

ダム堆砂とフラッシング排砂の数値シミュレーション

九州工業大学工学部 建設社会工学科 秋山 壽一郎 , 日本学術振興会特別研究員 重枝 未玲

1. はじめに

堆砂対策はダム機能を持続させる上で不可欠である．その対策の一つとして，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．常射混在流の数値シミュレーションでは，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．本報は，常射混在流の安定した計算が可能な FDS 法に基づき，1次元河床変動数値モデルを構築し，ダム堆砂と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， $S=(-gh(S_{ox}-S_{fx}))$ 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， $S_{ox}=-\partial z_b/\partial x$ 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， λ_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・Müller 式¹⁾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， $\tau_{*e} (=u_{*e}^2/sgd)$ は無次元有効掃流力， $\tau_{*c} (=u_{*c}^2/sgd)$ は無次元限界掃流力， u_* は摩擦速度， u_{*e} は有効摩擦速度である．限界摩擦速度 u_{*c} は岩垣の式²⁾より求める．摩擦勾配はKrishnappan³⁾に従い式(4)で表す．ここに， d_* 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 $\tau_{*e}=\tau_*(u_{*e}=u_*)$ 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，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⁴⁾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 $0.00938(m^2/s)$ ， $0.00003575(m^2/s)$ 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⁵⁾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 $x=5 \sim 7m$ の河床の

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

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

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

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

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

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

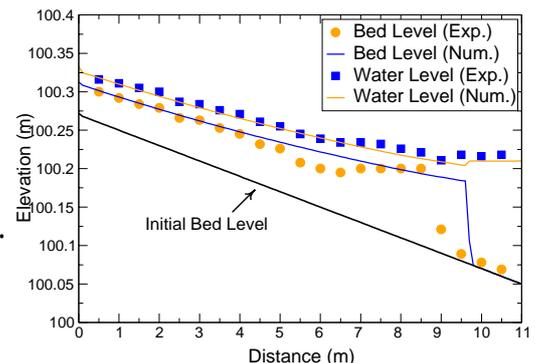


図-1 ダム貯水池での堆砂の実験値との比較

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、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。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(m)および 0(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における水深 h_s を用いて排砂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 はゲート高である。計算では $C_h=0.6$ を用いた。河床高の境界には、堆砂計算の初期河床高より小さくならない条件を与えた。その他の条件は前述した堆砂計算と同様である。

図-2 は、ゲート高 $a=0.0325\text{m}$ とした場合の計算結果を時間ごとに示したものである。この図から、放流による水位の低下とともに跳水が発生し、その後、水深の浅い堆砂のフロント部分から侵食がはじまる様子や、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ゲート高よりも低いこともわかる。

図-3 は、ゲート高 a を $0.0325\text{m} \sim 0.0375\text{m}$ に変化させた時の単位幅排砂量の時間変化を比較したものである。この図から、いずれのゲート高においても、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、排砂の初期段階 ($t < 2000$ 秒)を除いては単位幅排砂量には著しい違いがないこと、また、図中の拡大図から、ゲート高が大きいほど、排砂が開始される時間が早くなること、ゲート高がある程度大きくなると単位幅排砂量には著しい違いは生じないこと、などがわかる。

4. おわりに

本報では、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、単位幅排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、ゲート高さは排砂開始時間や排砂初期の排砂量に影響を及ぼすが、その影響は時間の経過とともに小さくなること、また、ゲート高さがある程度大きくなると、排砂量には著しい違いが生じないこと、などがわかった。

今後は、掃流砂だけでなく浮遊砂による堆積過程を考慮できるモデルに拡張するとともに、平面 2 次元への拡張を行う予定である。

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.

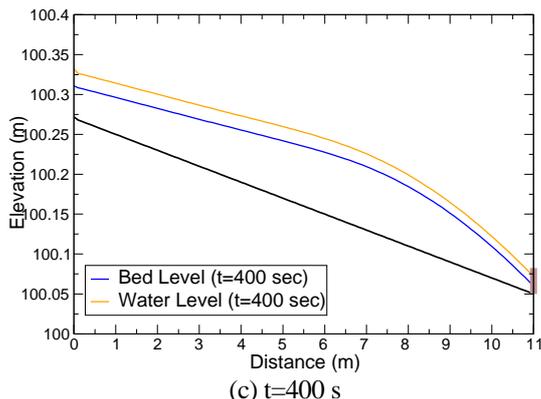
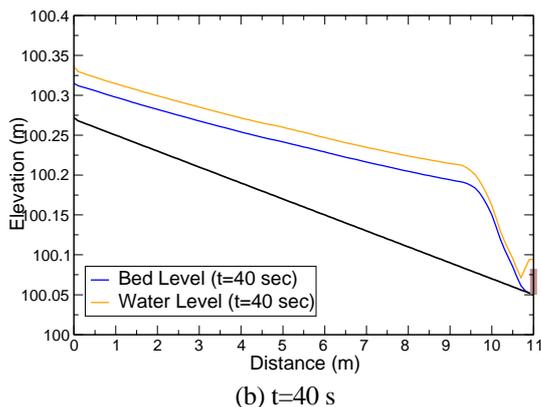
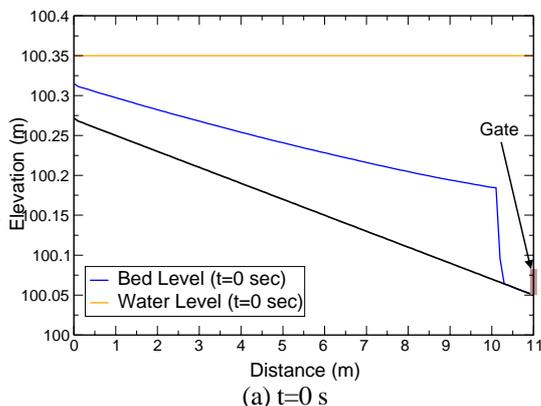


図-2 フラッシング排砂に伴う河床変動の計算結果 ($a=0.0325\text{m}$)

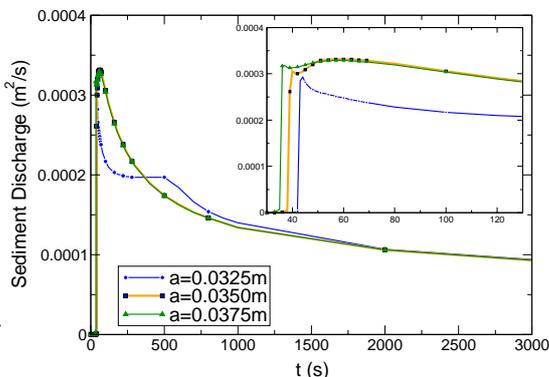


図-3 排砂量の時間変化