

徳島大学大学院 学生員 ○近藤雅浩
 徳島大学 フェロー会員 岡部健士
 高松建設(株) 非会員 道畑和也

1. はじめに：砂防という観点から、落差工は、河床の洗掘を防ぎ、勾配や断面形状を安定化するなど高い治水効果を発揮している。しかし、流れの急落や瀬切れなどの問題が起こり、水生生物などの生態系に大きな影響を与えている。そこで、落差工へのスリット付設により、平水時に生態的コリドーとして機能するような水みちが形成され、これらの問題が解決されるものと期待が集まっている。

本研究では、スリット付き落差工の上流における水みち形成過程に対する2次元河床変動計算モデルを構築し、実験結果との比較を通して、その適合性を検証した。

2. 計算モデルの概要：計算モデルは、浅水流モデルと河床変動計算モデルからなる。浅水流モデルの基礎式は、式(1)～(3)の連続式と運動方程式からなる。底面摩擦項は、(4)式の Engelund の経験式から求めた2次流の底面上の流速値と水深平均流の底面上の流速値との合力方向に河床せん断力が働くとして、評価している。乱流応力は、式(5)～(7)により評価しており、 ν_t , k は簡易的に係数 α , β を用いて式(8), (9)としている。

河床変動計算モデルの基礎式は、式(10)～(12)の土砂の連続式と流砂量式からなる。流砂量式は、河床せん断力が作用する方向を s 軸として、その方向に芦田・道上の式、 s 軸と直交する方向を n 軸として、その方向に長谷川の式を適用している。

ここに x, y : 平面座標, t : 時間, M, N : x, y 方向流量

フラックス, u, v : x, y 方向流速, H : 水位, h : 水深, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, τ_{bedx}, τ_{bedy} : x, y 方向河床せん断力, $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{yx}, \tau_{xy}$: 乱流応力, ν_{sb} : らせん流による河床近傍流速, u_* : 摩擦速度, r : 流線の曲率半径, N_* : 経験的に定める係数, ν_t : 渦動粘性係数, k : 乱流エネルギー, z : 河床高, λ : 空隙率, μ : 摩擦係数, s : 砂の水中密度, d_m : 砂の平均粒径, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*sc} : s 軸方向における斜面勾配を考慮した無次元限界掃流力である。計算格子にはデカルト座標系における定型直交格子, 変数配置にはスタッガード配置を用いた。離散化方法として、移流項は、計算を安定させるために CIP 法の移流方法を参考に、考案した手法を用いている。この方法は、流速の時間ステップが1ステップ前での流量フラックスの値を、そのまま移流させるという方法である(図1)。その他の空間微分項は、2次精度の中央差分、時間については陽的な leap-frog 法で進行させた。

3. 実験概要：下流にのみスリット付き落差工を設置した長さ 5.5m, 幅 1m の水路を用いた実験を行った。落差工へ切り込みを入れるだけでは、スリット直上に強い渦構造が発生することがわかっており²⁾、実験では下流スリット部に、

$$\text{[連続式]} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

[運動方程式]

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} Mu + \frac{\partial}{\partial y} Mv = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bedx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\tau_{xx}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\tau_{yx}}{\rho} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} Nu + \frac{\partial}{\partial y} Nv = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{bedy}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\tau_{yy}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\nu_{bs} = N_* \frac{u_* h}{r} \quad (4), \quad \frac{\tau_{xx}}{\rho} = \nu_t \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k \quad (5)$$

$$\frac{\tau_{yy}}{\rho} = \nu_t \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \quad (6), \quad \frac{\tau_{yx}}{\rho} = \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$\nu_t = \alpha h \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8), \quad k = \beta (u^2 + v^2) \quad (9)$$

$$\text{[連続式]} \quad \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\text{[流砂量式]} \quad q_s = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*sc}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*sc}}{\tau_*}} \right) \sqrt{sgd_m^3} \quad (11)$$

$$q_n = q_s \left(-\frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\tau_{*sc}}{\tau_*}} \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (12)$$

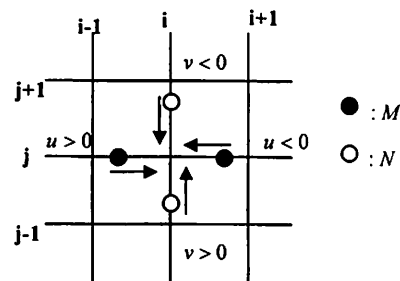


図1 移流の方法

表1 流量条件

	スリット幅	流量 (l/s)
Case1	小	1.21
Case2	中	1.48
Case3	大	2.00

渦構造の軽減を目的として導流工を設置している。河床勾配は 1/200, 平均粒径 1mm の一様砂を敷き詰めた。スリット幅に関しては, スリット最大通過流量が移動限界流量を超えない範囲内の幅において, 大・中・小として 3 ケース行った。初期流量は, スリット最大通過流量として流し始め, 減水させながら 4.4 時間通水した。表 1 に各ケースの初期流量を示す。

4. 適合性の比較: 伸展長, 流路幅, 河床位について計算モデルと比較を行った。図 2 ～図 4 に 4.4 時間後の実験の河床変動量図を示す。図 5～図 7 に 4.4 時間後の計算の河床変動量図を示す。図 8 ～図 10 に最深河床位を示す。

4. 1 伸展長: Case2, Case3 では, 実験結果が計算結果より長く伸展した。実験結果では, スリット幅が大きくなれば, 水みちは, より長く伸展するが, 計算結果ではスリット幅に影響されず, 伸展長はさほど変化がなかった。

4.2 流路幅: 全ケースにおいて実験結果より, 計算結果の方が大きく現れる傾向が得られた。また, 実験結果の流路幅は, スリット幅による変化はあまりないが, 計算結果は, スリット幅が大きくなると流路幅も大きくなっている。

4.3 最深河床位: 最深河床位について全ケースで実験結果より計算結果の方が高くなる傾向が得られた。

5.まとめ: 水みちの形成過程に注目すると, 下流から水みちの伸展については, ある程度再現できているものの, その伸展長や流路幅, 河床位については適合性があるとはいえない。ただし, 河床位は, 実験の方が計算結果より, 低くなり, 流路幅は, 実験の方が計算結果より, 狭くなるという傾向が得られた。実験において水みち形成過程で, 縦渦のような水みちを深く洗掘させる流れが発生していると考えられる。本モデルで縦渦のような流れは考慮していないために, 計算モデルでは実験結果より浅く計算されたと考えられる。

6. 参考文献

- 1) 穴瀬・赤尾・飯山・岡部:生態的コリドーの回復を目的としたスリット付き落差工の設計と適用(2001), 平成 12 年度徳島大学工学部研究報告 第 46 号
- 2) 応用生態工学札幌「溪流・河川横断構造物の切り下げ(スリットを含む)セミナー」:2005 年 7 月 19 日, 20 日開催, 2005 年 8 月 24 日発行
- 3) 矢部・内海・尾形:「CIP 法 原始から宇宙まで解くマルチスケール解法」森北出版株式会社

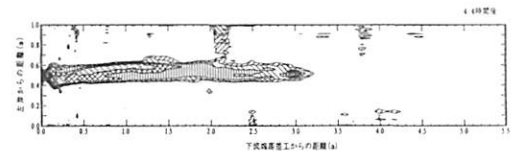


図 2 実験 case1 河床変動量

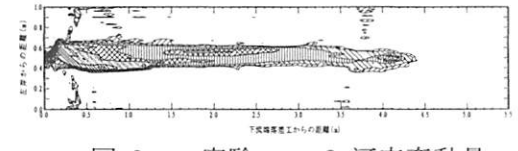


図 3 実験 case2 河床変動量

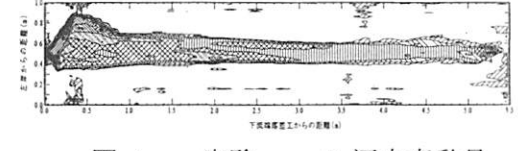


図 4 実験 case3 河床変動量

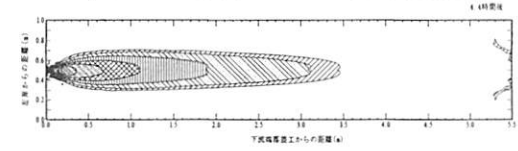


図 5 計算 case1 河床変動量

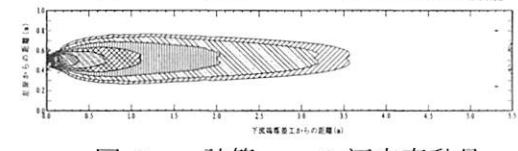


図 6 計算 case2 河床変動量

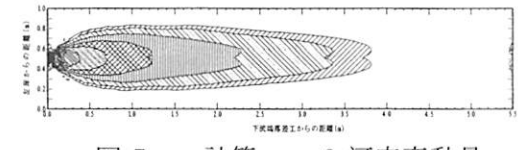


図 7 計算 case3 河床変動量



図 8 case1 最深河床位

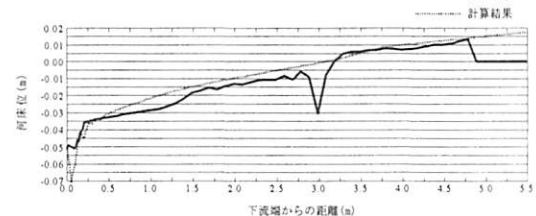


図 9 case2 最深河床位

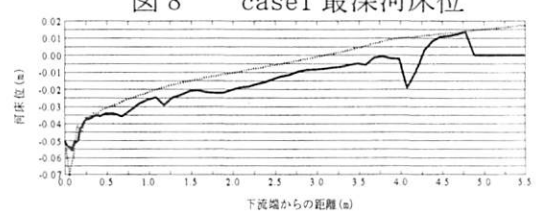


図 10 case3 最深河床位