

# 矢部川堤防決壊の被災メカニズムに関する考察

The study on the mechanism of the levee breach along the Yabe River

甲斐浩幸<sup>1</sup>・渡部秀之<sup>2</sup>・江上綾子<sup>3</sup>・大塚健司<sup>4</sup>  
・中山修<sup>5</sup>・宮武晃司<sup>6</sup>・平田嘉之<sup>7</sup>

Hiroyuki KAI, Hideyuki WATANABE, Ayako EGAMI, Kenji OTUKA,  
Osamu NAKAYAMA, Kouji MIYATAKE, Yoshiyuki HIRATA

<sup>1</sup>正会員 国土交通省 九州地方整備局 河川計画課 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東2-10-7)

<sup>2, 3, 4</sup>正会員 国土交通省 九州地方整備局 筑後川河川事務所 (〒830-8567 久留米市高野1-2-1)

<sup>5, 7</sup>正会員 (一般財団法人) 国土技術研究センター 河川政策グループ (〒105-0001 港区虎ノ門3-12-1 ニッセイ 虎ノ門ビル)

<sup>6</sup>正会員 前(財)国土技術研究センター 河川政策グループ (〒105-0001 港区虎ノ門3-12-1 ニッセイ 虎ノ門ビル)

The torrential rainfall by seasonal rain front caused rivers to severe flood at the north region of Kyushu in July 2012 and the right bank levee at 7.3km from the mouth of the Yabe River had been breached.

For identifying the mechanism of the levee breach, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) conducted a series of surveys including geotechnical investigation and seepage analysis. It is found that sand stratum on the foundation ground had crossed the levee from riverbank to landside area. In this paper, it is presumed that the major cause of the levee breach is piping through the sand stratum due to lasting high water level along the levee.

**Key Words :** mechanism of levee failures, damage to the river levees, seepage analysis, soil survey,

## 1. はじめに

平成24年7月13日～14日に九州北部を襲った梅雨前線の豪雨により、矢部川では堤防決壊を含め、18箇所の堤防で被災が発生した。また、派川の沖端川においても2箇所で堤防決壊が生じた。

本報告は、直轄管理区間の矢部川右岸7.3km付近の堤防決壊について、被災後に実施した土質調査結果及び浸透流解析結果等により明らかになった被災の要因及び被災メカニズムについて考察するものである。

## 2. 堤防被災の概要

### (1) 出水の概要

矢部川は、流域面積647km<sup>2</sup>、幹川流路延長61km（途中沖端川に分派し、下流部で飯江川、楠田川と合流）の1級河川であり、大正2年矢部川第一期河川改修工事より本格的な河川改修が始まり現在に至っている。

今次出水は、平成24年7月11日から14日にかけて、梅雨前線が本州付近に停滞し、14日の未明から昼頃にかけて、北部九州に強い雨域がかかり、短時間に記録的な雨量となったことが特徴である。図-1に示すように流域の黒木（くろぎ）、枉葉（ゆずりは）の各雨量観測所では1、3、6、9時間のいずれの降水量も観測史上最大を記録した。

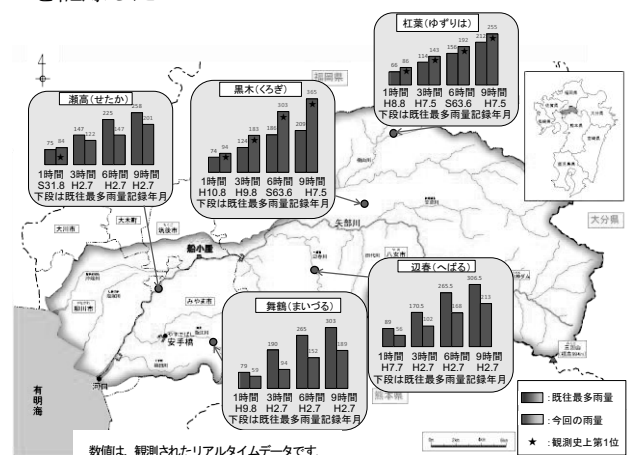


図-1 観測所における降雨量（既往最多雨量との比較）

また、15K付近の船小屋水位観測所における今次出水と既往出水の水位ハイドログラフを比較し図-2に示す。今次出水は、ピーク水位が既往最大を約2m上回っており、さらに5時間以上はん濫危険水位を上回り、計画高水位を超えた水位であった。

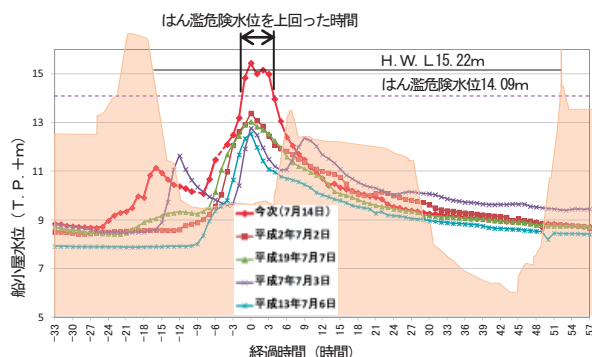


図-2 船小屋水位観測所における主要洪水の水位比較

## (2) 河川堤防の被災概要

矢部川堤防の被災箇所を治水地形分類図（昭和52年国土地理院）<sup>1)</sup>に重ねて図-3に示す。

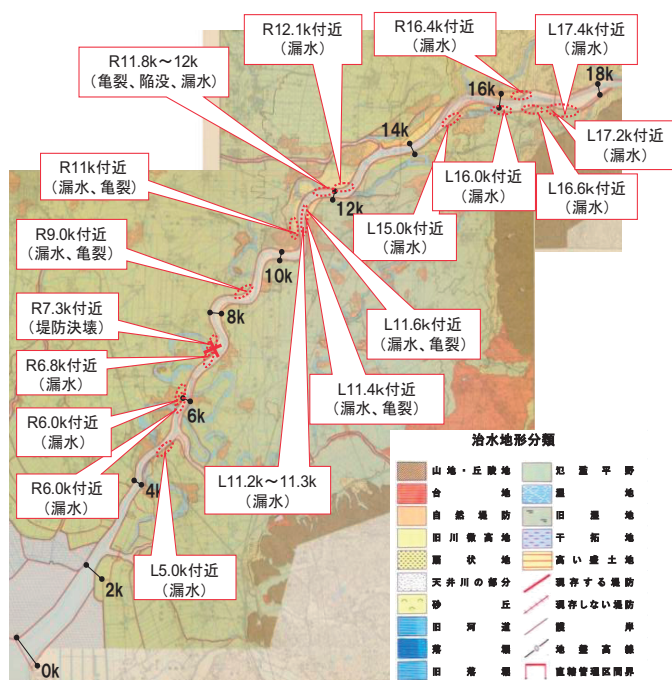


図-3 矢部川堤防の被災箇所位置図<sup>1)</sup>

今次出水による矢部川の堤防被災は、5km付近から下流を除いて直轄管理区間の全川にわたり、全18箇所（護岸崩壊等の河道での被災を除く）で生じており、被災内容は堤防決壊1箇所、亀裂等堤体変状5箇所、漏水17箇所であった（重複有り）。

矢部川堤防周辺の微地形は、大局的にみると10k付近から上流の矢部川中流部では旧川微高地が、下流部では氾濫平野が多く分布し、さらに旧河道も多く存在し

ているが、被災箇所と治水地形分類図で表す微地形との関係は明瞭ではない。

写真-1には、右岸7.3K付近の堤防決壊の状況を示す。決壊幅は約50mであり、決壊時刻は7月14日の13時20分頃であった。なお、決壊後の調査では、高水敷の洗掘及び残存していた堤防表のり面での植生の剥離、侵食は見られなかった。



写真-1 右岸7.3K付近の堤防決壊の状況

## 3. 決壊箇所付近の土質構成の特徴

### (1) 土質調査等の考え方と内容

堤防決壊の原因及び被災メカニズムの解明並びに本復旧工法の立案に資することを目的に決壊箇所周辺での土質調査等を実施した。

土質調査等は、堤防及び地盤の土質構成や物性値を把握することに主眼を置き、①高水敷～堤防～堤内地の地盤土質構成の空間的広がり、堤防や基礎地盤の土層構造の概略を把握する「マクロ調査」と、②土のせん断強さ（粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\phi$ ）や透水係数など数値解析が必要となる諸量を把握するための「ミクロ調査」、に分けて実施した。表-1に堤防決壊箇所付近での土質調査等の概要を示す。

図-4は、土質調査等の調査項目と調査位置を平面図に示したものである。図中においてボーリング調査は○、サウンディング調査は△、トレンチ調査は□で示しており、黄色着色は基礎地盤表層に後述する砂層（As層）が確認された箇所、緑色着色は確認されなかった箇所を示す。

なお、土質調査等の計画は被災直後に立案したが、現場の状況に応じてトレンチ調査（壺掘りによる掘削断面土質観察）箇所を追加する等、柔軟に追加変更を行った。なお、決壊箇所は図-5に示す治水地形分類図において旧河道と氾濫平野に分類される微地形に位置していたことから、治水地形分類図にある現存しない堤防の内外、旧河道箇所においても追加のボーリング等を実施している。

表-1 堤防決壊箇所付近での土質調査等の概要

被災の特徴	・約50mの幅で堤防が決壊
解明したい事象等	・何故、この場所が決壊したのか ・何が原因で決壊したのか ・本復旧工法の立案
事象を科学的に解明するためのアプローチ方法	・3次元的地盤・地盤の土質構造の把握 ・数値解析による再現・分析
具体的な調査の考え方 マクロ的な調査	① 決壊口を含む堤防の土質構成の把握 ② 基礎地盤土質の空間的広がり（例えば、砂層の分布、厚さ等）
ミクロ的な調査	③ 数値解析に必要な物性値等の把握
調査項目・範囲等	◇上記①のために ・決壊口及び周辺の縦横断のボーリング（連続する区間での無被災断面含む）、サウンディング、測量、トレンチ ・高水敷での物理探査 ・堤防開削調査（本復旧工事時） ・落堀形状及び断面のスケッチ調査（本復旧時） ◇上記②のために ・堤内地を主体とした空間的なサウンディング、トレンチ ◇上記③のために ・土質区分毎の物理、力学試験、現場透水試験
備考	現存しない堤防の川裏・川表の地質確認のためボーリング調査。

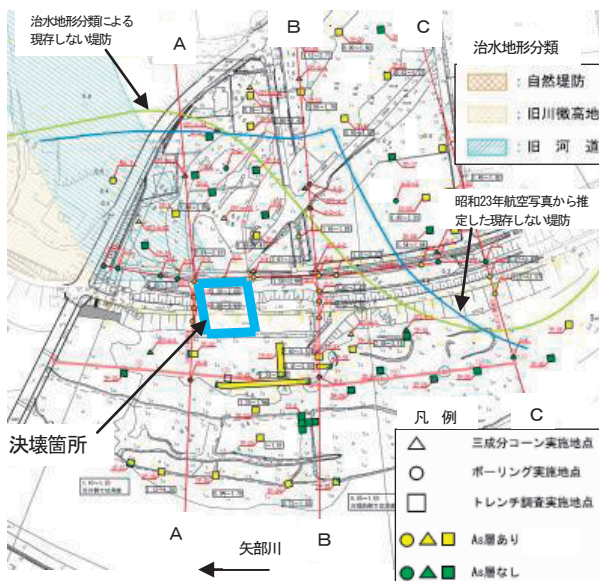


図-4 土質調査等実施位置図

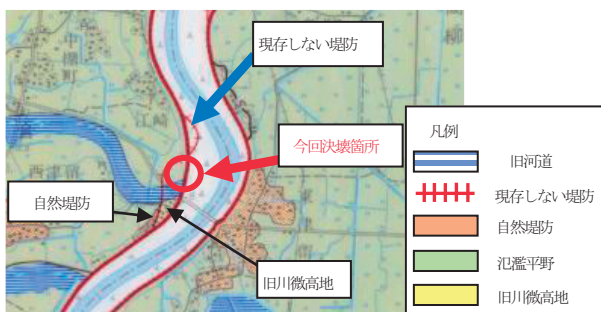


図-5 決壊箇所付近の治水地形分類図<sup>1)</sup>

## (2) 堤防築堤履歴

堤防決壊した右岸7.3km付近は、湾曲部の内岸側に位置し、堤防形状は、堤防比高6.0m、天端幅5.4m、表のり勾配1:2、裏のり勾配1:2〜1:2.5、高水敷幅約85mである。堤防構造は、天端はアスファルト簡易舗装、のり面は植生が施されていた。

右岸7.3k付近の堤防は、昭和25〜28年の間に引堤されている。図-6に示す昭和23年と昭和37年の航空写真の比較より、この間に大規模な引堤を実施したことが分かる。改修図面によれば、引堤箇所では水田跡に堤防を築き、昭和29年から旧堤を下流側より掘削撤去している。

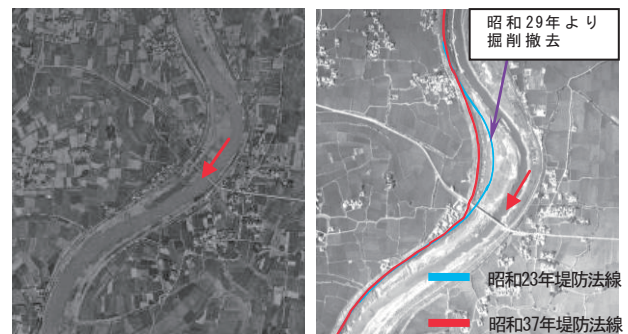


図-6 決壊箇所付近の航空写真の比較  
(左：昭和23年、右図：昭和37年)

## (3) 決壊箇所付近の地盤土質構成の特徴

### a) 基礎地盤の土質特性

土質調査結果に基づき、堤防決壊箇所上流の堤防B測線における堤防横断方向土質推定図を図-7に示す。

基礎地盤は、表層に粘性土(Fc層)、その下部に砂層(以下「As層」という。)、その下位に粘土質シルト層(Ac層)、礫混じり砂層(Ag層)が分布している。基礎地盤の上部にあるAs層は、1〜1.5m程度の厚さで分布し、透水性の低い粘性土の堤体(Bc層)と基礎地盤のAc層に挟まれ、かつ堤防を横断する形で河岸から堤内地の途中まで連続して存在しており、As層は行き止まり状態となっている。

また、上記のAs層は、トレンチ調査の結果、堤外地では写真-2に見られるように粒度の粗い砂層が局所的に見られ、決壊口付近では堤防表のり尻前面で高水敷表層の砂礫層(Fg層)と部分的に接していた。



写真-2 高水敷のトレンチ調査で確認された粒度の粗いAs層



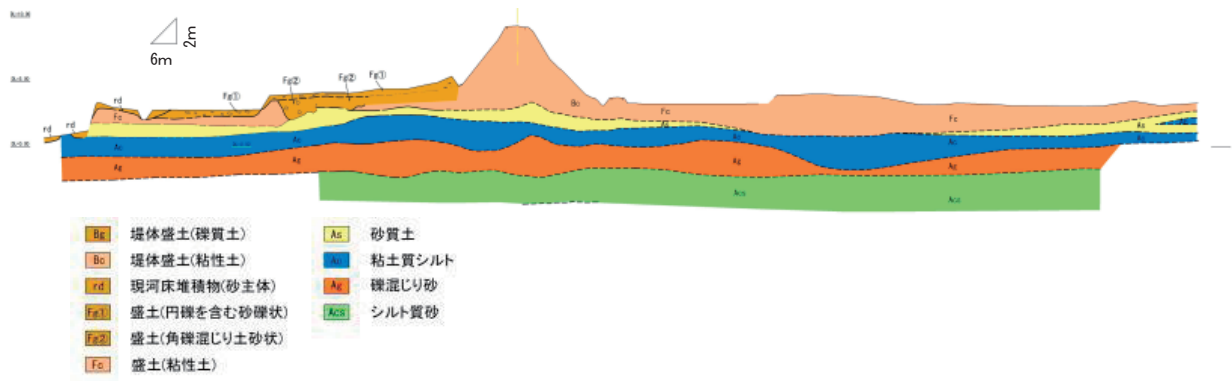


図-7 B測線の堤防横断方向土質推定図

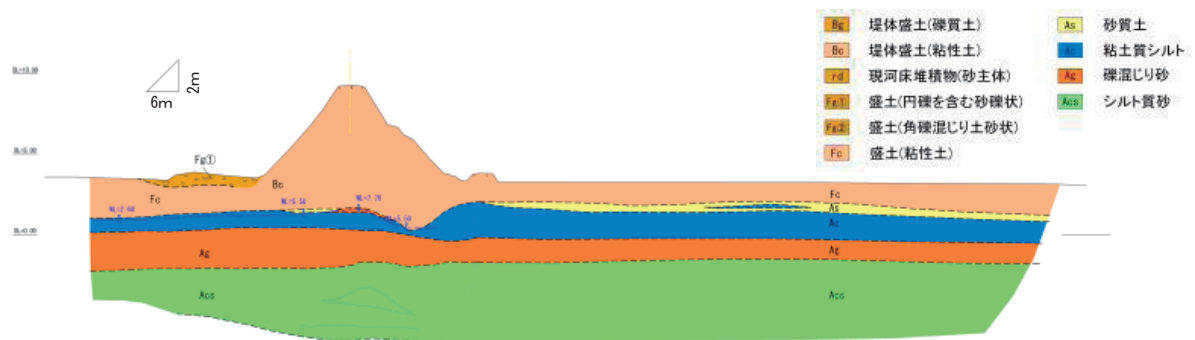


図-8 C測線の堤防横断方向土質推定図

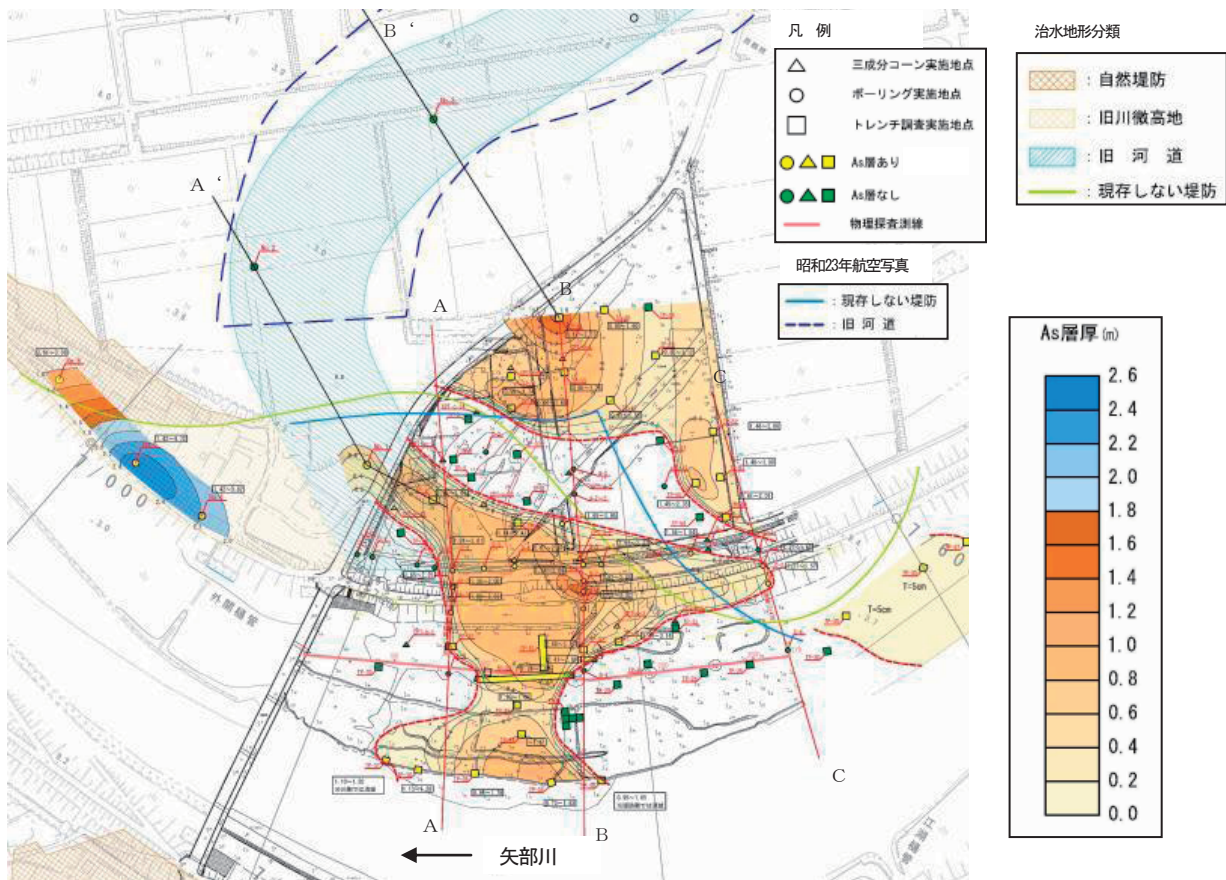


図-9 右岸7.3K付近での調査位置及びAs層の層厚分布図

なお、B測線よりさらに上流に位置する堤防C側線における堤防横断方向土質推定図を図-8に示す。B測線でみられた堤防下及び高水敷ではAs層は確認されていない。

図-9は基礎地盤表層に分布するAs層の層厚の平面的分布を示したものである。As層は、河岸から堤防を横断して堤内地の途中まで連続して分布しており、低水路河岸で広く、高水敷の途中で狭まり、堤防付近で広がる平面分布であった。また、As層の厚さは決壊口を挟む付近で比較的厚く分布している。

なお、土質調査は治水地形分類図に示されている旧河道、旧川微高地、氾濫平野及び現存しない堤防の周辺で行ったが、旧河道や氾濫平野ではAs層が確認されたところとそうでないところがあり、現存しない堤防の川裏側でAs層が確認されるなど、今回の調査では、As層の分布と旧河道との関連、治水地形分類との関係は明瞭でなかった。矢部川中下流部は、古くから洪水による氾濫を繰り返し受けた地域であることから、河川氾濫により堆積した沖積砂がこのAs層であると推定される。

## 4. 浸透流解析による検証

### (1) 解析の考え方及び条件

堤防決壊箇所では堤体が流出し、基礎地盤には落堀が形成されており、堤体及び基礎地盤表層の土質構成は不明である。このため、前述した決壊箇所近傍のB測線を決壊断面の代替断面とし、また決壊した箇所から100m離れたC測線を無被災断面の代表断面として堤防横断方向に河岸から堤内地までの土質構成をモデル化した。また、B測線の堤防断面については、裏のり尻付近に噴砂による穴（噴砂口）が生じたと仮定し、噴砂口をモデル化したケースも検討した。

これらの断面に対して不定流計算から推定した7.3k付近の水位ハイドログラフ及び近傍の瀬高観測所の降水量を外力として、2次元非定常浸透流解析及び円弧すべりによる安定解析を実施し、決壊原因及びメカニズム解明の資料とした。なお、土の比透水係数及び負の圧力水頭は「河川堤防の構造検討の手引き」<sup>2)</sup>に準拠した。また、解析に用いた各土層の透水係数は、土質調査結果から得られた平均値を用いている。

表-2 解析に用いた透水係数(cm/s)

検討断面	堤体	基礎地盤			
	Bs	Fc	As	Ac	Ag
B測線断面	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$8.5 \times 10^{-3}$
C測線断面	$1.9 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5}$	$6.4 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$6.4 \times 10^{-3}$
噴砂口モデル(B側線)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$8.5 \times 10^{-3}$

\*高水敷表層のFc層の透水係数は $3.3 \times 10^{-3}$  cm/s、噴砂口の透水係数は $1.0 \times 10^{-1}$  cm/sを設定した。また、堤体のせん断強度は $c: 21.1$  kN/m<sup>2</sup>、 $\phi: 7.3^\circ$ である。

### (2) 解析結果及び考察

図-10(1)は、図-7に示すB測線堤防をモデル化した解析結果であり、堤防のり尻部の基礎地盤砂層（As層）における圧力水頭並びに盤ぶくれ及び漏水の有無を評価する指標であるG/W（G:被覆土層の重量、W:被覆土層底面に作用する揚圧力）の時間変化を河川水位と併せて示したものである。

河川水位の上昇とともにAs層への浸透が促進され、堤防裏のり尻付近の圧力水頭は、7月14日12時に最大値の約3.9mとなる。また、G/Wも同時刻で0.47と最小値なる。

上記の堤防モデルにおいて、裏のり尻付近に噴砂による穴（噴砂口）が生じたと仮定し、Fc層に幅20cmで透水係数 $1.0 \times 10^{-1}$  cm/sの噴砂口を設置した浸透流解析を行った。計算経過時間70時間の流速ベクトルを図-11に示す。河川水位が高水位を継続した約68～74時間の噴砂口下のAs層上部の解析流速は、 $2.9 \times 10^{-3} \sim 3.7 \times 10^{-3}$  cm/sとなる。As層の有効間隙率を0.2として実流速に換算すると<sup>3)</sup>、 $2.1 \times 10^{-2} \sim 2.7 \times 10^{-2}$  cm/sとなる。この流速は、粒径と限界流速との関係図（図-12）に示した中島他<sup>4)</sup>の関係に基づけば、粒径0.1mm程度以下の土粒子を流動できる大きさである。このことから、As層を構成している土粒子のうち0.1mm程度以下の土粒子が噴砂口から流出し、時間とともにAs層の空隙・空洞化が堤防下へと進行したことが示唆される。

一方、無被災箇所のC測線は、堤防を横断するAs層はなく、基礎地盤中位に分布する礫混じり砂層（Ag層）が河岸から堤内地に連続する透水層となる。図-10(2)は堤防のり尻部のAg層における圧力水頭並びにG/Wの時間変化を河川水位と併せて示したものである。Ag層の圧力水頭は河川水位の上昇に遅れて上昇し、河川水位が低下した7月14日16時に最大値の4.8mとなるが、この圧力水頭はAg層上部の被覆土層の荷重より小さいことから、G/Wは1以上となり、基礎地盤の漏水、噴砂が生じなかったことが示唆される。

なお、B測線における浸潤線発達時の堤体に対する円弧すべり計算の最小安全率（Fs）は、Fs=2.3であったことから、浸透による堤体のすべり破壊に対しては、通常堤防が有するべきFs1.2以上を満足していたものと考えられる。

以上より、右岸7.3k付近の堤防決壊は、計画高水位を上回る高水位が長時間継続したことが誘因となり、堤防を横断して河岸から堤内地側の途中まで分布していた基礎地盤上部の比較的透水性の高い砂層（As層）の存在及び高水敷の礫層とAs層が繋がっていたことが素因となって生じたものと推察される。つまり、基礎地盤上部のAs層における浸透による圧力が河川水の上昇に連動して高まり、堤防のり尻付近でAs層上部の透水性の低い被覆土層を破壊し、噴砂口からAs層の土粒子の細粒分が流出し、堤防直下までAs層の空隙・空洞化が進行した結果、堤体の陥没が生じたものと推察される。

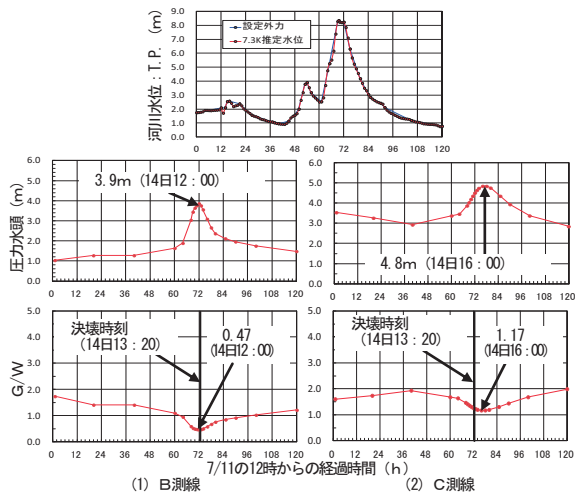


図-10 のり尻部における圧力水頭、G/Wの時間変化

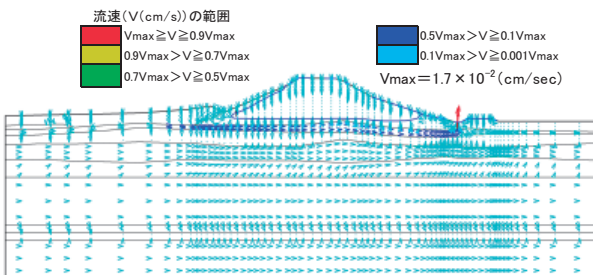
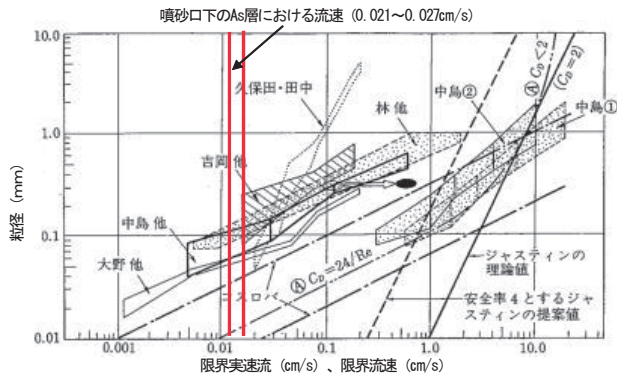
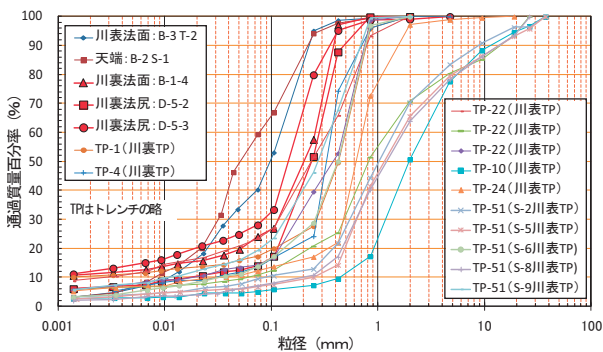


図-11 のり尻部に噴砂口をモデル化したケースでの流速ベクトル



(1) 限界流速と粒径との関係<sup>3)</sup>



(2) 右岸7.3k付近のAs層の粒度分布

図-12 限界流速と粒径との関係及びAs層の粒度曲線

## 5. 被災要因、被災メカニズムの考察

以上の結果より、今次出水による矢部川堤防の決壊は、計画高水位を上回る高水位が長時間継続したことによる基礎地盤のパイピングが要因と考えられる。

決壊のメカニズムは、図-13に示すように、パイピングにより、As層の細粒分が流出することで、堤防直下の空隙・空洞化が進行し、堤体を支持することができなくなり堤体が沈下・陥没した結果、そこから河川水が集中して流れ出すとともに堤体を洗掘し、決壊に至ったものと推察される。

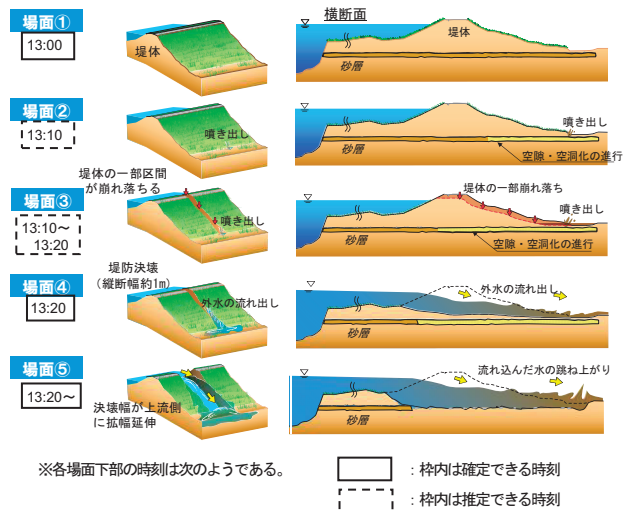


図-13 堤防決壊の経過 (概念図)

## 6. おわりに

堤防のパイピング破壊については、既往の研究事例も少なく、堤防の破壊に至るまでの過程についても科学的に未解明な事項が多く残っており、現場の事象を説明するためのさらなる研究が必要と考えている。

最後に、筑後川河川事務所では、堤防決壊の原因及び復旧工法等を審議することを目的に「矢部川堤防調査委員会 (委員長 秋山 壽一郎 九州工業大学大学院工学研究院教授)」を設置した。本論文は、委員会報告書を基に作成したものであり、秋山委員長はじめ委員の方々に深甚の謝意を表するものである。

## 参考文献

- 1) 国土院: 矢部川治水地形分類図, 1977.
- 2) (財) 国土技術研究センター: 河川堤防構造検討の手引き, 2002.
- 3) (社) 土質工学会: 土質工学ハンドブック, 1982
- 4) 中島秀雄: 図説河川堤防, 技報堂出版, 2003.

(2013. 4. 4受付)