

パイル群まわりの局所洗掘の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 ○羽田野 琢磨¹

1.はじめに 橋脚まわりの流れは静水圧からの圧力偏差の作用、擾乱の影響などにより、前面では Bow Wave の形成、下降流の発生、後領域では渦や乱れが生じる。その流れの特徴に関連して、橋脚周辺の河床変動には局所的な特徴が現れる¹⁻³⁾。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⁴⁾、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。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生じるため²⁾、全圧三次元モデルが望ましい。本研究では、直交曲線座標系における全圧三次元流れ数値解析モデルを用いて、局所洗掘を予測するための河床変動モデルを開発し、実河川に適用する可能性を検討した。

2. 境界適合直交曲線座標系における河床変動解析モデル 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。標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用い、Reynolds 方程式⁵⁾と掃流砂のみを考慮した河床材料の保存式を支配方程式とする。

$$\text{流砂の連続式: } \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (g_{22}q_{b\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (g_{11}q_{b\eta}) \right] = 0 \quad (1)$$

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、 Z_b は河床高、 λ は河床材料の間隙率である。 q_b は体積掃流砂量、その量および輸送方向は三次元全圧流れシミュレーションで得られた河床近傍の流向および局所的な河床勾配を考慮した上、芦田・道上式で計算する。

数値計算法においては、流速ベクトルと圧力および水位、河床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、有限体積分陰解スキームに基づいて時間ステップごとに流れおよび流砂連続の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、河床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三次元流れ解析モデルを適用し、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。河床材料の粒径は 0.076 mm である。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。Fig.2,3 には、パイル群周辺の水位 Contour、河床変動量を示している。ただし、河床変動量は 28 時間内のものでメッシュ毎に表示している。パイルの上流側は水位の上昇によるせき上げ背水 (Bow Wave)、下流側、特に両側面は低下背水となるほか、パイルの上流端では流れの阻害によって局所的な水位の上昇が見られる。パイル群まわりの局所的な河床変動は基本特徴には単円柱のものと一致するが、特別な変動特性を有する。接近流れが少々斜めにパイル群にあたるため、直接あたる側の円柱まわりには流れの集中、河床変動や水面変動などがはるかに著しい、背水側の円柱まわりには小さくなる。28 時間内の最大洗掘深はすでに 3 m 以上に達した。河床変動が発生してから 28 時間目の代表的な縦、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.4,5 に示している。文献[5]の Fig.3,4 (河床変動が発生してから 2 時間目なので、河床変動量はまだ小さい) と比較すると、局所洗掘を進むことによって、パイル群周辺の局所流れのパターンや圧力偏差なども変わっていくことがわかる。

以上の結果により、全圧三次元流れ数値解析モデルを用いて、局所洗掘を予測するための河床変動モデルを実河川に適用することが可能であることがわかった。

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流れ解析モデルを用いて、局所洗掘を予測するための河床変動モデルを開発した。そして、実河川に設置される複数のパイルを組んだ橋脚周辺の一洪水期間中 (28 時間) の局所的な河床変動解析を実施した。局所的な流れと河床変動の特徴を評価することができた。今後、浮遊砂輸送などを含め、継続時間が長い洪水における最大局所洗掘のシミュレーションを実施する予定である。

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) 宮川ら: 近接した円柱まわりの河床変動と流体力, 水工学論文集, Vol.44, 2000. 4) 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. 5) 金ら: パイル群まわりの流れの三次元数値シミュレーション, 本概要集, 第2部, 2000.

Keywords: Free surface flow, local scour, bridge pier, 3-D simulation, boundary-fitted coordinates

