

ダム堆砂のフラッシュ排砂に関する数値計算

九州工業大学工学部 学生会員 ○浅野 孝典, 九州工業大学大学院 学生会員 重枝 未玲  
九州工業大学工学部 正会員 秋山 壽一郎

1. はじめに

ダム堆砂に伴う貯水容量の減少が問題となっている。その対策の一つとしてダム放流によるフラッシング排砂が注目されている。ダム貯水池での堆砂や排砂時には、貯水池水位との関係で跳水を含む常射混在流が発生する場合がある。跳水を伴う流れの数値計算では、計算手法によっては、跳水のような不連続部分で数値振動が発生し、計算の継続ができなくなることがある。本研究は、跳水を伴うような常射混在流の安定した計算が行えるFDS法に基づき構築した1次元河床変動数値モデルを用い、フラッシング排砂に伴う貯水池内の河床変動に関する数値計算を行ったものである。

2. 1次元河床変動数値モデルの概要

流れの連続の式と運動方程式は式(1)で表される。ここに、 $t$  は時間、 $x$  は流下方向、 $U=(h, uh)^T$  は保存量ベクトル、 $E=(uh, u^2h+0.5gh^2)$  は流束ベクトル、 $S=(-gh(S_{ax}-S_{fx}))$  は発生・消滅項ベクトルである。ここで、 $h$ は水深、 $u$ は流速、 $g$ は重力加速度、 $S_{ax}=-\partial z_b/\partial x$ は河床勾配、 $z_b$ は基準水面からの河床高、および $S_{fx}$ は摩擦勾配である。

流砂の連続の式は式(2)で表される。ここに、 $\lambda_b$ は河床材料の空隙率、 $q_B$ は単位幅掃流砂量である。流砂量式には、式(3)のMeyer-Peter・Muller式<sup>1)</sup>を用いる。ここに $s$ は砂の水中比重、 $d$ は粒径、 $\tau_*=(u_*^2/sgd)$ は無次元掃流力、 $\tau_{*c}=(u_{*c}^2/sgd)$ は無次元有効掃流力、 $\tau_{*e}=(u_e^2/sgd)$ は無次元限界掃流力、 $u_*$ は摩擦速度、 $u_{*c}$ は有効摩擦速度である。限界摩擦速度 $u_{*c}$ は岩垣の式<sup>2)</sup>より求める。摩擦勾配はKrishnappan<sup>3)</sup>に従い式(4)で表す。ここに、 $d_s$ は平均粒径、 $R$ は径深である。また、 $a_1, a_2, a_3$ は河床形態に応じた係数であり、Manningの抵抗則を用いる場合、 $a_1=n^2g/d_{50}^{1/3}$ 、 $a_2=-1/3$ 、 $a_3=1.0$ となる。摩擦速度 $u_*$ は摩擦勾配 $S_{fx}$ により式(5)で表すことができる。ここでは無次元有効掃流力を $\tau_{*e}=\tau_*(u_*e/u_{*c})$ と近似した。

流れと河床変動相互干渉の影響は、時間スケールが大きく異なるため、小さいと考えられる。そこで、流れと河床変動を個別に解く方法を採用した。基礎方程式の離散化には、跳水を伴うような常射混在流を安定して計算できるFDS法を用いた。

3. 計算結果

本数値モデルをダム貯水池内での堆砂の実験結果<sup>4)</sup>に適用する。実験は、長さ11mの水路で行われており、粒径1.0mmの砂が初期勾配1/50で敷き詰められている。水路上流端での流入単位幅流量、単位幅給砂量および水路下流端での水深は、それぞれ0.00938(m<sup>2</sup>/s)、0.00003575(m<sup>2</sup>/s)および0.16(m)である。計算では対象領域を111個のセルで分割し、境界条件として、水路上流端で一定流量と流砂量を、下流端では水深と河床高を与えている。流れの初期条件には、河床変動を計算せずに求めた流れの定常解を与えた。計算に用いたManningの粗度係数は $n=0.015$ である。また、本数値モデルでは従来のモデル<sup>5)</sup>で問題とされていた堆砂フロント部分での数値振動の発生は認められなかった。

図-1は、計算開始から7200秒後の結果を示したものである。この図から、計算結果と実験値との間には

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + S = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_{*e} - \tau_{*c})^{1.5} \quad (3)$$

$$S_{fx} = a_1 \left( \frac{R}{d_s} \right)^{a_2} \left( \frac{u_*^2}{gR} \right)^{a_3} \quad (4)$$

$$u_*^2 = ghS_{fx} \quad (5)$$

$$q_{out} = C_h \cdot a \sqrt{2gh_s} \quad (6)$$

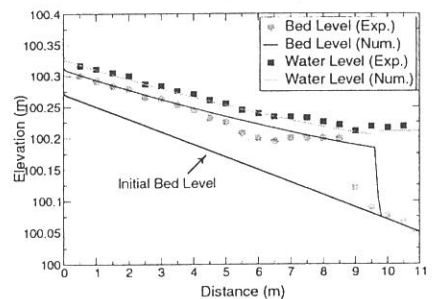


図-1 ダム貯水池での堆砂の実験値との比較

堆砂のフロントで若干の違いが認められる。これは、本数値モデルがフロント部での巻き込みのような鉛直方向の流速の影響や水中安息角の影響を考慮していないためである。また、同様な理由で  $x=5\sim 7\text{m}$  の河床のくぼみも再現できていない。しかしながら、全体的には計算結果は実験値をほぼ再現している。

次に、ダムからの放流による排砂に伴うダム貯水池内での河床変動に関する数値実験を行った。河床高の初期条件には前述したダム貯水池での堆砂の計算結果(7200秒後)を、水位および流速の初期条件には一定水位  $100.35\text{m}$  および  $0\text{m/sec}$  を与えた。境界条件としては、上流端では一定流量および平衡流砂量、下流端では境界の一つ前のセルの水深と河床高を与え、その水深  $h_s$  を用いてゲートから流出する単位幅流量を式(6)より求めた。ここに、 $C_h$  は流量係数、 $a$  はスリット高である。計算では  $C_h=0.6$  を用いた。その他の条件は前述した堆砂計算と同様である。

図-2は、スリット高  $a=0.0325\text{m}$  とした場合の計算結果を各時間ごとに示したものである。この図から、放流により水深が低下した後、水深の浅い堆砂のフロント部分から侵食がはじまり、その土砂が流出する様子が確認できる。また、ゲートでの河床高は、いずれの時間においてもスリット幅よりも低いこともわかる。

図-3は、スリット幅  $a$  を  $0.025\text{m}\sim 0.0325\text{m}$  に変化させた時に流出される単位幅流砂量の時間変化の比較を行ったものである。この図から、いずれのスリット幅においても、流出流砂量は急激に増加した後、時間の経過とともに減少し、その後一定となること、スリット幅が大きくなるほど、流出する単位幅流砂量が多くなること、排砂が開始される時間が早くなること、スリット幅がある程度大きくなると単位幅排砂量のピーク値が変化しなくなること、などがわかる。

#### 4. おわりに

本研究では、FDS法に基づく1次元河床変動数値モデルを貯水池での堆砂の実験結果に適用した後、フラッシング排砂に伴うダム貯水池内での河床変動に関する数値実験を行った。その結果、本数値モデルが貯水池での堆砂の実験結果を再現できること、フラッシング排砂については、スリット幅に依らず流出流砂量は急激に増加した後、時間の経過とともに減少し、その後一定となること、スリット幅が大きいほど、流出する単位幅流砂量が多くなること、排砂の開始時間が早くなることなどがわかった。

今後は、平面2次元や鉛直2次元数値モデルの構築を行い、2次元的な河床変動や放流ゲート付近の流れやそこでの河床変動等についても検討する予定である。

参考文献: 1) Meyer-Peter, E. and Muller, R.: Proceedings of 2nd IAHR Meeting, 1948., 2) 岩垣雄一: 土木学会論文集, Vol.41, 1958., 3) Krishnappan, B.: Journal of Hydraulic Engineering, Vol.111, No.2, 1985., 4) 日下部重幸ら: 土木学会第50回年次学術講演会, pp.442-443, 1995., 5) (社) 砂防学会編: 山地河川における河床変動の数値計算法, pp. 102-103, 山海堂, 2000.

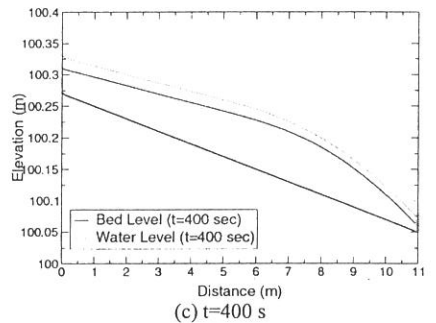
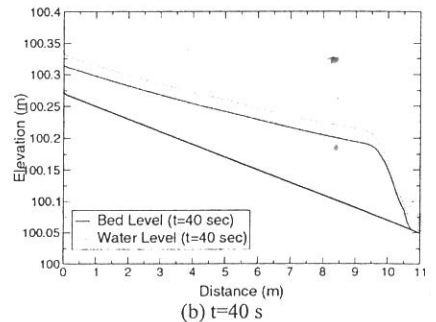
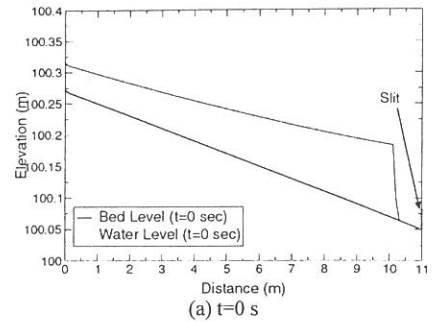


図-2 フラッシング排砂に伴う河床変動の計算結果 ( $a=0.0325\text{m}$ )

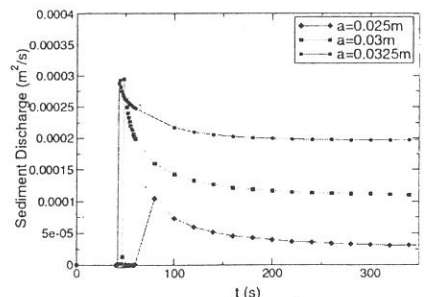


図-3 排砂量の時間変化