

いであ株式会社大阪支社 正会員 ○加藤 陽平
鳥取大学大学院工学研究科 正会員 檜谷 治

1. はじめに

水系砂防計画においては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。よって近年の砂防計画においては、「流す砂防」の効果を期待できる透過型砂防堰堤が用いられることが多い。しかし透過型砂防堰堤周辺で、土石流非発生時の土砂動態について研究された事例は少なく、「流す砂防」の機能が果たされているかは明らかになっていない。そこで本研究は、透過型砂防堰堤周辺で土砂動態モニタリングを行うとともに、数値シミュレーションにより長期的な土砂流出量を予測し、「流す砂防」の効果の定量的把握を試みる。

2. 土砂動態モニタリング¹⁾

(1)対象領域 鳥取県倉吉市関金町に位置する天神川水系の支流福原谷川流域(図-1参照)を研究対象とした。福原谷川は流域面積9.5km²を持つ山地溪流であり、本流福原谷川と上蒜山を源頭部に持つ赤岩川から成る。赤岩川下流部に福原2号砂防堰堤(部分透過型)が、福原谷川下流部に福原砂防堰堤(不透過型・満砂)が設置されている。

(2)モニタリングの概要 透過型構造を有する福原2号砂防堰堤周辺での土砂動態特性に関する調査、および土砂移動に影響を及ぼす因子として降雨流出特性の調査を行った。調査項目と調査手法を表-1に示す。本研究での調査は2010年7月に開始し、2011年9月の台風12号に伴う出水による降雨流出・土砂動態特性を捉えることができた。

(3)モニタリング結果 図-2に2011年台風12号時の降雨流出特性を示す。福原2号砂防堰堤地点では、最大時間雨量47.5mm/h、総雨量539.5mmの豪雨が発生した。流量は固定カメラ撮影画像の解析から得たものであり、福原2号砂防堰堤地点のピーク流量は約10m³/sと推定している。図-3は福原2号砂防堰堤の堆砂状況を縦断的に表したものである。河床高は2010年7月時点でスリット天端に達していなかったが、台風12号時の堆砂により2011年9月時点ではスリット天端を超過している。図-4は出水前後の河床材料の変

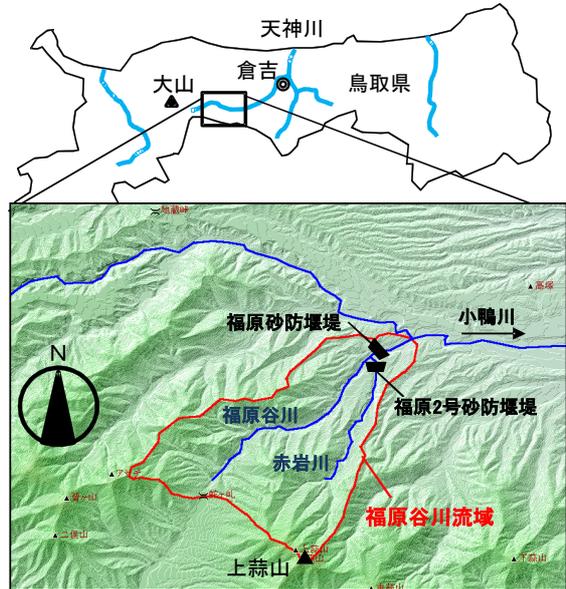


図-1 研究対象領域(福原谷川流域)

表-1 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

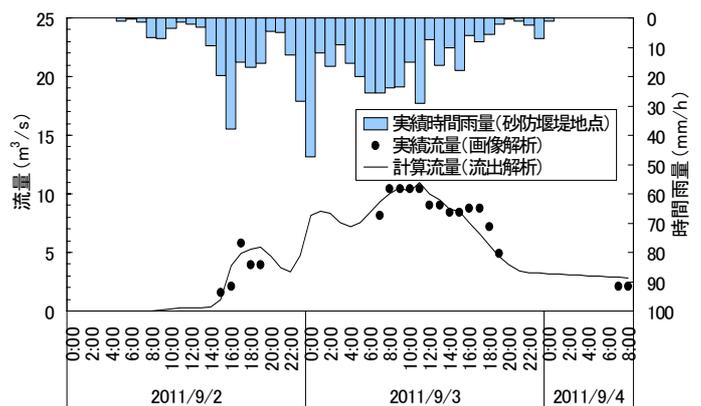


図-2 降雨流出特性(福原2号砂防堰堤地点)¹⁾

化である。採取地点は図-3に記載している。出水前の状況を見ると、砂防堰堤直上流の河床材料1では主に砂が、河床材料2では主に礫が含まれていた。出水後においては、河床材料1が礫質に変化し、河床材料2でも粗礫成分が増加している。

3. 土砂流出シミュレーション²⁾³⁾⁴⁾

(1)流域と河道のモデル化 モデル化の概念を図-5 に示す。江頭ら²⁾は支川の合流点から次の合流点までを単位河道、その左右岸斜面を単位斜面と定義し、単位河道と単位斜面からなるユニットを直列・並列に接続することで、降雨・土砂流出現象を一体的に解析できるモデルを構築した。本研究では江頭らの考え方を踏襲するとともに、河床勾配の変化や砂防堰堤による背水の影響を考慮できるように、単位河道内部を区間距離 Δx を持つブロックに細分割することとした。

図-5 上段のように流域分割を行い、単位河道に番号 $i=1\sim 5$ を割り振ると、図-5 下段のようなユニットの集合体として流域をモデル化できる。

(2)支配方程式

1)斜面の連続式・運動方程式

江頭ら²⁾は斜面上の表面流(表層)および中間流(A層)をモデル化しており、本研究では図-6 に示すようにA層の下にB層があるものとし、基底流を表現することとした。支配方程式は以下のようになる。

$$\frac{\partial(h_s + \lambda h_A)}{\partial t} + \frac{\partial(q_s + q_A)}{\partial x} = (R - f_A)\cos\theta \quad (1)$$

$$\frac{\partial\lambda h_B}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} = (f_A - f_B)\cos\theta \quad (2)$$

$$q_s = \frac{1}{N} h_s^{5/3} \sqrt{\sin\theta} \quad (0 \leq h_s) \quad (3)$$

$$q_A = k_A h_A \sin\theta \quad (0 \leq h_A \leq D_A) \quad (4)$$

$$q_B = k_B h_B \sin\theta \quad (0 \leq h_B \leq D_B) \quad (5)$$

ここに、 h : 水深、 q : 単位幅流量、 R : 雨量強度、 f : 浸透能、 λ : 空隙率、 D : 層厚、 N : 等価粗度、 k : 透水係数、 θ : 斜面勾配である。添字 $S \cdot A \cdot B$ はそれぞれ表層・A層・B層のパラメータであることを示す。

2)河道の連続式・運動方程式

図-7は単位河道内部のひとつのブロックを抽出した模式図であり、連続式・運動方程式に用いる変数を記載している。①単位河道内に砂防堰堤がない場合、kinematic wave 法を用いて河積・流量を算出する。

$$\frac{\partial A_{ij}}{\partial t} = (Q_{IN} - Q_{ij}) \frac{1}{\Delta x} + (q_L + q_R) \quad (6)$$

$$A_{ij} = B_{ij} h_{ij} \quad (7)$$

$$Q_{IN} = Q_{j+1} \quad (j < j_{\max}) \quad (8)$$

$$Q_{IN} = \sum_{k=1}^K Q_{k1} \quad (j = j_{\max}) \quad (9)$$

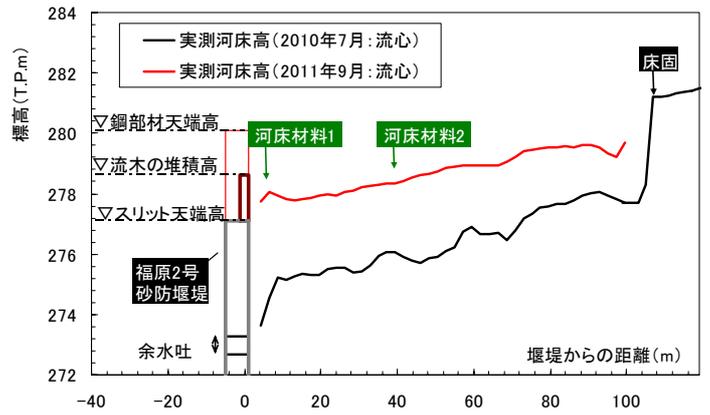


図-3 福原2号砂防堰堤の堆砂状況

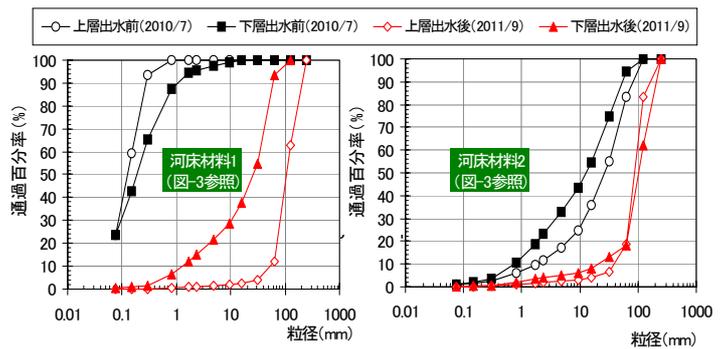


図-4 出水前後の河床材料の変化

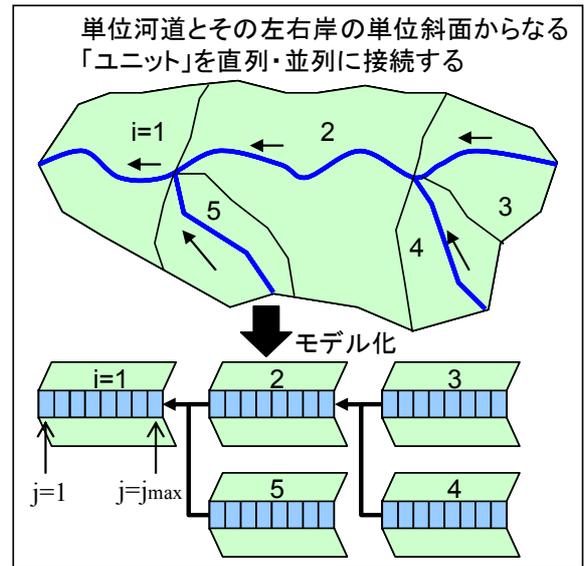


図-5 流域・河道のモデル化イメージ

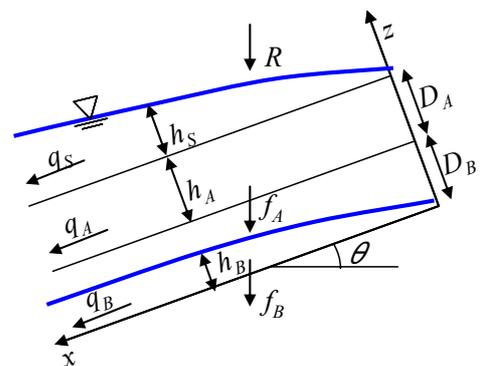


図-6 単位斜面の模式図 (縦断面図)

ここに A : 河積, Q : 河道流量, B : 河幅, h : 河道水深, $q_L \cdot q_R$: 左右岸斜面から流出する単位幅流量(= $q_S + q_A + q_B$), n : 粗度係数, I_b : 河床勾配, K : 流入する単位河道の数である. 添字 i は単位河道番号, j は単位河道内のブロック番号である.

②単位河道内に砂防堰堤がある場合, 水位のせき上げを表現するため不等流計算により水理量を算出する. 支配方程式は式(10), (11)のようになり, 河道内の流量貯留については考慮されない.

$$Q_{ij} = Q_{IN} + (q_L + q_R)\Delta x \quad (10)$$

$$\left(\frac{Q^2}{2gA^2} + h + z_b \right)_{ij} - \left(\frac{Q^2}{2gA^2} + h + z_b \right)_{ij-1} = I_{em}\Delta x \quad (11)$$

ここに, z_b : 河床高, g : 重力加速度, I_{em} : 平均エネルギー勾配である. I_{em} は岡部ら³⁾の手法により重み係数 $w_D \cdot w_U$ を用いて式(12)により算出する.

$$I_{em} = w_D \left(\frac{Q^2 n^2}{A^2 h^{4/3}} \right)_{ij-1} + w_U \left(\frac{Q^2 n^2}{A^2 h^{4/3}} \right)_{ij} \quad (12)$$

式(10)~(12)により解が得られない断面においては等流水深を与える. また, 下流端水深の境界条件は本間の越流公式を用いて以下のように与える.

$$h_{i1} = \left(\frac{Q_{i1}}{0.35b\sqrt{2g}} \right)^{2/3} + z_w - z_{b11} \quad (13)$$

ここに b : スリット幅, z_w : スリット部天端高である.

3) 流砂・河床変動の方程式

河床・浮遊砂の連続式は以下のとおりである.

$$\frac{\partial z_{bij}(1-\lambda)}{\partial t} = \frac{1}{B_{ij}} \sum_{m=1}^M (Q_{bIN} - Q_{bijm}) \frac{1}{\Delta x} + \sum_{m=1}^M (D_{ijm} - E_{ijm}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial (C_{ijm} A_{ij})}{\partial t} = (Q_{sIN} - C_{ijm} Q_{ij}) \frac{1}{\Delta x} + B_{ij} (E_{ijm} - D_{ijm}) \quad (15)$$

$$D_{ijm} = C_{bijm} w_{fm} \quad (16)$$

ここに, λ : 空隙率, Q_b : 全幅掃流砂量, D : 浮遊砂沈降量, E : 浮遊砂浮上量, C : 断面平均浮遊砂濃度, C_b : 基準面浮遊砂濃度, w_f : 沈降速度である. 添字 m は粒径を表す番号である. Q_{bIN} および Q_{sIN} はそれぞれ上流ブロックからの掃流砂および浮遊砂の流入量の合計であり, 以下のように扱われる.

$$\begin{pmatrix} Q_{bIN} \\ Q_{sIN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{bij+1m} \\ C_{ij+1m} Q_{ij+1} \end{pmatrix} \quad (j < j_{max}) \quad (17)$$

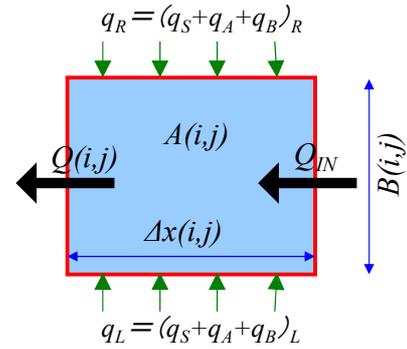


図-7 単位河道ブロックの模式図 (平面図)

表-2 流砂・河床変動計算に用いた式

掃流砂量	芦田・道上の式
浮遊砂浮上量	板倉・岸の式
浮遊砂沈降速度	Rubeyの式
浮遊砂基準面濃度	Rouse分布
粒度分布	芦田・江頭・劉の式 ⁴⁾
限界掃流力	岩垣の式
	芦田・道上の修正Egiazaroff式

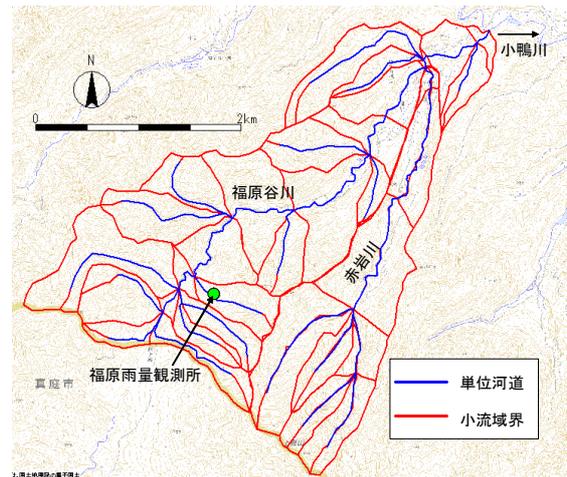


図-8 福原谷川流域のモデル化状況

$$\begin{pmatrix} Q_{bIN} \\ Q_{sIN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^K Q_{bk1m} \\ \sum_{k=1}^K C_{k1m} Q_{k1} \end{pmatrix} \quad (j=j_{max}) \quad (18)$$

その他計算に使用した式を表-2にまとめた.

(3)実績土砂動態の再現 モデルの精度を確保するため, 福原2号砂防堰堤の堆砂再現を行う. 図-8は単位河道・単位斜面のモデル化状況であり, 福原谷川および赤岩川の1次支川までを単位河道として扱っている. 計算条件を表-3に示す. 初期河床高の設定には2008年12月の10mメッシュDEMデータ⁵⁾を用い, 2011年9月測量時点まで計算期間とした. 各単位河道の川幅はレジーム則で設定した. 初期河床材料は2010年

の調査結果(図-4)をもとに作成した。ただし福原2号砂防堰堤周辺以外では粒度分布の実態が不明であるため、再現精度を見ながら粗粒分の追加・調整を行った(図-10参照)。図-9は河床高の再現結果であり、2011年9月洪水後の堆砂状況を概ね再現できている。図-10は河床材料の計算結果であり、図-4に示した河床材料の粗粒化を再現できている。

(4)長期的な土砂流出予測 斜面・河道を実績再現計算と同条件とし、2011年9月出水の後に2002年～2011年の10年間の降雨が繰り返される外力条件(表-3の計算期間②)を与え、長期的な土砂流出予測を試みた。また、福原2号砂防堰堤が透過型であることの効果を計るため、堰堤が現状、およびスリット部を塞いだ場合の2ケースで計算を行った。図-9に河床高予測結果を、図-11に福原谷川末端から小鴨川への流出土砂量を示す。福原2号砂防堰堤が透過型であることにより、再現期間・予測期間の13年間で約2300m³の土砂流出促進効果があると見積もられた。

4. 結論 kinematic wave 法と不等流計算を組み合わせた土砂流出解析モデルを構築し、降雨・河床高・河床材料の実績データをモデルに与えることで、透過型砂防堰堤における土石流非発生時の河床変動状況を再現できた。またスリットの有無を考慮した長期的な土砂流出予測を行い、透過型砂防堰堤の「流す砂防」の効果を定量的に把握できた。ただし、上流域の斜面崩壊などをモデル化していないため、土砂生産現象のモデル化が今後の課題である。

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、ならびに鳥取大学工学部水工研究室の皆様にご協力をいただきました。謝意を申し上げます。

参考文献

- 1)加藤・檜谷・梶川：透過型砂防堰堤周辺の土砂動態特性，水工学論文集，第57巻，I_973-I_978，2013。
- 2)芦田・江頭・中川：21世紀の河川学，第6章，京都大学学術出版会，2008。
- 3)(社)砂防学会編：山地河川における河床変動の数値計算法，pp32-37，2000。
- 4)芦田・江頭・劉：二層モデルによる複断面河道の流れおよび河床変動の数値解析，京都大学防災研究所年報，第35号 B-2，pp.41-62，1992。
- 5)国土地理院：基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ)，<http://fgd.gsi.go.jp/download/>

表-3 河床変動・土砂流出計算条件

計算期間	①再現:2009年～2011年9月 ②予測:上記①+2002年～2011年(10年)
雨量強度	福原観測所実績時間雨量(水文水質データベースより)
斜面	等価粗度: $N=0.7$
	土層厚: $D_A=0.4m, D_B=1.0m$
	透水係数: $k_A=0.01m/s, k_B=0.001m/s$
	浸透能: $f_A=10.0mm/h, f_B=0.1mm/h$
河道	河床高:2008年12月の10mメッシュDEMデータ ⁵⁾ より作成
	川幅:レジーム則から設定.各単位河道の流量は小鴨川河原町観測所の2011年9月洪水時の比流量から設定.
	河床材料:図-4河床材料2(2010年)より作成
	堰堤のない単位河道の区間距離: $\Delta x \approx 200m$
	堰堤のある単位河道の区間距離: $\Delta x \approx 10m$
砂防堰堤	粗度係数: $n=0.06$
	福原砂防堰堤: $b=20.9m, z_w = \text{初期河床高} + 0m$
	福原2号砂防堰堤: $b=7.6m, z_w = \text{初期河床高} + 3.1m$
	$z_w > z_0$ のとき掃流砂の流出がないものとする

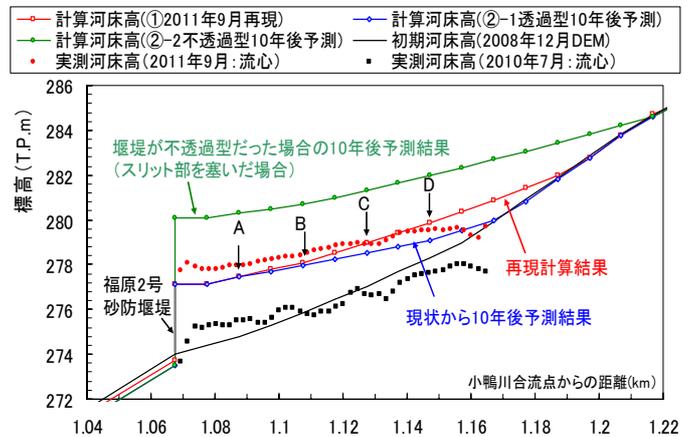


図-9 福原2号砂防堰堤の河床高計算結果

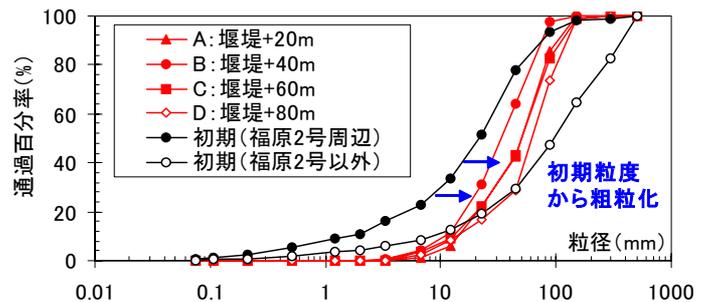


図-10 福原2号砂防堰堤の河床材料計算結果(表層)

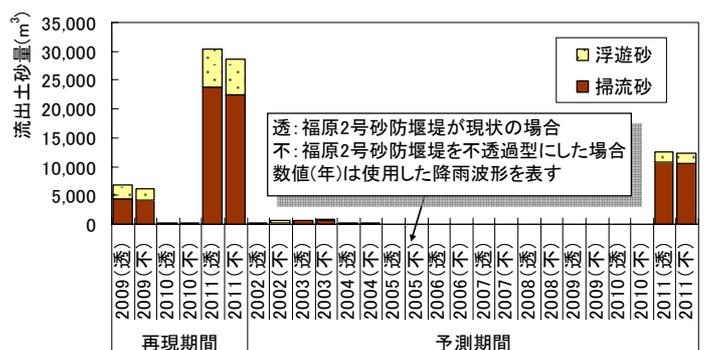


図-11 福原谷川から小鴨川への流出土砂量