

堤防の浸潤監視の実用化に関する フィールド試験

STUDY ON PRACTICAL APPLICATION OF SEEPAGE MONITORING IN RIVER LEVEE

倉田大輔¹・太田雅之¹・阿部知之¹・藤澤寛²・安達孝実³・河野隆治⁴

Daisuke KURATA, Masayuki OOTA, Tomoyuki ABE,
Hiroshi FUJISAWA, Takami ADACHI and Ryuji KOHNO

¹正会員 一般社団法人リバーテクノ研究会 (〒154-0001 東京都世田谷区池尻2-33-16)

²正会員 公益財団法人河川財団 河川総合研究所 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

³正会員 工修 前 (公財)河川財団 河川総合研究所 戦略的維持管理研究所 (同上)
(現 内閣府 総合海洋政策推進事務局)

⁴公益財団法人河川財団 河川総合研究所 (同上)

The stability of river levee is affected by the seepage of rainfall and river water. In this paper, the high permeability section of the permeable foundation has been extracted by the electric exploration. In the extracted section, the adequacy of the methodology by electric exploration has been made sure by confirming that the permeability of the permeable foundations was higher than other sections by the monitoring of the electrical resistivity and water tables. The river levee of the extracted section was more affected by the seepage of rainfall than river water. The proposed method of seepage monitoring in river levee is considered be useful for practical application.

Key Words : river levee, monitoring, seepage, field test, electrical resistivity

1. はじめに

現在、堤防の点検は形状や表面状況についての変状を目視点検により把握することが基本であり、内部状態の把握は行われていない¹⁾²⁾。降雨や河川水の浸透に伴うすべり破壊やパイピング破壊といった現象は、堤防内部で浸潤状態や間隙水圧等が常に変化して進行することから、出水時にこれらの状況を観測することで堤防の安定状態の監視が可能と考えられる。一方、堤防内部状態の監視を効果的に行うためには、浸透に対する安全性の観点から出水時に重点的な監視が必要な箇所の適切な選定が重要であり、そのための技術開発も必要となる。

本研究は、維持管理技術の高度化に向け、出水時における堤防の浸潤状態を監視するためのモニタリング技術の実用化を目指す研究の一環として、重点監視箇所の選定に利用する調査手法としての物理探査、堤防内部の浸潤状態を監視する技術としての水位観測および比抵抗モニタリングの適用性を、フィールド試験によって検証を行った。

2. 試験概要

(1) 重点区間の絞り込み

フィールド試験は、過去に漏水被害が多く発生しているA河川を対象とした。出水時の状態監視を重点的に実施する区間の絞り込みを行い、堤防が浸透により弱部となる可能性が高い区間を重点区間として設定した。さらに、重点区間内で最も弱部となると考えられる断面を代表断面として選定し、水位観測システムを設置した。以下に絞り込みのための手法を示した。

a) 既往資料の収集・整理

A河川を対象に、被災履歴、治水地形分類図、LPデータ、ボーリングデータ、詳細点検結果(浸透に対する安全性照査結果)、過去の改修・災害復旧工事に関する資料を収集、整理した。

b) 現地踏査

現地踏査では、主として川裏のり面の状態(変状の有無、植生の状態、土質等)、のり尻から堤内地にかけての微地形や地表部の状態(土地利用、土質、湿潤状態等)を把握した。また、代表断面付近の土質分布状況



a. 牽引式電気探査実施状況



b. 表面波探査実施状況

写真-1 物理探査実施状況

を推定するため、スウェーデン式サウンディング試験を実施した。

c)物理探査

堤体と基礎地盤の土質に関する情報を得るために、A河川左岸2.5k～3.9kの堤防天端と裏のり尻の2測線を対象に、堤防縦断方向に牽引式電気探査および表面波探査を実施した。物理探査測線は図-1に示した。

牽引式電気探査は、オームマップパー（Geometrics, Inc.）と呼ばれる探査装置を用いた。写真-1aに示すように、人力により電極付きのケーブルを牽引する方式で観測し、測線沿いの地盤の比抵抗分布を求めた。表面波探査は、同じく写真-1bに示すように、地表部で起振した表面波を測線上に展開した受振器で観測し、測線沿いの地盤のS波速度分布を求めた。

d)重点区間の絞り込み

資料収集整理、現地踏査、物理探査結果を踏まえ、下記に示す浸透に対して弱部となり得る条件に着目して絞り込みを行い、総合的に判断して重点区間を選定した。

＜絞り込みの条件＞

- ① 堤内地の地盤標高が相対的に低い箇所
- ② 過去に基盤漏水の履歴があり漏水対策が実施されていない箇所
- ③ のり面の変状やのり尻付近の湿潤化がみられる箇所
- ④ 堤体または基礎地盤の比抵抗が相対的に大きく透水性が高いと推定される区間
- ⑤ 堤体または基礎地盤のS波速度が小さく相対的に密度が低いと推定される区間

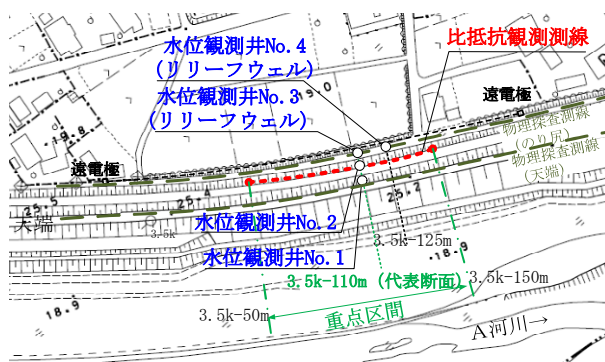


図-1 モニタリング機器配置平面図

(2)モニタリング方法

重点区間におけるモニタリング機器として水位観測井と比抵抗観測システムを設置した。モニタリング機器の設置状況を図-1に示した。代表断面に、水位観測井を堤体内に2箇所（No.1孔、No.2孔）、基礎地盤透水層を対象として1箇所（No.3孔）設置し、代表断面の25m下流の基礎地盤透水層を対象として1箇所（No.4孔）設置して、水位観測システムを構築した。水位観測井は、シートサンプラーで事前削孔し、土質を確認した上で観測井とした。水位計設置時は、No.1～No.4孔すべてにおいて観測孔内で水位は確認されていない。なお、No.3およびNo.4孔はリリーフウェルとしても利用できる構造とした。

また、小林³⁾の研究より、河川堤防の不飽和領域の水分動態観測に電気探査手法が有用であることを踏まえ、川裏のり面中段のNo.2孔より1m上方の位置に、比抵抗観測用の電極（長さ30cm）を縦断方向に1m間隔で埋設して区間長100mの比抵抗観測測線とした。なお、比抵抗観測用の遠電極は、重点区間の上下流2箇所に設置した。

堤体内の浸潤監視における観測は、水位観測は自記水位計による毎時連続観測、比抵抗観測は出水が予想される際に、観測機器を起動させてからおおよそ4日間、約15分毎のデータを収録する連続観測とした。基礎地盤被覆土層下位の透水層の地下水位監視における観測は、自記水位計による毎時連続観測とした。なお、No.4は通信型水位計を設置し、webサイトで観測データをリアルタイムに確認可能なシステムを導入した。また、現地に雨量計を設置し、重点区間の降雨量観測を行った。なお、河川水位は、重点区間の約500m上流に水位観測所があることから、その観測所の毎時河川水位データを水位観測データと合わせて整理した。

これらの方法で堤防内部および堤防直下基礎地盤の浸潤状態の変化についてのモニタリングを試行した。

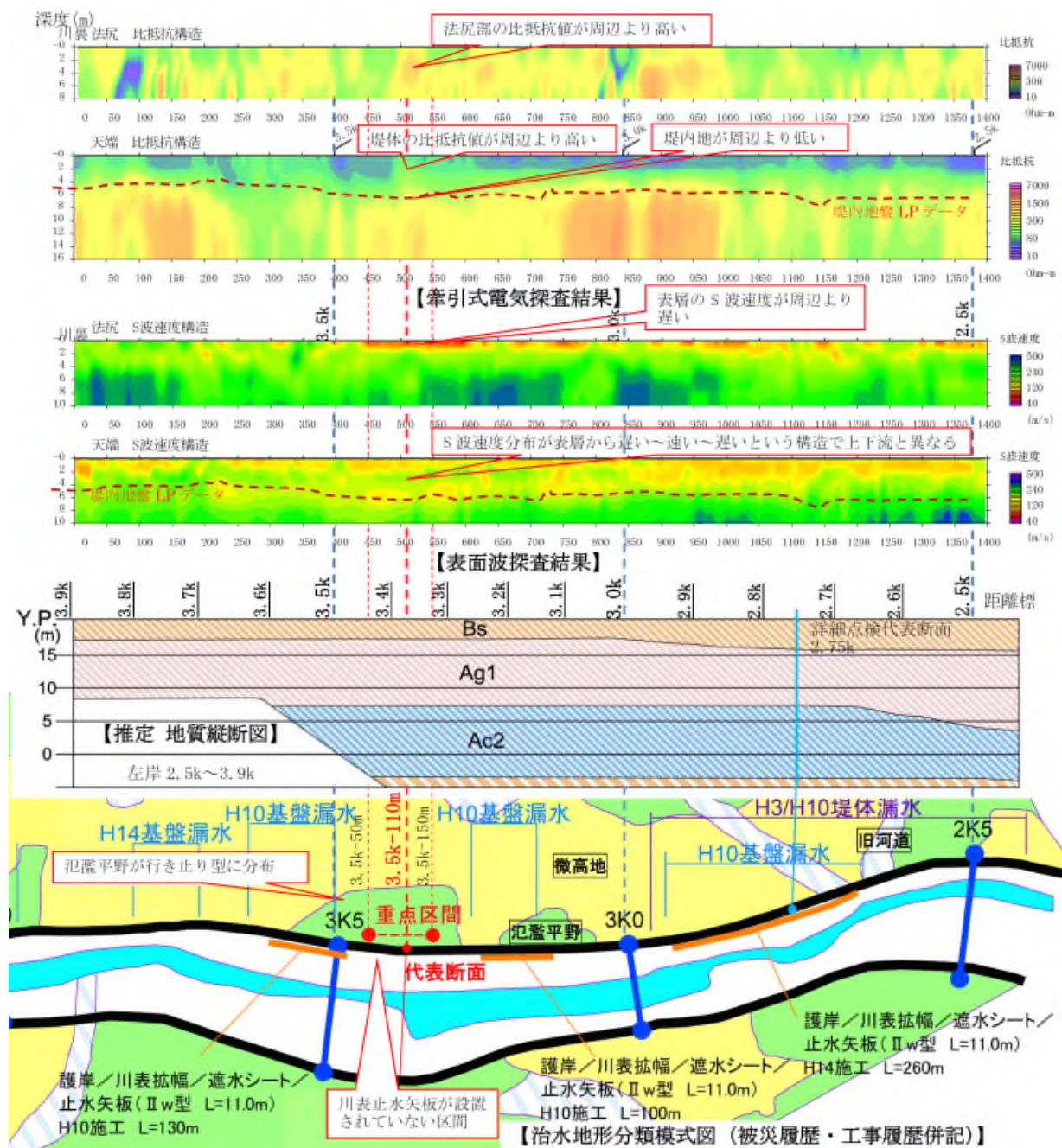


図-2 重点区間絞り込み結果図

3. 重点区間の絞り込み結果

(1) 重点区間の絞り込み

a) 既往資料の収集・整理

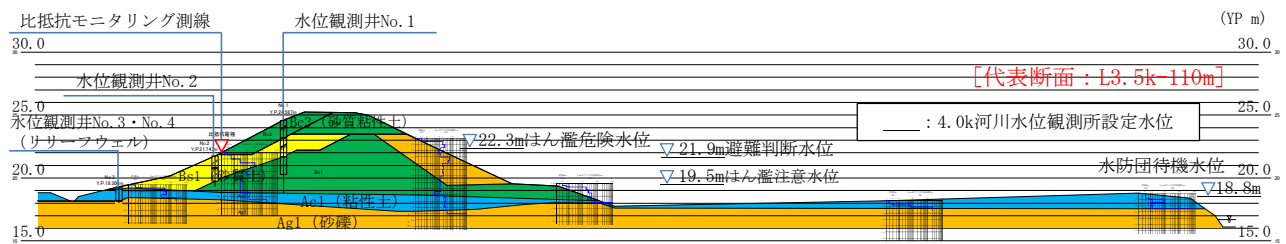
A河川における既往資料収集整理の結果から得られた特徴を図-2にまとめるとともに以下に示した。なお、地質断面図および治水地形分類図は模式図とした。

左岸2.25k～4.2kの間は、詳細点検（代表断面左岸2.75k）において裏のりすべり破壊およびパイピング破壊で安全性照査基準を下回る区間となっている。同区間のうち、左岸2.5k～3.9kでは堤防漏水が平成3年と平成10

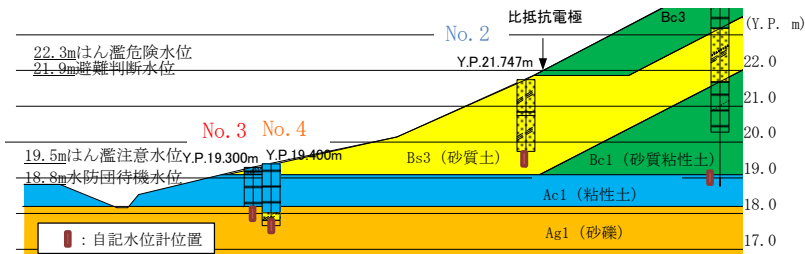
年、基盤漏水は平成10年と平成14年に発生している。また、左岸3.2k～3.5k付近の区間の堤内地では、治水地形分類の氾濫平野と微高地の境界が堤防近傍にあり、河川水が基礎地盤に浸透した場合に浸透した地下水が堤内地で行き止まる可能性のある、行き止まり構造となっている。そのうち、左岸3.2k～3.4k付近の区間は、災害復旧工事で川表止水矢板が設置されていない区間に該当している（条件②に該当）。

b) 現地踏査

資料調査結果を踏まえ、詳細点検において裏のりすべり破壊およびパイピング破壊で安全性照査基準を下回り、かつ被災履歴のある左岸2.5k～3.9kの約1.4kmの区間を対象として現地踏査を行った。



a. 推定土質横断面図



b. 推定土質横断面図 (川裏のり尻付近)

図-3 重点区間代表断面推定土質分布図 (左岸3.5k-110m)

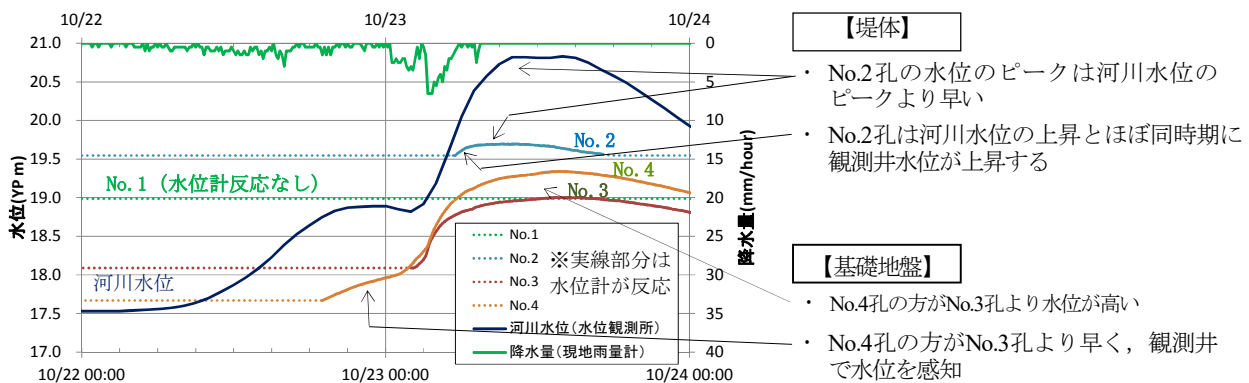


図-4 降水量・水位観測結果と推定土質構造の関係

治水地形分類の氾濫平野が行き止まり状で分布している左岸3.2k～3.5k付近の区間では、堤内地の畑が周辺より低い（条件①に該当）。なお、のり面の変状やのり尻付近の湿潤化は確認されなかった。

c)物理探査

現地踏査と同様に、対象区間の牽引式電気探査および表面波探査の結果を図-2に示した。電気探査の結果、氾濫平野が行き止まり状に分布している左岸3.2k～3.5k付近の区間である左岸3.25k～左岸3.4k付近は、周辺と比べて堤体および基礎地盤の比抵抗値が高く、周辺と比べて高透水性の可能性が高いと判断された（条件④に該当）。また、表面波探査の結果、左岸3.25k～左岸3.45k付近は、のり尻付近の表層のS波速度が遅く、土の締り具合は緩いと推測された（条件⑤に該当）。そのうち、左岸3.25k～左岸3.45k付近では基礎地盤と堤体の境界付近のS波速度が表層から遅い～速い～遅いという構造で、上下流と異なる構造となっている。

以上の調査結果を踏まえ、重点区間としては、左岸3.5k-150m～3.5k-50mの計100mを選定し、代表断面は左岸3.5k-110mとした。図-3aに代表断面の推定土質横断面図、図-3bに川裏のり尻付近を拡大した推定土質横断面図を示

した。なお、土質分布状況は、観測井事前削孔結果、スウェーデン式サウンディング試験結果および左岸2.75kの詳細点検でのボーリング調査結果を踏まえて推定した。

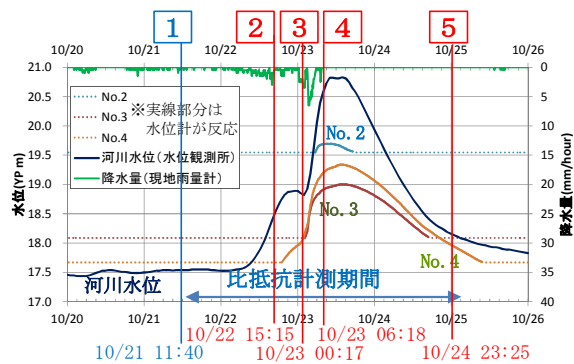
4. モニタリング結果

観測開始後、平成29年10月に台風21号に伴う出水がA河川で発生し、川表のり面中段まで河川水位が上昇した。重点区間の約500m上流にある水位観測所では、避難判断水位の約1.0m下まで水位の上昇がみられた。その際に得られた観測結果の整理・分析を行った。

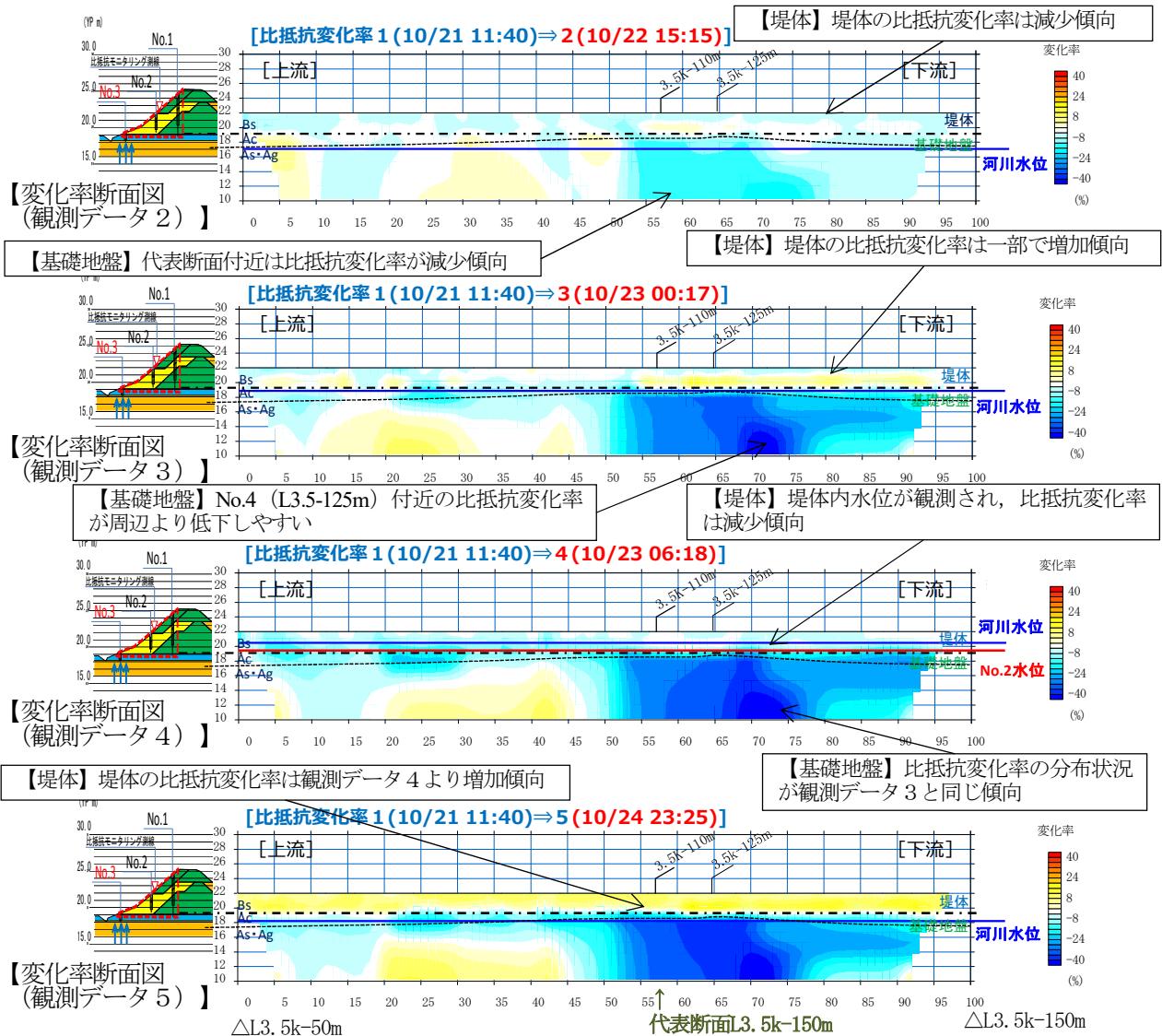
(1) 水位観測結果

図-4に示すように、河川水位の上昇に応じて堤体のり尻部のBs1層に設置されたNo.2孔、基礎地盤Ag1層に設置されたNo.3孔およびNo.4孔にて水位上昇が確認された。なお、堤体中心に分布するBc1層に設置されたNo.1孔では水位は感知されなかった。

堤体部川裏側に位置するBs1層のNo.2孔は、河川水位の上昇とほぼ同時期に観測井水位が上昇するが、観測井



a. 水位変化と比抵抗観測データの関係
(基準データ1, 観測データ2～5)



b. 比抵抗観測結果図 (変化率断面図)

図-5 比抵抗観測結果図 (各観測データ2～5と基準データ1の差分を変化率で表示)

水位のピークは河川水位のピークが終了する前に下降している。

基礎地盤Ag1層では、No.3孔、No.4孔とも水位上昇がみられ、圧力水頭はそれぞれGL-0.3m付近、GL-0.4m付近まで上昇したことが確認された。また、代表断面下流側のNo.4孔の方がNo.3孔よりピーク水位が高くなることわかった。その他、No.4孔では、観測孔水位の上昇に

合わせて水温の低下が確認された。

(2) 比抵抗観測結果

比抵抗の観測は、河川水位が上昇する前に開始し、河川水位が低下傾向となるまでの4日間観測を継続した。河川水位と観測井水位に合わせて、5段階のデータを図-5に示した。観測結果は小林³⁾の研究を踏まえ、図-5の

段階1を基準データとして、基準データと各観測データとの比抵抗の差分をとって変化率断面図を作成した。

観測データ2の段階では、堤体の比抵抗変化率は一部で減少傾向を示し、基礎地盤の代表断面付近は比抵抗変化率は減少傾向を示している。これは降雨が堤体の一部に浸透して水分量が増加し、代表断面付近の基礎地盤は、河川水位の上昇に伴う河川水が浸透していると推測される。

観測データ3の段階では、堤体の比抵抗変化率は一部で増加傾向を示し、基礎地盤の代表断面付近は比抵抗変化率はより減少傾向を示している。これは降雨量の減少に伴い堤体の一部の水分量が減少し、代表断面付近の基礎地盤は、観測データ2の段階より河川水位の上昇に伴う河川水の浸透の影響を受けていると推測される。

観測データ4の段階は、堤体の比抵抗変化率は減少傾向を示し、基礎地盤の観測データ3と同様の傾向を示している。これは3段階後の降雨が堤体に浸透して水分量が増加し、代表断面付近の基礎地盤は、観測データ3より河川水の浸透の影響を受けていると推測される。

観測データ5の段階は、堤体の比抵抗変化率は観測データ4より増加傾向を示している。堤体への浸透水が排出され水分量がより減少したと推測される。

(3) 観測結果の分析

重点区間で得られた水位観測および比抵抗観測の結果を、堤体と基礎地盤に着目して分析した。

堤体の川裏側では、堤体内水位の上昇が確認されているが、その経時変化には河川水との連動性はみられず、堤体中心部では水位上昇がみられていない。したがって、川裏側の堤体内水位の上昇は、河川水の浸透による影響は小さく、降雨浸透によるものと判断される。これらは、図-3に示す堤防横断土質構造から予想される浸透挙動とも整合する。

基礎地盤では、代表断面付近に周辺より透水性の高い土質が分布していると推測され、特に代表断面の15m下流の地点付近は、より透水性が高いと推測される。

実際に、河川水位の上昇に伴い、川裏のり尻付近の地下水位は2m近く上昇し、ほぼ地表面付近に達している。今後、河川水位がより高くなった場合の安全性について注意が必要と考えられる。

5. まとめ

堤防の浸潤監視のための重点区間は、行き止まり構造を有し、かつ牽引式電気探査結果から比抵抗が相対的に高く浸透性が高いと考えられる区間を選定したが、出水時の観測結果より、代表断面付近の基礎地盤透水層は上

下流に比べて浸透性が高いことが実証され、選定手法の妥当性が確認された。

水位観測では、基礎地盤透水層内および堤体内で水位上昇が確認され、基礎地盤では、地表面近くまで水位上昇したことが確認された。また、比抵抗モニタリングでは、降雨浸透と河川水の浸透に伴う観測測線直下地盤内の水分量等の経時変化が確認された。これらの結果より、代表断面付近の基礎地盤は浸透性が高く、出水に伴う透水層内の水位上昇が顕著であることが観測され、堤体については、川裏のり面下部において降雨に伴う水位の上昇が確認された。

以上から、フィールド試験で試行した水位観測と比抵抗観測を組み合わせたモニタリング手法は、堤防内部の浸潤監視の有効な手法となることが示唆された。

この手法により、該当区間の河川水位・降雨量と比抵抗・水位の変動の関係が把握できれば、その結果から堤防の浸透に対する安全度（すべり安全率 F_s 、 G/W 等）の評価基準を河川水位・観測井水位等を閾値として定めることで、観測井での水位を基に浸透に対する安全度を踏まえた監視が可能となる。この手法は、要対策区間の対策施工までの監視手法としても有用と考えられる。

今後は、外力パターン（降雨波形・河川水位波形）に応じた観測結果を蓄積するとともに、適用事例を増やし、それらの分析・検討結果から、大規模出水時の応答予測や危険度監視への適用に向けた検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準 維持管理編（河川編），2015。
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領，2016。
- 3) 小林剛：地盤の水分変化モニタリング技術ー 比抵抗モニタリングシステムの概要ー，応用地質技術年報 No.32，p.69-75，2013。

(2018. 4. 3受付)