

パイル群まわりの流れの三次元数値シミュレーション

日本工営(株) 中央研究所 開発研究部 正 員 ○金 海生¹ 山田 裕康¹

1. はじめに 橋脚が河道内に設置されると、そのまわりの流れはかなり複雑になる。また、その周辺の局所洗掘によって橋脚の変形、転倒などを引き起こす^{1,2)}。これに対して、高い精度の数値解析モデルで予測することが強く求められている。そこに、福岡らが局所洗掘を推定するために、流砂運動の特徴を十分取り込むことにより、実用的な数値解析法を開発し³⁾、より実現象の規模に近い条件で行われた模型実験による橋脚の最大洗掘深を推定することができた。しかし、橋脚まわりの流れは強い非静水圧特徴をもつ、強い鉛直方向の流れが発生するため²⁾、鉛直流速を小さいと仮定した静水圧近似モデルの適用には支障が生じる。最近、John らが desktop SUN WS で 168 時間をかけて市販のソフト Flow-3D™ を使って固定床における 20 秒間の橋脚近傍流れの三次元解析を実施した⁴⁾。かなりの時間をかかるものなので、現実的な手法ではないと思われる。本研究では、実河川に設置される橋脚周辺の自由表面流れの特徴をより精度よく、効率的に評価するために、境界適合直交曲線座標系における全圧三次元数値解析モデルを開発し、ある大河川に適用した。

2. 境界適合直交曲線座標系における三次元モデル 本モデルは、平面において構造物、河岸線などの任意境界に対して柔軟性がある境界適合直交曲線座標系を用いる。鉛直方向においては、自由表面および移動床が存在するため、 σ 座標を適用する。三次元 Reynolds 方程式を流れの支配方程式とする。

$$\text{連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(u^* h g_{22})}{\partial \xi} + \frac{\partial(v^* h g_{11})}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial w^*}{\partial \theta} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{運動量式: } & \frac{\partial hu^*}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^{*2})}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11}hu^*v^*)}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial u^* w^*}{\partial \theta} + \frac{hu^*v^*}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{hv^{*2}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} = -\frac{h}{\rho g_{11}} \frac{\partial p}{\partial \xi} \\ & + \frac{1}{\rho g_{11}} \left(\frac{\partial Z_b}{\partial \xi} + \theta \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{h}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}\sigma_1)}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11}\tau_{21})}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial \theta} + \frac{h\tau_{12}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{h\sigma_2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \end{aligned} \quad (2)$$

上記には ξ 方向の運動量式だけを示しているが、 η および θ 方向の運動量式は似る形を有する。ここに、 ξ 、 η は直交曲線座標、 g_{11} 、 g_{22} は座標変換に関するパラメータ、 θ ($= (z - Z_b)/h$) は σ 座標、 z は Cartesian 座標系における鉛直座標、 h ($= \xi - Z_b$) は水深、 ξ 、 Z_b は水位、河床高である。 u^* 、 v^* 、 w^* は ξ 、 η 、 θ 方向の流速成分⁵⁾、 p は圧力である。 τ 、 σ は乱流応力を含む有効応力で、ここに Boussinesq 近似に基づいて標準 $k \sim \epsilon$ 乱流モデル⁵⁾を用いて計算する。 ρ 、 g は水の密度、重力加速度である。

数値計算法においては、流速ベクトルと圧力および水位を直交曲線座標系におけるスタッガード格子に配列し、有限体積積分陰解スキームに基づいて時間ステップごとに前記支配方程式を離散化し、離散化した代数方程式を連立で解くことによる時間的および空間的に変化する流速ベクトル、圧力、水位などの結果を得る。

3. 計算例 川幅約 2 km を有するある大河川を渡る大橋の主橋脚は直径 10 m 円柱 6 本から支持される。数値シミュレーションにあたっては、流れ、特に橋脚周りの流れが三次元的な特性をもつため、橋脚近傍数百メートルの領域に対して本三次元モデルを適用し、それ以外には、水深平均の平面二次元モデルを用い、同時解析した。全解析領域は橋センターから上、下流それぞれ約 11 km、5 km までとした。橋脚まわりの境界適合直交曲線メッシュは Fig.1 に示している。三次元計算用メッシュ数は約 60,000、二次元用は約 30,000 である。Fig.2 には、それぞれ河床近傍、水面近傍の平面流速ベクトルを示している。パイル周辺の流れは、パイル前面で左右に分かれる流れと、後流領域でパイル両側面からの流れが剥離し、渦や乱れが発生する。河床近傍の底面流は表面流とかなり異なった特徴が現れている。代表的な縦、横断面における流速ベクトルおよび静水圧近似からの圧力偏差 ($p_d/\rho g$ 、単位: cm) は Fig.3,4 に示している。Fig.3 によると、パイル前面の水面附近の Bow Wave、そして鉛直上向きの流れ、また、下部での下降流などが合理的に評価されている。下降流の流速は接近流速の約 40% に達し、実験室での実験結果と整合する²⁾。この流れの特徴は Fig.4 の圧力偏差の結果と一致する。

4. おわりに 境界適合直交曲線座標系における全圧三次元解析モデルを開発し、実河川に設置される複数のパイルから支持される橋脚周辺の自由表面流れに適用した。大河川におけるパイル群まわりの流れの特徴が見事に表されることとなった。

本研究を行うにあたり種々御協力いただいた同僚の方々に感謝いたします。

参考文献 1) 建設省土木研究所河川室：治水上から見た橋脚問題に関する検討，Report No.3225, 1993. 2) Raudkivi, A.J.: Loose Boundary Hydraulics, pp.245~265, Pergamon Press, 1990. 3) 福岡ら：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, 1994. 4) John, E.R. and Vijay, G.P.: Three-dimensional Simulation of

Keywords: Free surface flow, bridge pier, 3-D simulation, boundary-fitted coordinates, σ -transformation

¹ 〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稲荷原2304

Tel.: 0298-71-2039

Fax: 0298-71-2022

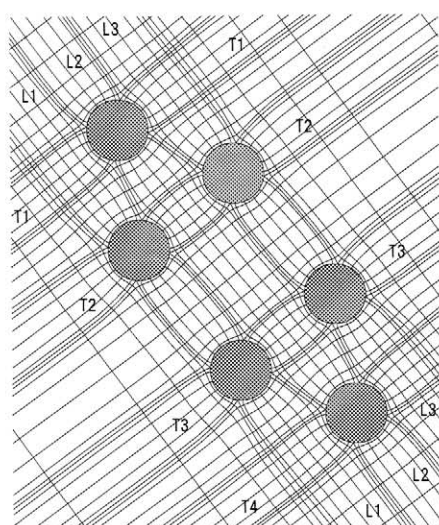


Fig.1 Local boundary-fitted grids

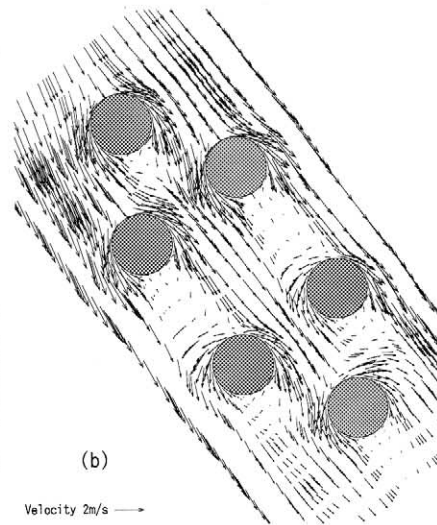
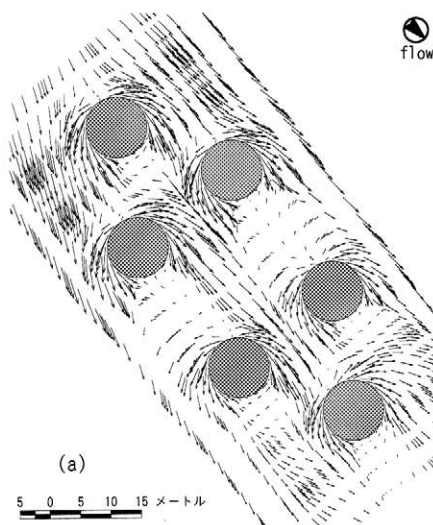
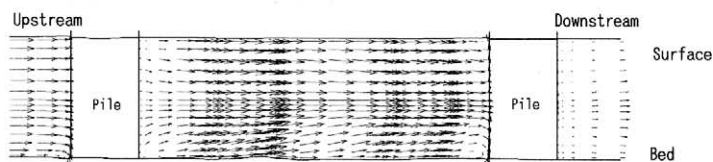
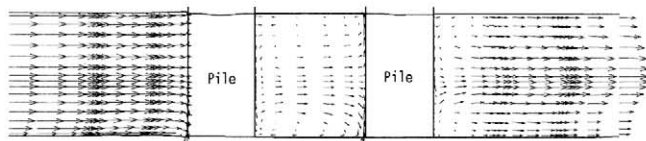


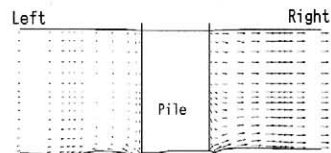
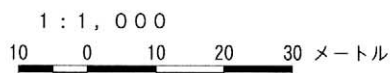
Fig.2 Velocity vector — (a) Near the bed, (b) Near the water surface



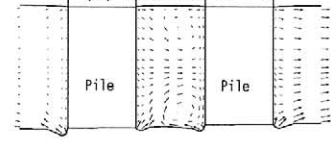
(a) Profile L2-L2



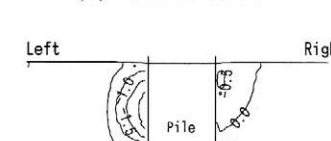
(b) Profile L3-L3



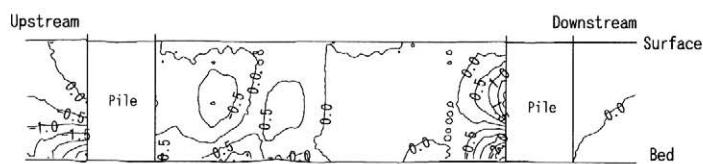
(c) Section T1-T1



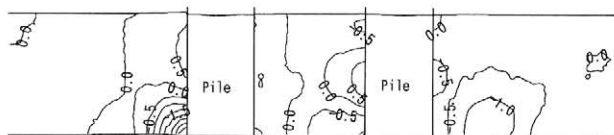
(d) Section T2-T2



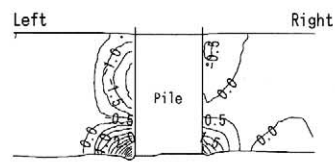
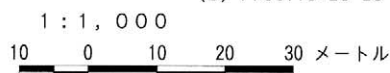
(e) Section T3-T3



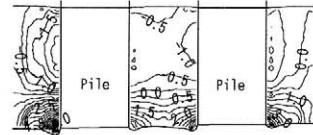
(a) Profile L2-L2



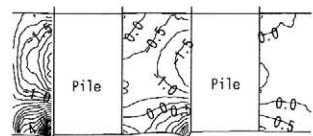
(b) Profile L3-L3



(c) Section T1-T1



(d) Section T2-T2



(e) Section T3-T3

Fig.4 Contour of deviation from the hydrostatic pressure in the representative profiles and transverse sections (2hrs. after the calculation, unit: cm)