多くの堤防区間で深刻な被災が発生したが、そのなかには以前に統合物理探査を適用していた堤防区間も含まれていた。そこで地震後に同一堤防区間で再計測を実施したところ、同手法によって被災区間を物性的に特徴づけられることがわかった。これらを含め、23年度内に11堤防区間で統合物理探査を適用し、地震被災箇所の詳細イメージとその物性的特徴に基づく被災のメカニズムの解明を試みた。その結果、被災箇所の基礎地盤の多くが低S波速度かつ低比抵抗で特徴づけられること、被災箇所の多くが旧河道や樋管横断部に位置しており、その場合堤体部が他の箇所と異なる特徴的な物性構造を有していること、が明らかになった。土木研究所において開発・実用化を進めてきた統合物理探査技術は、当初浸透に対する弱点箇所の効率的把握を目的としていたが、地震後の損傷の有無の把握、さらに

は耐震性の評価にも有効であることがわかった。

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) 稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会(2010):「河川堤防安全性評価のための統合物理探査適用の手引き」のとりまとめと刊行について, 物理探査学会第123回学術講演会講演論文集, 239-242.
- 5) 関東地方整備局・地盤工学会(2011): 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書, 65p.
- 6) 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.
- 7) 稲崎富士(2011):物理探査による東日本大震災被災堤防の物性的特徴, 物理探査学会第125回学術講演会講演論文集, 17-20.
- 8) 稲崎富士(2008):高精度S波速度検層データを指標とした沖積層の堆積環境と工学的特性の検討, 第四紀研究, 47, 121-138.

RESEARCH ON THE SEEPAGE AND SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF LEVEE SYSTEMS BY MEANS OF INTEGRATED GEOPHYSICAL INVESTIGATION

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Geology and Geotechnical

Engineering Research Group

(Geology)

Author : INAZAKI Tomio

Abstract: Levee systems situated not only in Tohoku Region but also in Kanto Region were severely damaged at many places by the 2011 off the Pacific Tohoku Earthquake of magnitude (Mw) 9.0, which occurred on Friday, 2011 March 11. Since 2005, the author has conducted integrated geophysical investigations for the safety assessment of levee systems at 32 actual levee sites. Among them, two sites were heavily damaged by the Earthquake just at anomaly parts characterized by low S-wave velocity and low resistivity both for levee body and substrata. After the Earthquake, urgent geophysical surveys were applied to 11 levee sites to evaluate the capability of the integrated geophysical investigation for the seismic vulnerability assessment as well as seepage assessment. As a result, the low S-wave velocity and low resistivity zone was again identified just at the damaged part, especially for the substrata. In addition, the field surveys eventually demonstrated the practical usefulness of the geophysical investigation for the seismic vulnerability assessment of levee systems.

Key words: Integrated geophysical investigation, the 2011 off the Pacific Tohoku Earthquake, vulnerability assessment, resistivity, S-wave velocity.