

貯水池における混合粒径材料の堆積とその排除法

高橋 保・中川 一・里深好文

要旨

貯水池における混合粒径材料の堆積過程に関して、水理実験と数値解析を行い、堆砂デルタにおける粒度の鉛直分布特性などを明らかにしている。また、バイパストンネルを用いて効果的に堆砂を排除するために、流入土砂を貯水池末端に設けた副ダム上流域に一旦堆積させ、出水後に貯水池の水を副ダムのゲートから上流側へ逆流させることにより、堆砂を再度侵食させて排砂する方法について、数値計算により検討している。

キーワード：ダム堆砂、混合粒径材料、バイパストンネルによる排砂、堆砂の再侵食、2次元数値シミュレーション、

1. はじめに

土砂の生産・流出が活発な河川にダムが建設されると、土砂の流出プロセスに大きな変化が生じることになり、ダム上・下流の河川環境に対して様々な影響が現れるようになる。貯水池内においては、堆砂の進行に伴って貯水池容量が減少するといった、ダムの機能そのものに直接関連する問題が生じ、ダム下流においては、濁水の長期化や、河岸や海岸の侵食といった問題が発生する。貯水池堆砂の問題を解決することは、水系一貫した土砂管理を実現するという点からも、また、貯水池の機能そのものを維持するという点からも重要な課題であるため、堆砂の浚渫・掘削やバイパストンネルや排砂ゲートによる排砂などがこれまでに数多くの貯水池で行われてきている。

ダム堆砂対策の中で、流送土砂を貯水池内に貯めることなく、流水の作用により本来あるべき場所である河道に戻すというバイパストンネルを用いた排砂法は、自然の理にかなった方法であるといえる。しかしながら、トンネルの大きさに限界があるため、出水時の流量がトンネルの送流能力を超えることが多いような比較的大規模な流域をもつ貯水池では、十分な効果が得られるかどうか不明であった。著者ら

はこのような条件下においても効率よく砂礫をダム下流へ排出する方法として、放流用のゲートをもった副ダムとバイパストンネルとを組み合わせた排砂法を提案し、水理実験や数値計算による検討を行ってきた(高橋・中川・里深, 2000)。この排砂法は、貯水池流入部に副ダムを設けて、出水時にはその上流域に流入土砂を一旦堆積させ、流量低減時に貯水池内の水を上流方向へ逆流させることにより、堆積土砂(デルタ)を再度侵食させて排砂トンネルへと導びくというものである。この研究の結果、副ダムゲートからの放流水を上流域へ導くための隔壁の形状が、堆砂デルタの効果的な侵食に対して大きな影響を持つことなどが明らかにされたが、一様粒径の材料を対象としたものであったため、砂礫の粒度分布の影響に関しては不明であった。また、堆砂デルタの侵食過程に関する2次元数値計算においては、側岸侵食の影響を考慮すべきであることなどが課題として残されていた。

そこで、本研究においては、混合粒径材料の堆砂過程に関して水理実験ならびに一次元数値シミュレーションを行っている。また、従来の2次元シミュレーションモデルに湾曲部における側岸侵食モデルを組み込むことにより、デルタの侵食過程に関する再現計算を行っている。さらに、導流部の隔壁に複数の

Table 1 Dimension of Takase Reservoir

Catchment area		131 km ²
Reservoir	Reservoir area	1.78 km ²
	Storage capacity	76,200,000 m ³
	Usable capacity	16,200,000 m ³
	High water level	1,278 m
Dam	Type	Fill dam
	Hight	176 m
	Crest length	362 m
	Volume	11,590,000 m ³

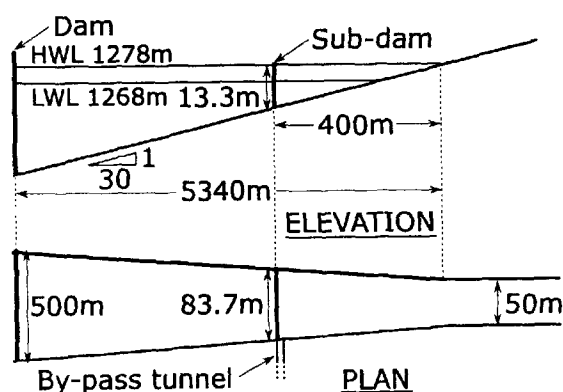


Fig. 1 Configuration of Takase reservoir

ゲートを設けることにより、効果的にデルタを侵食させる方法に関して、水路実験による検討を行っている。

2. 混合粒径材料の堆砂過程に関する水路実験

2. 1 実験装置

本研究は長野県にある高瀬ダムを対象としている。Table 1にその諸元を示し、Fig. 1にはモデル化された貯水池の地形を示している。貯水池の末端（上流端）から400m下流の地点に高さ13.3mの副ダムを設けている。実験にはFig. 2に示すような1/100スケールの模型を用いており、水路長さは11m、上流7mの間では水路幅は50cmである。下流側4mの間においては下流方向に水路幅が広がっており、下流端には高さ13.3cmの副ダムが設置されている。実験水路の勾配は1/30である。河床形状や流況および土砂の移動状況を観察できるように、両側壁や副ダムはすべて透明アクリルで作製されている。給水装置は低水槽、ポンプ、高水槽からなっており、給水量はコンピューター制御で調節可能である。水路上流部には給砂装置が設置されており、ダイヤル操作によって給砂量を調節できる。水路上には縦横断に移動可能な計測台車が設置されており、台車にはレーザー式河床位計とサーボ式水位計が取り付けられている。

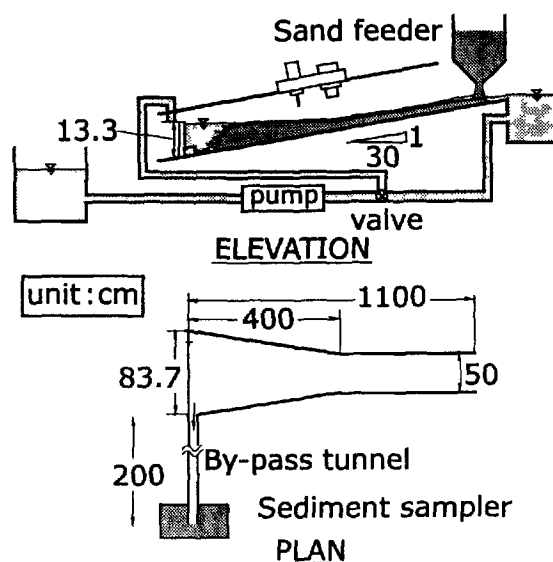


Fig. 2 Experimental flume

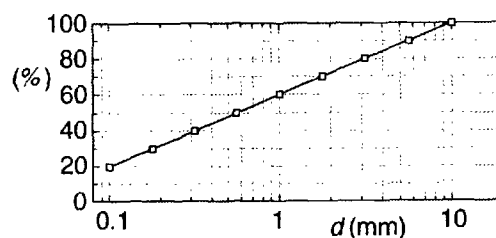


Fig. 3 Grain size distribution of sand employed for the experiment and the calculation

2. 2 実験条件と実験方法

まず、現地の河床材料を参考にして、 $d_1 (=0.1\text{mm})$ ～ $d_9 (=10\text{mm})$ の9段階の粒径階（Fig. 5参照）を設定し、 d_1 を20%と $d_2 \sim d_9$ を各10%ずつ混合することにより混合粒径材料を作成した。その粒度分布をFig. 3に示している。各粒径階はそれぞれ異なった色に彩色されているため、目視によって構成材料を判読することが可能である。

水路内に土砂が存在しない状態を初期条件として、洪水流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ に相当する流量 $3000\text{cm}^3/\text{s}$ を定常的に上流端から供給するとともに、 $22\text{cm}^3/\text{s}$ の給砂を与え、副ダム地点にデルタ先端が到達するまでの堆砂の進行過程を追跡した。

河床形状の測定は、通水開始から10分、30分、90分、130分の時点で給砂・給水を停止して行った。縦断方向に3本の測線（測線間の距離は15cm）で計測し、その平均値を用いて河床縦断形状を求めた。また、実験終了後、水路中心線に沿って縦断方向に100cm間隔

で堆積土砂の柱状のサンプリングを行っている。

2. 3 実験結果と考察

Fig. 4には河床縦断形状に関する計測結果が、後述する数値シミュレーションの結果と併せて示されている。なお、図の縦軸は水路床を原点としている。実験中の観察によれば、堆積の最先端にはウォッシュロードあるいは浮遊砂として輸送されてきた小さい粒子(d_1 や d_2)が緩やかに堆積し、その後には掃流砂として運ばれてきた砂礫が明瞭なデルタを形成していることが分かった。

Fig. 5は柱状サンプリングにより得られたデルタ内の粒径の鉛直分布状況を概念的に示したものであり、Fig. 6は深さ方向の粒度分布に関する実験結果を後述する計算結果と併せて示したものである。 $x=300\text{cm}$ の地点が貯水池の上流端であり、 $x=700\text{cm}$ の地点が副ダム地点である。なお、 $x=675\text{cm}$ は堆砂デルタの肩付近の地点となっている。これによれば、河床堆積物の最も深い部分には細かい粒子が堆積しているが、その直上には最大礫を含む最も大きい粒径成分が堆積しており、その層から上方へ順次粒径が細くなってゆくという、いわゆる逆グレーディングが認められる。このような逆グレーディングが生じる原因は以下のようなようであると考えられる。

掃流砂として堆砂肩まで運ばれてきた砂礫粒子は、急激な掃流力の低下に伴い、肩の直下流に堆積する。この部分の勾配は安息角に近いので、頻りに小規模な崩壊を繰り返しながら、デルタは下流側へと進行する。この時、粒径の大きなものは急な勾配の部分に停止することができず、より前方の勾配の緩い箇所まで転がり落ちてしまう。これは、河床表面の凹凸のスケールが粒子サイズに比べてかなり小さく、粒子に作用する抵抗が小さくなったためであると考えられる。その結果、より前方、すなわちより深い層に大きい粒子が堆積し、その上に順次細かいものが堆積することになる。

3. 混合粒径材料の堆砂過程に関する数値シミュレーション

3. 1 シミュレーションモデルの概要

(1) 流れの支配方程式

貯水池堆砂の進行過程に関する再現計算を行うためには、流れの計算モデルとしてダイナミックウェーブモデルを採用する必要がある。これは、貯水池内の流れが下流条件の影響を強く受けるために、擬似等流の近似が困難となることによる。本研究におい

ては、以下に示すような一次元非定常流れの運動方程式(高橋・井上・中川・里深, 2001)を用いている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = g \sin \theta_w - \frac{\tau}{\rho h} \quad (1)$$

ここに、 u :平均流速、 g :重力加速度、 θ_w :水面勾配、 τ :河床せん断力、 ρ :水の密度、 h :水深である。この式の右辺第2項は流れの状態に応じて、それぞれ以下のように表される。

[$C_L \geq 0.4C_{*L}$ の時 (石礫型土石流)]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau}{\rho h} &= \frac{u|u|d_{mL}^2}{8h^3G_1G_2} \\ G_1 &= C_L + (1 - C_L)\rho_m/\sigma \\ G_2 &= \{(C_{*L}/C_L)^{1/3} - 1\}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

[$0.01 < C_L < 0.4C_{*L}$ の時 (掃流状集合流動)]

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{1}{0.49} \frac{d_{mL}^2}{h^3} u|u| \quad (3)$$

[$C_L \leq 0.01$ あるいは $h/d_{mL} \geq 30$ の時 (掃流砂または泥流状乱流土石流)]

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{gn_m^2 u|u|}{h^{4/3}} \quad (4)$$

ここに、 C_L :流体中の粗粒分容積濃度、 C_{*L} :堆積層の粗粒分容積濃度、 d_{mL} :流体中の粗粒分平均粒径、 ρ_m :流体相の密度、 σ :砂礫の密度、 n_m :マニングの粗度係数である。

本計算では混合砂礫を対象としており、粒度の分布特性は粒径階 k の粒径 d_k とその存在率を用いて表現している。粒度分布の範囲を k_e 個の粒径階に分割し、 $k=1 \sim k_1$ の粒径成分を細粒分とし、 $k=k_1+1 \sim k_e$ の粒径成分を粗粒分としている。細粒分とは水と一体となって流体相を形成すると考えられる材料であり、粗粒分とは固体相を形成する材料を指している。

流体中の粗粒分容積濃度と流体相の密度、ならびに流体中の粗粒分平均粒径はそれぞれ以下のように表される

$$C_L = \sum_{k=k_1+1}^{k_e} C_k \quad (5)$$

$$\rho_m = \rho + \frac{\sigma - \rho}{1 - C_L} \sum_{k=1}^{k_1} C_k \quad (6)$$

$$d_{mL} = \frac{\sum_{k=k_1+1}^{k_e} d_k C_k}{C_L} \quad (7)$$

ここに、 C_k : k 番目の粒径階が流体の全容積に占める割合である。

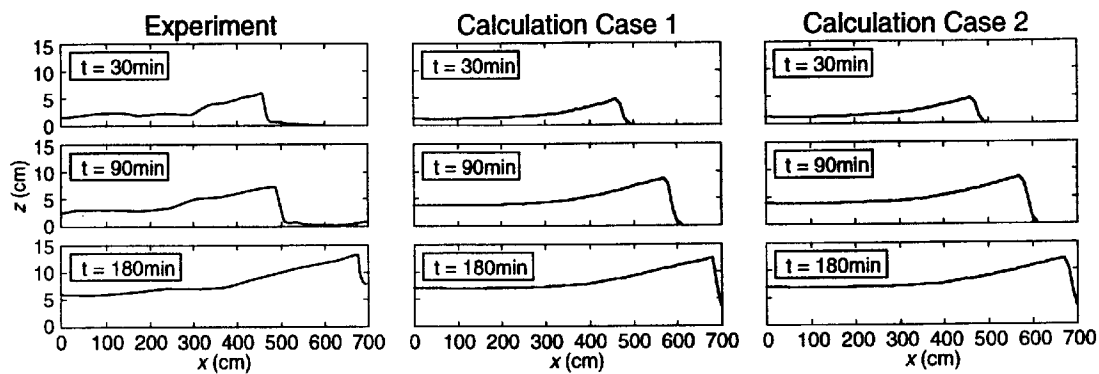


Fig. 4 Longitudinal bed profiles

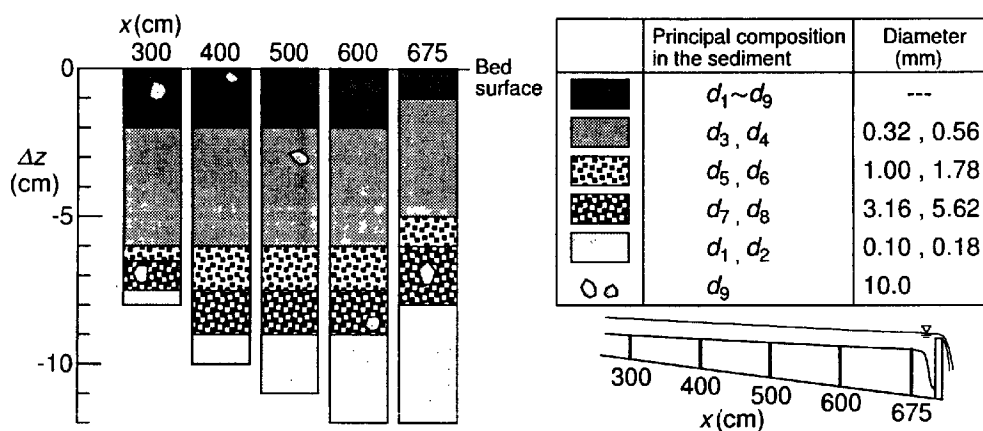


Fig. 5 Schematics of the grain size distribution in the delta

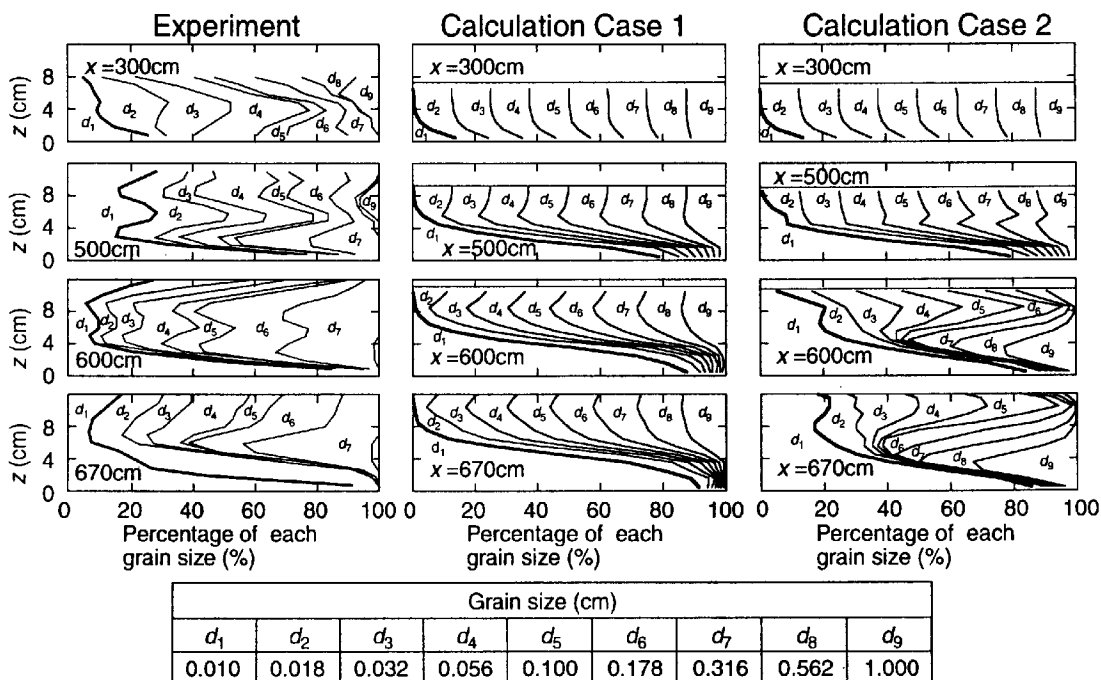


Fig. 6 Vertical grain size distributions in the deposits

一次元非定常流れに関する全容積の連続式と各粒階の連続式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial(uh)}{\partial x} = i_{sb} K_1 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(C_k h)}{\partial t} + u \frac{\partial(uh C_k)}{\partial x} = i_{sbk} \quad (9)$$

ここに、 i_{sb} ：河床の侵食・堆積速度（侵食が正、堆積が負）、 K_1 ：係数、 i_{sbk} ：粒径階 k の侵食・堆積速度である。 K_1 は河床が不飽和である場合に必要となる係数であり、侵食の場合（ $i_{sb} > 0$ ）には河床の飽和度 s_b を用いて $K_1 = C_{*L} + (1 - C_{*L})\{C_{*F} + (1 - C_{*F})s_b\}$ と表され、堆積の場合（ $i_{sb} \leq 0$ ）には $K_1 = 1$ である。ここで、 C_{*F} ：堆積層において粗粒分の空隙に存在する細粒分の容積濃度である。

(2) 侵食・堆積速度式

流体中の土砂濃度がその場で流し得る土砂濃度と異なる場合には、河床の侵食あるいは堆積が生じるものと考えられる。ただし、濃度のバランスを考える際に対象としている砂礫は固体相を形成する粗粒分だけであり、細粒分は考慮しないものとしている。

流体中の粗粒子濃度 C_L がその地点で流し得る平衡土砂濃度 $C_{L\infty}$ よりも小さい場合には、河床の侵食が生じると考えられる。いま、河床が平均粒径サイズの一様な粒子によって構成されているとすると、次式（高橋・中川，1992）により河床の侵食速度が求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{i_{sbo}}{\sqrt{gh}} &= K \sin^{3/2} \theta_w G_1 G_2 \\ G_1 &= \left\{ 1 - \frac{\sigma - \rho_m}{\rho_m} C_L \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta_w} - 1 \right) \right\}^{1/2} \\ G_2 &= \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta_w} - 1 \right) (C_{L\infty} - C_L) \frac{h}{d_{mL}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 i_{sbo} ：河床表面の粗粒分平均粒径 d_{mL} に対する侵食速度、 K ：定数、 ϕ ：河床材料の内部摩擦角である。平衡土砂濃度 $C_{L\infty}$ に関しては後述する。なお、この侵食速度は砂礫の空隙を含んだものであるため、実質の砂礫の侵食量を考える際には河床堆積物の容積濃度を考慮する必要がある。

河床表面を構成する粗粒分は種々のサイズを持っており、必ずしもすべての粒径階が同じように侵食されるとは限らない。そこで、粒径よりも水深の方が大きい粒径階に限って侵食されるものとする、 $d_{k_2+1} > h > d_{k_2}$ の時、各粒径ごとの侵食速度は以下のように求められる。

[$k_1 < k \leq k_2$ のとき]

$$i_{sbk} = i_{sbo} K_3 f_{bLk} C_{*L} \quad (11)$$

[$k > k_2$ のとき]

$$i_{sbk} = 0 \quad (12)$$

ここに、 i_{sbk} ：空隙を含まない実質の砂礫分に対する各粒径ごとの侵食速度、 f_{bLk} ：河床表層において全粗粒分中で粒径階 k の粒子が存在する割合、 K_3 ：係数であり、それぞれ次のように表される。

$$f_{bLk} = \frac{f_{bk}}{\sum_{k=k_1+1}^{k_e} f_{bk}} \quad (13)$$

$$K_3 = \sum_{k=k_1+1}^{k_2} f_{bLk} \quad (14)$$

ここに、 f_{bk} ：河床表層において全粒子中に粒径階 k の粒子が存在する割合である。

流砂形態が掃流砂である場合には、侵食可能な粒子の判定条件として粒径ごとの限界掃流力を考え、次の修正エギアザロフ式により求められる粒径階ごとの限界摩擦速度と摩擦速度を比較することにより、移動可能であるかどうかを判定する。

[$d_k/d_{mL} \geq 0.4$ のとき]

$$\frac{u_{*ck}^2}{u_{*cmL}^2} = \left\{ \frac{\log 19}{\log(19d_k/d_{mL})} \right\}^2 \frac{d_k}{d_{mL}} \quad (15)$$

[$d_k/d_{mL} < 0.4$ のとき]

$$\frac{u_{*ck}^2}{u_{*cmL}^2} = 0.85 \quad (16)$$

ここに、 u_{*ck} ： k 番目の粒径階の限界摩擦速度、 u_{*cmL} ： d_{mL} に対する限界摩擦速度であり、

$$u_{*cmL} = \sqrt{\tau_{*c}(\sigma/\rho_m - 1)gd_{mL}} \quad (17)$$

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan \theta_w} \quad (18)$$

と表される。

流体中の粗粒子濃度 C_L がその地点で流し得る平衡土砂濃度 $C_{L\infty}$ よりも大きい場合には河床上に堆積が生じる。このような濃度の不均衡による粗粒分の堆積速度は、以下のように表される。

$$i_{sbo} = \delta_d \frac{C_{L\infty} - C_L}{C_{*L}} |u| \quad (19)$$

ここに、 δ_d ：定数である。

粒径階ごとの堆積速度を考える場合、前述の侵食速度の場合と同様に堆積物の土砂濃度を考慮する必要がある。堆積物中の粗粒分土砂濃度は、後述するように粗粒分と細粒分の存在率によって変化するが、堆積する際には粗粒分のみが存在する場合の土砂濃度 C_{*Lmaz} になるものとする。また、粒子の沈降速度が大きい時にはその影響も考える必要があるため、粒径階ごとの沈降速度と摩擦速度とを比較し、沈降速

度の方が大きい粒径階に関しては堆積速度に沈降分を加えることにする。すると、各粒径階の実質の堆積速度はそれぞれ以下のように表される。

[$u_* < w_{0k}$ のとき]

$$i_{sbk} = -w_{0k}C_k + i_{sbo}\frac{C_k}{C_L}C_{*Lmax} \quad (20)$$

[$u_* \geq w_{0k}$ のとき]

$$i_{sbk} = i_{sbo}\frac{C_k}{C_L}C_{*Lmax} \quad (21)$$

ここに、 u_* ：摩擦速度、 w_{0k} ：粒径階 k の沈降速度である。

つぎに、細粒分の粒径別侵食速度について考察する。粗粒分の濃度のバランスに応じて河床の侵食が生じると、その空隙に存在していた細粒分も当然流体中に取り込まれることになる。いま、河床空隙における細粒分 k の容積濃度を C_{*k} とすると、式(10)から求められる侵食速度 i_{sbo} を用いることにより、粒径階 k の実質の侵食速度が次のように求められる。

$$i_{sbk} = i_{sbo}K_3(1 - C_{*L})C_{*k} \quad (22)$$

堆積の場合も侵食と同様に、堆積する粗粒分の空隙に流体相が取り込まれるため、結果的に細粒分の堆積が生じると考えている。したがって、

[$u_* < w_{0k}$ のとき]

$$i_{sbk} = -w_{0k}C_k + i_{sbo}(1 - C_{*Lmax})\frac{C_k}{1 - C_L} \quad (23)$$

[$u_* \geq w_{0k}$ のとき]

$$i_{sbk} = i_{sbo}(1 - C_{*Lmax})\frac{C_k}{1 - C_L} \quad (24)$$

となる。ただし、 i_{sbo} は式(19)から求められた堆積速度である。

河床変動量を計算する際に必要となる空隙を含むバルクの侵食速度は、粒径階ごとの実質の侵食速度と堆積層の粗粒分容積濃度を用いて以下のように表される。

$$i_{sb} = \frac{1}{C_{*L}} \sum_{k=k_1+1}^{k_e} i_{sbk} \quad (25)$$

バルクの堆積速度に関しては、式(19)により求められる堆積速度に粒子の沈降の影響を加えることにより、次のように表される。

$$i_{sb} = i_{sbo} + \frac{1}{C_*} \sum_{k=k_3}^{k_e} (-w_{0k}C_k) \quad (26)$$

ここに、 C_* ：沈降した粒子が堆積する場合の堆積層の容積濃度、 k_3 ：沈降する最小の粒径階である。異なる粒径階の粒子が同時に沈降・堆積する際の C_* に関しては、現段階では十分な知見が得られていないため、本計算においてはこれを粗粒分のみが堆積する

ときの土砂容積濃度である C_{*Lmax} に等しいものと仮定している。

式(10)および式(19)に用いられている粗粒分の平衡土砂濃度 $C_{L\infty}$ に関しては、水面勾配に応じて以下のように与えられる。

[$\tan \theta_w > 0.138$ のとき]

$$C_{L\infty} = \frac{\rho_m \tan \theta_w}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \quad (27)$$

[$0.03 < \tan \theta_w \leq 0.138$ のとき]

$$C_{L\infty} = 6.7 \left\{ \frac{\rho_m \tan \theta_w}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \right\}^2 \quad (28)$$

[$\tan \theta_w > 0.03$ のとき]

$$C_{L\infty} = \frac{(1 + 5 \tan \theta_w) \tan \theta_w}{\sigma / \rho_m - 1} \left(1 - \alpha_0^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \times \left(1 - \alpha_0 \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (29)$$

$$\alpha_0^2 = \frac{2\{0.425 - (\sigma / \rho_m) \tan \theta_w / (\sigma / \rho_m - 1)\}}{1 - (\sigma / \rho_m) \tan \theta_w / (\sigma / \rho_m - 1)} \quad (30)$$

$$\tau_* = \frac{h \tan \theta_w}{(\sigma / \rho_m - 1) d'_{mL}} \quad (31)$$

ここに、 d'_{mL} ：河床表層における移動可能粗粒子の平均粒径である。

(3) 河床のモデル化

河床変動を表す連続式は、

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_{sb} = 0 \quad (32)$$

と表される。ここに、 z ：河床位である。

前述の河床堆積層における粗粒分や細粒分の容積濃度に関しては以下のように考えている。まず、河床堆積物中に粗粒分が十分に多い場合には、粗粒子が骨格を形成し、その空隙に細粒子が存在するものとしている。この時、粗粒子の容積濃度 C_{*L} は、粗粒分のみが堆積する場合の容積土砂濃度 C_{*Lmax} に等しく、粗粒分の空隙に占める細粒分 k の存在率 C_{*k} は、

$$C_{*k} = \frac{C_{*L}}{1 - C_{*L}} \frac{f_{bk}}{F} \quad (k = 1 \sim k_1) \quad (33)$$

$$F = \sum_{k=k_1+1}^{k_e} f_{bk} \quad (34)$$

と表される。ここで、 f_{bk} ：堆積層における全粒子の中で k 番目の粒径階が占める割合、 F ：河床における全粗粒分の割合である。

ところで、細粒分の存在率が大きくなると、粗粒分の空隙に収容しきれなくなると考えられる。このような場合には、粗粒子は骨格を形成することなく、細粒分が土砂濃度 C_{*F} で堆積している中に分散して存在するものとする。ただし、 C_{*F} は細粒分のみが堆

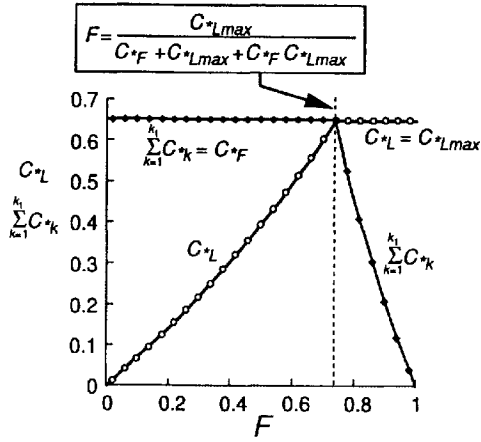


Fig. 7 Relationship between the ratio of the coarse fraction in the bed F and the volume concentrations of the fine and coarse fractions in the bed

積する場合の容積土砂濃度である。この時、粗粒子の容積濃度と空隙中の細粒分 k の存在率はそれぞれ以下のように表される。

$$C_{*L} = \frac{F C_{*F}}{C_{*F} F + 1 - F} \quad (35)$$

$$C_{*k} = \frac{f_{bk} C_{*F}}{1 - F} \quad (36)$$

すべての細粒分が粗粒分の空隙に収容されるためには、 $\sum_{k=1}^{k_1} C_{*k}$ が C_{*F} を越えないことが必要であり、そのためには下記の条件が満足されなければならない。

$$F \geq \frac{C_{*Lmax}}{C_{*F} + C_{*Lmax} - C_{*Lmax} C_{*F}} \quad (37)$$

Fig. 7には全粗粒分の割合 F と河床における粗粒分の容積土砂濃度 C_{*L} 、ならびにその空隙における細粒分の容積土砂濃度 $\sum_{k=1}^{k_1} C_{*k}$ との関係が示されている。なお、本計算においては $C_{*Lmax} = C_{*F} = 0.65$ としており、 $F = 0.74$ のとき細粒分が粗粒分の空隙に収容される限界となる。

河床表層の粒度分布の変化に関しては、厚さ δ_m の交換層を考えて、微小時間内におけるこの交換層への各粒径階粒子の出入りを評価することにより求めている。粒度分布の変化に伴って交換層内の固体分濃度にも変化が生じることに注意しながら、このような粒度分布の変化を微分形で表すと以下のようなになる。

[侵食の場合]

$$\frac{\partial f_{bk}}{\partial t} = \frac{i_{sb} J_0 f_{0k} - i_{sbk} - i_{sb}(J_0 - J) f_{bk}}{\delta_m J} \quad (38)$$

[堆積の場合]

$$\frac{\partial f_{bk}}{\partial t} = \frac{1}{\delta_m J} (-i_{sbk} + i_{sb} C_{*F} f_{bk}) \quad (39)$$

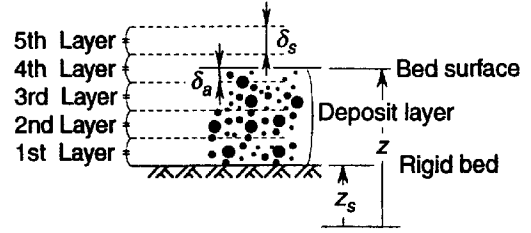


Fig. 8 Definition of the divided layers in the deposits

ここに、 δ_m :河床表面の交換層の厚さ、 J :河床表層の固体分濃度、 J_0 :河床表層の下にある堆積層（以後、下層と呼ぶ）の固体分濃度、 f_{0k} :下層における粒径階 k の存在率であり、

$$J = C_{*L} + (1 - C_{*L}) C_{*F} \quad (40)$$

$$J_0 = C_{*L0} + (1 - C_{*L0}) C_{*F0} \quad (41)$$

である。ただし、添字0は下層における値であることを示している。

混合砂礫床を対象とした河床変動計算を行う場合、流れと直接関係する河床表層の粒度分布の時間的な変動を考慮しないということはほとんど無いといえる。しかしながら、その下に存在する堆積層（下層）の粒度分布に関しては、時間的に変動することがないと仮定されている場合が多い。これは、河床内部の情報が少ないことに加えて、単純な侵食過程や堆積過程を対象とする場合には、下層の粒度分布が流れや河床変動に及ぼす影響は小さいと考えられるからである。ただし、侵食・堆積を繰り返すような場を対象とする際には、河床内部の粒度分布がある程度記憶できなければ、粒径ごとの土砂の連続条件が満たされない可能性が高くなると思われる。そこで、Fig. 8に示すように、河床内部を複数の層に分割し、最上部の厚さ δ_a の層だけが河床表層と粒子を交換するものとする、この層の粒度分布の変化は次の式によって表される。

$$\bar{f}_{0k} = \frac{\delta_a J_0 f_{0k} - i_{sb} \Delta t J f_{bk}}{\delta_a J_0 - i_{sb} \Delta t J} \quad (42)$$

ここで、 $\bar{f}_{0k}$:時間ステップ Δt 後の f_{0k} の値である。

(4) デルタ肩における崩壊のモデル化

デルタ肩のように土砂が比較的大きな勾配で堆積する地点においては、堆砂勾配が安息角よりも大きくならないようにする必要がある。そこで、このような場合崩壊が発生するものとして、次のように堆積速度式を変更している。すなわち、Fig. 9に示すように、2点間の河床位の差が $\Delta z_{max} = \Delta x \tan \phi$ を越え

ると、河床が崩壊し、計算点*i*から*i+1*へ向かって空隙も含めた体積 ΔV^i の土砂が移動するものと考え、

$$\Delta V^i = \frac{(z^i - z^{i+1} - \Delta z_{max})B^i B^{i+1}}{B^i + B^{i+1}} \Delta x \quad (43)$$

と表される。ここに、 z^i : 計算点*i*の河床位、 B^i : 計算点*i*の川幅、 Δx : 計算点の間隔である。計算点*i*における河床崩壊の影響を考慮したバルクの侵食・堆積速度 i_{sb}^i 、ならびに粒径別の侵食・堆積速度 i_{sbk}^i はそれぞれ以下のように表される。

$$i_{sb}^i = i_{sb}^{i-1} - \frac{\Delta V^{i-1} - \Delta V^i}{\Delta x B^i \Delta t} \quad (44)$$

$$i_{sbk}^i = i_{sbk}^{i-1} - \frac{\Delta V^{i-1} J^{i-1} f_{bk}^{i-1} - \Delta V^i J^i f_{bk}^i}{\Delta x B^i \Delta t} \quad (45)$$

ここで、添字*i*および*i-1*はそれぞれ計算点*i*および*i-1*に関する値であることを示している。ただし、河床崩壊の影響を考慮した i_{sb}^i ならびに i_{sbk}^i は、河床変動と河床粒度の変化を求める際のみを使用し、流れを計算する際には i_{sb}^{i-1} と i_{sbk}^{i-1} を用いている。

2. 3 で述べたように、デルタ先端では粗い粒子が先端の法面にそって転がり落ち、デルタ下端の緩斜

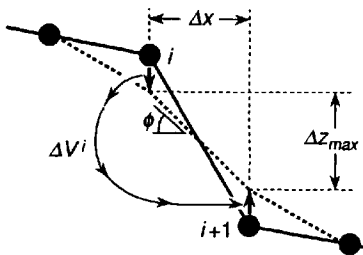


Fig. 9 Transfer of the bed material due to a landslide

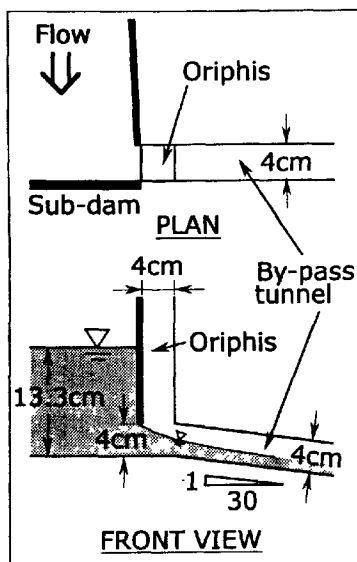


Fig. 10 Sediment removing system composed of a by-pass tunnel, syb-dam and introductory reach.

面に至って堆積する。この効果を計算に反映させるため、以下のような条件を新たに設定している。すなわち、河床勾配が0.35以上の地点では、河床表面の平均粒径の2倍よりも大きい粒子の堆積は起こらないものとしている。これは、河床表面の凹凸が当該粒子の粒径よりも十分に小さい場合には、抵抗が小さいために粒子が転がり落ちるからである。いま、計算点*i*がこの条件を満たしているとする、次式により堆積速度を修正する。

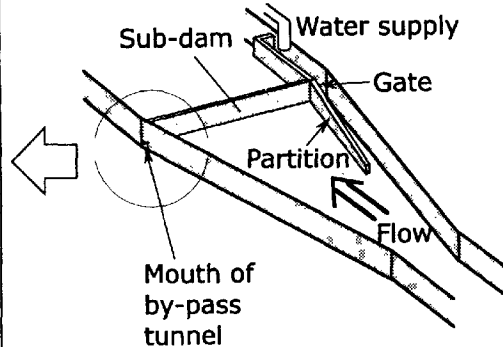
$$\left. \begin{aligned} i_{sbk}^{i+1} &= 0 \\ i_{sbk}^{i+1} &= i_{sbk}^{i+1} + i_{sbk}^i \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

3. 2 計算条件

上述の数値シミュレーションモデルの妥当性を検証するために、2. に示した水路実験への適用を試みる。給砂材料の粒度分布はFig. 3に示された実験条件にあわせている。 d_1 のみを細粒分とし、 $d_2 \sim d_9$ は粗粒分と考えている。砂の内部摩擦角 ϕ は0.75、砂礫の密度 σ は2.65g/cm³、堆積速度式(式(19))の係数 δ_d は0.04、侵食速度式(式(10))の係数 K は0.5としている。

水路上流端からの供給流量は3000cm³/s、給砂量は22cm³/sであり、 $t=180$ 分まで計算を行っている。下流端水位は副ダムの高さと越流水深をもとに決定し、副ダムから下流側100cmの位置における水位が変動しないものとしている。計算点の間隔 Δx は10cmとし、計算時間ステップ Δt は最大流速に応じて0.1秒から0.0025秒の範囲で変化させている。

計算は2ケース行い、Case2は3. 1(4)に示したデルタ肩における粗礫の転落を考慮したケースであり、Case1はその効果を考えないケースである。



3. 3 計算結果と考察

Fig. 4に示されたデルタの進行状況を見ると、両ケースの差はほとんど認められない。実験ではデルタが必ずしもダム軸に平行に進行せず、3次元的な形状をしていたため、 $t=90$ 分における計算値は実験値とあまり一致していないが、それ以外では両者の形状はよく似ているといえる。

Fig. 6の深さ方向の粒度分布を見ると、Case2の計算結果が実験における逆グレーディング傾向を比較的良好に再現できていることが分かる。デルタ肩における粗い粒子の転がり落ちを考慮しないCase1では逆グレーディング傾向を再現できていない。これらのことから、Case2のモデルが幅広い粒度分布を持つ材料の堆積過程をかなり良好に再現できるものであることがいえる。

4. 堆砂デルタの侵食過程に関する数値シミュレーション

Fig. 10に示すような放流ゲートを備えた副ダムとバイパストンネルとを組み合わせた排砂システムに関する著者らの研究（高橋・中川・里深，2000）においては、堆砂デルタの侵食過程に関する2次元数値シミュレーションが試みられている。しかしながら、この計算では湾曲部外岸の側岸侵食を考慮していなかったため、実験結果を十分に再現することはできなかった。そこで、本研究では側岸侵食機構を2次元河床変動モデル（高橋・里深，1999）に組み込むことにより、堆砂デルタの侵食過程を再現可能なモデルを構築する。ただし、この計算においては、河床材料の粒度分布は考慮せず、一様な粒径を持つものとする。

4. 1 支配方程式

二次元的な場を考え、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸を取ると、流れの連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} - i = 0 \quad (47)$$

と表われ、 x, y 方向の運動方程式はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + \\ 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (49)$$

となる。ここに、 u : x 方向の平均流速、 v : y 方向の平均流速、 p : 圧力、 ϵ : 渦動粘性係数、 i : 侵食・堆積速度、 τ_x, τ_y : x, y 方向の河床せん断力である。河床せん断力はマニング則を用いて算定し、圧力に関しては静水圧近似を行っている。

河床の連続式は以下のように表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (50)$$

ここに、 i : 河床の侵食・堆積速度であり、平衡土砂濃度 C_∞ と土砂濃度 C を用いて、次のように表わすことができる。

[$C_\infty - C > 0$, 侵食傾向のとき]

$$i = \begin{cases} \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_*} |u_* - u_{*c}| & (u_* > u_{*c}) \\ 0 & (u_* \leq u_{*c}) \end{cases} \quad (51)$$

[$C_\infty - C \leq 0$, 堆積傾向のとき]

$$i = \begin{cases} \delta_d \frac{C - C_\infty}{C_*} |u_* - u_{*c}| & (u_* < u_{*c}) \\ 0 & (u_* \geq u_{*c}) \end{cases} \quad (52)$$

ここに、 δ_e : 侵食係数、 δ_d : 堆積係数、 C_* : 堆積土砂の容積土砂濃度、 u_* : 摩擦速度、 u_{*c} : 限界摩擦速度である。平衡土砂濃度 C_∞ は芦田・道上（1972）の式による平衡流砂量を流量で除することにより求めている。流砂の連続式は次のように表わされる。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Ch u'}{\partial x} + \frac{\partial Ch v'}{\partial y} - i C_* = 0 \quad (53)$$

ここに、 u' : x 方向の土砂濃度の輸送速度、 v' : y 方向の土砂濃度の輸送速度であり、

$$u' = \sqrt{u^2 + v^2} \cos(\beta_1 + \beta_2) \quad (54)$$

$$v' = \sqrt{u^2 + v^2} \sin(\beta_1 + \beta_2) \quad (55)$$

と表される。 β_1 は主流方向（ s 軸）と x 軸とがなす角であり、

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{v}{u} \quad (56)$$

である。 β_2 は流砂の輸送方向と主流とがなす角であり、

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{q_{bn}}{q_{bs}} \quad (57)$$

と表される。ここに、 q_{bs} : 主流方向の流砂量、 q_{bn} : 主流に直交する方向（ n 軸方向）の流砂量である。長谷川（1983）の式を用いることにより、 q_{bn} は次のように表される。

$$q_{bn} = q_{bs} \left(\frac{h}{r} N_* + \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (58)$$

ここに、 r : 流れの曲率半径、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 τ_* : 無次元掃流力、 N_*, μ_s, μ_k : 係数である。

流れの曲率半径 r は、次のShimizu & Itakura（1991）の式により求めている。

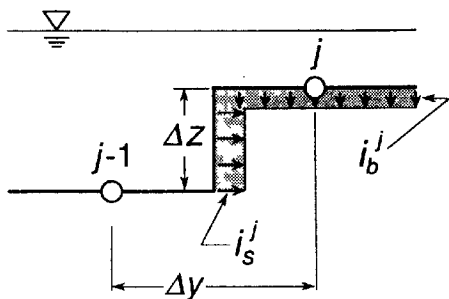


Fig. 11 Schematic of the bank erosion velocity

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (59)$$

湾曲部外岸においては、側岸斜面に大きなせん断力が作用し、活発な側岸侵食が生じる。このような側岸侵食の影響を考慮せずに計算を行ったところ、実験結果に比べ侵食量がかなり小さくなることが判明した（高橋ら，2000）。そこで、本研究ではFig.11に示すような側岸侵食速度 i_s を新たに導入することにした。すなわち、隣り合う2つの計算点の河床位の差が Δz であるとき、河床位の高い方（計算点 j ）の河床侵食速度 i_b^j （式（51）によって計算される値）に対して、側岸侵食の影響分を付加するものとしている。

$$i^j = i_b^j + \frac{\Delta z}{\Delta y} i_s^j \quad (60)$$

ここに、 Δy ：計算点の間隔である。なお、この侵食速度の補正は上・下流と左右の4方向に対して行っている。

芦田・江頭ら（1983）の研究によると、側岸侵食速度 i_s は、側岸に働く無次元せん断力を τ_{*s} とすると、

$$i_s = a_1 \tau_{*s} \left(1 - a_2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*s}} \right)^3 \quad (61)$$

$$a_1 = 0.01 \sqrt{sgd} \quad (62)$$

$$a_2 = 2 \sqrt{\frac{1 - (1/\tan \phi)^2 (\partial z / \partial n)^2}{1 + (\partial z / \partial n)^2}} \quad (63)$$

と表される。

いま、側岸に作用する摩擦速度 u_{*s} が底面付近の流速 U_L に比例すると考えるならば、

$$u_{*s} = a_3 U_L \quad (64)$$

となり、側岸に働く無次元せん断力 τ_{*s} は、

$$\tau_{*s} = \frac{u_{*s}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{a_3^2 U_L^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad (65)$$

と表される。ここに、 d ：粒径である。

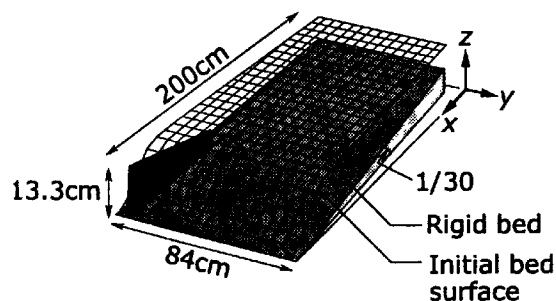


Fig. 12 Initial bed profile for the calculation

底面付近の流速は主流速 U と2次流流速 V を用いて、以下のように求めている。

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (66)$$

$$V = -\frac{h}{r} N_* U \quad (67)$$

$$U_L = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{1 + \frac{h^2}{r^2} N_*^2} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (68)$$

以上の支配方程式をスタッガードスキームを用いて差分化し、シミュレーションモデルを構築している。

4. 2 計算条件

堆砂デルタの侵食過程に関する水路実験（高橋・中川・里深，2000）に対して本計算モデルを適用した。この実験には2．に示された混合砂礫の堆積過程に関する実験と同じ水路が用いられている。平均粒径1.5mmのほぼ一様な砂を用いて、副ダムのゲートから上流へと放流したときのデルタの侵食過程を追跡している。

計算の初期河床形状としては、Fig.12に示すようにデルタの先端が副ダムに到達したときの形状を採用している。副ダムゲートからの供給流量は750cm³/s、計算格子のサイズは水路縦断方向（ x 方向）に2cm、横断方向（ y 方向）に1cmとし、計算の時間ステップは0.005秒としている。河床空隙率は0.4、マニングの粗度係数は0.02、式(51)、(52)の侵食係数と堆積係数はともに0.6とし、砂の安息角は30°、係数 N_* は7、 a_3 は1としている。

トンネル呑口における流出流速としては、勾配1/30に対応する擬似等流流速を与え、副ダムのゲートにおける流入流速としては、従来の計算（高橋・中川・里深，2000）と同様に流入流量と水深をもとに決定している。なお、実験において、せき上げの影響のため、トンネル呑口周辺の河床がトンネル底面より高くなっていたことを考慮して、計算においても、トンネル呑口周辺部の河床位を5cm高くしている。

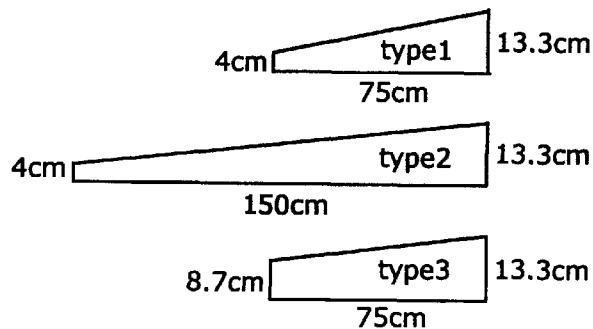


Fig. 13 Shape of the partitions

副ダムの放流ゲート上流に設置する隔壁の形状として、Fig. 13に示すような3つのタイプを設定し、隔壁を設置しない場合と併せて4ケースの計算を行っている。

4. 3 計算結果と考察

Fig. 14およびFig. 15にはそれぞれType1およびType3のケースにおけるデルタの侵食状況に関する計算結果が実験結果と共に示されている。これらを見ると、湾曲部外岸の側岸侵食を考慮することにより、デルタの侵食過程をかなり良好に再現できることが分かる。

Fig. 16には各ケースにおけるバイパストンネルからの流出流砂量に関する計算結果が示されている。通水直後の流出流砂量がうまく再現できていないのは、計算の初期河床形状として平均的なデルタ形状を用いたためであると思われるが、それ以外の部分では、本モデルは実験結果をうまく再現できているといえよう。

今後、このモデルを用いて様々な隔壁形状のもとで計算を行うことにより、より効果的な排砂システムを構築することができるものと考えられる。

5. ゲート付き隔壁の効果に関する検討

4. に示された水路実験や数値計算の結果より、ゲートからの放流水が隔壁上を横断方向に越流する位置は、時間の経過と共に上流側へと移動すること、また、この越流位置の移動がデルタの侵食過程に大きな影響を与えていることが明らかになっている。例えば、越流位置の移動が早すぎると、副ダムの近くの土砂は侵食されずに取り残されることになる。

隔壁と水路側壁に挟まれた領域（導流水路と呼んでいる）の河床が侵食されることにより、隔壁上の越流位置の移動が生じているため、これをコントロールすることは困難である。そこで、Fig. 17のType N

のように、隔壁にも開閉可能なゲートを設置することにより、放流位置を任意に変えることができるようにしてみた。ここでは、水路実験の結果を基に、比較的条件が似通っている前述のType 3の結果と比較しながら、その効果について検討する。

Fig. 2の実験水路にFig. 10の排砂システムを設置し、Fig. 17のType Nの隔壁を用いて実験を行った。通水開始後90分までは隔壁のゲートはすべて閉じておき、その後、上流側のゲート（Fig. 17の1番）から順に下流側へ10分おきに開放した。なお、ある時刻において開放しているゲートは常に一ヶ所である。通水開始後130分の時点で再度すべてのゲートを閉めて、導流水路の上流端から放流した。

Fig. 18にはバイパストンネルからの流出土砂量に関する実験結果が示されている。この図を見ると、ゲートの操作に伴い、流出流砂量が急増したことが分かる（ $t=90$ 分以後）。Fig. 19に堆砂デルタの侵食状況を示している。Type 3では斜線部Aに土砂が一部取り残されていたが、Type Nではゲート操作により強制的に放流位置を変化させたため、この部分の土砂も侵食されている。この時、一部の土砂は斜線部Bの領域に堆積したので、これを排出するため $t=130$ 分において導流水路の上流端から再度放流した。

Type 3とType Nの総排出土砂量を比較してみると、Type Nの方が17%程度多くなっており、隔壁にゲートを設けることが土砂の排出に有効な方法であることが分かった。

6. おわりに

本研究では、混合粒径材料の堆積過程に関して水路実験ならびに数値シミュレーションによる検討を行うとともに、堆砂デルタの侵食過程に関して数値シミュレーションを行った。本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 幅広い粒径範囲をもつ混合粒径材料が貯水池などに流入して堆積する場合、ウォッシュロードや浮遊砂として輸送されてきた細かい土砂が一番深い層に堆積し、その上を掃流砂として輸送されてきた砂礫が明瞭なデルタを形成しながら堆積する。
- 2) デルタの内部を見ると、一番深い層（ウォッシュロードや浮遊砂が堆積した層のすぐ上の層）に最も粗いものが堆積し、上の層ほど小さな粒子が堆積するという、いわゆる逆グレーディング傾向が認められる。
- 3) ダイナミックウェーブモデルを用いた一次元の河床変動計算により、混合粒径材料

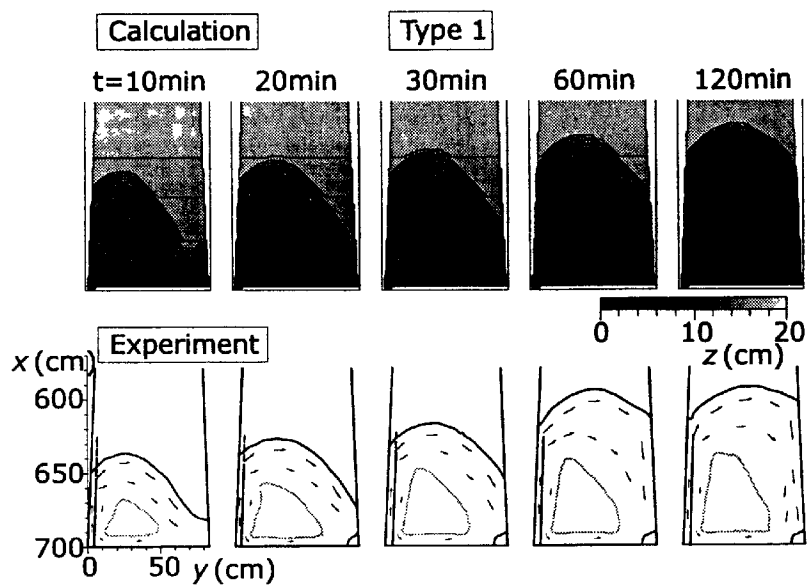


Fig. 14 Temporal variation of the bed topography in Type 1

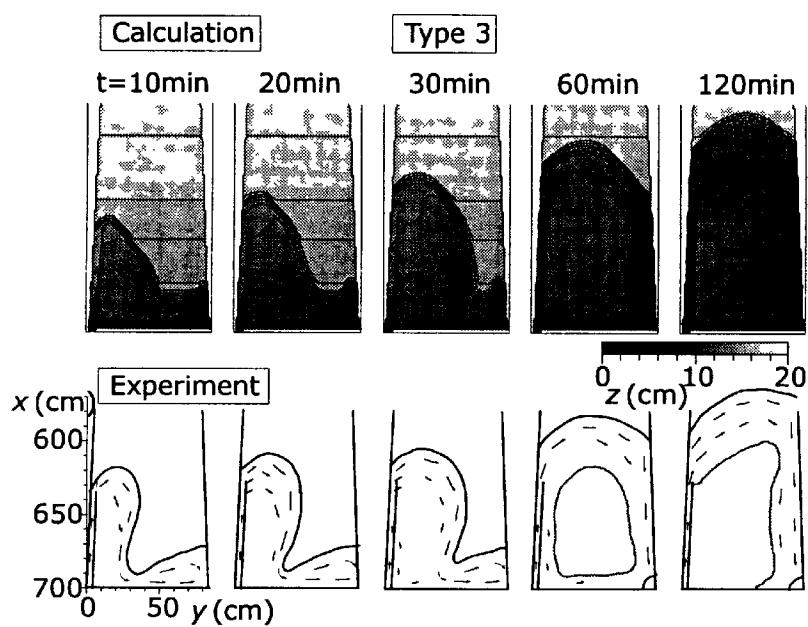


Fig. 15 Temporal variation of the bed topography in Type 3

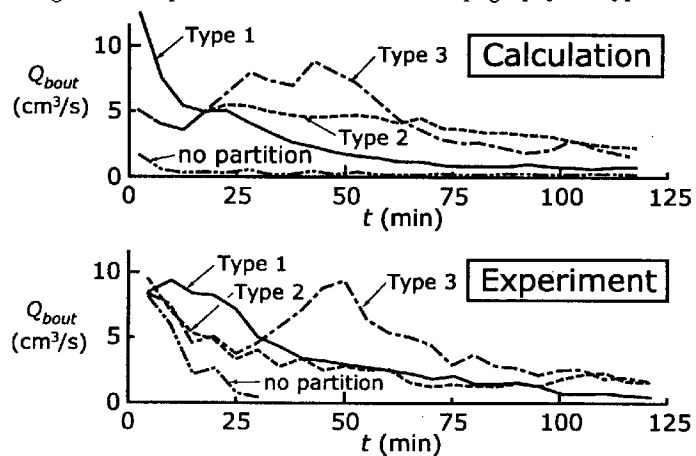


Fig. 16 Temporal variation in the sediment discharge at the by-pass tunnel

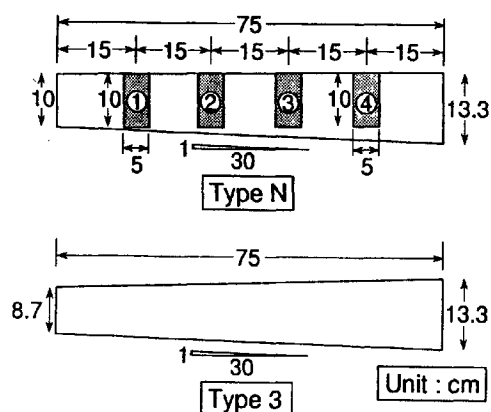


Fig. 17 Shape of the partitions

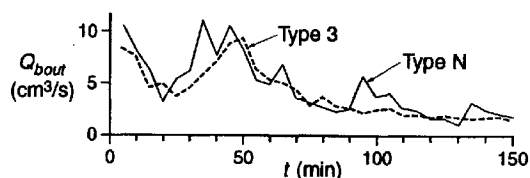


Fig. 18 Temporal variation in the sediment discharge at the by-pass tunnel

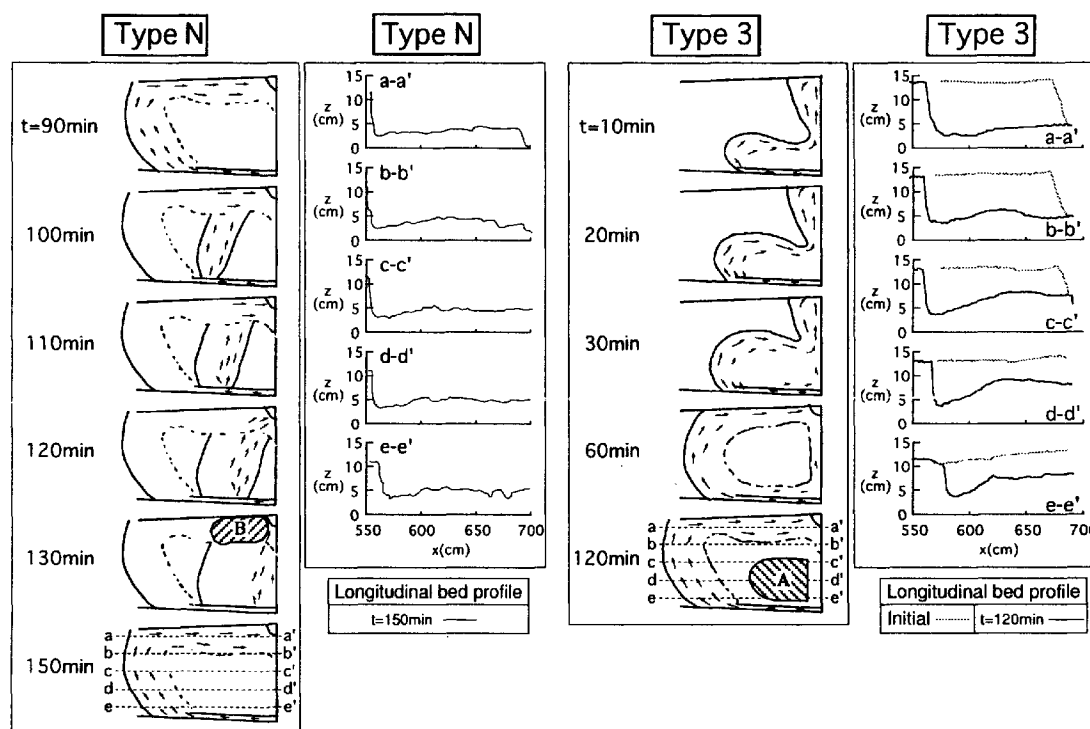


Fig. 19 Temporal variation of the channel patterns and the longitudinal bed profiles

の堆砂過程を良好に再現できる。また、堆砂デルタの肩部において粗い粒子が転がり落ちることを考慮すれば、逆グレーディングを再現することが可能となる。

4) 湾曲部外岸における側岸侵食を考慮した二次元河床変動モデルにより、副ダムからの放流による堆砂デルタの侵食過程を良好に再現できる。

5) 隔壁に複数のゲートを設置し、放流位置を変化させることにより、堆砂デルタの侵食量を増加させることができる。

参考文献

- 芦田和男・道上正規 (1972): 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.
- 芦田和男・江頭進治・加本 実 (1983): 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 第26号 B-2, pp.353-361.
- 高橋 保・井上素行・中川 一・里深好文 (2001): 山岳流域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測, 水工学論文集, 第45巻, pp.841-846.
- 高橋 保・里深好文 (1999): 網状流路の流路変動に

- 関する数値シミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第42号 B-2, pp.189-200.
- 高橋 保・中川 一・里深好文 (2000): 貯水池の水を利用した堆砂防止法の研究, 京都大学防災研究所年報, 第43号 B-2, pp.275-285.
- 高橋 保・中川 一 (1992): 自然ダムの決壊によって形成される洪水の予測, 京都大学防災研究所年報, 第35号 B-2, pp.231-248.
- 長谷川和義 (1983): 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文.
- Shimizu, Y. and Itakura, T. (1991): Calculation of flow and bed deformation with a general nonorthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp.241-248.

Prediction of Reservoir Sedimentation and Development of Reduction System for the Sedimentation

Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA and Yoshifumi SATOFUKA

Synopsis

We propose a one-dimensional simulation method in order to predict a reservoir sedimentation which causes imbalance of sediment runoff and spoils the function of reservoir. The model can calculate the temporal variation in the longitudinal bed profile and the grain size distributions in a surface layer and a lower layer in deposits. The simulation model is verified by the data obtained from a flume experiment.

We have already proposed a reduction system for sedimentation which is composed of a by-pass tunnel and a sub-dam. In the system, the transported sediment is stored in upstream area of the sub-dam during a flood, and after the flood, the delta is eroded by the flow discharged from a gate equipped to the sub-dam and the sediment is transported into the by-pass tunnel. We develop a new two-dimensional simulation model in which the bank erosion is taken into account, and apply this model to the delta erosion process.

Keywords: reservoir sedimentation; delta formation; erosion process of a delta; sediment transportation by a by-pass tunnel; two dimensional numerical simulation