

平成 30 年 7 月西日本豪雨災害における 江の川堤防被災

佐古 俊介¹・倉田 大輔²・森 啓年³・中川 翔太⁴・
大堀 文彦⁵・陰山 健太郎⁶

¹正会員 山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-0861 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: b003wd@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-0861 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: i006wd@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 山口大学准教授 大学院創成科学研究科 (〒755-0861 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: mori@yamaguchi-u.ac.jp

⁴山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-0861 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: b033ve@yamaguchi-u.ac.jp

⁵正会員 日本工営株式会社 流域水管理事業部 (〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6)
E-mail: a6623@n-koei.co.jp

⁶正会員 日本工営株式会社 流域水管理事業部 (〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6)
E-mail: a4601@n-koei.co.jp

平成 30 年 7 月豪雨により、島根県と広島県を流れる江の川において、一部で計画高水位を上回る記録的な洪水が発生し、河川堤防においても主なもので 2 か所の基礎地盤のパイピングに伴う噴砂や漏水、堤体の陥没やのり崩れ等が発生した。

本論文はこのうち大規模な被災が発生した、江の川左岸 27.8kp~29.2kp を対象に、地盤調査により堤防の土質構造を明らかにし、堤内地やのり尻、裏のり尻補強ブロック上端付近に発生した噴砂等の被災メカニズムについて、飽和不飽和浸透流解析や目視調査結果等を用いて明らかにした。併せて、衛星 SAR を用いた堤防変状の把握手法について検討を行い、解析範囲を狭めると堤防変状箇所と被災箇所が合致することがあるものの、衛星 SAR の特徴である、より広範囲の観測から堤防の変状を検知するのは現段階では困難であることが分かった。

Key Words : river levee, piping, settlement, SAR

1. はじめに

平成 30 年 7 月豪雨は、土砂災害や河川の破堤災害等、西日本一帯に大きな被害をもたらした。河川堤防においては、岡山県を流れる直轄河川である高梁川支川の小田川やその二次支川における破堤災害を筆頭に国の直轄管理河川では 22 水系 47 河川において、被害が発生している¹⁾。中国地方整備局管内の島根県と広島県を流れる江の川においても、一部で計画高水位を上回る記録的な洪水が発生し、堤防においても破堤にいたらなかったものの、主なもので 2 か所の基礎地盤のパイピングに伴う噴砂や漏水、堤体の陥没やのり崩れ等が発生している。

出水時における堤防被災について堤体土質や地盤構造

の調査を行うとともに、被災メカニズムについて明らかにすることは、堤防の安全性の向上や設計手法の高度化、有効な強化対策技術の検討において非常に意義があることであり、鬼怒川の堤防破堤²⁾や小田川の堤防破堤³⁾、北川の堤防被災⁴⁾等、過去の被災においても土質調査とそれを用いた被災メカニズムの分析が行われている。本論文は平成 30 年 7 月豪雨による堤防被災箇所のうち、噴砂と堤体の沈下が発生した、江の川水系江の川左岸 27.8kp~29.2kp の鹿賀地区における堤防被災を取り上げ、被災の概要について示すと同時に、ボーリング調査やトレンチ調査等の地盤調査を実施し、堤体と基礎地盤の土質構造について明らかにした。あわせて、飽和不飽和浸透流解析や円弧すべり解析結果と併せて目視調査結果を用い

て分析, 被災のメカニズムについて推定を行った。

また, のり面すべりやパイピングによる空洞等の堤防の変状が生じる場合, それらの変形が堤体表面に現れると考えられている。被災を堤防管理に活かすにあたっては, このような変形をいち早くとらえることにより安全性を向上させる上で重要であると認識されている。現在は主に目視を主体とする点検が行われているが, 長大な延長を持つ堤防の点検を限られた人的, 経済的状況の中で行うには, 人の目に大きく依存する現状の点検のやり方の限界や, 点検巡視の合理化を一層図る必要がある⁹⁾。現在までに MMS 等のレーザー測量で点群データを取得し, 堤防の変状を定量的に把握する方法⁹⁾や, 航空レーザー測量等により広範囲を一度に定量的な変形把握を行う方法⁷⁾が試みられている。そこで本論文では, 併せて, 衛星 SAR を用いた今後の堤防管理の可能性について考察を行うものである。

2. 被災の概要

(1) 被災の概要

江の川は, 流域面積 1,981km², 直轄管理区間延長 164.2km の一級河川である。平成 30 年 7 月豪雨の影響により, 総雨量としては, 被災箇所近傍の川本雨量観測所において,

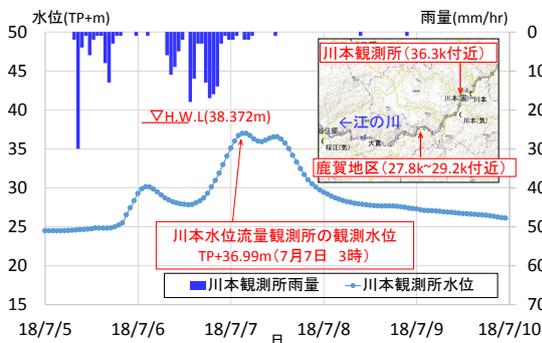


図-1 川本観測所における降雨・水位波形

7/5:00 から 7/9 23:00 までで計 221mm という猛烈な雨が降り, 水位は計画高水位を一部上回る記録的な洪水が発生し, 江の川右岸下原地先 15.0k~16.0k 区間と, 江の川右岸鹿賀地区 27.8k~29.0k の 2 箇所において, 堤体のり崩れや基礎地盤からの噴砂等の被災が発生した。

特に鹿賀地区においては, 28.4k~29.0k では延長約 11m (天端道路亀裂を含むと 15.2m), 27.8k~28.4k では延長約 10m の大規模なり崩れが発生した。

(2) 被災時外力

a) 降雨

図-1 に示した被災時の降雨としては, 被災箇所近傍の川本雨量観測所において, 総雨量として 221mm, 時間雨量の最大値で 30mm を記録している。

b) 水位

被災時の水位としては, 計画高水位を一部上回る箇所がある等, 記録的なものであったが, 図-2 に示した鹿賀地区における水位は, 計画高水位から 0.4m~1.0m 下の水位まで上昇している。

また, 当地区は洪水時に内水が発生しており, 被災箇所近傍の鹿賀第 1 排水樋門と鹿賀第 2 排水樋門の内水位観測結果 (図-3) によると最高内水位が約 TP.25.0m となり, 外水位との差は 7.0m 程度あったと推定される。

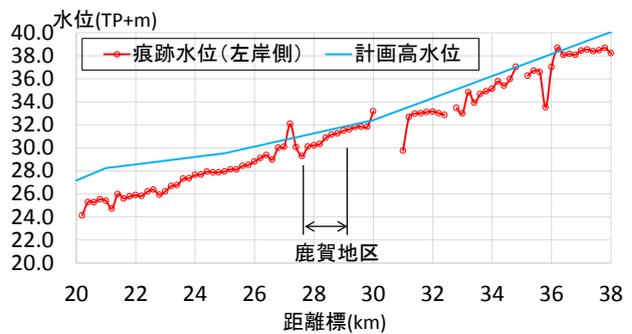
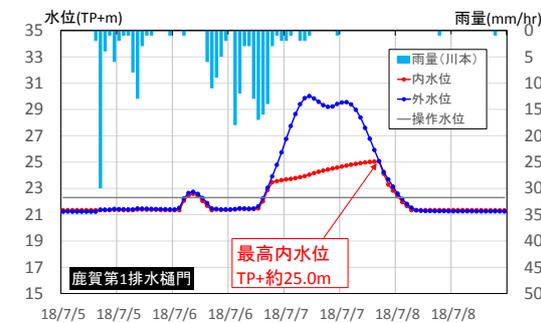
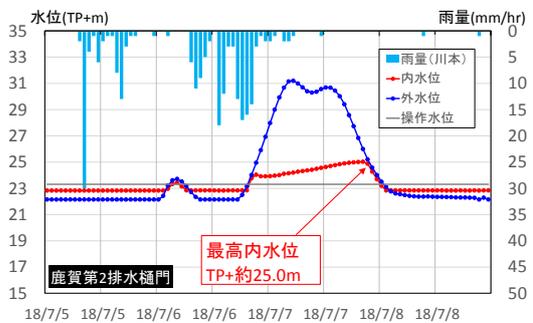


図-2 出水時の鹿賀地区付近の痕跡水位



(a) 鹿賀第一排水樋門



(b) 鹿賀第二排水樋門

図-3 内外水位差観測結果

(3) 築堤履歴

被災箇所における築堤履歴について堤防台帳をもとに整理を行った。その結果、当地区の堤防は昭和61年から平成7年にかけて築堤されており、28.75k(上流側)においては昭和61年から昭和63年にかけて、今の堤防の小段付近まで堤体を施工し、併せてのり尻付近に採石による置換工が施工されている。その後平成2年から平成3年にかけて計画高水位まで盛土を施工し、現在の堤防となっている(図-4)。

一方28.0k(下流側)においては昭和63年から平成6年にかけて、今の堤防の小段付近まで堤体を施工し、こちらは置換工は施工されていない。その後平成3年から平成7年にかけて計画高水位まで礫質土を用いて盛土を施工し、現在の堤防となっている(図-5)。

なお、両堤防とも平成28年に危機管理型ハード対策として超過洪水対応として天端舗装と裏のり尻部に補強ブロックが設置されている。

(4) 被災箇所の地形

図-6に示した江の川右岸鹿賀地区における治水地形分類図によると、堤防は微高地(自然堤防)上に築

造されており、特に旧河道や落堀等の治水上の要注意地形は確認できない。

(5) 被災箇所

江の川右岸鹿賀地区における被災箇所としては、28.4k~29.0k(上流側)と27.8k~28.4k(下流側)に大別される。被災状況を図-7及び図-8に示した。

28.4k~29.0k(上流側)の被災箇所としては、下流から28.8k-80m付近の小段部に延長16m、最大幅150mmのクラック(写真[1])と3箇所ののり面崩壊、28.8k付近の小段部に延長3m、最大幅30mmのクラックとのり尻部に設置された置換工の砕石が基礎地盤材料の砂とともに噴出(写真[2])、28.8k+40m付近の小段部とのり面に延長12m、最大幅11cmのクラック、28.8k+110m付近に小段部のクラックとのり面崩壊(延長1.6m、幅0.4m、深さ0.2m)、28.8k+150m付近にのり面崩壊(延長2.0m、幅2.4m、深さ1.0m)が見つかる(写真[3])。さらに、28.7k~28.9kの堤内地の耕作地においては、のり尻部の噴砂(写真[4])が点在している。

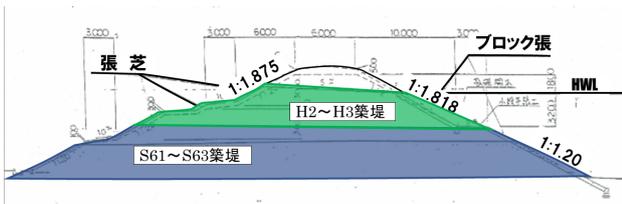


図-4 28.75kの築堤履歴

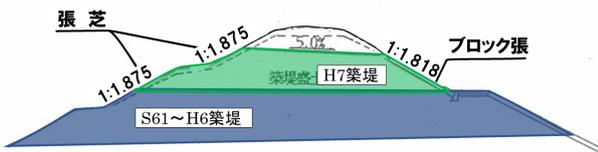


図-5 28.0kの築堤履歴

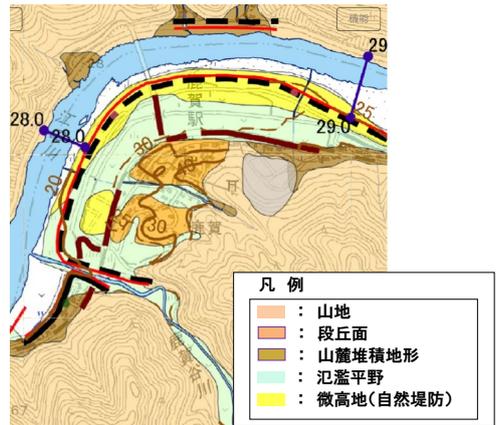
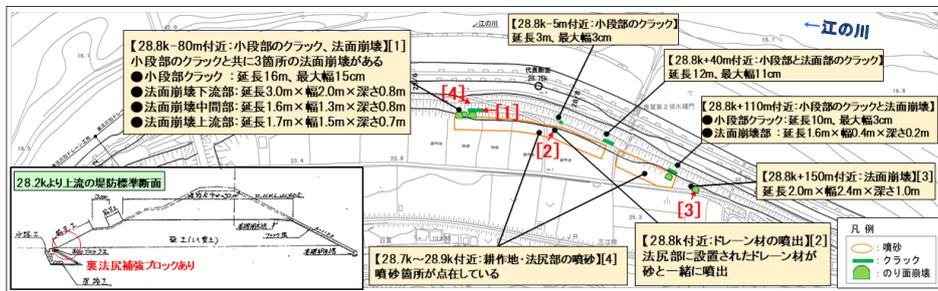


図-6 治水地形分類図



(a)平面図



(b)写真[1]

(c)写真[2]

(d)写真[3]

(e)写真[4]

図-7 28.4k~29.0k(上流側)の被災状況

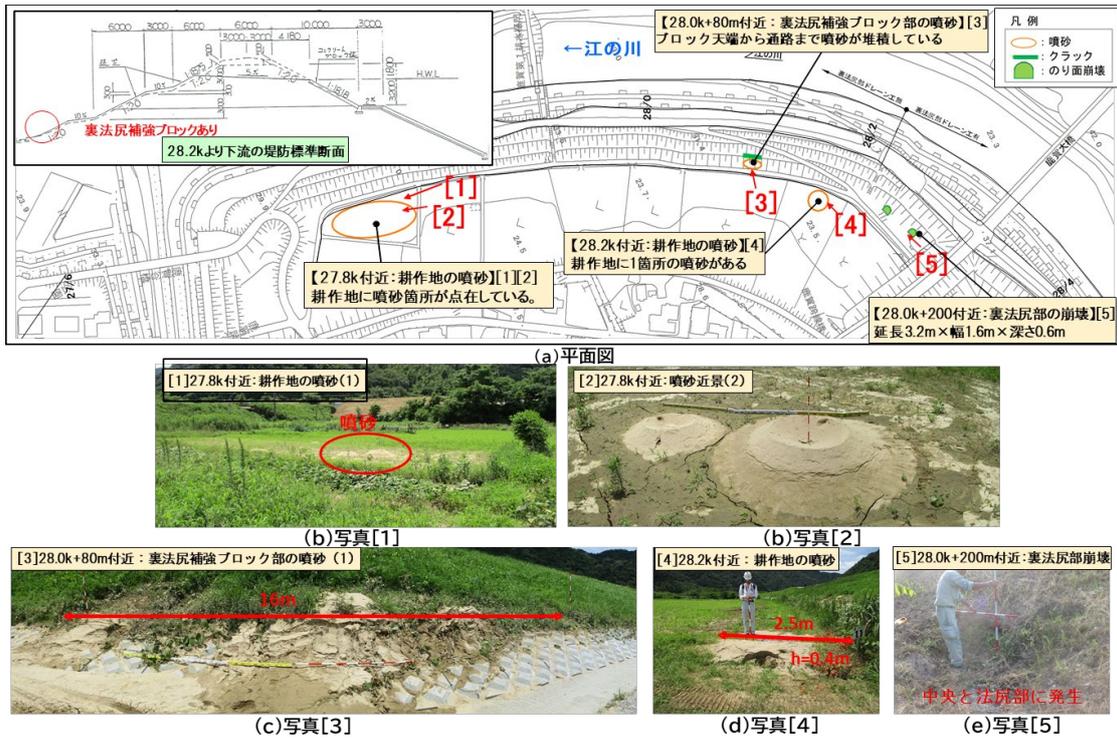


図-8 27.8k~28.4k (下流側) の被災状況

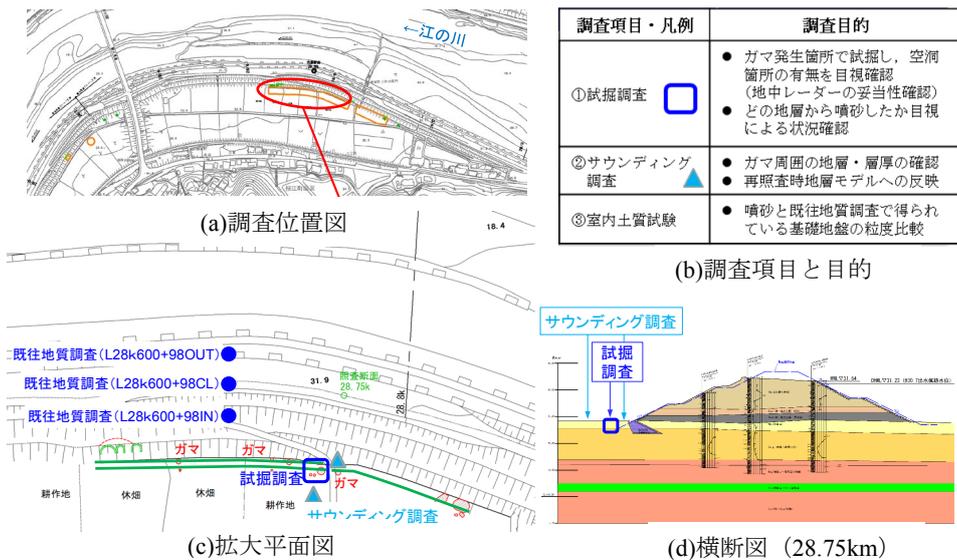


図-9 27.8k~28.4k (下流側) の調査箇所

また、27.8k~28.4k(下流側)の被災箇所としては、下流から27.8k~28.2kにかけての堤内地に噴砂箇所(写真[1], [2])が点在し、28.0k+80m付近の小段部に延長13m、最大幅50mmのクラックと裏のり尻補強ブロック部の天端から通路まで噴砂が堆積(写真[3])している。加えて、28.2k付近の堤内地に噴砂(写真[4])、28.0k+180mと200m付近に裏のり尻部ののり崩れ(写真[5])が見つかった。

3. 被災箇所の調査

被災箇所の調査については、鹿賀地区2箇所の被災箇所のうち上流側(左岸28.4k~29.0k)の噴砂量が多かったため、代表断面を左岸28.75kとしてその周辺について調査を実施した(図-9)。

調査については、代表断面やや下流(左岸28.6k+98m)における既往のボーリング調査結果を補完する形で、代表断面(左岸28.75k)でトレンチ調査とスウェーデン式サウンディング試験を実施した。

(1) ボーリング調査

平成 19 年に浸透に対する安全性照査が実施されており、そのときに裏のり、表のり、裏のり肩付近の 3 本のボーリング調査が実施されている (図-10)。

既往ボーリング調査で確認された堤体の土層構造は、上位より、玉石混じり砂礫の Bg 層、砂と粘性土の互層で褐色の Bsc1 層、同じく砂・粘土互層で黒灰色の Bsc2 層からなる。また、基礎地盤の土層構造は、地表面より、砂質土 (礫混じり砂～シルト質砂) の Ums 層、砂礫～礫混じり砂の Us-g 層、礫質土～玉石混じり砂礫の Us-g 層、砂質土の Ucs 層から粘性土の Ucc 層に遷移する層、砂である Lss 層から砂礫である Lsg 層に遷移する層からなる。河川水上昇時において、河川水の水圧は、主に Us-g 層および Usg 層から川裏側に伝播すると考えられる。

(2) トレンチ調査

川裏側のり尻部における堤防縦断方向のトレンチ調査 (試掘調査) を実施し、トレンチの掘削面の観察を行った。図-11 に調査結果を示した。基礎地盤は、地表面に堆積した噴砂に覆われたシルト質砂、その下位には淡灰色の砂が分布している。スウェーデン式サウンディング試験の結果、Nsw が 150 を上回る深度

が既往ボーリング調査で確認された Ums 層の下端深度と概ね一致していることから、のり尻付近の Ums 層の層厚は既往地質断面図と概ね一致している。

なお、トレンチの鉛直方向掘削面において、シルト質砂層 (Ums 層) 内に淡灰色の細砂がポケット状に分布している状況 (図-12) が確認されたことから、シルト質砂の下位に分布する Ums 層内の淡灰色の細砂が地表に繋がっていると考えられる。

(3) 粒度分布試験結果

既往ボーリング調査において実施された粒度試験の結果を整理し、噴砂の粒度分布との比較を行った (図-12)。

その結果は概ねボーリング結果を裏付けるものではあった。噴砂の粒径加積曲線と一致する粒径加積曲線の土層はなかったが、基礎地盤の地表面付近に分布する Ums 層の粒径加積曲線が噴砂に近い傾向を示している。また、堤体下位に分布する Bsc2 層については堤体表のり～天端付近にかけてと裏のり尻付近とは粒度分布の傾向が異なり、堤体表のり～天端付近は、細粒分が 50%以下の砂質土であるが、裏のり尻付近の堤体では細粒分を 50%以上含む粘性土であることが確認された。

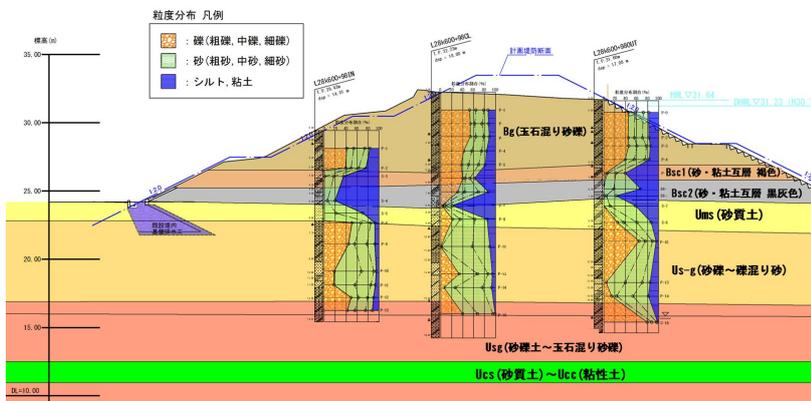


図-10 28.75k のボーリング調査結果と粒度分布試験結果



図-11 28.75k のトレンチ調査結果

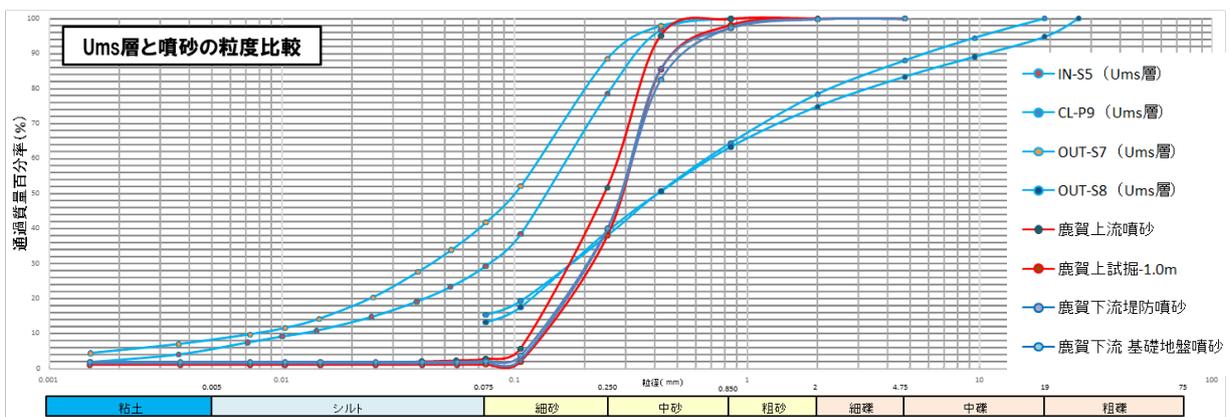


図-12 Ums 層と噴砂の粒度分布の比較

(4) 堤防土質構造

前述のように、鹿賀地区の左岸 28.75k の堤防は、昭和 61 年から昭和 63 年にかけて、小段部付近まで砂・粘土 (Bsc1 層) による築堤、平成 2 年から平成 3 年にかけて、小段付近から HWL まで玉石混じり砂礫 (Bg 層) による築堤がなされており、これが現在の堤防の主な構造をなしている。

基礎地盤は、礫混じり砂～シルト質砂の Ums 層の下位に砂礫～礫混じり砂である Us-g 層が分布している (図-13)。

対策工としては、昭和 61 年の最初の築堤時に裏のり尻部基礎地盤に置換工が施工されている。また、平成 2 年から平成 3 年にかけての築堤時に、川表側の護岸ブロック敷設に合わせて遮水シートが設置されている。

なお、平成 28 年に危機管理型ハード対策として川裏のり尻ブロックと天端舗装が施工されている。

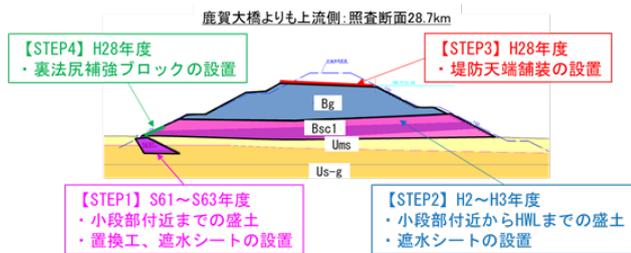


図-13 28.75k の堤防土質構造

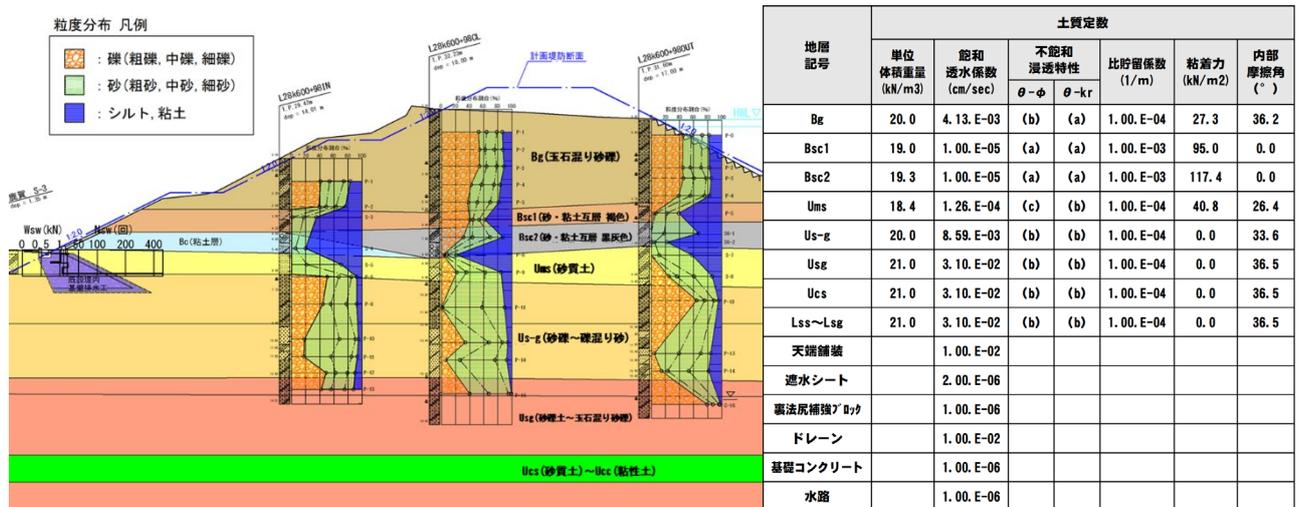
4. 解析結果 (上流区間ケース 3)

河川水位上昇時における浸透に対する安全性照査を行うため、ボーリング調査結果、サウンディング調査結果に基づき、鹿賀地区の左岸 28.75k の堤防のモデル化を行った。その際、堤体下部における Bsc 層については工事資料において砂質土および礫質土を材料として用いた記録があるため、砂質土として取り扱い、強度定数は粘着力を見込まず、内部摩擦角で設定した。一方、堤体川裏側のり尻付近 Bsc2 層においては粒度分布から粘土・シルト分を 50%以上含んでいることから、Bsc2 層の川裏側は、局所的な粘性土層としてモデル化を行った (図-14)。

照査における外力については、被災した平成 30 年 7 月洪水実績とした。降雨については 36.3k 付近の川本観測所における実績雨量、河川水位については、同じく川本観測所における観測水位でのピーク水位を痕跡水位へ平行移動した水位波形を作成し、外力として用いた。

河川水位上昇時における浸透に対する安全性照査の結果を図-15 に示す。堤体の危機管理型ハード対策である川裏のり尻ブロック上端の水平方向の局所動水勾配 (i_h) は 0.49 でほぼパイピングが発生する動水勾配となった。一方、堤体のり尻基礎地盤の置換工の上面における鉛直方向の局所動水勾配 (i_v) は 1.31 となった。また、堤内地の鉛直方向の局所動水勾配 (i_v) は 0.91, G/W は 0.99 であった。

なお、堤体裏のりすべりに対する安全率 F_s は 2.64 であった。



(a)地層断面図 (28.75km)

(b)土質定数

図-14 江の川左岸 28.75k における堤防のモデル化

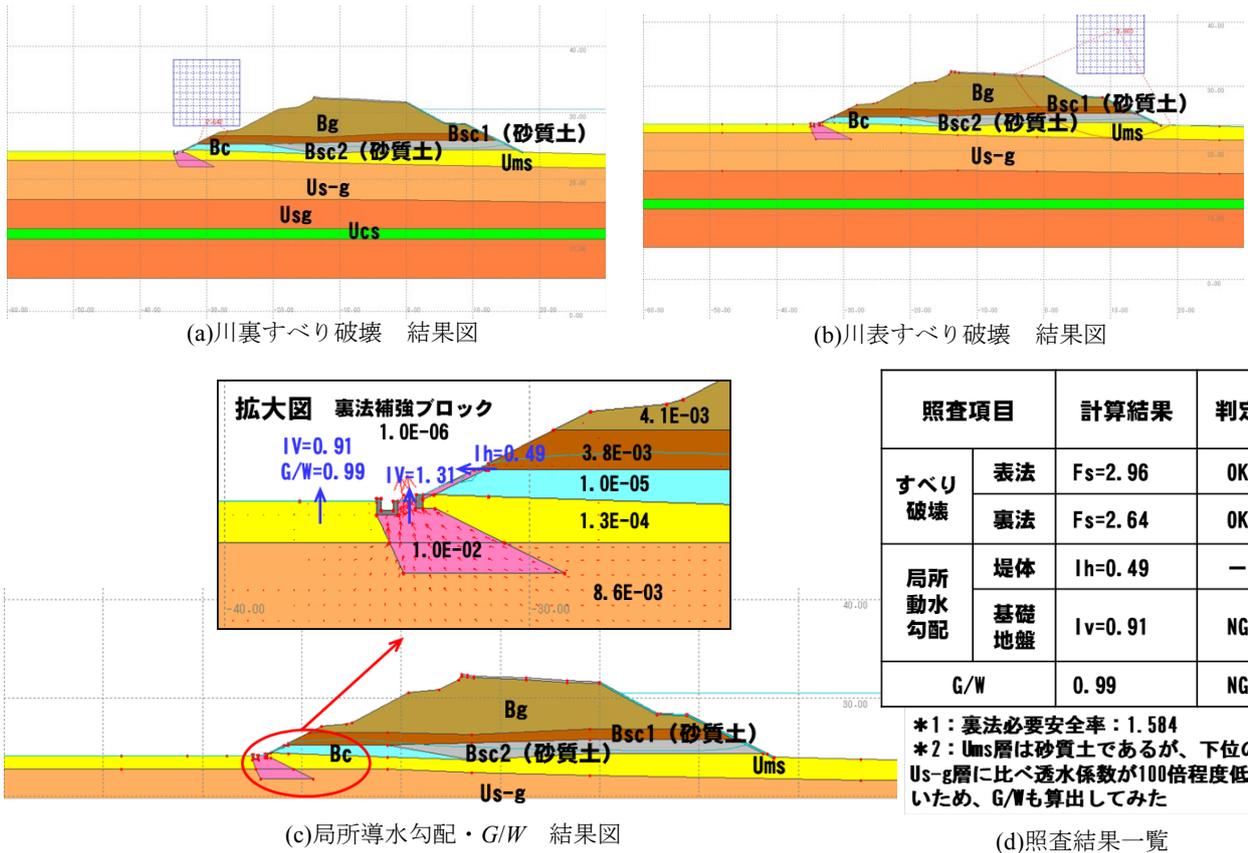


図-15 江の川左岸 28.75kにおける解析結果

5. 想定される被災メカニズム

調査, および解析結果をもとにした鹿賀地区27.85k付近における被災メカニズムについて以下に示す。

(1) 堤内地の噴砂

鹿賀地区 27.85k 付近における目視調査によると、27.85k 中心に前後約 50m の範囲で堤内地や置換工が施工されているのり尻付近に噴砂が点在している。

また、噴砂孔付近の Ums 層に相当する層のトレンチ調査では、表層に 80cm 程度のシルト質砂層が分布し、その下位に砂質土層が分布することが確認されている。ここでは空洞等は確認されていないものの、上部のシルト質砂層の間に細砂の部分的な分布が確認され、一部では砂脈状に分布している (図-16)。これらの細砂は、シルト質砂層の下部に分布が確認された砂質土層と同じ土質である。

一方、図-15 に示すボーリング調査結果を用いて被災箇所をモデル化した解析結果によると、堤内地側は $G/W=0.99$ で、堤防設計指針において求められるパイピングに対する照査基準 $G/W \geq 1.0$ とほぼ同じ値を示していること、のり尻側は置換工による排水の影響もあり $i_v=1.31$ で、パイピングに対する照査基準 $i \leq 0.5$

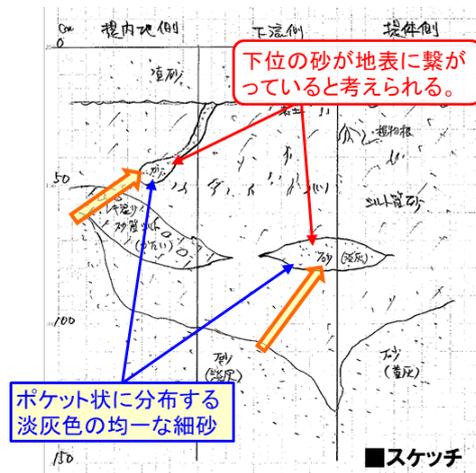


図-16 トレンチのスケッチ

を大きく上回る結果となったことから、基礎地盤パイピングが生じる危険性が高いことが裏付けられる結果となっている。

これらのことから、堤内地とりのり尻付近の噴砂は、Usg 層のうち下部に堆積する基礎地盤砂礫層を浸透した河川水が間隙水圧の上昇を招き、上部に堆積するシルト質砂層を突き破り、噴砂が発生したものであると考えられる。特にのり尻側の局所動水勾配はパイピングが発生する $i=0.5$ を大きく上回る結果となって

いることから、噴砂に加えて置換工の採石が共に噴出したものと推察される。

なお、図-12に示すように、トレンチ調査箇所付近の噴砂と Ums 層の粒度試験の結果を比較すると、Ums 層と被災箇所噴砂の粒度分布が、ほぼ同様の粒度曲線となっていることが分かる。このことから、被災箇所噴砂は Ums 層由来であることが推定される。なお、被災箇所の噴砂の粒度分布がやや均質になるのは、噴砂の段階で分級作用が進むために、粒径が揃う傾向があるためと考えられる。

(2) 裏のり尻補強ブロック付近の噴砂

裏のり尻補強ブロックは、Bsc2 層の裏のり側を覆うように配置されており、噴砂は補強ブロック上端から発生している。Bsc2 層ののり尻付近は粒度分布試験の結果、シルト・粘土分を 50%以上含んでいることが確認されていることから、粘性土に近い透水性を持つと考えられる。

また、Bsc2 層の上部に位置する Bsc1 層は砂質土系の材料であるため、堤体に浸透した降雨や河川水は Bsc2 層上部に溜まり、裏のり尻に向かって排水されることとなる。

一方で、解析結果によると、補強ブロック上端部付近の局所動水勾配 (i_b) は 0.49 でほぼパイピングが発生する動水勾配となり、この部分から噴砂が生じる危険性が高いことが裏付けられる結果となっている。

これらのことから、裏のり尻補強ブロック付近の噴砂は、堤体下部の砂質土系の材料で構成された Bsc1 層と、のり尻付近に局所的に介在する粘性土系の材料で構成された Bsc2 層の間を通った堤体内浸透水が、裏のり尻補強ブロックでせき止められ、ブロックの天端付近で排水されることにより発生したものと推察される。

(3) 小段のクラック

小段部のクラックは、解析結果によると裏のり安全率が $F_s=5.16$ と高く堤体の浸潤線上昇に伴う土質強度の低下によるものではないと考えられる。出水に伴い基礎地盤の Ums 層や Usg 層の間隙水圧が上昇し、裏のり尻や堤内地で噴砂を生じることで空洞が発生し、それに伴い支持力が低下することによってのり崩れを生じた可能性が高い。

6. 衛星 SAR 技術の堤防管理への応用

今回のようなのり面すべりやパイピングによる空洞等の堤防の変状は、洪水時の浸透作用により、堤体が

不安定化することで発生するものである。この場合、それらの変形が堤体表面に現れると考えられている。このような変形の程度を出水後早期に把握することや、日々の河川管理において変形量の変化を把握しておくことは、堤防の安全性を向上させることで極めて重要なことである。

現在、堤防変状をレーダー測量等の技術を用いてとらえる技術は、MMS や UAV 等を活用したものが、一部実用化されつつある⁸⁾。また、岡村ら⁹⁾や山中・岡村¹⁰⁾は、実河川の堤防において、パイピングの緩み領域をミニラムサウンディングを用いて特定し、さらに、同じ調査地点において LP 又は SfM で取得した DEM から堤体表面の小さな凹凸とパイピングの位置関係が良く一致することを確認している。

一方、衛星 SAR による干涉解析技術を堤防に用いると地表面の変動量を mm 単位で計測することができるため、長大な延長の堤防の変状状況を一度に見ることができる特徴を利用して、出水後早期に堤防に生じた変状をより広範囲で把握する可能性を持っている。今回これを用いて江の川パイピング被災箇所における出水前後の衛星 SAR 観測データを用いて堤体表面の変形量について解析を行い、堤防変状箇所の発見の可否について確認を行うとともに、今後の河川管理における衛星 SAR 技術の応用の可能性について検討を行った。

(1) 衛星 SAR 技術の概要

衛星 SAR は、マイクロ波を地表面に向かって斜めに発射し、地表面からの反射波を観測することで地上の情報を取得する能動型センサ（合成開口レーダー (SAR)）を搭載した衛星による地表面観測技術であり、その特徴は大きく 3 つある。

- ・雲を通過する波長の電磁波であるマイクロ波を用いるため、広域を天候に左右されずに計測ができる。
- ・自らが放射したマイクロ波を観測するため、夜間の計測も可能である。
- ・人工衛星は地球の軌道上を一定周期で周回しており、国内だと概ね半日以内で観測が行える。

この SAR で観測した画像を 2 つ用いて差分干涉処理を行うことで、地形の変動量を求める技術が干涉合成開口レーダー (InSAR) であり mm 単位での地表面の変動の測定が可能とされている。

(2) 被災箇所への適用

衛星 SAR を河川管理に用いるにあたっては、すべりやパイピングの際生じると考えられる地表面の変動をとらえられることが重要であるため、今回、江の

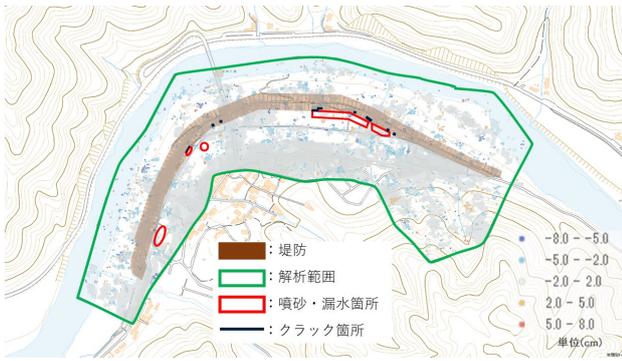


図-17 江の川鹿賀地区における衛星 SAR の解析結果

川の被災箇所における地表面の変動を衛星 SAR でとらえることが可能か解析を行った. 対象箇所は被災原因の分析を行った, 江の川左岸 27.8kp~29.2kp (鹿賀地区) 対象として SAR 干渉解析を行うこととした.

以下に標準的な手法による解析の結果を図-17に示す.

解析条件は閾値 0.90 とし, 解析時期は 2014 年 10 月 1 日から 2018 年 8 月 29 日までの地表面の経時変化を対象とし, 解析範囲は青枠の範囲内, つまり堤内地, 堤外地含めて実施した. 寒色系 (青色) が沈んでいる箇所, 暖色系 (赤色) が浮き上がっている箇所を示す. 図中に示す赤枠は主な噴砂箇所, 青線は亀裂箇所を示した. この結果, 沈下や隆起の箇所は変状箇所とは関係なくランダムに出現しており, 標準的な手法で解析を行ってもパイピングに伴う噴砂や堤体の陥没やすべりを観測することは困難であると考えられた.

SAR 干渉解析を行うにあたっては, 閾値と解析範囲と解析時期の3つが重要なパラメータであるため, これらを変更することにより変状箇所の可視化の可能性について検討を行った. SAR 干渉解析における閾値は, 地表面の変動状況の可視化に大きな影響を与える指標とされており, 地表面の変動量のモデル推定値と電波の観測データとの非相関度合いを示すものである. 閾値が小さいほど, 地表面の変動量と電波の反射状況の相関関係の誤差を許容する解析となるため, 地表面の変動を示す解析値 (以下, プロットという) は多くなるが, 地表面の相対的な変動の信頼度は低くなる.

SAR 干渉解析の解析範囲は, 解析対象を含む広範囲に設定することで長大な延長の堤防及び周辺の変状状況を一度に確認することができるメリットがある一方で, 解析は範囲内すべてのデータを対象としてフィルタリングによる前処理を行うため, 解析範囲内に含まれる植生や樹木の変化, 耕作による地表面の変化の影響等が含まれることとなり, 地表面の相対的な変動を正確に把握しにくくなる. そのため, 解析範囲は解析対象の形状を踏まえ, 極力限定的とすることが

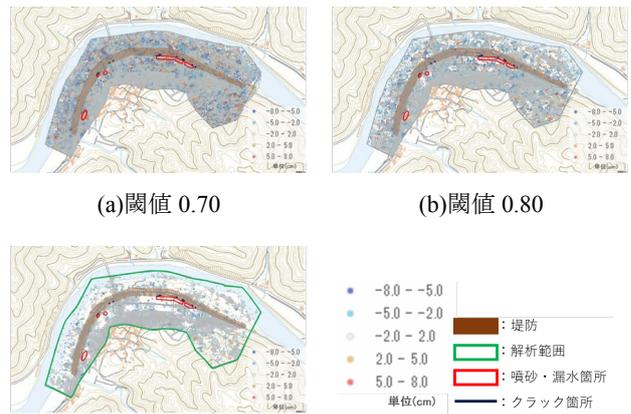


図-18 閾値を変えた場合の衛星 SAR の解析結果

望ましい.

最後に, SAR 画像の解析手法は, 2 回以上の SAR 観測において受信マイクロ波の位相より変位量を計測する SAR 干渉解析において, 時間方向に拡張し, 経年的な微小変化量を計測する時系列干渉解析と特定の 2 つの時期を比較する 2 時期干渉解析がある. 江の川の被災箇所を対象とした SAR 干渉解析では, 時系列干渉解析と 2 時期干渉解析の比較を実施した.

(3) 閾値を変化させたケース

閾値を変化させて解析を行った結果について, 0.10 刻みで図-18 に示す. 解析結果によると, 堤内地, 堤外地堤防で様々な変状がプロットされるものの, 変状位置との相関は見られない. また, 閾値を大きくするほど誤差を許容しない解析となるため, 変動を示す地表面の変動を示すプロットは少なくなるものの地表面の相対的な変動の信頼性は高くなるが, 被災箇所での地表面変動量の明瞭な違いは可視化できなかった.

(4) 解析範囲を変化させたケース

解析範囲を変更したケースについては, 被災箇所周辺に絞った場合と堤防のみの場合と鹿賀地区全体で設定して行った. なお, 閾値については衛星 SAR の解析で一般的に用いられている閾値 0.90 を用いた.

解析範囲を堤体の範囲 (緑枠内) で設定した場合と, 被災箇所絞った場合の比較を行った. まず, 堤体付近を対象範囲として設定した場合 (図-19) は, 顕著な変状が堤体に出ていない箇所でも, 地表面の変動を示すプロットがランダムに生じている. 一方で, 被災箇所絞った解析 (図-20) に関しては, 噴砂・漏水に伴う堤体のクラックが発生している箇所でも, プロットの集中が見られた. また, 噴砂・漏水に伴う堤体のクラックがある場合, 堤体の陥没が予想されるが, プロットは図-20 の左側は隆起が卓越したり, 逆に図-20

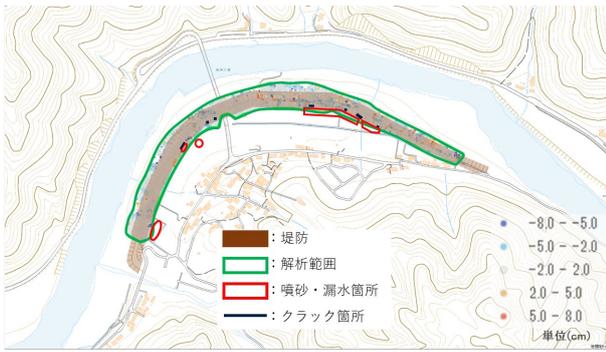


図-19 堤防周辺の範囲における解析結果

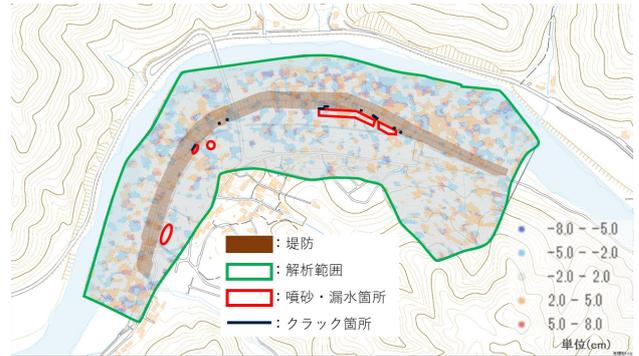


図-21 2018.3.17～2018.7.21の解析結果

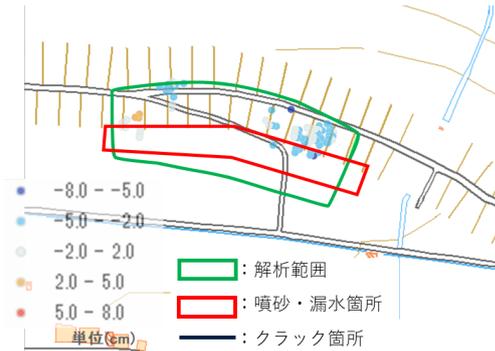


図-20 被災箇所周辺の範囲における解析結果

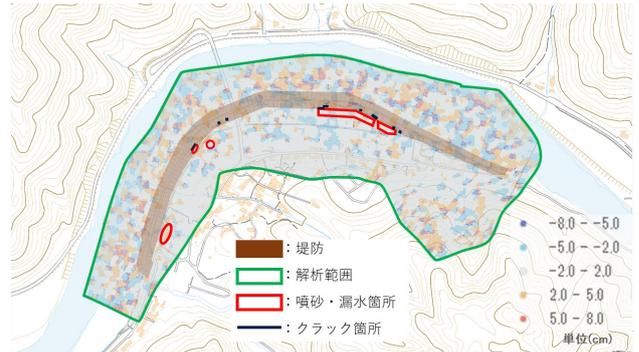


図-22 2018.6.20～2018.8.29の解析結果

の右側は沈降が卓越したりしており、現象とは異なる解析結果となった。

プロットの集中度合いと変状の関係を見ると、図-20の緑枠内のプロットの集中している箇所ではクラックが生じている。地盤のプロットは隆起・沈降の傾向が合致していないものの、解析範囲をしばると、堤体の変状部分の抽出の可能性があることが考えられる。

(5) 解析時期を変化させたケース

今回対象とした鹿賀地区の衛星 SAR データは、被災前のデータは複数時期あるのに対し、被災後のデータは1時期のみであった。

解析対象時期全ての地表面変動量データを用いた時系列解析の結果を図-21、被災前後の地表面変動量の差分を用いた2時期解析の結果を図-22に示す。噴砂・漏水やクラックといった被災箇所と、周辺のプロットの色(隆起と沈降)について見てみると、時系列解析と2時期解析における被災箇所での地表面変動量の明瞭な違いは確認されなかった。したがって、解析対象時期全てのデータを用いた場合も、2つの時期の差分を取った場合も被災箇所での地表面変動量の明瞭な違いは可視化できなかった。

(6) 堤防管理への活用

今回の結果は、衛星 SAR の特徴である、より広範囲な観測から堤防の変状を検知するという点で十分

な成果を得ることはできなかった。この原因として、解析は範囲内すべてのデータを対象として行うことから、堤内地の耕作地等の影響が除去されず相対的な変動が検知しにくかったことが考えられる。

一方で、解析範囲が狭い場合は、プロットの集中箇所と変状箇所が概ね一致していることから、地表面の変状原因が同様の箇所を切り分けて、つまり、地形や土地利用等が同様の箇所(田畑の利用等で変動量が大きく考えられる堤内地と、出水で侵食等の変状の大きい高水敷、植生程度の変動しかない堤体等)を分けて解析を行うと、精度の向上を図ることができる可能性があると考えられる。

7. まとめ

(1) 被災要因

江の川左岸 27.8kp～29.2kp(鹿賀地区)の堤防の浸透被災について、目視による被災状況や、ボーリング調査、トレンチ調査等の土質調査と併せて、飽和不飽和浸透流解析や円弧すべり解析結果を行った結果、被災メカニズムについて以下の推定を行った。

(1)堤内地とりのり尻付近の噴砂については、解析結果によると、堤内地側は $G/W=0.99$ でパイピングを発生する判断基準である $G/W \geq 1.0$ とほぼ同じ値を示していること、のり尻側の局所動水勾配はパイピングが発生する

$i=0.5$ を大きく上回る結果となっていることから、基礎地盤パイピングが生じる危険性が高いことが裏付けられる結果を得られた。また、噴砂孔付近のUsgに相当する層のトレンチ調査では、上部のシルト層の間に、シルト層の下部に分布が確認された砂質土層と同じ土質の細砂の部分的な分布が確認され、一部では砂脈状に分布していたこと、噴砂の粒度試験とUsg層の粒度試験の結果の比較より、噴砂はUsg層のものであることが明らかとなったことから、基礎地盤のパイピングによる被災であることが裏付けられた。したがって、堤内地とのり尻付近の噴砂については、Usg層のうち下部に堆積する基礎地盤砂礫層を浸透した河川水が間隙水圧の上昇を招き、上部に堆積するシルト層を突き破り、噴砂が発生したものであると考えられる。

- (2)裏のり尻補強ブロック上端から発生した噴砂については、解析結果によると、補強ブロック上端部付近の局所動水勾配(i_l)は0.49とほぼパイピングが発生する動水勾配となり、この部分から噴砂が生じる危険性が高いことが裏付けられる結果を得られた。このことから、堤体に浸透した降雨や河川水が、粘性土に近い透水性を持つBsc2層上部に溜まり、Bsc2層の上部に位置する砂質土系の材料であるBsc1層から裏のり尻に向かって排水されることに伴い発生したと考えられる。
- (3)小段部のクラックについては、解析結果によると裏のり安全率が $F_s=5.16$ と高いことから出水に伴う基礎地盤の間隙水圧の上昇に伴い、裏のり尻や堤内地で噴砂を生じることで空洞が発生し、その結果支持力が低下することによってのり崩れを生じた可能性が高い。

(2) 衛星 SAR 技術の堤防管理への応用

- (1)江の川左岸 27.8kp~29.2kp (鹿賀地区)において、堤体の変状による地表面の変化を衛星 SAR を用いて把握することを目的として、閾値、解析範囲、解析時期を変更して解析を行った。その結果、閾値と解析時期を変化させた場合では、堤防の変状箇所では地表面の変化を明瞭に確認することができなかったが、地形や土地利用等が同様で、変状原因が同様となる箇所に切り分

ける等、解析範囲を限定することにより、堤体の変状箇所では地表面の変化が確認された場合もあった。しかし、さらなる検討を行う必要がある。

謝辞: 本研究は国土交通省浜田河川国道事務所、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の協力、並びに中国建設弘済会の助成を受けたものです。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：災害情報 平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について第 52 報
- 2) 国土交通省関東地方整備局鬼怒川堤防調査委員会資料, <http://www.ktr.mlit.go.jp/river/bousai/index00000036.html>, 2015.
- 3) 高梁川水系小田川堤防調査委員会資料, <http://www.cgr.mlit.go.jp/emergency/odagawateibochosa.htm>, 2019.
- 4) 石原雅規, 上田秀一, 安部知之, 品川俊介, 笹岡信吾, 富澤彰仁, 佐々木享, 杉山詠一, 佐々木哲也: 北川における漏水の変遷と地形及び堤防構造等の関係, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp. 517-522, 2019.6.
- 5) 森啓年, 福原直樹, 服部敦: 河川堤防の点検・巡視の合理化に関する一考察, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp. 479-484, 2014.6.
- 6) 安達孝実, 河野隆治, 関克己, 藤山秀章, 小澤淳真: 堤防管理の高度化に向けた堤防地表面の点群データの活用に関する検討, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp. 565-570, 2018.6.
- 7) 国土交通省国土地理院: 航空レーザ測量による数値標高モデル (DEM) 作成マニュアル (案), 2006.
- 8) 中村賢人, 福島雅紀, 諏訪義雄: 堤防表面の変状把握における UAV レーザ測量の適用限界, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp. 565-570, 2018.6.
- 9) 岡村未対, 今村衛, 陣内尚子, 小野耕平, 山本卓男, 鎌田卓: 堤体表面沈下分布と貫入試験によるパイピング緩み領域の把握, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp. 529-534, 2018.6.
- 10) 山中大智, 岡村未対: 陥没孔周辺の堤体表面の動態観測, 第 6 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp. 41-44, 2018.12.

(Received April 26, 2019)

(Accepted August 16, 2019)

RIVER LEVEE FAILURE AT GOUNOKAWA RIVER BY 2018 JAPAN FLOOD

Shunsuke SAKO, Daisuke KURATA, Hirotoshi MORI, Syota NAKAGAWA,
Fumihiko OHORI and Kentaro KAGEYAMA

The heavy rain in July 2018 caused record-breaking floods in parts of the Gonokawa River that runs through the prefectures of Hiroshima and Shimane. A number of piping at the foundation of river levees had been observed in two sites which would lead to water leakage, sand boil, the failure and settlement of levee body.

This paper focused on the river levee failure in the Shikaga district that is located at 27.8 kp to 29.2 kp on the left bank and where there was a large-scale sand boiling followed by the settlement of levee body. The soil layers of the levee body and its foundation ground that have been clarified by site survey and soil tests. The mechanisms of the failure have been estimated with the results of the unsteady saturated-unsaturated seepage analysis and trench survey. This paper also discussed the application of satellites with Synthetic Aperture Radar (SAR) to monitor the displacement of river levee.