

立体格子型砂防ダムによる土石流 調節のシミュレーション

SIMULATION OF DEBRIS FLOW CONTROL
BY A GRID-TYPE SABO DAM

高橋 保¹・中川 一²・里深好文³・王浩民⁴

Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA, Yoshifumi SATOFUKA and Haomin WANG

¹フェロー 工博 京都大学教授 京都大学防災研究所 (〒611 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学助教授 京都大学防災研究所 (〒612 京都市伏見区横大路下三栖)

³正会員 工修 京都大学教授助手 京都大学防災研究所 (〒611 宇治市五ヶ庄)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒606 京都市吉田本町)

Recently, many grid-type Sabo dams have been constructed. These dams have functions to pass through sediment transported during normal floods and to store hazardous big boulders transported by a debris flow. In this study, we pay attention to the sedimentation processes of debris flow by a grid-type Sabo dam, and flume experiments and numerical simulations are carried out using stochastic model of blocking by a planer grid-type dam. In this study, the model is expanded into the three-dimensional model and processes of the debris flow generation, development and sedimentation by a grid-type Sabo dam is expressed by the model. This model is found to be very useful to clarify the function of the grid-type Sabo dam.

Key Words : debris flow; grid-type dam; sedimentation; simulation

1. はじめに

従来から、土石流対策としては、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、貯砂および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、下流への急激な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長期にわたって維持できる構造物として、立体格子型砂防ダムが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て、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総合的に検討するため、

「流砂系」¹⁾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図られつつある。このような背景の下で、立体格子型砂防ダムは、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、立体格子型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²⁾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³⁾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⁴⁾立体格子型砂防ダムの閉塞に大きく影響を及ぼすパラメータとして、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⁵⁾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、鋼製立体格子型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、いずれのモデルにおいても、格子空間の閉塞に主な影響を与える縦部材に関しては、定性的に取扱いにとどまり、土石流によるダム上流域の河床変動等立体格子型砂防ダムの土砂調節制御機能を定量的に予測できるとはいえない状況にある。そこで、本研究では、立体格子型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⁶⁾が開発した平面格子型砂防ダムの閉塞モデルを立体型に拡張し、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、立体格子型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

(1) 実験装置

実験に使用した水路は図-1に示すような、全長5m、幅10cm、深さ20cmの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図-2に示している。最大粒径は1cmで、平均粒径は0.24cmである。

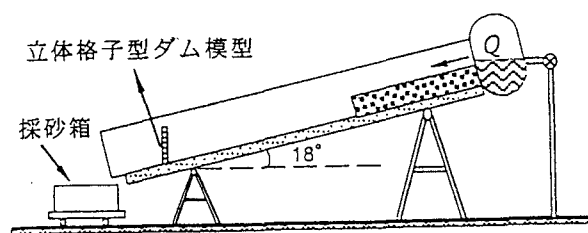


図-1 実験水路

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ンを設置し、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、粒径の分級過程、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、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、立体格子型砂防ダム模型を設置している。図-3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²⁾ $L/d_{max}=1.5\sim 2.0$ 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。また、格子面間隔は1.6cmである。

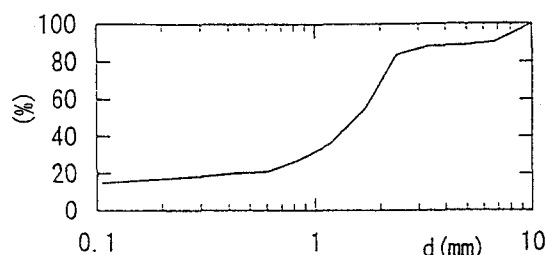


図-2 実験土砂の粒度分布

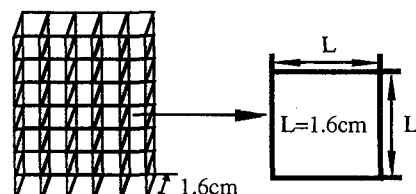


図-3 立体格子型砂防ダム模型

(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、これより上流側に厚さ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300cm³/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立体格子型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、立体格子型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、累積流出土砂量の測定を行った。

(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、その土砂の一部は盛り上がり、高くなった堆積層を乗り越えながら、前の堆積層の上に層状に堆積し、残り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。また、立体格子ダムの一面目を閉塞していた粒子のかみ合わせ構造がほとんど崩れず、後続土砂が堆積層を乗り越え、ダムの一面目と二面目の間に、比較的に大きな粒子が堆積した。この現象は現地調査で観察されている。また、写真-1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がわかる。

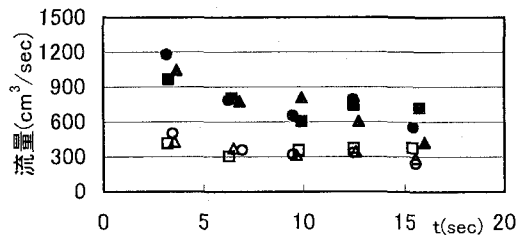


図-4 ダムの有無による下流端流量の比較

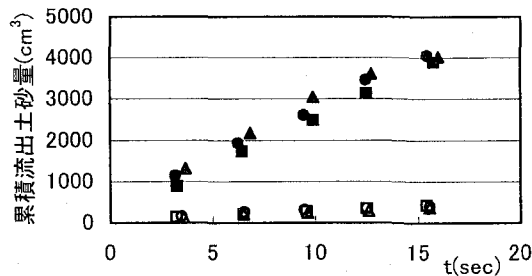


図-5 ダムの有無による下流端累積流出土砂量の比較

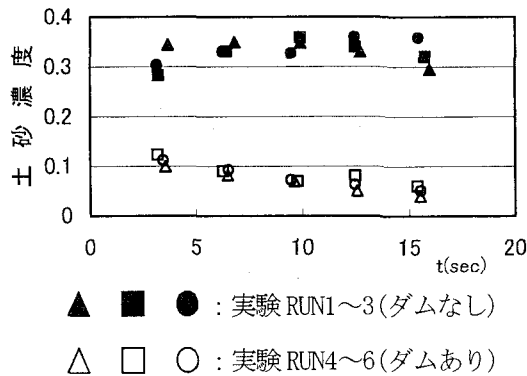


図-6 ダムの有無による下流端土砂濃度の比較

図-4 と図-5 はそれぞれ砂防ダムがある場合とない場合における下流端での流量と累加流砂量を示している。砂防ダムがある場合 (RUN4~6) では、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。累加流砂量もかなり小さくなっている。これらの図より、立体格子型砂防ダムにより土石流のピーク流量と累加流砂量を大幅に減少できることがわかる。図-6 は下流端土砂濃度の比較を示している。立体格子型砂防ダムは、土石流の濃度を低くする効果のあることが分かった。



写真-1 格子部分の閉塞状況

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、土石流になる場合を想定する。立体格子型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、土石流がどのようにし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が定量的に評価されなければならない。既に前報⁷⁾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⁸⁾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、時間の経過に伴う一面の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、立体格子型砂防ダムの土石流捕捉計算フローを図-7 のように考えた。

本解析手法においては、まず式 (1) ~ 式 (8)⁹⁾ を流れ方向に Δx の区間に区分し、一次元の数値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。

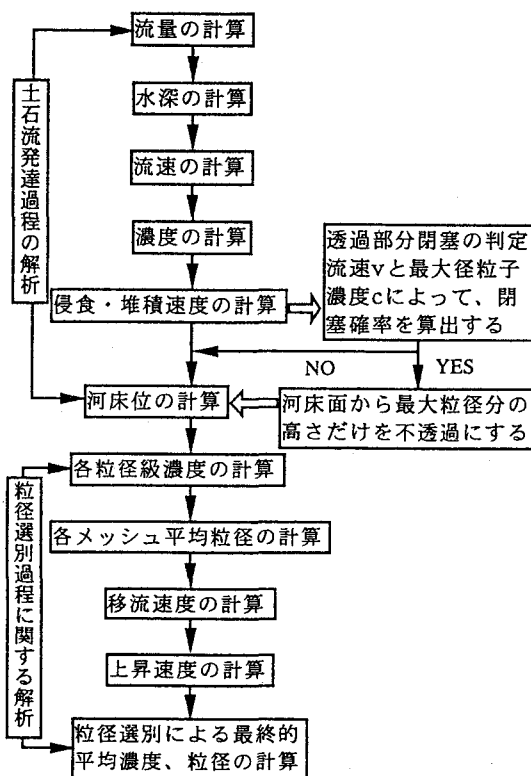


図-7 土石流捕捉計算フローチャート

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。

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

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_* ：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：

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

ここに、 s_b ：堆積層の飽和度（ここでは、堆積層が飽和しているから、 $s_b = 1$ ）、 i ：侵食或いは堆積速度である。固体分連続式：

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

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：

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

堆積速度式：

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

ここに、 δ_e ：不安定土層が流れの中への取り込まれるの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_* ：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。堆積速度式に $(1 - U/pU_*)$ の係数を含めているのは、ダム設置地点が勾配急変点の下流部である場合も想定して、慣性的な運動の影響を考慮するためである。

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鉛直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、そのメッシュ内の粒子群は、その高さの流下方向平均流速で下流のメッシュへと輸送され、一方、上流側メッシュから輸送されてくる粒子群が加わり、土石流が流下方向に移流すると同時に、メッシュ内の粒度分布に応じた上下方向の粒径別の移動が生じる。すなわち、各メッシュにおける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で上方へ粗粒子が輸送されることによって、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、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 ：

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

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_t ：流動深全体にわたる平均粒径である。

さらに、立体格子型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。すなわち、既往の研究⁹⁾によると、最大粒径土砂濃度 $c_{\max}$ （5つに分けた粒径階のうちの最大粒径階、ここでは1cm）と速度 U が瞬間的に一定であるならば、平面格子型砂防ダム（一面タイプ）の瞬間閉塞確率 P を次式で与えられる。

$$p = 1 - (1 - F)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

ここに、 F はある時間間隔 T_L の間の閉塞確率であり、 $n = T_L / \Delta t$ （ Δt ：実際の数値解析に用いる時間間隔）である。ただし、この式では、横部材と堆積面との間のクリアランスが狭くなった場合の影響が含まれていないので、次節の数値計算においては、その影響を考慮するために、クリアランスが最大粒径よりも小さくなった場合には、そのクリアランスを有効な格子間隔に読み替えている。今、平面格子型砂防ダムの閉塞モデルを立体型に拡張する。実験によると、立体格子型ダム2面目の格子が閉塞する原因は、1面目の格子部材と接触して減速した粒子が一面目を通じた他の粒子とアーチ構造を作って2面目の格子を閉塞することによる。この場合は、1面目に土石流が到達した時点と比べて、最大粒径土砂濃度 $c_{\max}$ が不変で、平均速度 v が格子部材と接触によって v_2 に減速すると考える。すなわち、2面目格子に対して、1面目は粒子を減速する影響を与える。実際には、粒子同士の衝突、離脱角度や摩擦などの影響で、一面目の柱と衝突して二面目に到達する粒子の速度の評価は複雑であるため、ここでは粒子が2面目に到達する時点の速度 v_2 は v と $[0, 1]$ のある乱数との積であると考え、前述した平面格子型砂防ダムの閉塞モデルによって、一定の $c_{\max}$ と v_2 の条件下で、式(12)により、2面目の瞬間閉塞確率 P_2 が求められる。今、1面目瞬間閉塞確率を P_1 と表すと、2面タイプ格子型砂防ダム全体の瞬間閉塞確率 $P_{2\text{面タイプ}}$ は次式で求められる。

$$P_{2\text{面タイプ}} = p_1 + (1 - p_1)p_2 \quad (13)$$

同様に、多面タイプの格子型砂防ダムの瞬間閉塞確率 $P_{n\text{面タイプ}}$ は次の式のようなものである。

$$P_{n\text{面タイプ}} = \sum_{n=1}^{n-1} p + \left(1 - \sum_{n=1}^{n-1} p \right) p_n \quad (14)$$

こうして、土石流流動モデルに粒径選別効果を取り入れ、さらに立体格子型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、立体格子型砂防ダムによる土石流堆積実験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。実験に用いた土砂材料を粒径で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、土石流のハイドロ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いて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過部の立体型閉塞モデルに代入して、試行回数 $N = 1000$ 、 $\Delta t = 0.02$ 秒の条件下で、式(12)と(13)によって、立体格子型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、河床面から最大粒径分の高さだけを不透過にして、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。

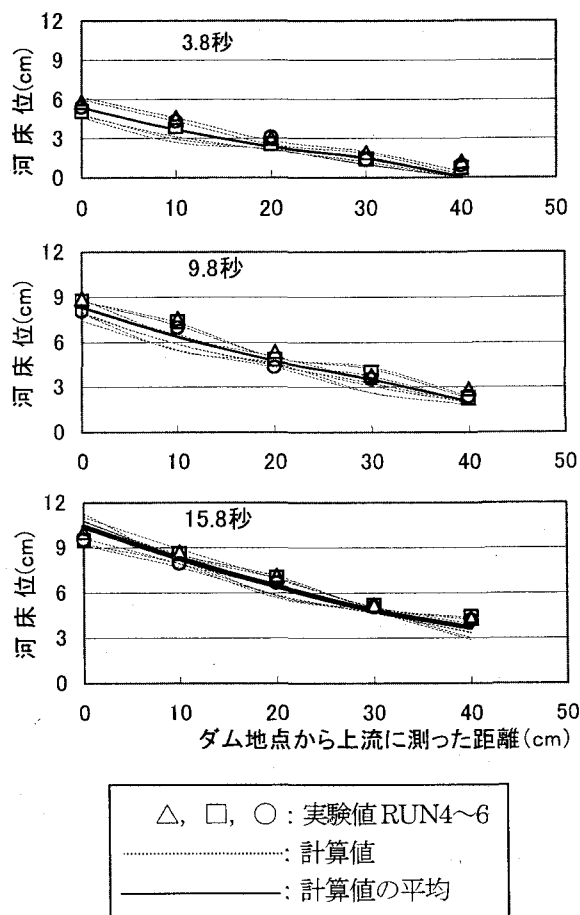


図-8 堆積河床位の実験値と計算値との比較

図-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、図-9、図-10、図-11はそれぞれ立体格子型砂防ダム模型下流端の流量、累積流出土砂量、土砂濃度について計算結果と実験結果を比較したものである。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。

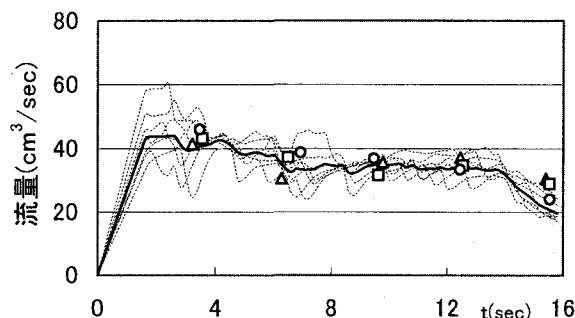


図-9 流量の実験値と計算値との比較

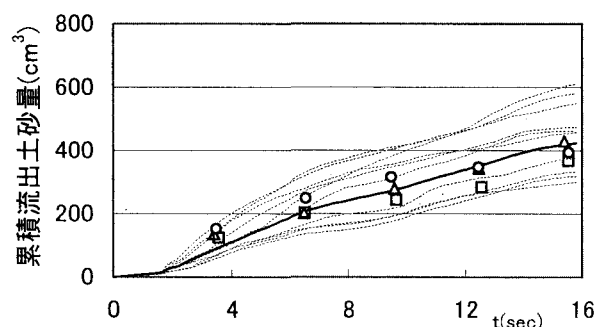


図-10 累積流出土砂量の実験値と計算値との比較

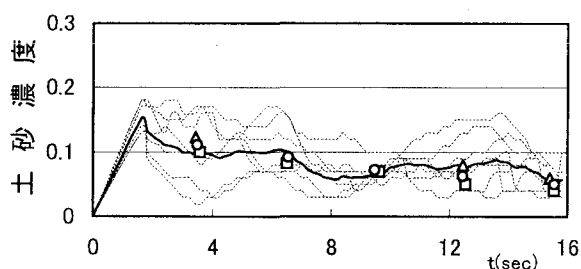


図-11 土砂濃度の実験値と計算値との比較

5. おわりに

本研究では、立体格子型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伴う土石流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、立体格子型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、土石流の流量、流砂量などの特性をダムがある場合と無い場合とで比較した。ついで、粒径選別効果を考慮した土石流捕捉モデルを開発し、本手法を用いて土石

流の発生、発達過程及び立体格子型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は以下のようである。

1. 立体格子型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立体格子型砂防ダム閉塞モデルを組み合わせたものである。
2. このモデルを用いて、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計算し、水路実験結果を概ね再現できることが確認できた。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 透過型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る。

参考文献

- 1) 高橋保：流砂系の総合的な土砂管理に向けて、河川，1998年11月号，pp. 3-7.
- 2) 芦田和男・高橋保：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. 433-441，1980.
- 3) 芦田和男・江頭進治・栗田三津雄・荒牧浩：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. 441-456，1987.
- 4) 水山高久・小橋澄治・水野秀明：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. 8-13，1995.
- 5) 水野秀明・水山高久・南哲行・倉岡千郎：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，p4-11，2000.
- 6) 高橋保・中川一・里深好文・王浩民：格子型砂防ダムの閉塞モデル，水工学論文集，第45巻，2001.
- 7) 高橋保・中川一・原田達夫：混合材料からなる渓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. 443-456，1990.
- 8) Takahashi, T., H. Nakagawa and S. Kuang : Estimation of Debris Flow Hydrograph on Varied Slope Bed, Proc. Corvallis Symp. On Erosion and Sedimentation in Pacific Rim, pp. 167-177, 1987.
- 9) Takahashi, T. : Debris Flow on Prismatic Open Channel, Jour. Hydraulic Div., ASCE Vol. 106 HY3, pp. 381-396, 1980.

(2001. 10. 1受付)