

2.2 堤防弱点箇所内部物性構造詳細評価技術の開発

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 22

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】

長大な管理区間延長を有する河川堤防の改修・維持管理を効率的に推進するには、要改良区間すなわち弱点箇所を効率的かつ高確度で把握することが可能な現地探査技術の開発実用化が求められていた。これまでの研究の結果、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法電磁探査を組み合わせた統合物理探査を適用することによって、堤防縦断方向に存在する数 10m 規模の異常部までを検出することが可能であることがわかってきた。そこでこの統合物理探査を加速的に普及展開することを目的として、関連する技術的情報を「手引き(案)」として取りまとめた。本手引き(案)には、河川堤防の特徴と被災の実態、河川堤防の安全性評価に適した統合物理探査の目的、統合物理探査の測定およびデータ処理手順、さらに地盤性状の異なる 5 河川での適用事例が記されている。次に、検出した弱点箇所の内部物性構造をより詳細に把握することが可能な調査計測技術の開発・現地適用実験を進めた。22 年度はその一環として、評価する地盤工学指標である透水性と剛性について、実データに基づいた解析検討を行なった。また堤防開削部において堤体部分の詳細比抵抗探査を実施し、開削前に実施した統合物理探査結果と比較検討した。また河川堤防周辺の 3 次元基礎地盤構造の把握、特に旧河道部の検出を目的とした 3 次元物理探査を実施し、その適用性について検討した。

キーワード：河川堤防、弱点箇所、統合物理探査、透水性、剛性

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。既往の被災事例を検討すると、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。また 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、東北関東地方で多くの堤防が被災したが、その一部は旧川横断部などの地形的弱部以外でも発生した。これらのことは、従来の点検調査手法では堤体と基礎地盤の不均質構造に由来する弱点箇所を的確には検出することが困難であることを示唆しており、このような弱点箇所を高い確度で検出することが可能な調査計測手法の開発が求められていた。

これまでの研究の結果、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

リングラム法電磁探査を組み合わせた統合物理探査を適用することによって、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ことを明らかにしてきた^{1, 2)}。さらに手法の普及展開をはかることを目的とし、現地適用過程および解析評価過程のマニュアル化を進めた³⁾。

ところで河川堤防の安全性評価には、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詳細点検を実施し安全性を照査する、という手順が採用されている。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、全延長にわたる目視観測、局所的な確認ボーリングおよびボーリング孔を利用した浸透特性計測などが採用されている。しかし堤体および基礎地盤は前述のように本質的に不均質であり、局所的な点検で得られた物性情報をどの程度の区間の代表値とするか、代表値として適当であるか、すなわちより問題のある物性を有する箇所が点検箇所近傍に存在しないか、を評価する手順は明確になっていない。こ

れには堤体および基礎地盤の物性構造を空間的に把握することが可能な調査計測技術の適用開発と、物性情報自体についての検討が必要とされる。そこで河川堤防詳細点検で実施される現場透水試験の計測データを収集し、土質特性および物理探査によって得られる物性との関連性について検討した。また堤防開削部において実際に堤体内不均質構造を観察するとともに高密度の物理探査を適用し、得られた物性情報と不均質構造や土質特性との関連性について検討を加えた。その結果、現場透水試験法は水位制御手法によって、透水係数の算定値に有意の差異が認められること、従来多用されている Creager の式⁴⁾ は、透水性推定に問題があることがわかった。そこであらたに細粒分の影響を考慮した補正式を提案した⁵⁾。この補正式を用いることによって、粒度特性データから透水係数の推定精度を向上させることが可能となった。また開削部での現地調査の結果、高密度物理探査によって、堤体内部の不均質物性分布を詳細に把握できることがわかった。

堤防は線形構造物であるが、基礎地盤は空間的な広がりをもっており、したがってその不均質構造の把握には本来的には3次元的な調査解析が必要とされる。これまで統合物理探査の適用にあたっては、堤防縦断方向の2次元的な不均質構造調査を主としてきたが、3次元的な探査による堤防周辺基礎地盤

の不均質構造、特に堤体の浸透安全性に影響する旧河道の検出を試みた。その結果、統合物理探査を構成するスリングラム法電磁探査を用いて対象領域を面的に測定することで、浅部基礎地盤の3次元的不均質構造を把握することが可能であることがわかった⁶⁾。

2. 調査研究成果

22 年度に実施した計測調査実験および既往データ解析検討の概要を以下に示す。

2.1 統合物理探査による耐震性評価

開発した統合物理探査の解析にあたっては、計測物性値から堤防および基礎地盤の浸透に対する安全性を評価することを前提としていたが、S波速度分布を求めることから、当初から地震に対する安全性も評価することが可能であることを指摘していた⁷⁾。2011年3月11日に発生した東日本大震災では、東北関東地方で多くの堤防が被災したが、以前に統合物理探査を適用していた堤防区間でも深刻な被災が発生したことから、既往探査結果の再解析を試みた。図-1にその結果を示す。堤防被害区間は約100mで、放棄河道直上で発生していることがわかる。他にも数箇所放棄河道と交差するが、この区間はS波速度および比抵抗値から4区分した安全性評価断面(同

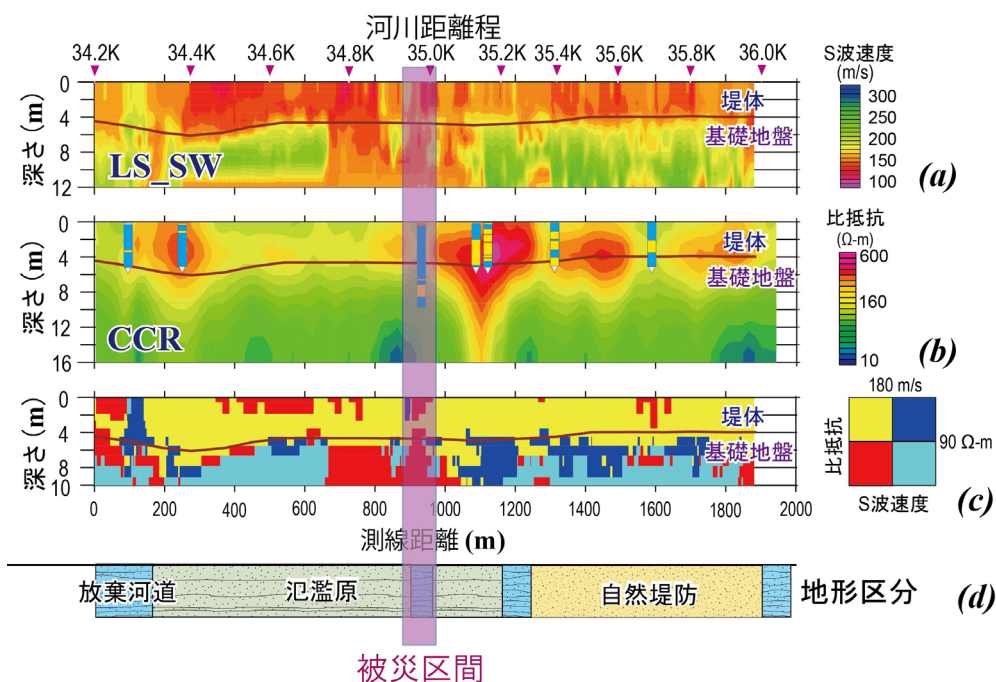


図-1 東日本大震災被災堤防区間における統合物理探査結果の再解析。(a) : S 波速度分布, (b) : 比抵抗分布, (c) : S 波速度および比抵抗値 4 区分による地震安全性評価断面 (d) : 地形区分。

図(c)では基礎地盤部も堤体も赤色（S波速度<180m/s; 比抵抗<90Ω-m）の占める割合が最も高くなっている。

統合物理探査で求められる物性値のうち、S波速度値はN値すなわち地盤剛性と相関性が高いことが知られており、高精度で測定されたS波速度データを用いた推定式が提案されている⁸⁾。また既往データの解析検討によって比抵抗値と粒度特性データとの相関も明らかになった⁹⁾（図-2）。これらの関係を用いることで、物理探査計測物性値から、粒度特性および地盤剛性を説明指標として準定量的に河川堤防の浸透に対する安全性、あるいは耐震安全性を評価することが可能となる。図-3にその概念図を示す。この図は、計測されたS波速度値と比抵抗値とのクロスプロットを解析し、特定の値で区分することで安全性を区分評価する手順が示されている。図-1(c)に示した例では、S波速度値：180m/s、比抵抗値：90Ω-mを用いて測定データを4区分しその空間分布を示しているが、赤色で表示された、耐震安全性の最も低いと判定されたゾーンが、実際に被害のあった堤防区間内において堤体内部にも基礎地盤にも連続して出現していることが表されている。なお上述の基準値は、ケーススタディとして採用したものであり、どれだけ普遍性があるかについては現時点では不明である。被災堤防区間での統合物理探査の新たな適用、あるいは既適用データを再解析することによって、より客観的な基準値を得ることができると期待される。

2.2 透水特性データの統計的解析

河川堤防の浸透破壊に対する安全性照査として、基礎地盤のパイピング破壊に対する安全性を非定常浸透流解析と円弧すべり計算によって求める手順が設定されており、入力パラメータとして必要な透水係数は現場透水試験によって求めることとされている。その現場透水試験には、単孔式による注水法および回復法試験が一般的に採用されている。しかし注水法によって求めた透水係数と回復法によって求めた透水係数が、同一孔同一深度での試験に関わらず、異なる値を示す場合があることが指摘されていた¹⁰⁾。室内と現場での透水試験結果にも有意の差異が認められるという指摘もなされている。透水試験の測定データがどの程度信頼できるものであるのか、計測手法による差異が何に起因しているのか、等を明らかにするために別途収集していた地質調査報告

書の中から現場透水試験および土質試験データを約1000セット抽出し、統計的解析を試みた⁵⁾。現場透水試験はピエゾメーター法によるもので、大きく注水法と回復法に区分される。図-4は収集したデータセットの中から同一孔・同一深度で実施された回復法と注水法による試験結果を抽出して比較したものである。同図ではデータの90%以上が1:1のラインの下方に分布しており、注水法による試験結果が、回復法による試験結果よりも1桁ないし2桁程度小さな値を呈することが明瞭に示されている。この測定法

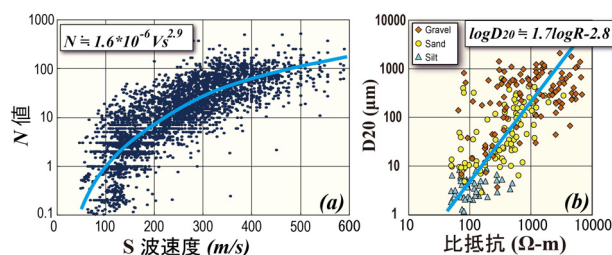


図-2 物理探査計測物性値と地盤剛性(N値)および粒度特性との相関。

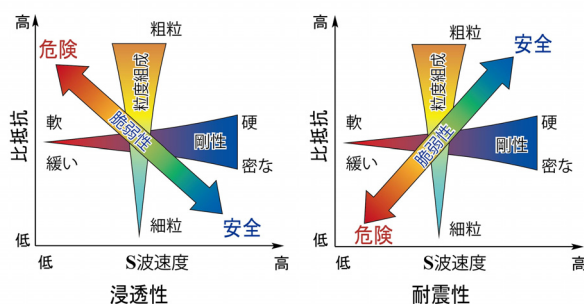


図-3 粒度特性および剛性を説明指標とした物理探査計測物性値からの浸透安全性(左)、耐震安全性(右)の準定量的評価。

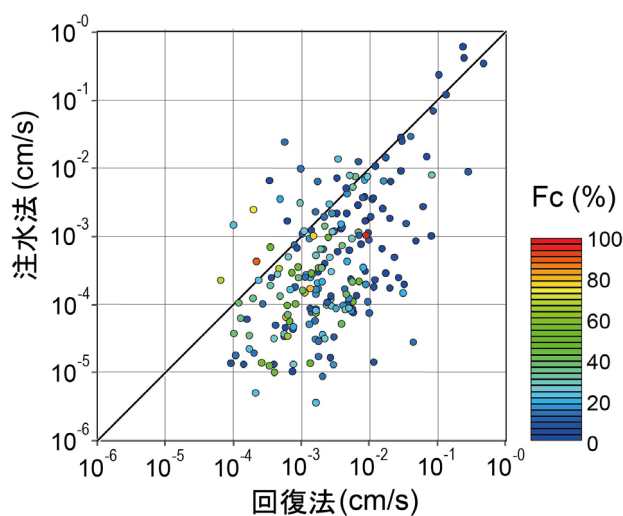


図-4 同一深度で実施された現場透水試験結果の比較⁵⁾。

間に生じる差異の原因については、細粒分による注水時の目詰まりの影響と考えられる。そこで以下の解析においては回復法のデータのみを使用することとした。

現場透水試験はその実施に経費と手間を要することから、一般に他の土質特性から推定されることが多い。最も普遍的に使用されている推定法に Creager の式⁴⁾がある。同推定式では粒度特性のうち D20 を用いている。そこでまず Creager の式から推定された透水係数(Kc)と、回復法により得られた透水係数(Kr)とを対比した(図-5 左)。この図に示されるように、Creager による推定透水係数(Kc)は現場透水試験結果(Kr)と比べると粗粒の砂礫では高い値を示し、逆に細粒のシルトで低い値を示す。回復法による現場透水試験結果は、砂礫のような高透水部については、測定上の問題からやや低く測定されている可能性はあるが、砂・シルトで Creager による推定透水係数よりも高い値を示す理由は細粒分の影響を過大に見積もっていることにあると考えられた。そこで現場透水試験結果(Kr)と Creager の式による推定透水係数(Kc)との比をとり、細粒分含有率(Fc)との関係を検討してみた。結果を図-5 中に示す。対数で表示した細粒分含有率と透水係数比には2次曲線で表すことが可能な正の相関が認められる。したがってこの2次相関式を用いることにより、細粒分含有率を指標として Creager の式による推定透水係数の乖離を補正することが可能となる。細粒分含有率で補正した透水係数推定値(Kc')と実測値の比較(図-5 右)では、まだばらつきは大きいものの、両者の差がおおむね1桁以内に収まっていることがわかる。実用的な面から言えば、このような単純な補正であ

っても透水係数の推定には有効といえる。

2.3 統合物理探査普及に向けた「手引き」の作成

開発した河川堤防統合物理探査手法は、簡便で従来技術に比べると適用経費も経済的であり、堤防内部の不均質構造を把握するのにきわめて有効であると考えられた。そこでこの技術を普及展開することを目的として、関連する技術的情報を「手引き(案)」として取りまとめた³⁾。

本手引き(案)は、5章で構成される。まず第1章「総則」では、手引き(案)の目的と運用の範囲が明記されるとともに、使用される技術用語が説明されている。人体に対する健康診断と比較すると、基本測定は概略点検に、サンプル検査は詳細点検に対比される。そして河川堤防に対する物理探査は、胸部X線検査や心電図検査などの装置診断に対比される非破壊調査として位置づけられ、河川堤防の浸透破壊に対する安全性照査における役割が簡潔に示されている。第2章「河川堤防の特徴と被災の実態」では、盛土構造物を主体とする堤防の構造的特徴が概述されており、それに加えて被災の実態、現行の堤防安全管理制度体系、そのなかでの物理探査の役割がまとめられている。第3章「河川堤防の安全性評価のための統合物理探査」では、適用する物理探査の選定基準、目的、現地探査手順、取得データの解析過程とそれに基づいた安全性評価の考え方が詳述されている。第4章「統合物理探査の測定およびデータ処理手順」は、本手引き(案)の根幹部分であり、河川堤防調査における統合物理探査の基本構成要素技術として選定した、

弾性波探査の一種である表面波探査、

電気探査の一種である牽引式電気探査、および

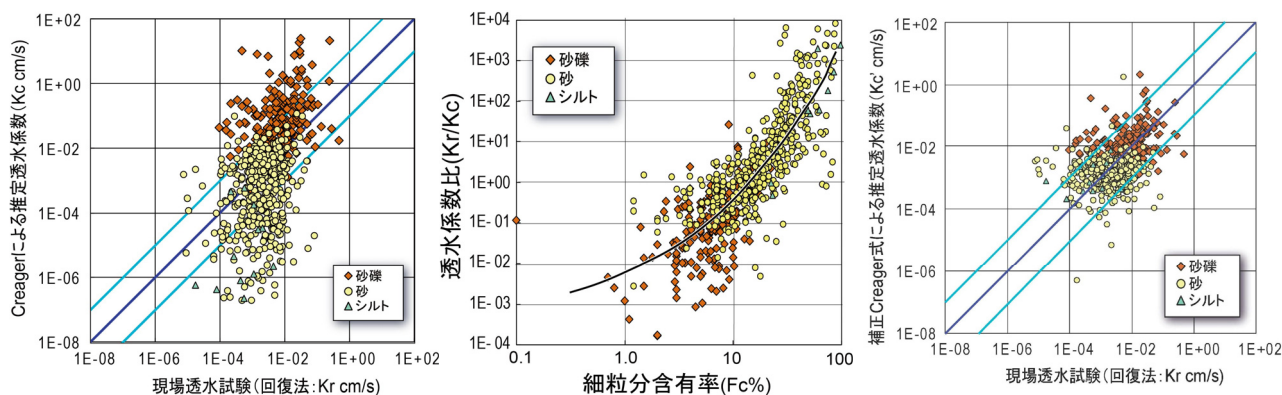


図-5 現場透水試験結果(回復法)と粒度特性にもとづく推定値との比較。

左：実測値(Kr)と Creager の式による推定値(Kc)との比較，中：実測値(Kr)と推定値(Kc)との比と細粒分含有率との関係，右：細粒分補正した Creager の式による推定値(Kc')と実測値(Kr)との関係⁵⁾。

電磁探査の一種であるスリングラム法電磁探査の3手法について、探査原理、測定手順、データ処理、探査結果の評価および成果物に関する技術的事項が項目ごとにまとめられている。最後に第5章「統合物理探査の適用事例」では、地域や河川特性が異なる5つの河川堤防に対して統合物理探査を適用した事例が紹介されている。これには探査結果だけでなく、ボーリング調査結果との対比やクロスプロット解析、その他の既往調査資料の活用方法、ならびに安全性評価の手順が含まれており、今後統合物理探査を実際の堤防調査に適用する際の、報告書の取りまとめの参考になるものである。

なお本手引き(案)については、法人著作物として所内調整ののちに近刊の予定である。

2.4 堤防開削部における詳細物性計測

図-6は、堤防開削部において堤体部の比抵抗分布をマッピングした結果を示したものである。開削地点では、堤体が累積構造を有しており、川裏側から川表側にむけて少なくとも3次にわたって堤体が拡幅・嵩上げされてきた経緯を読み取ることができる。元の堤体部が細粒材料で構築されているのに対し、その後の改築では粗粒材料が使用されていることがわかる(同図上写真)。この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、堤体スケッチに重ね合わせて表

示した(同図下)。比抵抗が堤体内部構造、すなわち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。この開削地点ではさらに簡易貫入試験、小口径ドライホール検層、コア比抵抗計測が実施されたが、その計測結果は詳細比抵抗マッピング結果と調和的であった。

2.5 堤防周辺基礎地盤の3次元比抵抗構造探査

堤防は線形構造物として特徴づけられるが、基礎地盤は空間的な広がりをもっており、したがってその不均質構造の把握には本来的には3次元的な調査解析が必要とされる。これまで統合物理探査の適用にあたっては、堤防縦断方向の2次元的な不均質構造調査を主としてきたが、堤防周辺基礎地盤の不均質構造、特に堤体の浸透安全性に影響する旧河道の検出を目的とした3次元探査を試みた。利用した探査手法は、統合物理探査を構成するスリングラム法電磁探査である。同法は人工雑音の影響を受けやすく構造再現性には劣るものの、開発・適用してきた3種類の手法のうち、最も簡便であり移動計測が容易で少人数で効率的な面的調査を実施することができる。この手法を用い、千曲川右岸堤防56km付近の幅約1km、上下流方向約3kmの区間を対象に比抵抗マッピングを実施した⁶⁾。この手法では同時に複数の周波数に対する地盤の応答を測定することができ、そのデータをもとに3次元的な比抵抗分布を求

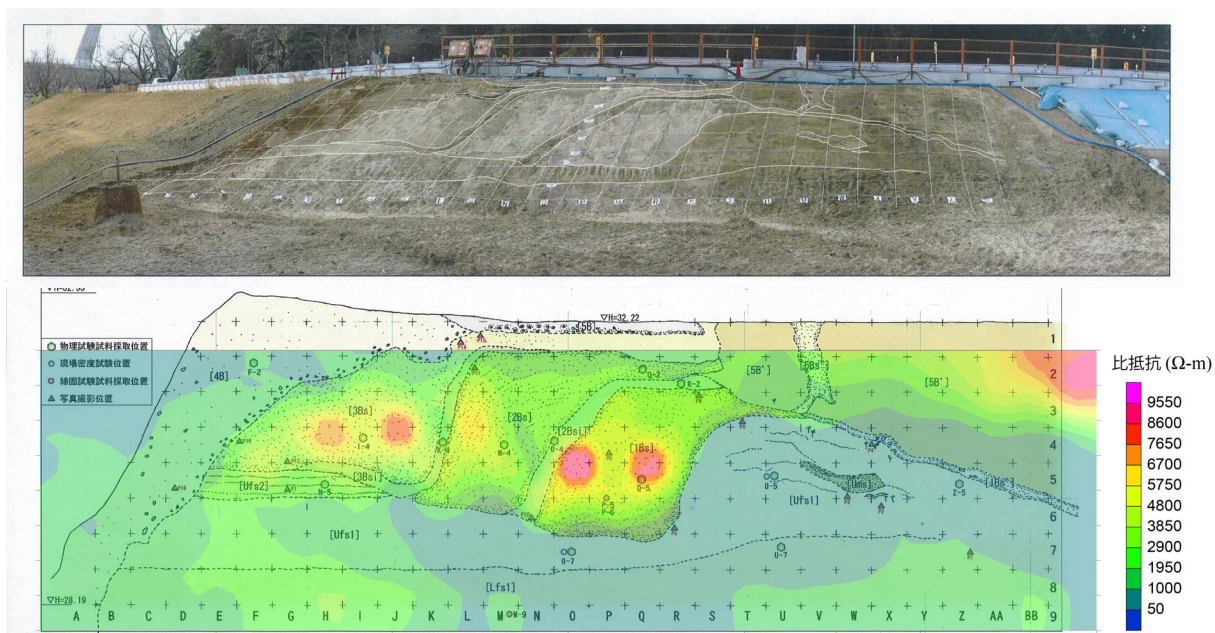


図-6 堤防開削部における堤体上部比抵抗マッピング結果。上：堤防開削断面写真，下：堤体構造スケッチへの比抵抗分布の投影。

めることができる。

測定は高水期の2009年8月と渇水期である同年12月に実施した。対象区域内で測定した約6000点のデータから深度10mまでの各点の1次元比抵抗構造を計算し、これを保管して1m深度ごとのスライス面での比抵抗分布を求めた。

図-7に、渇水期の地表から深さ2mのスライス面の比抵抗分布（同図左）と、高水期の地表から深さ6mのスライス面の比抵抗分布（同図右）を比較して示す。なお同図には空中写真判読によって推定された主要な旧河道の分布が重ねて示してある。同図では堤内地側の地盤の比抵抗が高水期に著しく低下していることが示されている。対象地域の堤内地側には水田が広がり、また千曲川と平行に北流し、図中の上端付近で堤防を交差し千曲川と合流する支流が分布している。灌漑用の地表水によって地下浅部の地下水が涵養されているために堤内地側が全般的に低比抵抗を示すものと考えられた。一方堤外地側の地盤は堤内地側に比べて相対的に高比抵抗となっており、しかも高水期のほうが全体的に高くなっている。外気温、あるいは地温の上昇による比抵抗計測値の相対的低下の影響が表れている可能性がある。ただ堤防を挟んだ両側に低比抵抗部が筋状に連なっ

ている傾向がいずれの断面においても認められる。その位置は空中写真判読によって解釈された旧河道、あるいは洪水流下チャネルの分布と調和的である。以上の解析結果は3次元比抵抗マッピングによって、旧河道や洪水時に形成された一時的なチャネルなど選択的に地下水が流れる部分をイメージングすることが可能であることを示している。

3. まとめ

非破壊で2次元の地下構造を物性分布として捉えることができる物理探査手法は、河川堤防の内部物性構造を把握する方法として有効であると期待される。先行研究によって開発した統合物理探査では、堤防縦断方向において数10m程度連続する物性異常部を検出することが可能であることが示された。このような物理探査手法を詳細構造調査に適用する場合、対象とする弱点箇所における物性異常の空間的な広がりや異常の程度について吟味し、適切な探査手法を選択するとともに測定条件についての検討を加えることが重要である。

22年度は統合物理探査による評価対象である地盤の浸透性と強度について、既往データを収集し統計的な解析を加え検討した。その結果粒度特性から透

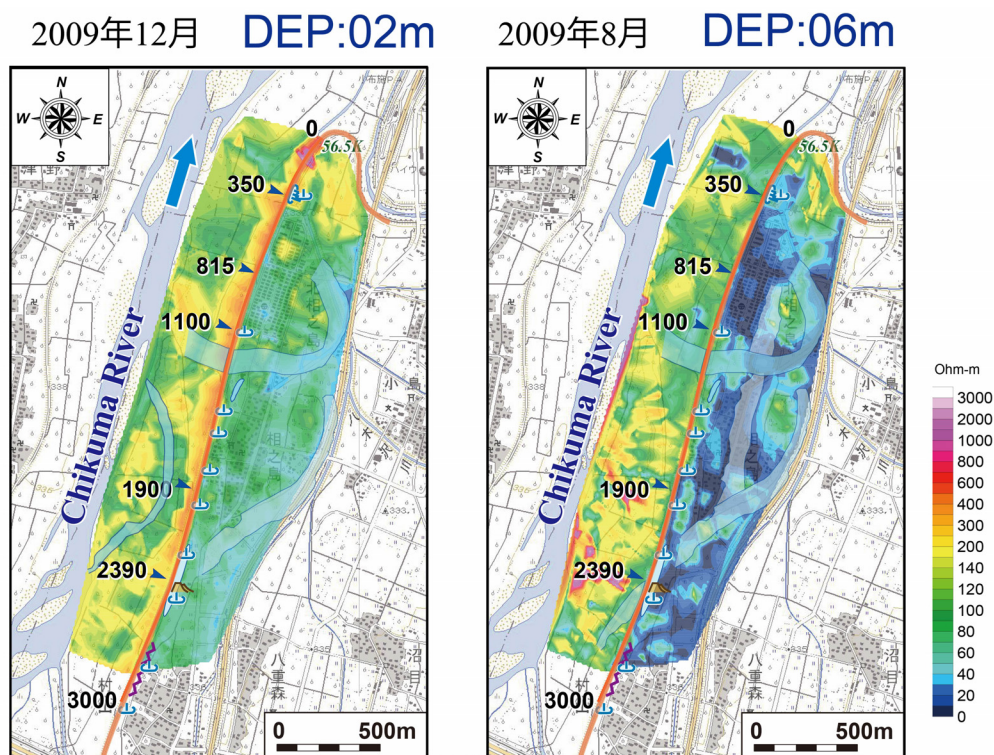


図-7 河川堤防周辺地盤の上部比抵抗マッピング結果。左：高水期浅部(深さ 2m)スライス断面，右：渇水期浅部(深さ 6m)スライス断面。

水係数を推定する際に細粒分に対する補正項を加えることが有効であること、粒度特性をパラメータとして計測物性である比抵抗値およびS波速度値の組み合わせから堤防および基礎地盤の透水性を推定することが可能であることが示された。また東日本大震災で被災した堤防に対する統合物理探査結果の再解析によって、同手法によって堤防の耐震強度分布をイメージし弱点部を抽出することが可能であることが示された。ただし普遍的な管理基準を設定するにはさらなる適用と検討が求められる。

統合物理探査によって得られる堤防および基礎地盤の物性値のうち、比抵抗値は粒度特性に加えて含水状態の影響を強く受ける。逆に季節変動や堤体内地下水存在状態の変動を比抵抗値の変化として捉えることが可能である。一般に細粒粘性土層は低比抵抗で変化率も小さい。これに対し粗粒砂礫層は含水状態によって比抵抗値が大きく変化する。したがって比抵抗値の季節変動あるいは経時変化を3次元的にモニタリングすることで、堤防の浸透安全性に影響する旧河道などのみずみちを的確に検出することが可能となりうる。今後は空間分解能および時間分解能を向上させる手段として、より高密度かつ高速でデータを取得可能な測定装置について検討する計画である。

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，物理探査学会。
- 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・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，物理探査学会。
- 4) Creager, W. P., Justin, J. D. and Hinds, J. (1944): Chap.16 soil tests and their utilization, in *Engineering for dams*, Vol.III: Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, pp.645-654.
- 5) 稲崎 富士・小西 千里(2010)：堤防基礎地盤における透水係数と粒度特性の関係，河川技術論文集，Vol. 16, 377-382，土木学会水工学委員会。
- 6) 三浦 豪・稲崎 富士(2010)：広帯域周波数 EM

プロファイリング装置 GEM 2 による河川堤防周辺比抵抗マッピング例，物理探査学会第 122 回学術講演会講演論文集，293-295。

- 7) 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。
- 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，vol. 47, 121-138。
- 9) 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)，物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集，pp.115-118。
- 10) 平田洋一(1993)：単孔式現場透水試験，地下水学会誌，Vol.35, No.3, pp247-254。

DEVELOPMENT OF HIGH-RESOLUTION MAPPING OF GEOPHYSICAL PROPERTIES OF THE VULNERABLE PART IN LEVEE SYSTEMS

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2009-2010

Research Team : Advanced Technology Research
Group (Special Unit on
Geophysical Exploration)

Author : INAZAKI Tomio

Abstract : Conventional safety assessment of levee systems usually starts from the behavioral segmentation of levee based on the damage events during past floods. Internal heterogeneity along levee body has been rarely taken into account in the segmentation process whereas the heterogeneity and the resultant weak zones in physical properties are the major vulnerability factors. It was because of its difficulty in imaging levee body as well as underlying layers by the conventional measurement techniques. In contrast, geophysical surveying we have developed can delineate such anomalies in the levee systems at low cost and with high performance. To characterize the internal geotechnical structure in delineated weak zone precisely, it is required to develop new techniques or ideas which can conduct the detailed mapping in the zone. Furthermore it is also essential to correlate reconstructed profile data to “ground truth” data. To do this, we tested the detailed resistivity mapping technique to an excavation site of existing levee. In addition, a 3-D resistivity mapping was conducted to identify buried channels around a levee system. Slingram EM method was adopted to obtain EM data of a total of 6,000 points over a 1 km by 3 km area around a levee in rainy and dry seasons in 2009.

As results, close relation was revealed between the excavated slope surface structure and a mapped resistivity profile, which indicated the resistivity is a function mainly of grain size of levee materials. 3-D resistivity map clearly delineated low resistivity zones correlated old buried channels which should be marked as high-seepage potential zones.

Key words : river levees, vulnerable part, integrated geophysics, permeability, stiffness