

貯水池逆流システムによるフラッシング排砂

SEDIMENT FLUSHING USING A REVERSE-FLOW SYSTEM

高橋 保¹・中川 一²・里深好文³

Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA and Yoshifumi SATOFUKA

¹ フェロー会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Reservoir sedimentation has strong influence not only on the function of reservoir but also on the balance of sediment through the river system. Although various methods for controlling reservoir sedimentation are available, the effectiveness and applicability are limited. Therefore, some new methods should be developed. We propose a new flushing system that is a combination of a by-pass tunnel and a sub-dam. The sub-dam is a small dam constructed at a little downstream of the upstream end of reservoir and equipped with a gate and an introductory channel. During a flood, the sub-dam is submerged beneath the reservoir water, and sediment is deposited upstream of the sub-dam forming a delta. After the flood, water stored upstream of the sub-dam is drained away through the by-pass tunnel. Then, the delta is eroded by the flow introduced from the gate of the sub-dam. The eroded sediment is transported into the by-pass tunnel. Efficiency of the introductory channel to control erosion process is investigated by flume tests. Two-dimensional numerical simulation is also carried out to reproduce the experimental results.

Key Words : Reservoir sedimentation, sediment flushing, erosion of delta, by-pass tunnel, two-dimensional numerical simulation

1. はじめに

貯水池における著しい堆砂は、貯水池の機能を損なうだけではなく、流域における流砂のバランスに対して大きな影響を与える。そのため、近年、水系一貫の土砂管理という観点からも貯水池堆砂に対する対策の必要性が高まりつつあり、すでに一部の貯水池においては、土砂生産・流出の抑制や堆砂の浚渫・掘削、バイパストンネルや排砂ゲートを用いた排砂といった堆砂対策が積極的に行われている。

排砂ゲートを用いる方法は、自然の力、すなわち流水による土砂輸送能を活用するという点で優れた方法であるといえるが、排砂時に貯水位を十分に低下させる必要があるため、水位の低下および回復が問題なく行えるダムでなければ適用することは難しい。

バイパストンネルを用いる方法は、土砂を貯水池へ入れることなくダム下流に送るため、ダム建設以前と大きく変わることのない土砂環境の維持が期待できる。しかしながら、トンネルの大きさには限界があるため、出水時の流量がトンネルの容量を超えるような大規模な流域

をもつダムではその効果に疑問が残されていた。そこで、著者らはそのような大規模な貯水池においても適用可能な、次のような堆砂排出システムを提案している^{1), 2)}。

①貯水池流入部に放流用のゲートを備えた副ダムと、バイパストンネルの呑み口を設ける。②トンネルの容量を超えるような出水時には、上流からの流入土砂を一旦副ダムの上流域に堆積させる。③流入流量が減少し、トンネルの容量を下回った時点で、ゲート操作により貯水池内の水を上流方向へと逆流させる。④ゲートからの放流水によって堆積土砂を効率的に侵食させ、トンネル呑み口へと導いて、ダム下流に排出する。

上記の土砂排出システムを継続的に稼働させるためには、副ダム上流の堆砂容量を効率よく回復させる必要がある。そこで本研究では、副ダム放流ゲートから上流方向への放水による堆砂デルタの再侵食過程ならびに排砂トンネルへの土砂の導流過程に関して、水路実験および数値シミュレーションを行っている。

2. 貯水池内の水を利用した堆砂の排出に関する水路実験

(1) 実験装置

本研究では、図-1に示す長野県の高瀬ダムを想定し、貯水池の上流端から400m下流の地点に高さ13.3mの副ダムを設けている。実験には図-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の区間では水路幅は50cmである。下流4mの区間においては下流方向に徐々に水路幅が広がっており、下流端でその幅は83.7cmとなっている。図-3に示すように、下流端には高さ13.3cmの副ダムが設置され、右岸側に放流用のゲート(幅5cm、全開時の深さ10cm)と導流用の隔壁が設けられている。隔壁と右岸側壁との間隔は5cmである。また、左岸側壁の副ダム直上流部には高さ4cm、幅4cmの排砂トンネルの呑み口が設けられ、そこから排砂トンネルにつながる構造となっている。実験水路および排砂トンネルの勾配は1/30である。

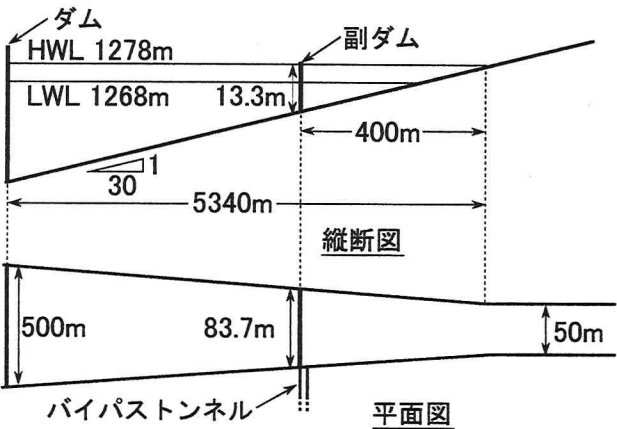


図-1 高瀬貯水池縦断面図

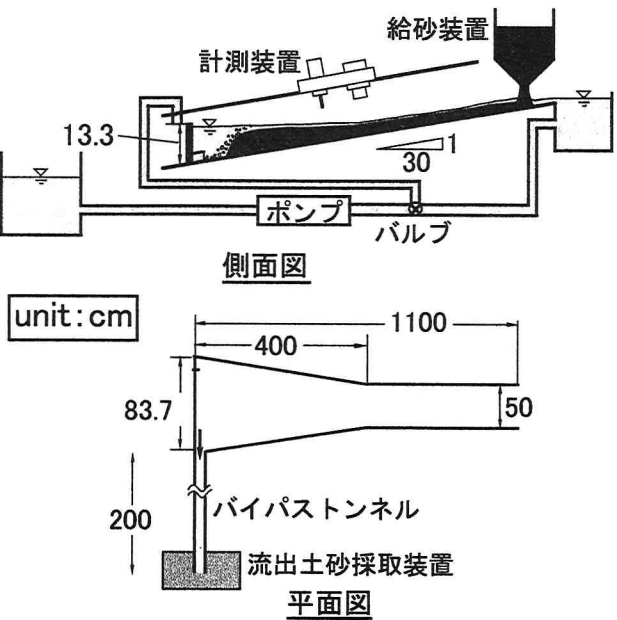


図-2 実験装置

(2) 実験条件

実験の初期堆砂形状としては、堆砂デルタの先端が副ダム地点に到達した状態を考えている(図-4参照)。この河床形状は、図-2の水路上流端から定常的な給水と給砂(流量:3000cm³/s, 給砂量:20cm³/s)を行うことにより得られたものである。実験には平均粒径0.15cmのほぼ一様な砂を使用している。

本実験においては、副ダム右岸側の放流ゲートから上流向きに750cm³/sの給水を行った。この給水量はトンネルが流せる最大流量とほぼ等しい。なお、水路上流からの給水はしていない。

ゲートからの放流水を上流側へと導き、効率的に堆砂デルタを侵食させるために、ゲートの出口から右岸側面と平行に図-5に示すような種々の隔壁を設置した。また、隔壁を設置しない場合についても実験を行っている。

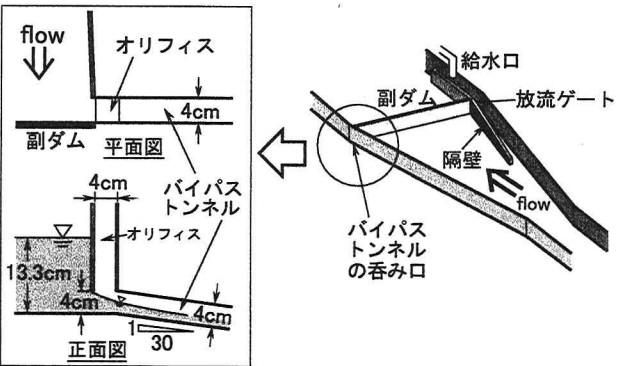


図-3 排砂システム

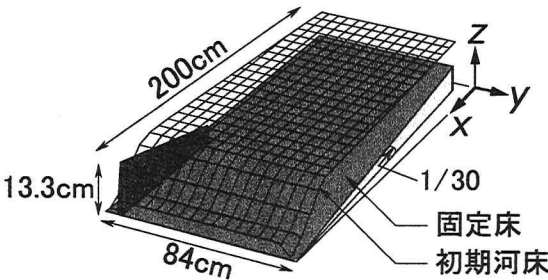


図-4 初期河床形状

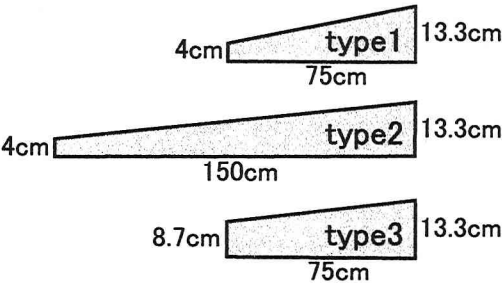


図-5 隔壁の縦断形状

(3) 実験結果と考察

図-6 には、各ケースにおける排砂トンネルからの流出土砂量の時間的変動に関する実験結果が、後述する計算結果と併せて示されている。

図-7 には、Type1 と Type3 の隔壁を設置したケースの堆砂デルタの侵食過程ならびに流況に関する実験結果が、計算結果とともに示されている。これらの図をもとに Type1 におけるデルタの侵食過程を説明してみよう。

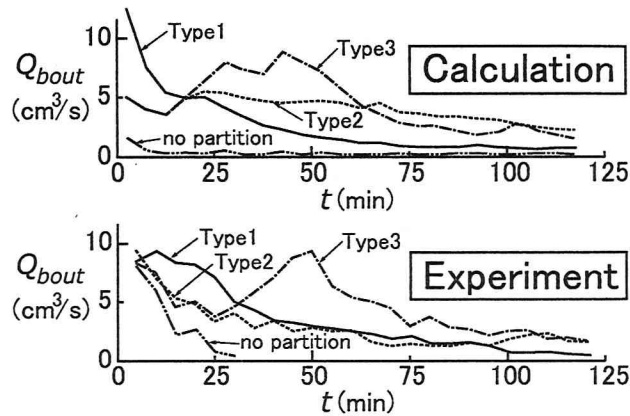


図-6 流出土砂量の時間的変動

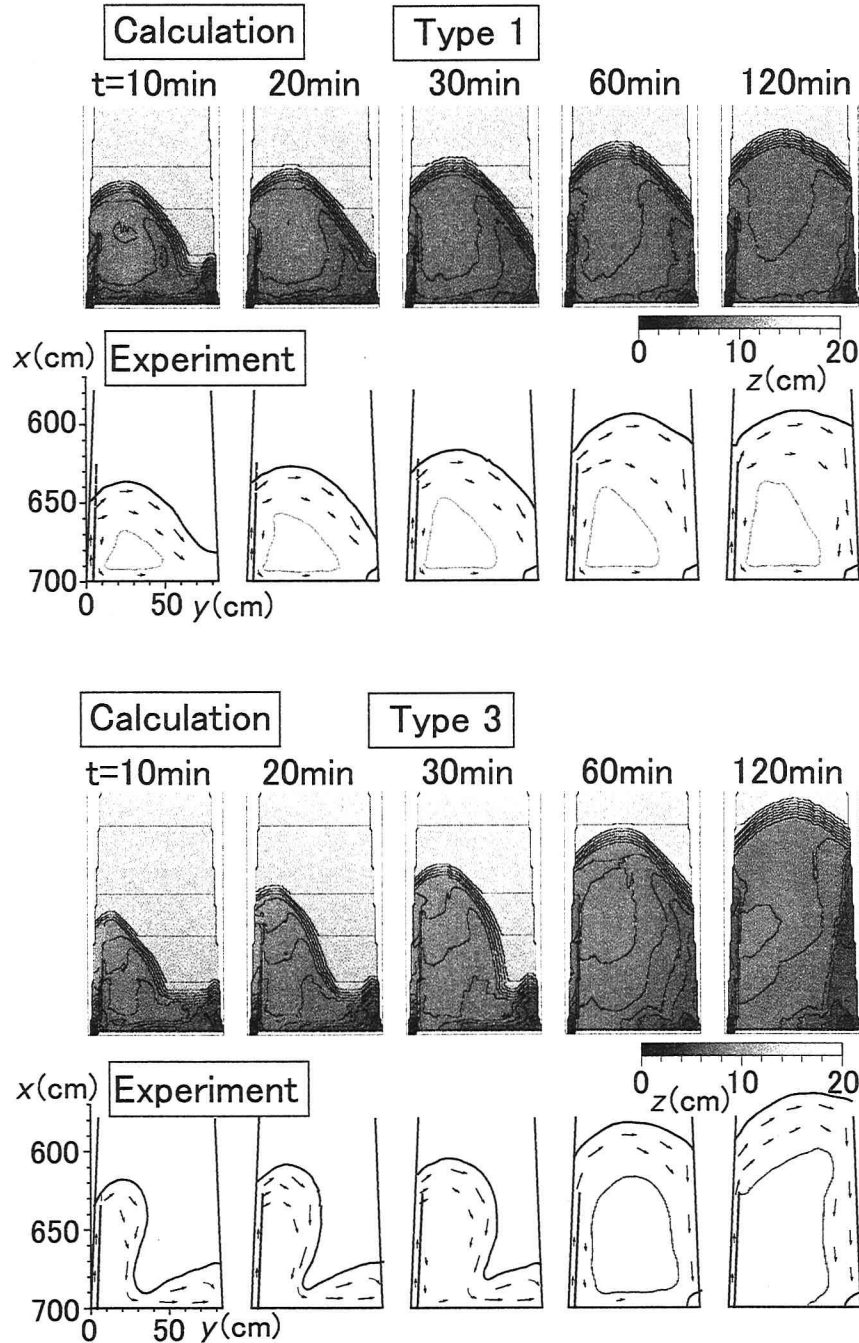


図-7 堆砂デルタの侵食過程

と表され, x, y 方向の流水の運動方程式はそれぞれ,

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

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。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (4)$$

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]

$$i = \begin{cases} \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_*} |u_* - u_{*c}| & (u_* > u_{*c}) \\ 0 & (u_* \leq u_{*c}) \end{cases} \quad (5)$$

$[C_\infty - C \leq 0$, 堆積傾向のとき]

$$i = \begin{cases} \delta_d \frac{C - C_\infty}{C_*} |u_* - u_{*c}| & (u_* < u_{*c}) \\ 0 & (u_* \geq u_{*c}) \end{cases} \quad (6)$$

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・道上の式⁴⁾から得られ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。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu'}{\partial x} + \frac{\partial Chv'}{\partial y} - iC_* = 0 \quad (7)$$

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る。このような土砂濃度の輸送速度が導入された理由は, 河床の横断勾配や 2 次流の影響によって, 主流と直行する方向の流砂が生じると考えられるからである。いま, 横断方向に流砂が存在してもトータルの流砂量には変化が無いものと仮定すると, 土砂濃度の輸送速度はそれぞれ以下のように表される。

$$u' = \sqrt{u^2 + v^2} \cos(\beta_1 + \beta_2) \quad (8)$$

副ダムの放流ゲートから給水を開始すると, 隔壁高さが流れ方向 (上流方向) に小さくなっているため, 流水の一部は隔壁を越流してデルタ上を流れ, 砂礫を侵食しながら副ダムの方へと流向を変えてゆく。そして, 副ダムに到達した後, 副ダムに沿った流れとなり, 排砂トンネルの呑み口へと向かう。一方, 水路右岸側壁と隔壁の間 (以後, この部分を導流水路と呼ぶ) では, 隔壁からの横越流によって流量は減少するものの, 流れは上流の堆砂デルタの前面に衝突し, 急激に流向を変えて湾曲流れを形成する。この湾曲流れによってデルタは激しく侵食され, 侵食された土砂は排砂トンネルへと輸送される。また, 水路上流方向へ向かう流れにより導流水路内の河床は徐々に侵食され, 河床および水位の低下に伴って, 隔壁上を越流する位置が上流側へと移動してゆく。Type2, Type3 の隔壁を用いたケースについても, 堆砂の侵食過程に大きな差異は認められないが, 隔壁形状の違いに応じて越流位置の変動速度が異なるため, 土砂の侵食量に影響が現れたと考えられる。隔壁を設けないケースでは上流側への侵食はほとんど進展せず, 副ダムに沿った流路が形成されるだけであった。

Type1 と Type3 とを比較してみると, 総侵食量は Type3 が Type1 の約 1.3 倍の値となっていた。この理由としては, Type1 では上流方向への隔壁高さの減少率が大きく, 比較的早い段階で越水位置が上流へ移動したことが挙げられる。そのため, 副ダムに近い領域が一部侵食されずに残されてしまったのである。また, Type1 においては隔壁が低く, 導流水路内の侵食が進んだ段階においても常に溢水していたため, 上流方向への流量が減少し, デルタ前面の侵食が進みにくかったことも原因の一つと考えられる。

Type2 では隔壁が長いために, 導流水路内の水はすべて横越流という形で導流水路外へ溢れ出ていた。それゆえ, 湾曲流を形成する上流方向への流量が小さく, 侵食量 (流出土砂量) は他のケースに比べかなり小さな値となっている。

3. 堆砂デルタの侵食過程に関する数値計算

より効果的な隔壁の形状を明らかにするためには, 堆砂デルタの侵食過程を再現可能な数値シミュレーションモデルが有効である。そこで, 本研究では従来の二次元河床変動モデル³⁾に側岸侵食機構を組み込んだ, 新たなモデルを提案する。

(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 軸をとると, 流れの連続式は,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} - i = 0 \quad (1)$$

$$v' = \sqrt{u^2 + v^2} \sin(\beta_1 + \beta_2) \quad (9)$$

と表される。ここに、 β_1 は主流方向（ s 軸）と x 軸とがなす角であり、

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{v}{u} \quad (10)$$

である。 β_2 は流砂の輸送方向と主流とがなす角であり、

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{q_{bn}}{q_{bs}} \quad (11)$$

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⁵⁾の式を用いることにより、 q_{bn} は次のように表される。

$$q_{bn} = q_{bs} \left(\frac{h}{r} N_* + \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (12)$$

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 & Itakura⁶⁾の式により求めている。

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (13)$$

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とが、水路実験から明らかにされている。式(8)～式(13)によって、流砂の輸送方向に対する2次流や河床横断勾配の影響はすでに考慮されているものの、これだけでは湾曲部外岸の急激な侵食は説明することはできない。なぜなら、2次流等の影響で流砂の輸送方向が変化しても、輸送量そのものは変わらないと考えているからである。したがって、侵食速度そのものに2次流や河床の局所的な勾配の影響を考慮する必要がある。そこで、本研究では図-8に示すような側岸侵食速度 i_s を新たに導入している。すなわち、隣り合う計算点の河床位に差があるとき、河床位の高い方（計算点 j ）の河床侵食速度 i_b^j （式(5)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している。

$$i^j = i_b^j + \frac{\Delta z}{\Delta y} i_s^j \quad (14)$$

ここに、 Δz ：隣り合う計算点の河床位の差、 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⁷⁾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、

$$i_s = a_1 \tau_{*s} \left(1 - a_2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*s}} \right)^3 \quad (15)$$

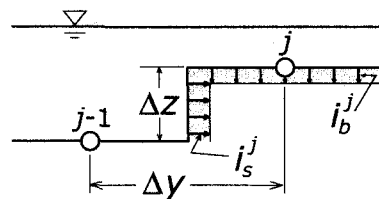


図-8 定義図

$$a_1 = 0.01 \sqrt{sgd} \quad (16)$$

$$a_2 = 2 \sqrt{\frac{1 - (1/\tan \phi)^2 (\partial z / \partial n)^2}{1 + (\partial z / \partial n)^2}} \quad (17)$$

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、

$$u_{*s} = a_3 U_L \quad (18)$$

となり、側岸に働く無次元せん断力 τ_{*s} は

$$\tau_{*s} = \frac{u_{*s}^2}{(\sigma / \rho - 1)gd} = \frac{a_3^2 U_L^2}{(\sigma / \rho - 1)gd} \quad (19)$$

と表される。ここに、 d ：粒径である。

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

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (20)$$

$$V = -\frac{h}{r} N_* U \quad (21)$$

$$U_L = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{1 + \frac{h^2}{r^2} N_*^2} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (22)$$

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

(2) 計算条件

2に示した水路実験に対して本計算モデルを適用する。計算の初期条件としては、図-4に示された河床形状を用いている。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(5)の侵食係数と式(6)の堆積係数はともに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。

トンネル呑み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速を与え、副ダムのゲートにおける流入流速は流入流量と水深をもとに決定している¹⁾。

図-5に示した3つのタイプの隔壁を設置した場合と、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。

(3) 計算結果と考察

図-7に示された 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をみると、本モデルにより、デルタの侵食過程がかなり良好に再現されていることが分かる。

図-6の流出流砂量に関する計算結果を見ても、本モデルにより実験結果がうまく再現されているといえよう。通水直後の流出土砂量に関してはかなり実験値と異なる計算結果となっているケースがあるが、これ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。

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。

4. おわりに

本研究では、副ダムとバイパストンネルとを組み合わせた土砂排出システムの機能を明らかにする上で重要な課題となる、放流ゲートから上流方向への放水による堆砂デルタの再侵食過程ならびに排砂トンネルへの土砂の導流過程に関して、水路実験および数値シミュレーションによる検討を行った。本研究により得られた成果を以下に要約する。

1) 水路実験の結果、副ダムのゲートに接続して設けられた隔壁の形状が、堆砂の再侵食過程に対して大きな影響を持つことが分かった。

- 2) 副ダムに近い領域の土砂を効率的に侵食させるためには、隔壁を上流へ向かって急激に低くしてはならないこと、また、隔壁の長さは上流へ向かう流量が確保できる程度にする必要があることなどが明らかになった。
- 3) 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再侵食過程を良好に再現できることが分かった。

参考文献

- 1) 高橋 保・中川 一・里深好文：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. 275-285，2000.
- 2) 高橋 保・中川 一・里深好文：貯水池における混合粒径材料の堆積とその排除法，京都大学防災研究所年報，第44号B-2，2001.
- 3) 高橋 保・里深好文：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. 189-200，1999.
- 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) 長谷川和義：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，1983.
- 6) Shimizu, Y. and Itakura, T. : Calculation of flow and bed deformation with a general nonorthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp. 241-248, 1991.
- 7) 芦田和男・江頭進治・加本 実：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. 353-361，1983.

(2001. 10. 1受付)