

平面2次元河床変動モデルによるフラッシング排砂時の河床変動と水みち形成プロセスの再現

九州工業大学工学部 学生会員 ○丸野 泰宏
九州工業大学工学部 フェロー会員 秋山壽一郎

九州工業大学工学部 正会員 重枝 未玲
九州工業大学大学院 学生会員 才木 康裕

1. はじめに

近年、ダム貯水池では、堆砂による機能低下や土砂流送の遮断が問題となっている。水系一貫とした土砂管理の立場から、ダム堆砂の河道への還元が実施されている。その解決策の一つとしてフラッシング排砂がある。著者らはフラッシング排砂時の河床、河道変動と排出土砂量の予測を目的とした平面2次元河床変動数値モデルを開発し、フラッシング排砂の実験結果に適用したが¹⁾、傾斜角度が土砂流送に及ぼす影響と、水中安息角を超えた場合に生じる土砂の崩落メカニズムを考慮していないために、流砂時の河床変動を十分な精度で再現することができなかった。本研究は、同モデルに傾斜角度が流砂量に及ぼす影響と、側岸侵食を含む安息角を超えた際の土砂崩落メカニズムを組み込むことで、フラッシング排砂時の河床変動と水みち形成プロセスの再現を試みたものである。

2. 数値モデルの概要

基礎方程式は、2次元浅水方程式と流砂の連続の式である。フラッシング排砂時には、主流方向についても無視できない河床勾配が生じるため、河床勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した式(1)の流砂量式²⁾を用いた。

$$q_{Bs} = q_B \left(\frac{\tau_{*s}}{\tau_*} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_d}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial s} \right); q_{Bn} = q_B \left(\frac{\tau_{*n}}{\tau_*} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_d}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (1)$$

流砂量式 q_B には芦田・道上の式を適用し、掃流力、限界掃流力については斜面の影響を考慮した掃流力と限界掃流力³⁾を用いた。ここに、 q_{Bs} , q_{Bn} =主流方向、主流直角方向の流砂量、 τ_* =無次元掃流力、 τ_{*c} =無次元限界掃流力、 τ_{*s} , τ_{*n} =斜面の影響を考慮した s , n 方向の掃流力、 $\tau_* = (\tau_{*s}^2 + \tau_{*n}^2)^{1/2}$ 、 μ_s =静止摩擦係数、 μ_d =動摩擦係数である。次に、局所的に斜面の水中安息角を越える場合や側岸浸食などの崩落土砂による土砂供給量をモデルに組み込んだ。水中安息角を越えるような極めて大きな河床勾配が存在する場合には、斜面崩落が生じるため、崩落土砂量 V は関根の方法³⁾に準じ、補正高さ ε を求め、式(2)より算出した。この崩落土砂量より式(3)からセル境界線の法線方向への流砂量 $q_{Collapse}$ を求めた。なお、本モデルの安息角補正は、セル境界線を挟むセル間で安息角補正を行っており、関根の方法³⁾のように、各セルの最急河床勾配方向に対して補正を行っているわけではない。

$$V = \frac{A_R}{A_L + A_R} \cdot \varepsilon \cdot A_L \quad (2) \quad q_{Collapse} = (1 - \lambda_b) \cdot \frac{V}{L \cdot \Delta t} \quad (3)$$

ここに、 $A_{R/L}$ =セル境界線の右側/左側のセル面積 L =セル境界線の長さ、 Δt =時間野刻み幅である。基礎方程式の離散化は、有限体積法に基づき行い、時間積分には Euler の陽解法を、空間積分には流束差分法を用いた。また、計算格子には非構造格子を用いた。

3. 数値モデルの検証

(1) 実験の概要

実験は、排砂ゲートのサイズの違いが排砂プロセスに及ぼす影響を調べた Case A と、貯水池形状が排砂プロセスに及ぼす影響を調べた Case B の2通りの実験が行われている。実験装置の概要を図-1に示す。水路の上流端から、一定流量 $Q_0 = 2.5 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$ の水を供給し定常状態とした後、水中比重 $s=1.65$ 、中央粒径 $d=0.75\text{mm}$ の一様砂を一定量 $Q_s=0.4 \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{s})$ で給砂し堆砂を発生させ、その後 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ のゲートを開放し、フラッシング排砂を発生させている。実験では、水路側壁の拡がり角度を4通り(Case A-1: $\alpha=5.71^\circ$, Case B-1: $\alpha=0^\circ$, Case B-2: $\alpha=1.91^\circ$, Case B-3: $\alpha=3.81^\circ$, Case B-4: $\alpha=5.71^\circ$)に変化させることで貯水池形状を変化させている。ゲート開放後から各時間で、図-2に示す測定点で水位 W_L 、河床高 z_b が、また水みち幅 W_B が測定されている。図-3に水面形と河床の経時変化の写真を示す。

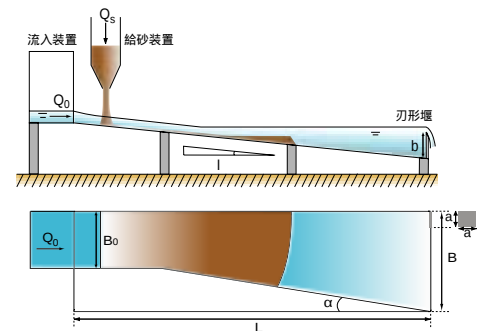


図-1 実験装置の概要と流れの定義図

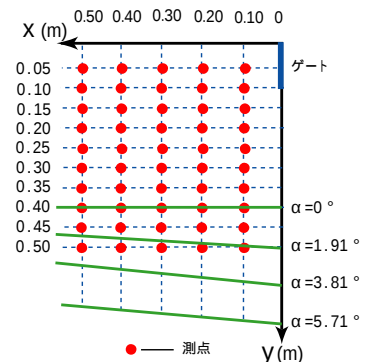


図-2 水深と河床高の測定点

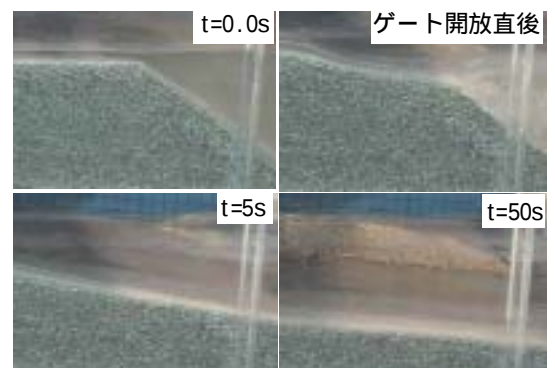


図-3 河床変動状況

(2) 計算条件

初期条件として固定床計算により水深と流速の定常解を求め、フラッシング排砂時の流れの境界条件は、上流端で一定流量、下流端のゲートで自由流出条件を、河床変動の境界条件は、上流端で流砂量($q_B=0.0(\text{m}^2/\text{s})$)を、下流端のゲートで河床高($z_b=0.0(\text{m})$)を与えた。流砂量については、境界条件として与えた河床高から水深および流速を算定し、これらより式(1)から求めた。水路壁面では閉境界条件を与えた。また、ドライベットの閾値は、 $h_v=0.001(\text{m})$ とし、水深が h_v より小さくなった場合、 $u=v=0$ とした。また、粗度係数 $n=0.014$ とした。

(3) 結果と考察

図-4 は、Case B-1 のゲート開放 40 秒後の $y=0.1\text{m}$ および $y=0.3\text{m}$ 断面の河床高と水位の解析結果と実験値との比較を行ったものである。これより、本モデルの解析結果は、 $y=0.3\text{m}$ の断面で実験値より若干大きくなっているものの、実験値を概ね再現していることが確認できる。また、前報¹⁾のモデルと比較しても、河床勾配が流砂量に及ぼす影響を組み込むことで、本モデルの予測精度が向上したことが確認できる。

図-5 は、ゲート開放 40 秒および 80 秒後について $x=0.10\text{m}$ と $x=0.30\text{m}$ 断面での水面形状と河床高の解析結果と実験値を比較したものを示したものである。ゲート開放 40 秒後については、解析結果は実験値を上回っており、80 秒後になると解析結果と実験値との差は小さくなることが確認できる。また、右岸側では河床高と水位がほぼ一致しており、ドライ状態となっていることから、水みちが形成されている様子もわかる。図-6 は、水みち幅の解析結果と実験値との比較を行ったものである。実験値は、時間の経過とともに下流側の水路中央付近で浮き州が発生した後、ゲート反対側に土砂が堆積・陸化し、ゲート側に水みちが形成されていた。解析結果はこのプロセスを再現していたが、時間にずれが生じていた。定量的な位置についても、実験結果に比べ陸化の進行が遅いなど若干の問題が残る。図-7 は、Case B-1 と 3 について、フラッシング排砂時の排出土砂の体積濃度の解析結果と実験値との比較を行ったものである。Case B-1, 3 のいずれについてもピーク値の再現性に問題があるものの、全体的な傾向は概ね再現していることが確認できる。以上のように、本数値モデルは水みち形成プロセスやそれともなう排出土砂の体積濃度をある程度再現できることが確認できるが、水位、河床高または水みち幅の定量的な再現性については改善の必要性が認められる。

ゲート開放直後は、急激な水位低下が生じるため 3 次元性の強い流れが生じる。本モデルは平面 2 次元モデルであるため、このような 3 次元性の強い流れを取り扱うことができない。これに伴い、初期段階での河床高を再現することができず、ゲート周辺の河床高が過大に評価されたために、ゲート反対側からゲートへ向かう河床勾配が小さく評価され流れが十分に発達することができなかった結果、ゲート反対側に土砂が堆積し、解析結果は実験値に比べが大きくなったと考えられる。

4. おわりに

本研究では、同数値モデルがフラッシング排砂時における水みち形成プロセスおよび排出土砂濃度について概ね再現できることを示した。今後は、ゲート付近の排出土砂量の手配を検討するとともに、本モデルで考慮されていない斜面急勾配方向を考慮した安息角補正を導入するなど、さらなる精度の改善を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 重枝未玲 秋山壽一郎 高須賀真哉: フラッシング排砂のプロセスとその数値シミュレーション, 水工学論文集, 第50巻, pp.156, 2006.
- 2) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法-治水と環境の調和した川づくり, 森北出版, 2005.
- 3) 関根正人, 小野了: 降雨による斜面浸食過程に関する数値解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.647-652, 2002.

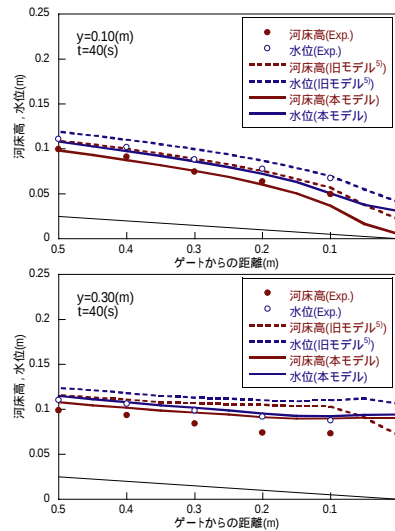


図-4 $y=0.1, 0.3\text{m}$ 断面での解析結果と実験値との比較 (Case B-1)

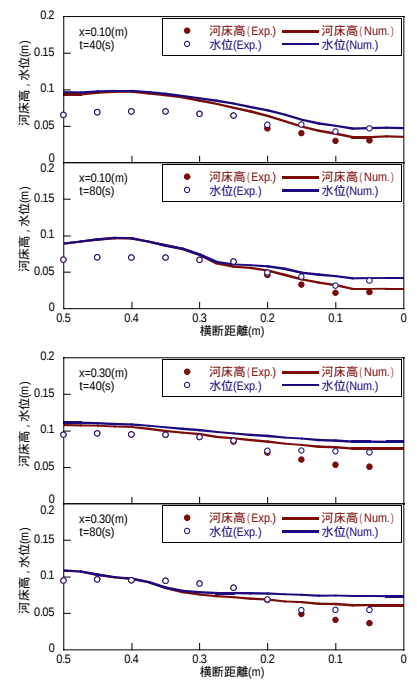


図-5 $x=0.1, 0.3\text{m}$ 断面での水面形状と河床高の比較 (Case B-3)

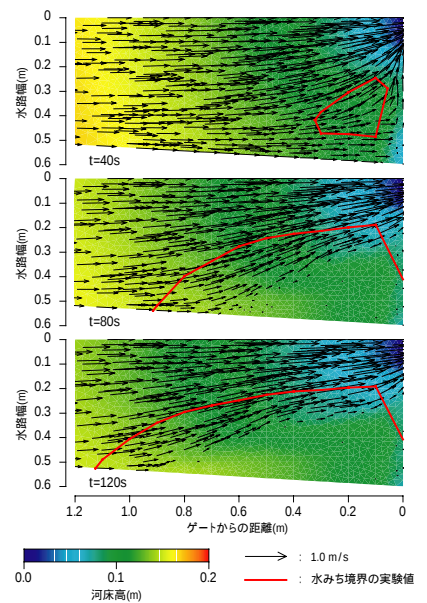


図-6 水みち形状の経時変化の比較 (Case B-3)

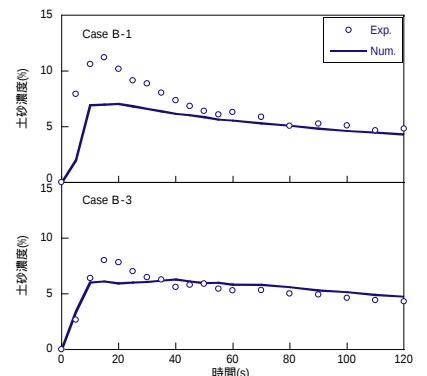


図-7 排出土砂濃度の経時時間の比較