

角柱周辺の水位変動の再現性に関する数値解析モデルの比較

松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 正会員 ○木村 一郎
鳥取大学工学部 土木工学科 非会員 渡辺 陽子
株式会社 テーリング 非会員 角 由加里
京都大学工学研究科 都市社会工学専攻 正会員 細田 尚

1. はじめに

本研究は橋脚による水位堰き上げ効果の再現性を、二次元モデル(2D)、準三次元モデル(quasi-3D)、三次元モデル(full-3D)について比較したものである。二次元モデルには、今回は二次流や鉛直加速度の影響を含まない単純モデルについてのみに検討する。まず、検証実験はとして角柱を橋脚モデルに用いた実験を行い、実験と同条件で計算を行うことによりモデルの妥当性を評価する。

2. 数値解析モデル

数値解析には次の3つのモデルを用い、結果を比較する。

- ① 平面 2 次元モデル (以下 P2D と略) : 水深積分された基礎式を用いて、乱流モデルは 0 方程式モデルとする。
- ② 準 3 次元モデル (以下 Q3D と略) : 静水圧近似の 3 次元モデル。乱流モデルは非線形 $k-\epsilon$ モデルとする。
- ③ 3 次元モデル (以下 F3D と略) : 動水圧を考慮した 3 次元モデル。乱流モデルは非線形 $k-\epsilon$ モデルとする。

基礎式や計算方法の詳細については他の文献に譲る。

3. 対象とする流れ場と検証実験

検証実験は松江高専水理環境実験室に設置された幅 20cm、長さ 10m、勾配 1/1000 の可傾斜開水路を用い、水路の中央付近に一辺が 4cm の角材を設置し、通水した。水深の中央における流速をプロペラ流速計を用いて計測し、水深の計測にはデジタルポイントゲージを用いている。流れ場の概要と座標系を図-1 に、実験の条件を表-1 に示した。

4. 計算結果とその考察

カルマン渦の再現性 : 実験では後流域にカルマン渦がみられ、数値解析においても全モデルでカルマン渦が再現された。図-2 に瞬間的な流速ベクトルを示す。再循環流域の長さに影響され P2D の渦の発振位置が最も角柱に近づいている。実験の Strouhal 数は 0.24 で、数値解析の Strouhal 数はいずれのモデルも実験値とほぼ一致した。

馬蹄渦の再現性 : 図-3 は、角柱近傍の x 軸に沿う鉛直縦断面内の時間平均流速場を Q3D と F3D で比較したものであり、鉛直スケールを2倍に拡大して示している。いずれのモデルでも角柱上流側底面付近に時計回りの渦がみられる。これは、馬蹄渦の上流端に相当するものである。渦の再現性にもモデルによる差異が認められ、渦の直径や回転流速は F3D の方が大きい。

F3D による動水圧分布の検討 : 図-4 は、F3D における動水圧(静水圧からの偏差)の分布を示したものであり、上は水深の中央の位置の平面分布を、下は x 軸に沿う鉛直縦断面の分布をそれぞれ示している。なお、鉛直分布については鉛直スケールを水平スケールの6倍に拡大して示している。まず、平面図についてみると、角柱の直上流は正の動水圧がみられるが、その上流側のU字型の馬蹄渦に沿った領域では負の値となっている。これは馬蹄渦の中心付近で遠心力の影響を受けるためと考えられる。角柱の側壁に沿った馬蹄渦より内側の箇所は、正の分布となっている。一方、角柱直下流側の左右の剥離域でも

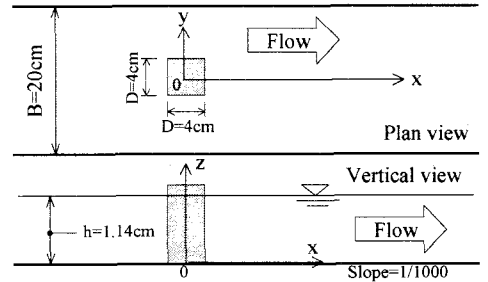


図-1 流れ場の模式図

表-1 流れ場の水理条件

h (cm)	U_0 (cm/s)	D (cm)	B/D	h/D	Re	Fr
1.14	18.18	4.0	5	0.285	8400	0.54

h: depth, U_0 : mean velocity, D: side-length of cylinder B: channel width, Re: Reynolds number ($=U_0 D/\nu$), Fr: Froude number ($=U_0/\sqrt{gh}$)

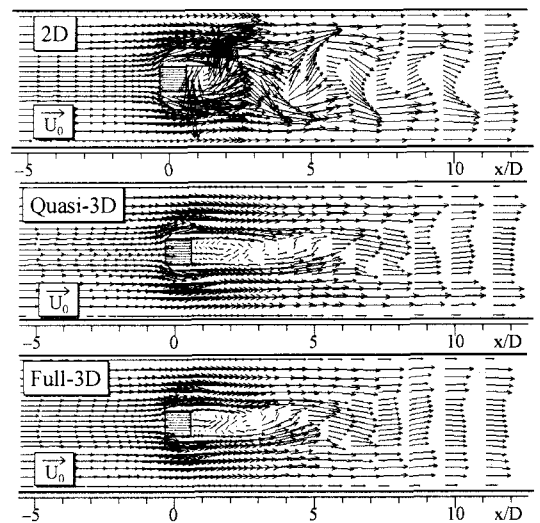


図-2 水平面内の瞬間的な流速ベクトル

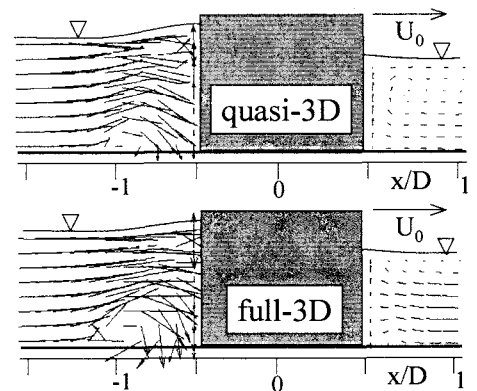


図-3 鉛直縦断面内の時間平均流速ベクトル ($y/D=0$, $x-z$ 平面)

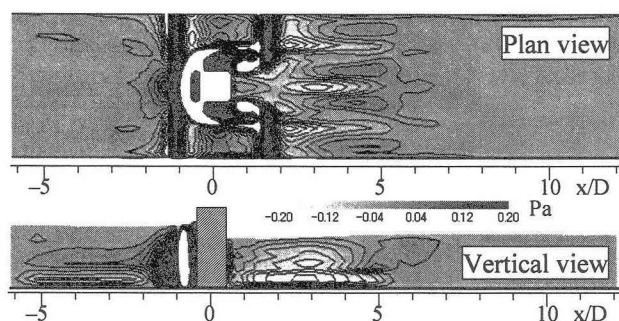


図-4 三次元モデルによる時間平均動圧分布

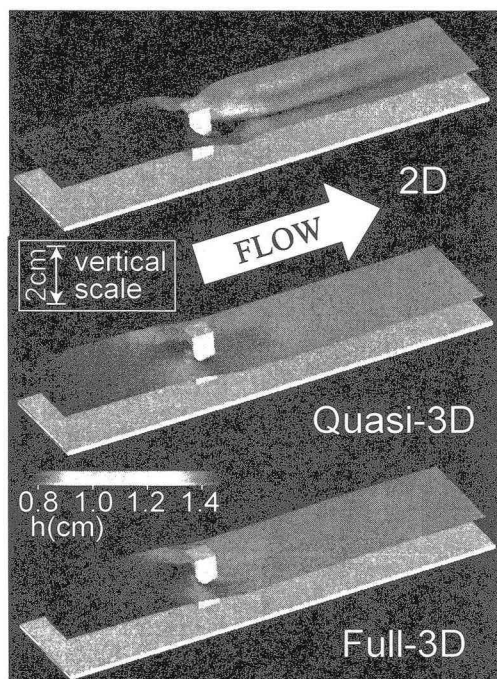


図-5 時間平均水面の鳥瞰図の比較

負の動水圧がみられる。鉛直分布についてみると、角柱の上流側の馬蹄渦付近の広い範囲で負の分布がみられる。この付近は角柱に衝突した流れが左右に分岐して進む鞍形点ともなっており、圧力の急激な低下が生じていることがうかがえる。馬蹄渦の周囲では逆に正の動圧分布がみられる。今回の実験においては圧力の計測を行っていないため、実現象との比較はできないが、流れ場との関連を考えると定性的には妥当な分布といえそうである。

角柱周辺の水位変動に関する比較：図-5 は3つのモデルによって再現された水面変動の 20 秒間の時間平均値である。P2D で左右非対称となるのは比較的長周期の変動の存在による。一見して、P2D が角柱下流側の水面の窪みを最も大きく再現しており、Q3D は角柱下流側の水面形が最も平坦である。より定量的特性を検討するため、 x 軸方向の水面形分布を、 $y/D=0$, $y/D=1.5$ の2断面について、図-6 に示した。 $y/D=0$ の断面について、まず角柱下流側に着目すると、P2D は水深の低下を過剰に評価していることがわかる。Q3D および F3D は、逆に下流側の水深低下を十分再現していない。上流側の堰き上げに着目すると、いずれのモデルも実験値との適合は良好に見える。角柱上流の水深最大値は、実験が 1.45cm, P2D が 1.45cm, Q3D が 1.42cm, F3D が 1.45cm であり、Q3D の再現性が若干劣っている。一方、角柱から離れた $y/D=1.5$ の断面では P2D が最も良好な結果となった。結局、P2D は水位変動(特に下流側窪み)を過大評価し、Q3D は水面形が平坦になるという特性が示された。ただしこれらには計算格子や乱流モデルの影響もあると考えられ、さらなる検討が必要である。

CPU 時間の比較：本研究では Dual Xeon 2.4GHz, RAM:512Mb の PC により、OpenGL による並列計算を実行している。各モデルによる実時間 10(s) の計算に要した CPU 時間は、P2D が 1.7(min), Q3D が 284(min), F3D が 364(min)であった。

参考文献: 1) 木村他:開水路せん断混合層の流れ構造に対する水深積分型修正ゼロ方程式モデルの適用性, 水工学論文集, Vol.48, 673-678, 2004. 2) 木村他:越流型水制周辺の三次元乱流構造に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, Vol.48, 661-666, 2004.

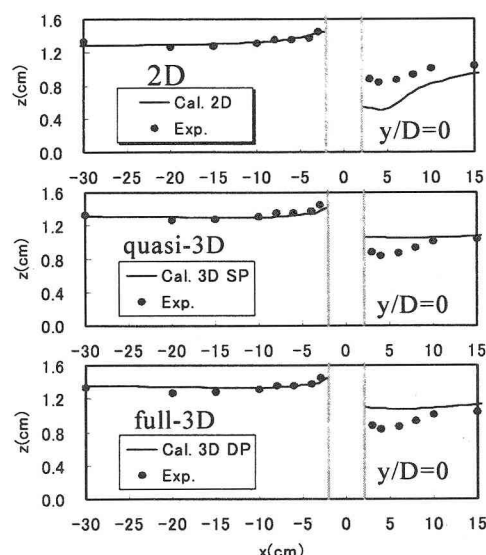


図-6 (a) 縦断面内の水面形の比較($y/D=0$)

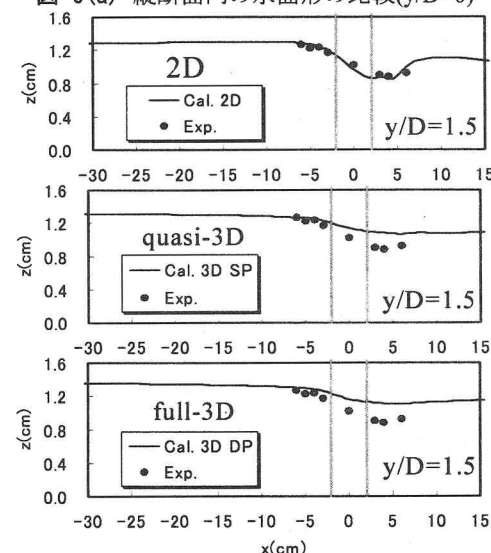


図-6 (b) 縦断面内の水面形の比較($y/D=1.5$)