

ダム堆砂の排除に関する研究(2)

—スリットダムの水理機能—

芦田和男・澤井健二

REMOVAL OF RESERVOIR SEDIMENTATION (2)

—SLIT DAM—

By Kazuo ASHIDA and Kenji SAWAI

Synopsis

When we set a slit dam at the upper end of a reservoir, the bed load deposits forming a delta. Although the suspended load also deposits downstream of the delta, it is carried away through the slit under some condition.

In this study, the flow and sedimentation near a slit dam are analysed by means of one dimensional method.

When the control section appears at the dam, the specific energy corresponding to a given discharge is calculated from the critical depth, but the coefficient for the pressure head is less than unity and decided by some experiments.

1. 緒 論

ダム堆砂は、貯水池機能の低下、背砂による洪水位の上昇、ダム下流域の河床低下さらには海岸侵食などをひきおこすやっかいな問題であって、その防止軽減法に関して現在各方面で研究が進められている。

考える防止軽減法は、対象地点が貯水池のどの位置にあるかにより若干異なる。1) 貯水池上流または末端付近では、貯水池への流入土砂の防止軽減が基本的な考えとなり、2) 貯水池内では、流水によりできるだけ下流へ輸送すること、それが困難なものについては浚渫等による人工的排除が眼目となり、3) ダム近傍では排砂管やゲートによりできるだけ下流へ排出することが重要であり、それぞれに適した工法の開発やその機能の究明が進められている。また、一方ではそれらを総合した排砂システムの検討も進められている。以上のうち、1) の区域で行いうる主な手法は、

- a) スリットダムやスクリーンダムのような透過性の構造物
- b) 砂防ダム
- c) 渦動排砂管(スリット管)

であろう。

a) と b) はともに貯砂による貯水池への流入土砂量の軽減を目的としているが、a) では流砂を分級堆積させて、貯水池への流入土砂の細粒化をはかり、排砂効率の向上を旨としているのに対して、b) では分級堆積を積極的に意図しない所に大きな相異がある。いずれの方法も、ダムが満砂するまでの容量だけでは、その効果に限度があるので、一般には、その堆砂を掘削排除して、堆砂機能を繰り返し使用する。したがって、掘削とその土砂を処理するシステムが同時に考えられなければならない。

c) は、これらと異なり、流水の作用により流砂を排除するもので、その水理機能については前報¹⁾で述べたように、適切な条件のもとでは細砂等の排除に対しては有力な方法であろう。

上記の方法は、実際には組み合わせて用いることが予想される。例えば、スリットダムと渦動排砂管を組み合せ、前者によって流砂を分級し、後者の機能を向上させることなどが考えられる。また、間隔の異なるスリットダムを流下方向に配置して、流木や大れき等から小れきに至るまで順次流下方向に篩分けることも考えられる。

これらの議論を行う上では、スリットダムの分級効果や堆砂形状を定量的に算定することが必要であるが、これらについて現在必ずしも十分わかっていることは言えない。

そこで、本論では、スリットダムの水理機能とくに、その分級効果や堆砂形状の算定法について考察を行い、実験によりその妥当性を検証する。また、スリットダムはどのような場所に適用して効果を発揮するかなどについても考察を行う。

2. スリットダムの機能と目的

スリットダムは、緒論でも述べたように、貯水池上流に設けて流入土砂を軽減する手法の1つである。その目的は、ある粒径以上のれきの流下を遮断して、流下砂れきの粒径の篩分け選別を行い、排砂を容易にすることにある。例えば Fig. 1 に示すように、上流にスリットダムを設け、ここで、スリット幅 d_s より大きい粒径を遮断し、下流には $d < d_s$ の粒径のものを流下させて、渦動排砂管での排砂を容易にすることが考えられる。

スリットダムの水理機能として次の事が考えられる。

1) スリットダムのような透過性のせきは普通の砂防ダムのような不透透せきと比べて、同じ摩擦速度で貯砂容量を大きくすることができる。

一般に、堆砂の粒径範囲は摩擦速度によって支配されるので、その値は重要である。同一の摩擦速度に対する透過せきのせき高は、不透透せきのそれより高く、その分だけ貯砂容量を大きく取れる。さらに、スリット部から細粒分を通過させるので、満砂までの有効容量は大きくなる。

2) スリットダムは、上流から浮流形式で流下しダムのせき上げ領域にきて堆積して掃流形式に移行する成分をスリットを通して流下させることにより、粒径の分級を行う。

一般に、流砂には掃流形式と浮流形式とがあるが、前者に対しては、全粒子が移動するような掃流力の範囲では、砂れきはほぼ河床砂れきの粒度分布の割合で移動し粒径の分級は行われない。また、河床砂れきの一部が移動しないような掃流力の範囲では、粒径の分級が行われるが、その時には、河床表面にアーモークコートが形成され、分級の効果は、ごく表層に限られる。したがって、掃流形式による移動では、粒径の分級は河床表面のごくわずかな層を除いてほとんど行われないとと言える。一方、浮流砂は、その粒径ごとに摩擦速度に対応して堆積するので、顕著な分級作用を受ける。この場合、粒径が $100\sim 200\mu$ 以下の場合には、堆積したまま移動しないが、 $100\sim 200\mu$ 以上の場合には、堆砂は掃流形式に移行する。

いま、スリットダムのせき上げによる摩擦速度の減少領域に、浮流砂および掃流砂が流下してくる場合を考える。

浮流砂は、その堆積限界の摩擦速度に対応して分級堆積し、 $100\sim 200\mu$ 以上の粒子は、掃流運動に移行する。この場合、浮流砂の粒度分布によっては、デルタを形成し、その標高を一定に保持しながら堆砂は進行する。スリットダムの間隔を、浮流形式から掃流形式に移行する粒径成分よりも大きくしておくこと、これらの砂れきはスリットを通して流出し、浮流砂による堆砂面は、上述の標高より上ることはない。一方、上流より掃流形式で流入するものは、上述の堆砂領域よりもさらに上流部に堆積し、時間とともに流下して、遂にはダム地点に到達する。このような時点では、大粒径のれきがスリットを閉塞して行き、次第に透過せきの機能を失っていく。

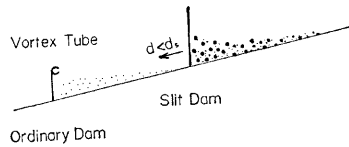


Fig. 1. Application of slit dam.

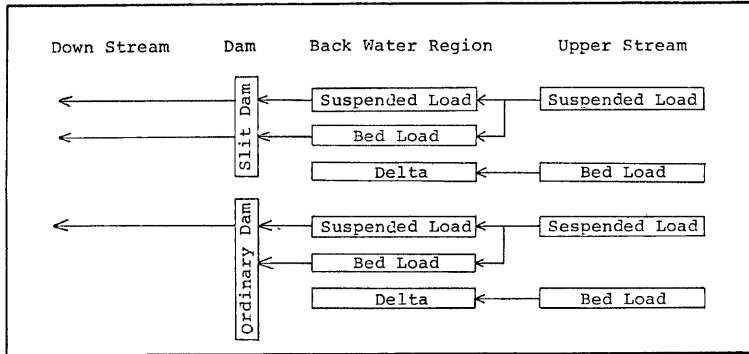


Fig. 2. Comparison of the functions of slit dam and ordinary dam.

以上のように、スリットダムと不透過せきとの働きの相異は、浮流形式で流下し、堆砂して掃流形式に移行する流砂成分に対する所にあるが、この事を Fig. 2 に示している。

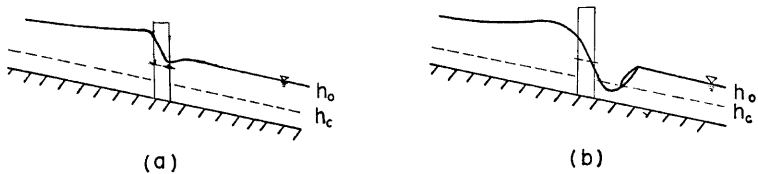
3. スリットダムの機能に関する理論的考察

3. 1 スリットダム周辺の水理特性

スリットダムによる水路の縮小部における流れの形式や水面形は、Fig. 3 のような4つの形式に分類されるので、それぞれの場合について考えることにする。

スリット部の横断形状を Fig. 4 (a) のとおりとして、水路幅、スリット幅をそれぞれ B 、 b 、スリット個数を n 、せき高を l とする。まず、等流での Froude 数 F_0 が $F_0 < 1$ の場合を考える。Fig. 4 (b) において、下流の等流断面 (O 断面) とスリット断面 (S 断面) との間に運動量方程式をたてると、

$$h_o > h_c$$



$$h_o < h_c$$

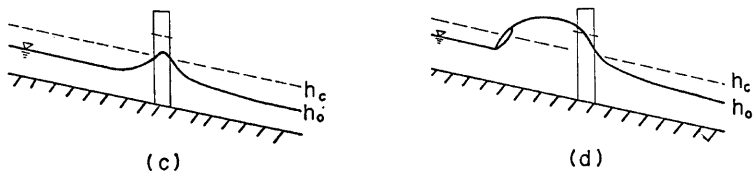


Fig. 3. Flow pattern through a slit dam.

$$\frac{\rho g}{2} h_s^2 B + \rho \eta_1 v_s Q = \frac{\rho g}{2} h_0^2 B + \rho \eta_2 v_0 Q \quad \dots\dots(1)$$

連続式は $Q = v_s \{ (h_s - l) B + nbl \} = v_0 h_0 B (h_s \geq l) \dots\dots(2)$

$$Q = v_s \{ h_s + nb \} = v_0 h_0 B \quad (h_s < l) \dots\dots(3)$$

である。ここに、 η_1, η_2 : 運動量補正係数、 h : 水深、 v : 平均流速、 Q : 流量。また、添字 s, o はそれぞれ S 断面および O 断面における値を示す。

ここで、 $l/h_0 = \gamma \quad \dots\dots(4)$

$$nb/B = \beta \quad \dots\dots(5)$$

$$h_s/h_0 = \zeta \quad \dots\dots(6)$$

$$v_0^2/g h_0 = F_0^2 \quad \dots\dots(7)$$

とおけば、式(1)~(3)から次式が得られる。

$$\gamma \leq \zeta : \frac{1}{2} \zeta^2 + \eta_1 F_0^2 \frac{1}{\zeta - \gamma(1 - \beta)} = \frac{1}{2} + \eta_2 F_0^2 \quad \dots\dots(8)$$

$$\gamma \geq \zeta : \frac{1}{2} \zeta^2 + \eta_1 F_0^2 \frac{1}{\zeta \beta} = \frac{1}{2} + \eta_2 F_0^2 \quad \dots\dots(9)$$

上式はスリット断面における無次元水深に関する3次方程式であって、スリットの幾何学的形状に関する β, γ および F_0 値と η_1, η_2 によって求められる。

スリット断面に支配断面があらわれる条件は、

$$F_s^2 = \frac{Q^2}{g A_s^3 / (\partial A_s / \partial h_s)} = 1 \quad \dots\dots(10)$$

であって、 h_s と l の大小関係により次のように表わされる。

$$h_s \geq l : \frac{v_s^2}{g h_s \left\{ 1 - \frac{l}{h_s} (1 - \beta) \right\}} = 1 \quad \dots\dots(11)$$

$$h_s \leq l : \frac{v_s^2}{g h_s} = 1 \quad \dots\dots(12)$$

式(11)および(12)を γ, β, F_0 と ζ の関係で表わすと $\zeta \geq \gamma : \zeta = F_0^{2/3} + \gamma(1 - \beta) \quad \dots\dots(13)$

$$\zeta \leq \gamma : \zeta = (F_0/\beta)^{2/3} \quad \dots\dots(14)$$

支配断面の生じる条件は、式(8)と(13)あるいは式(9)と(14)を連立に解くことにより、 F_0 と σ ($\zeta \geq \gamma$ の場合 $\sigma = \gamma(1 - \beta)$, $\gamma \geq \zeta$ の場合 $\sigma = 1 - \beta$) の関数として Fig. 5 のように与えられる。

次に、 $F_0 > 1$ の場合、上流の等流断面とスリット断面の間にエネルギー保存則を適用し、 ζ に関して次の3次方程式を得る。

$$\zeta \geq \gamma : 1 + \frac{1}{2} F_0^2 = \zeta + \frac{1}{2} F_0^2 \left\{ \frac{1}{\zeta - \gamma(1 - \beta)} \right\}^2 \quad \dots\dots(15)$$

$$\zeta \leq \gamma : 1 + \frac{1}{2} F_0^2 = \zeta + \frac{1}{2} F_0^2 \frac{1}{\beta^2 \zeta^2} \quad \dots\dots(16)$$

$F_0 < 1$ の場合と同様に、式(13)と(15)あるいは式(14)と(16)から、支配断面の生じる条件を求めることができ、その結果を Fig. 5 に $F_0 < 1$ の場合と合せて示しておく。

3. 2 スリットダムによる摩擦速度減少効果

スリットダム上流では流れがせき上げられ、摩擦速度が減少する。Fig. 4 (b) のように、スリット直上流

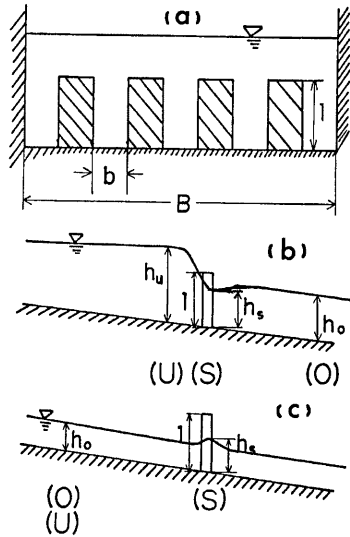


Fig. 4. Definition sketch of the parameters.

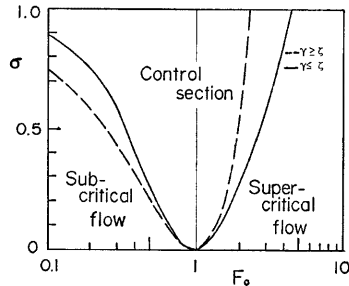


Fig. 5. Critical conditions for the control section.

部で流水が縮流し始める断面を U 断面とし、S 断面との間のエネルギー損失を無視すれば、

$$z_u + h_u + \frac{v_u^2}{2g} = E_s \tag{17}$$

となる。ここに、 z_u 、 h_u および v_u はそれぞれ U 断面における河床高、水深および平均流速、 E_s は S 断面におけるエネルギー水頭である。

$F_0 < 1$ で、かつ S 断面に支配断面が生じない場合には、式(8)あるいは(9)から、S 断面の水深 h_s を求め、エネルギー水頭 E_s を知ることができる。S 断面に支配断面が生じる場合には、水面の曲率のため、圧力は静水圧分布と異なり、エネルギー水頭を求める水深の補正を行う必要がある。いま、この補正係数を α とすれば、エネルギー水頭 E_s は次のように表わされる。

$$E_s = \alpha h_s + \frac{v_s^2}{2g} \tag{18}$$

α の値は、支配断面が生じない場合にはほぼ 1.0 であり、支配断面が生じる場合には 1.0 より小さい値となることが予想されるが、これについては実験により求める。

S 断面上流部において堆砂が進行中でも、流砂の粒径がスリット間隔よりも小さければ、S 断面には堆砂せず、したがって、流量が変化しない限り、 E_s は一定に保持される。一方、U 断面においては堆砂のため z_u は時間とともに変化することになるが、各時点でも式(17)は成立し、これより U 断面の水深 h_u は河床高 z_u の関数として次のように与えられる。

$$\frac{E_s - z_u}{h_c} = \frac{h_u}{h_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{h_c}{h_u} \right)^2 \tag{19}$$

上式は、堆砂形状を算定する際の境界条件となる。

3. 3 スリットダム上流の堆砂形状と粒度分布

スリットダム上流では、せき上げによる摩擦速度の減少に伴って、上流の等流断面で浮流状態であった砂れきのある部分は堆積し、粒径によっては掃流形式に移行する。堆砂の進行とともに摩擦速度は増加し、次第に平衡状態に近づく。この過程において、堆砂形状とともに、粒度分布も場所的、時間的に変化するが、次にそれらの算定法について述べよう。

粒径階 i の単位幅当り全流砂量 q_{Ti} は、その粒径階の河床砂れきの割合を f_i とすると、

$$\left. \begin{aligned} q_{Ti} &= f_i (q_B + q_s) \\ \sum f_i &= 1 \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

ここに、 q_B 、 q_s は単位幅当りの掃流砂量および浮流砂量である。 q_B についての芦田 道上式²⁾は、一樣粒径については、

$$\frac{q_B}{u_* \cdot d} = 17 \tau_{*c} (1 - \tau_{*c} / \tau_*) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \tag{21}$$

混合粒径については、上式の τ_{*c} に Egiazaroff による粒径別の値を用いることになっているが、その後芦田・高橋・水山らの研究³⁾により、平均粒径 d_m に対する値を使うべきであるとされているので、ここでは、それに従い、かつ平坦河床の場合を対象として、 $u_* = u_*$ とおき、掃流砂量式として、

$$\frac{q_B}{u_* \cdot d_m} = 17 \tau_{*cm} \left(1 - \frac{\tau_{*cm}}{\tau_{*m}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*cm}}{\tau_{*m}}} \right) \tag{22}$$

を用いることにする。ここに、添字 m は平均粒径に対する値である。次に、浮流砂量式は道上⁴⁾によれば、

$$q_s = q C_B (u_* / w_0) \left[\left(1 + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{v} \right) A_1 + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{v} A_2 \right] \tag{23}$$

で表わされる。ここに、 q ：単位幅流量、 C_B ：底面濃度、 κ ：Karman 定数、 A_1 、 A_2 は u_* / w_0 の関数として計算図表が与えられている。

堆砂形状の時間的変化は、流砂の連続式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial z_i}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial Q_{Ti}}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= \sum_i \frac{\partial z_i}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(24)$$

で与えられる。ここに、 z は基準面からの河床高、 z_i はその中での粒径階 i の成分である。

河床砂の混合による粒度分布の時間的、場所的变化は、混合層厚を δ とすると、

$$\left. \begin{aligned} f_i(x, t + \Delta t) &= \{ f_i(x, t) \delta + \Delta z_i \} / (\delta + \Delta z) \\ \sum_i f_i(x, t + \Delta t) &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(25)$$

で求められる。ただし、 δ に関しては、河床波が形成される場合はその波高のオーダー、平坦河床の場合には、最大粒径のオーダーと考えられるが、現在のところこれを的確にきめることはむずかしい。

初期条件および境界条件は、次のとおりである。

$$x = x_0 \text{ (上流の等流状態の断面)} : Q_{Ti} = Q_{Ti}(0) \dots\dots\dots(26)$$

ここに、 $Q_{Ti}(0)$ は上流からの流入土砂量である。

$$x = x_u \text{ (スリットダム直上の断面)} : u_* = u_*(z) \dots\dots\dots(27)$$

ここに、 $u_*(z)$ は U 断面における摩擦速度で 式(19) によって与えられる水深 h_u と流量および抵抗係数から求められる。

$$t = 0 : u_* = u_*(0), z = 0 \dots\dots\dots(28)$$

式 (24) および (25) を上の境界条件および初期条件のもとで解けば、堆砂形状および粒度分布の時間的変化を求めることができる。

各断面の掃流砂量および浮流砂量が上流から流下する浮流砂量に等しくなると、平衡状態があらわれるが、その時の摩擦速度および粒度分布は、

$$\left. \begin{aligned} Q_{Ti}(0) &= f_i(Q_B + Q_s) \\ \sum f_i &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(29)$$

式から求めることができる。また、堆砂高は、その u_* と式 (19) より求まる U 断面の堆砂高 z および水深 h とから容易に知ることができる。

実際には、上記の浮流砂の堆積による平衡河床上を上流からの掃流砂が流下するので、堆砂はさらに進むことになる。

3.4 スリットダムによる分級効果

上述のように、スリットダムは、上流から流下する浮流砂のかかりの部分は流下させ、掃流砂は阻止することによって粒径の分級を行うものであるから、その機能は、浮流砂量と掃流砂量との割合によって支配され、この割合が大きいものほど効果を発揮する。

粒径 d_i の粒子の浮流砂量と掃流砂量の割合は、式 (22) および (23) から、

$$\frac{Q_s}{Q_B} = \frac{C_B(u_* / w_0) \left[\left(1 + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{v} \right) A_1 + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{v} A_2 \right]}{17 \tau_{*m} \left(1 - \frac{\tau_{*cm}}{\tau_{*m}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*cm}}{\tau_{*m}}} \right)} \frac{R}{d_m} \cdot \frac{v}{u_*} \dots\dots\dots(30)$$

$$\text{また、} \quad \tau_{*m} = \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^2 \left(\frac{w_0^2}{sg d_m} \right) \dots\dots\dots(31)$$

の関係があるから、式 (30) は

$$\begin{aligned} \frac{Q_s}{Q_B} \cdot \frac{d_m}{R} \cdot \frac{u_*}{v} &= f \left(\frac{u_*}{w_0}, \frac{w_0^2}{sg d_m}, \frac{u_*}{v}, \tau_{*cm} \right) \\ &= f \left(\frac{u_*}{w_0}, \tau_{*m}, \frac{u_*}{v}, \tau_{*cm} \right) \end{aligned} \dots\dots\dots(32)$$

の形式で表わされる。ここに、 u_*/v 、 τ_{*cm} の変化による影響はそれほど大きくないので、近似的にこれを

一定として、上の関係を求めたものが Fig. 6 である。
 u_* 、および d_m が一定の条件では同一の τ_{*m} 上を移動し、粒径 d が小さくなるほど上方に移動して浮流砂量の割合が増加することがわかる。Fig. 6 からさらに一般的に、スリットダムが有効な河床砂れきの粒度分布と水理条件の範囲を読み取ることができる。

4. スリットダムの機能に関する実験

4.1 概説

前章での理論的な考察の実験的検討を試みる。まず、固定床で各種の開度を持ったスリットダムを設置して、スリットダム周辺での局所的な流れの特性、すなわち、水面形・流速分布ならびにせき上げ効果などの検討を行う。ついで、上流から流砂を供給して、堆砂形状の時間的変化と粒径分級効果を調べ、前章の結果と比較して、スリットダムの粒径分級効果を検討する。本来、掃流砂と浮流砂を同時に供給しながら、分級の特性を調べるのが、本研究の目的に最も合致していることは言うまでもないが、これには、規模の大きい実験装置とかなりの手間を要するので、ここでは、その基礎的な場合として、上流から浮流砂のみを供給し、せき上げ領域において、そのかなりの部分が堆積して掃流形式に移行してスリットを通過するというような、粒径、水理条件およびスリット開度を選定して実験を行うことにする。もし、上流から掃流砂の供給があるとした場合には、本実験で求められる浮流砂の上を掃流砂がデルタ形式で進行することが予想されるので、本研究の成果は、このような場合にも有効に適用できると考えられる。しかし、これについては、今後浮流砂と掃流砂とを同時に供給しながら実験を行いたいと考えている。

4.2 実験方法

実験装置は Fig. 7 のとおりで、上流部にせきを設けて流砂の循環を防ぐとともに、流量の計測を行い、

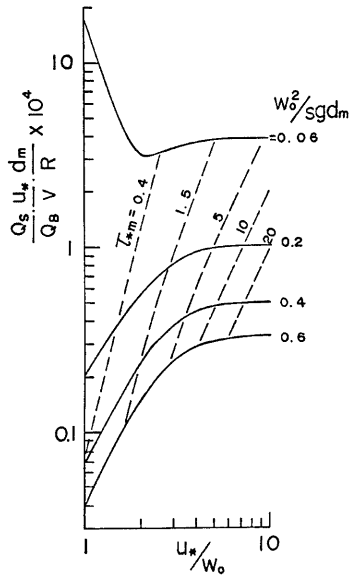


Fig. 6. The ratio of the suspended load to the bed load.

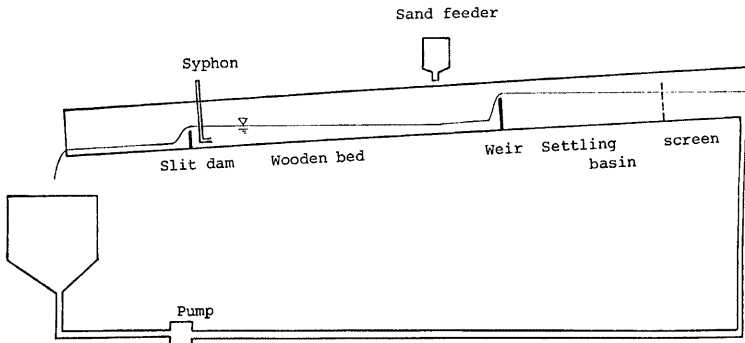


Fig. 7. Experimental apparatus.

その下流部に設置した給砂器で給砂した。下流部にスリットダムを設けて、水面形、流速分布、堆積形状、上流から循環する浮流砂量およびスリット部を通過する流砂量、スリット直上断面での浮流砂の濃度分布等の測定を行った。なお水路の長さは 22 m, 幅、深さともに 0.5 m である。

実験条件は **Table 1** のとおりである。水路底は Run A, B は板張りの滑面, Run C は粒径 8 mm の粗度をつけた粗面である。Run A は同一の流量, 勾配のもとで, スリット開度を種々変え, 給砂は A-5, A-6 についてのみ行い, とくに A-6 では混合砂を給砂した。Run B では, スリット開度 3 種類に対して, a) 給

Table 1. Experimental condition.

Run	i	Q (l/sec)	n	nb/B	d_m (cm)	Q_0 (g/sec)	t (min)	T (°C)
A-1-1	5/1000	3.8	0	1	—	0	—	—
A-1-2	"	3.4	1	0.75	—	"	—	—
A-1-3	"	3.7	"	0.5	—	"	—	—
A-1-4	"	3.8	"	0.25	—	"	—	—
A-1-5	"	4.1	"	0	—	"	—	—
A-2-1	6/1000	12.5	0	1	—	"	—	—
A-2-2	5/1000	14.4	1	0.75	—	"	—	—
A-2-3	"	11.6	"	0.5	—	"	—	—
A-2-4	"	11.4	"	0.25	—	"	—	—
A-2-5	"	12.5	"	0	—	"	—	—
A-3-1	11/1000	11.4	0	1	—	"	—	—
A-3-2	"	13.6	1	0.75	—	"	—	—
A-3-3	"	13.4	"	0.5	—	"	—	—
A-3-4	"	12.0	"	0.25	—	"	—	—
A-3-5	"	11.5	"	0	—	"	—	—
A-4-1	3.5/1000	7.1	"	0.75	—	"	—	—
A-4-2	"	9.2	"	0.75	—	"	—	—
A-4-3	5/1000	7.2	0	1	—	"	—	—
A-5	"	28.0	1	0.75	0.018	30	30	14.0
A-6	"	25.4	"	0.5	0.26	30	30	13.5
A-7	11/1000	35.8	"	0.75	—	0	—	—
B-1-1	1/200	20.2	10	0.75	0.018	31.3	60	13.8
B-1-2	"	25.0	"	0.50	"	30.0	"	"
B-1-3	"	31.4	"	0.25	"	31.1	"	14.4
B-2-1	"	16.6	"	0.75	"	31.3	"	"
B-2-2	"	15.3	"	0.50	"	30.6	"	14.5
B-2-3	"	16.6	"	0.25	"	29.9	"	"
B-3-1	"	20.3	"	0.75	"	54.9	"	13.8
B-3-2	"	29.4	"	0.50	"	54.5	"	14.0
B-3-3	"	31.4	"	0.25	"	56.4	"	14.8
B-4-1	"	20.2	"	0.75	0.030	29.7	"	14.5
B-4-2	"	29.6	"	0.50	"	29.5	"	14.3
B-4-3	"	32.1	"	0.25	"	29.8	"	15.5
C	"	30.0	"	0.20	"	30.0	360	21.7

砂量, 30 gr/s, 流量は堆積限界になるような値, b) 給砂量は同じで, 流量は上の1/2, c) 給砂量は上の約2倍で, 流量は a) に同じ, d) 流量, 給砂量は a) に同じで, 供給砂粒径の大きいものの4種類, 計12ケースの実験を行った。Run A, B は射流水路で, せき上流部で跳水を生じておりせき上げ区間が比較的短いのにに対し Run C は常流水路であり, せき上げ区間が比較的長い。

給砂した砂の粒度分布は Fig. 8 のとおりである。

測定は Run A-1~4, 7 では水面形のみを, A-5, 6 ではこれに河床形状および背水区間の濃度, A-6 ではさらに河床の粒度構成について, Run B では水面形, 河床形状とせき直上流および水路上下流端の採水による濃度と粒度分布, さらに河床砂の粒度分布について行った。Run C では Run B とほぼ同様の項目の他にせき上流部の流速分布の測定を行った。河床形状の測定には接触式砂面測定器あるいは超音波式砂面測定器を用いた。流水濃度は, 断面が 39.5 mm×4 mm の採水管をサイフォン式にして用いた。また, 上下流端での採水は, 中央部の幅 5 cm について数秒間行った。なお, Run B では, それぞれの時間的変化を知るため, 給砂開始直後 (0~5分) (15~20分) (35~40分) および給砂停止直前 (55~60分) の4回にわたって測定した。

4.3 実験結果とその考察

Fig. 9 (a) および Fig. 9 (b) は水面形と河床形状の時間的変化の例を示したものである。前者は, $F_0 > 1$ がかつダム地点に支配断面があらわれる場合であり, ダム上流 6 m の地点から波状跳水を生じており, スリットによるせき上げ区間が比較的短かい場合である。このような場合には, 貯砂効果をあまり大きく期待することができない。これに対して, 後者は, $F_0 < 1$ がかつダム地点に支配断面があらわれる場合で, せき上げ区間は長く, 大きな貯砂効果を期待できる。

支配断面が生じる場合のスリット断面の水深は, 式 (13) あるいは (14) によって与えられる限界水深にほぼ等しい。

次に, スリットによるせき上げ効果や, 堆積過程を算定するための基礎となるスリット部におけるエネルギー水頭 E_s は式 (18) で与えられるが, 式中の α の値が問題である。これについての実験の結果は Table 2 のとおりであり, α の値の大部分は0.71~0.96の範囲に属し, 平均的に見ると0.92程度の値である。これについては今後さらに検討する必要があるが, ここでは, $\alpha = 0.92$ として式 (18) から E_s の値を求めることができるものとしておく。

浮流砂の堆積過程に関しては, 期待どおり, ある程度の堆砂が進行した後平衡状態 (定常状態) が生じており, それ以後は堆砂することなく下流へ排除できることになる。

Fig. 10 は Run B-4-3 について摩擦速度の時間的変化と等流状態での流砂量式から算定される平衡摩擦速度を示したものである。ただし, 粗度高さとしては, 平均粒径の2倍をとり, Moody のダイヤグラムを使用した。これによると, 定常状態においても, Moody のダイヤグラムから求められた摩擦速度は, 流砂量式から算定される摩擦速度よりも小さいが, これには次のような理由が考えられる。そのひとつは, せき上げ区間が短く, 急激に摩擦速度が減少するために, 慣性効果が残る, 流砂量がその場所の摩擦速度に対応していないこと, もうひとつは, 平坦河床を仮定しているため, 摩擦速度自体が過小評価されていることであ

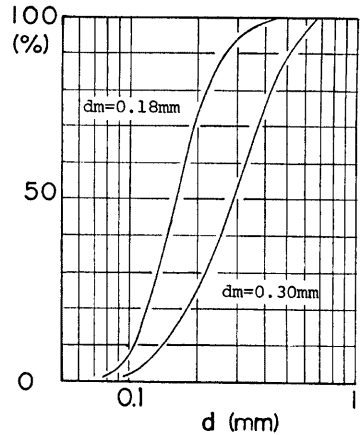


Fig. 8. Grain size distribution of the supplied sand.

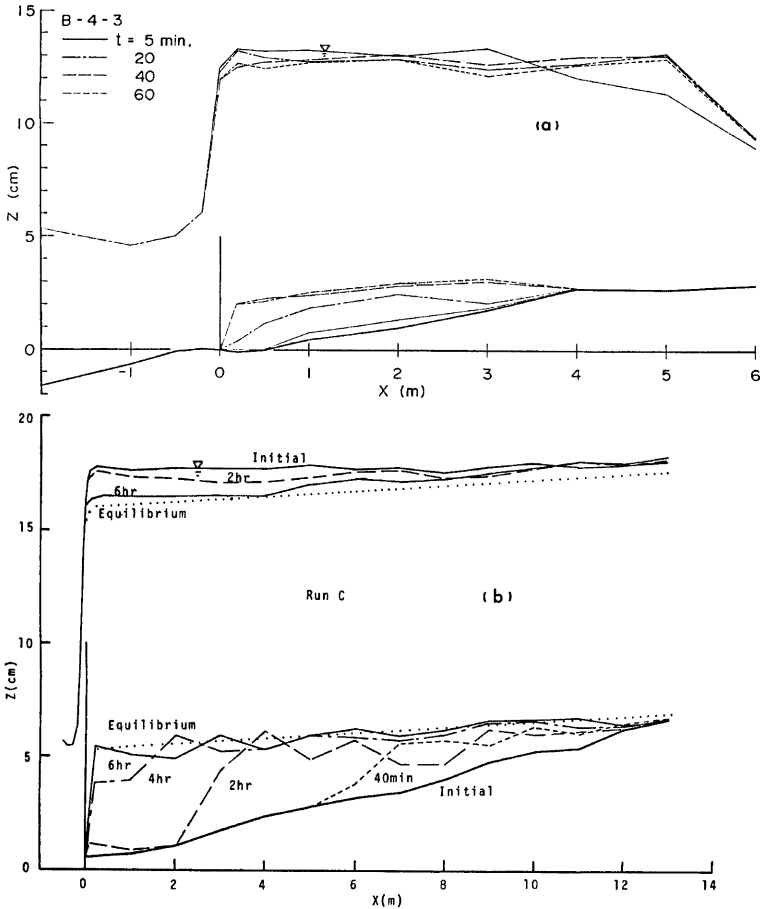


Fig. 9. Water surface and bed profiles.

る。浮遊砂の濃度分布を合わせて考慮した結果、Run B-4-3 においては、前者の影響が大きいものと判断された。そこで、慣性効果の比較的小さい Run C について同様の検討を行ったところ、やはり Moody のダイアグラムから求められた摩擦速度は、流砂量式から算定される平衡摩擦速度よりも小さくなっている。一方、6 時間後のエネルギー勾配から算定される摩擦速度は 3.6 cm/sec で、流砂量式から求められるものとはほぼ一致する。すなわち、せき上げ区間が長くて、摩擦速度が漸減する状態では、平衡状態の流砂量式が適用できるが、粗度の算定には注意が必要である。Fig. 9 (b) の破線は、流速係数を 16 とおいて平衡堆砂形状を求めたものである。

Fig. 11 は、停水後の河床面近傍の粒度分布を、式 (29) と比較したもので、両者はかなりよく一致する。

Fig. 12 は、れきと砂を等量補給した場合の粒度分布を表わしたものであり、分級効果が顕著に見られる。

Table 2. Hydraulic parameters near the dam.

Run	β	h_{sc} (cm)	h_s (cm)	z_u (cm)	E_u (cm)	α	Run	β	h_{sc} (cm)	h_s (cm)	z_u (cm)	E_u (cm)	α
A-1-2	3/4	2.0	1.6	-1.5	1.6	0.29							
A-1-3	1/2	2.8	2.8	-0.3	3.4	0.71	B-2-2	1/2	7.1	7.6	0.1	8.7	0.91
A-1-4	1/4	4.5	4.1	-0.5	5.1	0.64				7.3	1.6	8.9	0.94
A-1-5	0	6.9	6.6	-0.2	6.8	0.85				7.2	2.0	9.0	0.95
A-2-2	3/4	5.6	5.4	-0.4	7.3	0.90	B-2-3	1/4	8.6	8.6	-0.1	10.1	0.90
A-2-3	1/2	6.3	6.3	-0.4	7.7	0.92				8.6	0	9.9	0.87
A-2-4	1/4	7.5	7.3	-0.4	7.9	0.79				8.6	1.0	10.1	0.89
A-2-5	0	9.0	8.4	-0.2	9.9	0.88	B-3-1	3/4	6.8	7.2	0	9.2	0.95
A-3-2	3/4	5.5	4.0	-0.3	6.1	0.69				7.2	1.0	9.6	1.00
A-3-3	1/2	6.7	5.8	-0.3	6.8	0.71				7.2	0.9	9.5	1.00
A-3-4	1/4	7.6	6.6	-0.3	7.4	0.71	B-3-2	1/2	9.6	9.8	0.2	12.0	0.88
A-3-5	0	8.8	7.8	-0.3	9.0	0.81				9.4	1.5	12.5	0.94
A-4-1	3/4	3.3	2.6	-0.5	4.1	0.73				9.4	1.8	12.6	0.95
A-4-2	3/4	4.0	3.5	-0.5	5.0	0.74	B-3-3	1/4	11.1	11.2	-0.2	13.5	0.88
A-5	3/4	8.1	8.5	0.3	11.0	0.94				11.2	0.1	13.3	0.87
A-6	1/2	8.9	9.0	0.3	11.5	0.93				11.2	0.2	13.1	0.85
				0.1	11.0		B-4-1	3/4	6.8	7.1	-0.1	9.2	0.95
A-7	3/4	9.3	11.4	-0.3	13.7	1.03				7.1	1.6	9.9	1.06
B-1-1	3/4	6.8	7.0	0	9.0	0.92				7.1	1.5	9.8	1.04
			7.0	0.3	9.2	0.96	B-4-2	1/2	9.6	9.9	-0.1	12.2	0.90
			7.1	0.3	9.1	0.93				9.9	1.4	12.5	0.93
B-1-2	1/2	8.8	7.9	0.2	10.3	0.80				9.9	1.6	12.7	0.95
			7.9	1.6	11.3	0.92	B-4-3	1/4	11.2	11.9	0	14.4	0.95
			6.4	1.8	11.4	0.93				11.9	0.4	14.3	0.94
B-1-3	1/4	11.1	10.1	0	12.2	0.76				11.9	2.0	14.5	0.96
			10.1	0.2	13.0	0.83	C	1/5	14.8	15.9	0	17.8	0.96
			10.1	0.3	12.4	0.78				15.7	0.6	17.6	0.95
B-2-1	3/4	6.1	7.1	-0.1	8.0	0.92				15.5	4.8	17.5	0.94
			6.4	0.6	8.0	0.91							

5. 結 語

以上、ダム堆砂の防除に関する研究の一環として、スリットダムの水理機能について述べてきたが、得られた結果を要約すると次のようである。

1° 貯水池の上流にスリットダムを設置すると、その分級作用により、下流の排砂構造物への負荷を軽減することができるとともに、不透過の砂防ダムに比べて、より多くの流入土砂に対して貯砂効果を発揮することができる。この分級効果は、掃流砂と浮流砂の運動形態の違いを利用するもので、流入土砂のうちの掃

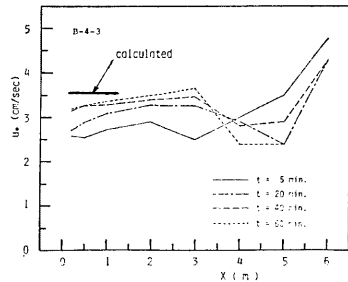


Fig. 10. Variation of the shear velocity.

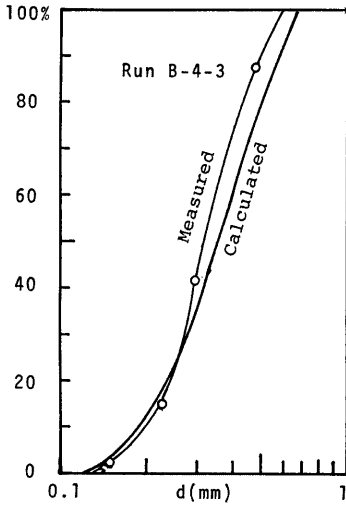


Fig. 11. Grain size distribution of the surface bed material under the equilibrium condition.

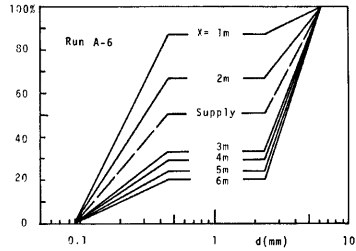


Fig. 12. Sorting effect of the sediment.

流分をデルタの形式によって堆積させ、それを通過した浮流分をその下流で掃流形式に転移させてスリットから排出させようとするものである。

2° 上記の機能がどの程度に発揮されるかは、掃流砂と浮流砂の割合に依存する。その割合は、 u_* / w_0 、 τ_{*m} 、 R/d_m 、および τ_{*cm} に依存するが、それらの関係を示す図表を作成し、スリットダムが有効に働く条件について考察した。

3° スリットダム周辺の水理特性について、一次元解析法を用いて考察し、スリット部の水深および、その直上流のせき上げ高を求める式を誘導した。支配断面が形成される場合には、流線の曲がりのために静水圧分布から外れるが、比エネルギーを $\alpha h_{sc} + \frac{v_{sc}^2}{2g}$ と表わして、係数 α を実験的に求めた。

4° スリットダム上流の堆砂形状と粒度分布を予測するための基礎式と境界条件を誘導し、特に平衡状態に達した場合について、実験との対比を行った。その結果、抵抗の算定に若干の問題が残るが、ここに述べたモデルがほぼ妥当であることが明らかにされた。

分級効果については十分な検証が行えなかったが、総合的な排砂システムの一環として、スリットダムは有効なものであり、今後さらに研究を進めていきたいと考えている。

なお、本研究を進めるにあたっては、京都大学工学部4回生(当時)松尾 勉君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・高橋 保・千田 実：ダム堆砂の排除に関する研究——渦動排砂管の水理機能——，京都大学防災研究所年報，第21号 B-2，1978。
- 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，土木学会論文報告集，第206号，1972。
- 3) 芦田和男・高橋 保・水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究，新砂防，107，1978。
- 4) 道上正規：流砂と河床変動に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1972。