

水平オープン型砂防ダム機能

FUNCTIONS OF SABO DAMS WITH A HORIZONTAL SLIT

藤田正治¹・水山高久²・武蔵由育³

Masaharu FUJITA, Takahisa MIZUYAMA, 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 (〒606-01 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 (同上)

³京都大学修士学生 大学院農学研究科森林科学専攻 (同上)

An open type of sabo dams such as slit dams has been developed for the more effective sediment control works and the active sediment supply to the downstream reach. So far, many sabo dams with vertical slits have already constructed. In this paper, sabo dams with a horizontal slit on the bottom is taken up as a new type of slit dams and the effect of the horizontal-slit dam on controlling sediment run off is studied with an experiment and the numerical simulation. The distinctive point of this type is that the dam does not work at all until the water level just upstream of the dam is over the slit height. This means that the horizontal-slit dam can store the sediment only at a high sediment discharge to be necessarily controlled. Some case studies on the sediment run off have explained such an effective function of the dam on the sediment control.

Key Words : *sabo dam, slit dam, open type of sabo dams, sediment control works, sediment run off, bed load*

1. はじめに

砂防ダムは、土砂の貯留により土砂流出のピーク時刻を遅らせ、ピーク流砂量を減少させることを目的の一つとするもので、不透過型と透過型（オープン型）に分類される。不透過型では満砂すると土砂の調節容量は減少するが、透過型では土砂の流出を積極的に許すので、堆砂してもその後の中小洪水でほとんどの土砂を流下させることができれば、大洪水の時いつでも土砂調節容量を確保することができる。また、透過型では、山地での生産土砂を下流へ供給することができるので、河床低下や海岸侵食と関連した流域の土砂管理の問題にも対応できるし、魚類等の水生生物の通過も可能にするというメリットもある。このような背景から透過型砂防ダムの有効性が指摘され、スリットダムや堰堤に暗渠を設けたものが多く設置されるようになってきている。

本研究で取り上げた水平オープン型砂防ダムも透過型砂防ダムの一つとして考えられているもので、図-1に示すように砂防ダムの底面に水平にスリット

を設けたものである。その特徴は、中小洪水時水位がスリット高より低いときは堰上げが生じないので土砂が堆積しないが、大洪水時に水位がスリット高を超えると堆砂が生じることであり、この点が従来の鉛直方向のスリットをもつ砂防ダムと異なる。すなわち、危険な土砂流出が生じるような大洪水のときだけ機能し、その他のときはダムがない状態と等しくなり、治水上効率的であると同時に河川へのインパクトを少なくできる点で優れていると考えられる。本研究では、水平オープン型砂防ダムの水理学

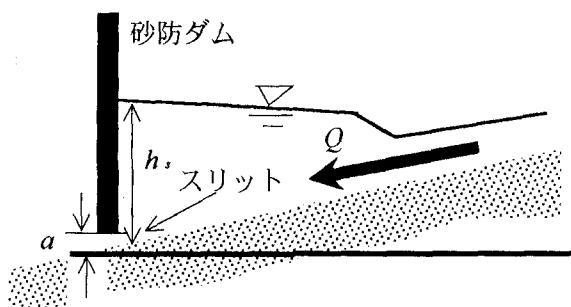


図-1 水平オープン型砂防ダム

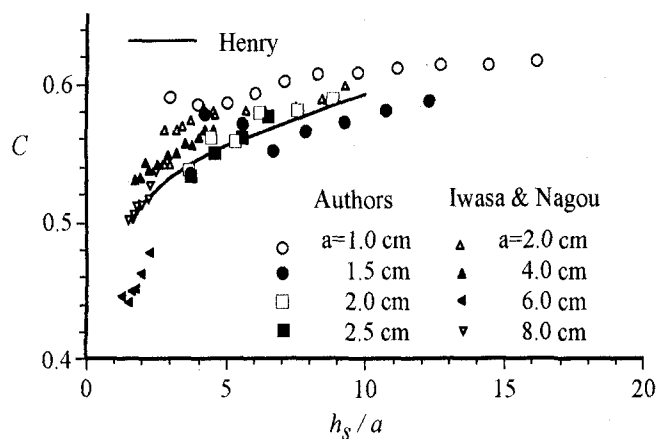


図-2 流量係数と h_s/a の関係

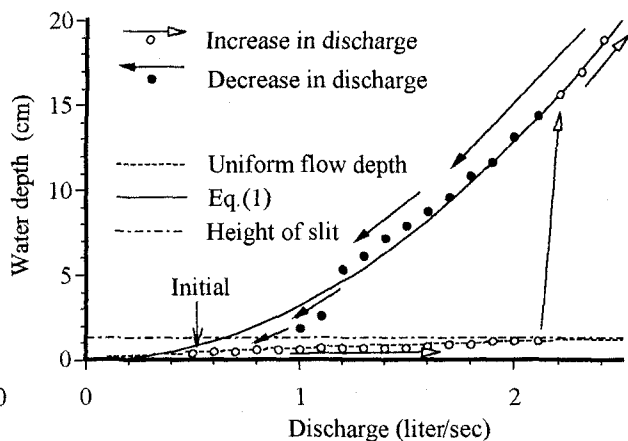


図-3 水位流量曲線

的特性と土砂調節機能を実験と数値シミュレーションによって解析し、その機能と有効性を明らかにするものである。

2. 実験

(1) 実験の概要

砂防ダム上流の堆砂形状は堰上げ水深に支配される。そこで、堰上げ水深および流量変化に伴う堰直上流の水位の変化に関する実験を行うとともに、堆砂の実験も実施した。実験水路は幅15.5cm、長さ5m、勾配0.05の矩形断面水路で、下流から1mの地点に厚さ1cmの亚克力板で造られた堰が水路床との間にわずかな隙間をあけて、スルースゲートのように設置されている。堰の縦断面の底面形状は矩形であり、とくに刃形に整形していない。

(2) 流量係数

堰上げ水深（堰直上流の水深）は堆砂形状を決定する重要なパラメータの一つである。流量が堰上げが生じるのに十分大きいとき、堰上げ水深 h_s と流量 Q の関係はスルースゲートの公式を適用すると、式(1)のように表わされる¹⁾。

$$Q = CaB\sqrt{2gh_s} \quad (1)$$

ここに、 C ：流量係数、 a ：スリット高、 B ：水路幅、 g ：重力加速度である。したがって、流量係数 C がわかれば流量に対して水深が決定される。 C は h_s/a をパラメータとして求められているが¹⁾、本実験でも Q と a を変えて C を求めると図-2のようになった。図中にはHenryの実験曲線と岩佐・名合の刃型リップのゲートを使った実験結果¹⁾も示されている。図-2のように、 C はばらつきがあるものの

h_s/a の関数となっている。

(3) 水位流量曲線

実験水路において流量が0から徐々に増加する場合を考えると、最初は堰に影響されることがなく流水は等流状態で堰を通過するが、等流水深がスリット高を超えると式(1)で求められるような水深の堰上げが発生する。次にこの状態から流量が減少するとき、堰上げ水深がスリットの高さ以下になるまでは堰上げの状態が続くものと考えられる。そこで、スリット高を1.35cmとして、流量を0.5 l/sから2.5 l/sまで増加させ、その後0.5 l/sに減少させたときの堰直上流の水深を測定した。その時の水位流量曲線を示したのが図-3である。図中にはマンニングの粗度係数を0.01としたときの等流水深と $C=0.6$ としたときの式(1)も示している。

図-3より増水時と減水時で水位流量曲線が異なることがわかる。すなわち、増水過程では、式(1)で堰上げ水深がスリット高を越えるような流量になっても、等流水深がスリット高より低いうちは堰上げが生じない。しかし、一旦堰上がると堰上げが発生し始めた流量に減水しても等流状態に戻らない。このことは水平オープン型砂防ダムの土砂調節機能の特徴を決める重要なポイントの一つである。すなわち、堰上げが生じる限界の流量を適切に設定すれば、危険な土砂流出が発生するまでの洪水初期には土砂を通過させ、限界値を越え危険な状態になり一旦堰上がると十分減水するまで堰上げが維持され、土砂をできるだけ長く貯留することができる。

(4) 堆砂過程

堆砂の実験はスリット高を変えて2ケース行った。Run 1, 2ともに粒径2.2mmの砂を2cmの厚さで一様に敷いて、流量1.5 l/s、給砂量29.5 cm³/s

の条件で行った。Run 1ではスリット高1.3cm, Run 2では1.7cmである。給砂量は初期河床勾配に対する等流での平衡流砂量である。Run 1の水路床からの水面と河床面の高さの時間変化の一例を図-4に示す。初期の水面形では跳水が生じている。堆砂の進行につれて堰上げ水深が少し増加しているが、これはスリットが閉塞したためではなく、スリットへ向かう流れに起因する堰付近の渦が堆砂の進行に伴って強くなったためと考えられる。10分後デルタは堰に到達しており、その後デルタは先端の高さを一定に維持しつつ背砂が進行している。30分後には、流出土砂量は流入土砂量とほぼ一致しており、平衡状態に達した。

3. シミュレーション

(1) 基礎式と計算方法

ここでは、一様幅Bの矩形断面水路における一様砂に対する一次元堆砂計算を行う。基礎式は、流れの連続式、運動量の保存則、流砂の連続式からなり、それらを保存形式で表わすと次のようである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = C \quad (2)$$

ただし、

$$U = \left(\frac{Bh}{Q} \right) \quad (3)$$

$$E = \left(\frac{gBh^2/2 + Q^2/(Bh)}{q_B/(1-\lambda)} \right) \quad (4)$$

$$C = \left(\frac{0}{gBh(i_B - i_f)} \right) \quad (5)$$

ここに、 h ：水深、 Q ：流量、 z_B ：河床位、 g ：重力加速度、 q_B ：掃流砂量、 λ ：河床砂の空隙率、 i_B ：河床勾配、 i_f ：エネルギー勾配である。

掃流砂量式には次式の芦田・道上式²⁾を用いる。

$$\frac{q_B}{u_* d} = 17 \tau_* \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (6)$$

ここに、 u_* ：摩擦速度、 d ：粒径、 τ_* ：無次元掃流力、 τ_{*c} ：無次元移動限界掃流力である。

エネルギー勾配はマンニングの式を用いると次式のようである。

$$i_f = \frac{n^2 Q^2}{B^2 h^{10/3}} \quad (7)$$

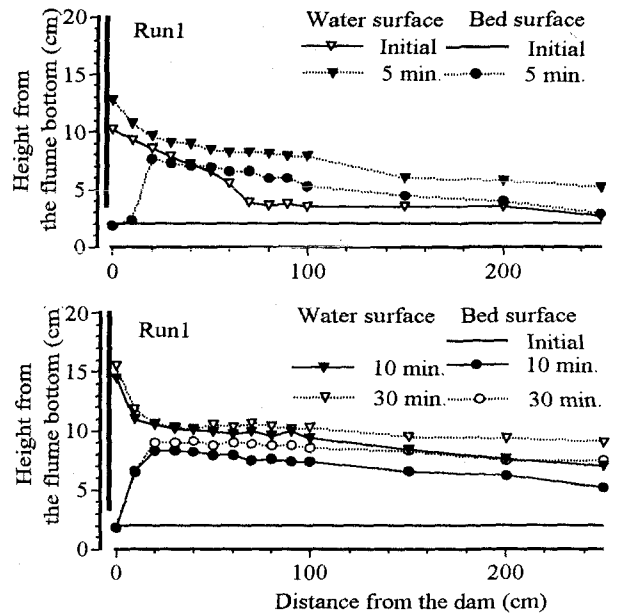


図-4 堆砂過程の実験結果

ここに、 n ：マンニングの粗度係数である。

砂防ダムが設置されるような急勾配河道では、常射混在流れが発生する場合が多いので、計算にはMacCormack法を用いるのが便利である³⁾。MacCormack法では、式(2)を予測子段階と修正子段階の2段階で差分計算するもので、各々の差分式は次式に示すとおりである。

予測子：

$$\overline{U}_l = U_l^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ E_{l+1}^n - E_l^n + (D_{l+1}^n - D_l^n) \right\} + \Delta t C_l^n \quad (8)$$

修正子：

$$U_l^{n+1} = \frac{1}{2} (U_l^n + \overline{U}_l) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left\{ \overline{E}_l - \overline{E}_{l-1} - (\overline{D}_l - \overline{D}_{l-1}) \right\} + \frac{\Delta t}{2} \overline{C}_l \quad (9)$$

ここに、 l, n ：場所と時間の差分格子点、 $\Delta x, \Delta t$ ：差分距離間隔および時間間隔、 D ：人工粘性項である。人工粘性には次式の拡散型の式⁴⁾を用いる。

$$D_l^n = Ku_* h_l \left(U_{l+1}^n - 2U_l^n + U_{l-1}^n \right) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) \quad (10)$$

ここに、 K ：人工粘性係数である。

人工粘性係数は次式のようであるが、

$$K = \begin{pmatrix} k_v & 0 & 0 \\ 0 & k_v & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix} \quad (11)$$

この決め方は従来の研究を参考されたい³⁾。

(2) 境界条件

境界条件は、流水については堰直上流で水位、上流端で流量を与える。堰直上流の水位は、堆砂の進行に伴う堰周辺の流れの構造の変化によって多少増加する傾向が見られた。しかし、ここではとくにそのことは考慮せず、堰上げ水深は、スリットの閉塞はないものとして式(1)と図-2から求められるものとする。

流砂については上流端で給砂量を与え、下流端でスリットからの流出条件を設定する。給砂量は山地河川では必ずしも流量と関係しないが、ここでは、初期河床の等流状態における平衡流砂量を与える。下流端では、スリット高は砂の粒径に比べて十分大きくかつ流速も大きく堆積が生じないものとする。すなわち、堰の地点の流砂量は直上流断面の流砂量と同じとし、河床は固定とする。

ところで、図-4の河床が平衡状態になった30分後の水面形において、堆砂前面の水深は下流方向に増加している。このような状態を上述のような流砂条件で堆砂計算すると、堆砂はさらに高く発達する。これはスリットへの流れを考慮していないため、1次元解析で求められる堆砂前面の流砂量が実際より小さくなるため、このことは1次元解析の限界とも言える。そこでここでは便宜的な仮定をする。すなわち、スリットの影響は堰から堰上げ水深の数倍の範囲とし、そこでは流砂量が等しくなるものとした。次に述べるシミュレーション結果から、ここではその範囲を3倍とするが、この一般性については2次元解析によって検討する必要がある。

(3) 実験のシミュレーション

前述の堆砂実験のシミュレーションを行う。ただし、人工粘性係数 k_v は5、 k_s は0.5、砂の比重は2.65、マンニングの粗度係数は0.015、 Δx は10cm、 Δt は0.002sec、流量係数Cは図-2を参考にしてRun 1で0.6、Run 2で0.55とした。

図-5はRun 2の場合の堆砂形状の変化の実験値と計算値を示したもので、初期と最終結果には水面形も描かれている。計算値は実験値を良く再現している。前項で示した流砂の境界条件に従い、下流から2断面まで流砂量を等しくしたのに下流から1断面目の河床が変化しているのは、人工粘性項の影響である。図-6はRun 1と2の堰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ある。給砂量も示されている。流出土砂量が徐々に増加し平衡状態に近づくようすが再現できている。以上の様に、本計算手法によって水平オープン型砂防ダムの堆砂過程が精度良く計算できる。

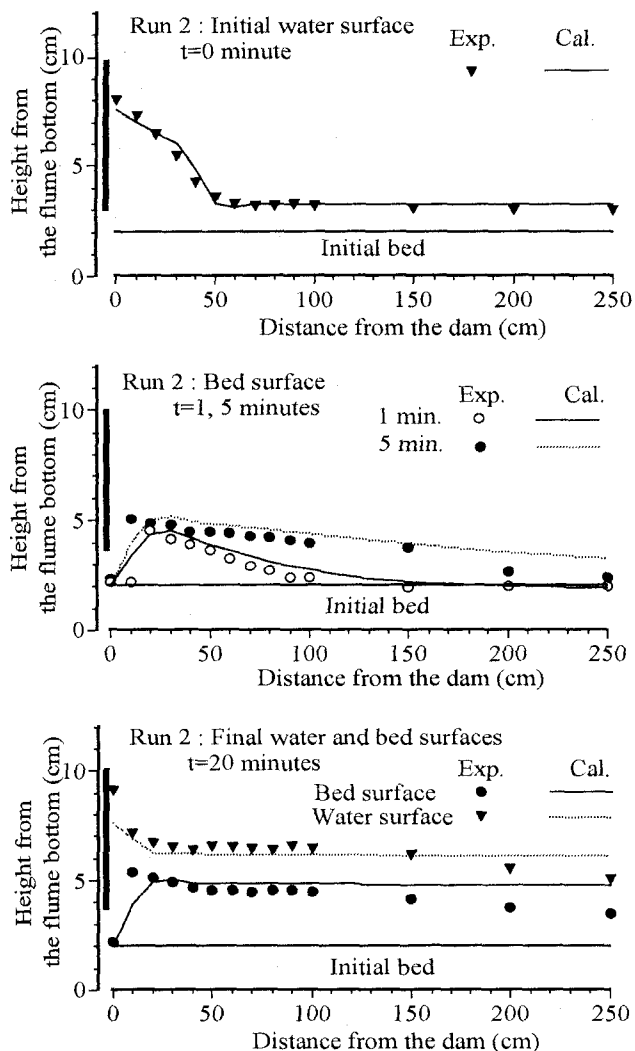


図-5 堆砂形状と水面形状の実験値と計算値

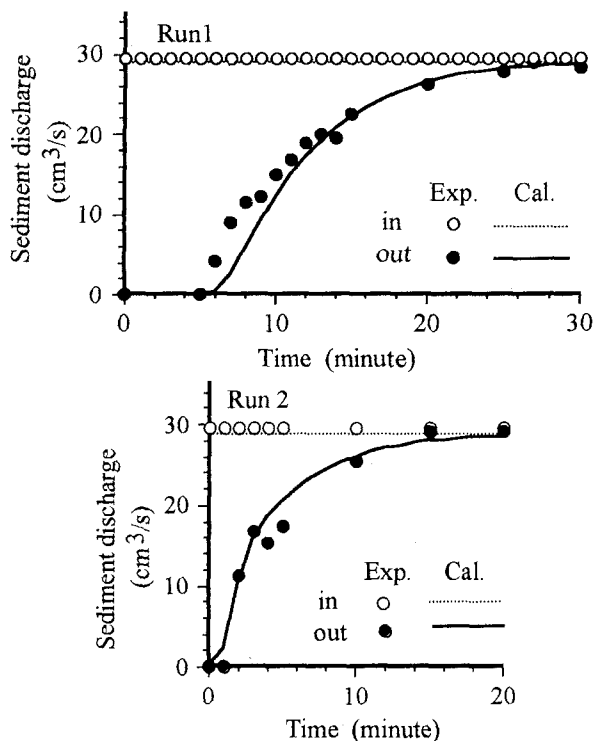


図-6 流出土砂量の変化の実験値と計算値

4. 土砂流出調節効果

(1) 計算条件

ここでは、水平型オープン砂防ダムの土砂調節効果についてできるだけ実河川に近い条件で例示的に検討する。計算に用いた河道は勾配0.05、川幅25m、長さ250mで、河床の平均粒径は10cmである。流量の設定は、このような河道の条件と同程度の信濃川水系の二居川で、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⁵⁾、この値を参考にして5から $30\text{m}^3/\text{s}$ の間で設定した。スリット高は30cmとした。その他、マンニングの粗度係数は0.04、人工粘性係数 k_v は5、 k_s は0.5、砂の比重は2.65、 Δx は5m、 Δt は0.072sec、流量係数 C は図-2を参考にして0.54とした。流量係数は h_s/a の関数となるので一定値ではないが、本計算では h_s/a が10以下であるので、そのときの平均的な値を用いた。また、下流端の流砂の境界条件は堰上げ水深が最大3m程度であるので、下流端から2断面目の範囲でスリットの吸引の影響があるものとして、それらの断面で流砂量を等しくした。

(2) 水位流量曲線

スリット高が0.3mのとき水位流量曲線は図-7のようになり、 $19\text{m}^3/\text{s}$ を超えると堰上げが生じる。したがって、流量が増加して $19\text{m}^3/\text{s}$ までは等流状態で流れ、それを越えると急激に水位が増加する。減水過程では堰上げ水深がスリット高より小さくなる $9.5\text{m}^3/\text{s}$ になるまで堰上げが継続し、流量がそれ以下になると初期河床勾配に対する等流水深になるものとする。ここでは、 $19\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量を含むような洪水を大洪水、含まないものを中小洪水と呼ぶことにする。

(3) 計算結果

ハイドログラフを図-8に示すように3ケース設定した。ケース1は中小洪水、2は大洪水の後に中小洪水、ケース3は中小洪水の後に大洪水が起こる場合を想定している。

図-8(a)にケース1の場合の流出土砂量の時間変化を示す。この場合、堰上げは発生しないので、流入土砂量の時間変化と流出土砂の時間変化は一致している。したがって、このような中小洪水の時にはこの砂防ダムは何ら河道に影響を与えない。

ケース2の場合の流出土砂量の時間変化を図-8(b)に、河床形状の変化を図-9に示す。流入土砂量と流出土砂量を比べると、28時間までの大洪水の

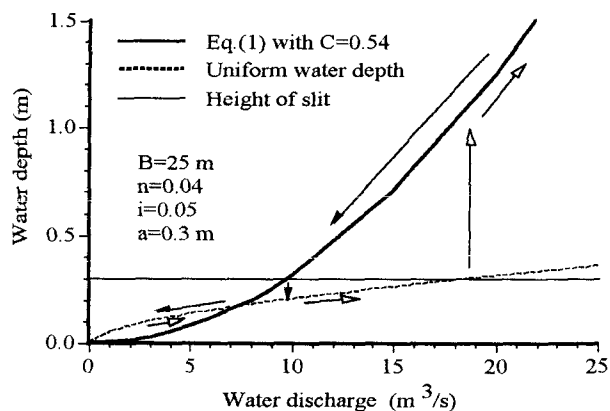


図-7 計算に用いた河道の水位流量曲線

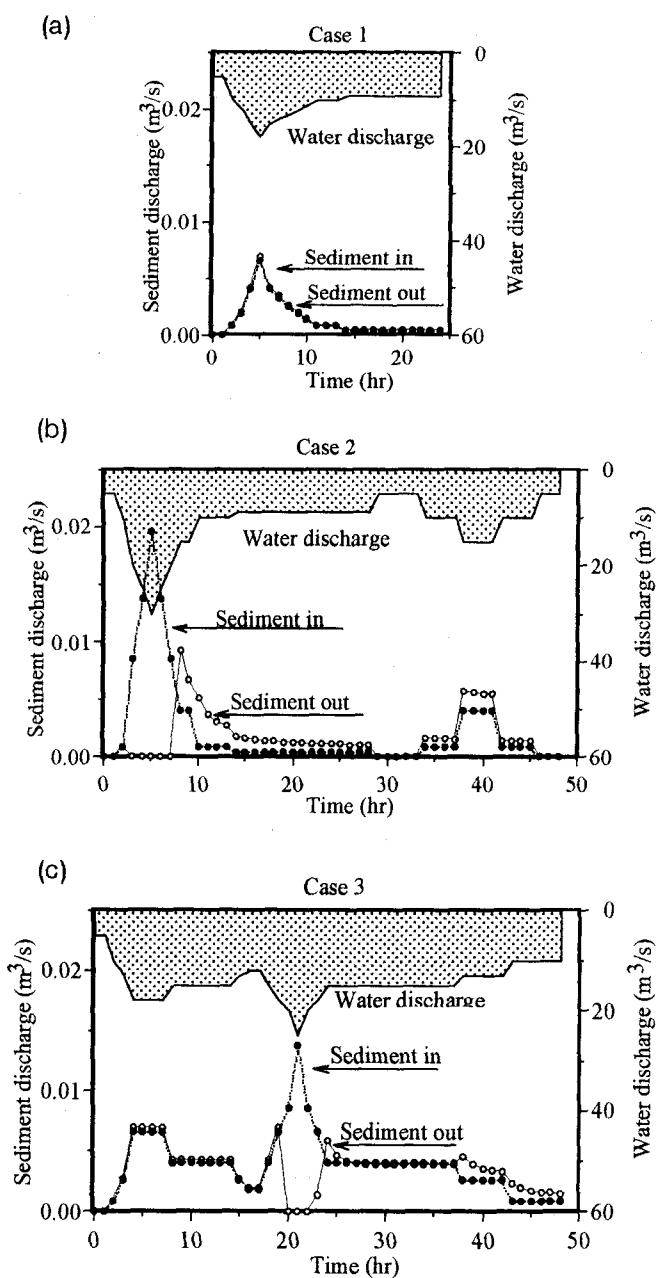


図-8 流出土砂量の時間変化

とき、砂防ダムによって流出土砂量のピーク時刻の遅延とピーク流砂量の減少が見られ、土砂流出調節効果が見られる。さらに、34時間からの中小洪水で堆砂が侵食されて流出している。図-9の堆砂形状の変化を見ると、ピーク流量の発生する5時間まで堰上げ水深の増加によって堆砂が高く成長すると同時に上流に拡がっている。ピーク流量を過ぎた7時間目まで堆積は進み、その後流量の低下に伴う堰上げ水深の減少で堆砂が侵食されている。さらに、流量が減少して堰上げがなくなると一層侵食は進むが、28時間後流量が $5\text{m}^3/\text{s}$ になって流砂が全区間でなくなると上流に堆積を残したまま侵食は終了した。さらに34時間後の中小洪水で徐々に堆砂が再侵食されており、このような洪水が継続すれば河床は初期状態に戻る。

ケース3の場合の流入土砂量と流出土砂量の関係を図-8(c)に示す。17時間までの中洪水では堰上げが生じないので、全て土砂が流出しているが、その後の大洪水になって堰上げによる堆砂によって土砂流出が急になくなっている。さらに、 $15\text{m}^3/\text{s}$ に減水すると堆砂は侵食されるが、堰上げの効果が続くので、堰上げがない場合と比べてそれ程侵食されることはなく、給砂の分だけ土砂が流出する結果になった。

5. おわりに

以上、水平オープン型砂防ダムの機能について検討した。実用上は、スリット周辺の流れや河床変動の制御などの問題点が残されているが、土砂流出調節効果は十分期待できることがわかった。以下に、主な結果を要約する。

- (1) 堰上げ水深と流量の関係は流量増加時と減少時で異なる。すなわち、堰の公式で堰上げ水深とスリットの高さが等しくなる流量から等流水深がスリットの高さになる流量までは、同じ流量に対して2つの水位が考えられる。
- (2) (1)のような特性のため堰上げが生じないような洪水、または大洪水でも堰上げが生じるまでの間は、砂防ダムは何ら機能を発揮しないが、一旦堰上げが生じるようになると流量がかなり減少するまで機能が継続し、土砂を長く貯留することができる。
- (3) 実河川を想定して、土砂の流出調節効果を検討した。流出土砂量のピークの時刻を遅延させ、ピーク量を減少させる効果が確認された。

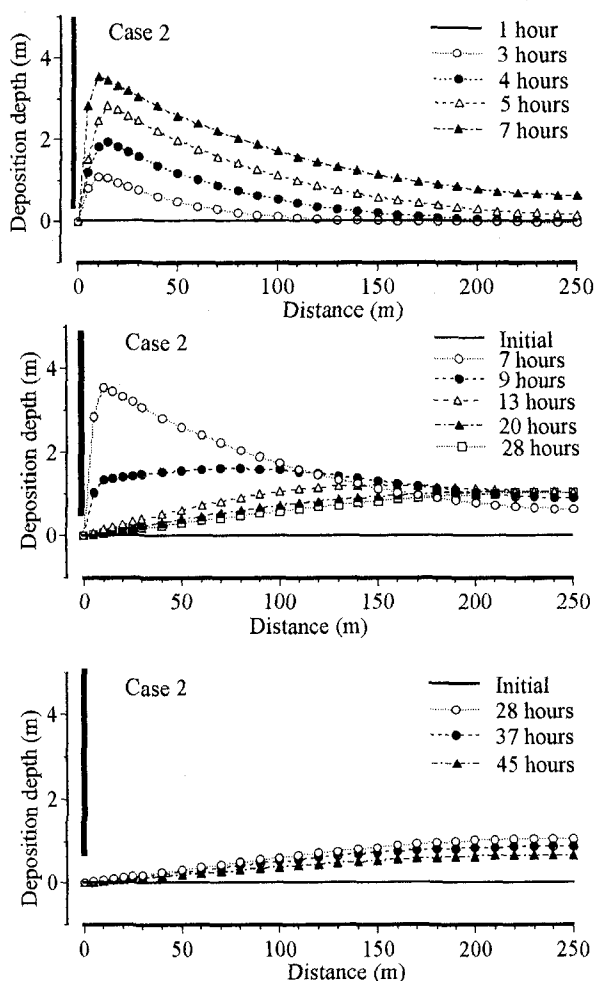


図-9 堆砂形状の変化

- (4) さらに詳細な検討のためには堰周辺の流れの2次元性を解析する必要がある。

参考文献

- 1) 水理公式集, 土木学会編p.276, 1973.
- 2) 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.
- 3) 日下部重幸, 道上正規, 藤田正治, 檜谷治, 宮本邦明: マッコー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, pp. 977-982, 1996.
- 4) 岡部健士, 天羽誠二, 石垣昌邦: 常・射流の遷移を伴う不等流の数値計算法について, 水工学論文集, 第36巻, pp.337-342, 1992.
- 5) 飯田猛行: 流路工の長期河床変動予測と床固めの配置計画, 京都大学修士論文, pp.19-22, 1996.

(1997.9.30受付)