

2.2 統合物理探査による河川堤防の内部構造探査技術に関する研究

研究予算：運営交付金（治水勘定）

研究期間：平 18-平 20

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】

河川堤防の弱点箇所を経済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を研究対象とし、その適用性・評価基準等を現地実験に基づいて検討してきている。これまでの現地検証実験の結果、牽引型比抵抗探査法とランドストリーマー方式高精度表面波探査法が作業性に優れ、かつその組み合わせによって異常部を効果的に抽出できることがわかってきた。これらの手法の普及展開をはかることを目的とし、現地計測および解析検討の過程のマニュアル化を進めている。20年度はマニュアル化した過程の妥当性を検証するための現地実験を2箇所で行った。また堤体内部の不均質構造をイメージングし、浸透やすべりに関わる物性を把握することが可能な詳細調査技術について、モデル堤防を利用して予察的な実験を実施した。その結果、堤体不飽和帯部の不均質構造の把握と同部での浸透水の動態観測が堤体の安定性評価に不可欠であることが再認識された。

キーワード：河川堤防，弱点箇所，S波速度，比抵抗，浸透

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。既往の被災事例をみても、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。

近年、河川近傍の開発が進み、洪水や地震に耐える強い堤防を整備することが急務となってきている。そのため、何らかの手段で堤防の安全性を評価することが求められる。従来これには、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安全性を照査する、という手順が採用されてきた。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、全線にわたる目視観測、局所的な確認ボーリングなどが採用されてきている。しかしこれまでの地形地質調査の密度や精度では、堤防内部の不均質構造や支持地盤の構造を把握することは極めて困難であり、これに代わる効果的かつ適用が容易な現場計測・調査手法の開発が求められていた。

非破壊的に2次元の地下構造をイメージングすることができる物理探査手法は、このような堤防探査に極めて有効であると期待される。ただし従来の物理探査手法は、対象深度が数10m～数kmと深く、また作業効率の面でも問題があった。そこで本研究は、河川堤防の内部構造と支持地盤の構造把握を対象とし、それを連続的な断面情報として提供可能な物理探査技術について実験的に検討し、同手法の適用上の技術的条件を鮮明化して普及・適用促進に寄与することを目的とした。

調査研究の結果、牽引型比抵抗探査法と土木研究所で開発したランドストリーマー方式の表面波探査法を組み合わせた統合物理探査が堤防探査として有効かつ経済的であることが明らかになった¹⁾。そこでこれらの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。20年度はマニュアル化した過程の妥当性を検証するための現地適用実験を2箇所で行った。また堤体内部の不均質構造をイメージングし、浸透やすべりに関わる物性を把握することが可能な詳細調査技術について、モデル堤防を利用した予察的な実験を実施した。その結果、被災実績を外部指標とした統合物理探査結果断面の区分表示によって、堤体の安全性評価結果を2次元断面情報として提供できること、堤体不飽和帯部の不均質構造の把握と同

部での浸透水の動態挙動観測が堤体の安定性評価に不可欠であることが再認識された。

2. 実験概要

20 年度に実施した現地適用実験およびモデル堤防における浸透水の動態観測実験の概要を以下に示す。

2.1 統合物理探査現地適用実験

開発を進めている統合物理探査手法の普及展開を促進することを目的として、実際の堤防において現地適用実験を実施した。対象とした河川は、能代河川国道事務所が管理する米代川と、黒部河川事務所が管理する黒部川である。このうち米代川での適用実験について概述する。

米代川では、19 年 9 月に上流部で発生した大雨により中下流部で計画高水位を延長 25km の範囲で超過し、多くの箇所が被災した²⁾。その後大規模な復旧工事が進められるに至り、被災箇所の堤体と基礎地盤に対する詳細・高密度の物性情報が集積された。この被災実績および地盤物性情報との対比により統合物理探査の適用性を評価した。

適用した物理探査手法を表-1 に示す。比抵抗探査は、人工的に地盤に電流を流し、この時発生する電位分布を測定して解析を加えることにより地盤の比抵抗構造を求める電気探査手法の一つである。従来の方法では、通電させるために多数の金属製の電極棒を地面にあらかじめ植え込み、結線しておく必要があった。この作業に多大な時間と労力を要するため、1 日あたりの測定はこれまでは数 100m 程度が限界であった。これに対し今回採用した牽引型比抵抗探査では、電極を牽引移動させながら計測が可能で、従来の電極設置型比抵抗探査に比べ極めて高い作業性を期待できる。同探査には、土木研究所が保有するキャパシタ電極カップル型 OhmMapper を使用した。

高精度表面波探査は、表面波の分散特性から表層部の S 波速度構造を再構成する手法であり、土木研究所が開発したランドストリーマーを活用することで現場計測作業を高速化することが可能となった。通常の物理探査の計測では、一度に計測する区間は限られており、連続的な探査を実施するにはセンサ類を測線上で移動させることが必要である。従来の表面波探査ではセンサを地面に固着させて信号を取得していたため、移動に伴ってセンサ類を設置し直す手間をかけなければならず、作業性に問題があっ

表-1 適用物理探査手法

探査手法	ツール	計測物性	探査深度
牽引型比抵抗探査	OhmMapper	比抵抗	<12m
高精度表面波探査	Land Streamer	S 波速度	<15m

表-2 探査適用堤防

堤防	測線位置	実距離	被災概要
OGT07L	天端/小段	550/360m	無被害
TBN21L	天端/小段/法尻	1600/900m	湧砂多発
TRK42R	天端/法尻	1250/1250m	局所湧砂

た。これに対しランドストリーマーは、多数のセンサを一体化し人力での牽引を可能にしたものである。同ツールではセンサはベースプレートを介して地面と接地しているだけあるので、移動・再設置の手間を短縮でき、作業効率を大幅に向上させることができる。

統合物理探査は、表-2 に取りまとめた 3 区間の堤防で実施した。このうち TBM21L 堤防区間は H19 洪水では堤内地側で基盤漏水に起因する湧砂が多発した。また TRK42R 堤防では、区間最下流部の川裏側で小規模な湧砂が発生したほか、部分的に堤体漏水が認められた。測線は基本的に天端と川裏側小段あるいは法尻部の管理用道路等に設定し、原則として同一測線上で牽引型比抵抗探査と高精度表面波探査を適用することとした。

2.2 モデル堤防での堤体浸透動態観測

土木研究所構内に築造されていた大型堤防モデルを用い、堤体内への水の浸透状況をモニタリングする手法の検討を目的とした繰り返し物理探査を実施した。この堤防モデルは、土質チームが平成 18 年から進めていた堤体内水位観測手法の検討のための共同研究で使用されたものである。共同研究の終了にあたり、予定されていた埋設機器の回収と堤体の解体作業に先立って浸透破壊実験が計画された。

大型堤防モデルの断面図を図-1(a)に、平面図を同図(b)に示す。モデル堤防は、堤高 3.0m、堤長 20m、のり面勾配 1:2.0 の半断面形状を呈し、基礎地盤として低透水性の関東ロームを 0.5m 厚で敷設後、茨城県江戸崎産の山砂を用いて 20cm 毎に転圧・築層された。堤体部の締固め度は 80-91%、透水係数は $2 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-4}$ と見積もられていた。

実験ではモデル堤防背面の給水槽の水位を制御し、

堤体内に背面からの浸透流を発生させた。また天端直下のり肩の一部区間（約 8m）に散水を施した。使用ポンプ容量および有効散水面積から、局部的に時間雨量換算で 60mm 程度の負荷を加えたと推定される。水位制御グラフおよび散水時間を図-2 に示す。まず 0 日目 18 時より 2 時間かけて実験時の堤体背面水位を基盤上面からの比高 2.3m まで上昇させた。この水位を 36 時間維持した後、さらに 20cm 上昇させ比高 2.5m とし、実験終了時点までこの水位を維持した。のり肩部散水は 2 日目 14 時より開始し、3 日目 09 時まで継続した。なお実験期間中に降雨は観測されなかった。

地表設置電極による二次元比抵抗探査と堤体内設置電極アレイを用いた比抵抗トモグラフィ探査の 2 種類の繰り返し電気探査を実施し、モデル堤防内部の比抵抗経時変化を測定した。

モデル堤防の、のり肩部、天端から 0.5m 下方ののり面に 50cm 間隔で 37 本の電極を設置し（図-1）、測線下方深さ 2.5m までの比抵抗構造とその経時変化を 1 時間ごとに測定した。また天端から 1m 離れたのり面に 5 本の電極アレイを設置し、二次元の比抵抗トモグラフィ探査を実施した。まず簡易貫入試験機等を用いて深さ 2.5m 程度の小孔を掘削し、その中に小口径のドライホール用電極アレイを挿入した。この電極アレイには、10cm 間隔でボタン電極が配置されている。特定の電極間の比抵抗と浸透による経時変化を 1 時間ごとに測定した。これらの電気探査に加え、堤体のり面の変状をモニタリングすることを目的として 3D レーザースキャナによる繰り返し高密度面的測量を実施した。期間中に取得した測量データは 71 ファイルに達した。この測量によって、モデル堤防法面部に対して、ほぼ 10cm×10cm 間隔の DEM データを得ることができた。

3. 実験および検討結果

3.1 統合物理探査現地適用実験結果

現場計測作業は 20 年 11 月に実施した。適用した 2 種類の探査のうち、牽引型比抵抗探査は直営で実施し、高精度表面波探査については計測作業を委託し、現地での技術管理の内容とその方法によって取得データの品質がどのような影響を受けるかについて検討を加えた。

図-3 は、米代川 TBN21L 堤防区間で実施した統合物理探査によって求められた、基礎地盤部の S 波速度と比抵抗との関係をクロスプロット表示したも

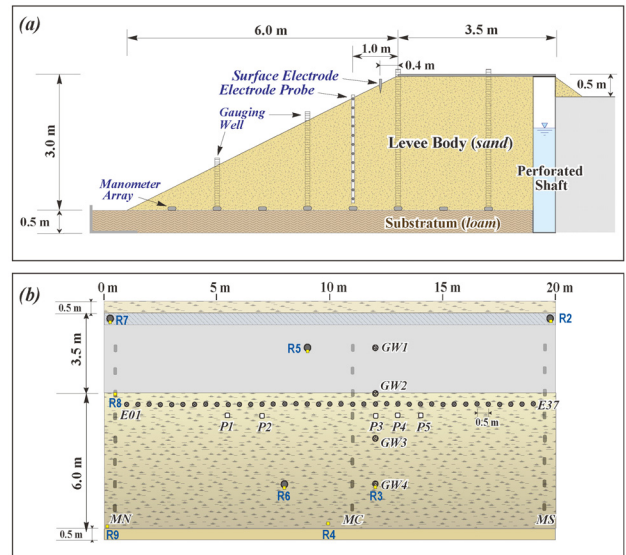


図-1 モデル堤防の形状および計測機器配置

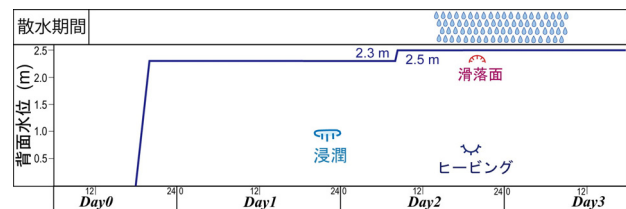


図-2 水位制御および表面散水実績

のである。一般的に、S 波速度が大きいほど比抵抗も大きな値を示す傾向がある。S 波速度は地盤材料の密度・締固め度と関係する物性であり、また比抵抗は含水率と粒度組成に依存する物性であることが分かっている。ただし本現場計測作業時点では、当該堤防区間では堤防復旧強化工事が施工中で、地下

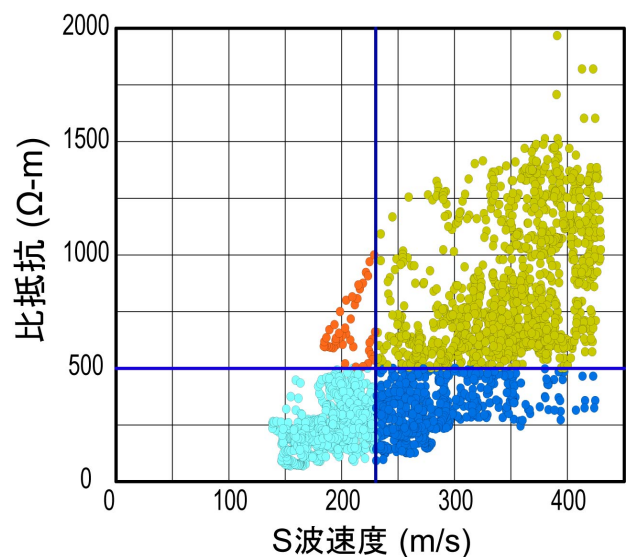


図-3 米代川 TBN21L 堤防区間における S 波速度と比抵抗との関係

水位が低く保たれていたことから、基礎地盤部は基本的に不飽和であり、比抵抗値に対しては粒度組成の影響が強く表れている想定された。したがって高 S 波速度・高比抵抗は砂礫などの粗粒で締まった堆積相に、低 S 波速度・低比抵抗はシルトなどの細粒で緩い堆積相に対比される。一方高比抵抗でありながら S 波速度が相対的に低いデータセットは、粗粒ではあるが緩い堆積相に対比される。

ところで比抵抗と粒度組成との間には、図-4 に示すように一般的に片対数図上で直線関係が認められる。粒度組成の代表値、例えば D20 は透水係数の推定に用いられる⁴⁾。このことは比抵抗値から地盤材料の浸透特性を間接的に推定できることを意味している。そこで、S 波速度断面(図-5(a))と比抵抗断面(図-5(b))データから、図-3 に示した相互の関係を基に対象堤防区間の基礎地盤部の浸透性を定性的に評価した(図-5(c))。浸透性評価断面では、基礎地盤の浸透性が、対象堤防区間のほぼ全域で高いことが示されている。ところで同図からは、基礎地盤部において、2 区間の高 S 波速度・高比抵抗部を抽出することが可能である。すなわち、測線距離 400-900m 間と 1000-1500m 間の 2 区間である。このうち前者は、下流側の境界が急傾斜で、上流側が緩

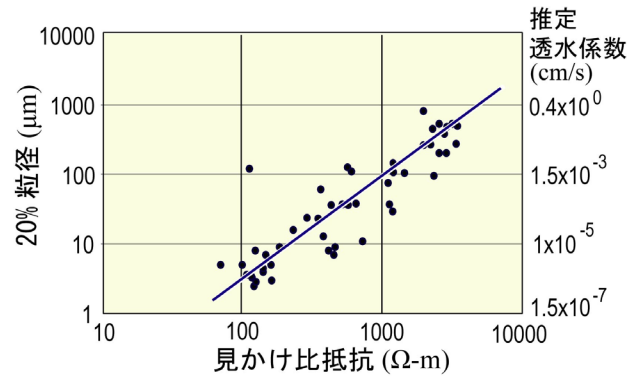


図-4 堤体の見かけ比抵抗と粒度との関係³⁾

傾斜の非対称の構造を示す。一方後者は上下流方向にはほぼ対称な形状を呈している。このうち前者の区間では堤内地側に湧砂が多発し、後者区間では基盤漏水は顕著ではなかった。これは、測定物性から推定した浸透特性では同等の危険度を有していると判断された場合でも、実際の洪水被害時には異なった挙動を示すことがあることを意味している。空中写真判読では、前者区間は分岐河道、後者区間は自然堤防と解釈される。このような堆積相・河川地形の違いも浸透性評価の際に考慮すべきであることを、この統合物理探査の現地適用実験結果は示唆している。今後は統合物理探査に加え、地形区分、堆積相

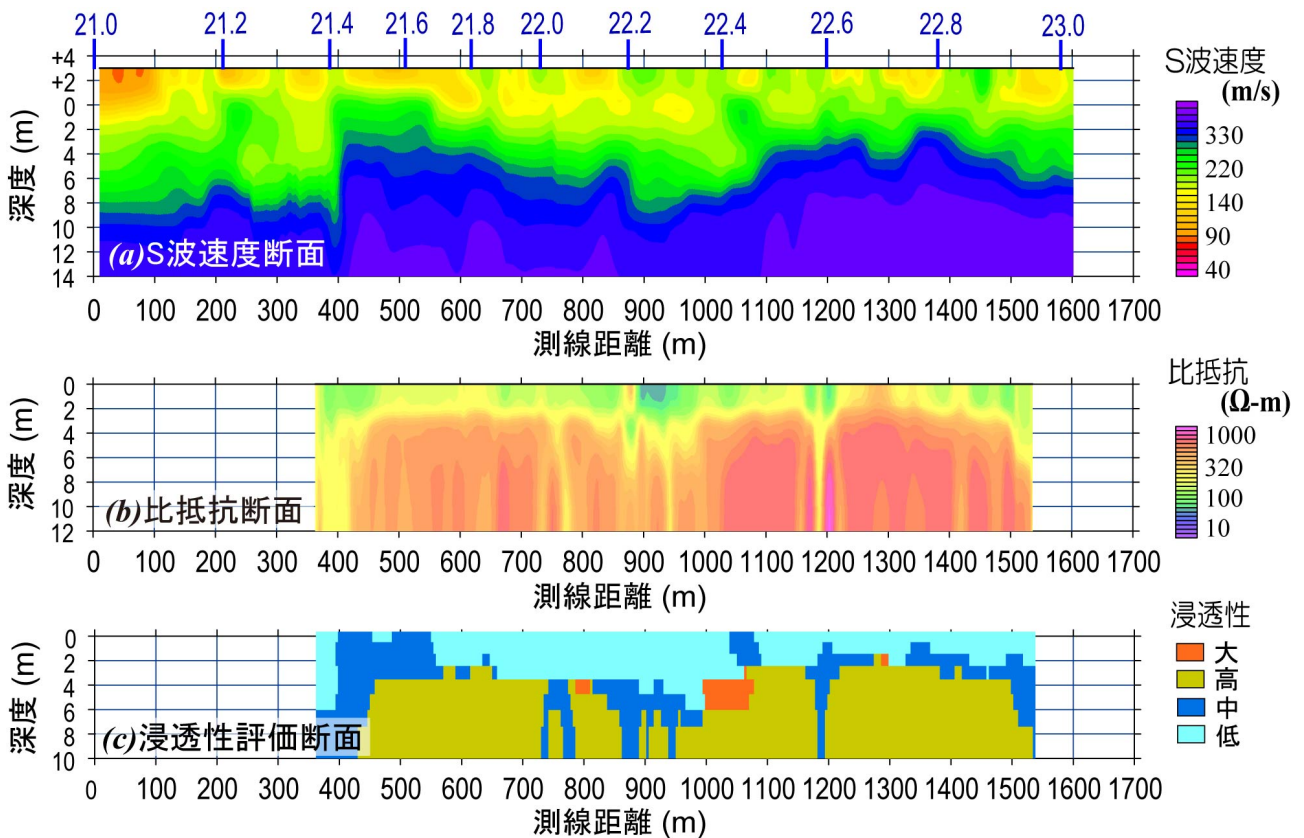


図-4 米代川 TBN21L 堤防区間統合物理探査および評価結果

区分も考慮した総合的な浸透性評価手順を構築することが求められる。

3.2 モデル堤防での堤体浸透動態観測結果

モデル堤防に対する堤体浸透実験では、図-2 に示したように背面からの給水の結果、約 25 時間後にモデル堤防中央部下部に小規模な漏水が認められるようになった。またのり肩散水開始後約 5 時間（2 日目 19 時頃）経過時点で、漏水発生部付近が膨みはじめた。さらに同 7 時間経過（2 日目 21 時頃）時点で、モデル堤防中央部約 4m の区間の天端直下に滑落崖が発生成長し、下部のヒービングと連結してのり表層すべり体が形成された（図-5）。

3D レーザースキャナによる高密度測量結果を図-6 に示す。図で暖色表示は凹みを、暗緑色表示は隆起を意味する。同図(a)でわかるように、局所的表層すべりによって堤体中央部ののり肩付近が滑落し、法尻付近が盛り上がった表面形状が捉えられている。のり肩部ではおおよそ 20cm 程度の浸食が、のり下部においては約 30cm の盛り上がりが見積もられた。すべり体を縦断する部分の断面表示（同図(b)）ではのり肩部での見かけ浸食と法尻部での隆起をより鮮明に判読することができる。

繰り返し物理探査の目的は、このような目視あるいはレーザースキャナ測量で確認できる地表変状に先行して生起していると思われる、浸透に伴う堤体内部の変化をとらえることにあった。

のり肩部に設置した地表電極アレイ直下部の見かけ比抵抗変化率を断面表示したものを図-7 に示す。背面からの浸透、堤体内水位上昇に伴い、当初は堤体下部の変化率が徐々に増大していた（同図左上、左中）が、地表散水とほぼ同時に表層部の見かけ比抵抗変化率が急上昇した（同図左下）。比抵抗変化の大きな部分は、当初は散水区間と対応していたが、やがて中央部の狭い区間に集中し始める（同図右上、右中）とともに、散水区間表層部の変化率が著しく増大した。この変動は、散水区間の表層部の比抵抗が、散水に伴い大きく低下したことを意味している。表層すべりの発生以降は、電極の接地条件が変わったことにより、変化率の図は複雑な様相を呈するようになっていった（同図右中、右下）。この図に示された結果は、地表電極設置型二次元比抵抗探査によって、堤体内部の浸透水の状況をイメージすることができるのと同時に、その挙動を追跡可能なことを実証するものである。



図-5 表層すべりの状況

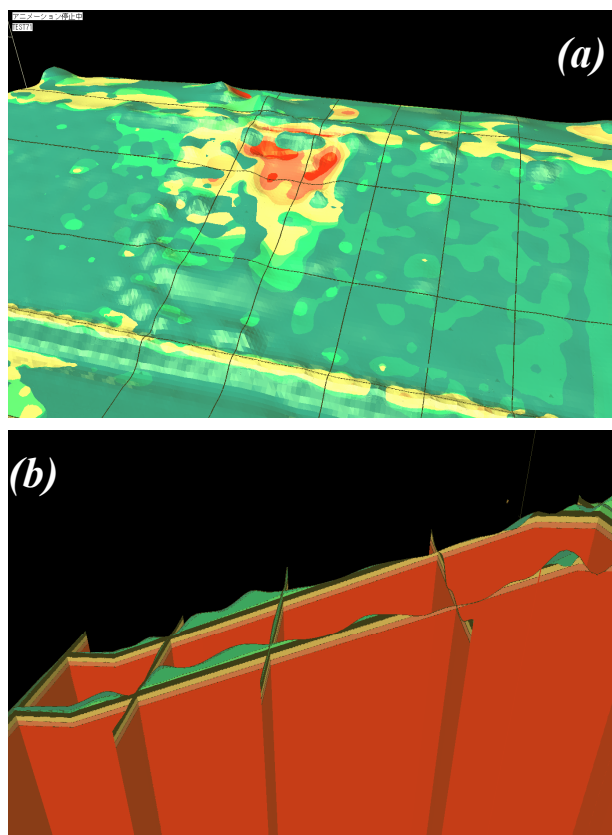


図-6 3D レーザースキャナ測量結果

1m 間隔で掘削した P3-P4 孔間の見かけ比抵抗の経時変化を図-8 に示す。同図において、たとえば 3P24_4P22 の表記は、比抵抗測定に使用した電極ペアを表し、P3 孔深さ 2.4m と P4 孔深さ 2.2m に配置された電極間の比抵抗測定データであることを意味する。同図では、まず経時的に見かけ比抵抗が低下する傾向が認められる。この傾向は浅い位置の電極ペアに顕著である。深い位置の電極ペアは変化度が小さく、測定開始当初より低比抵抗を示している。この測定結果は、背面からの浸透により飽和帯（浸

潤面)が上昇するだけでなく、不飽和帯中の飽和度も上昇することを強く示唆している。つぎに、表面散水開始に伴って、表層部付近の電極ペア間の比抵抗が低下した。低下度は基本的に表層に近い電極ペアのほうが大きい。さらに、のり表層すべりが顕著になる2日目21時以降、見かけ比抵抗値が特徴的な変動を示すようになる。特に比抵抗値の急激な上昇がいくつかのペアで認められた。この比抵抗値の上昇は、堤体内の物質の移動を反映したものである可能性が大きい。中深部電極ペア(3P18_4P16)も同様な応答を示していることも、この推定を補強するものである。物質の移動に伴い、比抵抗値が上昇するケースとしては、堤体材料からの間隙水の絞り出し、気相の相対的容量の増加、滑動時のブロック化などが想定される。電極アレイ設置部は、のり表層すべり体の上部に位置するので、間隙水の絞り出しを生起させ得るような圧縮場にはない。したがってこの見かけ比抵抗値の上昇は、すべりに伴う局所的な気相の移動集中の影響であると

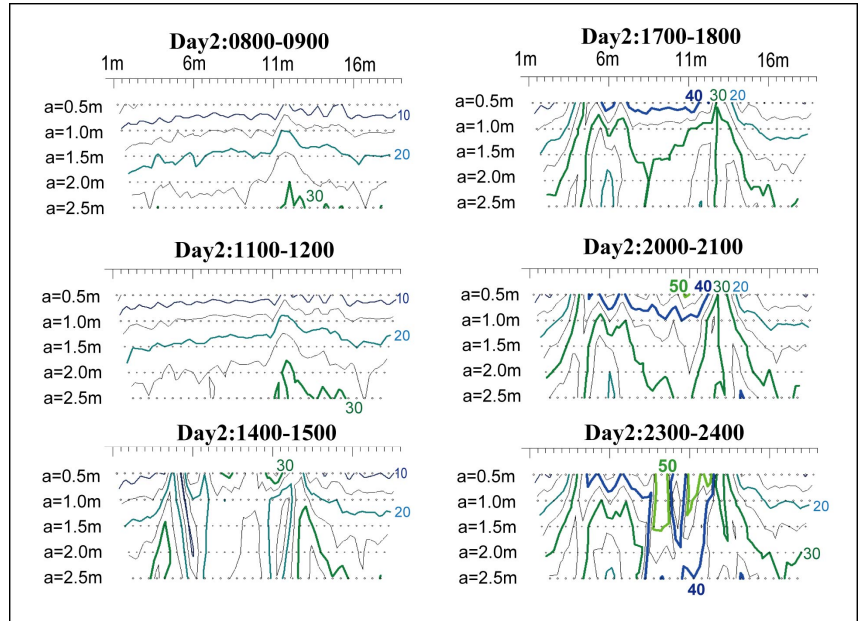


図-7 のり肩部見かけ比抵抗変化率の経時変化

解釈することが妥当である。繰り返し電気探査の結果は、同法では水位観測ではとらえられない、局所的な水分移動あるいは気相移動を捉えることが可能であることを示している。

4. まとめ

洪水被害を受けた実堤防に対して統合物理探査を適用し、被害実態との関連性を検討するとともに、

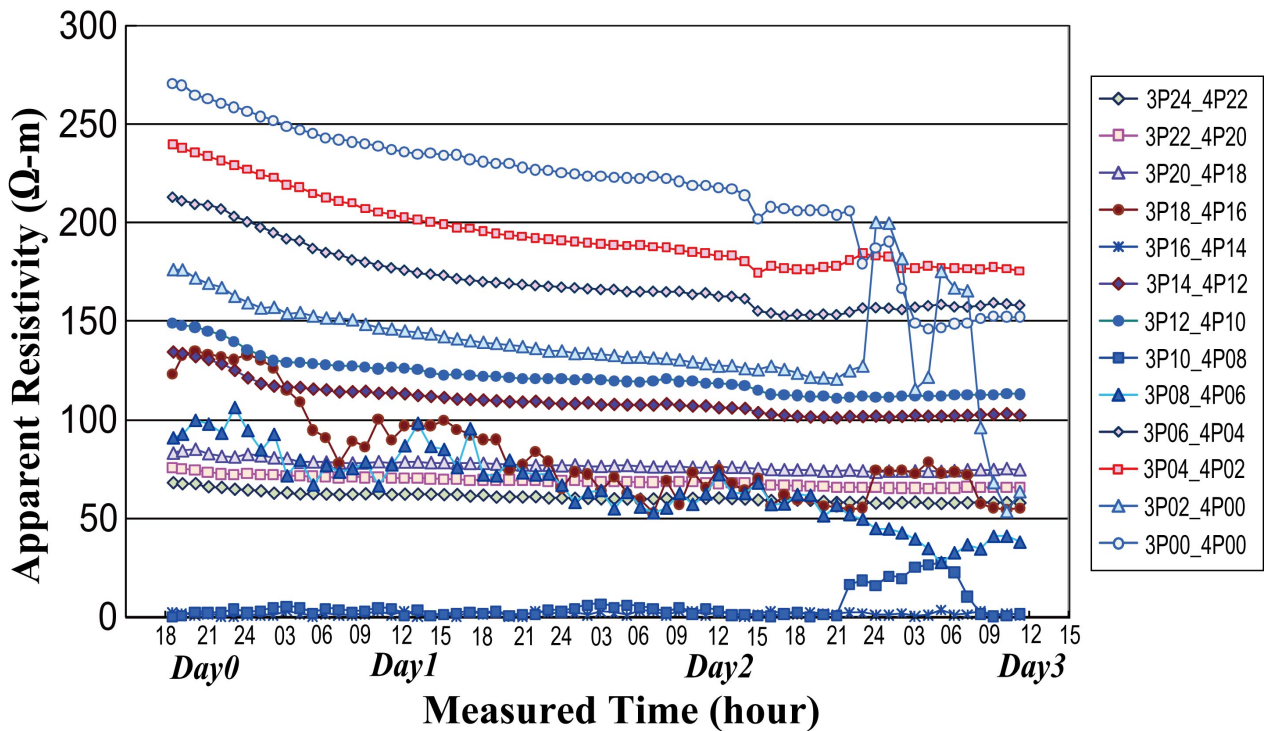


図-8 堤体挿入電極アレイ孔 (P3_P4) 間見かけ比抵抗変化

現場計測時の技術管理および品質管理について検討を加えた。その結果、統合物理探査によって求められるS波速度値と比抵抗値を指標に、基礎地盤部の浸透特性を概略的に評価することが可能であることが検証された。統合物理探査による評価結果は被害実態と概ね調和的であったが、それだけで全体を説明することはできないことが明らかになり、他の地盤情報、特に河川地形および堆積相解析が重要な補強情報を提供することが示唆された。

開発した統合物理探査を普及展開するためには、本研究で得られた技術情報の開示と民間への移転が不可欠である。前者に対してはマニュアルの発行に向けた準備が進行しつつある。技術移転にあたっては特に取得データの品質管理に対する判断基準の明確化が必要であることが明らかになった。

モデル堤防に対する浸透破壊実験が実施される際に繰り返し物理探査を実施し、時系列観測データを取得した。観測データの解析の結果、背面注水による堤体内水位の上昇に伴う比抵抗変化を明瞭にとらえることができた。捉えられた比抵抗変化パターンは、間隙水圧計等で把握された水位変化パターンとも調和的であった。さらに比抵抗計測では法肩散水による表層部不飽和帯内の変動も観察された。この変動は水位観測データには捉えられていない。さらに比抵抗時系列モニタリングの結果は、表面からの降雨浸透による湿潤帯の堤体内降下と飽和帯との相互作用が堤体の不安定化過程に影響していることを強く示唆した。

近年、河川堤防に対する数値解析では、気相の挙動を考慮した多相体を想定し、飽和-不飽和浸透流解析およびすべり変形を含めた連成解析の適用が広がりつつある。しかし高水位下での堤体内部の気相・液相の動態を現地において詳細に把握した例は多いとはいえない。またそのモニタリング手法も確立されているとは言い難いのが現状である。本研究によって、地表電極および孔内電極を用いた繰り返し電気探査が、気相・液相の動態を把握することが可能な有力な計測手法の一つであることが示された。

今後は提案した統合物理探査手法の適用手順および評価基準を確立し、河川堤防調査への適用を全国的に普及展開することを進めるとともに堤体内部の不均質構造と地下水の挙動を把握することが可能な原位置計測手法の開発に着手する予定である。

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.
- 2) 谷中仁志・齋藤由紀子・小橋秀俊・古本一司・中西利典(2008):平成 19 年 9 月豪雨による米代川・北上川堤防被災調査, 河川技術論文集, 14, 71-74.
- 3) 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) -比抵抗・表面波探査結果と堤体物性の対比-, 物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集, 115-118.
- 4) Creager, W. P., Justin, J. D. and Hinds, J. (1944): Engineering for dams, Vol.III: Earth, Rock-fill, Steer and Timber Dams, John Wiley and Sons, 649p.

DEVELOPMENT OF INTEGRATED GEOPHYSICAL INVESTIGATION TECHNIQUE FOR VULNERABILITY ASSESSMENT OF LEVEE

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 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 at low cost and high performance. It has been therefore required to develop an effective, inexpensive and easy-to-apply field survey method which enables to delineate the internal structure of levee body and underlying layers continuously. Geophysical methods are expected to play an important role in levee assessments. We tested combined geophysical methods at actual levees, and confirmed the advantages of the methods in field work, the resultant cost effectiveness, and their capability in detecting anomalies. We successfully identified anomaly structures in and beneath the levee. The geophysical properties evaluated by these methods, resistivity and S-wave velocity, are essential to evaluate the permeability and stiffness of the levee systems. We also demonstrated the usefulness of time-lapse geophysical measurement for evaluating dynamic behavior of groundwater in levee body.

Key words : river levees, S-wave velocity, resistivity, time-lapse monitoring, permeability.