急拡部を有する落差工下流での河床変動を対象とした数値解析

Numerical simulation of sand bar in downstream of back step structure with sudden expansion

白井秀和*・細田尚**

Hidekazu SHIRAI and Takashi HOSODA

*工修 京都大学大学院 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)

** 工博 京都大学教授 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)

In this paper, the numerical simulations of flow and bed deformation under the experimental conditions are carried out to verify the applicability of numerical models and to clarify the mechanism of the sandbar formation at the downstream of the back-step. In order to simulate the bed deformation, two conditions common equilibrium sediment transport model and the non-equilibrium model for bed-load transport are tested. It is shown that the result of non-equilibrium sediment transport model is in good agreement with the experimental results, in which sediments were deposited in the middle of the channel and along the sides where shockwaves are generated. However equilibrium sediment transport model was not able to capture the well features of sandbar formation. Furthermore, we clarified the mechanism of sandbar formation at the downstream of back-step by the results of non-equilibrium model.

Key Words: back step, bed deformation, sand bar, numerical simulation

1. はじめに

落差工は、洪水流において土砂の輸送及び河床勾配の安定化を目的として設置される河川構造物である。しかし、この構造物の設置により水の流れや土砂の動きに変化が生じ、その結果河川の環境を変化させ、そのシステムに影響を与えることもある。したがって、このような落差工周りで流れと土砂輸送メカニズムを明確にしておくことが重要である。図-1は、京都市を流れる加茂川の落差工下流で形成された砂州を示したものである。図に示すように、砂州は流路の真ん中と両側に形成されていることがわかる。このような砂州の形成はいくつかの落差工下流で確認されており、落差工下流での土砂堆積の一つの特徴であると考えられる。また、この河川における落差工は、下流で急拡しており、この形状が砂州の形成に大きな影響を与えていると考えられる。

このようなことから、Saif 等¹⁾は、この落差工周りで土砂輸送の特性を調べるために落差工の下流で水路が拡幅するような水路を用いた実験を行っている。その実験により、落差工下流での砂州の形成には、水路の拡張によって形成された衝撃波と水路中央付近で生じる跳水付近で土砂が堆積していくことを確認している。

本論文では、この実験を対象とした流れ及び河床変動の数値解析を行い、この急拡した落差工下流で形成される砂州の形成過程について検討する。流れに関しては一般曲線座標系での平面2次元の水深積分モデルを用い、河床変動には平衡流砂モデルと非平衡流砂モデルを用いる。まず、初めに流れのモデルの妥当性を検証する。その後、それぞれの河床変動モデルを適用し実験と比較する。今回の解析対象は実験から、衝撃波や跳水の下流など水量が不連続となる部分で砂の堆積が確認されており、平衡流砂モデルでも十分にその影響は考慮でき、砂州の形成過程を十分に再現できると考えられる。そのようななかでも流砂の非平衡性が砂州の形成に与える影響が大きいかを検証する。さ

図-1 落差工下流での砂州の形成

らに、非平衡流砂モデルにより得られた解析結果から、落差工周辺での砂州の形成の特性について検証を行う。この時、河床変動において流れの解析精度の重要性を示すために流れの解析に比較的精度の低いスキームを用いた河床変動計算も行う。

2. 数値解析モデル

2.1 流れの基礎式

流れの解析には、一般曲線座標系での水深積分モデルを用いる。一般曲線座標系に変換された基礎式である連続式と運動量方程式は次式のようにになる。

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[運動量方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u^2} h) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u^2} h) + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v^2} h) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v^2} h) + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v'}) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v' h}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u^2} h) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u^2} h) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v^2} h) \\ & + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v^2} h) + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v' h}) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v' h}) \end{aligned}$$

ここに、 t : 時間、 (ξ, η) : 一般座標、 (Q^ξ, Q^η) : 流量フラックスの反変成分、 (U, V) : 流速ベクトルの反変成分、 (M, N) : 流量フラックスの x, y 方向成分、 h : 水深、 g : 重力加速度、 z_s : 基準面からの水位、 ρ : 水の密度、 $(\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y)$: 変換のメトリックス、 J : 座標変換のヤコビアン、 $(\tau_b^\xi, \tau_b^\eta)$: 底面せん断応力の反変成分、 $-\overline{u^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v^2}$: x - y 座標系での水深平均レイノルズ応力である。

水深平均レイノルズ応力は次式で算出する。

$$-\overline{u'^2} = 2D_h \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3}k \quad (3a)$$

$$-\overline{u'v'} = D_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3b)$$

$$-\overline{v'^2} = 2D_h \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3}k \quad (3c)$$

$$D_h = \alpha h u_* \quad (3d)$$

ここに、 D_h : 渦動粘性係数、 k : 水深平均乱れエネルギー、 α : 渦動粘性係数の定数、 u_* : 摩擦速度、 τ : 底面せん断応力である。

水深平均乱れエネルギーについては、以下に示す鉛直方向 (z 方向) の k の分布に関する実験式²⁾ を水深積分して得られる次式を用いて算出する。

$$k = 2.07 u_*^2 \quad (4)$$

底面せん断応力は、次式の Manning 則より算出する。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

ここに、 n : Manning 粗度係数、 τ_{bx}, τ_{by} : x, y 方向の底面せん断応力である。

これらデカルト座標系(x, y)から一般座標系(ξ, η)への変換は次式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (6)$$

2.2 平衡流砂モデル

平衡流砂モデルでは、各地点での流れの特性からそれぞれ流砂量を決定して河床変動量を計算する。本研究では、次式にそれぞれ示すように、流れ方向に芦田・道上式³⁾を、流れ方向と直角の方向には長谷川式⁴⁾を適用する。

$$q_{bs} = 17 \tau_*^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \sqrt{(\sigma/\rho - 1) g d^3} \quad (7a)$$

$$q_{bn} = q_{bs} \left(\frac{u_{nb}}{u_{sb}} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (7b)$$

$$u_{nb} = -N_* \frac{h}{r} u_{sb}, \quad (N_* = 8.5) \quad (7c)$$

ここに、 (q_{bs}, q_{bn}) : 流線方向とその直角方向それぞれの掃流砂量； $\tau_{*c}, \tau_{*s}, \tau_*$: それぞれ、無次元有効掃流力、無次元限界掃流力、無次元掃流力； u_*, u_{*c} : 摩擦速度、限界摩擦速度； d : 流砂の粒径； σ : 砂の密度($\sigma/\rho=2.65$)； (u_{sb}, u_{nb}) : 河床近傍の流速(s, n)方向成分； μ_s, μ_k : 河床材料の静止摩擦係数($=1.0$)、動摩擦係数($=0.5$)； r : 曲率半径である。

表-1 計算条件

	解析対象	移流項離散化 (u の内挿- Q の内挿)	流量 (m^3/sec)	下流端水深 (m)	河床変動モデル
Run1	流れ	upwind-QUICK with minmod limiter	0.01115	0.0188	
Run2	流れと河床変動	upwind-QUICK with minmod limiter	0.00405	0.0180	平衡流砂モデル
Run3	流れと河床変動	upwind-QUICK with minmod limiter	0.00405	0.0180	非平衡流砂モデル
Run4	流れと河床変動	upwind-upwind	0.00405	0.0180	非平衡流砂モデル

河床変動の基礎式には、次式で表される流砂の連続式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{b\xi}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{b\eta}}{J} \right) \right\} = 0 \quad (8)$$

ここに、 z_b ：河床高さ； λ ：河床材料の空隙率； $(q_{b\xi}, q_{b\eta})$ ：掃流砂量の反変成分である。

2.3 非平衡流砂モデル

非平衡流砂モデル⁵⁾は、(1)pick-up rateの算出、(2)流砂の経路の決定、(3) deposit rateの計算、(4)河床の時間変化の計算の4段階で構成される。

まずpick-up rateは中川・辻本・村上⁶⁾が提案した、側岸など大きな横断勾配を有する場合にも適用可能な次式を用いる。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho-1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_2 \Omega \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^m \quad (9)$$

$$G_* = \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s}$$

$$\Omega = \left(\frac{\mu_s \cos \theta_n - \sin \theta_n \sin \phi}{\cos \psi + k_L \mu_s} \right) \left(\frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \right)$$

ここに、 p_s ：pick-up rate； k_L ：抗力と揚力の比(=0.85)； ψ ：河床での流速ベクトルと砂粒子の移動方向とのなす角； ϕ ：砂粒の移動方向と主流方向 s -軸(水深平均流速の横断方向流速が0となる方向)とのなす角とする。また、定数 F_0 、 k_2 、 m は、中川らと同様に0.03、0.7、3を与える。

つぎに、流砂の移動経路に関しては、計算の簡易性から平衡流砂モデルで用いて決定する。つまり、各計算点で求まる流砂量ベクトルからピックアップした砂の移動方向を決定し、 Δs 間隔で進める。砂の経路の各点は格子点上に進むとは限らない。その場合は、その経路から近い計算点の3点の流砂量ベクトルを内挿することで、移動する方向を決定する。この Δs 間隔ごとの経路に流砂を deposit させる。ここで、pick-up された点 j から i 個目の deposit rate $P_{d(i)}$ は、次式により求める。

$$P_{d(j,i)} = p_{s(j)} f_s(s_{(i)}) \Delta s \frac{A_{(j)}}{A_{(i)}} \quad (10a)$$

$$f_s(s) = \frac{1}{\Lambda} \exp\left(-\frac{s}{\Lambda}\right) \quad (10b)$$

$$s_{(i)} = i \cdot \Delta s \quad (10c)$$

ここに、 $A_{(j)}, A_{(i)}$ ：それぞれ pick-up 及び deposit 地点の計算メッシュの面積； Δs ：砂粒の移動軌跡の計算ステップ幅(=0.00125 m)； s ：砂粒の移動距離で $s=i\Delta s$ ； $f_s(s)$ ：step-lengthの確率密度関数である。また、 Λ ：平均 step-length で、ここでは河床材料の粒径の100倍とする。

上記の手法によって算出した pick-up rate, deposit rate を用いて次式により河床変動計算を行う。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = A_I d(p_d - p_s) \quad (11)$$

ここに、 A_I ：1次元の砂粒形状係数(=1.0)である。

3. 計算条件

3.1 数値解析手法

数値解析手法には、有限体積法を用いる。時間積分には、Adams-Bashforth 法を適用する。移流項の離散化には QUICK スキームと一次精度の風上差分を流束制限関数 minmod limiter により合わせたものを適用する。この時、従来であれば、流速 U 、 V の内挿にセル境界で平均したものをを用いるが、この方法では、本研究の計算条件において河床変動解析を行うと河床変動によって流れの計算に数値振動を引き起こし十分な再現をすることができないことが確認された。そこで、本研究では、流速 U 、 V の内挿を一次精度の風上差分のように内挿することで、流れの安定化を図る。

本解析では、砂の存在する領域と存在しない領域が混在する。このため、平衡流砂モデルにおいては、各セルで評価される流砂の収支がそれぞれのセルが保有する流砂量を越えた場合、保有する流砂量だけを流すようにする。また、非平衡流砂モデルでは、各セルの河床高以上の砂のピックアップは、行われなように設定する。

3.2 計算対象

本研究で対象とする水路は、図-2に示す通り、急拡した一段の落差工がある水路である。水路幅は0.91 m、落差の高さは0.1 mある。また、落差工の段差以外で水路勾配はゼロである。

図-2 計算対象

河床変動計算の際には、水路上流端の $x=0$ m から $x=0.925$ m まで水路全体に厚さ 0.01 m の砂を敷き詰めた状態を初期条件として与える。粒径は、実験で使われた砂の平均粒径 $d_{ave}=0.5274$ mm とする。

計算格子数は流れ方向に 275、横断方向に 111 とする。

粗度係数に関しては、流れの計算のみを対象とするとき 0.01 とし、河床変動の計算を対象とする場合は 0.0125 とする。また、今回の計算において砂がある領域とない領域の二つの領域があるが、計算の安定性のため、いずれの領域においても同じ粗度係数を与えることにする。

3.3 再現ケース

まず、Run1 において流れのみの計算を行い、実験と比較することで流れのモデルの妥当性を検証する。Run2 では平衡流砂モデルを用いた河床変動解析を行い、Run3 では Run2 と同じ条件で非平衡流砂モデルを用いた河床変動解析を行う。これら Run2 と Run3 の結果を Saif 等が行った流砂の堆積実験と比較し、各河床変動モデルの妥当性の検証を行う。また、Run4 では、Run3 と同様に非平衡流砂モデルを用いた河床変動解析を行うが、移流項の離散化において、流量フラックス Q^x , Q^y の内挿に QUICK スキームを適用せず、一次精度の風上差分に精度を下げた解析を行う。得られた結果を Run3 と比較することにより流れの解析における精度の影響について検討する。

以上の再現ケースの計算条件等をまとめると、表-1 のようになる。

4. 解析結果と考察

4.1 流れの解析結果と考察

はじめに、流れのみ解析を行った Run1 の結果について検証する。図-3 および図-4 は、それぞれ実験と数値解析での水位のコンター図を示している。実験において急拡部の両側から水路中央に向かって衝撃波が生じていることがわかる。また、この分布に時間的に大きな変化は確認されなかった。数値解析においても、この衝撃波を確認できる。図-5 は、それぞれの水路中央での水位をプロットしたものである。実験結果では、 $x=2.2$ m 付近で跳水して水位が上昇している。また跳水したあと水位が上下に変動していることが確認できる。これに対して、数値解析にお

図-3 水位コンター (実験)

図-4 水位コンター (Run1)

図-5 水路中央における水位の比較

ける水位は、跳水後の水位の変動は再現できなかったものの、実験結果に近い値をとっており、跳水の位置もおおよそ一致している。これらのことから、流れの解析モデルはある程度の再現性があると言える。

4.2 河床変動解析結果と考察

ここで、Saif 等が行った落差工周辺での流砂の堆積過程に関する実験と Run2 の平衡流砂モデルによる解析結果及び Run3 の非平衡流砂モデルによる解析結果を比較することにより河床変動モデルの適用性について検討を行う。

Saif 等が行った実験における流砂の堆積過程を図-6 に示す。(a), (b), (c)は河床変動開始から、それぞれ 1 分、5 分、10 分経過後の土砂の堆積位置を示したものである。河床変動開始から 1 分後の段階で衝撃波と跳水部分の付近に沿って堆積が始まる。また、跳水部分より下流では、衝撃波と跳水する部分の境から水路に沿って下流に堆積し始めていることが確認できる。河床変動開始から 5 分経

(a) 1 min

(b) 5 min

(c) 10 min

図-6 流砂の堆積過程 (実験)

過後には、跳水付近で堆積した砂が三角形の形状をなしており、跳水より下流の水路の両側では、砂州が発達していることが分かる。さらに、5分が経過すると、水路中央で三角形の形状に堆積していた砂が、下流で両側の砂州に伸びていくように堆積している事が分かる。

これに対して、平衡流砂モデルによる解析結果(Run2)として、河床変動計算開始からそれぞれ(a)1分、(b)5分、(c)10分経過後の河床高コンターを図-7に示す。河床変動開始から1分経過後では、衝撃波付近での堆積は十分ではないものの、水路中央の跳水部分の付近と跳水下流の水路の両側での土砂の堆積位置は実験に近い傾向であることがわかる。しかし、それ以降では、最初に堆積した土砂の位置に集中して土砂の堆積が進行し、十分に実験での堆積過程を再現することはできなかった。この原因として、今回の実験対象において土砂が存在する領域と存在しない領域があり、このような境界付近などでは、非平衡領域が存在し、平衡流砂モデルが過度の流砂量を評価してしまうためと考えられる。また、土砂の移動過程が流れを組み込んでいないことも十分に再現できなかった原因と考えられる。

(a) 1 min

(b) 5 min

(c) 10 min

図-7 河床高のコンター (Run2)

つぎに、非平衡流砂モデルによる解析結果(Run3)を図-8に示す。河床変動計算開始から1分経過後は、実験と同様に衝撃波と跳水付近での堆積、急拡部より下流域での堆積が確認できる。河床変動開始から5分経過後には、実験で確認された様に、水路中央で土砂が三角形の形状に堆積しているのが再現できている。また、急拡部下流での水路両側の砂州も実験に近い堆積をしている。河床変動開始10分後には、水路中央に堆積した土砂が下流方向へと伸び、水路両側の砂州も発達している。これらのように、非平衡流砂モデルでの解析は、時間的にも実験に近い土砂の堆積過程を再現できていることがわかる。このことから、非平衡流砂モデルの方が平衡流砂モデルよりも比較的正確に河床変動の再現されていることが確認された。つまり、この急拡部を伴う落差工下流における砂州の形成過程において、非平衡性の影響が大きいことがわかる。

この再現性の高い非平衡流砂モデルの結果を用いて、落差工の下流における土砂の堆積がどのようにして進行したかについて検討する。まず、Run4による流れの解析精度

(a) 1 min

(b) 5 min

(c) 10 min

図-8 河床高のコンター (Run3)

(a) 1 min

(b) 5 min

(c) 10 min

図-9 河床高のコンター (Run4)

を落とした場合の解析結果を図-9に示す。先ほど示したRun3による解析結果に比べて、河床変動解析開始から1分経過した時点で少し異なることが分かる。Run4での解析では、水路急拡部分での土砂の堆積が進行していないという点である。河床変動計算開始から5分経過後は、Run4においても水路中央部分で堆積する土砂が三角形の形に堆積する現象は再現されているものの、急拡部での砂州の形成は十分には再現できていないことが確認できる。さらに5分経過後も急拡部では砂州の堆積が確認できなかった。

もうひとつ異なる点は、急拡部より下流で形成される砂州が流れ方向に比較的伸びた形で形成されている点である。これも初期の段階からこの傾向が確認できる。これらの原因を知るために、Run4における河床変動開始初期における水位の分布、流速ベクトル図、流砂の移動経路、無次元掃流力の分布をそれぞれ図-10から図-13に示す。いずれの図においても水路中央線に対してほぼ対称に分布していることがわかる。また、河床変動中での水位や流

速の分布等に大きな変動がないことが確認された。水位の分布からわかるように、落差工下流で跳水が発生し、その付近で水位が高くなっている。また、流速ベクトル図から、この付近で流速が急激に小さくなっている。これらのことから、無次元掃流力が跳水部分で急激に下がっており、三角形に近い形でこれが小さい領域が分布していることが確認できる。さらに、流速ベクトル図からわかるように、急拡部で衝撃波が生じ、これによって流れ方向が水路中央に向かっていく。このため、流砂の移動経路は水路中央に集中していることがわかる。また、水路中央で堆積した砂は移動せずに、流砂移動経路のない白い領域で三角形の形状になっていることが確認できる。これらによって水路中央で土砂が堆積していく傾向にあることがわかる。また、水路中央に堆積した土砂は下流方向に向かって、比較的まっすぐと移動している。Run4での急拡部下流での砂州の形成が比較的下流方向に伸びて細く堆積しているのはこのためである。これに対して、Run3における河床変動開始初期における水位の分布、流速ベクトル図、流砂の移動

図-10 初期の水位分布 (Run4)

図-14 初期の水位分布 (Run3)

図-11 初期の流速ベクトル図 (Run4)

図-15 初期の流速ベクトル図 (Run3)

図-12 初期の流砂の移動経路 (Run4)

図-16 初期の流砂の移動経路 (Run3)

図-13 初期の無次元掃流力の分布 (Run4)

図-17 初期の無次元掃流力の分布 (Run3)

経路、無次元掃流力の分布をそれぞれ図-14 から図-17 に示す。先ほどの Run4 に比べて、水路中央線に対して非対称に水位や流速が分布しており、これらの分布が水路の両側に変動しながら流れていることが確認された。

このような変動は、図-18 に示すような急拡部分での流れによってもたらされている。これらの図は、1 秒間隔ごとのベクトルの変化を示したものであり、衝撃波付近で循環流が形成され、それが下流に移動し、また新たな循環

(a) $t = 0$ sec

(b) $t = 1$ sec

(c) $t = 2$ sec

(d) $t = 3$ sec

図-18 急転部分における流速ベクトル図 (Run3)

流が上流側で形成されていくのが確認できる。これは、急転部分における流速の横断分布が大きく変化しており、せん断不安定渦とみられる循環流が形成されるためと考えられる。このような、循環流が下流へと流れていくような過程は、Run4では、確認されなかった。

Run3での水位の分布と流速ベクトル図は、Run4に比べて非対称である以外は、値の大きさが大きく異なるということはない。しかし、無次元掃流力の分布は、非対称であるだけでなく、水路の両側で無次元掃流力の値が比較的低くなっている領域が、水路中央側に広がっていることが確認できる。これが、水路両側の砂州の堆積を促進さ

せる要因の一つである。また、図に示すように、流砂の移動経路が、循環流により横断方向に変動しながら輸送されるため水路の両側の比較的広い範囲に土砂が輸送されていくことも水路両側の砂州の発達に大きく影響を与えていると言える。

これらからわかるように、流れが大きく土砂の堆積に影響しており、流れの解析においてある程度の精度を保証しておくことが重要であることが確認された。

5. おわりに

本研究では、落差工周りの流砂の堆積過程を対象とした流れと河床変動の解析を行った。結果をまとめると以下のようになる。

1. 流れの解析において、今回用いたスキームでも落差工下流での衝撃波と跳水を再現でき、ある程度実験に近い結果を得ることができた。
2. 平衡流砂モデルによる河床変動解析は、初期の段階では、実験に近い結果を得ることができたが、時間の進行とともに実験の傾向と大きく異なる結果となった。
3. 非平衡流砂モデルにおいては、落差工下流での土砂の堆積過程が実験と近い傾向を示しており、平衡流砂モデルよりも優位性があることが確認された。
4. 非平衡流砂モデルによる解析結果から、今回対象とした実験条件においては、急転部分で生じる循環流が、落差工下流での砂州の形成に大きく影響を与えている事が確認された。

参考文献

- 1) Saif, A., Hosoda, T., Onda, T., and Shigemitsu, R. : Relation between sand bar formation and the habitat of "Kamogawa Chidori" in the Kamo River, Kyoto. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, RCEM2009, pp.549-554, 2009.
- 2) Nezu, I. And Nakagawa, H. : Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, pp.53-56, 1993.
- 3) 芦田和男, 道上正規 : 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 4) 長谷川和義 : 沖積蛇行の平面および河床形と流れに関する水理学的研究, 学位論文, 1984.
- 5) Nagata, N., Hosoda, T. and Muramoto, Y. : Numerical analysis of river channel processes with bank erosion. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126(4), 243-252, 2000.
- 6) 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.

(2012 年 3 月 8 日 受付)