九州工業大学大学院 正会員 重枝未玲 九州工業大学大学院 フェロー会員 秋山壽一郎 建設技術研究所 九州河川支部 正会員 坂本 洋 九州工業大学工学部 学生会員 松本 拓磨

1.はじめに

近年,河川の維持管理は本格的な計画管理へと移行している.適切な維持管理には,流域での土砂生産,常・射 流が混在する条件下を含む河道上流から下流での河床変動,河床材料の質の変化,出水規模,河床材料に応じた安 定河床・河道の形成などの複雑なプロセスの予測が必要となる.そのため,その予測を行なう数値モデルには,常・ 射流が混在する条件下での河床変動を予測することが不可欠となる.本研究は,近似リーマン解法の一つである HLL法¹⁾を用い,流れと河床変動の相互作用を考慮した新たな河床変動モデルを構築するとともに,流れと河床変 動の相互作用を無視した数値モデルとの予測精度の比較を行ったものである.

2.平面2次元河床変動モデルの概要

流れの基礎方程式は式(1)の2次元浅水流方程式である.ここ に, U=保存量ベクトル, E, F=x, y 方向の流束ベクトル, S1=河 床勾配ベクトル, S_2 =摩擦勾配ベクトル, h = 水深, u, v = x, y方向の流速,g=重力加速度,z_b=河床高,S_{fx},S_{fy}=x,y方向の 摩擦勾配である.河床変動の基礎方程式は式(2)の流砂の連続の 式である.ここに, λ_b =河床材料の空隙率, q_{bx} , $q_{by}=x$, y 方向の

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S_1 + S_2 = \mathbf{0}$$

$$U = (h, uh, vh)^T \mathbf{E} = (uh, u^2 h + 1/2gh^2, uvh)^T$$

$$\mathbf{F} = (vh, uvh, v^2 h + 1/2gh^2)^T$$

$$S_1 = (0, gh \partial z_b / \partial x, gh \partial z_b / \partial y)^T S_2 = (0, gh S_{fx}, gh S_{fy})^T$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + 1/(1 - \lambda_b) \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + 1/(1 - \lambda_b) \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = \mathbf{0}$$
(1)

(1)

AF

流砂量である.流れと河床変動の相互作用を考慮する場合は,式(1)と(2)のシステム方程式から特性速度を求め,こ の特性速度を用いて離散化する.考慮しない場合は2式を別々に離散化する.本研究では, 流れと河床変動の相 互作用を考慮した model-A, 流れについては, model-A と同じ特性速度を用い, 河床変動については相互作用を 1. 無視した model-B, 相互作用を無視した model-C の 3 つのモデルを構築した.数値流束には, model-A では式(1),

(2)のいずれにも HLL 法のものを, model-B と C では式(1)には HLL 法 のものを,式(2)には風上解法のものを用いた.

3.モデルの検証

1 次元および 2 次元ダム破壊流れの移動床実験結果に基づき, modelA~Cの検証と比較を行った.ダム破壊流れは,特性速度の取り扱 いが予測精度に及ぼす影響が顕著となる流れであるため,上記の実験 結果は、本モデルの特性速度の取り扱いを検証する上で適している。 なお,ドライベッド状態は,非常に小さな水深 h_v=0.001m を与えるこ とで取り扱うこととした.クーラン数は0.1とした.

(1)1 次元ダム破壊流れの移動床実験結果²⁾に基づく検証

実験装置は,図-1に示す水路(幅0.25m)である.水路中央にダムを設 け,ダムの上下流には,水中比重 s=1.68,平均粒径 1.82mm の砂が空 隙率 λ_b=0.47 で敷き詰められており, ゲート上流の河床は下流よりも



0.1m 高く設定されている,瞬間的にダムを取り除くことでダム破壊流れを発生させている,解析の初期条件には貯 水部の水深に 0.25m, 氾濫部の水深に 0.1m を与えた.全ての境界に閉境界条件を与えた.図-2は, model-A~Cの 水面と河床形状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,いずれのモデルについても, ダム 近傍で跳水と段波が生じ,短い区間で流れの状態が,常流,射流,常流と変化すること,この流れにより,ダム 上流の土砂が下流へと流送され, 跳水発生位置で流送された土砂が堆積するなどの実験結果を再現していること が確認できる.また,いずれの時間についても,解析結果は,実験値の傾向を再現しているが,河床が不連続に変 化するなど,実験値とは異なる区間も存在する.これは,本モデルでは土砂崩落モデルを導入していないためであ る.各モデルの解析精度を比較すると,model-A,model-C,model-Bの 順で高い.model-Aの予測精度が高いのは相互作用を考慮したためであ る.一方,model-C予測精度が低いのは,相互作用を流れのみに考慮し たため,流れと河床変動解析との間の整合性がないためと考えられる. (2)2次元ダム破壊流れの移動床実験結果³⁾に基づく検証

実験装置は,図-3 に示す水路である.x=3.0mの位置にダムを設け, ダムの上下流には,水中比重 s=1.68,平均粒径 1.82mmの砂が空隙率 $\lambda_b=0.47$ で敷き詰められている.ダム上流の貯水槽には0.25mの水を溜め, 瞬間的にダムを取り除くことでダム破壊流れを発生させている.下流端は 段落ちとなっている.初期条件には貯水部の水深には0.25m,氾濫部のド ライ状態のセルには水深 h_v を与えた.境界条件は,下流端に限界水深を, その他の境界には閉境界条件を与えた.

図-4 は, model-A の河床形状の経時変化を示したものである.これよ リ, 水路急拡部で流れが加速するため,河床が洗掘されて初期河床 0.1m よりも低くなる様子, 急拡部下流の左岸側で土砂が堆積する様子などが 確認できる.また, model-B, Cも同様な傾向であった.

図-5 は,図-3 中の P1,P3 での水位の解析結果と実験値の比較を,図 -6 は,図-3 中の2つの断面について,ダム破壊12秒後の河床形状の解析 結果と実験値との比較を行ったものである.いずれのモデルについても水

位の経時変化を十分な精度で再現していることが確 認された.一方で,河床形状については,model-B,C は実験値を概ね再現しているが,model-A については 再現できておらず,河床の最大値と最小値の平均的な 位置を通り,実験結果よりも拡散した形状であること が確認された.これは,HLL法は主流方向の最大と最 少の特性波のみを考慮しており,横断方向に流れや河 床の伝播があった場合,中間波をまたぐ物理量の変化 を一定と取り扱うため,中間波の方向に洪水や河床変 動が伝播する2次元の解析の場合では数値拡散が大 きくなる特徴を持っているためである.



図-32次元ダム破壊流れの移動床実験の概要





4.おわりに

図-6 ダム破壊 12 秒後の河床形状の解析結果と実験値との比較

本研究から,1次元ダム破壊流れに対しては,(1) model-A~C は同様な予測精度を有していること,(2) model-A が流れと河床変動の相互作用を考慮している分若干予測精度が高くなること,一方,2次元ダム破壊流れに対して は,(3) model-A~C のいずれも,流れの予測精度は同程度であるが,河床形状の予測精度は,相互作用を考慮した model-A の精度が劣ること,などが確認された.今後は,HLL 法に代わり HLLC 法を導入することで,本モデルを 中間波が考慮できるモデルに改良するとともに,河床変動の相互作用を無視したモデルとの予測精度の比較を行い たいと考えている.

謝辞:本研究は,科学研究費補助金若手研究 B(課題番号:25820225,研究代表者:重枝未玲)の助成を受け実施したものである.ここ に記して感謝の意を表します.

参考文献:1) Hatern, A., *et al.*:On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws, *SIAM Review*, Vol.25, No.1, pp.35-61, 1983. 2) Spinewine, B., Zech, Y.: Small –scale laboratory dam-break waves on movable beds, *Journal of hydraulic Research*, Vol.45, pp.267-276, 2007. 3) Palumbo, A., *et al.*:Dam-break flow on mobile bed in a channel with a sudden enlargement, *Proceedings River Flow 2008 International Conference on Fluvial hydraulics*, Cesme, Vol.1, pp.645-654, 2008.