

# 縦断方向の土質の不均質性に着目した 河川堤防の被災原因調査

A SITE SURVEY OF DAMAGED RIVER LEVEES  
FOCUSED ON THE HETEROGENEITY OF SOIL LAYERS

森 啓年<sup>1</sup>・笹岡信吾<sup>2</sup>・上野俊幸<sup>3</sup>・諏訪義雄<sup>4</sup>  
Hirotoshi MORI, Shingo SASAOKA, Toshiyuki UENO and Yoshio SUWA

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 山口大学大学院創成科学研究科 (〒 755-08611 山口県宇部市常盤台 2-16-1, 元国土技術政策総合研究所河川研究部)

<sup>2</sup>国土技術政策総合研究所河川研究部 (〒 305-0804 茨城県つくば市旭 1)

<sup>3</sup>正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部 (〒 305-0804 茨城県つくば市旭 1)

<sup>4</sup>正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部 (〒 305-0804 茨城県つくば市旭 1)

Site survey to clarify the cause of river levee failures were conducted at the sites where water leakage or sand boil had been taken place. The dense sampling of foundation soil at the back-toes of the river levees were carried out to make the difference of soil layers clear. The difference is that a high permeable gravel soil layer at the shallow depth in the Naka-river or a low permeable silty soil layer at the surface in Yoshida-river, which considered as the main cause of the water leakage or the sand boils. The improved method of site survey for a river levee is proposed combined with the topographical survey.

**Key Words:** river levee, site survey, seepage, piping

## 1. 序論

### (1) 研究背景

2012年7月に矢部川で発生したパイピングによる河川堤防の決壊は基礎地盤に存在する砂質土層によって発生したと推定されている。その砂質土層は決壊した区間を中心におよそ130m程度の範囲にしか存在しないことがその後の調査で明らかになっている。また、2013年7月に子吉川で発生したすべりと噴砂による河川堤防の被災も基礎地盤の砂質土層が原因と考えられている。この場合、砂質土層は被災が発生した区間を中心に比較的広い範囲に分布するが、特に堤防天端と川裏法尻部の比高が大きく、被覆土が薄いわずか60m程度の区間でのみ被災は発生している。

このように、長大な土構造物である河川堤防は、局所的な範囲に存在する土質や微地形・堤防形状に起因する相対的に弱点となる区間に被災が発生している。しかし、縦断方向の土質の変化については数百mから数km毎に実施されるボーリング調査、微地形・堤防形状の変化についてはおよそ200m毎に1横断面実施される定期測量による点としての限られた情報に頼っているのが現状である。

その様な中、国土交通省では、河川堤防の被災の発生メカニズムを明らかにし、災害復旧工法の設計の参考にするとともに、知見を蓄積するため被災した河川堤防を対象に様々な調査(以下、被災原因調査)を実施している。

前述の矢部川や子吉川のように、被災原因調査により、その被災のメカニズムが推定され、災害復旧工法の設計が確定した事例も多くある。しかし、経済的、時間的制約の中、被災原因調査の多くは河川堤防が被災した区間に絞った調査を行っている。そのため、その被災の発生メカニズムは明らかになるものの、その成果を同じ河川の他の区間や他河川に活用する取組みについては、いまだ道半ばと言える。

被災した区間の土質や微地形・堤防形状の特徴を把握し、その知見を被災の事前防止に活用することが求められている。

### (2) 研究目的

本研究は、河川堤防を対象に被災の事前防止のための調査の在り方を提案することを最終的な目標としている。そこで、顕著な漏水や噴砂がみられた那賀川水系那賀川(以下、那賀川)、鳴瀬川水系吉田川(以下、

吉田川)の河川堤防を対象として、被災がみられた河川堤防の区間(以下、被災区間)とその周辺の被災していない河川堤防の区間(以下、無被災区間)において実施した被災原因調査をまとめ、被災区間と無被災区間の差を明らかにすることを試みたものである。

具体的には、被災区間及びその周辺の無被災区間の河川堤防を対象として、詳細な微地形や堤防形状の把握、地盤調査や土質試験を行うとともに、浸透流解析による評価を実施した。

それらの結果から、被災の原因となった縦断方向の微地形・堤防形状、土質の不均質性が何であるか明らかにした。あわせて、堤防被災の事前予防のための調査の在り方について考察した。

### (3) 研究方法

詳細な微地形や堤防形状については、治水地形分類図とともに高解像度のデジタルカメラを搭載した UAV(無人航空機)を利用し、その撮影した視差画像より連続的な地表面の標高を把握<sup>1)</sup>した。あわせて、航空レーザ測量により被災と関連が深いと考えられる平均動水勾配、計画高水位と川裏法尻部地盤高の比高(以下、比高差)、法勾配の観点<sup>2)</sup>から分析した。次に、地盤調査は、被災区間と周辺の無被災区間を含めて縦断方向5点について、川裏法尻部に約80mの間隔で、最大深さ5m程度の簡易サンプリングを行い、漏水や噴砂に特に影響を与える堤体の裏法尻部とその基礎地盤の土層構成を縦断方向に把握した。

また、無被災区間における代表的な1横断面を対象として河川堤防の詳細点検<sup>3)</sup>と同様に、川表法面、天端、川裏法面の3点のボーリング調査を実施し、堤体及び基礎地盤の土層構成を横断面で把握するとともに、採取試料の土質試験結果をもとに、飽和不飽和浸透流解析によるパイピングの評価を実施した。さらに、これらの結果は国土交通省の河川事務所が実施したボーリング調査及び土質試験結果をもとにした被災区間の横断土層構成とも比較している。

### (4) 既往研究

これまで、大規模な河川堤防の被災が発生した場合、国土交通省などの河川管理者による被災原因調査が実施され、報告書が公開されてきた。例えば、矢部川では矢部川調査堤防委員会が開かれ、2013年3月に矢部川堤防調査委員会報告書<sup>4)</sup>が取りまとめられている。これは、決壊した区間に加え、噴砂によるガマや堤体のすべり等の決壊に至らなかった被災区間についても詳細な調査を行い比較検討したものである。また、中川らは子吉川の河川堤防の被災後、掘削調査等を行い、その被災原因に関して飽和不飽和浸透流解析、円弧すべり



図-1 被災状況(那賀川, 2015年7月)

解析を行い、考察を行っている<sup>5)</sup>。本研究はこれまでの被災原因調査をさらに進め、特に被災区間と無被災区間との比較に着目したところに新規性、有用性がある。

## 2. 那賀川水系那賀川

### (1) 被災概要

那賀川左岸13.24~13.48k区間では、2004年8月、2007年7月、2014年8月、2015年7月の出水でくり返し漏水が発生している。特に図-1に示す2015年7月の出水における漏水では、堤内地に噴砂により直径1m以上のガマやその下の砂質土層が流出したことによる陥没がみられた。

### (2) 調査区間

本研究では、上記の被災区間を含む那賀川左岸13.00~13.48k区間を対象に被災原因調査を行った。なお、調査区間を含む一連区間(左岸12.40~13.48k)の代表断面13.40kにおいて堤防詳細点検が実施されている。その結果は、川表のすべり、パイピングは照査基準を満足し、川裏のすべりのみが満足していなかった。それにも関わらずくり返し漏水が発生していることから、被災原因調査を実施した。

### (3) 調査結果

#### a) 微地形・堤防形状

周辺の微地形は治水地形分類図において、氾濫平野、旧河道に区分されている。このうち調査地周辺では旧河道が最も広く分布している。

UAVの撮影画像と航空レーザ測量を活用し把握した被災区間周辺の微地形及び堤防形状を図-2に示す。この結果から、無被災区間における平均動水勾配は被災区間と比較してやや高いこと、比高差、平均法勾配は無被災区間と被災区間がほとんど変わらない傾向がみられた。これらの結果から、被災区間の漏水及び噴砂は微地形・堤防形状に起因したものでないと推定される。

#### b) 縦断土質状況

次に、被災区間及び無被災区間を対象に簡易サンプリングを実施した。簡易サンプリングは図-2に示すように川裏法尻部を基本として、最大深さ5m、およそ80m

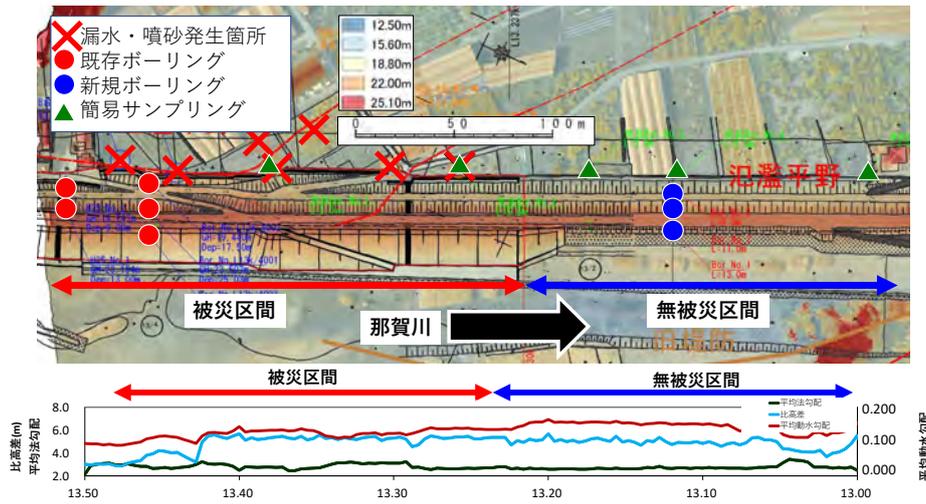


図-2 調査地点及び堤防形状図 (那賀川)

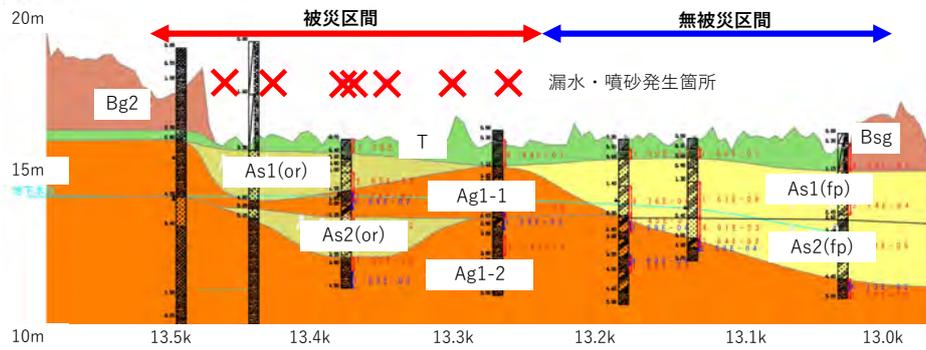


図-3 裏法尻部土質縦断面図 (那賀川)

間隔で実施した。なお、簡易サンプリングはポータブル型の土壌採取機器もしくは自走式ボーリング機器のいずれかを現地の状況に応じて採用した。なお、各層の透水係数として地下水深は簡易サンプリング孔を利用した現場透水試験、地下水以浅はボーリングのサンプリングによる室内透水試験、透水試験の実施が困難な場合については Creager の式を用いている。

あわせて、無被災区間の中から平均動水勾配が最も高い横断面を対象に、ボーリングを実施した。ボーリングは、河川堤防の詳細点検と同様に、川表法面、天端、川裏法面の3点について、基礎地盤の礫質土層が5m以上確認されるまでの深さとした。

簡易サンプリングとボーリングの結果と既存のボーリングの結果をまとめた川裏法尻部の位置における縦断面方向の土質の状況を図-3にまとめた。その結果、被災区間には、高い透水性の礫質土層 (Ag1-1:  $6.84 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ) が比較的浅い位置 (表層から0.8~1.6 m) に、その上にも高い透水性の砂質土層 (As1(or):  $2.05 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) が存在することが確認された。一方、無被災区間では透水性の高い礫質土層 (Ag1-2:  $1.53 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) は表層から2.3~4.4mの位置に存在し、その上に比較的厚く、中程度の透水性の砂質土層 (As1(fp), As2(fp):  $2.14 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ) が存在する。この基礎地盤の礫質土層の位置の違いが、

漏水や噴砂の有無を分けたと推定された。

### c) 横断土質状況

前述のボーリングの結果と既存のボーリングの結果をもとに、図-4に被災区間及び無被災区間の堤体及び基礎地盤の土質横断面図を示す。前述の様に、被災区間においては川裏法尻の下に高い透水性の礫質土層が存在する。出水により上昇した河川水が基礎地盤の高い透水性の礫質土層 (Ag1-2) から浸入し、比較的浅い位置の礫質土層 (Ag1-1) にも高い間隙水圧を発生させ、漏水と噴砂を発生させたと推定される。一方、無被災区間においては川裏法尻の下の浅い位置に高い透水性の礫質土層は存在しないため、被災区間と同様に出水により上昇した河川水が礫質土層 (Ag1-2) から浸入し、その層の間隙水圧は上昇するものの、その上層には被覆土層と砂質土層が比較的厚く存在したため、漏水や噴砂には至らなかったと推定される。

調査区間において最も河川水位が上昇した2014年8月の実績水位を用いて、作成した横断土質図をもとに飽和不飽和浸透流解析を行ったところ、被災区間は揚圧力が0.69と大幅に1.0を切る結果となった。一方、無被災区間については、最小でも3.35とパイピングについて安全であるとの評価となった。

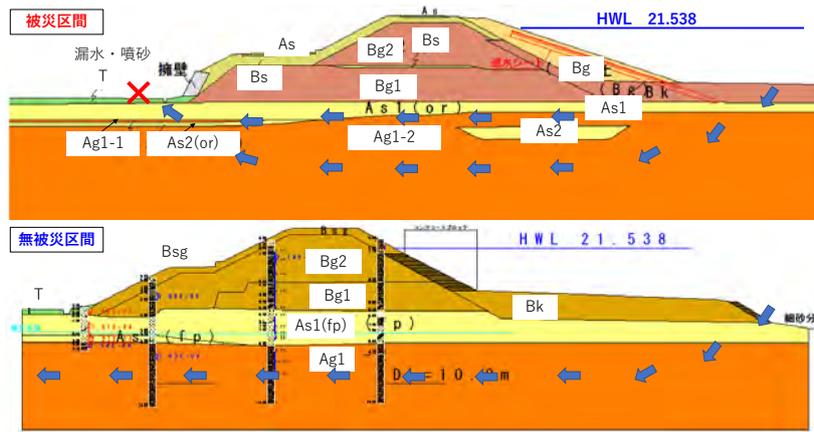


図-4 土質横断面図（那賀川，上：被災区間，下：無被災区間）



図-5 被災状況（吉田川，2015年9月，東北地整提供）

#### (4) 考察

以上の結果から，那賀川の左岸 13.24～13.48k 区間における漏水及び噴砂の原因は，透水性の礫質土層が川裏法尻の比較的浅い位置に存在することが主な原因と推定された。その存在範囲はおおよそ 200m 程度であり，今回実施した約 80m の間隔の簡易サンプリング調査で把握出来るものであった。

### 3. 鳴瀬川水系吉田川

#### (1) 被災概要

吉田川左岸 15.60～16.04k 区間では，2012年7月，2015年9月の出水でくり返し漏水が発生している。特に図-5に示す2015年9月の出水における漏水では，川裏小段から大量の漏水がみられた。

#### (2) 調査区間

本研究では，上記の被災区間を含む吉田川左岸 15.60～16.40k 区間を対象に被災原因調査を行った。なお，調査区間を含む一連区間（左岸 15.60～16.40k）の代表断面 15.92k において堤防詳細点検が実施された。その結果は，川表及び川裏のすべりは照査基準を満足しており，パイピングは被覆土層が 3m 以上であることから照査不要であった。それにも関わらずくり返し漏水が発生していることから，被災原因調査を実施した。

#### (3) 調査結果

##### a) 微地形・堤防形状

周辺の地形は治水地形分類図において，氾濫平野，後背湿地，自然堤防，旧河道（不明瞭），旧流路および干拓地に区分されている。このうち調査地周辺では干拓地が最も広く分布し，調査地の上流側には氾濫平野が分布している。

UAV の撮影画像と航空レーザ測量を活用し把握した被災区間周辺の微地形及び堤防形状を図-6に示す。この結果から，調査区間は平均動水勾配と比高差，法勾配は被災区間と無被災区間でほとんど変化はない傾向がみられた。これらの結果から，対象となる漏水は微地形・堤防形状に起因したものでないと推定される。

##### b) 縦断土質状況

次に，被災区間と無被災区間の両方を対象に簡易サンプリングを実施した。簡易サンプリングは図-6に示すように川裏法尻部を基本として，最大深さ 5m，おおよそ 80m 間隔で実施した。なお，簡易サンプリングはポータブル型の土壌採取機器もしくは自走式ボーリング機器のいずれかを現地の状況に応じて採用した。なお，各層の透水係数として，地下水位深は簡易サンプリング孔を利用した現場透水試験，地下水以浅はボーリングのサンプリングによる室内透水試験，透水試験の実施が困難な場合は Creager の式を用いている。

あわせて，無被災区間の中から平均動水勾配が最も高い横断面を対象に，ボーリングを実施した。ボーリングは，河川堤防の詳細点検と同様に，川表法面，天端，川裏法面の 3 点について，基礎地盤の難透水が 1m 以上確認されるまでの深さとした。

簡易サンプリングとボーリングの結果と既存のボーリングの結果をまとめた川裏法尻部における縦断方向の土質の状況を図-7にまとめた。その結果，被災区間には，透水性の低い礫混じりシルト層（Bc1:  $5.63 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ）が比較的浅い位置（表層から 1.0～1.5 m）に存在することが確認された。一方，無被災区間では比較的透水性の高いシルト混じり砂層（Bs1:  $7.92 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ）が同様の位置に存在する。この表層近く基礎地盤の透水性

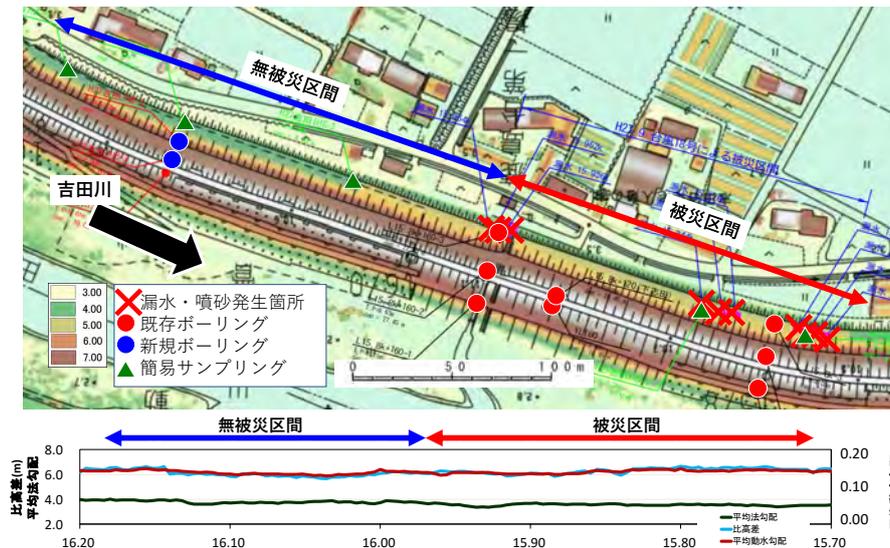


図-6 調査地点及び堤防形状図（吉田川）

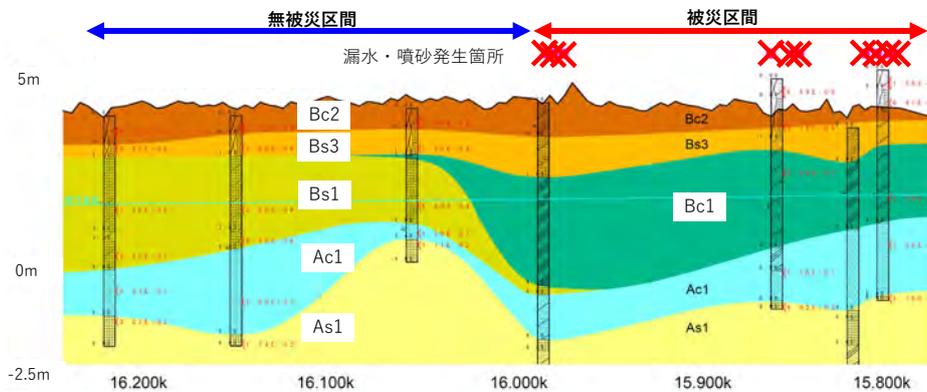


図-7 裏法尻部土質縦断面図（吉田川）

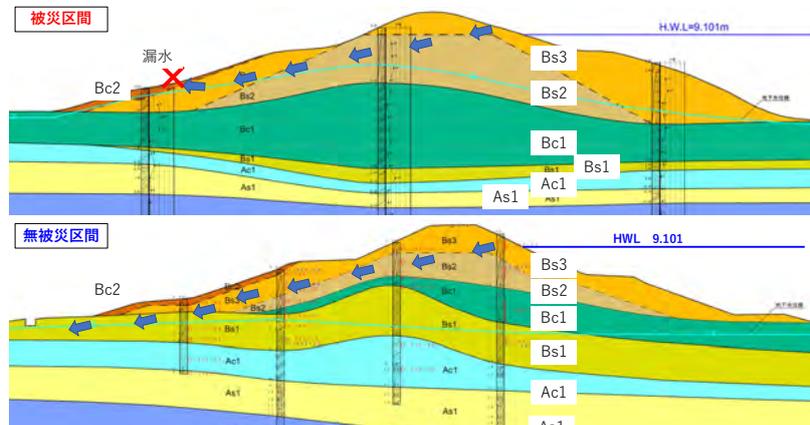


図-8 土質横断面図（吉田川，上：被災区間，下：無被災区間）

の違いが、漏水の有無を分けたと推定された。

c) 横断土質状況

前述のボーリングの結果と既存のボーリングの結果をもとに、図-8に被災区間及び無被災区間の堤体及び基礎地盤の土質横断面図を示す。被災区間においては表層近くに比較的透水性の低い礫混じりシルト層が存在するとともに、堤体内に地下水位が存在する。出水により上昇した河川水と雨水は、表法面被覆工が設置済であるため、堤体上部の透水層 (Bs2:  $9.81 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ) から

入り裏法尻へ浸透した。しかし、基礎地盤の表層には透水性の低い礫混じりシルト層が存在するため、行き場を失った浸透水により川裏小段から漏水を発生したと考えられる。また、基礎地盤表層に透水性が低い層が存在することにより、堤体内の通常の水位が高いことも漏水の発生につながった可能性もある。一方、無被災区間においては川裏法尻の下に透水性が高いシルト混じり砂層が存在するとともに、地下水位は基礎地盤中に位置している。そのため、同様に堤体の透水層 (Bs2及びBs3:  $1.14 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ) から入った河川水と

雨水が、裏法尻に浸透しても基礎地盤へ流出するため川裏小段において漏水が発生しなかったと推定される。

調査区間において最も河川水位が上昇した2015年9月の実績水位を用いて、作成した横断面の横断土層図と地下水位をもとに飽和不飽和浸透流解析を行ったところ、被災区間は揚圧力が0.75と1.0を切る結果となった。一方、無被災区間については、基礎地盤への浸透水の流出により間隙水圧が上昇しないためパイピングについて安全であるとの評価となった。

#### (4) 考察

以上の結果から、吉田川の左岸15.60～16.04k区間における漏水の原因は透水性の低い礫混じりシルト層が堤内地の基礎地盤の表層に存在することと堤体に存在する高い地下水位が主な原因と推定された。特に礫混じりシルト層の存在範囲は200mを超え、今回実施した約80m間隔の簡易サンプリング調査で把握出来るものであった。一方、詳細な微地形・堤防形状の把握では、被災区間と無被災区間の区別はつかず、前述の縦断方向の土質の不均質性が大きな影響を及ぼすことが確認された。

## 4. 結論

### (1) 結果

那賀川と吉田川における被災原因調査の結果、以下の事項が明らかになった。

1. 那賀川の左岸13.24～13.48k区間における漏水及び噴砂の原因は、高透水性の礫質土層が川裏法尻の比較的浅い位置に存在することが主な原因と推定された。
2. 吉田川の左岸15.60～16.04k区間における漏水の原因は透水性の低い礫混じりシルト層が堤内地の基礎地盤の表層に存在することと、堤体内に存在する高い地下水位が主な原因と推定された。
3. 被災区間と無被災区間を分けたのは、主に縦断方向の土質の不均質性によるものであった。それを把握する手法として、川裏法尻部の約80m間隔の簡易サンプリング調査は有効であった。

### (2) 今後の堤防調査の方向性

前述の被災原因調査結果から、被災区間と無被災区間の縦断方向の土質の差を明らかにするとともに、被災のメカニズムを解明できた。しかし、国土交通省が管理するだけでも10,000kmを超える河川堤防すべてに、例え川裏法尻部の簡易サンプリング調査のみであっても実施するのは非現実的である。また、子吉川の約60mの範囲のみの微地形・堤防形状の差に起因する様な被

災を把握するのは、今回の約80m間隔の簡易サンプリングのみでは困難であり、連続的に微地形・堤防形状を把握する技術も併用することが必要である。

これらの状況から、今後の河川堤防の調査では、縦断方向に長い区間を対象にした調査と限られた区間を対象にした調査を分ける必要があると考える。例えば、田端ら<sup>6)</sup>、笹岡ら<sup>7)</sup>が提案している縦断方向の堤防形状や堤体・基礎地盤の土質等の情報から相対的な弱部を抽出する技術が提案されている。それを縦断方向に長い区間に適用した上で、特に相対的な弱部となる区間や大都市を後背地に持つ等の社会的に重要な区間を対象に、本研究で実施した詳細な微地形・堤防形状の把握、高い密度での地盤調査による縦断方向の土質の不均質性を把握し、被災の事前防止のための対策を実施する区間を抽出する方法が考えられる。

本研究は、限られた区間を対象とする調査方法を議論する上で、出発点となる事例と考えられる。なお、簡易サンプリングの約80m間隔という数字は、現地の被災状況等を勘案し設定したものであり、地盤工学的な根拠の確立は課題として残っている。今後、他の河川でも同様の調査を実施し、さらに知見を蓄積したい。

## 謝辞

被災原因調査の実施、既存の地質調査結果の提供にあたり、ご協力頂いた四国地方整備局那賀川河川事務所、東北地方整備局北上下流河川事務所に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 中村賢人, 笹岡信吾, 諏訪義雄, 森啓年: UAVを活用した微地形写真解析による河川堤防周辺の浸透に対する被災要因分析, 第4回河川堤防技術シンポジウム, pp.47-48, 2016.11
- 2) 下川大介, 福原直樹, 森啓年, 服部敦: 変状と被災の統計的解析による河川堤防の点検及び巡視維持管理点検・巡視の合理化に関する一考察, 河川技術論文集, Vol.21, pp.337-342, 2015.6
- 3) 国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)2012.2 [http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/material/teibou\\_kouzou02.pdf](http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/material/teibou_kouzou02.pdf) (2017.4 確認)
- 4) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告書, 2013.3, [http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site\\_files/file/torikumi/01-plan\\_course/tyosa/saisyu/houkokusyo.pdf](http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/torikumi/01-plan_course/tyosa/saisyu/houkokusyo.pdf) (2017.4 確認)
- 5) 中川博樹: 子吉川における堤防被災メカニズムと調査分析結果について, 2014.12 <http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~gm/session.pdf> (2017.4 確認)
- 6) 田端幸輔, 福岡捷二, 瀬崎智之: 超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, pp.I\_1273-I\_1278, 2015.2
- 7) 笹岡信吾, 上野俊幸, 諏訪義雄, 森啓年: 被災履歴を考慮した河川堤防の弱点箇所抽出手法の提案, 第4回河川堤防技術シンポジウム, pp.57-60, 2016.11

(2017. 4. 3 受付)