

VOF 模型在有支流汇入的河道复杂流场中的应用

张光碧,邓 军,张法星,杨 庆,朱迪生,王红强

(四川大学水利水电学院,四川 成都 610065)

摘要 采用 VOF 模型对大渡河与楠桧河交汇处的护堤工程区及其影响范围进行了三维数值模拟计算分析.结果表明 楠桧河与大渡河交汇口处的流态主要受大渡河流态的影响.护堤工程扩建后,断面平均流速在局部的增大,会增加对河岸的冲刷,因此在护堤建设过程中,应加强固岸措施.工程现场的原位试验观察与模拟计算结果吻合较好,加之工程多年来的安全运行,均说明 VOF 模型是一种处理复杂自由表面的有效方法,可在天然河道,特别是在有支流汇入的复杂河道流场研究中推广应用.

关键词 VOF 模型 支流汇入 数值模拟 河道复杂流场

中图分类号 TV135 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)05-0592-04

有支流汇入的河道具有几何边界不规则、地形条件和水力因素复杂等特点,采用何种模型模拟计算流速场一直是人们关注的问题,本文采用 VOF 模型对大渡河与楠桧河交汇口的护堤工程区及其影响范围进行了三维数值模拟研究.VOF 模型(Volume of Fluid)是 Hirt 等^[1]于 1981 年在研究压力容器流体自由液面时提出的适合于 2 种或多种互不穿透流体间界面追踪的计算方法,它克服了以往研究方法的不足,只用 1 个函数就能描述自由表面的各种复杂变化,目前越来越受到有关研究人员的重视.邓军等^[2]利用 VOF 模型对高水头泄洪洞水力特性进行了模拟计算.李志勤等^[3]采用 VOF 模型对黄河潘家台滩整治工程进行了模拟分析.孙大鹏等^[4]采用 0-1 混合型边界元法计算了三维波动水槽内的波浪变形.王志东等^[5]研究了 VOF 方法中自由液面的重构.有支流汇入的河道水流特性也引起人们的普遍关注.杨胜发等^[6]对支流入汇干流交界面进行了二维数值模拟.罗英相等^[7]对支流入汇与河口段航道水深的关系进行了分析.兰波等^[8]对干支流交换水面形态特征进行了试验研究,但有支流汇入的复杂边界条件的三维数值模拟研究却很少.

1 VOF 模型和数值求解

VOF 模型适用于 2 种或 2 种以上互不穿透流体间界面的跟踪计算.模型对每一相引入体积分数,通过求解每一控制单元内的体积分数值,确定相同界面.对于水气二相流,设 $\alpha_w(x, y, z, t)$ 和 $\alpha_a(x, y, z, t)$ 分别代表每个控制单元内水和气所占的体积分,在每个单元中有

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \tag{1}$$

对于某个计算单元而言,存在 3 种情况:(a) $\alpha_w = 1$,表示该单元完全被水充满;(b) $\alpha_w = 0$,表示该单元完全被气充满;(c) $0 < \alpha_w < 1$,表示该单元部分是水,部分是气,有水气交界面.显然,自由表面问题属于第 3 种情况.

VOF 模型采用三维 $k-\epsilon$ 紊流模型方程,基本控制方程如下.

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)] \tag{3}$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G - \rho\epsilon \tag{4}$$

式中 G 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项,表达式为

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{5}$$

ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{6}$$

式中: ρ, μ ——体积分数平均密度和分子黏性系数; P ——动水压力; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ —— k 和 ϵ 的紊流普朗特数; t ——时间; u_i, x_i ——速度分量和坐标分量, $i = 1, 2, 3$, 即 $\{x_i = x, y, z\}$, $\{u_i = u, v, w\}$; j ——求和下标; μ_t ——紊流黏性系数,可由紊动能 k 和紊动耗散率 ϵ 求出

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{7}$$

式中 C_μ 为经验常数.

控制方程中的常数值 $C_\mu = 0.09, C_k = 1.0, C_\epsilon = 1.3, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92$.

水的体积分数 α_w 的控制微分方程为

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \tag{8}$$

水气界面的跟踪即通过求解控制方程(8)来完成.

进口边界分为水流速度进口和空气速度进口,并给定初始进口速度 u 和 k, ϵ ,其中 k, ϵ 按经验公式给出

$$k = 0.0144 u^2 \quad \epsilon = \frac{k^{1.5}}{0.5 h}$$

式中 h 为计算起始断面的平均水深,紊动正应力为紊动能的 $1/3$,切应力为 0.出口边界划分为压力出口和质量出口,其中 k, ϵ 采用与进口相同的经验公式计算,则 u, h 为出口断面的流速和水深,并认为出口流动参数沿流向的梯度为零.自由水面按对称边界处理,固体边壁采用考虑边壁粗糙影响的壁函数法处理.

2 计算实例及网格划分

工程区位于大渡河与楠桧河交汇处,为一典型的有支流汇入的交叉河口,计算情况为 20 a 一遇洪水时天然和护岸工程扩建后河道流速场情况.工程扩建段长 205 m.

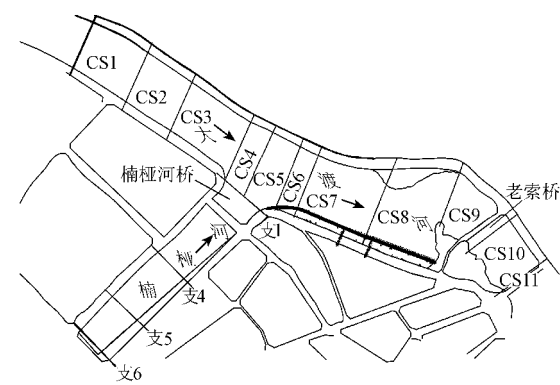


图 1 工程位置和计算剖面布置

Fig.1 Layout of project and computational profile

有支流汇入的交叉河口,采用 VOF 模型进行三维数值模拟计算时需给出干流和支流的进口及干流的出口边界条件.天然情况干流大渡河入口流量 $Q = 6180 \text{ m}^3/\text{s}$,水位为 861.30 m.支流楠桧河入口流量 $Q = 395 \text{ m}^3/\text{s}$,水位为 863.62 m.干流大渡河的出口流量 $Q = 6470 \text{ m}^3/\text{s}$,水位为 858.12 m.护堤工程修建后干流大渡河入口 $Q = 6180 \text{ m}^3/\text{s}$,水位为 861.30 m,支流楠桧河入口流量 $Q = 395 \text{ m}^3/\text{s}$,水位为 863.62 m.出口边界条件为大渡河干流出口边界条件, $Q = 6470 \text{ m}^3/\text{s}$,水位为 858.12 m.

固体边壁采用考虑糙率影响的壁函数法处理,在计算河段上游约 1 km

考虑到计算的进出口应选在不受工程扩建影响的河段,因此,对工程区上下游共计 2 000 m 范围采用 VOF 模型进行了 20 a 一遇洪水时该河段护堤工程修建前后的三维数值模拟计算.有支流入汇的河道,地形和水流条件均复杂,为了使干流河道与支流河道能耦合求解,在选取断面时要抓住支流入汇的特点,在交汇处布置较密的断面.本文计算的断面布置见图 1.采用非均匀网格,支流与干流交汇的重点部位加密网格,提高计算精度.网格垂直方向长约 0.5 m,沿水流方向约 5 m,横向约 2 m,网格单元总数为 270 000 多个.图 2 为工程及其影响区的三维立体图.

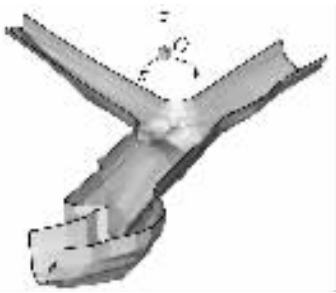


图 2 工程及其影响区三维立体
Fig.2 Three-dimensional stereogram of project and its influencing region

内有大渡河农场水文站实测糙率,集中在 0.032 ~ 0.052 范围内变化. 本文的推算是根据 1992 年实测洪水位,考虑到河床组成情况及断面形态,在现场逐一进行反演推求的情况下,将糙率集中在 0.030 ~ 0.045 之间. 糙率采用成果为大渡河干流 0.320 ~ 0.041,支流楠桧河为 0.350 ~ 0.043.

本文采用的数值离散方法为控制体积法(FVM). 为了避免压力场波动导致不正确的计算结果,网格划分采用交错网格法^[8],将模型中的各源项按负坡线性化原则进行处理,以保证数值求解的稳定性. 时间差分采用全隐式^[9],时间步长取为 0.001 ~ 0.005 s. 离散方程组的求解采用 ADI 法^[10],压力和速度的耦合采用 PISO 算法,计算网格点处变量 φ 值采用幂函数插值求得.

从图 3 可知,在天然情况下 20 a 一遇洪水流量时,由于楠桧河与大渡河交汇,且交角较大,在交汇处流态较乱,存在明显的漩涡及回流等. 楠桧河的流量很小,约为大渡河流量的 1/15,因此在大流量情况下,交汇口处的流态仍主要受大渡河流态的影响. 从图 4 可以看出,楠桧河的水流主要沿河道的右岸进入大渡河,而河流交汇后,流速在整个断面上分布都比较均匀,这也与文献[8]的结果相吻合. 河流交汇后,流速一般为 5 ~ 6 m/s,局部达 6 ~ 7 m/s,在右岸扩建工程末端附近流速略小,为 4 ~ 5 m/s.

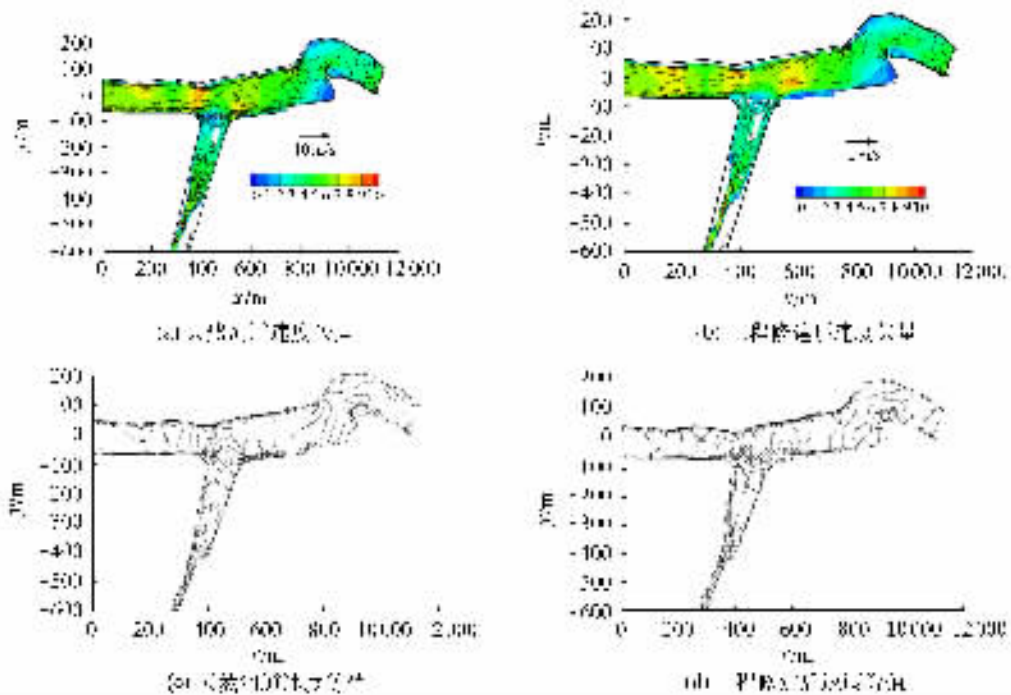


图 3 工程修建前后 20 a 一遇洪水水面计算流场

Fig.3 Calculated flow field of water surface for flood with recurrence interval 20 a before and after construction of project

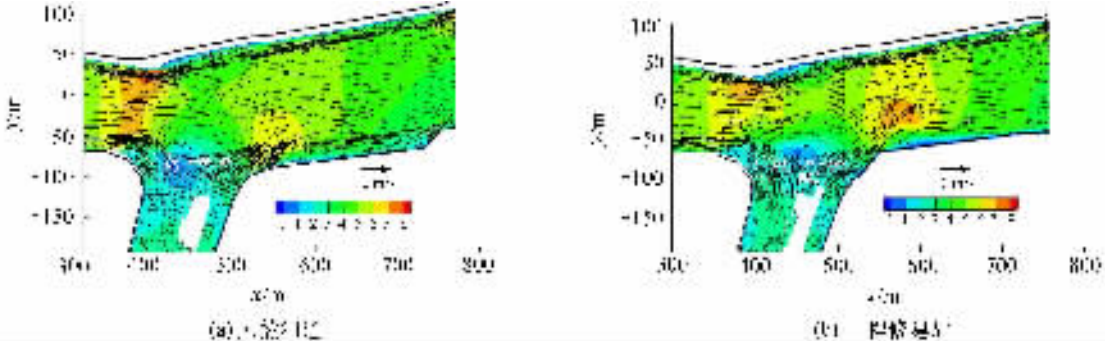


图 4 工程修建前后楠桧河与大渡河交汇处水面下 2 m 流场放大

Fig.4 Magnified flow field at 2 m under water surface at confluence of Nanyah River and Daduhe River before and after construction of project

从图 3 可知,护堤工程修建后流态与天然情况相比变化不大,楠桧河水流方向大部分倾向河心(图 4),使得楠桧河与大渡河交汇口的对岸遭到一定程度的顶冲,但基本未改变原主流的流向. 两河交汇口在扩建段工程末

端附近,断面流速明显增加,达 7~8 m/s. 在其余各计算断面的流速、流向工程修建前后基本没有变化,河势没有明显的改变. 模拟计算结果与现场原位试验观察情况吻合较好.

3 结 论

a. 采用 VOF 模型对楠桧河与大渡河交汇口附近的流场进行了数值模拟计算,结果表明:(a)由于楠桧河与大渡河交汇,且交角较大,在交汇处流态较乱,存在明显的漩涡及回流等. 楠桧河的流量很小,约为大渡河流量的 1/15,因此在大流量情况下,交汇口处的流态仍主要受大渡河流态的影响. 河流在交汇以后,流速在整个断面上分布都比较均匀,在护堤工程扩建后,断面平均流速在局部增大,增加了对河岸的冲刷. 因此在护堤建设过程中,应加强固岸措施,避免堤岸因水流冲刷而毁坏. (b) 护堤工程修建前后河势没有明显的改变. 计算结果和现场的原位试验观察结果吻合较好.

b. 对有支流汇入的复杂边界的河道,采用 VOF 模型模拟计算是恰当的,只要计算断面选取和网格划分能正确地反映河道的边界特征,就能较真实地反映实际情况. 因此,VOF 模型特别适用于有支流汇入等复杂河道流场的研究,可以在有支流汇入的复杂河道水流流场研究中推广应用.

参考文献:

[1] HIRT C W, NICHOLS B D. Computational method for free surface hydrodynamics[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, Transaction of the ASME, 1981, 103(2): 136-141.

[2] 邓军, 许唯临. 高水头岸边泄洪洞水力特性的数值模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1209-1218.

[3] 李志勤, 李嘉, 易文敏, 等. VOF 模拟在黄河潘家口滩整治工程中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(6): 18-23.

[4] 孙大鹏, 李玉成. 三维数值波动水槽波浪变形计算的 0-1 混合型边界法[J]. 水动力学研究进展, 1999, 14(4): 429-437.

[5] 王志东, 汪德. VOF 方法中自由液面重构的方法研究[J]. 水动力学研究进展: A 辑, 2003, 18(1): 52-56.

[6] 杨胜发, 赵志舟, 杨斌. 支流入汇干流交界面数值模拟[J]. 重庆交通学院学报, 2002, 21(2): 115-118.

[7] 罗英相, 罗远山. 支流入汇与河口段航道水深的关系[J]. 江西师范大学学报, 1992, 16(4): 380-384.

[8] 兰波, 汪勇. 干支流交换水面形态特征分析[J]. 重庆交通学院学报, 1997, 16(4): 109-114.

[9] 黄国鲜, 周建军, 陈界仁. 复杂边界下同位网格和交错网格水流模型收敛性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(6): 785-788.

[10] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flow[J]. Computer Methods in Appl Mechanics and Eng, 1974, 3: 269-289.

Application of VOF model to complex flow field
of river channel with branch afflux

ZHANG Guang-bi, DENG Jun, ZHANG Fa-xing, YANG Qing, ZHU Di-sheng, WANG Hong-qiang
(School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract VOF model was applied to 3D numerical simulation and calculation of the dike dam project at the confluence of Daduhe River and Nanyahe River and its influencing regions. The result shows that the flow pattern at the confluence is mainly affected by that of Daduhe River. After the extension of the dike dam project, the local mean flow velocity in the cross-section will increase, and the scouring against the river bank will intensify, therefore, the bank protection measures should be taken during the construction of the dike dam project. The agreement of the result of field experiments with that of calculation and long-term safe operation of the project demonstrates that VOF model is an effective method to deal with the complex free surface, and it can also be applied to study of natural river channels, especially the complex flow field of river channel with branch afflux.

Key words VOF model; branch afflux; numerical simulation; complex flow field of river channel