川内川流域の地形・地質を踏まえた基盤浸透に よる堤防破壊危険性の評価

EVALUATION OF THE LEVEE FAILURE RISK DUE TO FOUNDATION LEAKAGE BASED ON THE TOPOGRAPHY AND GEOLOGY OF THE SENDAI RIVER BASIN

白石芳樹¹・田端幸輔²・福岡捷二³ Yoshiki SHIRAISHI, Kosuke TABATA and Shoji FUKUOKA

 ¹正会員 工修 株式会社建設技術研究所 九州支社(〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)
²正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

流域治水では、洪水を緩やかに流下させることが求められるが、高水位が長時間継続するため、基盤浸透に対する堤防破壊危険性の評価と弱点箇所の対策が課題である.一般に、砂礫層の上に難透水層が被覆した互層構造では、洪水時に基盤漏水に起因した堤防被災が生じやすいが、火砕流堆積物によって形成されている川内川流域では、これまでに支川で噴砂が生じた他に大規模な被災は確認されていない.現状の堤体とその基礎地盤構造で大規模洪水に対しても安全であるかを工学的に判断し、必要に応じて対策を講じていく必要がある.本研究では、川内川流域を対象に本支川の土質構成、土質特性、堤防基盤脆弱性指標^{h*}を調べ、堤防破壊危険性を評価した.その結果、h*は堤防基盤浸透現象に対する力学的相似条件であることが実証された.また通常の河川ではh*>1かつUc*<3が、噴砂発生危険性の高い範囲となるが、シラスから構成される川内川では、h*>2かつUc*<10が、噴砂発生危険性の高い範囲となった.

Key Words: levee foundation vulnerability index t_b*, soil characteristics of levee foundation ground, Sendaigawa River, Shirasu

1. はじめに

近年,超過洪水が増大し,これまで被害を受けてこな かった河川でも堤防破壊に伴う氾濫被害が発生している. これまで河川整備は河川の流下能力の向上と堤防の築造 に注力されてきたが,堤防は河川毎,箇所毎に異なる土 質特性の材料で構築されていることから,特に浸透によ る破壊の危険な箇所を推測することが困難である.

川内川流域では、火山活動に起因したいわゆるシラス で基盤を成しているため、透水性が高く洗掘や崩壊が発 生しやすく大規模洪水時に基盤浸透による堤防被災の危 険性が懸念される.

本研究では、川内川流域の基盤構造の成り立ちを文献 から調査し、層序構成の特徴を整理した.概ねHWLま で水位が上昇し、支川で噴砂が生じたH18年洪水を対象 に、ボーリング調査実施断面で堤防基盤脆弱性指標4^{*1)} を算定し、噴砂発生箇所とそれ以外の箇所の値を比較し、 堤防満杯流量流下時の4*から、超過洪水時の基盤浸透に よる堤防破壊危険性を検討した.

2. 川内川流域の基盤構造の特徴

(1) 流域の概要

川内川流域は流域面積1,600km²,総延長137kmで,上 流域から河川沿いに小盆地が連なる(図-1).川内川の 河川沿いの地質構造は,主にシラスで構成されており, 過去の噴火に応じ,加久藤カルデラ,阿多カルデラ,姶 良カルデラの火砕流堆積物での層序となっている.加久 藤カルデラ(約30万年前)は,大規模火砕流を伴う大噴 火で湖が出現し²,その後,栗野岳溶岩流によって堰き 止められ,湖が形成され,一部は硬い溶結凝灰岩になっ ている.その後,鹿児島の湾口部に位置する阿多カルデ ラ(約10万年前)が噴火し,加久藤火砕流堆積物を削った 谷を埋めるように分布している.さらに姶良カルデラ (約2.5万年前)を出現させた噴火によって入戸火砕流 が噴出し堆積した³.



タイブ1 タイブ2 タイブ3
図-3 3 タイプの火砕流堆積物の特徴スケッチ⁵⁾

また、中流にある鶴田ダム上流に大口盆地と加久藤盆 地の2つの小盆地が存在し、その間に狭窄部が連続し、 洪水時に水位が上がりやすく流下能力上のネック箇所と なっている。川内川の河川勾配は基岩の露出する箇所で 急勾配となり、盆地では緩やかとなるため階段状の河川 縦断形状を有している(図-2)。

近年の川内川の主な洪水被害は平成18年7月に発生し ており、11箇所で観測史上最高水位を観測し4箇所にお いては計画高水位を超えた.川内川の上流から下流に至 る流域の3市2町の約5万人に避難勧告等が発令され、浸 水面積約2,777ha、浸水家屋2,347戸に及ぶ甚大な被害が 発生した.主な被害は氾濫、護岸や堤防の一部損壊が あった.一方、堤体の漏水やパイピング被害は3件⁴⁾と、 浸透に起因する堤防被害は少ないものの、透水性の高い 土質が河川堤防の基盤を構成していることから、これで まで被害がなかった箇所でも被災するおそれがある.

(2) シラスによる基盤構造の成り立ち

川内川の河川沿いに堆積する入戸火砕流堆積物は、シ ラス台地として現在の表層近くに露出しているが、1.6 万年前ごろから最終氷期が終わり、急激な温度上昇に よって降雨量が増え、シラス台地が削られて段丘が形成 された.火砕流堆積物は、火砕流のガス流速の違いによ り堆積特性が分類されており⁵⁰、図-3に示すような堆積 の特徴を示す.入戸火砕流堆積物は、タイプ3に該当し、 上層に軽石がほぼ水平に堆積する.





図-4 川内川36.8k開削時の互層状況(川内川河川事務所提供)



ー次シラス(74~250µm) 旧砂丘地の砂(250~420µm)

図-5 電子顕微鏡による一次シラスと普通砂粒子の比較

また、シラスは一次シラスと二次シラスに区分され、 前者はシラス層を構成している火山灰、火山砂、軽石が 一様に混合して成層を成していない一方、後者は湖面や 流れなどの水の作用によってできた水成シラスと言われ、 成層を成している.堤防基盤構造は、主にこの一次シラ スと二次シラスで組み合わさった状態から成っている. 図-4に川内川36.8k付近の推込分水路開削時の互層構造 を示す.堤防下の基盤層ではない箇所であるが、上層に シルト質混じり礫、下層にシルト質が構成されている.

(3) シラス堤防に関するこれまでの対策

一般的にシラスの強度は水が加わると著しく低下する 性質がある.シラスの含水比は通常20%程度であるが、 30%以上になると急激に強度が低下することが知られて いる⁶.そのため、露出したシラスは流水が作用すると 侵食を受け易く、急速に削り込まれていく性質を有する. 一方で、図-5に示すように普通の砂粒子に比べて角張っ た粒子形状をしていることが知られている⁷.シラス材



料を河川堤防の盛土材料として利用する場合の技術基準 ⁸⁾の中で設計施工の標準手法が整理され、次のように記 載されている.①堤防天端は、良質土(粘性土及び砂質 土)を用いて被覆するか、又はセメント安定処理工を行 うものとする.②堤防ののり勾配は、2割以上の緩やか な勾配とし、川表・川裏ののり面には、それぞれ野芝の 総芝による芝付けを行うものとする.③川表のり面に湧 水等がある箇所については、護岸工及び漏水防止矢板工 等の適切な処置を講ずるものとする.

つまり、シラスは水が浸透しやすく、水に侵食されや すい特性を有するため、堤体として使用されている箇所 については、別途被覆等による安定対策がとられている.

(4) 被災箇所の地質的特徴の整理

川内川におけるシラスの基盤浸透に関する被害につい て、近年では平成18年洪水時に支川の羽月川2.0k左岸に おいて噴砂が発生した.図-6に、羽月川2.0k左岸堤防の ボーリング調査結果から描かれた柱状図と深度毎の透水 係数(青色プロット)を示す.ボーリング柱状図による と、標高164m以深には、軽石混り凝灰質細砂から成る 一次シラス層が確認できる.その上の標高164~167mに は、透水係数が3.23×10⁴m/s~7.01×10⁴m/sの砂礫層が 存在しており、これが二次シラス層と推測される.二次 シラスの上層には、薄い砂質シルト層と礫混り砂から成 る層が被覆しており、透水係数が2.07×10⁶m/sと小さい ことから透水性が低い層と判断される⁹.

図-7に、羽月川2.0k左岸の透水層の粒径加積曲線を示 す.図には、港湾施設の設計時にしばしば参照される地 震動に対する液状化の可能性のある範囲¹⁰⁾(以下、液 状化発生可能範囲)を緑色の破線で示している.これは 地震時の繰り返しせん断によるダイレイタンシーに起因 した過剰間隙水圧によって砂粒子が流動化しやすい範囲 を表したものである.本研究で扱う噴砂やパイピングは 繰り返しせん断ではなく、河川水位の上昇に伴い間隙水 圧が高まることで発生する.よって、間隙水圧の上昇を もたらす要因は異なるものの、間隙水圧上昇後に流動化 しやすい粒度分布に大きな違いはないと考えることがで



図-7 川内川のH18 噴砂箇所粒径加積曲線図

表-1 乱さないシラスと締め固めたシラスの限界動水勾配 一覧表(藤本¹²⁾の論文から再作成)

試料	Dmax	D ₆₀	D50	D10	Uc	乱さないシラス	締め固めたシラス	
	(mm)					限界動水勾配の実測値/計算値		
А	50	0.28	0.075	0.01	28	3.7~4.8	1.5~5.8	
в	30	0.28	0.06	0.016	17.5	1.45~1.63	0.5~1.1	
限界動水勾配のA,B平均値						0.94~2.60	0.90~2.50	

きる. 佐藤ら¹¹⁾ はこの考え方を基に,梯川堤防の基盤 漏水によう噴砂発生危険性を推定し,実際の被災箇所を 概ね説明できることを確認している.

図-7によると,被災箇所及び川内川堤防の粒度分布は 液状化発生可能範囲の外にプロットされることから,噴 砂の発生しにくい土質特性であったことがわかる.また, 噴砂の発生した羽月川2.0k左岸の粒度分布が最も液状化 発生可能性範囲に近く,他の箇所より噴砂しやすい状態 にあったと推測できる.つまり,川内川では総じて粒径 及び均等係数が大きいことから,噴砂やそれに伴う堤体 すべり破壊が生じる危険性はそれほど高くなかったもの と推察される.

(5) シラス層における噛み合い特性

川内川のシラス層が多く存在する基礎地盤では全体的 に二次シラスの影響で透水係数が高く,噴砂等が発生し にくい土質特性である可能性が示された.ここでは,既 往研究から噴砂やパイピングの発生,すべり破壊の可能 性が低い理由を考察する.

藤本⁽²⁾は、川内川と同様、シラスを基盤層とする大 淀川上流部において乱さずに採取したシラスと、締固め たシラスを用いて、室内パイピング実験を実施し、限界 動水勾配を計測した.そして、土粒子の自重と鉛直方向 の動水勾配のつり合いから得られる計算式(式(1))と の比較を行っている.

$$i_c \gamma_w = \frac{h}{L} \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \tag{1}$$

ここに, $i_c=h/L$:限界動水勾配,h:流路長Lにおける水頭差, $G_s: ± 粒子比重, e:間隙比, <math>\gamma_w$:水の単位体積重量である.

噴砂開始の諸元 Uc* 透水係数 ケース 噴砂 L Т н 地盤使用砂 水頭差 水面出現 開始時間 終了時間 経過期間 Uc $(D_{60}$ ts* \mathbf{k}_{h} (No) 有無 流量変化 (s) (m) l/min (m) (D_{20}) (分) (分) (分) (m/s) (cm) (分) 15 霞ヶ浦(美浦) 120 ほぼ一定 11.74 10140 4.42E+00 0 30 170 199 29 2.9 2.1 2.77×10⁻² 1.2 16 鬼怒川 140 2から5.21 5.21 40 255 274 19 3.9 2.8 2.28×10^{-4} 14040 1.4 5.64E+00 利根川 120 ほぼ一定 5040 17 3.62 40 110 124 14 2.5 1.8 1.11×10⁻¹ 1.2 8.79E-01 18 江戸川(シルト混り) 180 ほぼ一定 3.42 95 460 489 29 14.3 2.5 4.26×10⁻¹ 23640 1.8 2.15E+00 霞ヶ浦(麻生1) 0 10 175 0.66から32 400 407 1.7 4.68×10 23820 2.32E+01 19 32 2.2 1.75 玉造 \bigcirc 165 ほぼ一定 31.08 95 370 375 5 $1.7 4.82 \times 10^{-4}$ 16800 20 1.65 1.61E+01 21 鬼怒川 0 135 測定不能 5.98 40 230 279 49 3.1 2.2 1.14×10⁻⁴ 14340 1.35 2.79E+00 霞ヶ浦(麻生2) 120 ほぼ一定 22 2.18 40 155 184 29 2.2 1.6 5.75×10^{-5} 8640 1.2 7.82E-01 23 利根川下流 145 275 至らず 135 30.2 7.9 4.28×10⁻¹ 7800 1.35 24 長良川 110 ほぼ一定 4.28 155 169 14 2.1 $1.5 1.00 \times 10^{-4}$ 6540 1.1 9.68E-01 60 霞ヶ浦 (西の州) 50 0 200 測定不能 457 3.8 24420 7.95E+00 25 455 2 2.5 1.14×10^{-4} 2 -江戸崎 80 275 至らず 135 52.4 11700 1.35 26 18.7 4.70×10⁻⁹ 27 小貝川(吉沼) 至らず 40.9 9.2 6.51×10⁻⁷ 28 渡良瀬川 100 ほぼ一定 3.78 40 125 139 14 2.5 1.8 9.72×10^{-5} 5940 8.02E-01 1

表-2 大型模型実験によるな*の算出結果(三木ら15)の結果をもとに再整理)

表-1に比較結果を示す.乱さないシラスの静止時の限界 動水勾配は,試料A(60%粒径D₆₀=0.28mm,均等係数 U_c=28)で計算値の3.7~4.8倍,試料B(D₆₀=0.28mm, U_c=17.5)で1.45~1.63倍となり,いずれも計算値より大 きくなっている.このことは、シラスの材質そのものが 嚙み合わせやインターロッキングにより高いせん断力を 示すことを示唆している.山脇ら¹³⁾は初期相対密度 50%の原粒度シラスと細粒分を取り除いたシラスについ て排水,非排水単調せん断試験を実施し、細粒分を取り 除いた低拘束圧下では角張った母粒子同士がかみ合うこ とで強度が増したという結果を得ている.堤防下の基盤 透水層は、細粒分を多く含有していないこと、10m未 満程度の深度に位置しており、低拘束状態とみなせるこ とから、顕著な粒子破砕は発生していないと推測される.

3. 基盤浸透による堤防破壊危険性の評価

(1) 検討手法

前章に示したとおり、川内川の堤防基盤層は主にシラ スで構成されていることから、基礎地盤の浸透リスクも 高いと考えられる.ここでは、川内川のボーリング調査 が実施されている断面を対象に、平成18年洪水における 堤防基盤脆弱性指標^{6,1)}及び噴砂発生に関係する均等係 数U^(*1)を調べ、基盤層や法尻先の地質との関係を整理し、 基礎地盤の浸透に対する危険性を考察した.なお、川内 川の被災事例が少ないことから、佐藤ら¹⁴⁾の千曲川の^{6,4}、 U^{*}の算定結果に加え、三木ら¹⁵⁾による実河川の材料を 使った水平方向浸透流によるパイピング現象を再現した 貴重な大型模型実験での計測結果を引用し、^{6,*}、U^{*}の 算定を実施し、噴砂発生の領域を調べた.

なお, 6*, U^{*}の噴砂発生領域においては, 佐藤ら¹⁴ が対象とした千曲川他で6*≧1.4, U^{*} <10で噴砂が起こ りやすいという知見が得られている.千曲川は川内川と 同様に大小の盆地から構成されているが, 千曲川の中流 は火山隆起による起源の丘陵で囲まれ, 氾濫原は上流か



図-8 大型模型実験装置図(三木ら¹⁵⁾をもとに加筆) らの運搬土砂による扇状地で構成されており、地層構造 が川内川と異なる.

6*, U.*は以下の式で表される.

$$t_b^* = \frac{5}{2} \frac{k_b (H+D)T}{\lambda L^2}$$
(2)
$$U_c^* = \frac{D_{60}}{D_{20}}$$
(3)

ここに, H:最高水位と裏法尻高の差, T:洪水流が高水 敷に冠水後の洪水継続時間, λ:空隙率, ka:基礎地盤透水 層の代表透水係数, D:裏法尻から基礎地盤透水層までの 厚さ, L:表法先から裏法先までの水平距離, D60:60%粒径, D20: 20%粒径である.

(2) 検討条件

川内川のボーリング調査箇所(43箇所)における堤防, 堤内地の形状はレーザプロファイラデータから読み取っ た.また,透水係数はボーリング深度に応じた地質デー タからCreagerの式によって透水層の値(平均値:2.03× 10³m/s,範囲:1.16×10⁵m/s~1.94×10²m/s)を求めた. 水位は平成18年洪水の痕跡水位(図2)を用いた.一方, 千曲川では,佐藤らが算定した結果を引用した.

三木ら¹⁵⁾は、平成8年にパイピング破壊に対する定量 的な安定度評価手法を確立するために、小型模型実験と 大型模型実験を行い、パイピング現象及びクリープ比や 限界実流速等の従来の理論値、実験値との適合性、基礎 地盤の土質がパイピング抵抗に及ぼす影響、浸透流解析 から求まる局所的な動水勾配を用いた安定度評価手法に



(%)

量百分率

「創画図

ついて検討を行った.この実験で得られた知見が、現行 の堤防詳細点検における浸透破壊危険性の判定基準の ベースとなっている. 図-8に示すように、大型模型実験 は、浸透路長3mまたは2mの場所に直径50mmの穴を粘土 層・不透水シートに開け、その上に粘土(3cm)を敷き、 さらに耐久合板(15mm)を設置し,弱点箇所を設置され た. これにより弱点箇所の観察をしやすくし, 噴砂発生 のタイミングがわかるように工夫されている。また、弱 点箇所からの流出量と砂地盤の端部に設置された越流壁 からオーバーフローした流出量を時間毎に観測された. 砂地盤には14種類の実河川の砂試料を用いられ、その粒 度分布や土質定数も記録されている.実験の結果、緩い 砂地盤では、50%粒径が0.3~0.4mm程度、細粒分は10% 以下、均等係数が5以下でパイピングが発生しやすいこ と、また、透水係数が1.0×10⁻⁴m/sより大きいとパイピ ング破壊時の平均動水勾配も増加する傾向がみられるこ とが確認されている.これは透水係数が大きくなると地 盤内流速も増加するが、50%粒径や最大粒径が大きく、 土粒子の移動に対する抵抗力も増加するため、パイピン グ破壊時の平均動水勾配が大きくなることを示している.

三木ら¹⁴⁾の模型実験データの6*の算定に用いた透水 係数kbは、①噴砂開始前、②噴砂後及びパイピング発生 時に記録された水頭差及び越流堤の漏水量を基にダル シー則から逆算した値を用いた(表-2). Uc*は各試料 の粒径加積曲線から算定した. なお、ケース23, 26, 27 は噴砂に至っていないため、6*の算定は行っていない.

(3) 検討結果

検討対象とした川内川,千曲川,大型模型実験のな*と U_c*の関係を図-9に示す.

赤色でプロットした川内川において、6*が比較的高い 5事例のうち、3事例で6*>1を示す. このうち、被災した 1事例(羽月川2.0k左岸で噴砂)は、6*=2.41、Uc*= 10.37となってる. なお、3事例でUc*<10となっている.

緑色でプロットした千曲川については、被災のあった 3事例(常襲の噴砂は除く)のうち、2事例がな*>1を示す. U*については、被災3事例はすべてU*<3となっている.





なお、1事例であるが₆*<0.2で噴砂が発生している. これは、堤内地側からの地下水の影響を受けることに よって、堤防法尻付近の水圧が上昇しやく漏水が発生し やくなる箇所¹²⁾に該当する.

黒色プロットで示した三木ら¹⁵⁾の大型模型実験については、噴砂に至ったのは11事例であり、そのうち7事例で $h^*>1$ であり、11事例で $U_e^*<3$ となっている.

噴砂事例のうち、6*<1となった4事例については、表-2に示すように噴砂開始の水頭差が他の事例に比べ100~ 120cmと小さく、初期から漏水が発生していたことが確認されている.図-10に示す透水層の粒径加積曲線によると、液状化発生可能範囲に含まれており、噴砂の発生しやすい土質特性であったことがわかる.

以上より,堤防の大きさや基盤層の厚さ,外力規模, 透水係数がそれぞれ異なる川内川,千曲川及び大型模型 実験において,噴砂が確認されたデータの多くは, 6*= 1~10の値をとることが確認された.この結果から,式 (2)で表される各諸量の組み合わせで表現される無次元量 6*は,堤防基盤浸透現象に対する力学的相似条件である と解釈できる.

ただし、千曲川と三木ら15)の大型模型実験のデータ については噴砂箇所のよ*の値はかなり対応している一方 で、川内川の噴砂箇所のム*の値は高めの値を示している. これは、基盤透水層が二次シラスで構成される川内川の 特徴である可能性がある. 噴砂が発生するためには、浸 透流によって土粒子が移動される必要があるが、2章で 示したようにシラスは土粒子が角張っていることから, 移動が生じにくい可能性があり、これが噴砂発生時の6* を高くした要因と推察される. 土粒子形状と粒子移動の 関係については今後詳細な調査検討が必要であるが、ま ずは、液状化発生可能性をU*によって代表し、*とU* の両者の値を調べることで、噴砂発生危険性をある程度 推定可能になると考えられる.具体には、通常の河川の 場合は、千曲川及び大型模型実験の結果から、 な*>1かつ U.*<3が、噴砂発生危険性が高い範囲と見なすことがで きる. ただし、シラスから構成される川内川では、 6*>2 かつし*<10とする方が妥当である.



(4) 堤防天端水位時の噴砂発生の危険性評価

超過外力に対する基盤浸透リスクを評価するため、川 内川のボーリング調査が実施された断面のうち検討対象 とした5箇所において、堤防天端水位時の4*を算定した. 結果を図-11、表-3、表-4に示す。H18痕跡水位は図-2 に示すようにHWL程度であり、堤防天端と差は約1.5m 程度であった。そのため堤防天端水位時はすべて6*が大 きくなるが、羽月川2.0k左岸及び川内川25.6k以外で、新 たに6*>2となる箇所はなかった。一方、川内川96.86k はUc*=6.21となり羽月川2.0k左岸よりも噴砂しやすい土 質特性であり、堤防天端水位時には6*=1.78と高くなる ことから基盤浸透危険性が高まると考えられる。

4. 結論

川内川の基盤構造の成り立ちを調査し、主にシラス層 の層序構成の特徴を整理した。噴砂が生じたH18年洪水 を対象に、ボーリング調査実施断面でな*を算定し、噴砂 発生箇所とそれ以外の箇所の値を比較した。また、千曲 川及び大型模型実験結果をもとに噴砂したケースのな*と U&との関係を調べた結果、以下のことが分かった。

- ・ 式(2)で表される各諸量の組み合わせで表現される無 次元量4*は、堤防基盤浸透現象に対する力学的相似 条件であることが、川内川、千曲川及び大型模型実 験データを用いて実証された。
- 一方、シラスから構成される川内川では、6*>2かつ U^{*}<10が、噴砂発生危険性の高い範囲となる.この ような差をもたらす要因として、浸透流によって細 粒分が移動し、骨格となる角張った粒形のシラスに インターロッキング効果が現れたことで一般的なシ ラスよりもせん断強度が大きく、浸透流による骨格 粒子の移動が生じにくい可能性があると考えられる. 川内川では、基盤浸透破壊については十分でない.そ のため、基盤にシラスを有する近隣河川のデータと被災 事例を調査し、検証を追加する必要がある.また、砂粒

表-3 川内川 H18 洪水に対する t*と U*の値

						· ·		
	距離標		H18	H18痕跡水位	D	透水層k _b	難透水層k _h	均等係数
河川	(km)	場所	被災	t _b *	(m)	(m/s)	(m/s)	Uc*
川内川	18.21	右岸	-	8.33E-01	1.85	4.86E-04	1.05E-07	5.11
	25.60	右岸	-	2.21E+01	2	1.40E-02	3.19E-06	5.59
	72.60	右岸	-	3.59E-01	0.3	1.23E-03	1.21E-07	13.07
	96.86	右岸	-	1.21E+00	1.3	4.27E-03	6.11E-08	6.21
羽月川	2.00	左岸	噴砂	2.41E+00	2.3	3.23E-04	2.07E-06	10.37

表-4 川内川堤防満杯洪水規模に対する t*と U*の値

	距離標		H18	堤防満杯時	D	透水層k _b	難透水層k _h	均等係数
河川	(km)	場所	被災	t _b *	(m)	(m/s)	(m/s)	Uc*
川内川	18.21	右岸	_	1.02E+00	1.85	4.86E-04	1.05E-07	5.11
	25.60	右岸	-	3.04E+01	2	1.40E-02	3.19E-06	5.59
	72.60	右岸	-	6.63E-01	0.3	1.23E-03	1.21E-07	13.07
	96.86	右岸	-	1.78E+00	1.3	4.27E-03	6.11E-08	6.21
羽月川	2.00	左岸	噴砂	3.12E+00	2.3	3.23E-04	2.07E-06	10.37

子の移動に伴う噴砂発生の詳細なメカニズムについても 今後検討が必要である.

参考文献

- 佐藤豊,福岡捷二:堤防基盤脆弱性指標か*と地形,土質構成 に基づく堤防のり先での漏水形態の推定法,土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.I_121-I_126,2021.
- 2) 横山勝三:シラス学,古今書院,2003.
- 尾崎次男:加久藤盆地の水文地質、防災科学技術総合研究報告、26号、pp113-118、1971.
- 4) 田中勇一: H18.7川内川における激甚災害-再度災害防止に向けて-, 九州技報, 第41号, 2007.
- Wilson, C.J.N. : The role of fluidization in the emplacement of pyroclastic flows: an experimental approach. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 8, 231-249,1980.
- 6)河原田礼二郎:シラスの物理的・力学的性質に関する研究 (第一報)未撹乱試料の剪断試験について,鹿児島大学農学 部学術報告,6, pp.222-226,1957.
- 7)山内豊聡:粒状材としてのしらすの特性,地学雑誌98-6, pp.37-43, 1989.
- 8) 国土交通省編:シラス地帯の河川・道路土工指針(案), 1997.
- 9) 地盤工学会編: 地盤調査の方法と解説 改訂版, 2013.
- 10) 日本港湾協会編:港湾の施設の技術上の基準・同解説,2007.
- 11) 佐藤豊, 大渕貴, 福岡捷二:梯川における基盤漏水が発生する地形・地質及びパイピングによる堤防変状, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1237-I_1242, 2018.
- 12) 藤本廣:シラスの侵食とパイピング現象の問題点,土と基礎,23-2,p41-48,1975.
- 13) 山脇大輔,兵動正幸,吉本憲正,加登文学,中田幸男,岡林 巧:しらすの静的・動的強度に及ぼす細粒分の影響,地盤と 建設, Vol.19, No.1, pp.27-36, 1997.
- 14) 佐藤豊,福岡捷二:堤防脆弱性指標t*,堤防基盤脆弱性指標 た*と土質特性を用いた堤防裏すべり発生の検討,第9回河川 堤防技術シンポジウム, pp.79-82,2021.
- 15) 三木博史,山田哲也,藤井厚企,野口典孝,佐藤正博:堤防 基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験,土木研究所資 料,第3399号,1996.

(2023.3.24受付)