

### 実河床形状を模擬した固定床湾曲開水路乱流の LES

神戸大学大学院工学研究科 学生員 ○猪熊 裕司  
神戸大学大学院工学研究科 正会員 中山 昭彦

#### 1. 緒言

河川計画や、河川防災を検討する際、湾曲部での二次流の効果を考慮することが求められている。外岸部では、乱流と遠心力によって生じる圧力勾配によって第一種二次流やこれと逆向きの外岸セルという渦が観測されており、河岸近傍で発生する為、河岸浸食機構の解明・予測に重要である。既往の開水路湾曲部に対する数値解析は二次元解析、RANS, LES がなされているが、二次元解析では乱流構造を捉えることができず、RANSは瞬時変動を捉える事ができない、また計算結果はモデルに依存する。LESは境界条件の設定やSGSモデルについて問題が無い訳ではないが、瞬時変動を捉える事ができ、乱流構造を精度よく再現できる可能性がある。しかし既往の LES 計算を含め三次元計算では遠心力により生じるはずの水面変動について詳細に議論されていない為、本研究では水面適合シグマ座標を用い、LES(Large-Eddy-Simulation)によって開水路湾曲部における水面変動を含む乱流構造の解明を目的とする。

#### 2. 計算手法

支配方程式は非圧縮性流体における質量保存式である連続式と運動方程式である Navier-Stokes 式を用いる。乱流モデルは標準 Smagorinsky モデルを用い、時間進行法はCrank-Nicolson法を用いる。変数配置はコロケート格子、座標系はシグマ座標系、計算格子の時間進行には高さ関数を用い、水面での応力条件を満たすように流速を求めた後、水面位置を更新、一定比で計算格子を再分割する事により、計算格子を更新している。底面・壁面境界条件は基本的に No-slip 条件だが、壁面鉛直方向流速成分にのみ slip 条件を課している。

#### 3. 解析対象

解析対象は実河川への適用の足掛かりとする為、Zeng ら<sup>1)</sup>が土砂輸送実験、解析を行った U 字湾曲開水路とする。図1は計算格子の概形であり図1黒枠内に参考として Zeng ら<sup>1)</sup>の実験水路断面を示す。底面形状は  $\phi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$  断面での観測値を横断方向に3次スプライン曲線で補間し、主流方向には線形補間を行ったものを用いる。格子数は(主流, 横断, 鉛直)=(460, 80, 30)で内径 11.89m, 水路幅 2.44mである。また湾曲部上流には直線部を設け、周期境界で計算を行うことにより乱流変動の発達した流入を得ている。

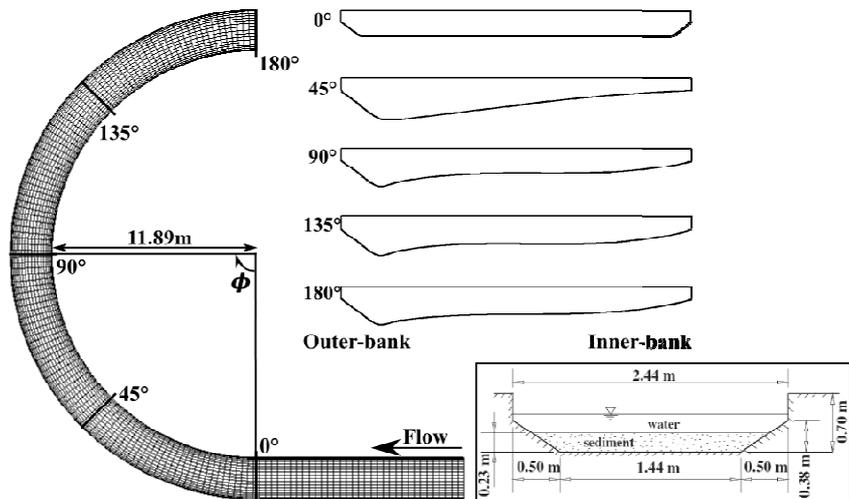


図1 計算格子 (黒枠内は Zeng ら<sup>1)</sup>の実験、解析の水路断面)

流入面平均水深  $H=0.19$ (m), 平均流速  $U=0.51$ (m/s),  $Fr=0.38$ ,  $Re=950000$  である。

#### 4. 結果

これ以降、 $y$  を鉛直方向座標、 $B$  を外岸からの距離とし、初期水面位置を 0.0 mとする。図2は湾曲部各断面での二次流ベクトル及び水面形である。矩形直線開水路の場合、右岸上隅に時計回りの渦が生じ、左岸上隅には反時計回りの渦が生じ、底面ではそれらと逆回転の渦が生じるが、このケースの  $\phi=0^\circ$  断面では底面形状の影響で底面での渦が

キーワード LES, 湾曲開水路, 二次流, 自由水面流

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学研究科 TEL078-803-6280

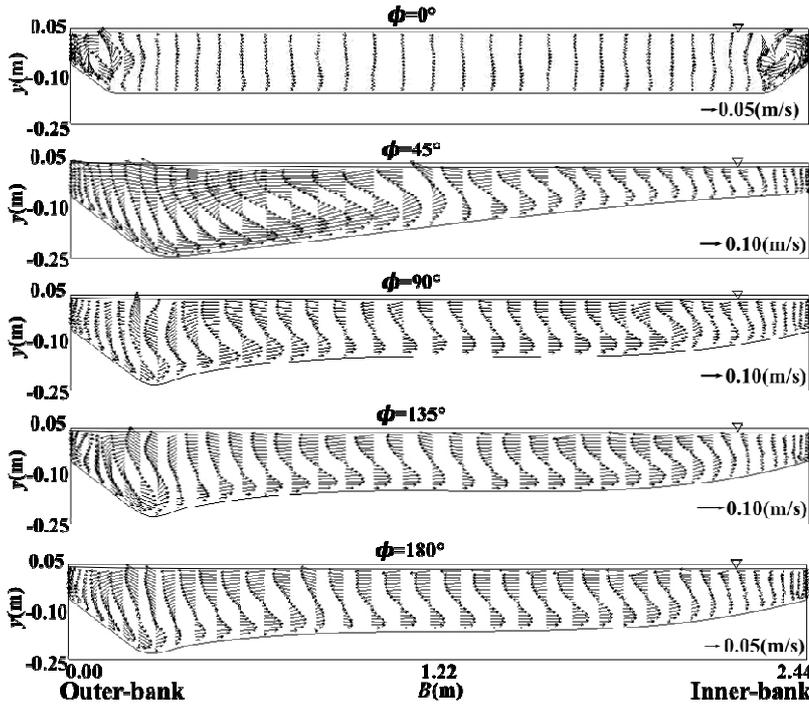


図2 水面形と二次流ベクトル

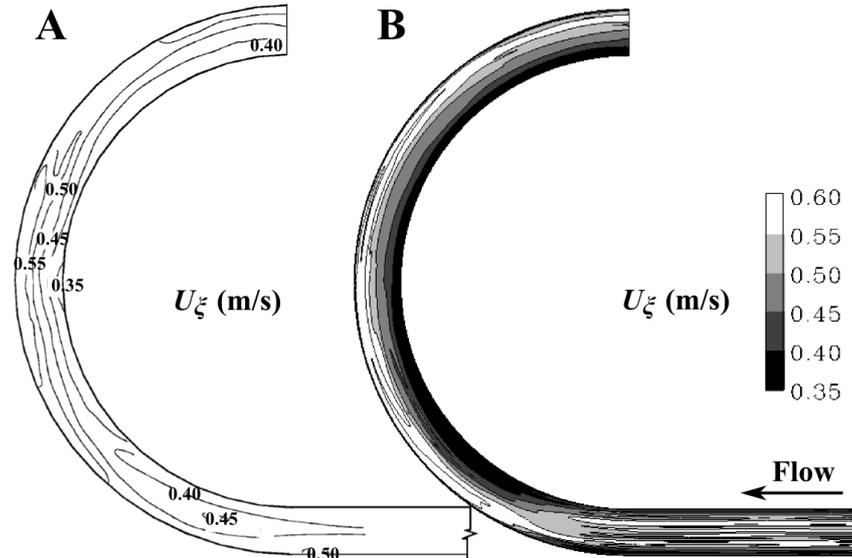


図4 水深平均流速分布 A Zeng ら<sup>1)</sup> B 本計算

に高く、内岸で低くなるという傾向を示している。図4は Zeng ら<sup>1)</sup>の行った実験(図中 A)と本計算(図中 B)との比較である。ただし  $U_{\xi}$  は水深平均主流方向流速とする。分布形状及び流速値を良好に再現しており、本計算が問題なく行えた事を示している。

5. 結論

水面適合シグマ座標を用いた LES を湾曲開水路に適用することにより、湾曲部で生じる第一種二次流と、外岸セル、水面変動を再現することができた。また比較についても計測値を再現しており本手法がこの種の計算に有効であることが確認できた。

6. 参考文献

- 1) Jie Zeng, George Constantiescu, Larry Weber. A 3D non-hydrostatic model to predict flow and sediment transport in loose-bed channel bends. Journal of Hydraulic Research Vol. 46, No3 (2008), pp. 356-372
- 2) 例えば, 滝本慎二, 木村一郎, 清水康行, 細田尚. 急な湾曲部を有する開水路三次元乱流構造に関する数値シミュレーション. 応用力学論文集 Vol. 12, (2009), pp. 749-758

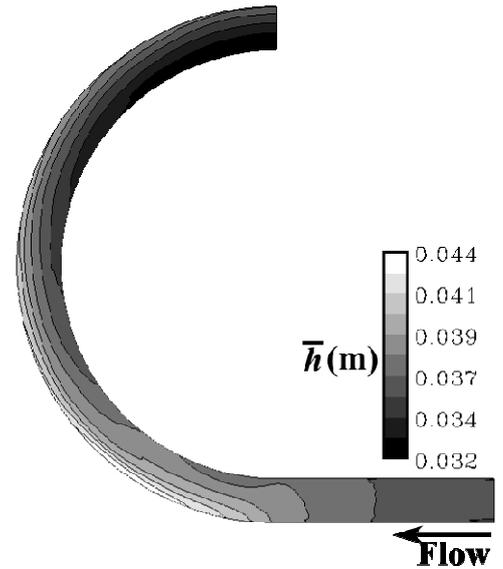


図3 時間平均水深

消えている。また、このケースでは  $\phi = 135^\circ$  断面でしか外岸セルが確認できなかったのに対し、今回とはほぼ同じ曲率、フルード数で、矩形断面での LES, RANS<sup>2)</sup> では湾曲部ほぼ全体で外岸セルが生じており、底面形状が乱流構造、特に外岸セルの発生を抑制する形で影響を及ぼしていることが確認できた。図3は時間平均水面高の分布である。周期境界で時間進行する過程で水面が漸増し、準定常となった範囲で時間平均し示した為、全体的に水位は初期より上昇しているが、外岸で相対的に