

床面上直立圆柱的三维湍流数值模拟¹⁾

薛雷平 刘 桦 刘海江

(上海交通大学工程力学系, 上海 200030)

摘要 从数值预报桥墩等结构物床面局部冲刷的角度发展绕直立圆柱的三维湍流的数值模拟技术. 基于 Wilcox 的 $k-\omega$ 两方程湍流模式, 采用基于有限体积法的压力修正 SIMPLE 算法, 计算了绕床面直立圆柱的三维湍流流场, 分析了光滑和粗糙床面两种情况下的流动情况. 通过系列的验证计算, 表明该计算模型能够比较准确地反映不同外来流条件下绕直立圆柱的流场. 计算结果揭示了床面粗糙度对绕圆柱的湍流流动的影响.

关键词 $k-\omega$ 湍流模式, 有限体积法, SIMPLE 算法, 湍流, 桥墩

引 言

冲刷对河流和海流作用下的结构物的稳定会造成很大的威胁, 有关水中结构物冲刷的防护和维修的费用是非常高的. 冲刷过程与流动情况和底床床面的性质有直接的联系. 关于水流作用下桩柱附近的局部冲刷问题前人已经做了大量的工作^[1~4]. 他们主要是以实验的手段来估计冲刷坑的形态及最大冲刷深度等问题. 直立桩柱(如桥墩)的三维绕流十分复杂, 它主要表现在: 桩柱前面的水面变化, 桩柱附近流动的加速, 桩柱前面的马蹄涡及后面的尾涡(分为脱落和不脱落两种情况), 紊动的加强等. 在桩柱的周围将出现尺度很大的旋涡体系, 旋涡的中心形成负压吸起床面的泥沙带入下游. 这些变化将会引起当地水流冲刷能力的增强, 桩柱附近尤其明显($S_0/D = 2.4$, 其中 S_0 代表冲刷的最大深度, D 代表桩柱的直径)^[5]. Baker^[6] 利用流动显示技术对层流马蹄涡的结构进行了细致的研究, 分析了马蹄涡系中 3 个顺时针、3 个逆时针共 6 种涡运动变化的情况, 之后 Baker^[7] 又对马蹄涡系的振荡及由层流到湍流的过渡进行了研究. Dargahi^[8] 对圆柱流场的水槽实验结果进行了详细的分析, 讨论了马蹄涡和尾涡的一些性质, 并分析了 Re 数同涡的数量及维数之间的关系. 以上研究工作基本可分为两类, 一类注重宏观现象的捕捉和总结, 是目前工程计算公式的实验基础; 另一类工作着眼于流动机理, 尤其是涡系发展规律的研究, 但该类工作采用的实验雷诺数距实际情况有较大距离, 也很难考虑粗

糙底床(如沙质底床)等冲刷问题重要因素的影响. 数值模拟研究对水工建筑物绕流和冲刷问题研究提供了强有力的工具, 它们可以模拟符合实际情况的影响参数组合, 通过合适的数学模型和计算方法也能对沙质底床以及冲刷过程进行预测. 目前该类结合实际复杂三维流场的数值模拟还是比较困难的, Anderson^[9] 建立了沙质底床沙粒直径与表面粗糙度的关系, 并引入 Wilcox^[10] 的 $k-\omega$ 两方程湍流模式进行了河流中沙丘的二维数值研究, Roulund^[11] 利用 Ellipsys3D 流动求解器及 $k-\omega$, SST 湍流模型对圆柱附近三维流动进行了求解和分析, 得到了较为符合实际的结果.

本文采用三维数值模拟方法^[12,13] 对床面直立圆柱湍流绕流问题进行了初步的研究. 作为对实际建筑物周边底床冲刷问题的数值模拟的基础, 作者对整个数值模型结合一系列实验结果进行了验证计

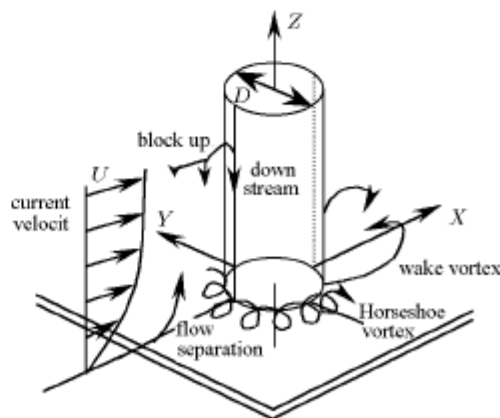


图 1 圆柱附近的流动情况

Fig.1 Flow pattern around a pile

2003-07-16 收到第 1 稿, 2004-06-10 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金(10172058)和高校博士点基金(2000024817)资助项目.

算,同时对不同流动参数下光滑床面和粗糙床面条件下的流动进行了比较计算.本文主要探讨了粗糙床面对圆柱附近流动及床面切应力的影响.

1 控制方程及边界条件

流体绕固定在床面上圆柱的运动是一个三维流动.它的控制方程包括连续性方程和动量守恒方程.其中连续方程(不可压缩均质)为

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

雷诺平均的 N-S 方程为

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

考虑到所要解决流动问题的复杂性,尤其是必须对沙质底床进行模拟,本文采用 Wilcox^[10] 的 $k-\omega$ 两方程模型进行湍流计算,该模型可以直接考虑固壁表面粗糙度问题.

$k-\omega$ 湍流模型表示如下:

湍动能 k 的方程为

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

特定湍流耗散率 ω 的方程为

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\beta}{\beta^*} \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

上面两个方程中的各参数的取值如下

$$\beta = 0.075, \quad \beta^* = C_\mu = 0.09$$

$$\alpha = 5/9, \quad \sigma = 0.5, \quad \sigma^* = 0.5$$

涡黏性系数 μ_T 由下式获得

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k}{\omega} \quad (5)$$

本文考虑定常来流,并对水面作刚盖假定(即采用对称边界条件),整个计算域共采用 4 类边界条件:入口边界条件、出口边界条件、对称边界条件和固壁边界条件.入口边界条件通过计算一段适当长

的无柱的入口段来得到(实际为二维湍流边界层,边界层厚度由算例试验值定).出口边界条件为对流输出条件,定常问题可表达为

$$\partial \phi / \partial n = 0$$

ϕ 表示 U, V, W, k, ω 等不同的物理量.对称边界条件为

$$U_n = 0, \quad \partial \phi / \partial n = 0$$

其中 ϕ 表示 U, k, ω 等不同的物理量.固壁边界条件为:

流速 $U_i = 0 (i = 1, 2, 3)$, 湍动能 k : $\partial k / \partial n = 0$, 底床泥沙颗粒大小的考虑转化为固壁粗糙度的处理,直接进入湍流模式, ω 的边界条件为

$$\omega = S_R C_\mu \frac{U_f^2}{\nu} \quad (6)$$

$$S_R = \begin{cases} (40/k_s^+)^3, & 0 < k_s^+ < 20.2 \\ 100/(k_s^+)^{0.85}, & k_s^+ > 20.2 \end{cases}$$

$k_s^+ = U_f k_s / \nu$, 其中 Nikuradse 平衡泥沙粗糙度 $k_s \approx 2.5 d_{50}$ (d_{50} 为 50% 泥沙当量颗粒直径), 摩阻流速

$$U_f = \sqrt{\tau / \rho} = \sqrt{\nu \partial U / \partial n} = \sqrt{\nu |U_t| / 0.5 \Delta z}$$

Δz 为此控制点的高度. k_s^+ 为一反映床面粗糙程度的量,如果 $k_s^+ > 70$ 则表示床面粗糙,如果 $k_s^+ < 5$ 则表示床面是光滑的,如果 k_s^+ 处于上述的两个量之间则说明床面处于过渡区.圆柱表面为光滑固壁, ω 边界条件为

$$\omega = \frac{2\nu}{\Delta z^2} \quad (7)$$

以上给出了本问题流场部分的数学模型,并提出了相应的边界条件.

2 三维流场数值方法

这里计算采用的数值模拟方法是压力修正法(SIMPLE 算法),离散方法为有限体积法. SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法是一种求解压力耦合方程组的半隐式方法.本文采用格点格式和非交错网格进行计算求解.方程的详细离散过程可参考文献[12]和[13].

3 计算结果分析

本文重点研究定床(无冲刷情况下)光滑床面和粗糙床面的流场形态的不同.计算网格采用分区方法分为 4 部分,见图 2.具体算例及相应的计算条件见表 1.

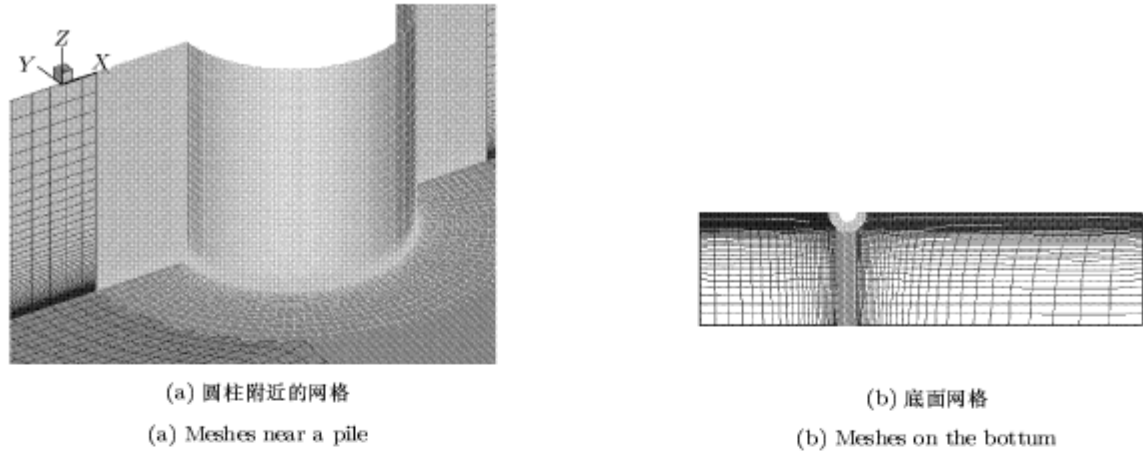


图 2 计算网格

Fig.2 Computational meshes

表 1 数值计算的各种工况参数表

Table 1 Model parameters for numerical computation

Bottom type	Cylinder diameter D/m	Current velocity $U_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Water depth h/m	Boundary thickness δ/m	Reynolds number Re_D	k_s/cm	d_{50}/cm	Length of entry section l/m	Bottom stress without cylinder $\tau_0/\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	Experiment
smooth	0.536	0.326	0.54	0.54	1.75×10^5	—	—	91	0.1657	Ref.[11]
rough	0.536	0.326	0.54	0.54	1.75×10^5	1.0	4.0	57	5.956	Ref.[11]
smooth	0.15	0.26	0.2	0.2	3.9×10^4	—	—	27	0.099	Ref.[8]
smooth	0.15	0.1	0.6	0.6	1.5×10^4	—	—	111	0.0178	Ref.[14]

图 3 给出了表 1 中粗糙床床条件 (Roulund^[11]) 下计算得到的圆柱附近的速度场。从图中可以看到均匀来流的发展, 在床面形成了边界层流动; 圆柱前端由于逆压梯度的存在, 形成马蹄涡; 在柱前形成下降水流, 并形成了新的边界层; 柱侧面流动产生分离, 柱后形成尾涡。Roulund^[11] 指出的直立圆柱周围的流动现象从图中都可以看到。由此可见, 本文采用的计算方法能够比较准确地反映圆柱附近的流动现象。

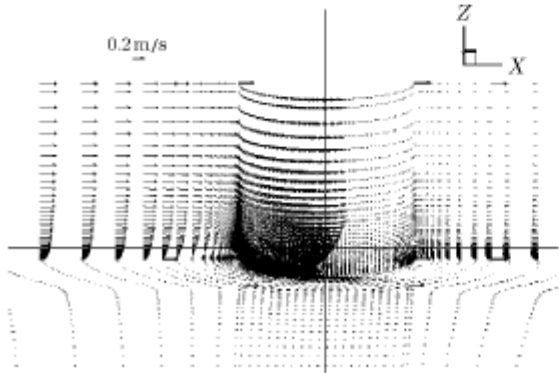


图 3 粗床条件下圆柱周围的速度场

Fig.3 Velocity field around a pile on rough bottom

图 4, 图 5 分别为光滑床面和粗糙床面圆柱侧面尾涡分离角与实验结果 (Roulund^[11]) 的比较。从图中可以看到光滑床面的计算结果同实验有一定的差距, 直接原因来自于湍流模式中的 Boussinesq 假定, 基于该假定的湍流模式对于钝头体驻点附近湍流强度均会有一定程度的过高估计, 目前有一些非线性湍流模式可以对该类问题作出较为准确的计算, 可参见文献 [12]。

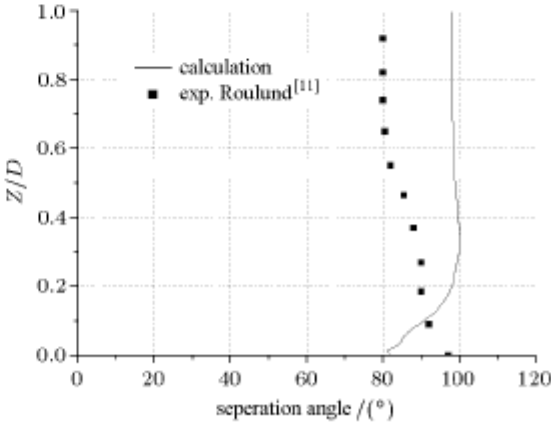


图 4 光床柱侧尾涡分离角

Fig.4 Separation angle on smooth pile

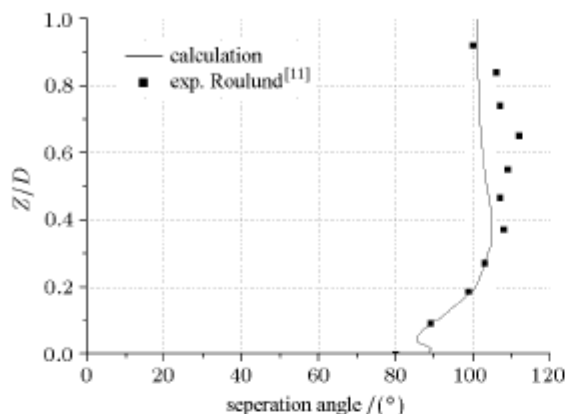


图 5 粗床柱侧尾涡分离角

Fig.5 Separation angle on rough pile

粗糙床面的计算结果同实验比较接近, 此时圆柱与底床交接处附近流场的湍流强度主要由粗糙底床引起, 湍流模式对于圆柱绕流驻点附近湍流强度的高估远小于底床引起的湍流强度, 因此, 这里的计算比光床计算与实验结果的相符性要好得多.

图 6 为光床柱前对称面底面切应力放大系数与实验结果^[11]的比较. 计算结果能比较准确地反映对称线上的切应力分布情况. 图 7 为粗床与光床柱前对称面底面切应力放大系数的比较, 由于床面粗糙度的作用, 光床情况下的切应力放大系数要小于粗床情况.

图 8, 图 9(Roulund^[11] 实验) 为粗糙床面与光滑床面计算柱前 $z = 0.05\text{m}$ 高程处湍流度和混合长度计算结果的比较. 从图中可以看到粗糙床面的湍流特征值(湍流度, 混合长度)由于底面粗糙度的影响比同条件下的光滑床面都要大许多.

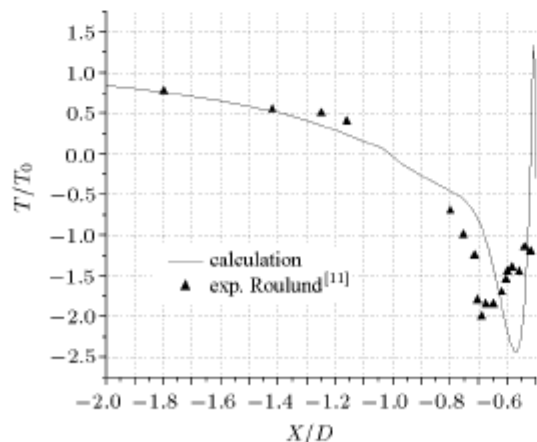


图 6 光床柱前切应力放大系数

Fig.6 Amplification factor of the shear stress on smooth bottom

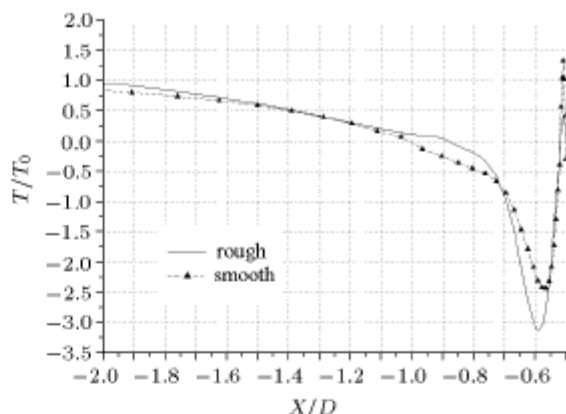


图 7 粗床与光床柱前切应力放大系数比较

Fig.7 Comparison between amplification factor of the shear stress on rough bottom and on smooth bottom

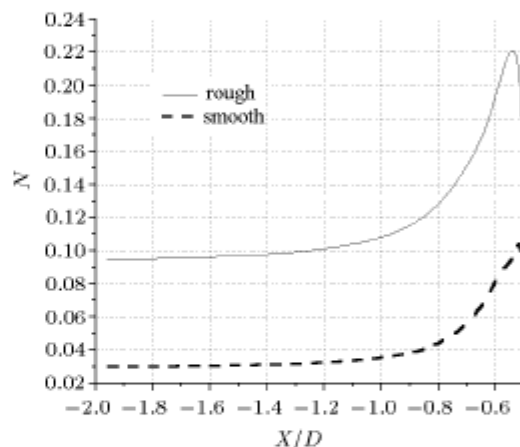
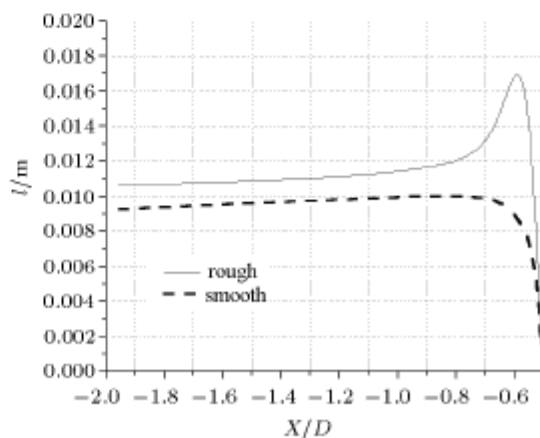
图 8 $z = 0.05\text{m}$ 粗床与光床柱前湍流度比较Fig.8 Turbulence density in the front of pile on rough bottom and smooth bottom ($z = 0.05\text{m}$)图 9 $z = 0.05\text{m}$ 粗床与光床柱前混合长度比较Fig.9 Mixing length in the front of pile on rough bottom and smooth bottom ($z = 0.05\text{m}$)

图 10, 图 11 分别为柱前沿水深及底面的压力系数分布与 Dargahi^[8] 的实验结果的比较。可以看到数

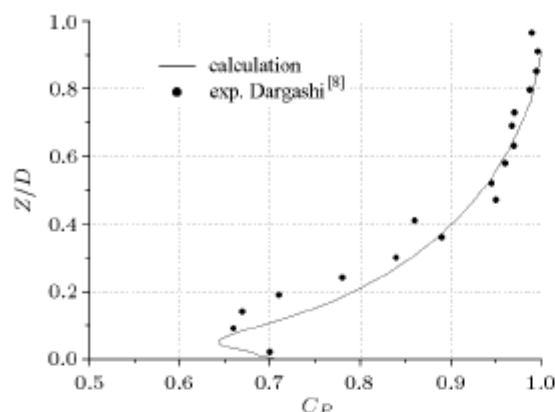


图 10 光床柱前沿水深压力分布

Fig.10 Pressure distribution along water depth in the front of pile on smooth bottom

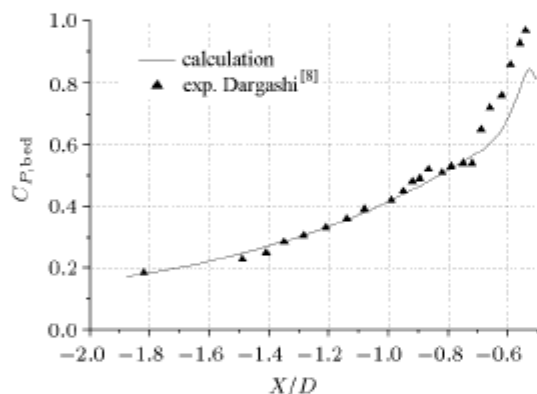


图 11 光床柱前底面对称线压力分布

Fig.11 Pressure distribution along center line in the front of pile on smooth bottom

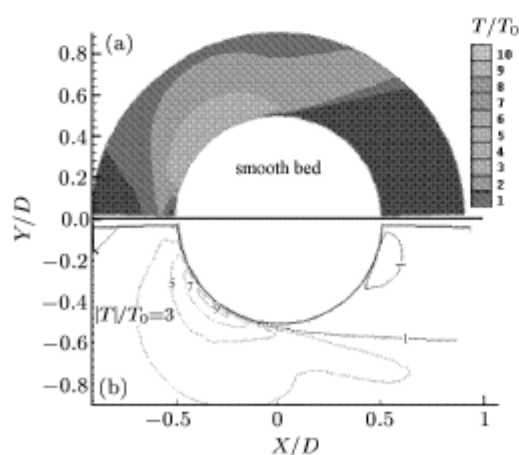


图 12 光床床面切应力放大系数, (a) 计算, (b) 实验结果^[14]

Fig.12 Amplification of shear stress on smooth bottom

(a) Computational results, (b) Experiment^[14]

值模拟的结果能准确地反映压力的变化情况。图 12 为计算得到的光滑床面的底面切应力放大系数 (有无绕流体时切应力之比) 分布与 Hjorth^[14] 同条件下的实验结果比较。图中看到, 数值模拟的结果能够比较准确地反映床面切应力的放大位置和分布形状, 但在极值大小上比实验结果略低。

4 结 论

基于 FVM 和 SIMPLE 算法的三维湍流 $k-\omega$ 数值模型能够比较准确地模拟直立圆柱附近三维流动的一些现象, 如桩柱附近的速度场和压力场分布。通过与前人的实验结果比较, 计算结果表明本文对流动场的数值模拟是成功的, 尤其对压力场的模拟比较准确。通过数值计算可以看到床面粗糙度对整个流动现象有较大的影响。底床粗糙度的增加使得流动湍流强度相应增大。粗糙床面情况下的湍流度 N 及表征湍流大小尺度的混合长度 l 都将较光滑床情况有相应的增加, 由此导致床面切应力大幅度增加。这将对床面泥沙的冲刷有很大的影响, 有关粗糙床条件下三维湍流的计算结果对进一步深入研究桩柱附近的局部流动有一定的指导意义。

致谢 感谢上海交通大学工程力学系何友声教授对本研究项目的指导。本文部分算例由上海交通大学高性能计算中心帮助完成, 谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 Breusers HNC, Raudkivi AJ. Scouring. IAHR/AIRH Hydraulic Structures Design Manual, Vol 2, AA Balkema, Rotterdam/Brookfield, 1991
- 2 Melville BW, Chiew Yee-Meng. Time scale for local scour at bridge piers. *J Hydr Eng ASCE*, 1999, 125(1): 59~65
- 3 陈国平, 左其华, 黄海龙. 波浪作用下桩柱周围局部冲刷研究. 海洋工程, 2000, 18(4): 21~26 (Chen Guoping, Zuo Qi-hua, Huang Hailong. Local scour around cylinder under water action. *Ocean Engineering*, 2000, 18(4): 21~26 (in Chinese))
- 4 Whitehouse R. Scour at Marine Structures. London: Thomas Telford, 1st edition, 1998
- 5 Ettema R, Melville BW, Barkdoll B. Scale effect in pier-scour experiments. *J of Hydr Eng*, 1998, 124(6): 639~642
- 6 Baker CJ. The laminar horseshoe vortex. *J Fluid Mech*, 1979, 95(2): 347~367
- 7 Baker CJ. The oscillation of horseshoe vortex systems. *J of Fluids Eng*, 1990, 113: 489~495
- 8 Dargahi B. The turbulent flow around a circular cylinder. *Exp in Fluids*, 1989, 8: 1~12
- 9 Andersen F, Rajaratnam N. The dynamics of ripples beneath surface waves and topics in shell models of turbu-

- lence. [Ph D thesis]: Copenhagen: Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark, 1999
- 10 Wilcox DC. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries Inc., La Canada California, 1993
- 11 Roulund A. Three-dimensional numerical modelling of flow around a bottom-mounted pile and its application to scour. [Ph D Thesis]: Department of Hydro and Water Resources, Technical University of Denmark, 2000, Series Paper No. 70
- 12 Xue L. Entwicklung eines effizienten parallelen Loesungsalgorithmus zur numerischen Simulation komplexer turbulenter Stroemungen. [Dissertation]: TU Berlin, Germany, 1998
- 13 刘海江. 床面上直立圆柱的三维湍流及局部冲刷数值模拟. [硕士论文]: 上海: 上海交通大学, 2002 (Liu Haijiang. Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow around a bottom-mounted pile and scouring. [M D Thesis]: Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2002 (in Chinese))
- 14 Hjorth P. Studies on the nature of local scour. Bulletin series A 46, Sweden: Dep of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, University of Lund, 1975

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR TURBULENT FLOW AROUND A BOTTOM-MOUNTED PILE¹⁾

Xue Leiping Liu Hua Liu Haijiang

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract When a bottom-mounted pile is placed in a steady current, the presence of the pile will change the flow pattern in its neighborhood, resulting in the following phenomena: the contraction of the flow, the formation of a horseshoe vortex in front of the pile and lee-wake vortices behind it. These changes usually cause an increase in the local sediment transport capacity, and thus lead to local scour. The three-dimensional flow around a vertical bottom-mounted circular pile is studied numerically by means of SIMPLE method based on the Finite Volume Method. The $k-\omega$ turbulence model is used for closure. The mathematical model is validated against experimental data and numerical results available. Computational results show that the effects of roughness of bottom on the turbulent flow around a vertical bottom-mounted circular pile.

Key words $k-\omega$ model, FVM, SIMPLE, turbulent flow, bottom-mounted pile

Received 16 July 2003, revised 10 June 2004.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10172058) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (2000024817).