

砂防ダム群の土砂流出調節効果

SEDIMENT RUNOFF CONTROL BY A SERIES OF SABO DAMS

藤田正治¹・水山高久²・武蔵由育³

Masaharu FUJITA, Takahisa MIZUYAMA and Yoshiiku MUSASHI

¹正会員 工博 京都大学助教授 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

²正会員 農博 京都大学教授 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

³農修 株式会社八千代エンジニアリング (〒153-0061 東京都目黒区中目黒 1-10-21)

We have studied the function of a series of sabo dams on sediment runoff control using a numerical simulation method of one dimensional bed variation. A closed type dam, a vertical slit dam, and a horizontal slit dam are taken up as sabo dams and five dams of each type were placed at an interval of 400m in a river. First of all, the applicability of the simulation method to the sediment deposition process and the erosion process in the upstream reach of a dam was verified. Next, the bed variation was calculated for the riverbed of sediment mixture not covered by armor coat. The second to the fifth sabo dam was filled up with the sediment eroded in the reach between the dam and the upper dam while the upper dam was trapping the sediment. Therefore, they could not have a storage capacity enough to reduce the amount of runoff sediment. On the other hand, a series of sabo dams in the riverbed covered by armor coat could completely trap runoff sediment to be controlled.

Key Words : *sabo dams, sediment runoff, bed variation model, slit sabo dams, a series of sabo dams*

1. はじめに

一つの砂防ダムで十分な土砂流出調節ができないとき、通常複数の砂防ダムを設置する。この場合、砂防ダムの群としての土砂調節量が単独ダムの土砂調節量の足し合わせて評価することができるかが問題となるが、各ダムはその下流側の河床変動にも影響するので単純に結論付けることはできない¹⁾。さらに透過型と不透過型のダムが混在すると土砂流出過程はさらに複雑になり、それぞれの場合に対して模型実験や数値計算を行う必要があるが、基本的な事項として、砂防ダム群が設置された河道の洪水時の河床変動や河床材料の粒度分布の変化特性を知っておくことが重要であろう。

ダムからの土砂流出過程は流量、流入土砂量、土砂供給のタイミングなどに影響されるが、初期河床が十分粗粒化されているかどうかによっても異なる。とくに、砂防ダム群中の下流側のダムでは、上流側のダムからの土砂供給が遮断されている間、河床が侵食されるか、あるいはアーモアコートによって侵食が防止されるかによって土砂流出過程が異なるものと考えられる。

本研究の目的は、初期河床のアーモアコートの影響を見ながら、砂防ダム群の土砂流出調節効果を明らかにすることである。ここでは、砂防ダムの形態として不透過

型、鉛直スリット型および水平スリット型を取り上げる。ここに、水平スリット型とは堰堤の底面に川幅一杯のスリットをあけたもので、藤田・水山・武蔵²⁾が単独に設置したときの機能について検討している。本研究では、まずダム上流の堆砂・侵食過程を解析するための数値計算法の精度を非定常流に対して検証する。なお、定常流における堆砂過程の計算精度についてはすでに検証している²⁾。つぎに、各種の砂防ダムがそれぞれ5基連続して設置されている場の河床変動を計算し、その特性と土砂流出調節効果について上述の観点から考察する。

2. 計算方法

(1) 基礎式と数値計算法

山地河川の河床材料は混合砂で構成されているので、混合粒径に対する1次元河床変動計算法を用いる。基礎式は流れの連続式、運動方程式、全流砂の連続式、粒径別流砂の連続式からなる。砂防ダム上流では通常流れが射流から常流に遷移するので、数値計算法にはマッコーマック法を用いる。ただし、粒度分布の計算は後退差分のとき安定すること³⁾、マッコーマック法では人工粘性の導入により粒径別流砂の連続性が崩れることを考慮し

て、粒径別流砂の連続式のみ後退差分法で計算する。

幅 B の矩形断面水路を仮定すると、流れの連続式、運動方程式、全流砂の連続式は次のようになり、これらの式はマッコーマック法で解析される。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = C \quad (1)$$

式(1)中の U , E , C は次式で表される。

$$U = \begin{pmatrix} Bh \\ Q \\ z_B \end{pmatrix} \quad (2) \quad E = \begin{pmatrix} Q \\ gBh^2/2 + Q^2/(Bh) \\ q_T/(1-\lambda) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 \\ gBh(i_B - i_f) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここに、 x : 流れ方向の座標、 t : 時間、 h : 水深、 Q : 流量、 z_B : 河床位、 g : 重力加速度、 q_T : 全流砂量、 λ : 河床材料の空隙率、 i_B : 河床勾配、 i_f : エネルギー勾配である。エネルギー勾配はマンニングの抵抗則から求める。

全流砂量は掃流砂量と浮遊砂量の和として計算され、掃流砂量および浮遊砂量は河床材料の粒径範囲を n_s 個に分割し、代表粒径別に算定された掃流砂量 q_{Bi} および浮遊砂量 q_{Si} の和として計算される。

粒径別掃流砂量は次に示す芦田・道上式⁴⁾で計算する。

$$\frac{q_{Bi}}{u_* d_i f_i} = 17 \tau_{*i} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \right) \quad (5)$$

ここに、 d_i : 粒径階 i の代表粒径、 f_i : 河床材料中の砂礫 i の割合、 τ_{*i} : 砂礫 i の無次元掃流力、 τ_{*ci} : 砂礫 i の無次元限界掃流力、 u_* : 摩擦速度である。限界掃流力は Egiazaroff の式⁵⁾とその修正式⁴⁾から計算される。

浮遊砂量は Kalinske 型の濃度分布式と断面平均流速 v から次式で計算される。

$$q_{Si} = v C_{ai} \frac{h}{6Z} (1 - \exp(-6Z) \exp(6Za/h)) \quad (6)$$

$$\text{ただし、} \quad Z = w_{oi} / \beta \kappa u_* \quad (7)$$

ここに、 C_{ai} : $z=a(=0.05h)$ における濃度、 w_{oi} : 粒径階 i の砂礫の沈降速度、 κ : カルマン定数、 β : 拡散係数と渦動粘性係数の比であり、 $\kappa=0.4$, $\beta=1.2$ とする。浮遊砂基準点濃度は芦田・道上の式⁶⁾を用いて算定する。

粒径別流砂の連続式は流砂と河床材料の混合層を考えた以下のような平野のモデル⁷⁾を用いる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} \geq 0; \quad \frac{\partial f_i}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda)\delta} \frac{\partial q_{Ti}}{\partial x} - \frac{1}{\delta} \frac{\partial z_b}{\partial t} f_i \quad (8)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} \leq 0; \quad \frac{\partial f_i}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda)\delta} \frac{\partial q_{Ti}}{\partial x} - \frac{1}{\delta} \frac{\partial z_b}{\partial t} f_{oi} \quad (9)$$

ここに、 δ : 混合層の厚さ、 q_{Ti} : 粒径階 i の全流砂量、

f_{oi} : 混合層より下層の河床材料に占める粒径階 i の割合である。混合層の厚さは河床材料の最大粒径とする。

(2) 境界条件

複数の砂防ダムを含む区間を隣り合った砂防ダムに挟まれた小区間に分けて河床変動計算を行うため、上流境界は砂防ダム群の上流端またはダム直下流部、下流境界はダムの位置とする。上流境界条件としては、流量と粒径別流砂量が与えられる。下流境界では、ダム直上流部における水深と流砂の捕捉量が与えられる。

不透過型ダム直上流部の水深 h_s はダム地点で限界水深が得られるとすると、

$$Q = B\sqrt{g}(h_s - h_d)^{3/2} \quad (10)$$

である。ここに、 h_d : ダムの高さである。

鉛直スリットダムの堰上げ水深は次式で与えられる⁸⁾。

$$Q = \frac{2}{3} C_v n_v b \sqrt{2gh_s}^{3/2} \quad (11)$$

ここに、 n_v : スリットの個数、 b : スリット幅、 C_v : 流出係数である

水平スリットダムの堰上げ水深は次式のようなである²⁾。

$$Q = C_h B a \sqrt{2gh_s}^{1/2} \quad (12)$$

ここに、 a : スリットの高さ、 C_h : 流出係数である。ただし、流量が小さく堰上げが発生していない時には、初期河床勾配に対する等流水深とする。

ダムによる流砂の捕捉条件は、不透過型の場合、ダム直上流の堆積厚さがダムの高さを越えるまではダム地点に達した全流砂が捕捉され、越えた後は全て流出するものとする。透過型の場合はスリットに砂礫が捕捉されないものとする。ところで、マッコーマック法では堆砂先端付近の水面形の計算精度が十分でなく、堆砂先端部の高さが過大になるという欠点がある⁹⁾。これを改善するために、ここでは、ダム近傍のある区間で、不透過型の場合、流砂量が距離に比例して減少し、透過型の場合、流砂量は全て等しいものとする。

3. 非定常流に対する計算方法の適用性

(1) 実験の概要と計算条件

一定流量下の堆砂過程に対する本計算法の妥当性はすでに検証しているが²⁾、非定常流に対する堆砂過程や堆砂の侵食過程への適用性についてはまだ検証されていない。そこで、水平スリットおよび鉛直スリットダム上流の堆砂・侵食過程について実験を行い、そのシミュレーションを行うことによって本計算法の妥当性を検証する。

実験には長さ 4m、幅 15.5cm、勾配 0.05 の水路を用いた。水路床には 2cm の厚さで平均粒径 1.7mm、比重 2.65 の一様砂を敷き、水路下流端から 1m の地点に長さ 5cm、

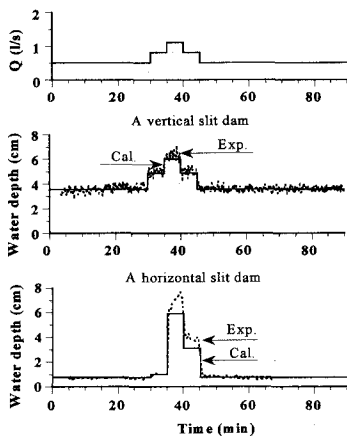


図-1 流量条件と堰上げ水深の変化

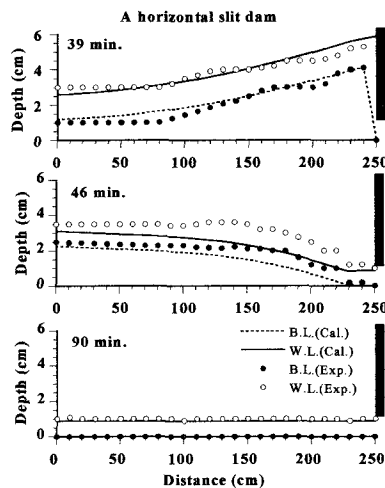


図-2 水平スリットダムの堆砂と侵食

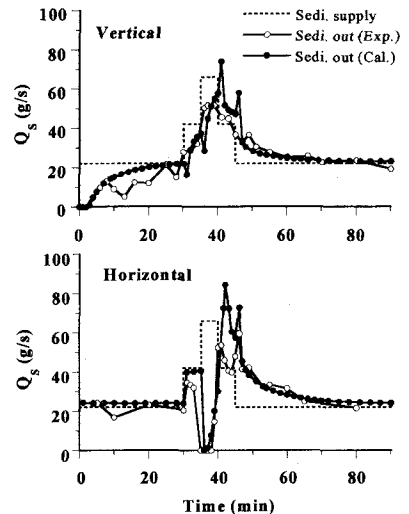


図-3 スリットダムからの土砂流出量

厚さ 2cm のアクリル板を置いて砂止めとした。水平スリットおよび鉛直スリットダムの模型はこのアクリル板の中央に設置した。ダムの厚さは 1cm で、鉛直スリットは幅 3.2cm で中央に一つ、また、水平スリットの高さは 1.1cm である。これらのスリット幅とスリット高は最大流量時の堰上げ水深が等しくなるように決められたものである。実験は図-1(上)に示すように流量を 5 段階に変化させて行い、給砂量は初期河床形状と各流量に対する平衡流砂量を実験的に求めて与えた。

計算では、マニングの粗度係数を 0.0225、 Δx を 5cm、 Δt を 0.002s、流量係数 C_d を 0.6、 C_v を 0.67 とした。マッコーマック法の人工粘性は拡散型の式で与え⁹⁾、その係数は流れと河床位の計算に対してそれぞれ 5 および 0.5 とした。また、2. (2) で述べたことを考慮して、下流端から 15cm で流砂量が等しいとした。

(2) 実験結果と計算結果

図-1(中、下)は堰上げ水深の計算値と実測値を比較したものである。水平スリットダムでは、鉛直スリットダムと違って最小流量のとき堰上げが生じていないこと、増水期と減水期で水深の変化過程が異なることが特徴的であり、計算結果はそれをよく表現している。

実験で得られた土砂の流出過程は以下のようなのである。水平スリットダムの場合は最大流量時まで堰上げが発生しないので、供給土砂はそのまま流出したが、堰上げが発生すると直ぐに流出土砂量は 0 となった。その後減水時の急激な低下背水に伴って堆砂が侵食され、最小流量時には再び堰上げが消滅するので河床は実験開始の状態に戻った。鉛直スリットダムの場合、実験開始とともに堰上げが発生し土砂が堆積した。最大流量までに堆砂がかなりダム近くまで進行しているの、最大流量時に水平スリットダムのように流出土砂量を 0 にすることはできない。その後、減水過程で堆砂が侵食されるが、最小流量になっても堰上げは消滅しないので十分時間が経過

しても堆砂が残された。

水平スリットダムの河床および水面形状の実験値と計算値を図-2 に示す。本計算結果は 39 分までの堆砂形状と最終的に全て侵食されるという実験結果をよく再現している。図-3 は鉛直および水平スリットダムからの流出土砂量の時間変化の実験値と計算値を示したもので、両者はほぼ適合している。しかし、図-3 より急激な水位低下直後の流出量が過大に評価されていることがわかる。その結果、図-2 に示す 46 分後の侵食形状に見られるように、計算では侵食が早く進んでいる。以上より、本計算の妥当性はある程度示されたと思われるが、急激な水位変化時の計算手法については改良する必要がある。

4. 砂防ダム群の土砂流出調節効果

(1) 概要

不透過型砂防ダム、鉛直および水平スリット砂防ダムをそれぞれ 5 基設置した場合について、ダムの上下流の河床変動を数値計算し、砂防ダム群の土砂流出調節効果について検討する。また、アーマーコートが発達した河道にダムが設置された場合を想定した計算も行う。

(2) 計算条件

計算条件は信濃川水系の二居川の河床形状および流量実績を参考にして設定する。すなわち、川幅は 25m、初期河床勾配は 0.05、河床の初期粒度分布は図-4 の S1 のようである。アーマーコートが発達した河床を初期条件とした計算では粒度分布 S2 を用いる。つぎに、流量ハイドログラフは、過去 10 年間の最大日平均流量が $17\text{m}^3/\text{s}$ であったので、この値を参考にして $5\sim 30\text{m}^3/\text{s}$ の範囲で図-5 のように設定する。後述の水平スリットダムで堰上げ発生の限界流量は $19\text{m}^3/\text{s}$ であるので、便宜上図-5 の前半の洪水を中小洪水、後半を大洪水と称する。初期河

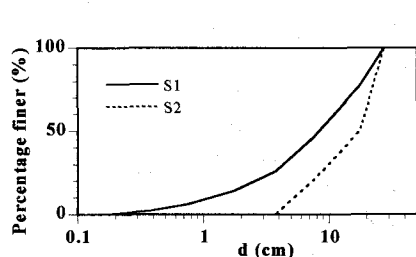


図-4 河床材料の粒度分布

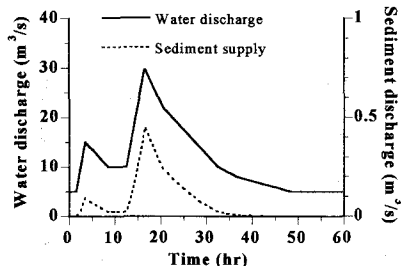


図-5 ハイドログラフと流入土砂量

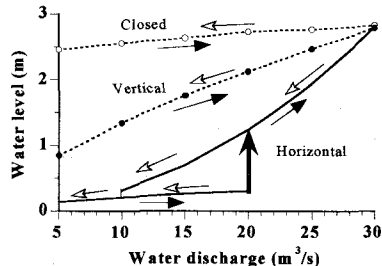


図-6 堰上げ水深と流量の関係

床の粒度分布が S2 の場合、中小洪水では無給砂の場合でも河床は侵食されない。給砂量には、河床粒度分布を S1 とし、上流端における初期河床形状および各時刻の流入流量から計算される平衡流砂量を与える。

ダム形態は不透過型、鉛直スリット型、水平スリット型とする。不透過型ダムの高さは 2.3m、水平スリットの高さは 0.3m、鉛直スリットの幅は 3.2m、個数は 1 つとし、400m ごとに同一形態の 5 基のダムを設置する。図-6 は $C_d=0.6$ 、 $C_v=0.67$ のときの流量と堰上げ水深の関係を示したもので、図-5 のピーク値に相当する流量のとき 3 種類のダムで堰上げ水深が同じになる。

マンニングの粗度係数は 0.04、人工粘性係数は流れと河床位の計算に対してそれぞれ 5 および 0.5、砂の比重は 2.65、 Δx は 4m、 Δt は 0.12s とした。また、2. (2) で述べた流砂量を補正する区間はダムから 16m までの範囲とした。なお、初期粒度分布 S1 に対する不透過型砂防ダム、鉛直スリットおよび水平スリットダムのケースを Case C、V、H、S2 に対するケースを Case C-ar、V-ar、H-ar と記す。

(3) 計算結果

Case C、V、H の計算結果を図-7～10 にまとめて示す。図-7 は流入土砂量と上流から 1, 3, 4, 5 番目のダムからの流出土砂量、図-8 は不透過型の 1, 2, 5 番目のダム上流の河床変動、図-9 はスリットダム群の 1, 5 番目のダム上流の河床変動、図-10 は 1 番目のダムの最終状態での河床平均粒径の縦断分布および不透過型の 5 番目のダムの河床平均粒径の縦断分布を示したものである。Case C-ar および H-ar の計算結果は図-11～13 に示す。図-11 は 1, 5 番目のダム上流の河床変動、図-12 は流入土砂量と上流から 1, 2, 3, 5 番目のダムからの流出土砂量、図-13 は不透過型の 1, 5 番目および水平スリット型の 5 番目のダムの河床平均粒径の縦断分布を示したものである。これらの図よりダム群の土砂流出調節効果を以下で考察する。

(4) 不透過型砂防ダム群の効果

まず、図-8 より、1 番目とそれ以降のダムにおける土砂貯留現象の相違が見出される。1 番目のダムでは上流域全体における堆砂によって流入土砂の一部が貯留され、満砂すると下流のダムへ土砂が供給される。それに対し 2

番目以降では、上流のダムに土砂供給が遮断される間に直上流ダム直下流域の侵食によってダムが満砂状態になっている。ここに土砂が流入すると、堆砂の凹形状の部分に土砂を堆積させ土砂をある程度貯留するものの、すでに満砂状態にあるためダムから流出する土砂量も多くなる。その結果、図-7(a) に示すように、砂防ダムからの流出流砂量は流入流砂量より小さく、砂防ダムの効果が認められるものの、3 番目以降ではあまり流出土砂量が減少しておらず、砂防ダム群としての効果が発揮されていない。洪水終了時で上流から 1～5 番目のダムの堆砂量はそれぞれ 5372, 2137, 1413, 995, 873m³ であり、下流のダムになるにしたがって貯留量が急減する。これらの合計は 10790m³ であり、砂防ダム群への流入土砂量約 14960m³ の 72% しか土砂を貯留していない。単独の砂防ダムの場合貯留量は 5732m³ となるので、ダムを連続して設置しても総貯留量は単独の場合の総和とはならないことがわかる。

ついで、河床の粒度分布変化について最下流のダムを対象にして考察する。図-10 の下図より、最下流のダム上流では 14 時間までは上流からの給砂がストップしたため粗粒化しているが、上流から細粒土砂が供給されると徐々に元河床の平均粒径に近づいていることがわかる。

(5) 透過型砂防ダム群の効果

図-7(b), (c) より、鉛直スリットおよび水平スリットダムでもピーク流砂量の減少が見られ、後者ではピーク流砂量の発生時刻がピーク流入流砂量の発生時刻より少し遅れている。しかし、2 番目以降では不透過型ダムの場合と同様に、流入してきた土砂は侵食部の埋め戻し等で多少堆積するものの、土砂流入が始まるまでに生じた堆砂が減水時に侵食されるため、ピーク流砂量の低減が見られず、砂防ダム群としての効果は発揮されていない。

鉛直スリットダムと水平スリットダムを比較すると、鉛直スリットダムの方が堆砂の侵食量が少ない。これは鉛直スリットの場合、最終状態でも堰上げしていることと、図-10 上図に示すように侵食に伴って堆砂前面が粗粒化するためである。したがって、水平スリットダムの方が洪水後半に排砂する能力が高い。また、水平スリットダムは中小洪水のときすべて土砂を排出しており、不必要な土砂の貯留は行われない。

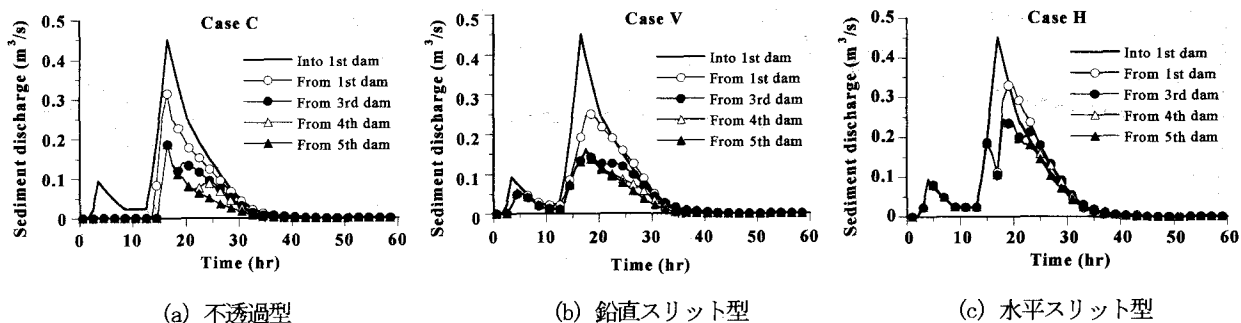


図-7 各ダム群の流出土砂量の時間変化

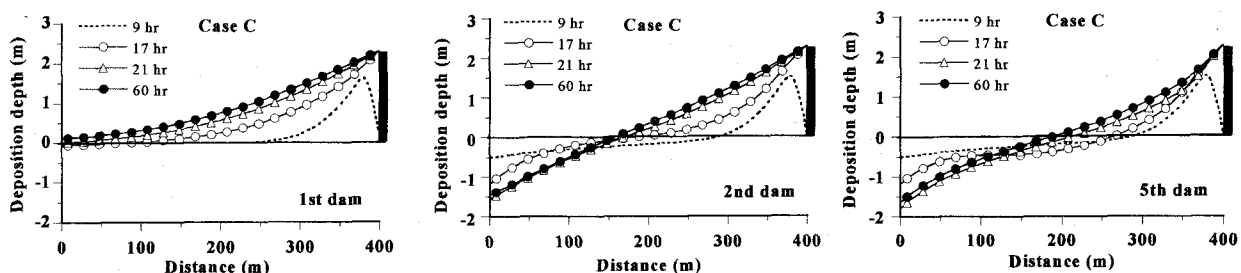


図-8 不透過型砂防ダム上流の河床変動

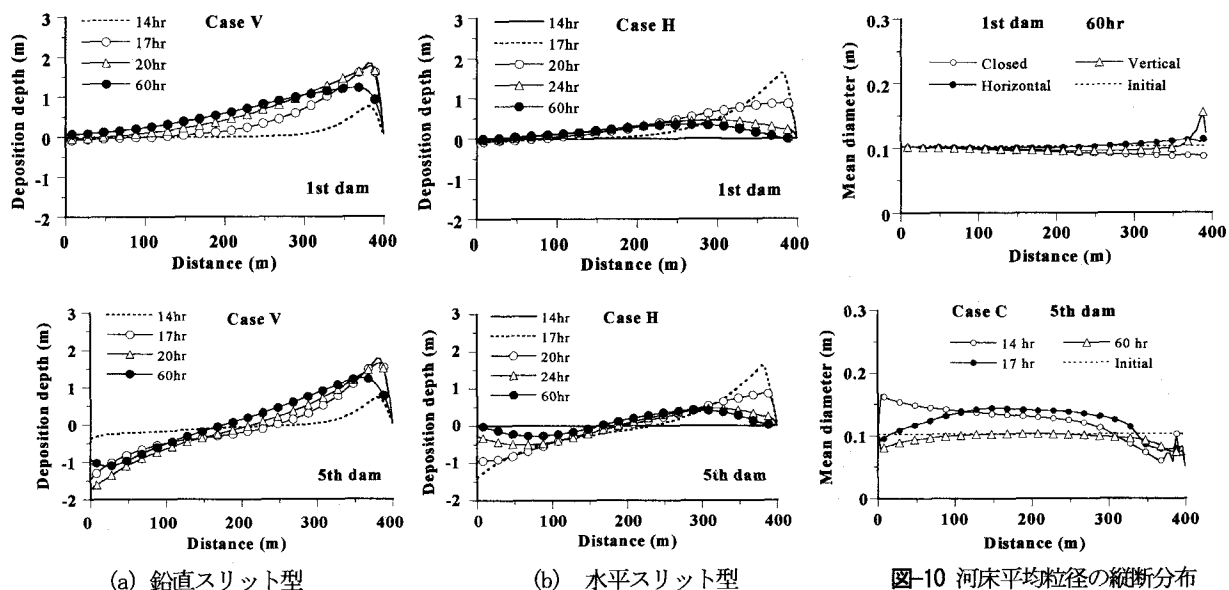


図-9 スリットダム上流の河床変動

図-10 河床平均粒径の縦断分布

(6) アーマーコートが発達した河床の場合

アーマーコートの発達した河道の場合、図-13(a)に示すように、最上流の不透過型砂防ダムでは土砂流入によって河床の粒度分布がS2からS1に変化する。それに伴って、図-11のように、Case Cに比べて河道に土砂が多く堆積し、堆砂の進行が遅くなる。最下流のダムでは図-13(b)に示すようにアーマーコートがさらに発達するため上流側の侵食が抑えられ、Case Cの場合は、17時間後には満砂しているのに、Case C-arでは満砂していない。このような河床の効果によって、図-12に示すように下流側のダムほど土砂流出量が減少している。結果的に1～4番目のダムにそれぞれ6521、4176、3184、1079m³の

堆砂があり、約14960m³の流入土砂はこれらのダムで全て捕捉され、砂防ダムの群としての機能が認められる。

水平スリットダムの場合、図-11、12および13(c)から次のようなことが考察される。すなわち、2番目以降のダムでは、直上流ダムの下流域が侵食されにくいので、流量ピーク時でもダム上流にわずかしき土砂が堆積しないので、ピーク流量後の土砂流出量は少ない。しかし、ピーク流量後に1番目のダムから流入してくる土砂がスリットを通過して流下するので、不透過型ほどピーク流出土砂量が減少していない。しかし、2番目以降のダムでは、アーマーコートが発達した河床の粒度分布が細粒化するのに伴って土砂が河道に堆積するので、下流のダムほど流出土砂量が小さくなっている。

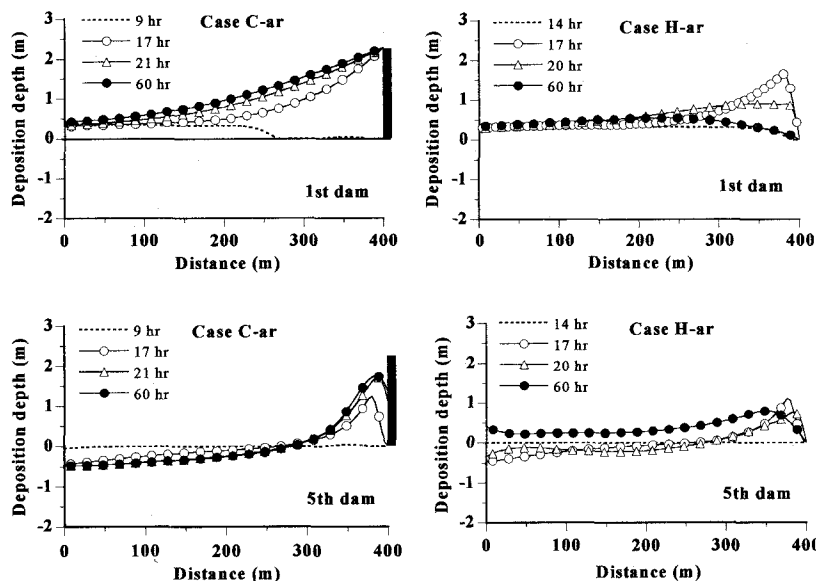


図-11 ダム上流の河床変動

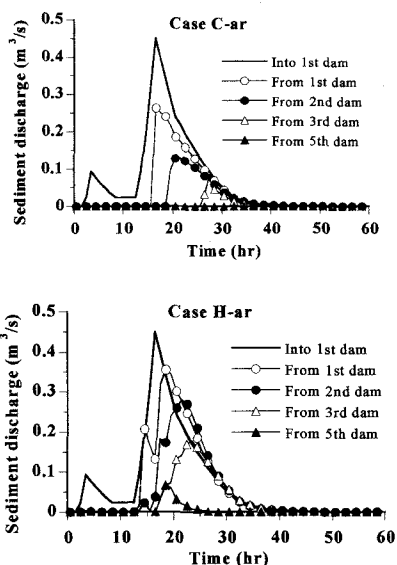


図-12 流出土砂量の時間変化

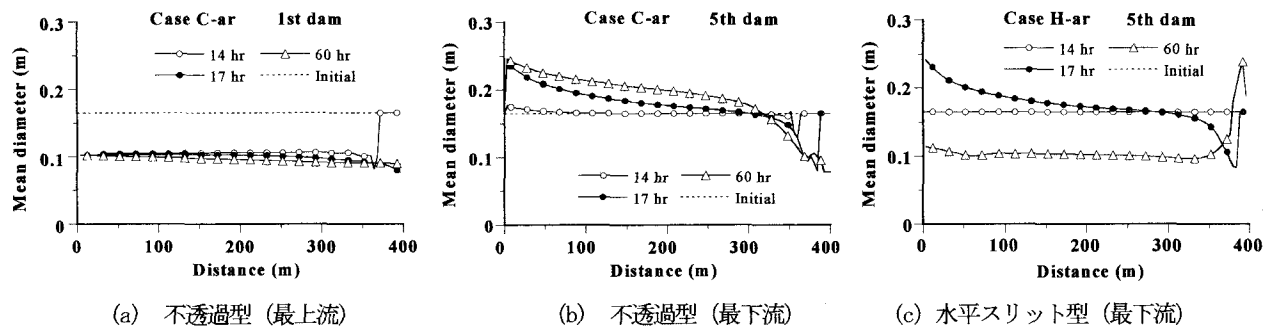


図-13 河床表面の平均粒径の縦断分布

5. おわりに

本研究は数値計算により砂防ダム群の土砂流出調節効果について検討したものである。得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) マッコーマック法を用いた鉛直スリットおよび水平スリットダム上流の河床変動計算法は非定常流の場合にも適用でき、堆砂過程と侵食過程がよく再現できた。
- (2) 不透過型砂防ダムを連続して設置しても土砂の貯留容量は下流ほど小さく、単独の砂防ダムの貯留量の足し合わせでダム群としての貯留量は評価できない。
- (3) 初期河床がアーモークで覆われている場合には、複数のダムの群としての機能が認められた。
- (4) 水平スリットダムの方が鉛直スリットダムより土砂を排出する能力が大きい。

参考文献

- 1) 大久保駿・水山高久・蒲正之・井戸清雄：連続するスリット砂防ダムの土砂調節効果，砂防学会誌，Vol. 50, No. 2, pp.

14-19, 1997.

- 2) 藤田正治・水山高久・武蔵由育：水平オープン型砂防ダムの機能，水工学論文集，第42巻，pp. 931-936, 1998.
- 3) 芦田和男・高橋保・道上正規：河川の土砂災害と対策，防災シリーズ5，森北出版，pp. 210-218, 1983.
- 4) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，第206号，pp. 59-69, 1972.
- 5) Egiazaroff, I.V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol. 91, Hy4, pp. 225-247, 1965.
- 6) 芦田和男・道上正規：浮遊砂に関する研究(1) -河床付近の濃度-, 京都大学防災研究所年報，第13号B, pp. 63-79, 1970.
- 7) 平野宗男：Armoring をともなう河床低下について，土木学会論文報告集，第195号，p. 55-65, 1971.
- 8) 水山高久・阿部宗平・矢島重美：スリット砂防ダムの流量係数と堆砂形状，新砂防，Vol. 42, No. 4, pp. 28-30, 1989.
- 9) 藤田正治：砂防ダムの堆砂計算法(その1)，砂防学会誌，Vol. 51, No. 1, pp. 72-77, 1998.

(2000. 10. 2 受付)