

3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる 水制周辺の河床変動解析

長田信寿¹・細田 尚²・村本嘉雄³・中藤達昭⁴

¹正会員 博(工学) 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³フェロー会員 工博 大阪工業技術専門学校校長 (〒530-0043 大阪市北区天満 1-9-27)

⁴ Ph.D. アイオワ大学アイオワ水理研究所副所長 (Iowa City, Iowa 52242, USA)

本研究では、流れ及び河床形状の空間的変化が著しい非越流・不透過型水制周辺の局所洗掘過程を表現し得る3次元数値解析モデルの構築を行った。流れの計算においては、時間的に変化する河床面及び水面が存在する場で有効な手法と考えられる移動一般座標系を用いて基礎式を記述し、また、乱流モデルとしては非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いた。河床変動計算では、水制周辺で流れ及び局所河床勾配の空間変化が著しいことに起因して流砂の非平衡現象が卓越すると考えられるため、砂粒の離脱・堆積に関する確率モデルと砂粒の運動方程式を用いた砂粒の移動計算を組み合わせることにより、流砂の非平衡現象を表しうるモデルを構築した。本数値解析手法を、既往の室内実験に適用し、実験結果との比較によって、モデルの妥当性及び有用性を示した。

Key Words : local scour, spur dike, numerical analysis, non-equilibrium sediment transport, moving grid system

1. はじめに

水制は、河岸防御などの災害対策あるいは航路確保のため、従来より設置されてきたが、最近では、環境への配慮から水制周辺で積極的に河床の洗掘・堆積を生じさせ、河道の多様性の創出を図る機能も期待されている。そのような観点からは、水制工自体の倒壊防止のための最大洗掘深予測だけでなく、水制の設置による周辺河床の洗掘過程および洗掘孔形状の的確な予測が必要であると考えられる。本研究では、側岸に水制状の構造物を有する流路の河床変動過程を予測する基本的数値解析モデルを開発することを目的とする。

これまで、水制に関する研究は、上記のような状況を背景として、様々な観点から、室内実験、現地計測、数値解析が行われてきた。特に、室内実験については、水制周辺の流れの基本的な構造の把握あるいは最大洗掘深の予測等を目的として、多くの研究が行われている(例えば、秋草¹⁾、Garde, Subramanya and Nambudripad²⁾、Gill³⁾、今本・池野⁴⁾、Rajaratnam and Nwachukwu⁵⁾など)。また、最近では、水制域と主流域間の流れの詳細な構造の把握を目的とした実験が行われており、例えば、柿崎・長谷川⁶⁾は群として設置された越流型の水制を対象に、

また、池田・吉池・杉本⁷⁾は非越流型水制を対象に、両域間の運動量輸送等について考察している。越流型水制周辺の河床形状変化を扱った実験としては、福岡ら⁸⁾、大本・平川・井手⁹⁾によって行われた研究があり、水制角度あるいは水制間隔が流れ及び洗掘深等に与える影響について検討がなされている。

実河川に設置された水制の現地計測を行った研究は、室内実験と比較して少ないが、以下の研究例がある。Przedwojski¹⁰⁾は、Wart 川の湾曲部を調査地点として、河道の湾曲に起因する洗掘が存在する場における水制周りの局所洗掘深について考察を行っている。また、崇田・渡邊・清水¹¹⁾、崇田・清水・板倉¹²⁾は、水制周辺の流れが河床変動に及ぼす影響、特に、水制背後の2次流と土砂堆積に着目して十勝川を対象に計測を行っており、藤田¹³⁾は、PIVを用いて水制周辺の表面流況を把握することにより、群として設置された水制間の循環流に着目して計測を行い、ともに興味深い結果を得ている。

水制周辺における流れを対象とした数値解析は、Liu, Tominaga and Nagao¹⁴⁾、秋山ら¹⁵⁾、Mayerle, Toro and Wang¹⁶⁾、崇田・清水¹⁷⁾、Ouillon and Dartus¹⁸⁾によって行われている。Liu, Tominaga and Nagao¹⁴⁾は、水制形状、水制設置角の相違する水制を対象に、秋山ら¹⁵⁾は、側壁に

垂直に設置された直方体の単独水制、群水制を対象に、水深積分された平面2次元流れの数値解析を行っている。Mayerleら¹⁶⁾は、静水圧分布を仮定した3次元モデルを用い、渦動粘性係数の評価手法が異なる複数ケースの計算を行っているが、いずれの計算ケースの結果も実験結果の流速分布を再現できていない。これは、鉛直流速が卓越する流れ場であるにもかかわらず、静水圧分布を仮定していることも理由であろうが、このモデルは、横断方向に粗い計算格子を用いているにもかかわらず、壁面境界条件として non-slip 条件を与えており、これも実験結果と計算結果に差が生じた原因の一つであろうと考えられる。崇田・清水¹⁷⁾は、水面及び河床面が時間的に変動する場を対象とした場合では、3次元モデルを用いた数値解析が難しくなること等の理由により、水深方向の流速分布を半解析的に求め、これを平面2次元モデルに導入し、水制背後に形成される2次元流が再現可能な準3次元モデルを構築しており、水制のごく近傍を除いてその再現性は良い。Ouillon and Dartus¹⁸⁾は静水圧分布を仮定しない3次元モデルを用いて、水制周辺の流れに適用している。水制周辺の3次元流れの構造については結果が示されていないためモデルの再現性は判断できないが、流速の平面的な分布の再現は良好である。

水制周辺での河床変動計算を含めた数値解析としては、福岡ら^{19),20)}、道上・檜谷²¹⁾、Jia and Wang²²⁾、大槻ら²³⁾、Pengら²⁴⁾の研究がある。福岡ら²⁰⁾は、水制の抗力・揚力を外力として運動方程式に取り込むことにより、越流型水制の存在する流路の河床変動計算を行い、その設置法に関して工学的に有用な提言を行っている。しかし、このモデルでは鉛直方向の運動方程式を解かず静水圧分布を仮定しているため、適用範囲には限界があり、例えば鉛直流が卓越する非越流型・不透過水制への適用は困難であると考えられる。Jia and Wang²²⁾も同様に、静水圧分布を仮定しており、また大槻ら²³⁾は、平面2次元モデルに抵抗として水制の影響を導入しているため、上記と同様の問題点を有する。一方、水制周辺においては、底面近傍流れの非一様性が著しく、また局所的な河床勾配も局所洗掘に起因して水制周辺で空間的に大きく変化することから、流砂の非平衡現象が卓越すると考えられる。したがって、掃流砂を対象とした河床変動計算においては、流砂の非平衡性を考慮する必要があると考えられる。しかし、福岡ら²⁰⁾、大槻ら²³⁾、Pengら²⁴⁾のモデルは、いずれも平衡流砂量式を用いて河床変動計算を行っており、この点にも問題が残されている。Jia and Wang²²⁾のモデルに関しては、浮遊砂量の計算に用いる河床のせん断応力の算出において、3次元モデルを用いて水制近傍の流れ場を解いているにもかかわらず、壁法則から求められる底面せん断応力だけでなく、水制近傍の回転流の影響をその渦度を用いて付加しており、この物理的な意味づけ

が困難である。以上のモデルに対して、道上・檜谷²¹⁾は、流れに関しては非静水圧分布の3次元モデルを用いており、河床変動計算については流砂の非平衡性に着目したモデル化を行っている。しかし、流砂の非平衡性の導入方法については、実験の観測結果をもとに、水制前面のメッシュからの流送土砂は水制前面では堆積せず、すべて流出されるものと仮定し、その堆積は、水制先端からの距離に応じて同心円的に行うという簡易的な手法を用いており、その仮定の妥当性、適用の汎用性については疑問が残る。また、計算点における流出土砂量を平衡流砂量式を用いて算定している点にも問題がある。

以上のように、水制周辺の現象を再現できるモデル、特に、水制近傍の河床変動過程に関する数値解析モデルは、現段階では確立されていない。本研究では、このような現状に鑑み、水制周りの局所洗掘現象が再現可能な数値解析モデルを開発することを目的とする。対象は、非越流型の不透過水制とする。理由は、特に、非越流型・不透過水制については、数値解析の困難さもあって、解析手法の開発が遅れている分野であること、また、類似の構造物として、橋脚あるいはAbutment等への数値解析モデルの応用も考えれば、非越流・不透過の河川構造物まわりの局所洗掘現象に関する数値解析モデルを構築する意義は少なくない、と考えられるからである。

ここで構築するモデルは以下の特徴を有する。まず、非越流・不透過型の水制周辺では鉛直流速が卓越するため、静水圧近似を行わず、鉛直方向の運動方程式を解く3次元モデルを用いる。また、崇田・清水¹⁷⁾は、河床変動を伴う流れの計算に3次元数値解析モデルを用いる場合、水深方向の計算格子の配置法が難しくなることを指摘しているが、本研究では、この点に関して、時間的に変化する水面と河床面に適合するよう、計算ステップごとに計算格子点を再構築する移動一般座標系を用いることで対応している。また、乱流モデルとしては、3次元性が強い水制周辺での流れに適用できるよう、非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いる。河床変動計算においては、前述した理由から、流砂の非平衡性を考慮することとし、pick-up rate の算定、砂粒の運動方程式を用いた砂粒の移動経路の計算、step length に応じた deposition rate の算定、を行うことにより、河床の洗掘・堆積過程を計算する。

本モデルを、崇田・清水¹⁷⁾、および道上・檜谷²¹⁾の実験に適用することにより、本数値解析手法の妥当性を検証する。

2. 移動座標系を用いた3次元流れの計算手法

(1) 流れの基礎式

著者らは、これまで、計算境界である側壁が移動する河岸侵食現象に対して、時間的に変化する河岸に適合し

た移動一般座標系を用いて、平面2次元の流路変動過程の数値解析を行ってきた²⁵⁾。移動一般座標系の導入は、流れの計算と河床変動計算をカップリングして行う場合、特に、有効な方法であると考えられる(例えば、Nagata²⁶⁾、牛島・清水・保坂²⁷⁾)。本研究においても、構造物周りの局所洗掘現象に適用するため、時間的に変動する水面と河床面に適合した3次元の移動一般座標系を用いることとする。また、後述するように変数配置法としてスタッガードスキームを用いており、圧力を計算セル中央に、流速成分をセル境界面に配置している。このような場合、デカルト座標系の流速成分を未知量として基礎式を記述すると、各セル境界面の法線方向は任意であるため、セル境界面への変数配置が困難となる。したがって、ここでは、流速ベクトルの反変成分 U^i を未知量として、基礎式を記述することとする²⁸⁾。流れの連続式と運動方程式は以下のように表せる。

[連続式]

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

[運動方程式]

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

ここで、

$$\nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right), \quad g^{ij} \equiv \nabla \xi^i \cdot \nabla \xi^j \quad (3a, b)$$

$$U^i \equiv (\partial \xi^i / \partial x_j) u_j \quad (3c)$$

$$U_G^i \equiv (\partial \xi^i / \partial x_j) u_{jG} \quad (3d)$$

$$\tau_{ij} = \nu \left(\frac{\partial \xi^m}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi^m} + \frac{\partial \xi^m}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial \xi^m} \right) \quad (3e)$$

ここに、 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、 ρ :水の密度、 ν :動粘性係数、 p :圧力、 J :座標変換のヤコビアン(J^{-1} は物理空間のセル体積)、 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($\mathbf{u}=(u_1, u_2, u_3)$)、 u_i :流速ベクトルの x_i 方向成分、 u_{jG} :計算格子移動速度ベクトルの x_i 方向成分、 \mathbf{f} :外力(ここでは重力)ベクトル($\mathbf{f}=(f_1, f_2, f_3)=(0, 0, -g)$)、 f_i :外力の x_i 方向成

分、 g :重力加速度、 τ_{ij} :粘性応力テンソル、 $\overline{u'_i u'_j}$:レイノルズ応力テンソルであり、 i, j, l, m は1, 2, 3の値をとる。

(2) 乱流モデル

本研究では、構造物周りの局所洗掘現象という複雑な境界形状を有する流れ場を解析対象としているため、実用的観点から、乱流モデルとしてレイノルズ平均乱流モデルを用いている。ただし、水制等の構造物周りの流れは、3次元的な流れが顕著であり、標準型 $k-\varepsilon$ モデルを適用することは適切でないと考えられる。したがって、ここでは、開水路角柱まわりの流れの再現等で良好な結果を得ている木村・細田^{29), 30)}が同定した関数形を用いた非線形 $k-\varepsilon$ モデルより、レイノルズ応力を評価する。

レイノルズ応力は、2次の非線形項まで考慮したYoshizawa³¹⁾の表現を用いて、次式で評価する。

$$\begin{aligned} -\overline{u'_i u'_j} = D_i \left(\frac{\partial \xi^m}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi^m} + \frac{\partial \xi^m}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial \xi^m} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4) \\ - \frac{k}{\varepsilon} D_i \sum_{\beta=1}^3 C_{\beta i} \left(S_{\beta i} - \frac{1}{3} S_{\beta \alpha \alpha} \delta_{ij} \right) \end{aligned}$$

ここで

$$S_{1ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \frac{\partial u_j}{\partial x_r} \quad (5a)$$

$$S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_r} + \frac{\partial u_r}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \right) \quad (5b)$$

$$S_{3ij} = \frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_r}{\partial x_j} \quad (5c)$$

ここに、 k :乱れエネルギー、 ε :乱れエネルギー散逸率、 D_i :渦動粘性係数、 C_{μ}, C_1, C_2, C_3 :係数、 δ_{ij} :クロネッカーのデルタ記号である。なお、式(4), (5)は、Gatski and Speziale³²⁾の表現と等価である。渦動粘性係数 D_i 、係数 C_{μ}, C_1, C_2, C_3 は次式で評価する。

$$D_i = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_{\mu} = \min \left[0.09, \frac{0.3}{1+0.09M^2} \right] \quad (6a, b)$$

$$C_1 = \frac{0.4}{1+0.01M^2}, \quad C_2 = 0, \quad C_3 = \frac{-0.13}{1+0.01M^2} \quad (6c, d, e)$$

上式中の M は、以下のようにStrain Parameter S とRotation Parameter Ω で評価する。

$$M = \max(S, \Omega) \quad (7)$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}, \quad \Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (8a, b)$$

式(5), (8)に含まれる $\partial u_i / \partial x_j$ は、一般座標系では、 $(\partial \xi^m / \partial x_j) (\partial u_i / \partial \xi^m)$ と表されるが、ここでは表示の簡略化のため、デカルト座標系での表示にとどめる。

乱れエネルギー k 、乱れエネルギー散逸率 ε は、以下の輸送方程式を解くことにより計算される。

[k の輸送方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{k}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j) k}{J} \right) \\ = \frac{-\overline{u_i' u_j'}}{J} \frac{\partial \xi^l}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi^l} \frac{\varepsilon}{J} \\ + \frac{\partial}{\partial \xi^l} \left(\left(\nu + \frac{D_l}{\sigma_k} \right) \frac{g^{lm}}{J} \frac{\partial k}{\partial \xi^m} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

[ε の輸送方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j) \varepsilon}{J} \right) \\ = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \frac{(-\overline{u_i' u_j'})}{J} \frac{\partial \xi^l}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial \xi^l} \frac{C_{\varepsilon 2}}{J} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ + \frac{\partial}{\partial \xi^l} \left(\left(\nu + \frac{D_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{g^{lm}}{J} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi^m} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)、(10)のモデル定数は、一般的な $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\eta = 1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ を用いる。

(3) 数値解析法と境界条件

基礎式の離散化手法としては、有限体積法を用いる。移流項の離散化には QUICK スキームを用いる。変数はスタッガードスキームを用いて配置する。また、本研究では静水圧分布を仮定せず3方向の運動方程式を解いているため、収束計算を行う必要があるが、ここでは HSMAC 法を用いて、連続式を満足するよう圧力と流速を計算する。

壁面（側壁面、水制壁面、河床面）の境界条件としては壁法則を用いる。すなわち、①壁面から最近傍の計算第一格子点において、壁面と平行な流速を算出し、②この流速、および第一格子点と壁面との距離（壁面の法線方向）を用いて、対数則より摩擦速度を計算し、③壁面せん断応力を求めるとともに、乱流特性量の境界条件を壁関数を用いて与える。上下流端の境界条件については、上流端では流量を、下流端では水位を与え、水理量の流下方向勾配を0とする。また、自由水面の存在による乱れの抑制を表すため、杉山ら³³⁾の提示した乱れエネルギー散逸率に関する水表面境界条件、及び細田³⁴⁾の提示した渦動粘性係数に関する減衰関数を用いることとする。初期条件としては、乱れエネルギー k 、乱れエネルギー散逸率 ε は一様とし、横断方向、鉛直方向流速は0、流下方向流速の鉛直分布は対数分布を用いて与える。

水表面位置は、水表面の運動学的条件が満足されるように、その時間変化を求める。また、河床面位置は、次節で述べる河床変動計算モデルを用いて計算する。

3. 流砂の非平衡性を考慮した河床変動計算手法

構造物周りの局所洗掘現象においては、構造物周辺で、底面せん断応力ベクトルの変化が大きく、また、局所河床勾配の変化も顕著であるため、流砂の非平衡現象が卓越すると考えられる。したがって、平衡流砂量式を用いて、河床変動計算を行うことは、妥当性を欠くと考えられる。ここでは、①局所的な掃流力に応じた pick-up rate の算定、②砂粒の運動方程式を用いた砂粒の移動経路の計算、③ step length に応じた deposition rate の算定、で構成された河床変動モデルを構築することにより、流砂の非平衡性を考慮することとする。

なお、著者らは、既に、河岸侵食に伴う流路変動解析モデルにおいて、平面2次元的な流砂の非平衡性を考慮した河床変動モデルを提示している²⁵⁾が、本研究で構築したモデルとは、砂粒の移動過程の扱い方が相違している。すなわち、前報²⁵⁾においては、流れの計算を行うことによって、主流方向、および流線の曲がりに伴う2次元流に起因する底面近傍流速ベクトルの主流方向からのずれを求め、この2次元流の影響と、河床横断勾配が砂粒の移動方向に与える影響を考慮して、砂粒の移動軌跡を算出した。しかし、ここで対象とするような構造物周りの流れにおいては、底面近傍で渦が形成されるなど流れの3次元性が強く、上記の手法の適用は困難である。したがって、ここでは、前述したように砂粒の運動方程式を解くことにより、砂粒の移動過程を計算する。

また、構造物周りの洗掘深が増大するに伴って、大きな局所的河床勾配を有する斜面が形成され、土砂の slide が生じる。このモデル化についても説明する。

(1) pick-up 量の計算

単位時間あたりに、それぞれの計算メッシュから離脱 (pick-up) する土砂体積 V_p は、pick-up rate p_s を用いて、次式のように表せる。

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p \quad (11)$$

ここに、 d ：河床材料の粒径、 A_2 、 A_3 ：砂粒の2次元、3次元の形状係数 (= $\pi/4$, $\pi/6$)、 S_p ：離脱地点の計算メッシュの鉛直方向 (x_3 方向) への射影面積である。なお、 V_p の定義点は、河床のメッシュ中央である。pick-up rate p_s は、局所河床勾配の影響を考慮した中川・辻本・村上³⁵⁾による次式を用いて計算する。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_p \Phi \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^{m_p} \quad (12)$$

$$G_* = \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (13a)$$

$$\Phi = \frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \quad (13b)$$

ここに、 τ_c ：無次元掃流力、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力（岩垣式³⁶⁾より算出）、 σ ：河床材料の密度（ $\sigma/\rho=2.65$ ）、 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度、 α ：砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角度である。定数 F_0, k_p, m_p には、中川ら³⁵⁾と同様に、それぞれ0.03, 0.7, 3を与える。また、式(11)中の離脱地点の計算メッシュの x_3 方向への射影面積 S_p は、底面から水面方向を ξ^3 軸とすると、次式で計算される。

$$S_p = \frac{\partial \xi^3 / \partial x_3}{J} \quad (14)$$

(2) 砂粒の運動方程式を用いた移動過程の計算

ここでは、離脱後の移動過程を、砂粒の運動方程式を用いて計算する手法について述べる。なお、移動計算の開始地点は、砂粒の離脱地点、すなわち河床面のすべてのメッシュの中央位置であり、以下に述べる計算は、この地点から離脱した砂粒の移動過程を計算するものである。

まず、河床平面を表すため、 (x_1-x_3) 平面、 (x_2-x_3) 平面内の河床平面と平行な単位ベクトルを、それぞれ \mathbf{p}_{b1} 、 \mathbf{p}_{b2} とすれば、これらは以下のように表せる（ただし、 x_3 方向を鉛直方向とする）。

$$\mathbf{p}_{b1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{b1} \\ 0 \\ \sin \theta_{b1} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p}_{b2} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \theta_{b2} \\ \sin \theta_{b2} \end{pmatrix} \quad (15a, b)$$

ここに、 θ_{b1}, θ_{b2} は、それぞれ x_1, x_2 方向の河床勾配角である。砂粒の作用する力として、抗力、重力、浮力、揚力、摩擦力を考えると、 \mathbf{p}_{bi} ($i=1,2$)方向についての砂粒の運動方程式は以下ようになる。

$$m_{sed} \frac{d u_{sed i}}{dt} = D_i + W_i - F_i \quad (16)$$

ここに、 m_{sed} ：砂粒の仮想質量であり、付加質量係数 $C_m (=0.5)$ を用いて、次式で表せる。

$$m_{sed} = \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_m \right) A_3 d^3 \quad (17)$$

また、 D_i, W_i, F_i は、砂粒に作用する抗力、水中重量、摩擦力の \mathbf{p}_{bi} 方向成分であり、それぞれの大きさを D, W, F とすれば、次式のように表せる。

$$D = \frac{C_D \rho}{2} (u_{bi} - u_{sed i})^2 c_e A_2 d^2 \quad (18a)$$

$$W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \quad (18b)$$

$$F = \mu_k \left(W \frac{\cos \theta_{b1} \cos \theta_{b2}}{\sin \theta_p} - k_L D \right) \quad (18c)$$

$$D_1 = D \frac{u_{b1} - u_{sed 1}}{\sqrt{(u_{b1} - u_{sed 1})^2}}, \quad D_2 = D \frac{u_{b2} - u_{sed 2}}{\sqrt{(u_{b2} - u_{sed 2})^2}} \quad (19a, b)$$

$$W_1 = -W \frac{\sin \theta_{b1} \cos^2 \theta_{b2}}{\sin^2 \theta_p}, \quad W_2 = -W \frac{\sin \theta_{b2} \cos^2 \theta_{b1}}{\sin^2 \theta_p} \quad (19c, d)$$

$$F_1 = F \frac{u_{sed 1}}{\sqrt{u_{sed i}^2}}, \quad F_2 = F \frac{u_{sed 2}}{\sqrt{u_{sed i}^2}} \quad (19e, f)$$

ここに、 $u_{sed i}$ ：砂粒の移動速度の \mathbf{p}_{bi} 方向成分、 u_{bi} ：底面近傍流速の \mathbf{p}_{bi} 方向成分、 C_D ：抗力係数（ $=0.4$ ）、 c_e ：砂粒に作用する抗力の有効断面積に関する係数（ $c_e A_2 d^2$ ：周辺砂粒からの露出を考慮した抗力の作用に関する砂粒の有効断面積）、 μ_k ：砂粒の動摩擦係数（ $=0.35$ ）、 θ_p ： \mathbf{p}_{b1} と \mathbf{p}_{b2} のなす角度である。また、砂粒に作用する流速 u_b の大きさは、 $k_d d$ （ $k_d=0.8$ ）³⁷⁾とする。なお、 c_e は、いわゆる遮蔽係数³⁶⁾に相当するものであり、静止砂粒に対しては0.4程度の値が用いられている。本解析においても静止砂粒に作用する抗力の算出に用いる c_e については、 $c_e=0.4$ を用いることとする。しかし、移動中の砂粒の c_e については、静止砂粒に対する上記の値より大きくなるのが指摘されているが³⁸⁾、その値は、砂粒の移動形態によって異なると考えられる。特に流れの変化が著しい局所洗掘孔においては、その定式化は現時点では困難であると考えられることから、ここでは簡単のため移動中の土砂については $c_e=1$ と仮定する。

砂粒位置は、砂粒の運動方程式より計算された砂粒の移動速度ベクトル \mathbf{u}_{sed} を用いて、次式により、求められる。

$$\mathbf{p}_{sed(n)} = \mathbf{p}_{sed(n-1)} + \Delta t \cdot \mathbf{u}_{sed} \quad (20)$$

ここに、 $\mathbf{p}_{sed(n)}$ ：pick-up後、計算 n ステップ時の砂粒の位置ベクトル。なお、初期値 $\mathbf{p}_{sed(0)}$ はpick-up rateの定義点の座標である。また、砂粒の移動距離 $s_{(n)}$ は、 $s_{(n)} = \sum \Delta t |\mathbf{u}_{sed(n)}|$ で与えられる。

なお、前項及び本項で現れた各種係数（抗力揚力比、付加質量係数、抗力係数など）は、主に、中川・辻本³⁹⁾を参考に設定した。また、洗掘孔内の砂粒の動きは複雑であり、既往の実験では、その挙動が十分明らかになっているとは言いがたい。したがって、ここでは、式(16)の運動方程式で示したような滑動形式で、その動きを代表させることとした。しかし、この点に関しては、今後詳細な実験を行い、洗掘孔内における砂粒の挙動について明らかにし、その機構をモデルに導入する必要がある。

(3) deposition 量の計算

前項で計算された砂粒の移動地点において、土砂の堆積量を求める。計算点 j (この点での砂粒の pick-up 量を $V_{p(j)}$ とする) から出発した砂粒の移動経路において、出発から n ステップ後の位置における単位時間あたりの deposition 体積 $V_{d(j,n)}$ は、step length の確率密度関数を $f_s(s_{(n)})$ とすると、次式で示される。

$$V_{d(j,n)} = V_{p(j)} f_s(s_{(n)}) \Delta s \quad (21)$$

ここに Δs は、計算 1 ステップ間の砂粒の移動距離であり、 $\Delta s = \Delta t \cdot |\mathbf{u}_{sed}|$ と表せる。なお、step length の確率密度関数は、次式で示すような指数関数で表せるものとする³⁵⁾。

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{s_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (22)$$

ここに、 λ : 平均 step length である。平均 step length λ は、これまで粒径と関係づけられて議論されており⁴⁰⁾、平均的には粒径 d の 100 倍程度であり、 d の 50 倍~250 倍程度の範囲である言われている⁴¹⁾。step length は、主に砂粒と河床の衝突事象に関係しているため、pick-up rate と比較して、摩擦速度や掃流力の変動に対しての変化が鈍いと指摘されているが、ここでは、その変化をモデルに組み込むこととし、Einstein⁴²⁾ が揚力の変動を考慮して提示した次式を用いることとする

$$\lambda = \lambda_0 d \int_{-B_* / \tau_* - 1 / \eta_0}^{B_* / \tau_* - 1 / \eta_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr \quad (23)$$

ここに、 η_0 : 流体力変動の変動係数、 B_* 、 λ_0 : 定数である。 η_0 、 B_* 、 λ_0 は Einstein⁴²⁾ と同様に、それぞれ 0.5、0.156、100 とした。これらの係数に関して、例えば、 η_0 は、Einstein and El-Samni⁴³⁾ の圧力変動の実験結果からの推定であるが、局所洗掘現象の解析に、同様の値を用いることに関しては、問題が残されていると考えられる。 B_* 、 λ_0 についても、同様のことが指摘できる。なお、流砂の非平衡性の出現は、前述した構造物まわりの底面せん断応力ベクトルおよび局所河床勾配の変化による砂粒の離脱量・移動方向の空間的な変化に起因するもの他に、step length の変化に起因するものが考えられる。しかし、式(23)の導入は、そのような step length の変化に起因する流砂の非平衡性の出現を積極的に導入することを意図したものではない。すなわち、前報²⁵⁾まで用いてきた平均 step length (砂粒径の定数倍： $\lambda = 100d$) では、流れの変化が step length に与える影響が考慮されていないので、構造物周辺では step length が平坦河床の場合と異なるという指摘⁴⁴⁾を、モデルに反映させる余地が全くないために、導入したに過ぎない。したがって、式(23)の局所洗掘現象への適用性、あるいはより望ましい評価法について明らかにするために、今後、構造物まわりの砂粒の移動・

停止に関する基礎的なデータを蓄積する必要がある。

また、本モデルの基本的な構成に関して、検討を要すべき点としては、砂粒の運動方程式を解き、その移動過程を計算しているにもかかわらず、step length という確率的な概念を取り入れて砂粒の堆積過程を記述していることである。確かに、河床との衝突事象をモデル化し、砂粒の停止条件を取り入れれば、力学的に砂粒の停止、すなわち堆積が記述でき、平均 step length 等を設定する必要はない。例えば、中川ら^{45)、46)}、後藤⁴⁷⁾は、砂粒の移動形態として、転動あるいは滑動形式を考え、停止条件としては、河床の突起での砂粒の乗り越しモデルにおいて、乗り越し時の角速度、あるいは衝突後の移動速度が限界値以下の場合に停止したとみなしている。また、関根・吉川⁴⁸⁾は、砂粒の移動を、3次元 Saltation 運動の数値模擬によって解析し、停止条件としては、「砂粒が窪みの部分にトラップされ、上下流いずれの方向にも流送されない状態に至ったとき、その砂粒は停止したと判断する」として、step length、moving period などを評価し、非常に興味深い結果を得ている。しかし、このような手法を用いた場合には、河床の凹凸をモデル化する必要が生じ、ここでさらに確率的な扱いが必要となる(例えば、中川ら^{45)、46)}、後藤⁴⁷⁾の砂粒の乗り越しモデルにおいては、突起間隔や突起高さなど。関根・吉川⁴⁸⁾のモデルでは、河床粒子の配列など)。また、砂粒の停止条件の設定についても、さらなる議論の対象となろう。特に局所洗掘現象を対象とした場合においては、これらの知見はまだ十分ではないと考えられること、および本研究が基本的モデルの構築に主眼をおいていることを考え、河床との衝突事象のモデル化は行わないこととした。

(4) 局所洗掘における土砂の slide の扱い

非粘着性材料で構成された河床での、構造物周りの局所洗掘現象では、洗掘深の増大に伴って河床の局所的な勾配が増加するが、ある限界角 θ_{\max} 以上の斜面が形成された場合、河床斜面のずり落ち (slide) が生じる。この領域は、Melville⁴⁹⁾による実験においても指摘されているように、洗掘孔の発達にともなって拡大する。したがって、局所洗掘現象の計算においては、この土砂の slide のモデル化が不可欠と考えられ、本計算においては、簡単に、以下のようにモデル化した。まず、あるメッシュとその隣接メッシュすべての河床高を比較し、限界角以上の斜面が形成されたメッシュ間では、slide により、瞬時に、限界角を保持するに見合う量の土砂移動が生じるとする。slide 土砂移動先のメッシュでは、前項で述べた土砂の移動・堆積計算において、上記の slide による土砂移動体積を付加し計算を行うこととする。なお、前述の限界角 θ_{\max} については、ここでは簡単に水中安息角 (ここでは $\theta_{\max} = 32^\circ$) とする。

(5) 河床変動計算

以上の手法によって算出した単位時間あたりの pick-up 体積〔式(11)〕, deposition 体積〔式(21)〕を用いて, 河床変高の時間変動を計算する。しかし, pick-up 体積は, 河床高定義点(メッシュ中央)で定義されているものの, 式(21)で計算される deposition 体積 $V_{d(j,n)}$ は, 各経路上で計算されているため(後出図-1 参照), その位置は河床高の定義位置と必ずしも一致しない。そこで, まず, ① $V_{d(j,n)}$ の算出点が含まれる計算メッシュを抽出し, ② 式(21)で計算された $V_{d(j,n)}$ を河床高定義点の位置での値に換算し, ③ それを, 各河床高定義点ごとに, 各々の河床高定義位置近傍に到達した砂粒の堆積量の合計量 V_d (異なる離脱個所から移動を開始した砂粒が, 現時間ステップに, 同一の河床高定義位置近傍に到達することがあるため, 計算対象としている河床高定義点に関連する $V_{d(j,n)}$ を合計する必要がある) を求め, ④ 次式により, 河床変動を計算する。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{(V_d - V_p)}{S_d} \quad (24)$$

ここに, z_b : 河床高, A_1 : 1 次元の砂粒の形状係数 (=1.0), S_d : 当該計算メッシュの x_3 方向への射影面積である。なお, 上記②の, 移動経路上で計算された $V_{d(j,n)}$ の河床高定義点の位置での値への変換に関しては, メッシュの辺長で規準化(無次元化)された砂粒位置の無次元化座標を用いて, 重み付きで, $V_{d(j,n)}$ を近傍の河床高定義位置へ分配することとした。また, ③で述べたように, $V_{d(j,n)}$ の河床高定義点への変換量を, 各河床高定義点において合計し, V_d を求めるということは, 通常, 畳み込み積分の形で表現される deposition 量を, 2 次元の河床平面において数値解析的に計算していることになる。

(6) 計算手順

上記の手法を用いた場合, 各地点から離脱した砂粒の各時間ステップにおける移動地点, 移動速度を記憶させておく必要がある。このため, 砂粒の pick-up 計算をすべての時間ステップで行うことは, 計算機の記憶容量から考えて困難である。したがって, ここでは, 以下の手順で計算を進行する。

まず, 砂粒の pick-up 計算は, ある時間間隔 Δt_p (ここでは $\Delta t_p = 0.125 \text{ sec}$) ごとに行うこととし, この Δt_p 内に pick-up された砂粒の体積は, 式(11)に Δt_p を乗じることによって求める。計算各ステップの pick-up 量は, Δt_p 内では時間的に均等に pick-up されるものとし, その体積を各計算ステップに割り振る。なお, Δt_p の設定は, 使用するコンピュータの搭載メモリ量と, 流れの計算時間間隔 Δt (ここでは, $\Delta t = 0.005 \text{ sec}$) および計算格子点数等との関係から決定される。すなわち, Δt_p を小さくすると, 必要なメモリ量が大きくなり, 計算が困難となる場

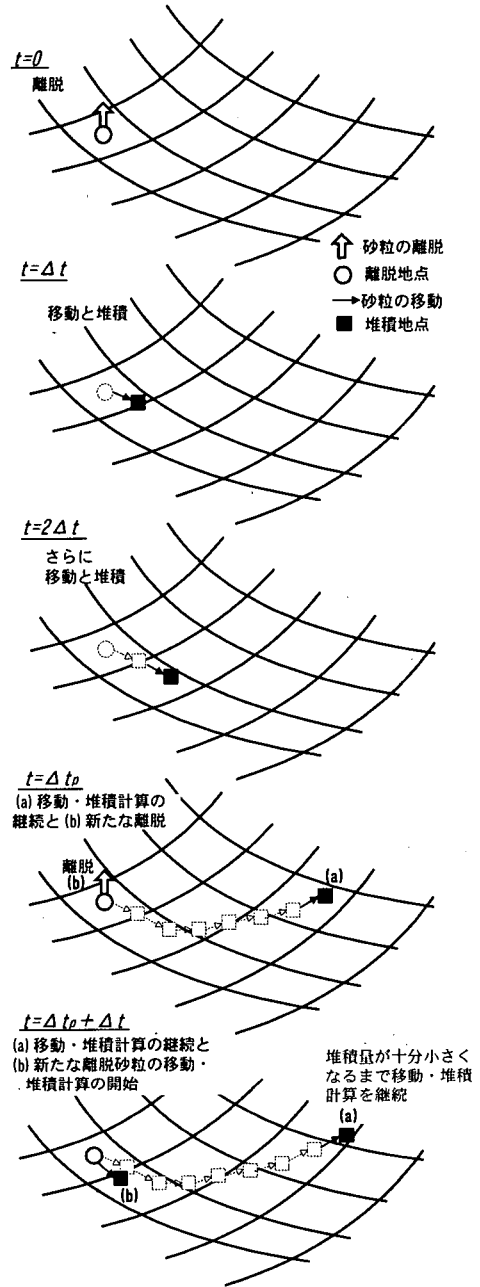


図-1 砂粒の離脱・移動・堆積計算模式図

合があるが, 一方で, Δt_p を大きくしすぎると, 河床変動の進行が漸続的になる。なお, Δt_p の設定値の変更が, 最大洗掘深あるいは洗掘形状の計算結果に与える影響は, ほとんどないことを確かめている。次に, 砂粒の運動方程式は, すべての計算ステップ (Δt 間隔) で計算し, 砂粒の移動距離に応じて, 式(21)より deposition 体積を計算する。また, 砂粒の移動・堆積計算は, 堆積量が十分小さくなるまで, すなわち, 各移動経路上において, 堆

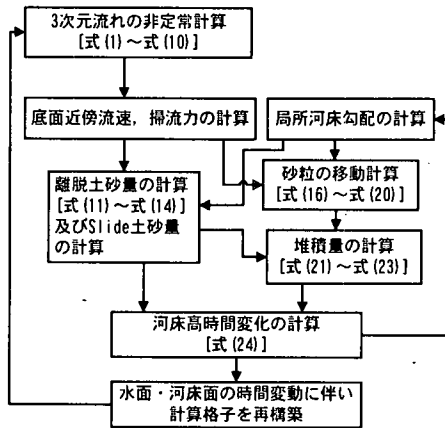


図-2 計算フロー

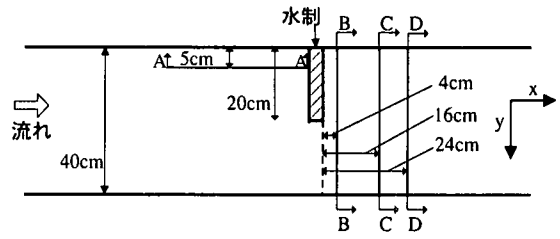


図-3 崇田・清水¹⁷⁾による実験水路の概要

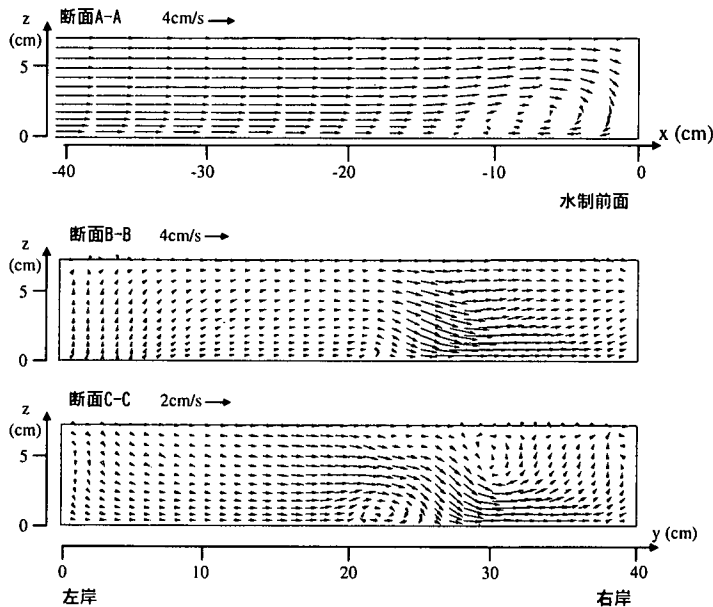


図-4 断面A-A, B-B, C-Cにおける流速ベクトル (計算結果)

積量の合計とその出発地点における離脱量がほぼ等しくなるまで、継続して計算を行う。また、斜面のslideの計算は、pick-up 体積を計算する時間間隔 (Δt_p) と同じ間隔で行っている。

河床高は、式 (24) を用いて、各ステップごと (Δt ごと) に計算を行い、更新された河床面および水面に適合するように、計算格子を再構築し、計算を進める。

以上の計算過程を、最初の離脱時を $t=0$ として、 Δt 後、 $2\Delta t$ 後、 \dots 、 Δt_p 後、 $\Delta t_p + \Delta t$ 後、について、模式的に示したものが図-1である。また、流れの計算も含めた全体の解析フローを図-2に示す。

4. 水制周辺の流れと局所洗掘現象への適用

本計算手法の妥当性の検証のため、2.及び3.で示した数値解析モデルを、(1) 崇田・清水¹⁷⁾の実験、(2) 道上・檜谷²¹⁾の実験に適用し、その結果を考察する。

(1) 崇田・清水の実験への適用および結果の考察

まず、流れの再現性を検証することを目的として、本モデルを崇田・清水の実験¹⁷⁾に適用した。崇田・清水は、平坦な固定床上に水制を設置し、その周辺の流れ、特に水制背後の流れを、レーザー流速計を用いて詳細に計測している。数値解析の対象とする実験水路は、幅40cm、河床勾配 1/1000 を有する直線水路であり、流量は 1870

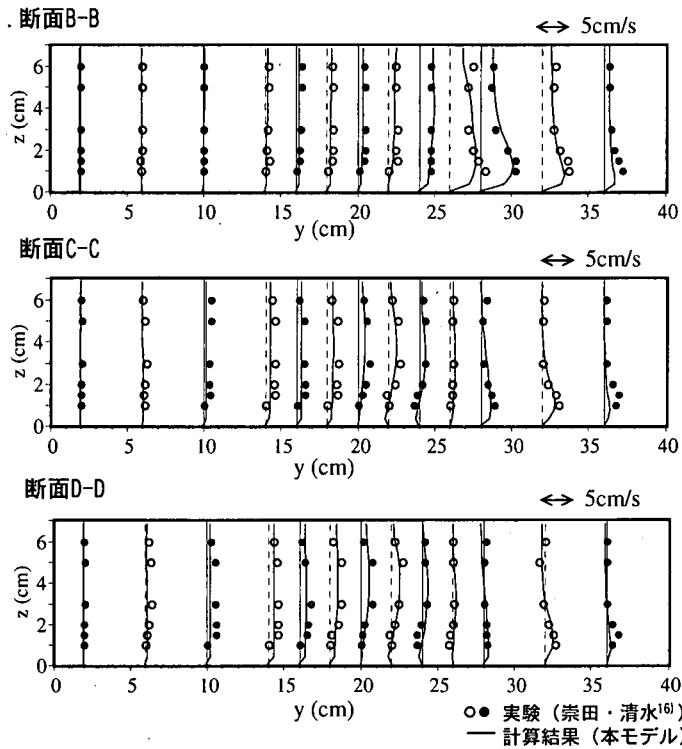


図-5 横断面B-B, C-C, D-Dにおける横断方向流速の実験結果と計算結果の比較

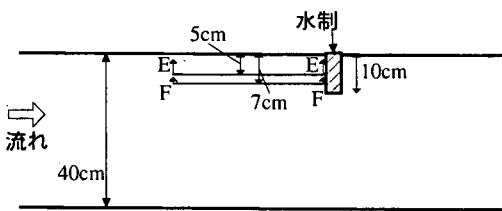


図-6 道上・檜谷²¹⁾の実験水路の概要

cm³/s, 下流端水位は7cmに設定されている。水制は、長さ(横断方向長)20cm, 厚さ(流下方向長)4cmの直方体であり、図-3に示すように、側壁に対して垂直に、左岸側に設置してある。

図-4は、図-3に示した断面A-A(水制前面の縦断面; 左岸より5cm), 断面B-B(横断面; 水制から4cm下流), 断面C-C(横断面; 水制から16cm下流)における流速ベクトルの計算結果である。水制前面の底面近傍では、水制前面で鉛直下方向き、底面近傍で上流向きの渦が形成され(断面A-A), また、水制直下流の断面(断面B-B)では、水制の存在に起因する水制先端付近への流れの集中と、上記の水制前面での下降流の影響によって、底面において右岸に向かう強い流れが生じている。さらに下流の断面C-Cでは、底面での右岸に向かう流れは徐々に

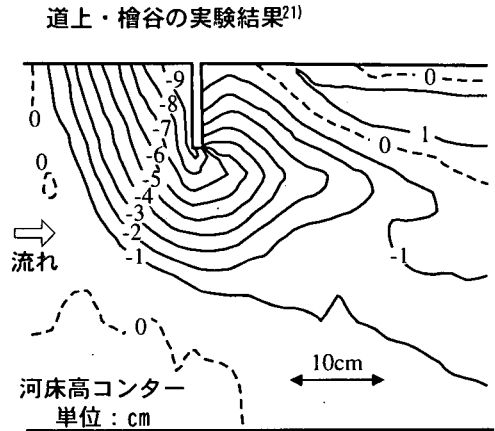
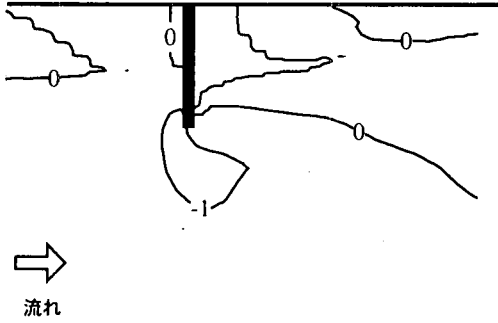


図-7 平衡状態における河床コンター(実験結果²¹⁾)

弱まりつつあり、また、同断面の $y=20\text{cm}\sim 25\text{cm}$ の底面では、崇田・清水が水制背後の流れの特徴として強調した主流域から水制域へ向かう流れが再現されている。

図-5は、横断面B-B, C-C, D-D(それぞれ水制から4cm, 16cm, 24cm下流)における横断方向流速の実験結果と計算結果の比較図である。前述した計算結果の特徴は、実験結果と合致するものであり、数値解析結果は、定量的にも妥当な結果であることが分かる。

計算結果 (洗掘初期段階: t=1min)



計算結果 (平衡状態)

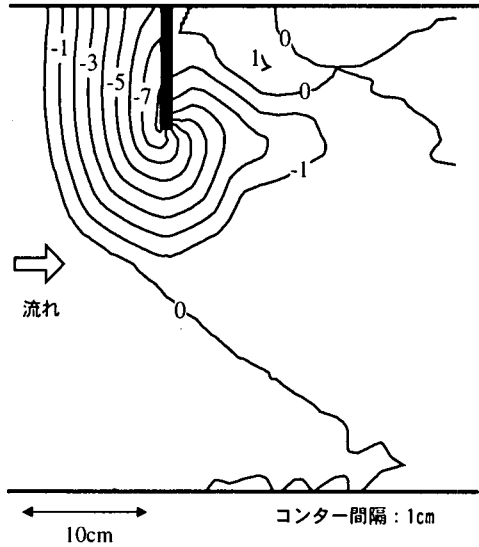
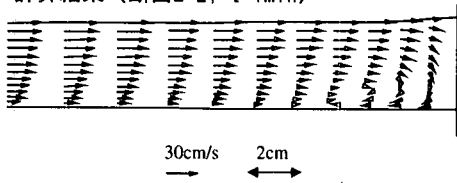


図-8 洗掘初期段階と平衡状態での河床コンター (計算結果)

計算結果 (断面E-E; t=1min)



計算結果 (断面F-F; t=1min)

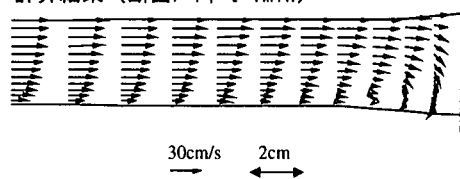


図-9 洗掘初期段階での縦断面E, Fにおける流速ベクトル (計算結果)

(2) 道上・楕谷の実験への適用および結果の考察

次に、水制周辺の局所洗掘現象に対するモデルの再現性を検証するため、道上・楕谷²¹⁾による実験を対象に、本数値解析モデルを適用した結果について述べる。

実験は、幅40cm、河床勾配1/300の直線水路で行われており、流量は4000cm³/s、平均水深2.85cmである。水路左岸側に、側壁に対して垂直に、長さ10cm、厚さ1cmを有する直方体の水制が設置されている(図-6)。河床材料は、平均粒径0.6mmの一樣砂が用いられている。道上・楕谷の実験結果を、平衡状態の河床高コンター図として、図-7に示す。

図-8は、本数値解析モデルによる計算結果を、河床高コンター図として、洗掘初期段階と平衡状態について示したものである。計算において、洗掘は、図-8左図に見られるように水制先端から始まっており、これは道上らの実験事実²¹⁾とも合致しており、Kwan³⁰⁾による不透過水制の実験においても同様の現象が観測されている。洗掘孔は時間とともに拡大し、図-8右図に示すような、水制

前面で急勾配、下流側で緩やかな勾配を有する洗掘孔が形成される。平衡状態における計算結果は、実際の洗掘孔形状の特徴を、ほぼ妥当に再現している。最大洗掘深については、実験結果が9cmを上回る値(図-7参照)であるのに対して、計算結果は8.1cmであり若干小さい。しかし、既往のモデル²¹⁾(計算手法の概要については1.参照)による最大洗掘深の計算結果(5cm強)と比較して、その値は実験結果に近いものとなっている。また、洗掘孔形状、特に流砂の非平衡性が卓越すると考えられる水制直下流部における洗掘形状に関しては、基本的には平衡流砂量式で河床変動計算を行っている既往のモデル²¹⁾による再現精度は低く、本モデルの優位性が認められる。

次に、洗掘と流れの対応について考える。

水制周りの洗掘は、主に、①不透過構造物の存在による平面的な流れの水制先端部への集中、②水制前面底部で生じる渦、に起因するものと考えられる。洗掘初期段階においては、渦は、図-9(図-6に示す水制前面の縦断

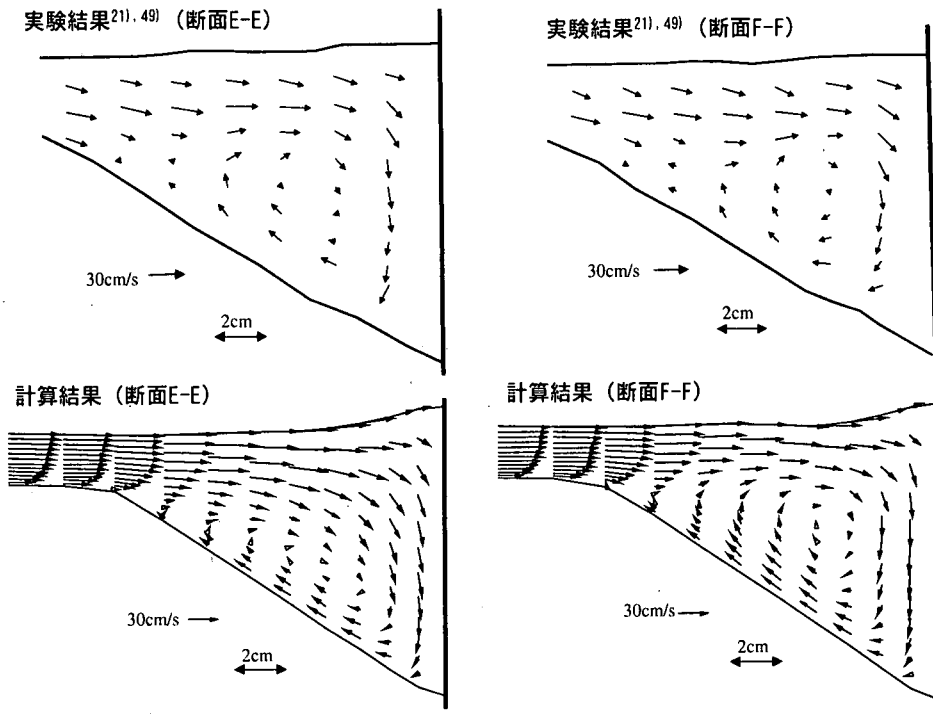


図-10 平衡状態での縦断面E-E, F-Fにおける流速ベクトル (実験結果^{21), 51)}と計算結果)

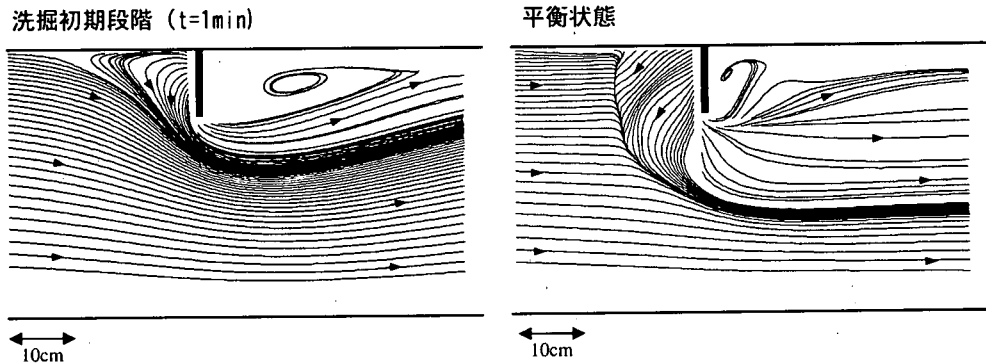


図-11 洗掘初期段階と平衡状態での底面流況図 (計算結果)

面E-E, F-Fにおける洗掘初期段階における流速ベクトル図)に示すように小さく、底面近傍において水制から上流向きへの流れも顕著でない。したがって、初期段階の洗掘では上記②の要因は小さいものと考えられる。しかし、4.(1)でも述べたように、渦により水制前面に下降流が生じ、これが、上記①の要因と重なって、水制先端部、特にその底面近傍への流れの集中を助長し、その結果、初期洗掘における水制先端付近の洗掘を惹起させるものと考えられる。

次に、図-10に、平衡状態における水制前面の縦断面

E-E, F-Fの流速ベクトルの計算結果を、実験結果(道上・檜谷²¹⁾、檜谷⁵¹⁾とともに示す。計算結果は、水制前面部の渦を良好に再現していることが分かる。同図より、洗掘初期段階と比して、水制前面部の渦は発達しており、洗掘孔の形成に伴い、前述②の要因が卓越するものと考えられる。

このような水制前面部の渦の発達を反映して、底面近傍の流況も大きく変化する。図-11は、初期洗掘段階と平衡状態での、底面近傍流況図(底面より鉛直方向に第一格子点の流速ベクトル計算結果を用いて作成)である。

初期洗掘段階では、水制先端部に近い位置に流れの集中が見られる。これに対し、平衡状態での洗掘孔における渦による剥離域は、Melville⁴⁹⁾が円柱周りの局所洗掘実験結果より指摘しているように、洗掘孔形状の影響を受ける。そのため、洗掘初期に生じた水制先端部への流れの集中は見られず、水制前面部の広範囲にわたって逆流域が形成される。このように、洗掘初期の流れと洗掘進行後の流れは大きく異なるため、水制周辺の河床変動を検討するには注意を要する。例えば、1.で述べた Ouilon and Dartus¹⁸⁾の数値解析では、平坦河床での流れの計算結果を用いて、水制周辺の洗掘域と堆積域を議論しているが、これは妥当性を欠くものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、非越流型の不透水制を対象に、その周辺の流れ及び河床変動を解析するための数値解析モデルの構築を行った。

水制周辺では、水制前面の下降流、底面付近での渦の形成など流れの3次元性が強い。したがって、流れの空間的非一様性が顕著であり、また、局所河床勾配も洗掘孔付近で大きく変化することから、流砂の非平衡現象が卓越する。また、時間的に変動する水面と河床面を有していることも、局所洗掘現象の3次元数値解析モデルの構築を困難にしていたと考えられる。

このような場においても精度良い解析が可能となるよう、本モデルでは、非静水圧近似の3次元流れの基礎式を用い、これを水面と河床面の時間変化に適合する移動一般座標系を用いて記述した。乱流モデルとしては、実用性を考慮し、非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。また、砂粒の離脱と堆積に関する確率モデルと砂粒の運動方程式を用いた砂粒の移動計算を組み合わせることにより、流砂の非平衡性を考慮した河床変動計算手法を構築した。

本計算手法を、崇田・清水¹⁷⁾および道上・檜谷²¹⁾の実験に適用し、水制周りの流れと局所洗掘現象に関するモデルの現象再現性の検証を行った。流れに関しては、平坦河床における水制下流側の横断面内の流れ、また、洗掘孔における水制前面の縦断面内の流れについて実験結果と比較を行い、本計算モデルの妥当性を示した。また、河床変動計算については、最大洗掘深が実験結果より若干小さく評価されているものの、その形状的特徴は良好に再現されており、既往のモデルに対する本モデルの優位性が示された。また、洗掘初期段階と、洗掘孔の発達後における流れ構造の相違が、水制先端部での初期洗掘から水制前面部に拡大する洗掘孔の形成・発達過程に影響を与えたと考えられることを指摘した。

なお、本モデルにおいて問題が残されていると考えら

れる点として、(1)河床変動計算モデルで現れた係数は、標準的な値あるいは一様な場での実験から同定された値を用いているが、これを前述のような複雑な流れ場を有する局所洗掘現象に用いていること、(2)洗掘孔内の砂粒の移動形態をすべて掃流形態として扱っていること、が挙げられる。これらに関しては、モデル化を行うに際して、現象そのものの基本的知見が著しく不足しており、今後、基礎的な研究の必要があると考えられる。

なお、本研究は、第一著者のアイオワ大学水理研究所滞在(文部省在外研究員、1999-2000)期間中に主として行われたものであり、研究の遂行にあたっては、同研究所の計算機を使用させていただいた。ここに記して、関係諸氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 秋草 勲, 吉川秀夫, 坂上義次郎, 芦田和男, 土屋昭彦: 水制に関する研究, 土木研究所報告, 第107号, 1960.
- 2) Garde, R. J., Subramanya, K. and Numbudripad, K. D.: Study of scour around spur-dikes, *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol.87, HY6, pp.23-37, 1961.
- 3) Gill, M. A.: Erosion of sand beds around spur dikes, *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol.98, HY9, pp.1587-1602, 1972.
- 4) 今本博健, 池野秀嗣: 水制の水理機能に関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, 第17号, PP.681-699, 1974.
- 5) Rajaratnam, N. and Nwachukwu, B. A.: Erosion near groyne-like structures, *J. Hydr. Res., IAHR*, Vol.21, No.4, pp.277-287, 1983.
- 6) 柿崎恒美, 長谷川和義: 水制のある開水路中の横断運動拡散係数の測定, 水工学論文集, 第36巻, pp.281-286, 1992.
- 7) 池田駿介, 吉池智明, 杉本 高: 不透水水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.281-286, 1999.
- 8) 福岡捷二, 西村達也, 岡信昌利, 川口広司: 越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 第42巻, pp.997-1002, 1998.
- 9) 大本照憲, 平川隆一, 井手賢正: 越流型水制群に対する2次流と流砂の応答, 水工学論文集, 第42巻, pp.1003-1008, 1998.
- 10) Przedwojski, B.: Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes, *J. Hydr. Res., IAHR*, Vol.33, No.2, pp.257-273, 1995.
- 11) 崇田徳彦, 渡邊康玄, 清水康行: 水制周辺の流速分布について, 水工学論文集, 第39巻, pp.577-582, 1995.
- 12) 崇田徳彦, 清水康行, 板倉忠興: 出水による水制周辺の粒度分布及び河床変化について, 水工学論文集, 第40巻, pp.799-804, 1996.
- 13) 藤田一郎: トレーサを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析, 水工学論文集, 第42巻, pp.505-510, 1998.
- 14) Liu, J., Tominaga, A. and Nagao, M.: Numerical simulation of the flow around the spur dikes with certain configuration and angles with bank, *J. Hydroscience and Hydraulic Engng.*, Vol.12, No. 2, pp.85-100, 1994.

- 15) 秋山壽一郎, 浦 勝, 山口 学, 重枝未玲: MacCormack 法を用いた平面 2 次元数値モデルの浅水流への適用性について, 水工学論文集, 第 42 卷, pp.679-684, 1998.
- 16) Mayerle, R., Toro, F. M. and Wang, S. S. Y.: Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes, *J. Hydr. Res.*, IAHR, Vol.33, No.2, pp.243-256, 1995.
- 17) 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.
- 18) Ouilion, S. and Dartus D.: Three-dimensional computation of flow around groyne, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.123, HY11, pp. 962-970, 1997.
- 19) 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.
- 20) 福岡捷二, 西村達也, 高橋 晃, 川口昭人, 岡信昌利: 越流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.
- 21) 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 卷, pp.61-66, 1992.
- 22) Jia, Y. and Wang, S. S. Y.: A modeling approach to predict local scour around spur dike-like structures, *Proc. 6th Federal Interagency Sedimentation Conference*, pp.II-90-97, 1996.
- 23) 大槻英樹, 芦田和男, 荒巻 浩, 劉 炳義, 藤田 暁: 河道湾曲部における水制機能の予測手法, 第 4 回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.35-40, 1998.
- 24) Peng, J., Tamai, N., Kawahara, Y. and Huang, G. W.: Numerical modeling of local scour around spur dikes, *Proc. 28th Congr. of IAHR*, E10, 1999.
- 25) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄: 河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.23-40, 1999.
- 26) Nagata, N., Hosoda, T., Muramoto, Y. and Rahman, M.: Numerical analysis of unsteady open channel flows with channel processes, *Proc. 6th Int. Conf. on Hydr. Engrg. Software*, pp.233-242, 1996.
- 27) 牛島 省, 清水隆夫, 保坂 稔: 局所洗掘数値解析手法の発電所放水口前面への適用性, 水工学論文集, 第 42 卷, pp.1009-1014, 1998.
- 28) 細田 尚, 長田信寿, 村本嘉雄: 移動一般座標系による開水路非定常流の数値解析, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp.267-272, 1996.
- 29) Kimura, I. and Hosoda, T.: 3-D unsteady flow structures around rectangular column in open channels by means of non-linear $k - \epsilon$ model, *Proc. 1st Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Santa Barbara, California, pp.1001-1006, 1999.
- 30) 木村一郎, 細田 尚: 乱れ強さ非負条件を考慮した非線形 $k - \epsilon$ モデルによる立方体周辺の流れの三次元解析, 水工学論文集, 第 44 卷, pp.599-604, 2000.
- 31) Yoshizawa, A.: Statistical analysis of the deviation of the Reynolds stress from its eddy viscosity representation, *Phys. Fluids*, Vol.27, pp.1377-1387, 1984.
- 32) Gatski, T. B. and Speziale, C. G.: On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows, *J. Fluid Mech.*, Vol.254, pp.59-78, 1993.
- 33) 杉山均, 秋山光廣, 亀澤正之, 野口大介: 傾斜側壁を有する複断面開水路内の乱流構造解析, 土木学会論文集, No.565/II-39, pp.73-83, 1997.
- 34) 細田 尚: 開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究, 京都大学学位論文, 1990.
- 35) 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.
- 36) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp.1-21, 1956.
- 37) 村上正吾: 非平衡流砂モデルの展開による河川流砂に関する研究, 京都大学学位論文, 1992.
- 38) 藤田裕一郎: 沖積河川の流路変動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1980.
- 39) 中川博次, 辻本哲郎: 移動床流れの水理, 技報堂出版, 1986.
- 40) Einstein, H. A.: Formulas for the transportation of bed load, *Trans. ASCE*, No. 2140, pp.561-597, 1942.
- 41) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T.: Sand bed instability due to bed load motion, *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol.106, HY12, pp.2029-2051, 1980.
- 42) Einstein, H. A.: The bed load function for sediment transportation in open channel flows, *Technical Bulletin, No.1026*, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950.
- 43) Einstein, H. A. and El-Samni, E. A.: Hydrodynamic forces on a rough wall, *Review of Modern Phys.*, Vol. 21, pp.520-524, 1949.
- 44) 辻本哲郎, 水上敏昭: 円柱橋脚前面での局所洗掘機構のモデル化, 第 29 回水理講演会論文集, pp.591-596, 1985.
- 45) 中川博次, 辻本哲郎: 水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.244, pp.71-80, 1975.
- 46) 中川博次, 辻本哲郎, 細川泰廣, 村上正吾: 平坦河床上の砂れきの運動機構解明における確率論的取り扱い, 第 24 回水理講演会論文集, pp.27-34, 1980.
- 47) 後藤仁志: 砂粒子の運動機構とその移動床問題への応用に関する研究, 京都大学学位論文, 1992.
- 48) 関根正人, 吉川秀夫: 掃流砂の停止機構に関する研究, 土木学会論文集, 第 399 号/III-10, pp.105-112, 1988.
- 49) Melville, B. W.: Local scour at bridge site, *School of Engrg. Rep. No.117*, University of Auckland, New Zealand, 1975.
- 50) Kwan, T. F.: Study of abutment scour, *School of Engrg. Rep. No.328*, University of Auckland, New Zealand, 1984.
- 51) 檜谷 治: 河川および浅水湖の 3 次元流れと平面 2 次元河床変動に関する研究, 京都大学学位論文, 1992.

(2000. 9. 13 受付)

ANALYSIS OF LOCAL SCOUR AROUND A SPUR DIKE USING 3-D MATHEMATICAL MODEL DEVELOPED WITH MOVING-GRID SYSTEM AND NONEQUILIBRIUM SEDIMENT-TRANSPORT THEORY

Nobuhisa NAGATA, Takashi HOSODA, Yoshio MURAMOTO and Tatsuaki NAKATO

This paper presents a numerical model to simulate local scour around a spur dike. Governing equations of flow are formulated in a moving boundary fitted coordinate system in order to calculate open channel flows with temporal changes in bed and water surfaces. In calculating Reynolds stress tensors, the nonlinear $k - \varepsilon$ model is adopted. A model for bed deformation is developed by using a stochastic model for bed-load transport because a nonequilibrium situation of sediment transport dominates around the spur dike due to rapid changes in the near-bed flow and local bed slopes. For the sake of verification, the model is applied to two laboratory experiments. Comparisons between the numerical results and the observed ones demonstrate the ability of the present model in reproducing the flow and bed scour around the spur dike.