

平衡・非平衡流砂モデルによる水制周辺の 局所洗掘に関する数値解析

NUMERICAL SIMULATION ON LOCAL SCOURING AROUND A SPUR DIKE USING EQUILIBRIUM AND NON-EQUILIBRIUM SEDIMENT TRANSPORT MODELS

音田 慎一郎¹・細田 尚²・木村 一郎³・岩田 道明⁴
Shinichiro ONDA, Takashi HOSODA, Ichiro KIMURA and Michiaki IWATA

¹正会員 博(工) 京都大学大学院助手 工学研究科都市社会工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻(同上)

³正会員 博(工) 松江工業高等専門学校助教授 環境・建設工学科(〒690-8518 松江市西生馬町14-4)

⁴正会員 (株)建設技術研究所 大阪本社 河川部(〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

Around a spur dike, local scouring is occurred and it is necessary to estimate the maximum scour depth and the bed elevations around the dike. In this paper local scouring around the dike is simulated using the equilibrium and non-equilibrium sediment transport models. To evaluate the model performance, both calculated results are compared with experiments conducted by Michiue & Hinokidani (1992)⁹⁾ and the scouring processes and the flow near bed, especially in the initial stage, are examined. It was shown that the time scale of maximum scour depth and scouring processes are different between the equilibrium and non-equilibrium sediment transport models.

Key Words : local scouring, spur dike, numerical simulation, equilibrium and non-equilibrium sediment transport model

1. はじめに

近年、水制の有する河川環境向上の機能が注目され、従来の河岸防御などの治水対策に加えて、水制周辺で積極的に河床の洗掘・堆積を生じさせることで河道の多様性の創出を図る試みが行われている。その際、良好な河川環境の創出を目指し、効果的な水制の設計法を確立するには、最大洗掘深のみならず水制周辺の流れと河床変動(洗掘孔形状)及び洗掘過程などを精度よく予測することが必要である。

こうした背景から水制周辺の流れと河床変動について実験的、数値解析的研究などが精力的に行われてきた。水制周辺の流れに関する研究として、例えば池田ら¹⁾は非越流型水制を対象に主流と水制域間の運動量輸送について実験的、数値解析的に検討している。また、崇田・清水²⁾は局所的な流速分布の変化を平面2次元モデルに組み込み、準3次元モデルの構築を行っている。木村ら³⁾は、越流型水制周辺の流れの3次元解析を行い、非定常3次元流れ構造に及ぼす水制設置角度の影響、乱流モデルによる再現性について考察している。

水制周辺の局所洗掘現象に関する実験的研究としてIshigakiら⁴⁾、大本ら⁵⁾、Tominaga and Matsumoto⁶⁾の研究

が挙げられ、水制設置角度によって洗掘・堆積域が大きく異なることが指摘されている。河床変動計算を含めた数値解析についても多くの研究が行われ、福岡ら^{7), 8)}は水制が流れに及ぼす影響を外力として組み込んだ準3次元モデルを提案し、越流型水制工の設計法について考察している。また、流れの3次元モデルと河床変動モデルを組み合わせ、越流及び非越流水制周辺の局所洗掘の数値解析も道上・檜谷⁹⁾、Zhangら^{10), 11)}、福岡ら¹²⁾、Yossef and Rupprecht¹³⁾によって行われており、モデルの妥当性が検証されている。流れに関してはある程度再現できることが報告されている¹³⁾が、最大洗掘深や洗掘域と堆積域の位置等の再現性が十分ではないと思われる。その理由として、乱流モデルや土砂輸送モデルの選定、局所的河床勾配が増加し、限界角以上の斜面が形成されたときの土砂のずり落ちの計算手法等が考えられる。一方、Nagataら¹⁴⁾は、乱流モデルと土砂輸送モデルに非線形 $k-\epsilon$ モデル、砂粒の運動方程式を解く非平衡流砂モデルを適用して水制周辺の河床変動解析を行い、既往のモデルより最大洗掘深やその形状的特徴が良好に再現できることを示している。しかし、主として平衡状態での洗掘孔形状に注目しており、洗掘過程の詳細な考察や平衡・非平衡流砂モデルによる計算結果の比較は行われていない。

そこで、本研究では土砂輸送モデルによる水制周辺の局所洗掘現象の再現性を考察するため、平衡及び非平衡流砂モデルを用いて数値解析を行い、洗掘過程の時間的変化について計算結果を詳細に検討する。

2. 数値解析法

(1) 流れの基礎式

水面と河床面に適合した3次元移動一般曲線座標系を用いると流れの基礎式は以下のように表される。

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial \xi^i} \left(\frac{U^i}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{U^i}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j) U^i}{J} \right) \\ & - \frac{(U^j - U_G^j) \mathbf{u}}{J} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi^j} (\nabla \xi^i) - \frac{\mathbf{u}}{J} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \xi^i) \\ & = -\frac{g^ij}{\rho J} \frac{\partial p}{\partial \xi^j} + \frac{\mathbf{f}}{J} \cdot \nabla \xi^i + \frac{1}{\rho J} \frac{\partial \xi^j}{\partial x_m} \frac{\partial \xi^i}{\partial x_l} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (\tau_{lm} - \rho \overline{u'_l u'_m}) \end{aligned} \quad (2)$$

[k -方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{k}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j) k}{J} \right) = \frac{-u'_l u'_l}{J} \frac{\partial \xi^l}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial \xi^l} \\ & - \frac{\varepsilon}{J} + \frac{\partial}{\partial \xi^l} \left(\left(\nu + \frac{D_t}{\sigma_k} \right) \frac{g^{lm}}{J} \frac{\partial k}{\partial \xi^m} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

[ε -方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j) \varepsilon}{J} \right) \\ & = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \frac{(-u'_l u'_l)}{J} \frac{\partial \xi^l}{\partial x_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi^l} - \frac{C_{\varepsilon 2}}{J} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ & + \frac{\partial}{\partial \xi^l} \left(\left(\nu + \frac{D_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{g^{lm}}{J} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi^m} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、

$$\nabla \equiv (\partial/\partial x_1, \partial/\partial x_2, \partial/\partial x_3), \quad g^{ij} \equiv \nabla g^i \cdot \nabla g^j \quad (5a)$$

$$U^i \equiv (\partial \xi^i / \partial x_j) u_j, \quad U_G^i \equiv (\partial \xi^i / \partial x_j) u_{jG} \quad (5b)$$

$$\tau_{ij} \equiv \mu \left(\frac{\partial \xi^m}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi^m} + \frac{\partial \xi^m}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial \xi^m} \right) \quad (5c)$$

また、 t : 時間、 (x_1, x_2, x_3) : デカルト座標、 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) : 一般曲線座標、 J : 座標変換のヤコビアン、 g^{ij} : 基本反変テンソル、 U^i : 流速ベクトルの反変成分、 U_G^i : 計算格子移動速度ベクトルの反変成分、 $\mathbf{u}$: デカルト座標系での流速ベクトル($= (u_1, u_2, u_3)$)、 u_i : 流速ベクトルの x_i 方向成分、 p : 圧力、 $\mathbf{f}$: 外力ベクトル($= (0, 0, -g)$)、 g : 重力加速度、 τ_{ij} : 粘性応力テンソル、 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$: レイノルズ応力テンソル、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギーの散逸率、 ρ : 水の密度、 μ : 粘性係数であり、 ij, m, l は1, 2, 3の値をとる。

乱流モデルには、高レイノルズ数型2次非線形 k - ε モデルを用いた¹⁵⁾。本モデルは、水制周りの流れなどにも適用され、再現性が検証されている^{3), 14)}。

$$-u'_l u'_l = D_t \left(\frac{\partial \xi^m}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi^m} + \frac{\partial \xi^m}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial \xi^m} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (6)$$

$$D_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$S_{1ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \frac{\partial u_j}{\partial x_r}, \quad S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_r} + \frac{\partial u_r}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \right) \quad (8)$$

$$S_{3ij} = \frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_r}{\partial x_j}$$

ここに、 D_t : 渦動粘性係数であり、式(6), (7)中のモデル係数は以下のように評価する。

$$C_1 = \frac{0.4}{1 + 0.01 M^2}, C_2 = 0.0, C_3 = \frac{-0.13}{1 + 0.01 M^2} \quad (9a)$$

$$M = \max(S, \Omega) \quad (9b)$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}, \quad \Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (9c)$$

$$C_\mu = \min[0.09, 0.3 / (1 + 0.09 M^2)] \quad (10)$$

(2) 河床変動モデル

a) 非平衡流砂モデル

土砂輸送モデルには、平衡・非平衡流砂モデルを適用する。まず、非平衡流砂モデルについて簡単に説明する。本研究で用いる非平衡流砂モデルは、pick-up rateの算定、砂粒の運動方程式より砂流群の移動経路の計算、step lengthに応じたdeposition rateの算定によって構成されている¹⁴⁾。pick-up rateは局所河床勾配の影響を考慮した次式によって計算する¹⁶⁾。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_p \Phi \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^{m_p} \quad (11a)$$

$$G_* = \frac{\cos \Psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (11b)$$

$$\Phi = \left(\frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \Psi + k_L \mu_s} \right) \left(\frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \right) \quad (11c)$$

ここで、 p_s : pick-up rate、 d : 河床材料の粒径、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 σ : 河床材料の密度、 θ_b : 最大傾斜方向の河床勾配角、 k_L : 抗力と揚力の比($=0.85$)、 μ_s : 砂の静止摩擦係数($=0.7$)、 Ψ : 河床での流速と砂粒の移動方向のなす角、 α : 砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角である。また、 F_0 , k_p , m_p は定数であり、0.03, 0.7, 3とする。上記のpick-up rateを用いて単位時間あたりに各計算メッシュからpick-upする土砂堆積 V_p は次式のようになる。

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p, \quad S_p = \frac{\partial \xi^3 / \partial x_3}{J} \quad (12)$$

ここに、 A_2, A_3 : 砂粒の2, 3次元の形状係数($= \pi/4, \pi/6$)。

離脱後の砂粒群の移動経路は、次の砂粒の運動方程式 ($i=1,2$)を計算することで求める。

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_m \right) A_3 d^3 \frac{du_{sed i}}{dt} = D_i + W_i - F_i \quad (13a)$$

ここで、 C_m ：付加質量係数(=0.5)， $u_{sed i}$ ：砂粒の移動速度の $\mathbf{p}_{bi}$ 方向成分， D_i 、 W_i 、 F_i は、砂粒に作用する抗力 D 、水中重力 W 、摩擦力 F の $\mathbf{p}_{bi}$ 方向成分である。また、 $\mathbf{p}_{b1}$ 、 $\mathbf{p}_{b2}$ は (x_1-x_3) 平面及び、 (x_2-x_3) 平面内の河床平面と平行な単位ベクトルであり、以下のように表される。

$$D = \frac{C_D \rho}{2} (u_{bi} - u_{sed i})^2 c_e A_2 d^2 \quad (13b)$$

$$W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \quad (13c)$$

$$F = \mu_k \left(W \frac{\cos \theta_{b1} \cos \theta_{b2}}{\sin \theta_p} - k_L D \right) \quad (13d)$$

$$\mathbf{p}_{b1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{b1} \\ 0 \\ \sin \theta_{b1} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p}_{b2} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \theta_{b1} \\ \sin \theta_{b1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

ここに、 θ_p ： $\mathbf{p}_{b1}$ と $\mathbf{p}_{b2}$ のなす角度である。 D_i 、 W_i 、 F_i の成分表示については、紙面の都合上省略する。

上記の砂粒の運動方程式から得られる砂粒の移動速度ベクトルを用いて砂粒群の位置を次式により計算する。

$$\mathbf{p}_{sed(n)} = \mathbf{p}_{sed(n-1)} + \Delta t \cdot \mathbf{u}_{sed} \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{sed(n)}$ ：pick-upされた土砂が計算 n ステップ時に存在する位置ベクトルであり、初期にpick-upされる砂粒の位置 $\mathbf{p}_{sed(n)}$ はセル中心である。また、砂粒の移動距離 $s(n)$ は次のように与えられる。

$$s(n) = \sum \Delta t |\mathbf{u}_{sed(n)}| \quad (16)$$

次に、式(15)で計算された移動地点に堆積する土砂量を求める。pick-up地点 j から出発した砂粒が n ステップ後の移動地点に単位時間あたりに堆積するdeposition体積 $V_{d(j,n)}$ はpick-up体積 $V_{p(j)}$ 、step lengthの確率密度関数 $f_s(s(n))$ を用いて次式で示される¹⁶⁾。

$$V_{d(j,n)} = V_{p(j)} f_s(s(n)) \Delta t \cdot |\mathbf{u}_{sed}| \quad (17a)$$

$$f_s(s(n)) = \frac{1}{\lambda} \exp \left(-\frac{s(n)}{\lambda} \right) \quad (17b)$$

ここで、 λ は平均step lengthであり、Einstein¹⁷⁾の提示式で評価する。

局所洗掘現象では、洗掘深の増大に伴って河床の局所勾配が増加し、ある限界角 θ_{bmax} （ここでは $\theta_{bmax}=32^\circ$ とする）以上の斜面が形成すると土砂のslideが生じる。そこで本研究でもslideによる土砂移動堆積の計算を考慮する。

以上より得られる土砂体積量を用いて、河床変動計算を行う。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{(V_d - V_p)}{S_d} \quad (18)$$

b) 平衡流砂モデル

平衡流砂モデルを用いて河床変動を計算する場合、通常、流下方向の掃流砂量の評価式にM.P.M式や芦田・道

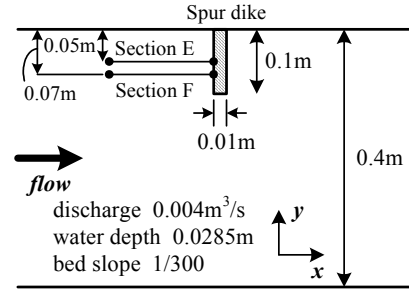


図-1 道上・檜谷⁹⁾の実験条件

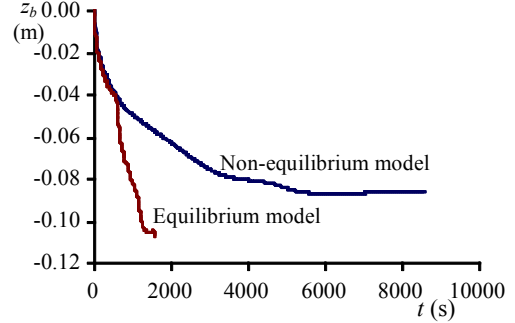


図-2 最大洗掘深の時間変化

上式が適用されるが、ここでは流砂の移動限界を変えないで計算結果の比較を行うため、以下の手順で河床変動計算を行った。まず、式(11)を用いてpick-up rate p_s の算出を行い、流砂量 q_{Bs} を求める。次に、長谷川式(20)から横断方向流砂量を計算する。得られた流砂量フラックスを一般座標系に変換し、式(21)より河床の時間的变化を計算する。ここで、 q_{Bs} の方向は2次流成分を含んだ方向としているため、式(20)の q_{Bn} では主流速と横断方向流速の比を考慮していない。

$$q_{Bs} = \frac{A_3}{A_2} p_s \Delta d \quad (19)$$

$$q_{Bn} = q_{Bs} \left(-\frac{\partial z_b}{\partial n} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{Bs}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{Bn}}{J} \right) \right) = 0 \quad (21)$$

流れと河床変動の計算手法、及び計算手順の詳細については、参考文献¹⁴⁾に記載されているため、紙面の都合上省略する。

3. モデルの適用と計算結果の考察

非越流・不透過型単一水制周辺の局所洗掘現象⁹⁾に適用し、土砂輸送モデルによる現象の再現性を検証する。実験の水理条件を図-1に示す。

図-2は、最大洗掘深の時間変化を示したものであり、平衡と非平衡流砂モデルでは、洗掘の時間スケールが大きく異なることがわかる。時間スケールの違いは固定床下流部の局所洗掘の計算結果¹⁸⁾でも確認されている。今後、洗掘の発達時間スケールに関して実験結果と比較することで、定量的な評価の検討を行いたい。

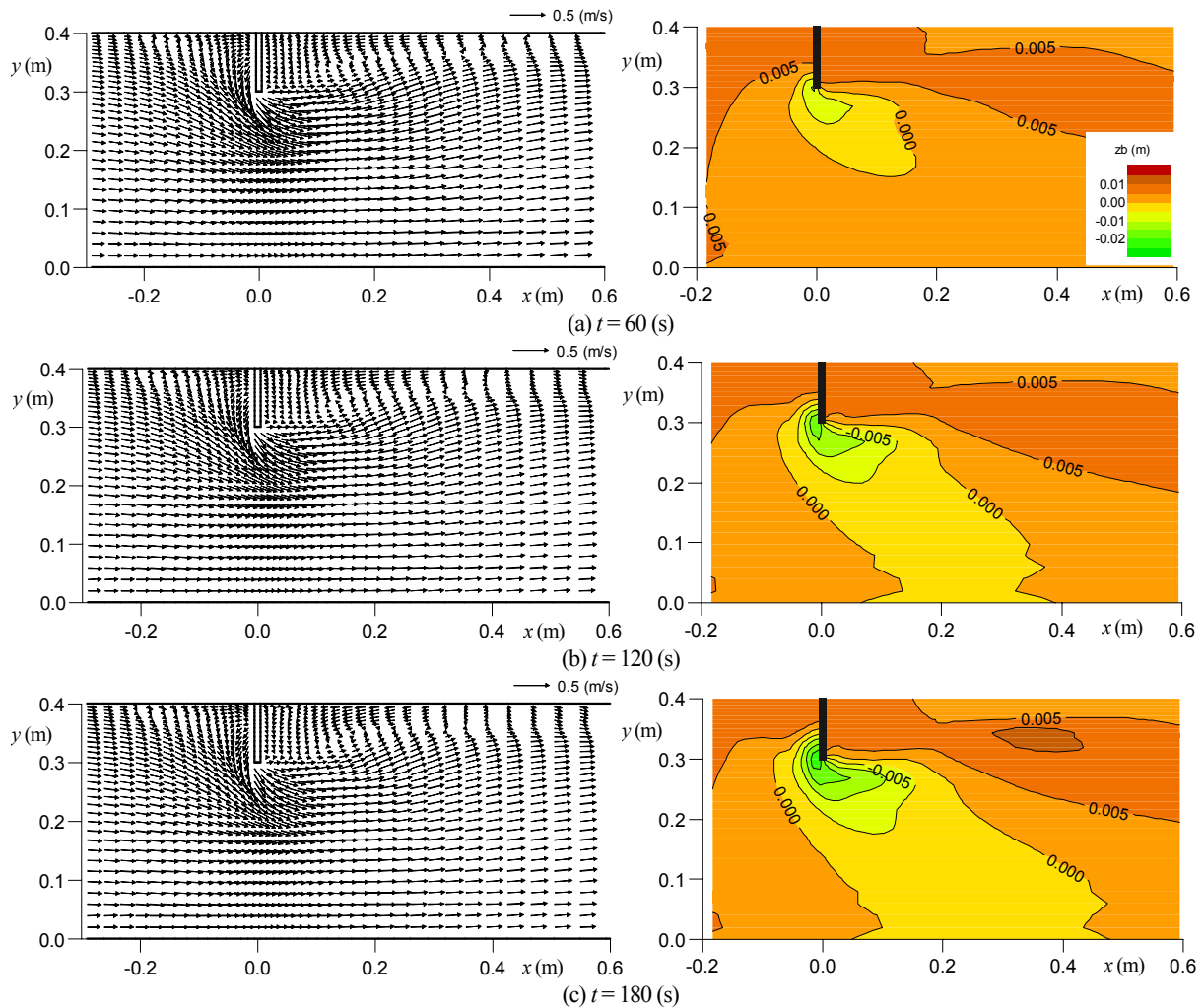


図-3 非平衡流砂モデルによる計算結果 (左: 河床近傍の流況図, 右: 河床高コンター図)

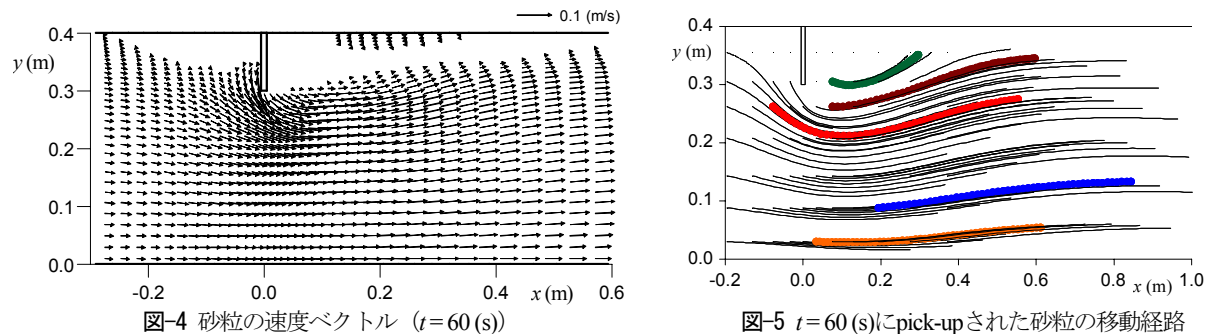


図-4 砂粒の速度ベクトル ($t=60$ (s))

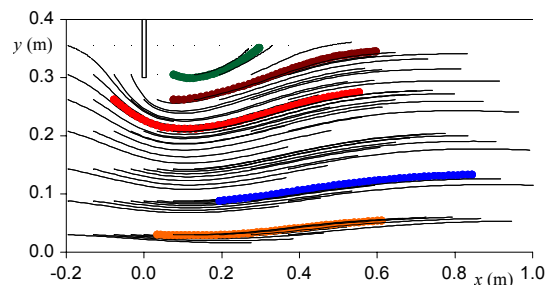


図-5 $t=60$ (s)にpick-upされた砂粒の移動経路

図-3は非平衡流砂モデルを用いた場合の河床近傍の平面流況図と河床高コンターの時間変化である。ここでは、土砂輸送モデルによる洗掘過程の違いを考察するため、洗掘深が小さい初期洗掘過程について検討する。図を見ると洗掘は水制先端から始まっており、また水制先端からの流れの集中によって主流方向の土砂がpick-upされているため、主流方向に沿って河床が低下している様子が確認できる。洗掘孔の発達に伴い、流れは河床形状の影響を受けるが、洗掘孔に沿う流れ構造を示しており、初期洗掘過程では流向は時間的に変化していないことがわかる。

図-4に砂粒の移動速度ベクトルを示す。また、図-5に代表的な砂粒の移動経路 (pick-up地点から最終到達地

点)を示す。参考のため、幾つかの移動経路はプロットで表した。図を見ると、砂粒は流れに追従して運ばれており、水制背後 ($x=0.2\sim0.4$ m) に堆積している砂粒 (緑色プロット) が確認できる。

平衡流砂モデルを用いた場合の計算結果を図-6に示す。洗掘は水制先端部付近だけで生じており、非平衡流砂モデルによる計算結果とは洗掘形状が異なっている。また、洗掘孔の発達に伴い、水制の直下流部で水制背後に向かう流れが生じており、その結果、堆積の時間スケールが早くなっている。図-7は掃流砂量フラックスの時間変化を表したものであり、 $t=10$ (s)と60 (s)でフラックスの向きが大きく異なっていることがわかる。

図-8は平衡状態における河床高コンターを表したもの

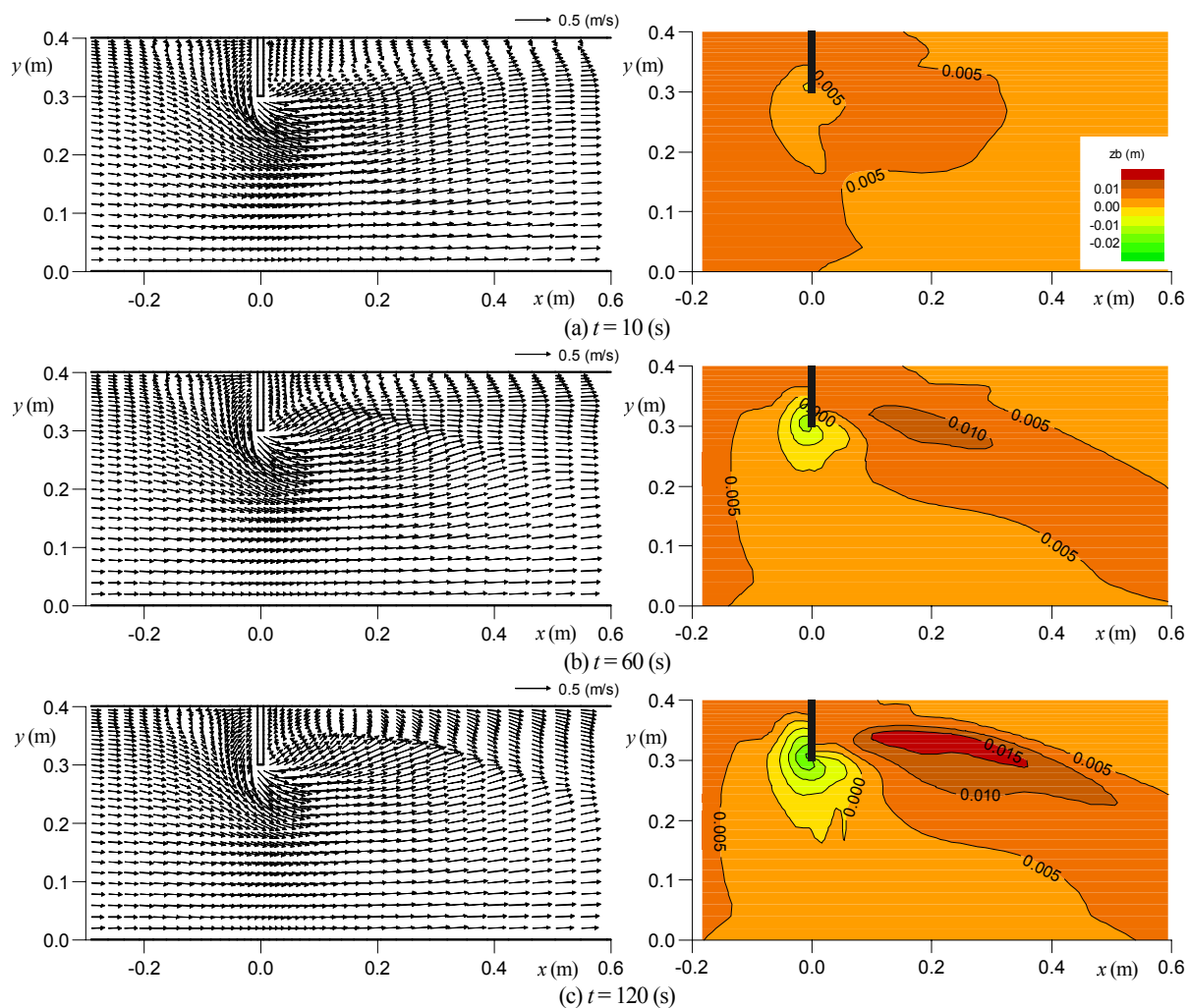


図-6 平衡流砂モデルによる計算結果 (左: 河床近傍の流況図, 右: 河床高コンター図)

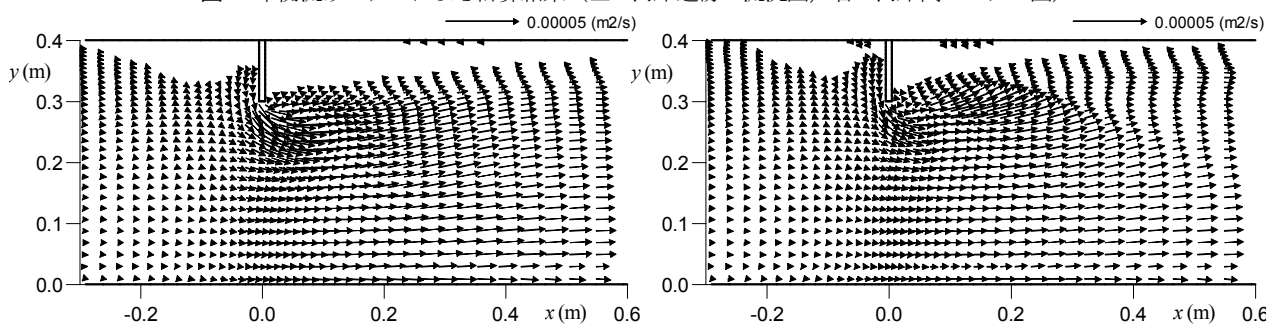


図-7 掃流砂量フラックスの時間変化 (左: $t = 10$ (s), 右: $t = 60$ (s))

である。実験結果、非平衡流砂モデル、平衡流砂モデルの最大洗掘深はそれぞれ0.09m, 0.086m, 0.10mであり、両モデルとも実験結果とほぼ一致している。水制周辺の河床変動について着目すると、非平衡流砂モデルによる計算結果では水制背後の堆積域が若干小さいものの、実験結果と同様に水制前面で一様に最大洗掘を示しており、よく再現されていると思われる。一方、平衡流砂モデルを用いた場合には洗掘孔が若干大きく、右岸側に堆積・洗掘域が形成されている。また、水制先端部での洗掘が著しく、洗掘孔形状が異なっている。従って、局所洗掘現象のように流砂の非平衡性が卓越する場合には、非平衡性モデルを用いたほうが適切であると考えられる。

平衡状態における水制前面の断面Eの流速ベクトルを図-9に示す。水制前面で生じる渦を良好に再現している。

4. おわりに

本研究では、平衡・非平衡流砂モデルによる水制周辺の局所洗掘現象の数値解析を行い、土砂輸送モデルによる現象の再現性について考察した。最大洗掘深については両モデルとも実験結果とほぼ一致していたが、初期洗掘過程、洗掘孔の発達時間スケール、平衡状態での洗掘孔形状が異なることがわかった。今後、斜め越流型水制

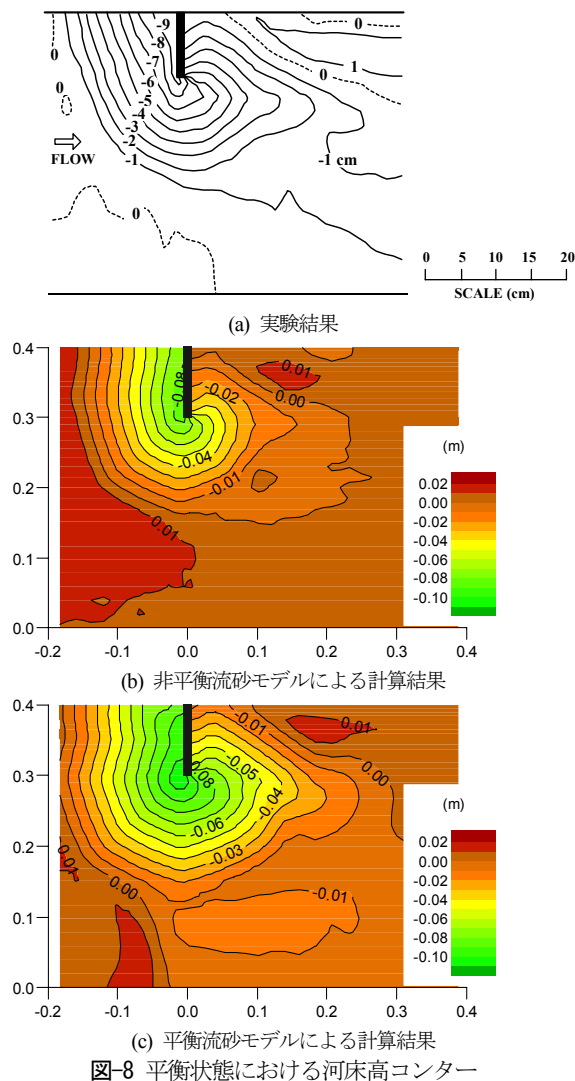


図-8 平衡状態における河床高コンター

等の様々な条件の場合についても数値解析を行い、モデルの妥当性を検証するとともに、浮遊砂を考慮した数値解析モデルの構築について検討したい。

参考文献

- 1) 池田駿介, 杉本 高, 吉池智明: 不透水制群を有する流れの水理特性に関する研究, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.145-155, 2000.
- 2) 崇田徳彦, 清水康行: 水制を含む流れの準3次元数値計算モデルの開発, 土木学会論文集, No.497/II-28, pp.31-39, 1994.
- 3) 木村一郎, 細田 尚, 音田慎一郎, 富永晃宏: 越流型水制周辺の三次元乱流構造に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.661-666, 2004.
- 4) Ishigaki, T., Ueno, T., Rahman, M.M. and Khaleduzzaman, A.T.M.: Scouring and flow structure around an attracting groin, *Proc. of RiverFlow 2004*, Vol.1, pp.521-525, 2004.
- 5) 大本照憲, 平川隆一, 渡邊訓甫: 非越流型水制群の向きが河床変動と流れ構造に及ぼす影響, 応用力学論文集, Vol.8, pp.875-882, 2005.
- 6) Tominaga, A. and Matsumoto, D.: Diverse riverbed figuration by using skew spur-dike groups, *Proc. of RiverFlow 2006*, Vol.1, pp.683-691, 2006.
- 7) 福岡捷二, 渡辺明英, 西村達也: 水制工の配置法の研究, 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.27-36, 1992.
- 8) 福岡捷二, 西村達也, 高橋 晃, 川口昭人, 岡信昌利: 越流

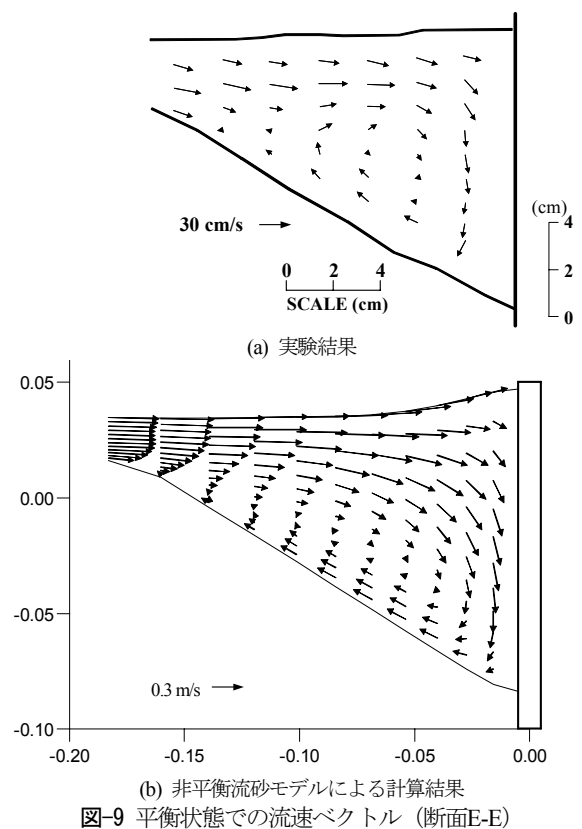


図-9 平衡状態での流速ベクトル (断面E-E)

型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.51-68, 1998.

- 9) 道上正規, 檜谷 治: 水制周辺の平面2次元河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.61-66, 1992.
- 10) 福岡捷二, 渡辺明英, 川口広司, 安竹 悠: 透過型水制工が設置された直線流路における流れと河床変動, 水工学論文集, 第44巻, pp.1047-1052, 2000.
- 11) Zhang, H., Nakagawa, H., Ishigaki, T., Muto, Y. and Baba, Y.: Three-dimensional mathematical modeling of local scour, *J. of Applied Mech.*, JSCE, Vol.8, pp.803-812, 2005.
- 12) Zhang, H., Nakagawa, H., Muto, Y., Baba, Y. and Ishigaki, T.: Numerical simulation of flow and local scour around hydraulic structures, *Proc. of RiverFlow 2006*, Vol.2, pp.1683-1693, 2006.
- 13) Yossef, M.F.M. and Rupprecht, R.: Modeling the flow and morphology in froyne fields, *Proc. of RiverFlow 2006*, Vol.2, Vol. 2, pp.1707-1713, 2006.
- 14) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y.: Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures, *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.131, No.12, pp.1074-1087, 2005.
- 15) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear $k-\epsilon$ model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.42, pp.813-837, 2003.
- 16) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾: 側岸における非平衡流砂過程, 第29回水理講演会論文集, pp.561-566, 1985.
- 17) Einstein, H.A.: The bed load function for sediment transportation in open channel flows, *Technical Bulletin*, No.1026, U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950.
- 18) 音田慎一郎, 細田 尚: 水深積分モデルによる固定床下流の局所洗掘の数値解析, 日本流体力学会年会2004講演論文集, pp.242-243, 2004.

(2006. 9. 30受付)