

透過型砂防堰堤周辺の土砂動態特性

CHARACTERISTICS OF SEDIMENT TRANSPORTATION AROUND A SLIT SABO DAM

加藤陽平¹・檜谷治²・梶川勇樹³

Yohei KATO, Osamu HINOKIDANI and Yuki KAJIKAWA

¹正会員 工修 いであ株式会社 大阪支社水圏部 (〒559-8519 大阪市住之江区南港北1-24-22)

²正会員 工博 鳥取大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 博(工) 鳥取大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

Recent years, slit Sabo dams have been selected for their function to prevent debris flow disaster and conserve continuity of water and sediment flow simultaneously. However, once a slit Sabo dam is filled with bed load or suspended load, its pocket for debris flow prevention would be lost and sediment supply to downstream would be decreased. Though in order to resolve the problem, knowledge and investigation about characteristics of sediment transportation around a slit Sabo dam are important, not much study about slit Sabo dams have been reported. In order to clarify the effect of a slit Sabo dam on sediment transportation, the authors have researched the characteristics of rainfall-runoff and sedimentation around a slit Sabo dam in a channel in Tenjin river basin. This paper reports the results of field observation on and 1D numerical simulation of the flood event caused by Typhoon No. 12 in 2011.

Key Words : *Slit Sabo dam, sediment runoff, field observation, 1D numerical analysis*

1. はじめに

水系砂防計画¹⁾においては、山地から河川までの土石流等の有害な土砂移動を制御するとともに、下流河川や海岸に必要な土砂を流すことを基本としている。そのため、近年では土石流・流木対策施設として透過型砂防堰堤が選択されることが多くなっている。また、透過型砂防堰堤では土石流を捕捉するためのポケット(計画捕捉量)が必要であるので、技術指針²⁾においては土砂・流木が堆積した場合すみやかに除去することが示されている。これらを踏まえると、土石流を伴わない出水時(以下、通常出水時と表現する)に掃流砂・浮遊砂が透過型砂防堰堤に堆積した場合、土石流の捕捉や下流への土砂供給に対し悪影響が及ぶ可能性がある。

一方、透過型砂防堰堤に関する既往の研究に目を向けると、土石流の捕捉に関する研究は多くあるが、通常出水時の堆砂や土砂流出に関する研究³⁾は少なく、知見が十分とは言えない状況にある。そこで、本研究では透過型砂防堰堤周辺における通常出水時の土砂動態の解明を目的とし、天神川水系赤岩川において降雨流出特性・土砂動態特性の現地調査、および数値解析を実施することとした。本論文では、2011年台風12号時の赤岩川の降雨

流出状況、土砂堆積状況を示すとともに、数値解析に基づく砂防堰堤周辺の土砂動態の推定結果について述べる。

2. 土砂動態特性の把握手法

(1) 対象領域

本研究では、鳥取県倉吉市関金町に位置する天神川水系の支流赤岩川流域を対象領域とし、福原2号砂防堰堤(国交省管理)の土砂動態への影響を調査する。

赤岩川は上蒜山を源頭部に持ち、福原谷川と合流し天神川支川小鴨川に注ぐ(図-1参照)。図-2は国土地理院基盤地図情報をもとに作成した赤岩川の河床縦断面図である。河床勾配は急峻で、福原谷川合流点から0~1kmの区間では1/20、源頭部である4kmより上流の区間では1/3程度となっている。表層地質⁴⁾についてみると、赤岩川の上流域では主に蒜山安山岩が、下流域では大山噴出物である凝灰角礫岩が分布している。堀雨量観測所(位置は図-1参照)の近10年間の平均年降水量⁵⁾は約2,200mmであり、全国平均よりもやや多雨である。

福原2号砂防堰堤の諸元を表-1に示す。本堰堤は土石流・流木対策を目的とし、赤岩川の最下流部に設置されている部分透過型の鋼製スリット砂防堰堤である。

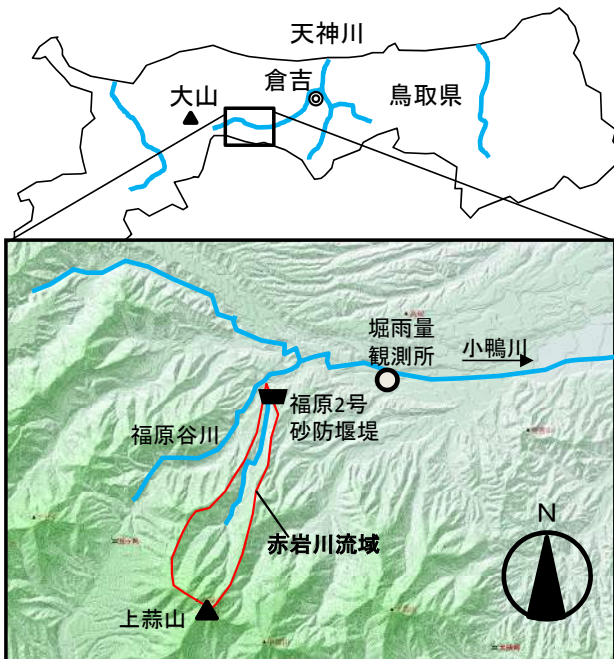


図-1 研究対象領域 (赤岩川)

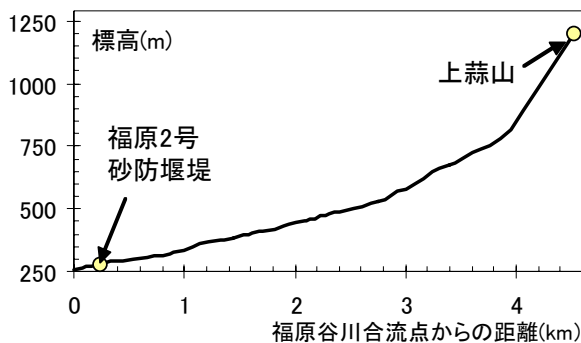


図-2 赤岩川河床縦断面図

表-1 福原2号砂防堰堤の現況諸元

設置目的	形式	完成年月	計画捕捉量	流域面積
土石流・流木対策	鋼製スリット (B型)	H10.3	1,700m ³	2.7km ²
堰堤高	透過部高	不透過部高	全幅	透過部幅
11.5m	3.0m	8.5m	71.0m	10.0m

表-2 調査項目および調査手法

分類	調査項目	調査手法
降雨流出	時間雨量	(国土交通省提供)
	流量	①固定カメラで越流部を撮影し水深から越流流量を分析 ②降雨流出解析を行う
土砂動態	河床高	トータルステーションによる測量
	河床材料粒度分布	現地試料を回収しふるい分け試験を実施

(2) 調査項目・調査手法・調査期間

土砂動態特性、およびそれに影響を及ぼす因子として降雨流出特性を現地調査により把握する。調査項目および調査手法について表-2に示す。

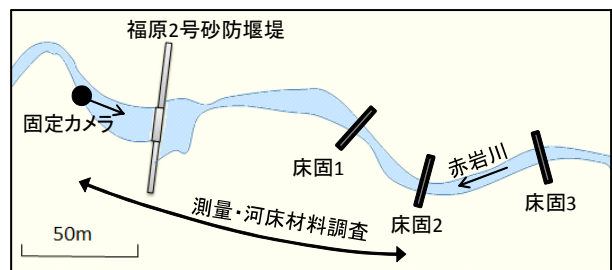


図-3 調査領域周辺図

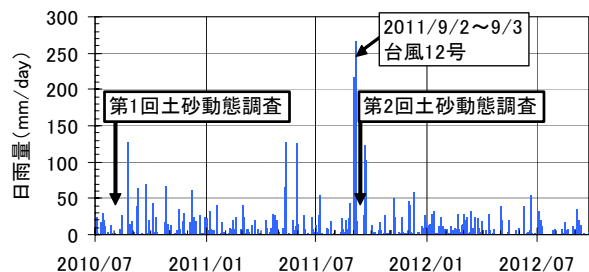


図-4 堀雨量観測所日雨量 (2010年7月～2012年9月)

a) 降雨流出特性に関する調査手法

実績流況を把握するため、砂防堰堤の下流側に固定カメラを設置 (図-3参照) し、10分間隔で砂防堰堤の連続撮影を行う。また撮影した画像から越流水深を解析し、式(1)に示す本間の越流公式により流量への換算を試みる。なお、照明がないため夜間は撮影できていない。

$$Q = 0.35Bh\sqrt{2gh} \quad (1)$$

ここに、 h : 越流水深、 B : スリット幅(=10m)である。夜間の流量を補間するため、分布型降雨流出モデル⁶⁾により福原2号砂防堰堤地点の流出量を推定する。

このモデルでは斜面上の流れを表層・A層 (中間流) ・B層 (基底流) の3層構造としており、表面流は等流、中間流および基底流はダルシー則により流速を評価する。降雨損失はB層から下層への浸透分で表現している。河道流量についてはkinematic wave法により追跡するが、砂防堰堤による流量貯留は無視している。

b) 土砂動態特性に関する調査手法

福原2号砂防堰堤の周辺には、直下流に減勢工、上流側に複数の床固工 (図-3中の床固1～3) が存在する。河床高・河床材料粒度分布調査については、図-3に示すとおり減勢工～床固2の区間で実施している。

c) 調査期間

本調査は2010年7月に開始し、2012年現在も継続している。調査期間中の堀雨量観測所日雨量を図-4に示す。固定カメラは出水期中連続して撮影を行っている。河床高・河床材料粒度分布については、2010年7月に第1回調査を実施し、それ以降は現地踏査を行い、出水による変化が確認できた場合に調査を行うこととしている。2011年台風12号により9月2日～3日にかけて日雨量が200mmを越える豪雨が発生した。この出水による河床変動が顕著であったため、出水後の9月9日に河床高・河床材料粒度分布の第2回調査を実施している。

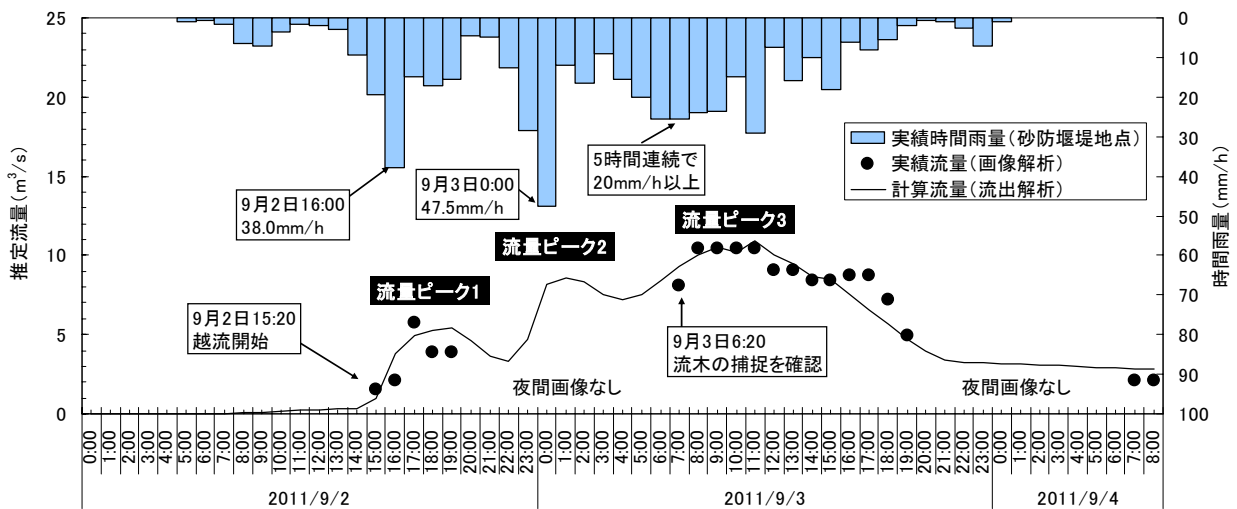


図-5 2011年台風12号時の降雨流出特性 (福原2号砂防堰堤地点)

3. 土砂動態特性の調査結果

表-3 降雨流出解析の定数設定

項目		設定値
河道	粗度係数	0.06
	等価粗度	0.7
斜面	土層厚	A層 : 0.4m, B層 : 1.0m
	透水係数	A層 : 0.010m/s, B層 : 0.001m/s
	浸透能	A層 : 10.0mm/h, B層 : 0.10mm/h

(1) 降雨流出特性

図-5は2011年台風12号時における実績時間雨量，画像解析から得た実績流量，および降雨流出解析から得た計算流量である。雨量データは福原2号砂防堰堤地点の観測値であり，先に述べた堀観測所とは異なる。降雨流出解析については実績流量波形を概ね再現できるようにキャリブレーションを実施した。従来の検討⁹⁾では小鴨川・天神川の平野河道部の流量を検証材料としていたが，当時の設定定数では赤岩川の流量を再現できなかった。そのため，本研究では赤岩川流域に適した定数として，表-3に示す値を設定した。

降雨流出解析結果を踏まえると，台風12号時の流量は図-5に示すとおり3つのピークを有していたと考えられる。便宜上，これらを流量ピーク1～3とする。流量ピーク1・2は，シャープな降雨波形の直後に発生しているが，流量ピーク3は20mm/h程度の雨が連続した後に発生している。期間中の最大流量は流量ピーク3で発生している。

図-6は福原2号砂防堰堤の流況である。夜間の状況は不明であるが，9/2 19:10と9/3 6:20の間に鋼製スリットに流木が捕捉されており，流量ピーク3である9/3 11:00の時点で流木による水位のせき上げが確認できる。出水中，土石流の発生・捕捉は確認されていない。

(2) 土砂動態特性

図-7に台風12号出水前後の砂防堰堤上流側の写真および河床高コンターを示す。出水前はスリット部の直上流に深みがあったが，出水後はスリット部の直上流で堆砂し，浮州の発生を確認できる。砂防堰堤から床固1までの河床勾配は，出水前で約1/30程度，出水後で約1/40程度となっている。図-8は砂防堰堤から0m，20m，50m断面の河床横断面図である。測線は図-7上段のコンター図に示している。出水前は明瞭な滞筋を確認できるが，出水によりスリット天端高以上まで土砂が堆積しており，滞



図-6 福原2号砂防堰堤の流況画像

筋のあった位置の河床が左右岸よりも高くなっていることがわかる。図-9に出水前後の上層（最大粒径程度の層），下層（上層の下）の河床材料粒度分布の変化状況を示す。採取地点は図-7下段に示すA～D地点である。

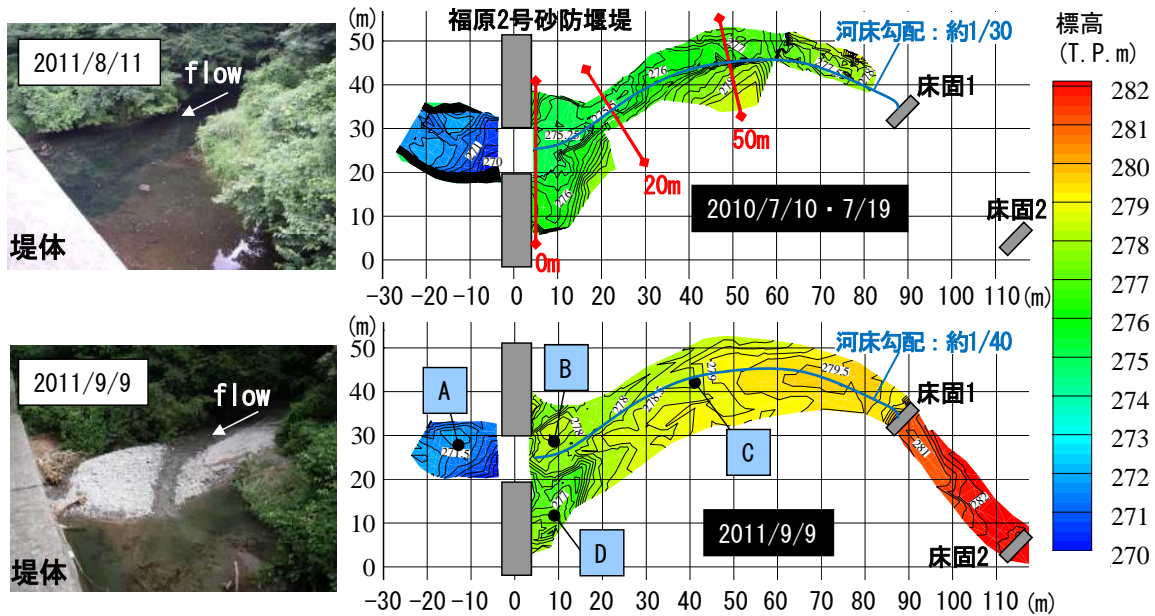


図-7 福原2号砂防堰堤周辺の河床高コンター（台風12号前後）

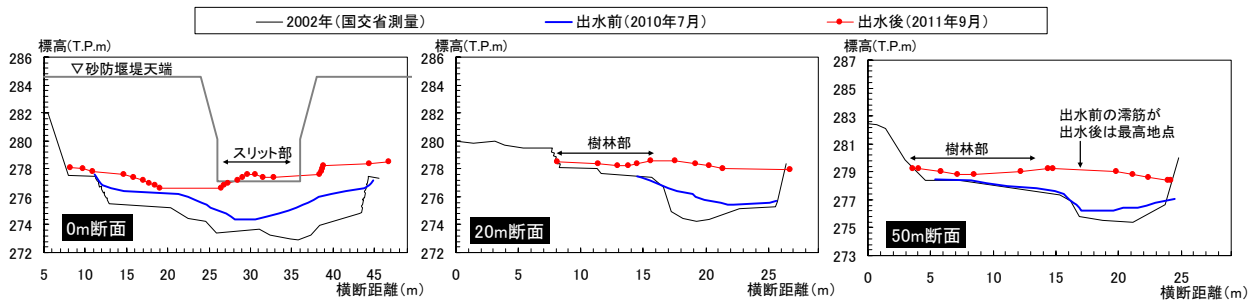


図-8 福原2号砂防堰堤上流の河床横断形状

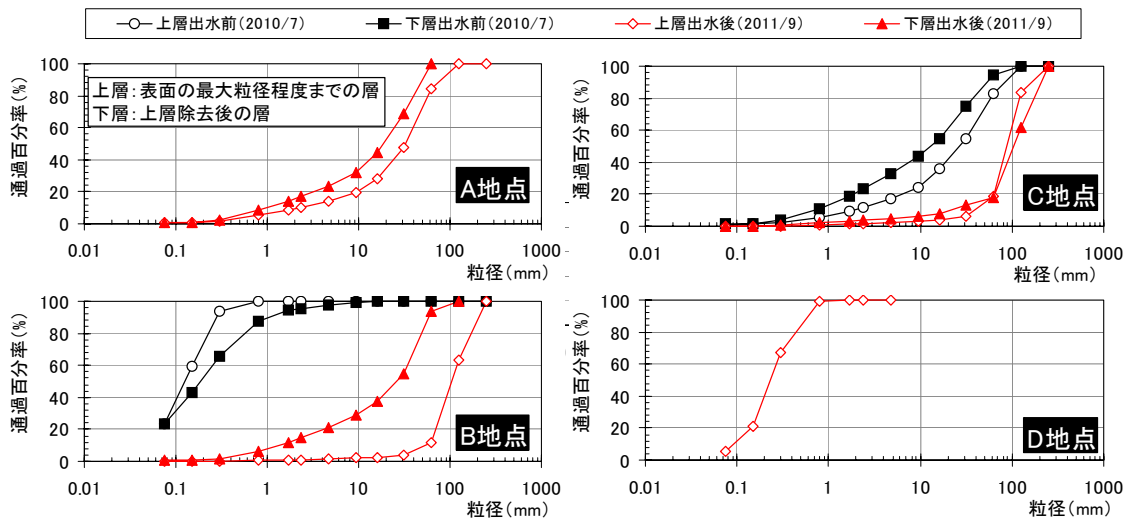


図-9 河床材料粒度分布（図-7下段のA～D地点）

出水前の状況を見ると、砂防堰堤直上流のB地点では主に砂が、C地点では主に礫が堆積していた。出水後においては、B地点の河床が礫質に変化し、C地点でも河床が粗礫に覆われている。出水後に調査地点A・Dを追加しており、砂防堰堤の直下流であるA地点ではスリット部を越流したと見られる1～100mm程度の砂礫が、スリット部の脇に位置するD地点では1mm以下の砂が多く見られる。

4. 土砂動態の数値シミュレーション

(1) モデル概要および計算条件

砂防堰堤周辺における出水中の堆砂や土砂収支の状況を解明するため、1次元河床変動モデルによる土砂動態の数値シミュレーションを実施する。赤岩川は急勾配で射流が発生すること、砂防堰堤直上流では湛水区間が生

じることを踏まえ、差分法にMacCormack法を用いてモデル化する。本モデルは目下部⁷⁾のモデルをベースに、混合粒径および浮遊砂の移動を追加したものである。

下流端流量については、スリット部と余水吐の流量の合計とし、式(2)~(4)により算定する。

$$Q_{out} = Q_1 + Q_2 \quad (2)$$

$$Q_1 = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_{d1} B_1 H_0^{3/2} \quad (3)$$

$$Q_2 = C_{d2} B_2 \sqrt{2g \left(H_d - \frac{Z_2 - Z_3}{2} \right)} \quad (4)$$

ここに、 Q_{out} ：堰堤を通過する流量、 H_0 ：ダム直上流での比エネルギー、 H_d ：下流端水位、 C_{d1} ：スリット部の流量係数(=0.577⁸⁾)、 C_{d2} ：余水吐の流量係数である。余水吐は土砂に埋没しておりほとんど通水しておらず、流量の再現性から $C_{d2}=0.020$ とした。 B_1 ：スリット部全幅から鋼材幅を引いた値、 B_2 ：余水吐の幅合計であり、それぞれ7.6m、1.2mと設定した(図-10参照)。

計算の諸条件は表-5のとおりである。

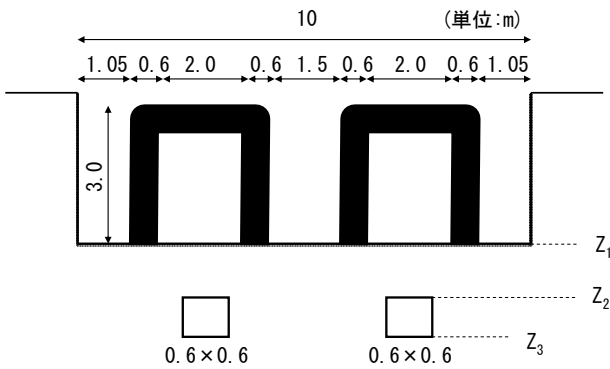


図-10 砂防堰堤のモデル化

(2) 河床高の再現結果および土砂動態の分析

河床変動計算結果における、初期、3つの流量ピーク、減水中、および出水後の6時点の河床高および表層平均粒径を図-11に示す。出水後の計算河床高を実測値と比較すると、縦断河床勾配はほぼ一致しているが、河床高は実測値よりも1m程度低くなった。実現象ではスリット部の全幅10m×高さ約1.5mまで流木が捕捉されていたが、計算においては流木による水・土砂の流出に対する影響を考慮していないため、河床高の再現精度に誤差が生じたと考えられる。

図-11上段をみると、9/2 19:00(流量ピーク1)の時点で堆砂デルタが形成されており、時間の進行とともに前進していることがわかる。図-11下段の表層平均粒径より、デルタの構成材料が平均粒径20~40mmの礫成分であることがわかる。図-11の上段右に、砂防堰堤から10、50、100mの地点の、河床変動計算における出水後の河床鉛直方向の平均粒径分布を示した。10m地点では砂成分が、50m・100m地点では礫成分が主体となっている。10m地点は図-9のB・D地点、50m地点はC地点に対応し

表-5 河床変動計算条件

項目	設定条件
計算区間	砂防堰堤から床固3までの区間(図-3参照)
$\Delta x \cdot \Delta t$	$\Delta x=2.0m, \Delta t=0.2sec$
上流端流量	流出解析による推定流量(図-5参照)
供給土砂	上流端の平衡給砂条件
初期河床高	2010年7月測量結果の直線近似(図-11参照)
初期河床材料	2010年7月のC地点の粒度分布(図-9参照)を計算領域全域に与えた
流砂量式	浮遊砂: Itakura・Kishi式 掃流砂: 芦田・道上式
床固	水深: 限界水深を与える 流砂: 1断面上流の流砂が通過する
下流端流量	接近流速を考慮した越流量式
下流端流砂量	浮遊砂: 越流量×浮遊砂濃度が流出する 掃流砂: 下流端河床高 Z_B とスリット部の天端高 Z_1 の関係から以下のように設定する ・掃流砂は流出しない ($Z_B < Z_1$) ・1断面上流の掃流砂が通過する ($Z_B \geq Z_1$) 余水吐からの流出は考慮しない

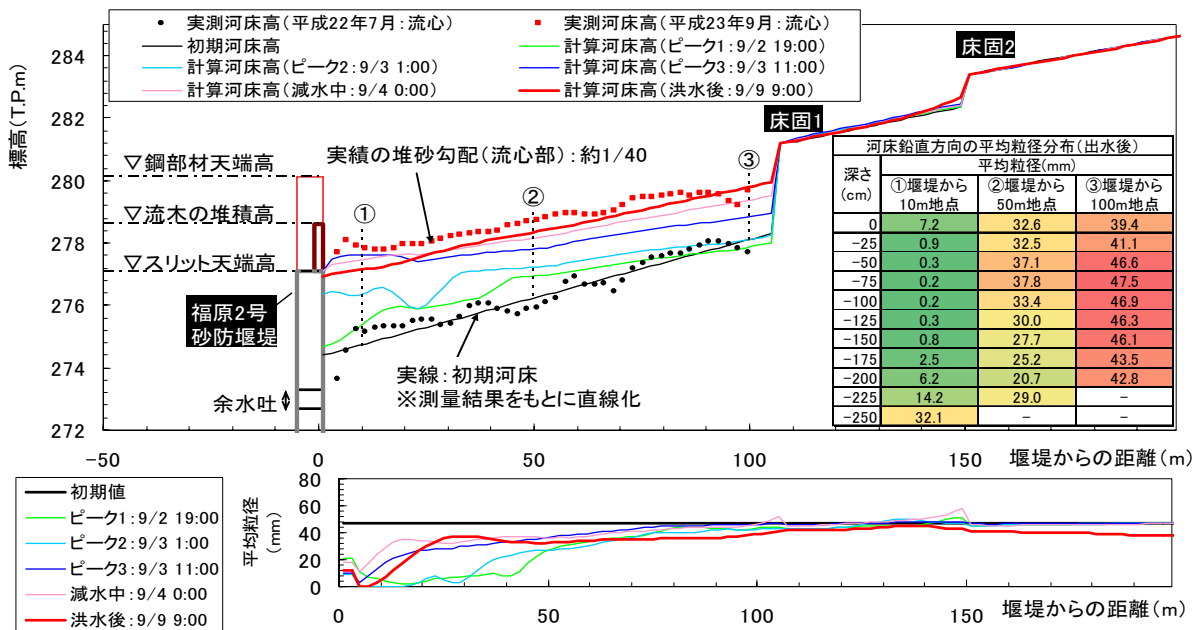


図-11 河床変動再現計算結果(上段:河床高・下段:表層平均粒径)

ており、D地点の砂成分、C地点の礫成分の堆積状況を概ね表現できている。

砂防堰堤直上流（下流端）の河床高・水位の時間的変化を図-12に示す。河床高は9/3 9:00にスリット部天端高を越え、9/3 15:00頃まで上昇した後に低下に転じ、最終的にはスリット部天端高まで収束している。

図-13は上流端からの土砂流入量と砂防堰堤からの土砂流出量の時間変化である。浮遊砂は河床高がピークとなった9/3 15:00頃まで流入>流出となっており、その後は流入と流出がほぼ釣り合っている。掃流砂は河床高がスリット部天端高に達してから流出するよう設定しているため、9/3 10:00頃から流出している。

表-6は計算区間における出水後時点の土砂収支であり、ウォッシュロード成分とみられる0.1mm未満とそれ以上の粒径成分を区分して集計している。全粒径で見ると、上流端から約6,600m³の土砂が流入し、そのうちの33%が砂防堰堤により捕捉されている。0.1mm未満の土砂は上流端流入量の52%にのぼるが、下流端からの流出量も

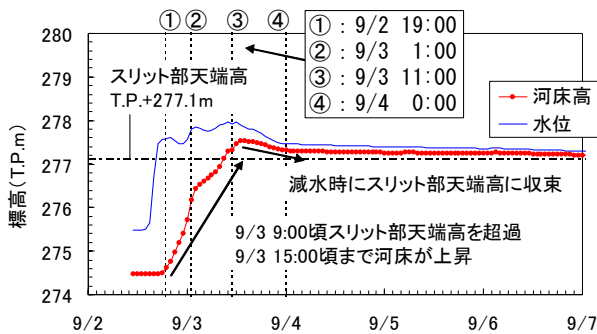


図-12 砂防堰堤直上流断面の河床高・水位の時間変化

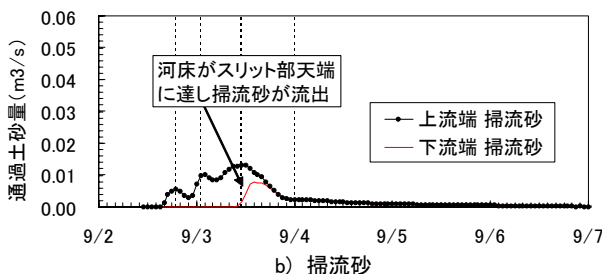
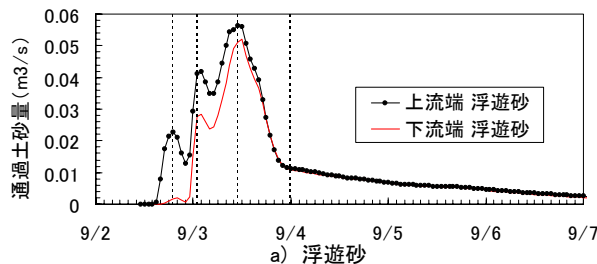


図-13 砂防堰堤通過土砂量の時間変化

表-6 計算区間における土砂収支

粒径成分	上流端流入量 (m ³)	下流端流出量 (m ³)	収支 (m ³)	捕捉率 (%)
0.1mm ≤ D	3,148	1,372	1,776	56%
D < 0.1mm	3,417	3,037	380	11%
全粒径	6,565	4,409	2,156	33%

多いため、捕捉率は11%にとどまる。一方、0.1mm以上の土砂の捕捉率は56%であり、砂防堰堤の堆砂成分の内、砂礫成分が大部分を占めている。

5. 結論

鋼製スリット型砂防堰堤の周辺において2011年台風12号時の堆砂・土砂流出に関し、現地調査と数値解析を行った結果、以下のような知見と課題が得られた。

- (1) 福原2号砂防堰堤は、台風12号以前はスリット部天端高まで余裕があったが、出水によりスリット部天端高以上まで堆砂した。堆砂後の縦断河床勾配は約1/40であった。堆積土砂の流出状況については、今後のモニタリングにより明らかにしていく。
- (2) 流量・地形・河床材料の現地データを与えることで、1次元河床変動モデルにより堆砂・土砂流出に関する実現象を概ね再現できた。これにより、出水による流入土砂量は約6,600m³であり、約33%が砂防堰堤周辺で捕捉されたものと推定できる。
- (3) 流木の捕捉、およびスリット部周辺の平面的な流れの発生がそれぞれ堆砂の高さ、スリット部脇の砂成分の堆積に関与していると思われる。これらの取扱いが再現精度向上に向けての課題となる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省倉吉河川国道事務所より多数の資料を提供いただきました。また、鳥取大学工学部水工研究室の皆様には、現地調査や論文作成にあたりご協力をいただきました。ここに記して心より謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局監修、(社)日本河川協会編：国土交通省河川砂防技術基準同解説、計画編、山海堂、2005。
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：土石流・流木対策設計技術指針解説、国総研資料第365号、2007。
- 3) 芦田和男、江頭進治、村岡猛、里深好文：砂防ダムの流出土砂調節機能に関する研究、京都大学防災研究所年報、第30号B-2、1987。
- 4) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：20万分の1地質図幅集（画像）Version.2.0、Disk B、2002。
- 5) 国土交通省：水文水質データベース、<http://www1.river.go.jp/>
- 6) 大木孝志、小島亨、川津幸治、永田徹、加藤陽平：天神川における土砂動態の実態把握および将来予測、第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp81-86、2006。
- 7) 日下部重幸、道上正規、藤田正治、檜谷治、宮本邦明：マックマック法を用いた砂防ダム上流の堆砂計算法に関する研究、水工学論文集、第40巻、pp977-982、1996。
- 8) 岩佐義郎：水理学I、朝倉書店、pp139、1987。

(2012.9.30受付)