

2次元と3次元を組み合わせた河川流の数値計算

長岡技術科学大学 非会員 ○南谷祐作

長岡技術科学大学 正会員 楊宏選

長岡技術科学大学 正会員 熊倉俊郎

1. はじめに

河川流解析において、構造物周辺や複雑な地形の流れの解析には3次元流体モデルによる解析が有効である。しかし、広域を対象とした3次元解析には多大な計算負荷を要する。この課題に対し、広域を平面2次元モデル、構造物周辺等を3次元モデルで解析するハイブリッド解析手法が提案されている。オープンソースのCFD環境であるOpenFOAMでは、mintgen¹⁾により2次元浅水流ソルバー(shallowFoam)と、3次元VOFソルバー(interFoam)を一つの統合ソルバーとして組み合わせたshallowInterFoamが開発された。またこのハイブリッド計算手法の実用化に向けて保坂ら²⁾による課題の抽出とその改善が図られた。

本研究では、平面2次元・3次元ハイブリッド解析手法を河川流解析に適用し、四角柱橋脚周辺の水深および後流構造について、平面2次元解析および3次元解析との比較を通じて、ハイブリッド解析手法の再現性と課題を検討する。

2. 解析手法の概要

解析にはshallowInterFoamソルバーを活用する。

(1)平面2次元解析モデル

2D領域では、非線形長波理論に基づいたモデルを使用している。基礎方程式は、静圧を仮定して、連続の式と運動方程式を水深方向に積分した平面2次元浅水流方程式である。水深の輸送方程式と運動方程式は次に示される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (h\mathbf{U}\mathbf{U}) &= -hg\nabla(z_b + h) \\ &+ \frac{\tau_b}{\rho} + \nabla \cdot (\nu_t \nabla(h\mathbf{U})) \end{aligned} \quad (2)$$

なお、 h は水深、 $\mathbf{U}$ は流速ベクトル、 ρ は密度、 τ_b は底面摩擦応力、 z_b は河床高、 ν_t は渦動粘性係数である。

(2)3次元解析モデル

3D領域における計算手法はOpenFOAMの非圧縮性・不混和流体の二相流を対象としたinterFoam

ソルバーをもとに構築されており、基礎方程式は連続式、Navier-Stokes方程式である。気液界面の追跡にはVOF法を使用している。連続方程式、流体分率 α の移流方程式、運動方程式は以下になる。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)\mathbf{U}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\mu_e \nabla \mathbf{U}) - \nabla p + \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

ここで $\mathbf{g}$ は重力、 μ_e は有効粘性係数(粘性 μ と渦粘性 μ_t の和)である。

3. 検証計算

(1)検証データ

本検討では、四角柱の橋脚を検証データとする。平面図と領域配置を図1に示す。橋脚は4×4mで全高にわたって配置されており、水没することはない。3次元領域は(x,y)=(100,20)から(300,50)まで200×30mの範囲(図1の赤ライン)とした。メッシュの解像度は橋脚近傍で0.5mとし、橋脚から離れるにつれて水平方向の間隔は最大で $\Delta x, \Delta y = 1.0\text{m}$ まで引き延ばされている。鉛直方向は3次元領域は一定の4mであり、底面付近の層は薄く(第1層0.04m, 第2層0.06m), 上部層は0.2mで設定している。また底面勾配は、x方向に一定の勾配($I_s = 0.001$)を設定している。

(2)解析条件

解析ケースはハイブリッドケースのほか、比較ケースとしてすべての領域を3次元モデルとしたケース(3Dケース)および平面2次元モデルとしたケース(2Dケース)を対象とした。3DケースはOpenFOAMのinterFoamソルバを用いる。また2DケースはshallowFoamを用いる。

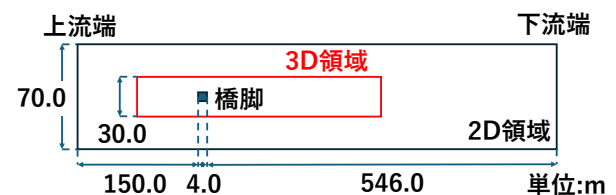


図1 検討平面図と領域配置

4. 計算結果と考察

4.1 橋脚前後の水深比較

300～400 秒の計算結果を対象に、0.5 秒間隔で得られた水深の時間平均値を比較した。橋脚中央 ($y=35$ m) における水深の縦断分布を図 2 に示す。なお、表示範囲は $x=140\sim180$ m とした。

(1) 橋脚前方の比較

橋脚前方では、3D ケースとハイブリッドケースの水深分布がおおむね一致し、橋脚直前における水深の上昇が再現された。一方、2D ケースでは橋脚直前に急激な水深低下が生じている。

3D ケースおよびハイブリッドケースでは、格子形状によって橋脚を表現しているのに対し、2D ケースでは河床高を変更することで橋脚を表現している。この橋脚の表現方法の違いが、水深分布の差に影響した可能性がある。

(2) 橋脚後方の比較

橋脚後方では、3つのケースで水深が低下した後、下流に向かって回復する傾向が確認された。3D ケースとハイブリッドケースの水深分布はおおむね一致したが、2D ケースでは水深の回復が比較的緩やかであった。

以上の結果から、橋脚前後の時間平均水深については、ハイブリッドケースが 3D ケースに近い結果となった。

4.2 流線及び鉛直渦度の比較

橋脚周辺の鉛直平均流速に基づく流線および鉛直渦度分布を図 3 に示す。

2D ケースおよび 3D ケースでは、橋脚後方に流れの剥離が生じ、後流域に正負の鉛直渦度が分布している。これらの特徴は、カルマン渦列の形成を示唆している。

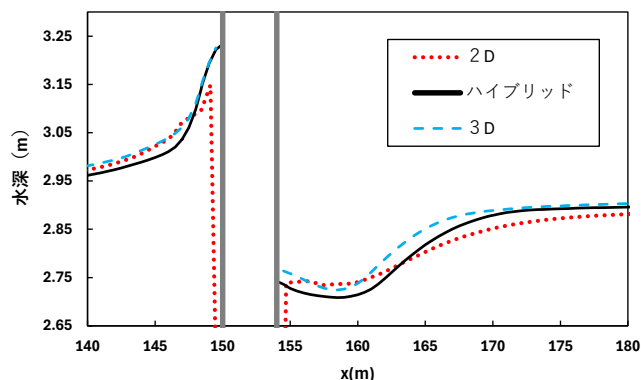


図 2 橋脚中央 平均水深縦断分布

一方、ハイブリッドケースでは、橋脚後方に細かな正負の渦度分布が形成され、2D ケースおよび 3D ケースとは異なる後流構造が確認された。

この相違については、2次元・3次元領域間の接続条件、格子解像度、乱流モデルおよび数値計算条件などが影響している可能性があり、今後詳細な検討が必要である。

5. 結論

本研究では、四角柱橋脚を対象に、2D ケース、3D ケースおよびハイブリッドケースの水深分布と後流構造を比較した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 橋脚前後の時間平均水深について、ハイブリッドケースは 2D ケースよりも 3D ケースに近い分布を示した。

(2) 2D ケースおよび 3D ケースでは、橋脚後方に剥離流と正負の鉛直渦度分布が形成された。

(3) ハイブリッドケースでは、橋脚後方の渦度分布が他のケースと異なり、後流構造の再現性に課題が残ることが示された。

今後は、2次元・3次元領域の接続条件や格子解像度の影響を検討するとともに、橋脚に作用する抗力・揚力の時間変動を比較し、後流の再現性を定量的に評価する。

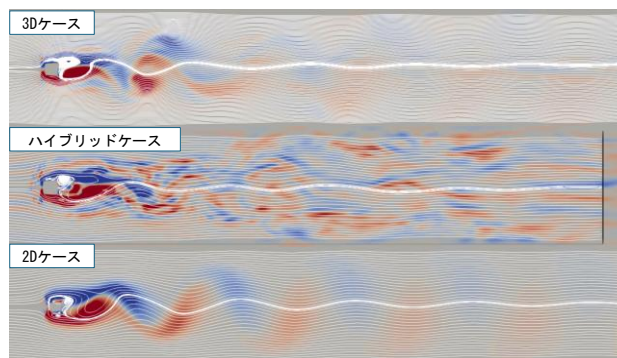


図 3 流線及び鉛直渦度分布

参考文献

- 1) Mintgen, F : Coupling of Shallow and Non-Shallow Flow Solvers An Open Source Framework, Technical University of München, 166p, 2018
- 2) 保坂幸一, 松山昌史, 加藤勝秀 : 2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2, I_19-I_24, 2021