

円柱周りの流れと局所洗掘現象の 3次元数値解析

3D NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AND LOCAL SCOUR AROUND A CYLINDRICAL PIER

長田信寿¹・細田 尚²・中藤達昭³・村本嘉雄⁴

Nobuhisa NAGATA, Takashi HOSODA, Tatsuaki NAKATO, and Yoshio MURAMOTO

¹正会員 博(工) 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 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)

⁴フェロー会員 工博 大阪工業技術専門学校校長 (〒530-0043 大阪府北区天満1-9-27)

Prediction of damaging local scour around a bridge pier is considered to be of crucial importance in bridge safety. However, it is extremely difficult to solve analytically complex flow associated with local bed deformation surrounding the pier. This paper describes development of a numerical model in simulating flow and bed deformation around a cylindrical pier. The flow was calculated using 3D Reynolds-averaged Navier-Stokes equations closed with a nonlinear $k-\varepsilon$ turbulence model. A moving boundary-fitted coordinate system was employed to simulate the unsteady flow field bounded by movable bed surface and free water surface. The effect of nonequilibrium sediment transport was introduced in the bed-deformation model by coupling the momentum equation of sediment with stochastic models for sediment pick-up and deposition. The proposed model was tested against laboratory data for verification. The model was found to reproduce the flow and local scour geometry with reasonable accuracy.

Key Words : local scour, bridge pier, 3D numerical model, nonequilibrium sediment transport, nonlinear $k-\varepsilon$ turbulence model, moving grid system

1. はじめに

橋脚周りの局所洗掘現象は、防災上の重要性から、その機構の解明・洗掘深の予測に関して、これまでに数多くの研究が行われてきた。特に、基礎実験によって、橋脚周りの流れの構造、最大洗掘深に与えるパラメータなどが検討され、その知見をもとに、多くの最大洗掘深予測式が提示されている。

これに対して、数値解析の研究は、最近になって行われるようになってきており、橋脚周りの流れの数値解析をRichardson and Panchang¹⁾が、また、河床変動計算を含めた数値解析としては、Olsen and Melaaen²⁾、福岡ら³⁾、Olsen and Kjellesvig⁴⁾、Roulundら⁵⁾が行っている。Richardson and Panchang¹⁾は、流れの解析ソフトFLOW-3Dを用いて、洗掘孔を有する円柱周りの流れを解析している。しかし、洗掘孔内の馬蹄形渦が十分に表し得ず、洗掘孔底面近傍の流速が過小に評価されている。Olsen and Melaaen²⁾、Olsen and Kjellesvig⁴⁾は、乱流モデルとして標準型 $k-\varepsilon$ モデル、および土砂移動形態として浮遊砂によるものを考え、河床変動計算を行っているが、洗掘

形状が実験結果と比較されておらず、その現象再現精度は判断できない。福岡ら³⁾は、静水圧近似を仮定した準3次元モデルを用いて流れを計算し、流砂の非平衡性を導入した掃流砂・浮遊砂モデルを用いて河床変動計算を行っている。洗掘形状は比較的良好な再現結果を示しているが、橋脚背後において、流砂の非平衡現象の卓越領域、平衡とみなせる領域、及びそれらの遷移領域に分けて解析しており、その領域区分の汎用性については疑問が残る。また、非平衡領域での、浮遊砂の算定方法にも問題が残されている。Roulundら⁵⁾は、解析ソフトEllipSys3Dを用い流れ場を計算し、掃流砂量式と流砂の連続式を用いて河床変動計算を行っている。円柱周辺の流れの特徴は再現されているが、流砂の非平衡性が卓越すると考えられる円柱背後の洗掘形状に関しては実験結果と大きな差が見られる。

このように、橋脚周辺の流れ・河床変動モデルは発展途上にあり、現象の重要性から考えても、モデルの改善が期待されている分野であると考えられる。本研究では、橋脚周りの流れと局所洗掘現象に関する基本的な数値解析モデルの構築を目的とする。

2. 数値解析モデルと計算手法

(1) 流れの解析モデル

本研究では、時間的に変化する自由水面、河床面を有する流れ場を解析する。計算対象領域の形状変化を伴う流れ場（流路変動、局所洗掘現象など）の非定常計算を行う場合、移動一般座標系の導入は、有効な手法と考えられる（例えば、著者ら⁶⁾、牛島ら⁷⁾）。また、橋脚周辺では、前面の強い下降流など鉛直流速が卓越し、馬蹄形渦等の形成により3次元性の強い流れとなる。従って、ここでは、静水圧近似を仮定しない3次元流れの運動方程式および連続式を、時間変動する水面・河床面に計算境界が適合するよう移動一般座標系で表示し、流れの基礎式として用いる。

$$[\text{連続式}] \quad \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{U^j}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[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、

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

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

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

ここに、 t ：時間、 (ξ^1, ξ^2, ξ^3) ：一般曲線座標、 (x_1, x_2, x_3) ：デカルト座標（なお、本研究では x_3 方向を鉛直方向とする）、 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、 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_i ：流速ベクトルの x_i 方向成分、 u_{iG} ：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。

乱流モデルとしては、実用性を考慮し、レイノルズ平均乱流モデルを用いることとする。ここでは、橋脚周りのような強い3次元性の卓越する流れ場に適用できるよう、木村・細田⁸⁾が同定した関数形を用いた非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いて、レイノルズ応力を評価する。

基礎式は、有限体積法を用いて離散化する。また、HSMAC法を用いて圧力・流速の同時緩和を行う。

移流項の離散化にはQUICKスキームを用いる。壁面条件としては、壁面最近傍の計算格子点における流速より対数則を用いて摩擦速度を算出し、壁関数より乱流特性量の境界条件を与える。また、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。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。

(2) 河床変動の解析モデル

橋脚周りでは、底面近傍流れの空間的な変化が著しく、また、局所的な河床勾配も大きく変化するため、流砂の非平衡現象が卓越すると考えられる。一方、著者ら⁹⁾は、流路変動現象を対象に、流砂の非平衡性を考慮したモデルの構築・適用を行ってきたが、そのモデルは、平面2次元流れの計算結果から、2次元流の影響と河床勾配の影響を考慮して、砂粒の移動軌跡を計算するものであり、ここで対象とするような3次元性の強い流れ場に適用することは困難である。そこで、流砂の運動方程式を解くことにより、砂粒の移動過程を計算し、これと砂粒の離脱・堆積に関する確率モデルを組み合わせることにより、河床変動計算を行う。

a) 砂粒の離脱量の計算

土砂の離脱体積は、pick-up rate p_s を用いて、次式により計算する。

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p \quad (4)$$

ここに、 V_p ：計算メッシュから単位時間あたりに離脱する土砂体積、 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への射影面積である。 p_s は、中川・辻本・村上¹⁰⁾によって提示された局所的な河床勾配を考慮したpick-up rate推定式を用いて算出する。

b) 砂粒の移動計算

河床面上の流砂運動を記述するため、 θ_{b1}, θ_{b2} をそれぞれ x_1, x_2 方向の河床勾配角とし、 $(x_1 - x_3)$ 平面、 $(x_2 - x_3)$ 平面内の河床平面と平行な単位ベクトル $\mathbf{p}_{b1} (= (\cos \theta_{b1}, 0, \sin \theta_{b1}))$ 、 $\mathbf{p}_{b2} (= (0, \cos \theta_{b2}, \sin \theta_{b2}))$ を導入する。また、砂粒に作用する力として、抗力、重力、浮力、揚力、摩擦力を考えると、 $\mathbf{p}_{bi}$ 方向についての砂粒の運動方程式は次式で表せる。

$$m_{sed} \frac{\partial u_{sed i}}{\partial t} = D_i + W_i - F_i \quad (5)$$

ここに、 $u_{sed i}$ ：砂粒の移動速度の $\mathbf{p}_{bi}$ 方向成分、 m_{sed} ：砂粒の仮想質量である。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。

$$D = \frac{C_{DP}}{2} (u_{bi} - u_{sed i})^2 c_e A_2 d^2, \quad W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \quad (6a, b)$$

$$F = \mu_k \left(W \frac{\cos \theta_{b1} \cos \theta_{b2}}{\sin \theta_p} - k_L D \right) \quad (6c)$$

$$D_1 = D \frac{u_{b1} - u_{sed1}}{\sqrt{(u_{b1} - u_{sed1})^2}}, \quad D_2 = D \frac{u_{b2} - u_{sed2}}{\sqrt{(u_{b1} - u_{sed1})^2}} \quad (7a, b)$$

$$W_1 = -W \frac{\sin \theta_{b1} \cos^2 \theta_{b2}}{\sin^2 \theta_p}, \quad W_2 = -W \frac{\sin \theta_{b2} \cos^2 \theta_{b1}}{\sin^2 \theta_p} \quad (7c, d)$$

$$F_1 = F \frac{u_{sed1}}{\sqrt{u_{sed1}^2}}, \quad F_2 = F \frac{u_{sed2}}{\sqrt{u_{sed2}^2}} \quad (7e, f)$$

ここに、 C_D ：抗力係数（= 0.4）， u_{bi} ：底面近傍流速の $\mathbf{p}_{bi}$ 方向成分， σ ：河床材料の密度， k_L ：抗力と揚力の比（= 0.85）， 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。なお、 c_e は、いわゆる遮蔽係数に相当するものであり、静止砂粒に対しては0.4とする。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¹¹⁾、その値は、砂粒の移動形態によって異なると考えられ、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。したがって、ここでは簡単のため、移動中の土砂については $c_e = 1$ とする。なお、この設定値が計算結果に与える影響については、今後の検討課題とする。

砂粒の位置ベクトル $\mathbf{p}_{sed(n)}$ （添え字 (n) はpick-up後、計算 n ステップ経過したことを示す）は、砂粒の移動速度ベクトル $\mathbf{u}_{sed}$ を用いて、次式より求める。

$$\mathbf{p}_{sed(n)} = \mathbf{p}_{sed(n-1)} + \Delta t \cdot \mathbf{u}_{sed} \quad (8)$$

c) 堆積量の計算

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、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堆積量 $V_{d(j,n)}$ は、次式で求められる。

$$V_{d(j,n)} = V_{p(j)} f_s(s(n)) \Delta s \quad (9)$$

$$f_s(s(n)) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{s(n)}{\lambda}\right), \quad s(n) = \sum \Delta t |\mathbf{u}_{sed(n)}| \quad (10a, b)$$

ここに、 $f_s(s(n))$ ：step length の確率密度関数， Δs ：計算1ステップの砂粒の移動距離， $s(n)$ ：砂粒のpick-up後のトータルの移動距離， λ ：平均step lengthである。平均step length λ は、揚力の変動を考慮したEinstein¹²⁾による評価式を用いて計算する。

d) 土砂のSlide計算

構造物の存在に起因する局所洗掘現象においては、構造物近傍の洗掘の進行に伴って、急な河床勾配を有する斜面が洗掘孔内に形成される。局所的な河床勾配が、ある限界勾配角以上となると、河床斜面土砂のslideが生じる（例えば、道上・檜谷¹³⁾、Melville¹⁴⁾など）。本数値解析では、このslide現象を、以下の手法を用いて河床変動モデルに導入した。①各計算メッシュにおいて、後述の限界勾配角 θ_{bmax} を算出する。②対象とする地点に隣接するメッシュの

河床高を用いて、局所河床勾配角 θ_b を計算する。③局所河床勾配角 θ_b がその限界角 θ_{bmax} を上回った場合、限界角を保持するに見合う量のslide土砂量を算出する。④slideによる土砂の移動は瞬時に行われるものと仮定し、土砂のslideが生じたメッシュのpick-up量に、上記のslideによる土砂移動量を付加し、前項で述べた土砂の移動・堆積計算を行うこととする。

限界勾配角 θ_{bmax} については、河床材料の水中安息角 θ_r に近い値を有するものと考えられる（道上・檜谷¹³⁾）。しかし、馬蹄形渦などによって強い逆流が底面近傍に生じる場合には、水中安息角以上の局所河床勾配を有する斜面が形成される¹⁴⁾。従って、砂粒への抗力の作用方向が、洗掘孔斜面の上方向の場合には、砂粒に作用する力の釣り合いより、限界勾配角を求めることとする。なお、限界勾配角を求めたい方向と抗力の作用方向との関係により、限界勾配角は変化すると考えられることから、ある方向 $\mathbf{e}_b$ の限界勾配角を、次式より計算する。

$$W \sin \theta_{bmax} = \tan \theta_r (W \cos \theta_{bmax} - L) \cos \beta_1 + D \cos \beta_2 \quad (11)$$

ここに、 β_1 ：砂粒に作用する摩擦力と $\mathbf{e}_b$ 方向のなす角度， β_2 ：抗力と $\mathbf{e}_b$ 方向のなす角度である。なお、抗力の作用方向が洗掘孔斜面の上方向でない場合には、限界勾配角 θ_{bmax} を水中安息角 θ_r とみなす。

e) 河床高の変動計算

河床高の時間変化は、単位時間あたりの土砂離脱量、堆積量を用いて、次式により求める。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{(V_d - V_p)}{S_d} \quad (12)$$

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。

f) 河床変動計算手順

本手法を用いて、河床変動計算を行った場合、河床上の計算格子から離脱した砂粒について、各計算ステップでの位置と移動速度成分を記憶させておく必要がある。このため、コンピュータの記憶容量の制約上、すべての計算ステップにおいて、砂粒の離脱計算を行うことは困難である。従って、ある時間間隔 Δt_p （ここでは、流れの計算時間間隔、計算対象領域の格子点数、および使用した計算機の搭載メモリ量を考慮して、 $\Delta t_p = 0.125$ secとした）ごとに砂粒の離脱計算を行うこととする。 Δt_p 内の離脱土砂は、式(4)に Δt_p を乗じることにより求め、 Δt_p 内の各ステップで均等に離脱するものとする。砂粒の運動方程式と堆積量の計算については、すべての時間ステップで行うこととする。また、本手法では、砂粒の移動経路上で堆積量を計算するため、堆積量の算定位置と計算格子点は一致しない。そこで、移動砂粒が存在するメッシュを抽出し、それを構成する計算格子点に対して、メッシュの辺長で無次元化された砂粒位置の無次元化座標を用いて、重み付きで土砂堆積量を分配することとした。

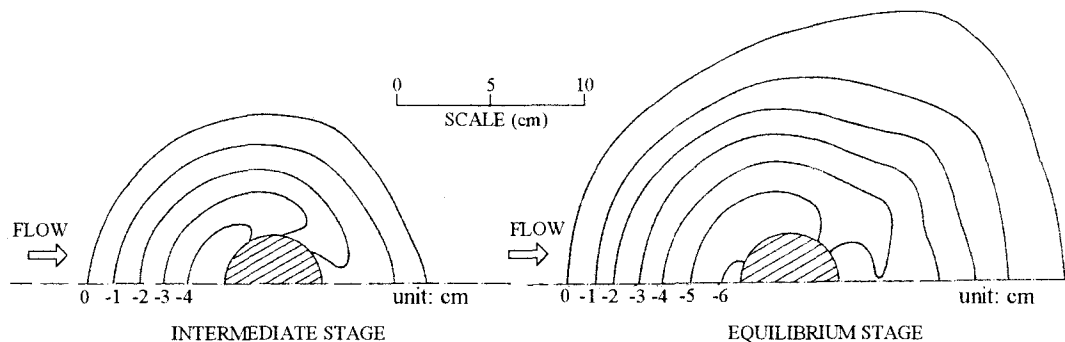
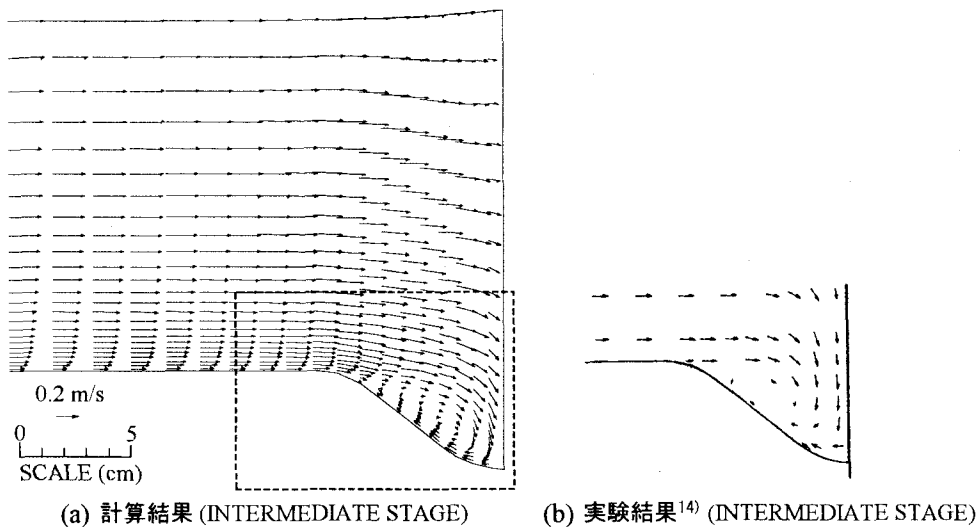


図-1 河床コンター (実験結果 ; Melville¹⁴⁾)



(a) 計算結果 (INTERMEDIATE STAGE) (b) 実験結果¹⁴⁾ (INTERMEDIATE STAGE)
図-2 円柱上流の縦断面における流速ベクトル (a) 計算結果, (b) 実験結果¹⁴⁾

3. 数値解析モデルの適用

(1) 計算ケース

橋脚周りの流れ及び局所洗掘現象に対する本数値解析モデルの適用性を検証するため、Melville¹⁴⁾の実験に適用する。なお、既に、同実験を対象にDey¹⁵⁾およびRichardson and Panchang¹⁾が、流れのモデルを適用している。実験で用いた水路は幅45.6 cmの直線水路であり、中央に直径5.08 cmの円柱が設置してある。流量は0.01712 m³/s、非擾乱域の水深、平均流速は、それぞれ0.15 cm、0.25 m/sであり、フルード数は0.21である。河床材料は、中央粒径0.385 mmのほぼ一様砂であり、その水中安息角は32°である。

この実験の特徴としては、移動床実験において、通水から30min後 (Intermediate Stage)、150min後 (Equilibrium Stage : Melvilleによる最大洗掘深の計測結果において、その時間変化が十分小さくなったとみなせる状態¹⁴⁾)に形成された洗掘形状 (図-1) と同形状を有する固定床 (ただし、表面には移動床実験と同じ砂を貼り付けている) を作成し、洗掘孔内の円柱周りの流れを計測している点である。本数値解析モデルの適用においては、まず、橋脚周りの流れの再現性の検証を目的として、この固定床実験に対して、流れの計算を行う (Run 1)。次に、移動床実験を対象として、平坦河床から計算を開始し (Run 2)、河床変動モデルの検証を行う。

(2) 結果と考察

図-2および図-3は、円柱上流側の縦断面 (水路中心線上) の流速ベクトルと、非擾乱域の平均流速 (0.25 m/s) で無次元化された流速コンターの計算結果 (Run 1) と実験結果である。なお、図-2は紙面の都合上、Intermediate Stageのみ示す (Equilibrium Stageの流れの特徴は図-2と類似)。円柱直上流の流れは、実験結果において見られるように、円柱前面に沿った下降流および底面近傍の渦の形成が特徴である (図-2(b))。円柱直上流での下降流により、円柱前面では底面近くまで、大きな流速値をもつ流れが形成されている (図-3(a), (b))。一方、前述したように同実験を対象に、Dey¹⁵⁾、およびRichardson and Panchang¹⁾が解析を行っている。Deyらは、円柱周りの流れ場を、その特徴に応じて領域区分し、それぞれの場において、実験結果の流速分布形状と適合かつ連続式を満足するような流速分布式を提示した。その汎用性にも問題が残されているが、図-3に示したような流速コンターの傾向が表現されていない。また、Richardson and Panchangの計算結果においては、底面近くの渦が明確でなく、底面近傍の洗掘孔斜面上方に向かう流れもほとんど現れていない。そのため、彼らの計算結果では、大きい流速値を有するコンター線の、円柱前面に沿った洗掘孔底部への貫入が十分に再現されていない。これらに対して、

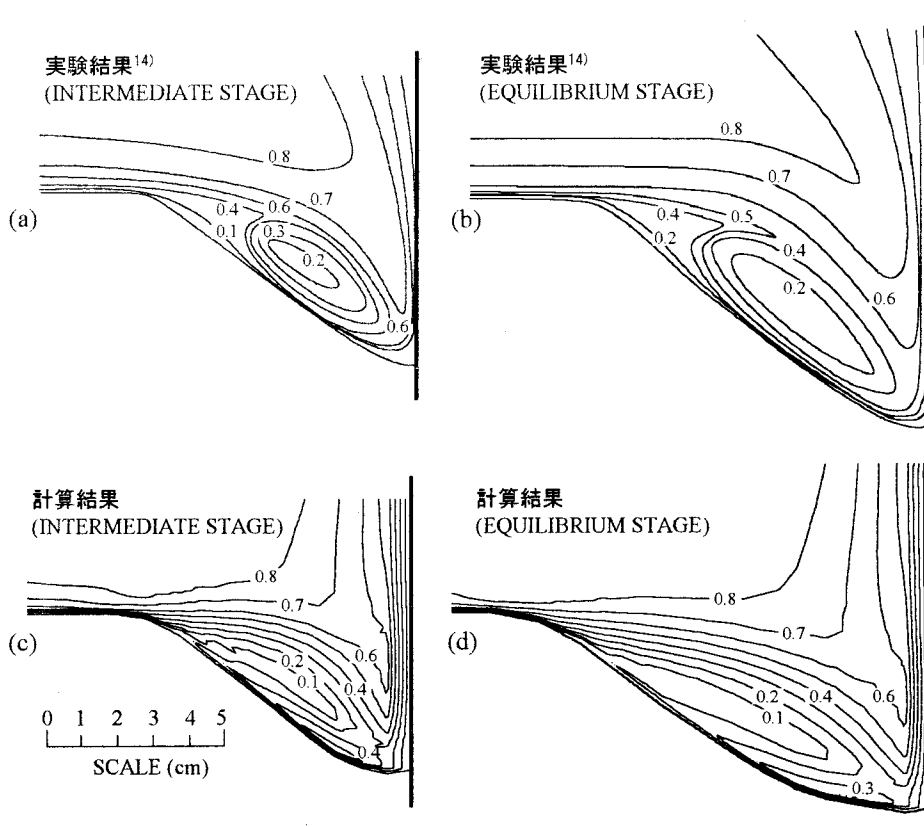


図-3 流速コンターの実験結果¹⁴⁾と計算結果

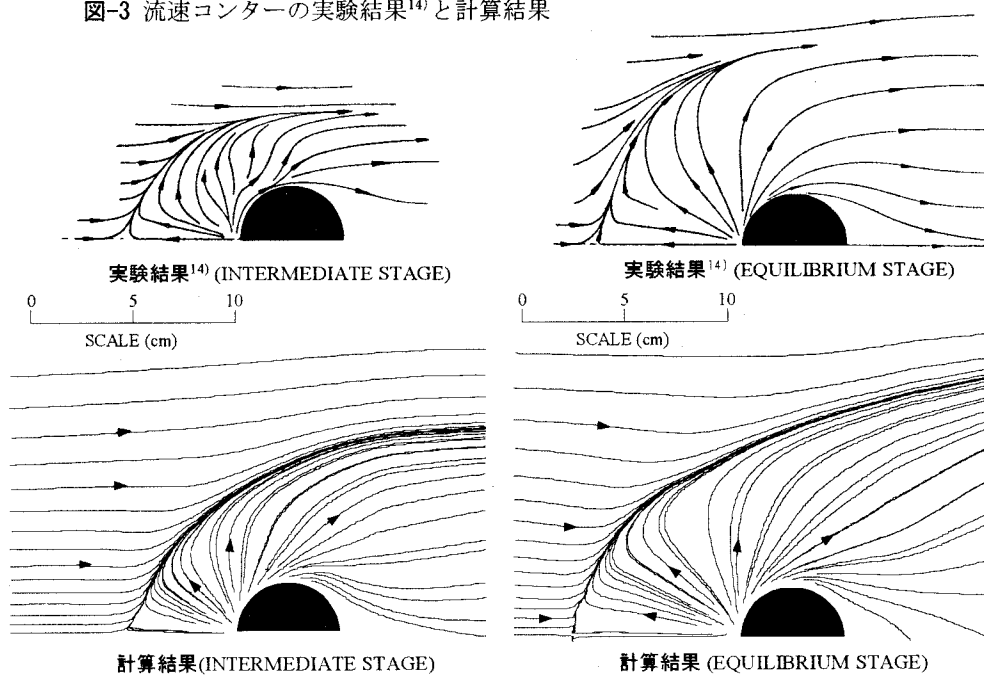


図-4 底面近傍流況の実験結果¹⁴⁾と計算結果 (河床より2mm上方の位置)

本モデルの計算結果[図-2(a), 図-3(c), (d)]は、円柱直上流の流向に関しては、実験結果の方が、より鉛直下方に向いている（これは、計算機能力の制約上、円柱直上流に、十分な数の計算格子点の配置が困難であったことが原因の一つと考えられる）ものの、前述した洗掘孔内流れの傾向が再現されており、本モデルの妥当性を示すものと考えられる。

図-4は、河床から上方に2mmの位置における底面

近傍流況図の実験結果と計算結果 (Run 1) である。円柱まわりの馬蹄形渦によって、底面近傍では、円柱から遠ざかる方向に流れが生じ、それが上流からの流れと合わさり、剥離境界を形成している。また、洗掘規模の相違に起因してEquilibrium Stageの方が、Intermediate Stageより、大きな剥離域を有している。これらの実験事実も、数値解析結果は精度良く再現していることが分かる。

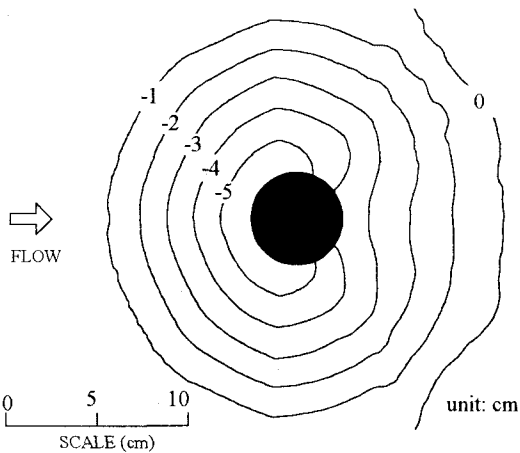


図-5 河床コンター計算結果(Equilibrium Stage)

図-5は移動床実験を対象としたRun2のEquilibrium Stageにおける河床高コンターの計算結果である。なお、図-1、図-5に示した河床コンターは、初期平坦河床からの変化を示したものである。この実験の水理条件では、非擾乱域における掃流力は、河床材料の限界掃流力を若干下回るため、構造物周りの洗掘は、静的洗掘となる。一方、数値解析においては、pick-up rateを算出する際に用いる局所河床勾配を、隣接するメッシュの河床高から計算しているため、洗掘孔外縁を含むメッシュでは、勾配の大きな洗掘孔斜面の影響を受け、徐々に河床が低下する。したがって、実験では、上流平坦河床と洗掘孔斜面の境界が明確であるのに対して、数値解析結果では、洗掘孔の外縁が滑らかな形状となり、図-5に示すように、円柱背後の堆積域との境界を除いて、0 cmのコンター線が円柱近傍では現れない。上記のような相違点はあるものの、図-1に示した実験結果と比較して、計算結果は、全体的な洗掘孔形状の特徴が再現されているものと考えられる。また、図-5に示した洗掘孔形状は、Yanmaz and Altunbilek¹⁶⁾が多くの実験結果より示した典型的な円柱まわりの洗掘形状と非常に類似しており、本計算結果の妥当性を支持するものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、橋脚まわりの流れ及び局所洗掘現象に適用可能な数値解析モデルを構築し、Melvilleの円柱橋脚を用いた室内実験に適用した。流れの計算は、移動一般座標系で表示された3次元流れの連続式と運動方程式、またレイノルズ応力の評価手法として非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いて行った。河床変動計算においては、河床材料の離脱・堆積に関する確率モデルと、砂粒の運動方程式を組み合わせることにより、流砂の非平衡性を考慮したモデルを構築した。Melvilleの実験結果と本モデルによる計算結果を比較し、橋脚周りの基本的な現象を再現し得ることを示した。なお、本モデルでは、静的洗掘における洗掘孔外縁付近の河床形状の再現性に問題が残されており、また、モデルの適用性を高めるためには、

砂粒の浮遊状態への遷移過程などについても、今後モデルに取り入れていく必要があると考えられる。

謝辞：本研究は第一著者のアイオワ水理研究所滞在中（文部省在外研究員）に、主として行われたものであり、研究の遂行にあたり、計算機は同研究所より提供していただいた。ここに記して関係諸氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) Richardson, J. E., and Panchang, V. G.: Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.5, pp.530-540, 1998.
- 2) Olsen, N. R. B., and Melaaen, M. C.: Three-dimensional calculation of scour around cylinders, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.119, No.9, pp.1048-1054, 1993.
- 3) 福岡捷二, 富田邦裕, 堀田哲夫, 宮川朝浩: 橋脚まわりの局所洗掘推定のための実用的数値シミュレーションの開発, 土木学会論文集, No.497/II-28, pp.71-79, 1994.
- 4) Olsen, N. R. B., and Kjellesvig, H. M. K.: Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth, *J. Hydr. Res.*, IAHR, Vol.36, No.4, pp.579-590, 1998.
- 5) Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J., and Michelsen, J.: 3D mathematical modelling of scour around a circular pile in current, *Proc., 7th Int. Symp. on River Sedimentation*, Hong Kong, China, pp.131-137, 1998.
- 6) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄, Md. Munsur Rahman: 移動一般座標系による側岸侵食を伴う河道変動の数値解析, 水工学論文集, 第40巻, pp.927-932, 1996.
- 7) 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巻, pp.1009-1014, 1998.
- 8) 木村一郎, 細田 尚: 乱れ強さ非負条件を考慮した非線形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巻, pp.599-604, 2000.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Melville, B. W.: Local scour at bridge site, *Rep. No. 117*, School of Engrg., The Univ. of Auckland, 1975.
- 15) Dey, S., Bose, S. K., and Sastry, G. L. N.: Clear water scour at circular piers: a model, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.121, No.12, pp.869-876, 1995.
- 16) Yanmaz, A. M., and Altunbilek, H. D.: Study of time-dependent local scour around bridge piers, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.117, No.10, pp.1247-1268, 1991.

(2000. 10. 2受付)