

单一贴壁四面体框架绕流场三维数值模拟

高 柱¹, 殷 杰², 唐洪武³, 郭红民¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 上海勘测设计研究院, 上海 200434;
3. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:四面体透水框架群作为一种新型的防冲促淤措施已经在各种河流工程中得到推广应用, 由于其特殊的几何形状, 仅依靠常见的量测手段确定其绕流场结构存在较大困难, 使得对该类方法防护机理的理解受到限制。在 CFD 通用程序 Fluent 平台上建立三维水动力数值模型, 对单一贴壁四面体透水框架的清水流场进行模拟, 并与超声测速仪 (ADV) 实测结果进行对比验证。研究表明该数值模型有效地补充了三维复杂流场的物理实验结果, 有助于理解四面体框架的防护机理。改变水力参数, 计算得到阻力系数 C_D 相对于雷诺数 Re 的变化曲线, 当 $Re > 10^5$ 时, 单一贴壁四面体框架的阻力系数 C_D 为一常数, 大小为 1.557。

关键词:四面体框架; 绕流场; 数值模拟; 阻力; 冲刷防护

中图分类号: TV143.3; TV653.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)02-0161-06

最近十几年, 四面体透水框架群 (Tetrahedron Frame Groups, TFG) 作为一种新型的防护型材已经在各种河岸工程中得到推广应用, 与应用同时开展的相关研究工作也逐步从现场原型观测、工程经验总结、实验室试验研究, 向结合试验和数值分析的理论研究以及经济评价方向深入, 如徐国宾和张耀哲等^[1-2]对四面体框架在治河护岸工程中的应用问题做了讨论; 房世龙和唐洪武等^[3-4]对四面体框架在桥墩防护中的应用做了较系统的试验和理论分析; 徐锡荣和李若华等^[5-7]则对四面体框架的阻力特性和流场结构做了较系统的试验研究和分析。其中涉及的问题, 如四面体框架 (Tetrahedron Frame-TF) 绕流场的水流结构, 与减速促淤有关的框架群水流与泥沙相互作用的机理, 在桥墩防护等河流工程中的应用, 正逐步成为此类研究中的新热点。由于四面体框架的特殊几何形状, 仅依靠常见的流量量测手段确定其绕流场结构和阻力特性, 存在较大困难, 而数值模拟技术是克服该困难的较理想方法。考虑到计算程序的通用性和可靠性, 越来越多的水利工作者采用成熟的商用 CFD 程序补充完善自己的研究工作^[8-10]。本文在 Fluent 商用代码平台上建立单一贴壁四面体框架的数值计算模型, 通过与物理试验结果的对比, 验证了该数值计算结果。

1 数学模型的建立

Fluent 中所求解的不可压缩流体的质量与动量守恒方程可以用笛卡儿张量形式表示。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (- \overline{u_i u_j}) + g_i \quad (2)$$

式中 u_i 、 p 、 μ 和 g_i 分别为时均流速分量、压力、密度、液体动力粘度和 i 方向的重力加速度; $-\overline{u_i u_j}$ 为雷诺应力张量, 表征液流中紊动效应。

收稿日期: 2009-03-16

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金 (2009491111); 浙江省科技攻关计划重点科研项目 (2008C23104); 三峡大学科学基金资助项目 (0620070016, 0620080019); 国家自然科学基金资助项目 (50779028)

作者简介: 高 柱 (1978 -), 男, 湖北宜昌人, 讲师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学、环境水力学等方面研究。
E-mail: gaozhu.cn@gmail.com

1.1 紊流模型的封闭

为使控制方程封闭, 需要引入紊流模型来模拟雷诺应力张量。最常用的紊流模型是建立在各向同性假设基础之上的标准 k - 紊流模型。相对较新的“可实现” k - 紊流模型满足一定的雷诺应力数学约束条件, 与紊流的物理特性一致, 在涉及旋转、存在强逆向压力梯度的边界层流动、流动分离和回流, 特别是二维射流扩展率的预报方面, 它较之标准 k - 模型和 RNG 模型有了一定的提高^[11], 文中控制方程都采用“可实现” k - 紊流模型封闭。

1.2 数学模型和计算条件

为方便将部分数值计算工况的结果与物理模型实测结果进行对比, 计算几何模型的建立是按照物理实验装置中各组成部分的几何大小设计的, 如图 1 所示。所需对比的水力要素量测垂线布置如图 2^[12]所示, 图中垂线 4、11、15、16、17 距离布置参考点的距离分别为 1 cm、4 cm、7 cm、13 cm、19 cm, 垂线 5、6、7 与纵向对称面的距离分别为 1 cm、3 cm、6 cm。

计算域水槽大小: 长 1260 mm, 宽 202 mm, 高度为各工况下的水槽均匀流水深。图 1 所示的数值计算的三轴坐标系原点, 对应于图 2 中所示的物理实验中的四面体框架布置参考点, 参考点位于渠道底部中心处, 距离计算域入口边界 360 mm。四面体框架用胶水粘附在水槽底部固定。四面体框架的各杆件长度 L 为 40 mm, 杆件截面为正方形, 边长 a 为 3 mm。数值计算中的自由水面采用刚性壁面假设, 设置成无摩擦的滑动边界条件。水槽上游设置为速度入口边界条件, 并假设流速分布均匀, 流速大小通过流量和过水断面面积求得。对不同的计算工况, 指定水力直径 D_H 和紊动强度 I 的取值, k 和 ϵ 的取值由 Fluent 软件所提供的经验公式计算得到。下游出口设置为 fluent 中的出流边界条件。水槽玻璃壁面和四面体框架壁面设置成固体壁面边界类型, 壁面粗糙高度取值分别为 0.1 mm (玻璃材质) 和 0.25 mm (木头材质)^[13]。有限体积法离散控制方程, 固体壁面采用标准壁面函数处理。先生成面网格, 框架面网格间距 1 mm, 水槽面网格间距 10 mm, 四面体单元剖分计算域, 产生 879 651 个单元体, 网格如图 3 所示。计算中采用 Fluent 默认的欠松弛因子取值, 二阶迎风格式求解动量方程, 恒定求解器, SMPLE 算法求解压力速度耦合, 设置 10^{-6} 为计算收敛的判据。

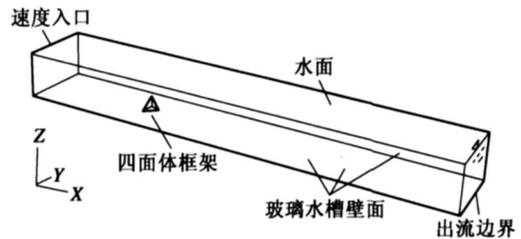


图 1 计算域和边界设置

Fig. 1 Computational domain and boundary configurations

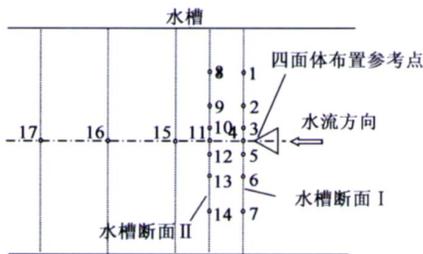


图 2 物理实验中量测垂线平面布置图

Fig. 2 Vertical line distribution in the physical experiments

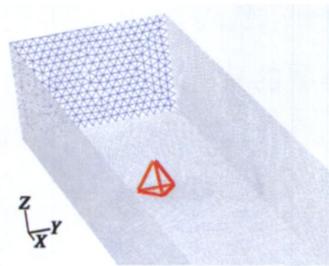


图 3 无结构化计算网格

Fig. 3 Un-constructural computing grid

2 计算结果及讨论

2.1 流场特性

图 4 是四面体框架绕流场的流线图, 图 5 是 $z=0.02$ m (从渠底起算距离) 平面上的流速矢量分布图, 图 6 是对称面 $y=0$ m 上的流速矢量分布图。从以上图中可以清楚地观察到常见的各种绕流体直观特征。限于篇幅, 本小节“流场特性”内容以工况 $Q=0.386$ m³/m in 为例进行说明。

图 7和图 8 分别是超声测速仪 (ADV)实测的四面体框架绕流场沿水流中心线的纵向流速分布 (即图 2 中的量测垂线 4, 11, 15, 16, 17)和横断面 I 内的纵向流速分布 (即量测垂线 4, 5, 6, 7)。图中水深 h (从渠底起算)用四面体框架的边长 L 量纲一化, 空间点上的纵向流速 u 用断面平均流速 U 量纲一化, 图中实黑线是无绕流体存在条件下的纵向中心断面上的实测流速垂线分布, 由实测离散数据回归分析得到。沿水深方向四面体框架对流场的影响区域限制在框架所在的高度空间内, 流速大小沿流程逐渐恢复, 但直到垂线 17, 流速仍然没有得到完全恢复。在横断面内, 垂线 5 流速分布受到影响, 垂线 6 流速分布未受影响。以上的纵向和展向影响范围表明: 四面体框架对流场的影响仅限制在其所在空间及其向下游延伸的一定距离之内。

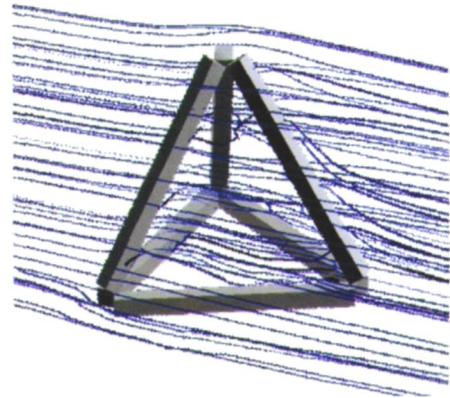


图 4 四面体框架绕流场流线图
Fig. 4 Stream lines of TF flow field

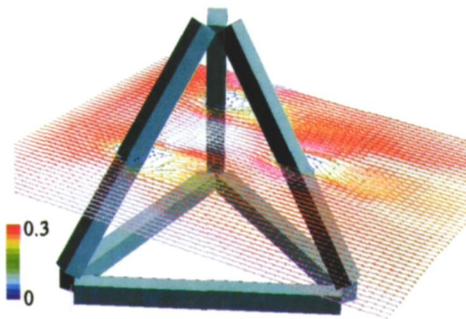


图 5 平面 $z=0.02\text{ m}$ 上的速度矢量图
Fig. 5 Vectors plot in $z=0.02\text{ m}$ plane

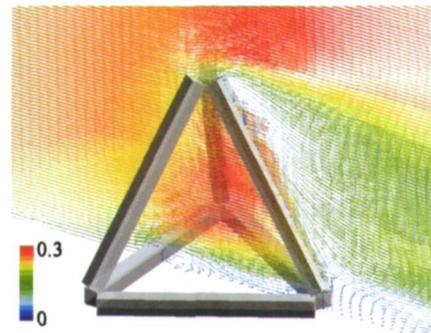


图 6 对称面 $y=0\text{ m}$ 上的速度矢量图
Fig. 6 Vectors plot in $y=0\text{ m}$ symmetry plane

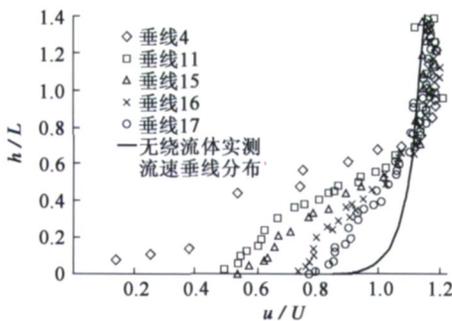


图 7 ADV 实测的四面体框架绕流场沿水流中心线的各垂线纵向流速分布
Fig. 7 Measured streamwise velocity distribution along each vertical line in centerline plane

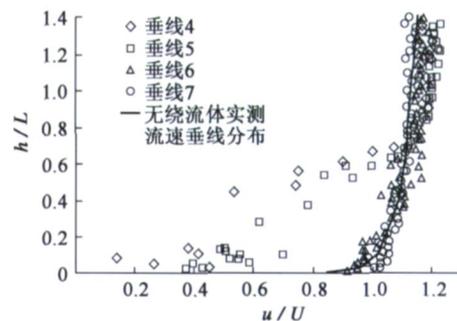


图 8 ADV 实测的四面体框架绕流场横断面 I 内各垂线纵向流速分布
Fig. 8 Measured streamwise velocity distribution along each vertical line in cross section I

图 9和图 10 分别是计算得到的四面体框架绕流场沿水流中心线的纵向流速分布和横断面 I 内的纵向流速分布, 为便于对比验证, 垂线位置的选取与图 7和图 8 一致。

计算结果显示的流场总体变化趋势与实测结果一致, 但计算所得到的绕流体在水深方向的流速影响范围较实测结果偏大, 达到 $1.2L$, 同时未受绕流体影响的空间点上的流速计算值较实测结果偏小。两者产生差

异的原因有以下几个方面：水槽壁面、杆件表面的粗糙高度难以准确给出；速度入口边界上的紊动条件也是凭借经验公式获得；物理实验定位和量测的误差以及数学模型本身的误差。尽管存在一定的差异，但就总体计算结果而言，计算得到的各水力要素的规律和趋势与实验所测结果一致，各物理量的数量级大小相当，数学模型已经具备一定的精度。因此可以将该数学模型作为实验研究工作的有力补充并可替代部分物理实验工作。

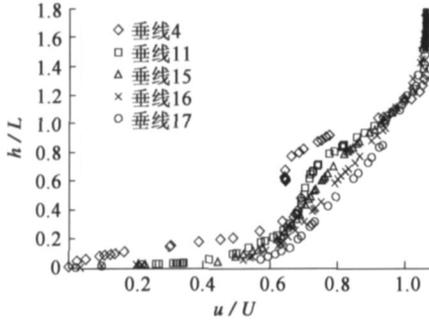


图 9 计算得到的绕流场沿水流中心线的纵向流速分布
Fig.9 Computed streamwise velocity distribution along each vertical line in centerline plane

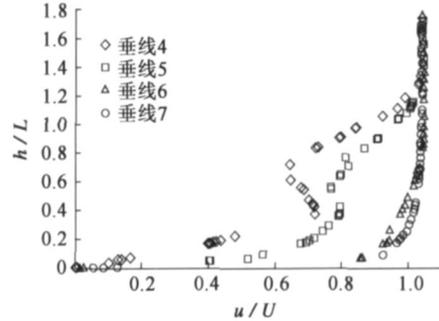


图 10 计算得到的绕流场横断面 I 内各垂线纵向流速分布
Fig.10 Computed streamwise velocity distribution along each vertical line in cross section I

2.2 阻力系数 C_D 和雷诺数 Re

建立绕流体阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 的关系图，可以方便地确定实际工程中不同水流条件下任意大小绕流体所受水流阻力的大小。笔者曾经采用动量差值数值积分的方法确定了单一贴壁四面体框架的阻力大小^[12]，该阻力计算方法直接依赖于物理实验所量测的流场数据点的数量，并且由于四面体框架的特殊几何形状，使得 ADV 无法测量框架内部空间点上的流速，因而该方法的动量差值数值积分断面只能选择在框架体的尾流场中，并尽量靠近框架体，正如图 2 中选择在水槽横断面 I 上，这种近似处理降低了阻力大小计算精度。为提高阻力计算精度，通过 CFD 技术获得了四面体框架的三维流场信息，按如下的阻力计算一般表达式确定绕流体阻力^[14]。

$$F_D = F_f + F_p, F_f = \int_A \tau_0 \sin \alpha dA, F_p = - \int_A p \cos \alpha dA \quad (3)$$

式中 F_D 为绕流阻力，它由摩擦阻力 F_f 和压差阻力 F_p 两部分组成； τ_0 和 p 分别为物体表面微元面积 dA 上的切应力和压应力， A 为物体的总表面积； α 为物体表面上微元面积 dA 的法线与流速方向的夹角。量纲一的水力参数雷诺数 Re 和阻力系数 C_D 的定义分别为

$$Re = \frac{3Ua}{\nu}, C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} U^2 A_f} \quad (4)$$

式中 U 为水槽的断面平均流速； a 为四面体框架各支杆的截面边长； ρ 、 ν 分别为清水的密度和运动粘滞系数； A_f 为四面体框架的迎流面积，这里定义为 $4aL$ ，即 480 mm^2 。表 1 为分别由 CFD 技术 (表中的 6、7、8 列) 和动量差值数值积分方法得到 (表中第 9 列) 的两种工况下的绕流体阻力的对比，数学模型与物理模型的水力参数设置基本一致。

表 1 两种方法得到的绕流体阻力对比

Table 1 Compare of the drags got by the two different methods

组次	水槽流量 Q $/(m^3 \cdot \text{min}^{-1})$	水深 H $/m$	水的运动 粘滞系数 ν $/(10^{-6} m^2 \cdot s^{-1})$	Re	压差阻力 F_p (CFD) $/N$	摩擦阻力 F_f (CFD) $/N$	绕流阻力 F_D (CFD) $/N$	绕流阻力 F_D (ADV) $/N$
工况 1	0.3860	0.1242	0.695	3320.63	0.022415	0.0006016	0.023017	0.018824
工况 2	0.4160	0.0960	1.069	3010.12	0.047402	0.001044	0.048445	0.048390

从表 1 的阻力量级大小看: 通过 CFD 技术计算得到的结果与通过动量差值积分方法得到的结果大小相当。由于积分方法的计算断面选择在四面体框架参考点下游 1 cm 处, 该处流场略有恢复, 因此其 F_D 值较 CFD 方法略微偏小。其中计算所得的 F_i 远小于 F_p , 在 F_D 的近似计算中可以将其忽略, 该结论与一般的绕流体阻力大小组成比例一致。通过阻力特性的进一步分析, 再次验证该 CFD 模型已具备一定的计算精度。因此选择实际工程中四面体框架可能遇到的 Re 范围 (1 800 ~ 155 000), 通过修改 CFD 数值模型水力参数, 得到可供工程实际应用参考的 C_D 与 Re 的关系图 (图 11)。为便于显示, 横坐标采用对数坐标形式。随着 Re 的增加, C_D 值虽然在局部略微有波动, 但总体趋势是下降并趋向于一个特定值, 大小为 1.557。

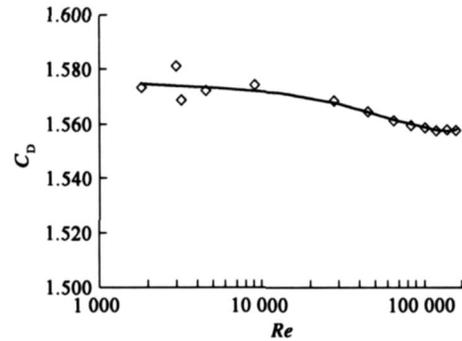


图 11 阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 的关系

Fig. 11 Drag coefficient C_D vs Re

3 结 论

利用 CFD 通用程序代码 Fluent 建立了单一贴壁四面体框架的数值模型, 计算得到了详细的绕流体流场信息, 研究表明: 四面体框架对流场的影响仅限制在其所在空间及其向下游延伸的一定距离之内。通过比较数值实验和物理实验所对应的流场特性和阻力系数大小, 验证该数学模型已具备一定的计算精度, 可以作为物理试验研究的有力补充和研讨工具。在此基础上, 本研究获得了不同工况下阻力系数 C_D 相对于 Re 的变化曲线, 曲线趋势表明, 当 $Re > 10^5$ 时, 单一贴壁四面体框架的阻力系数 C_D 为一常数值, 大小为 1.557。

参考文献:

- [1] 徐国宾. 黄河下游河道渠化治理 [J]. 泥沙研究, 2007 (1): 1-7. (XU Guo-bin. Canalized regulation of the lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2007 (1): 1-7. (in Chinese))
- [2] 徐国宾, 张耀哲. 混凝土四面六边透水框架群技术在河道整治、护岸及抢险中的应用 [J]. 天津大学学报, 2006, 39 (12): 1465-1469. (XU Guo-bin, ZHANG Yao-zhe. Application of tetrahedron-like concrete penetrating frames in river improvement, bank protection and emergency work [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39 (12): 1465-1469. (in Chinese))
- [3] 房世龙, 陈红, 王岗. 桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (4): 84-89. (FANG Shi-long, CHEN Hong, WANG Gang. Properties of protection engineering against local scouring around piers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (4): 84-89. (in Chinese))
- [4] 房世龙, 唐洪武, 周宜林, 等. 桥墩附近四面体透水框架抛投防冲效果试验研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17 (3): 354-358. (FANG Shi-long, TANG Hong-wu, ZHOU Yi-lin, et al. Experimental study on effect of local scour at piers and protection by tetrahedron frame [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (3): 354-358. (in Chinese))
- [5] 陈辉, 吴杰, 李益进, 等. 四面六边透水框架体抛投落距探讨 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37 (4): 446-449. (CHEN Hui, WU Jie, LI Yi-jin, et al. Throwing distance of permeable frames of tetrahedron with six side [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37 (4): 446-449. (in Chinese))
- [6] 李若华, 王少东, 曾甄. 穿越四面六边透水框架群的水流阻力特性试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2005 (10): 64-66. (LI Ruo-hua, WANG Shao-dong, ZENG Zhen. Experimental study on the resistance characteristic of water flow through the permeable frames of tetrahedron with six sides [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005 (10): 64-66. (in Chinese))
- [7] 徐锡荣, 刘刚, 徐松年, 等. 透水框架四面体防洪护岸试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (5): 65-68. (XU Xi-rong, LIU Gang, XU Song-nian, et al. Experimental study on flood control and bank protection by tetrahedron permeable frame [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, 27 (5): 65-68. (in Chinese))
- [8] 蒋成义, 吴春笃, 黄卫东, 等. 辐流式二沉池中异重流的计算流体力学模型研究 [J]. 水科学进展, 2007, 18 (6): 846-852.

- (JIANG Cheng-yi, WU Chun-du, HUANG Wei-dong, et al. Computational fluid dynamic model for density currents in activated sludge secondary clarifier[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 846-852. (in Chinese))
- [9] 焦爱萍, 刘沛清, 刘宪亮. 基于计算流体动力学的不同流量比两股射流水垫塘的消能特性研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 238-244. (JIAO Ai-ping, LIU Pei-qing, LIU Xian-liang. Study on energy dissipation of two-jet with varying discharge ratio on a plunge pool based on computational fluid dynamics[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 238-244. (in Chinese))
- [10] 李艳玲, 华国春, 张建民, 等. 多股水平淹没射流水力特性的影响因素研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 761-766. (LI Yan-ling, HUA Guo-chun, ZHANG Jian-min, et al. Factors affecting the hydraulic characteristics of horizontal submerged jets[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 761-766. (in Chinese))
- [11] Fluent Inc. FLUENT 6.2 User's Guide[CP]. Fluent Inc, 2005.
- [12] GAO Zhu, TANG Hong-wu, XIAO Yang, et al. Hydraulics of tetrahedron-like penetrating frame[C]// Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1827-1832.
- [13] 吴持恭. 水力学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2007. (WU Chi-gong. Hydraulics [M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese))
- [14] JOHN A R, CLAYTON T C. Engineering fluid mechanics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 1993.

Three dimensional numerical simulation of external flow field around tetrahedron frame with a single attached wall *

GAO Zhu¹, YIN Jie², TANG Hong-wu³, GUO Hong-min¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Tetrahedron Frame Groups (TFG) protection method, a new engineering measure to prevent bank erosion and promote sediment deposition, has been widely adopted in many river engineering practices in China. However, due to the unique geometric forms of TFG, it is difficult to measure the external flow in TFG, which limit further understanding about the mechanism of the TFG protection method. A three dimensional (3-D) hydrodynamic model is developed on the platform of the Computational Fluid Dynamics (CFD) platform fluent to simulate the external flow field and drag around the Tetrahedron Frame (TF) with a single attached wall in clear water environment. The simulation results are compared with the Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) experimental measurements. The result shows that the 3-D model can effectively supplement the experimental study of the complex flow fields, which provides valuable information for the mechanism study of the TFG protection method. Giving different values of hydraulic parameters, the diagram of drag coefficient C_D vs Reynolds number Re is obtained using the 3-D model. The diagram shows that the drag coefficient in TF with a single attached wall tends to be a constant value of 1.557 when the Reynolds number is larger than 10^5 .

Key words: tetrahedron frame; external flow; numerical simulation; drag; scour protection

* The study is financially supported by the Open Foundation of State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering (2009491111) and the National Natural Science Foundation of China (No. 50779028).