

透過性砂防ダムによる土石流堆積シミュレーション

高橋 保・中川 一・里深好文・王 浩民*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

近年、平常時或いは中小出水時の土砂を通過させ、土石流発生時の危険な土砂は捕捉する目的で透過性砂防ダムが設置されてきているが、その機能を定量的に評価できているとは言い難い。そこで、昨年度開発した透過性砂防ダムの閉塞モデルをベースとして、本研究では、透過性砂防ダムによる土石流堆積過程に着目し、水路実験及び数値シミュレーションを行い、透過性砂防ダムの土石流抑止機能を解明しようとしている。

キーワード：土石流、透過性砂防ダム、堆積、数値シミュレーション

1. はじめに

従来から土石流対策として、砂防ダム等の構造物による、いわゆるハード対策によるものが主に考えられている。これらの砂防ダムの機能としては、貯砂および侵食による土砂生産の抑止機能は重要であるが、さらに洪水或いは土石流として供給される過剰土砂を一時貯留し、下流への一挙の土砂流出を軽減する土砂調節機能が基本計画に取り込まれている。その基本的な考え方は、土砂の流出の防止、または流出量の軽減である。このような基本的な機能を常に維持することを目的として、昭和49年(1974年)に青森営林局管内の国有林において、鋼製透過性砂防ダムの第一号が施工されて以来、日本全国に数多く設置されている。これは水の連続性確保、水生動物の生息環境の維持、周辺景観との調和などの機能を具備している他に、平常時および中小出水時には土砂を流せることにより、砂防ダムが満砂して空容量を失うことを防ぎ、土石流の発生時には、その先端の巨礫により透過部が閉塞されることを利用し、

ダム上流域に土石流を堆積させることができる。

特に最近、土砂輸送の不均衡が顕在化している河川が目立ってきており、流域内に生じる土砂生産・流出・堆積の現象とそれに関わる問題を一体にして検討するため、「流砂系」という新しい概念が導入された。それに基づき、森林を含む山地部、山麓部、平野部、河口・海岸部等における堆積・侵食等の土砂に関わる環境面も含めた流域全体の土砂生産・流出、さらに堆積に関わる社会問題を一貫して扱う総合土砂管理が念じられつつある。このような背景の下で、透過性砂防ダムは、平常時の無害な土砂を流下させるとともに、土石流や大出水時に危険な土砂を堆積させて土砂調節効果を果たすいわゆる「流す砂防」対策としては大いに期待できる。

これまで、透過性砂防ダムの土砂堆積機構や土石流調節機能に関して、多くの研究が行なわれてきている。まず、芦田・高橋(1980)は格子型砂防ダムの土石流調節機能を実験的に検討し、透過部の閉塞条件を提案した。その後、芦田・江頭ら(1987)は、土砂通過量を確率的に決める閉塞モデルを考案し、連

続体の原理に基づいた土石流の流動モデルと組み合わせた土石流捕捉モデルを提案した。水山・小橋らは(1995)透過性砂防ダムの閉塞に大きく影響を及ぼすパラメータには、透過部分の大きさ(L)と石礫の最大粒径(d_{max})との比(L/d_{max})、土石流の土砂濃度(C)を採りあげ、流砂量減少率の実験経験式と連続体の原理に基づいた土石流の流動モデルを組み合わせた土石流捕捉モデルを提案した。また、水野・水山ら(2000)は個別要素法を用いて、個々の砂礫の運動モデル、水が砂礫に与える推進力に関するモデル、鋼製透過性砂防ダムのモデルを組み合わせ、2次元の土石流捕捉モデルを作成した。しかしながら、現状では土石流によるダム上流域の河床変動等透過性砂防ダムの土砂調節機能等を定量的予測できると言いがたい。そこで、本研究では、透過性砂防ダムによる土石流の堆積過程に着目し、水路実験及び数値シミュレーションを行う。著者ら(2001)が開発した格子型砂防ダムの閉塞モデルと粒径選別効果を取り入れた土石流流動モデルとを組み合わせ、土石流の発生、発達、透過部の閉塞による堆積過程を一貫して計算できるモデルを作成し、透過性砂防ダムの土石流防止機能を解明しようとしている。

2. 実験概要

2.1 実験装置

実験に使用した水路は Fig. 1 に示すような、全長 5m、幅 10cm、高さ 20cm の可変勾配鋼製水路であり、水路床には平均粒径 0.3cm の混合砂で粗度を貼付した。水路側面は透明なアクリル材でできており、土石流の状況を観察できるようになっている。水路勾配は 18 度に設定している。給水装置は、浸透流給水タンクと洪水流給水タンクおよびポンプからなっている。本実験は全て同一の供給流量で行っている。

実験材料としては、市販珪砂を使用した。実験材料の粒度分布を Fig. 2 に示している。最大粒径は 1cm で、平均粒径は 0.24cm である。

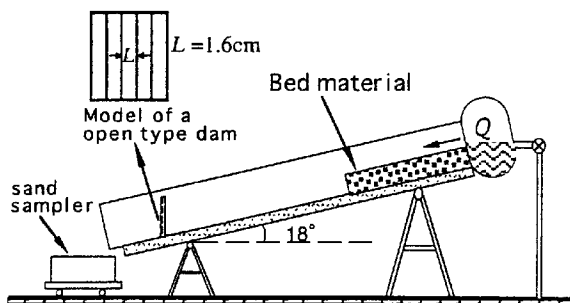


Fig. 1 Experimental flume

計測装置として、水路下流端に移動式サンプリング台車を設置し、その上に採砂箱を五つ並べ、台車を横断方向に移動させることにより、同じ時間間隔で土石流の先端部分、中間部分及び後方部分のサンプルを採取できるようにした。サンプリング時刻はビデオカメラ記録より読み取った。また、水路全域にわたって流下方向にレールを設置し、ローラーでなめらかに移動できる計測台車を載せた。その台車にはレーザー式河床位計が装着されている。この河床位計によって計測された土石流堆積層の河床位は、AD 変換ボードを通じてノートパソコンに入力される。砂防ダムの堆積層の正面における大粒子のかみ合い具合や堆積層の表面及び側面の状況などをデジタルカメラで記録した。さらに、土石流の流下状況や、土石流の発達過程、粒径の分別過程、流動深、透過部の閉塞、堆積河床位などの時間変化を撮影するため、デジタルビデオカメラを 4 台利用して、それぞれ水路の上方、側面(水路全体とダム直上流部の 2カ所)、正面から撮影を行った。なお、実験水路の下流端より 30cm のところに、透過性砂防ダム模型を設置している。Fig. 1 のように、ダム部材には直径 3mm の銅製棒を用いている。前述した閉塞条件 $L/d_{max}=1.5\sim 2.0$ を参考にして、ダム模型の各縦部材の間隔は 1.6cm に設定した。

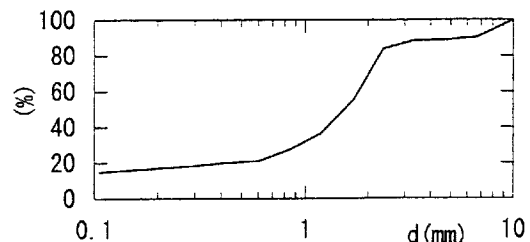


Fig. 2 Grain-size distribution of the sand used in experiments

2.2 実験方法

実験は以下の手順で行う。まず、水路上流端より 1.5m 下流地点に高さ 10cm の堰を設け、この空間に厚さ 10cm で砂礫材料を敷き、浸透流給水タンクより長時間水を与えて、十分飽和させた後、洪水流給水タンクから $300\text{cm}^3/\text{sec}$ の水を 20 秒間給水することにより、土石流を発生させる。次に、実験水路の下流端に設置した透過性砂防ダム透過部の閉塞状況と土石流の堆積状況を計測する。なお、透過性砂防ダム模型がどの程度土石流を捕捉するかを比較するために、ダム模型を設置しない場合についても実験した。計測方法としては、ビデオカメラによる撮影とともに、水路下流端において採砂箱を用いて通過土

石流を約3秒間隔でサンプリングし、サンプルの流量、流砂量、総流出土砂量の測定を行う。

2.3 実験結果及び考察

実験のVTRによると、大きな粒子が集中している土石流の先端部が砂防ダムに到達すると、その大きな粒子の大部分は砂防ダムを透過することができないため、砂防ダムの開口部は瞬間的に閉塞され、それと同時に、後続流がせき上がり、土砂の堆積が始まる。さらに、後続流の土砂が流下してくると、その土砂の一部分は盛り上がりが高くなった堆積層を乗り越えて流出しながら、前の堆積層の上に層状に堆積し、その他の大部分はその後方に堆積していく。堆積層が長くなるとともに、わずかの時間ではあるが、後続流の土砂が堆積層を乗り越えられず、土砂の流出が一時的に停止することがあった。その後、土砂が再び流出し始め、後続流には微細粒子が次第に多くなって、堆積層の後部に層状に堆積する。その堆積過程をFig.3に示す。また、Photo1はダム模型の透過部の閉塞状況を示している。この写真によると、土石流先端部に集中する最大径クラスの粒子がアーチ構造を作ることによってダム模型透過部を閉塞することは判明した。

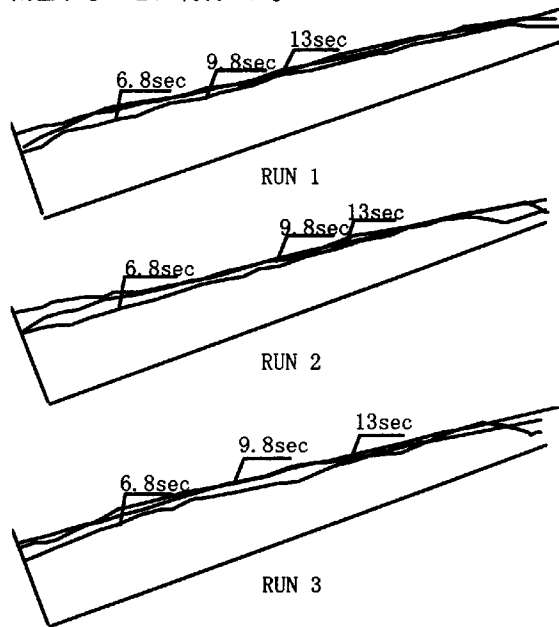


Fig. 3 The depositional processes of debris flow by an open-type Sabo dam

Fig. 4とFig. 5はそれぞれRUN1~3(砂防ダム有、同一実験条件)の下流端での流量と流砂量を示している。砂防ダムが無い場合(RUN4~6)と比較すれば、流量のピーク値が大幅に減少し、変動幅が著しく小さくなっていることがわかる。RUN2では土石流が下

流端に到達した6秒後ぐらいに、流量が再び大きくなって、給水終了直前にピーク値に近い大きな流量が現れた。これは、ダム開口部を閉塞していた砂礫のかみ合わせ構造が崩れることによって、流出量が大きくなったと考えられる。流砂量は概ね流量と似たような変動傾向を示している。これらの図より、透過性砂防ダムにより土石流のピーク流量と流砂量を大幅に減少できることがわかる。



Photo 1 Open spaces blocked by boulders

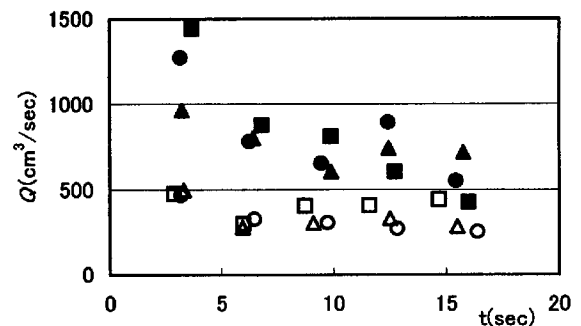
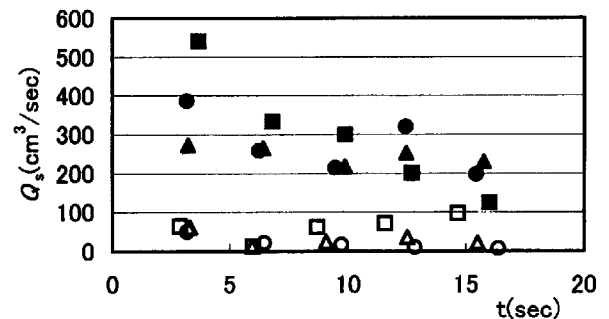


Fig. 4 Experimental results of flow discharge



△ □ ○ : Experiment RUN1~3(with dam)
▲ ■ ● : Experiment RUN4~6(without dam)

Fig. 5 Experimental results of sediment discharge

Fig. 6 は RUN1~3 の下流端濃度を示している。ダムなしの場合と比較すれば、透過性砂防ダムにより、土石流の濃度を低くする効果のあることは分かった。また、変化の傾向においては、ダムなしの場合には流量と濃度が違う形を現しているが、ダムがある場合には濃度と流量が同じような形を現している。

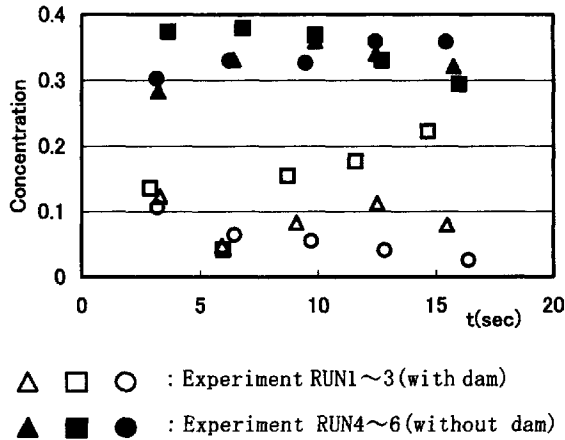


Fig. 6 Experimental results of sediment concentration at the downstream end of the channel

3. 土石流捕捉モデル

急勾配の溪床堆積物が表面流によって侵食され、その水と侵食土砂が混合して流下しながら、土石流になる。透過性砂防ダムが設置される場合は、実際にどのような土石流調節機能を果たせるか、換言すれば、土石流がどうやって砂防ダムの透過部を閉塞するか、またその閉塞によってどのように堆積するかは定量的に評価しなければならない。既に前報⁶⁾において、土石流の発生、発達過程を粒径選別の効果を取り入れながら一貫して取り扱う土石流ハイドログラフ予測法を提案した。さらに、昨年の研究では、土石流による透過部の瞬間閉塞確率は石礫濃度、最大粒径、移動速度等の土石流特性値と関係づけられるものであり、閉塞現象は一つの「確率過程」と考え、時間の経過に伴うダムの閉塞過程を再現できるモデルを開発した。これらの研究をベースにして、透過性砂防ダムの土石流捕捉計算フローチャートを Fig. 7 のように考えた。

本解析手法においては、まず式 (1) ~ (8) を流れ方向に Δx の区間に区分した一次元差分計算をすることによって、土石流の発達・減衰過程及び流速、流量などの土石流特性値を求めることができる。運動方程式：

$$q_t = Ch^{5/3} \sin^{1/2} \theta \quad (1)$$

ここに、 q_t : 土石流の単位幅流量、 h : 流動深、 θ : 流路勾配、係数 C は流れの状態に応じて与えられ、土石流の場合は次のように記述される。

$$C = \frac{2}{5d_m} \left[\frac{g}{0.02} \left\{ c + (1-c) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{c}{c_s} \right)^{1/3} - 1 \right\} \quad (2)$$

ここに、 d_m : 平均粒径、 g : 重力加速度、 c : 土石流中の砂礫の容積濃度、 c_s : 静止堆積層における砂礫の容積濃度、 ρ : 間隙流体の密度、 σ : 砂礫の密度である。

全容積の連続式：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_t}{\partial x} = i(c_s + (1-c_s)s_b) + r \quad (3)$$

ここに、 s_b : 堆積層の飽和度、 r : 単位長さあたりの横流入量、 i : 侵食或いは堆積速度である。

砂粒の連続式：

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial (cq_t)}{\partial x} = ic_s \quad (4)$$

土石流の平衡濃度式：

$$c_\infty = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (5)$$

ここに、 c_∞ : 土石流の平衡濃度、 ϕ : 堆積層の内部摩擦角であるが、移動粒子間の動摩擦角として用いられている。

河床位の連続式：

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + i = 0 \quad (6)$$

ここに、 z_b : 河床位である。

侵食速度式：

$$i = \delta_s \frac{c_\infty - c}{c_s - c_\infty} \frac{q_t}{d_m} \quad (7)$$

堆積速度式：

$$i = \delta_d \left(1 - \frac{U}{pU_s} \right) \frac{c_\infty - c}{c} U \quad (8)$$

ここに、 δ_s : 土層不安定の発生とその不安定土層の流れの中への取込に要する遅れを表す係数、 δ_d : 係数、 U : 土石流の平均流速、 U_s : 堆積も侵食もなしに流下を続けることのできる平衡流速、 p : 1 よりも小さい定数である。

次に、流れが土石流に発達した場合は、式 (9) ~ (11) のような粒径選別過程を記述できる方程式系を流動深方向にも区分した二次元の差分式の下で解くことにより、土石流先端部への巨礫の集中とそれによる土石流流量や流速などの水理量への影響を求めることができる。

ここでは、ある計算メッシュに着目した場合、その内部の平均粒径よりも大きい粒子は、粒子同士の

衝突による分散圧力による上方への輸送によって、平均粒径よりも小さい粒子は、大きい粒子が上方へ移動した後の空隙を埋めるように、動的篩の効果等によって、下方へ輸送されるとする。

粒子 k の上昇速度 v :

$$\frac{v^2}{gd_p} = \frac{4}{3} \frac{1}{c_D} \frac{(\sigma - \rho) \cos \theta}{\{(\sigma - \rho)c + \rho\}} |V_d| \quad (9)$$

$$|V_d| = r_d^{1/3} \left| \frac{2}{1+r_d} \frac{(0.5r_d^{1/3} + 0.5 + \lambda^{-1})^2 (r_d^{1/3} + \lambda^{-1})^3}{(1 + \lambda^{-1})^3} - 1 \right|$$

移流速度 u :

$$u = \frac{2}{3d_L} \left[\frac{g \sin \theta}{0.02} \left\{ c + (1-c) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{c}{c} \right)^{1/3} - 1 \right\} \left\{ h^{3/2} - (h-z)^{3/2} \right\} \quad (10)$$

固体分連続式 :

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{\partial (c_k u)}{\partial x} + \frac{\partial (c_k v)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

ここに、 c_D : 抗力係数、 $r_d = \{d_k/d_m\}^3$ 、 d_k : 粒子 k の粒径、 $\lambda = \{(c^*/c) - 1\}^{-1}$: 線濃度、 c_k : 粒径 k の土砂濃度、 d_p : 着目メッシュ内の平均粒径、 d_L : 流動深全体にわたる平均粒径である。

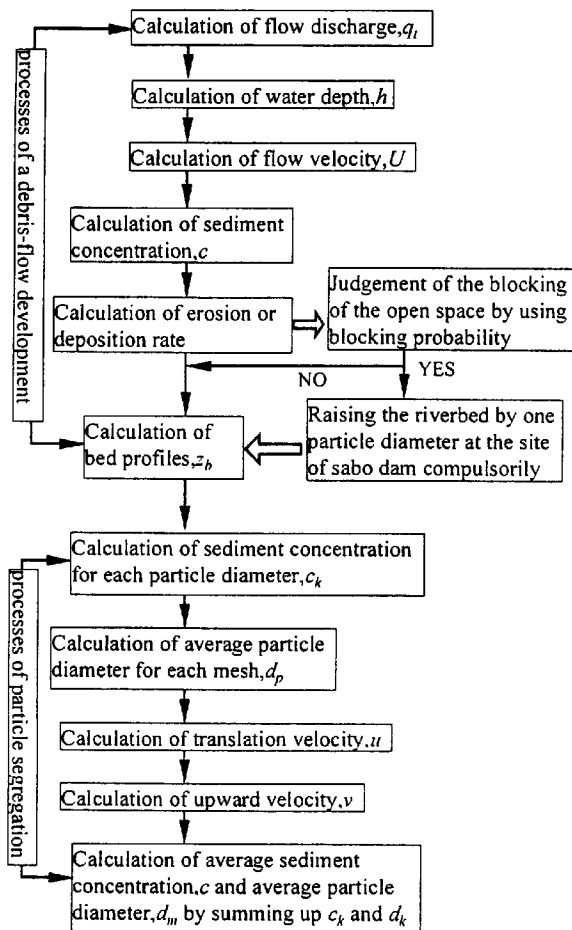


Fig. 7 The flowchart of simulation model

更に、透過性砂防ダムの閉塞確率を求めることによって、透過部の閉塞による土石流の堆積過程が求められる。具体的に、最大粒径土砂濃度 c_{max} (c_{max} は 5 つの粒径階のうち最大径であり、ここでは 1cm)、速度 U が瞬間的に一定であるとして、ある時間間隔 T_L の間に、 i 個の粒子がランダムな時間 t_i ($0 < t_i < T_L$) に、ランダムな位置 x_i を流下し、ダム透過部へ到達して柱に衝突すると考えると、粒子が柱と反発することなく柱を軸に回転している間は、後続粒子の通過可能間隔 l が小さくなる。すなわち、粒子が接している柱の直径が大きくなったのと同値であると考えられる。従って、粒子と柱との衝突の有無によって、新しい柱の直径を計算し、ダムが閉塞するかどうかを判断する。すなわち、 T_L の間に m ($i \geq m$) 回の試行をし、その都度ダムが閉塞するかどうかを判定する。同じ条件下でこの試行を N 回繰り返す、 T_L 時間内で閉塞した回数 M を求め、閉塞確率 F を以下のように評価する。

$$F = M/N \quad (12)$$

さらに、 T_L を変えて計算すれば、 T_L と F との関係が離散的に求められる。しかし、実際の数値解析に用いる閉塞確率は T_L より遙かに小さい時間間隔 Δt に対する瞬間閉塞確率 P でなければならないので、 P を F を用いて表しておくことが必要である。そこで、今、 c_{max} 、 U が瞬間的に一定であるならば、 P が一定であると考え、 $T_L = n\Delta t$ 秒後の閉塞確率は $F = 1 - (1 - P)^n$ となるので、

$$p = 1 - (1 - F)^{1/n} \quad (13)$$

より p を求めることができる。

こうして、土石流流動モデルに粒径選別効果を取り入れ、さらに透過性砂防ダムの閉塞モデルを組み合わせることにより、土石流の発生、発達、透過部の閉塞による堆積過程を一貫して計算できる。

4. 数値解析及び結果

上述の土石流捕捉モデルを用いて、透過性砂防ダムによる土石流堆積に関する再現シミュレーションを行った。具体的には、まず時間ステップは $\Delta t = 0.02 \text{ sec}$ とし、メッシュの大きさは $\Delta x = 10 \text{ cm}$ とした。前述した実験の土砂材料を粒径で 5 段階に分け、各時間ステップにおいて、粒径の選別を計算し、土石流のハイδροグラフを予測するシミュレーションを行う。そして、流速や流量などの土石流特性値及び土石流発達時における先端部に集中する最大径クラス粒子の土砂濃度を求める。次に、砂防ダム部に到達した土石流の流速と最大径土砂濃度を透

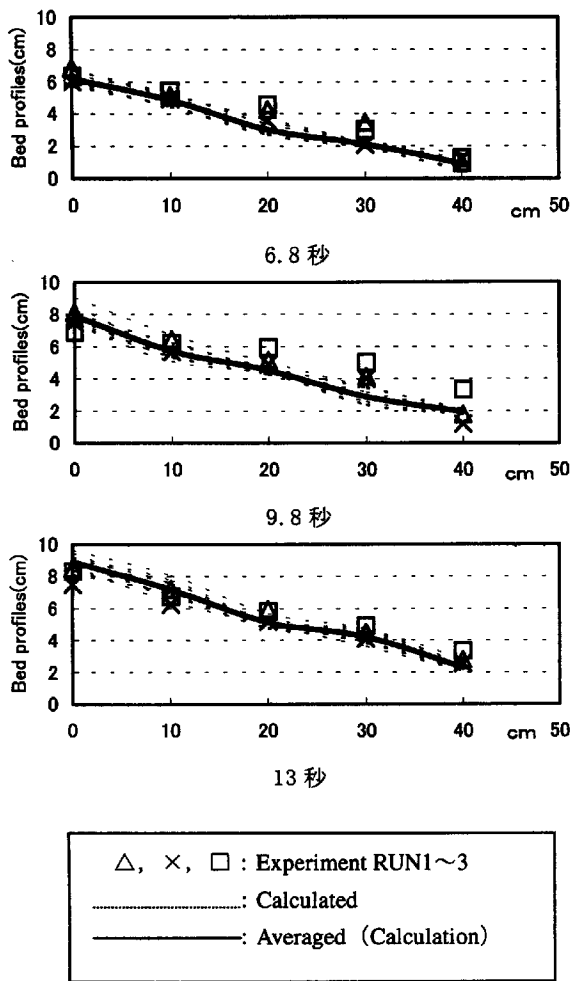


Fig. 8 Comparisons between calculated and Experimental bed profiles

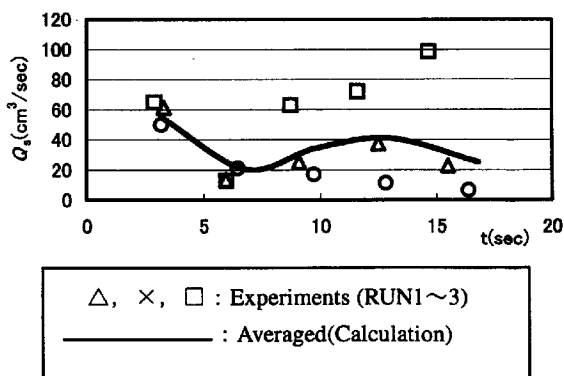


Fig. 9 Comparisons between calculated and Experimental sediment discharge

過部の閉塞モデルに代入して、 $N = 1000$, $\Delta t = 0.02$ 秒の条件下で、透過性砂防ダムの瞬間閉塞確率を算出する。さらに、算出した瞬間閉塞確率を $[0, 1]$ 内の発生乱数と比較して、それを上回る場合は砂防ダ

ム透過部が閉塞したと判定し、ダム部の河床位を強制的に上げて、全体的に透過性砂防ダム上流域における土石流の堆積による河床変動を求める。

Fig. 8 は閉塞後の河床位の実験値と計算値とを比較したものである。透過部の閉塞に関して、石礫濃度、移動速度等の土石流特性値によって算出した瞬間閉塞確率がある乱数値を超えた場合は閉塞と判定しており、乱数発生時の初期値の違いによって、ダム透過部の閉塞状況はそれぞれ若干異なる。そこで、同じ実験に対し、10ケースの再現計算を行い、これを図中の点線で示す。そして、これらを平均したものを図中の太線で示す。また、Fig. 9 は流出土砂量について計算結果と実験結果を比較したものである。RUN2 に関して、実験ではアーチアクションが崩れて二次崩壊が発生したため、計算結果は実験結果よりやや小さめであるが、実験値の傾向を比較的良く再現している。本手法により、ダム透過部の閉塞の実験結果は概ね再現できていると言えよう。

5. 終わりに

本研究では、透過性砂防ダムの土石流調節制御機能を解明することを目的として、砂防ダム透過部の閉塞による土石流の堆積による砂防ダム上流域の河床変動数値解析法を検討した。まず、透過性砂防ダムの閉塞とその閉塞による土石流の堆積過程に関して水路実験を行い、透過性砂防ダムの調節により、土石流の流量、流砂量などの特性をダムなしの場合と比較した。ついで、粒径選別効果を考慮した土石流捕捉モデル開発し、本手法を用いて土石流の発生、発達、透過性砂防ダムによる堆積過程に関する再現計算を行った。本研究で得られた成果と今後の課題は以下のようなものである。

1. 透過性砂防ダムによる土石流捕捉モデルを開発した。このモデルは粒径選別効果を取り入れた土石流流動モデルに新しく開発した透過性砂防ダム閉塞モデルを組み合わせて、ある程度透過性砂防ダムの土石流調節効果を評価することができる。
2. この計算手法を用いて、土石流の発生、発達、透過部の閉塞による堆積過程までを一貫して再現計算を行った。水路実験結果は概ね再現されており、この計算手法の妥当性が確認された。

謝辞

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費（基盤研究 B(2) 研究代表者 高橋保、研究課題名 水系一貫した土砂配分システムの開発、課題番号

11558048 及び基盤研究 C(2) 研究代表者 中川一、
研究課題名 透過性砂防ダムの機能評価と流域土砂
管理に関する研究、課題番号 11650525) の補助を
受けて行ったものであり、関係各位に記して謝意を
表す。

参考文献

芦田和男・江頭進治・栗田三津雄・荒牧浩 (1987) :
透過性砂防ダムの土石流調節機構, 京都大学防災
研究所年報, 第 30 号 B-2, pp. 441-456.

芦田和男・高橋保 (1980) : 土石流の調節制御に関す
る研究, 京都大学防災研究所年報, 第 23 号 B-2,
pp. 433-441.

高橋保・中川一・里深好文・王浩民 (2001) : 格子型砂防
ダムの閉塞モデル, 水工学論文集, 第 45 巻

高橋保・中川一・原田達夫 (1990) : 混合材料からなる
溪床侵食型土石流の予測, 京都大学防災研究所年
報, 第 33 号 B-2, pp. 443-456.

水山高久・小橋澄治・水野秀明 (1995) : 格子型ダム
のピーク流砂量減率に関する研究, 新砂防, Vol. 47
No. 5 (196), January, pp. 8-13.

水野秀明・水山高久・南哲行・倉岡千郎 (2000) :
個別要素法を用いた鋼管製透過性砂防ダムの土石
流捕捉効果に関するシミュレーション解析, 砂防
学会誌, Vol. 52 No. 6, p4-11.

Simulation of debris flow deposition by open-type Sabo dam

Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA, Yoshifumi SATOFUKA and Haomin WANG*

*Graduate school of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Recently, many open-type sabo dams have been constructed. These dams have functions to pass through the sediment transported during normal floods downstream and store hazardous big boulders transported by a debris flow. In this study, we pay attention to the sedimentation processes of debris flow by a open-type Sabo dam, and flume experiments and numerical simulations are carried out to clarify the function of the open-type Sabo dam.

Keywords: debris flow; open-type Sabo dam; deposition processes; numerical simulation