

苏州河河口水闸垂直二维流动精细数值模拟

王本龙¹,何刚强²,王瑟澜³,刘 桦¹

(1.上海交通大学船舶、海洋与建筑工程学院,上海 200030;2.上海市水务工程设计研究院,上海 200063;
3.上海市苏州河综合整治建设有限公司,上海 200002)

摘要 应用 FLUENT 对苏州河河口水闸的溢顶流动过程进行了数值模拟。计算结果表明,对正向挡水工况,闸门门顶较高时,过流流量较小,对下游床面冲击作用弱。当苏州河外侧水位为低水位时,形成的回流区中心较低,形成较大的床面流速,对底面护坦的冲击较强。与正向挡内河水工况相比,反向挡潮时,溢顶水流对内河侧河床的冲刷较弱。当内河侧水位降低时,溢流对床面的冲刷作用增强。正向挡水工况时,作用在水闸上的力矩为正值(顺时针方向),反向挡潮时,作用在水闸上的力矩为负值(逆时针方向)。

关键词 苏州河河口水闸 溢顶流 垂直二维模型 VOF 数值模拟

中图分类号 :TV66 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)S1-0048-04

苏州河河口水闸工程位于上海市金山路苏州河河口,是上海市水利工程建设总体规划的重要组成部分。由于工程区位于苏州河河口,与黄浦江相连,属感潮河段,所以完全可以采取工程措施,依据潮位变化规律,实现苏州河的调水要求。建设具有双向挡水功能的苏州河水闸将是一种科学、可行的工程方案。建成后的苏州河河口水闸既可为提高苏州河水位、改善水质和景观提供有效的服务,又可在发生内涝时,从闸门顶上排泄苏州河河水,降低市区(特别是苏州河沿岸)的防汛压力。

水闸宽 100 m,其边墩、底板均为预制的沉箱结构,钢板桩防渗,基础为预制打入桩,门型为液压水下卧倒门。不同运行工况下,苏州河水闸的局部流动属复杂流动的范畴,如在正向挡水过流跌水时,不仅要考虑自由水面的影响,而且还出现掺气现象。深入认识典型运行工况下水闸附近的复杂流态、护坦近底部的最大流速及闸门上水动力载荷的分布规律,对工程设计具有重要的意义。

随着计算流体力学技术的不断发展,应用 CFD 技术解决实际工程问题已得到广泛的关注。例如,在 FLUENT 平台上,周勤俊等^[1]和张九山等^[2]进行了二次开发,建立了数值波浪水槽,用于研究波浪与海堤的相互作用问题。

本项目采用基于 RANS 方程和湍流模型的流动精

细数值模拟技术(FLUENT 商业化软件)进行系统的计算分析,为苏州河水闸工程的设计提供科学依据。

1 基本方程

VOF 模型是应用于欧拉网格系跟踪自由表面常用的技术。在该模型中连续方程由描述 VOF 输运的方程代替:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_q = 0 \tag{1}$$

$$\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \tag{2}$$

式中: α_q 表征 VOF 函数;下标 1 代表空气,下标 2 代表水,例如 $\rho_1 = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\rho_2 = 998 \text{ kg/m}^3$ 。每一个有限体内的密度由式(3)计算:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \tag{3}$$

在整个计算域动量方程可表达为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} \tag{4}$$

包含两种流体的控制体边界通量的计算是决定 VOF 模型的一个关键因素,这里采用几何重建方法。该方法假定在界面网格内分界面是线性函数,通过守恒关系确定该线性函数的方程,然后计算边界通量。

在湍流数值模拟中有许多种湍流模型可供选择,如 Apalart-Allmaras 模型、 $k-\epsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、

2 正向挡内河水消能防冲计算分析

2.1 计算工况

水闸金属结构设计考虑门顶限位在 3.5 m 高程,在 3.5 m 至外河最低水位不设限位。当内河水位超过 3.5 m,门顶可以自动溢流,需要时开门排水。当水位差较大时,门顶泄流可能对下游护坦有较强的冲击。此外,由于闸门附近的复杂流动,如何计算作用在闸门上的水动力载荷也是结构设计的重要问题之一。用于计算的典型工况见表 1。

表 1 外河侧消能防冲及排水效果设计水位组合 m

工况	门顶高程	内河水位	外河水位
I-1	3.0	3.5	1.29
I-2	2.5	3.5	2.00
I-3	2.5	3.5	1.29
I-4	2.0	3.5	1.29
I-5	1.5	3.5	1.29
I-6	1.0	3.5	1.29

2.2 计算模型的建立

水闸的厚度为 1.3 m,长度为 9.53 m。取闸门旋转轴 $O(0,-2.15)$ 为参考点,计算范围分别向上游和下游取 50 m 和 70 m,底板高程为 -1.5 m,护坦及底面地形按设计图纸确定,见图 1。



图 1 计算域

采用四边形网格剖分,计算域网格最大尺度为 $5.0\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ (长 $\times$ 高),在闸门附近,即计算域中部 $x = -15\text{ m}$ 到 $x = 25\text{ m}$ 间,进行网格局部加密,网格尺度在 $0.08\text{ m} \times 0.08\text{ m}$ 的量阶。

为了分析闸门上所受到的压力以及相应的矩,输出闸门表面的压力。另外为了研究水流对底面护坦的冲刷,底面的速度分布也是需要考虑的。闸门左侧取 $(-15.0,-1.85)$ 到 $(-0.65,-1.85)$,右侧取 $(7.5,-3.3)$ 到 $(16.6,-2.0)$ 间的底面输出速度的分布,如图 2 中粗线所示。



图 2 输出结果位置标识

初始条件分别给定计算域内内河侧和外河侧水位,速度为零。由于计算域足够大,流动上游入口按静压假定给出压力边界条件,流动下游为自由出流

边界。计算域上部为恒定大气压,亦按对称边界处理。所有固壁按对称边界条件处理。

在这种初始和边界条件下,采用非定常计算需要一定时间的调整,才能形成准稳态的流动。由于闸门附近的流动出现水体的掺气和水面波动,不能达到严格意义上的定常流,因此在计算过程中要对是否达到稳态流动进行判断,采取记录采样点压强的时间过程线和床面速度的时间-空间分布为判断依据,在计算进入准稳态阶段后才停止计算,输出计算结果。

对于实际流动,当上下游水位差达到一定值之后,会出现掺气现象,因此需要人为保证下泻水流两侧为实际大气流动。通过在闸门顶端下部开若干小孔的办法来达到该目的,见图 3,图中粗体线段标识为开孔段,长度为 4 个网格。数值计算结果表明这种处理方法是合理有效的。

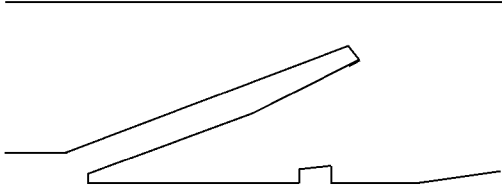


图 3 掺气小孔示意图

沿闸门径向上下表面均匀取 5 等分点采集压力过程(所有显示结果采用相同采样点)。轴向矩由表面正向压力对旋转轴 O 积分所得。规定顺时针方向矩为正,逆时针方向矩为负。在本报告中用标准大气压对闸门表面压强分布进行无量纲化, $P_0 = 101\,325\text{ Pa}$, $C_p = (P - P_0)/P_0$,表面压力系数分布坐标定义为以闸门轴为起点,先沿闸门上表面按顺时针转到闸门下表面。

由于利用非定常流动计算模拟实际工况,应当使计算达到稳态后才能得到有实际意义的计算结果。为了评判流场计算是否达到稳态,给出了河床表面速度的时间-空间分布,计算结果表明水闸下游形成稳态流动后,近底部床面速度近似达到稳定,并呈现小幅度的周期性变化。在所有的计算过程中,都保证了在达到稳态后输出计算结果,力求计算结果准确。

2.3 计算结果

图 4 给出了正向挡水工况一(I-1)条件下溢顶流动过程的计算结果。从图中可以看出,溢顶水流形成瀑布,在口外水域形成剧烈的水面掺气和波动现象。图 5 和图 6 分别为该工况条件下水闸上游(左侧)和下游(右侧)的近床面流速值的沿程分布。

表 2 给出了挡水溢流 6 种工况下水闸下游底面最大流速的大小和出现的位置。计算结果表明,闸门门顶较高时,过流高度(流量)较小,对下游床面冲击作用弱。闸门门顶较低时,溢流水体流动方向与



图4 工况 I-1 自由水面形状与掺气现象
($t = 8.757\text{ s}$, VOF 函数空间分布 α_2)

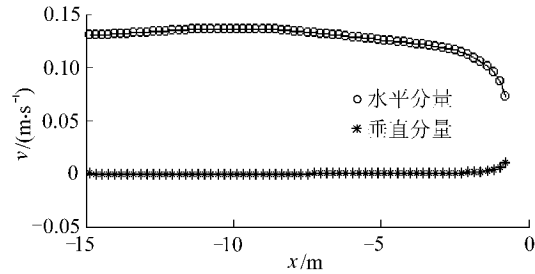


图5 工况 I-1 稳定阶段闸门上游床面瞬时流速分布

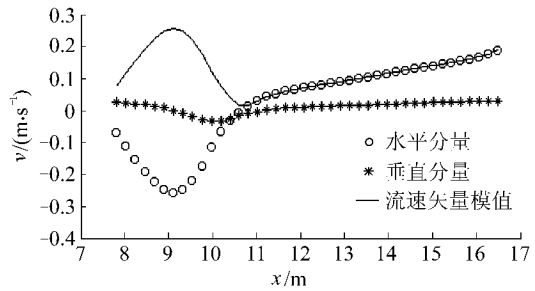


图6 工况 I-1 稳定阶段闸门下游床面瞬时流速分布
表2 下游床面速度比较

工况	最大速度值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大速度位置(x 坐标)/m
I-1	0.26	9.11
I-2	0.36	16.32
I-3	0.41	16.33
I-4	1.04	11.26
I-5	2.41	12.16
I-6	1.58	12.34

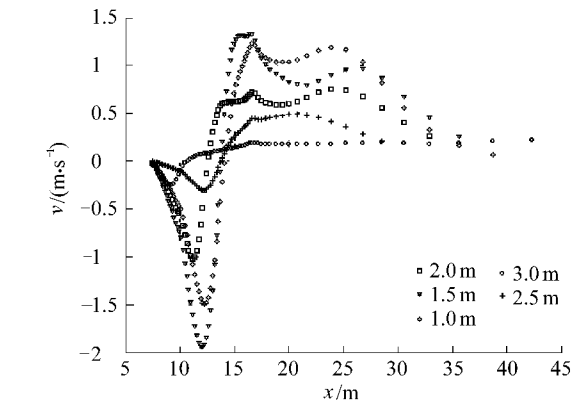


图7 苏州河外侧河床流速大小分布
(内河侧水位3.5 m, 外河侧水位 1.29 m, 闸门门顶高度从 3.0 m 以 0.5 m 间隔递减至 1.0 m)

水平方向夹角小, 静止水体的消能作用距离长, 最大流速点下移, 见图 7。比较工况 I-1, I-4, I-5, I-6, 最大速度位于下泻水流的回流区, 下泻水流的前冲作用也很强烈, 而工况 I-2, I-3 最大速度则出现在下泻水流的前冲区。

对比工况 I-2 和工况 I-3 的流速矢量图, 可以明显看出当苏州河外侧水位为低水位时, 形成的回流区中心较低, 形成较大的床面流速, 对床面的冲刷作用较强。图 8 给出了这两种工况下床面流速大小的分布。

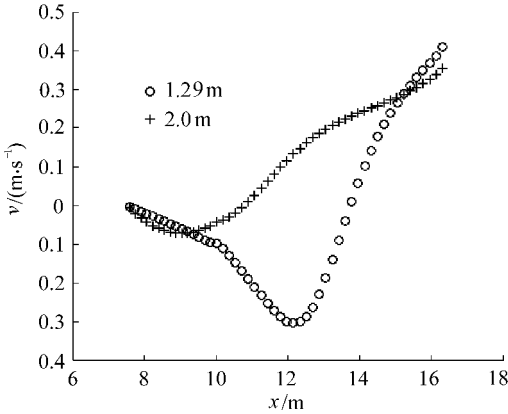


图8 苏州河外侧河床流速大小分布(内河侧水位3.5 m, 闸门门顶 2.5 m, 外河水位分别为 2.0 m 和 1.29 m)

表 3 给出了正向挡水时作用在闸门上的力矩与闸门开启角的关系。比较工况 I-1, I-3, I-4, I-5, I-6, 可发现在闸门两侧水位差相同的情况下, 随着闸门开启角的减小, 作用在闸门上的力矩呈减小的趋势。需特别指出的是, 当闸门顶高程为 1.0 m 时(工况 I-6), 作用在闸门的力矩为负值, 是逆时针的, 其因为在闸门下游形成了强大的旋涡, 导致闸门下表面的压力增大。

表3 正向挡水时单宽闸门的力矩 $10^5\text{ N}\cdot\text{m}$

工况	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6
压力矩	3.0~3.8	0.2~0.3	2.2~2.8	0.8~1.0	0~0.2	-1.2~-1.3

3 反向挡潮消能防冲模拟

3.1 计算工况

反向挡潮是苏州河河口水闸的另一个基本功能。本次数值模拟的工况见表 4。

表4 内河侧消能防冲及排水效果设计水位组合 m

工况	门顶高程	外河水位	内河水位
I-1	2.5	3.5	3.0
I-2	2.5	3.5	2.5
I-3	3.5	4.0	3.5
I-4	3.5	4.0	2.8
I-5	3.5	4.0	2.5

3.2 计算结果

图 9 为反向挡水工况二(II -2)条件下自苏州河口外水体溢顶进入闸内水域的流场图。可以看出,在水闸上部形成大流速区,水面变化剧烈。图 10 为近底部流速的沿程分布。表 5 给出了水闸内侧近底部流速最大值的比较。

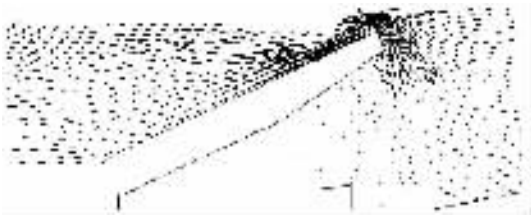
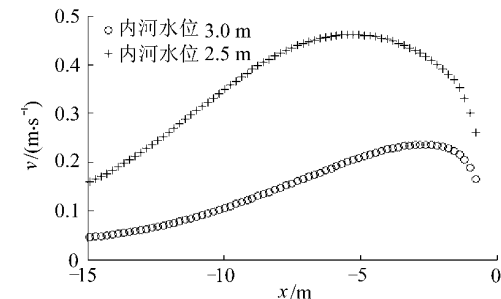
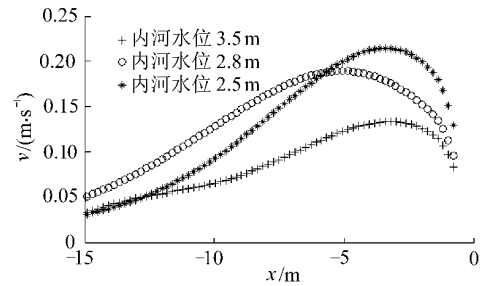


图 9 工况 II -2 流速矢量图($t = 4.118\text{ s}$)



(a)门顶2.5 m,外河水位3.5 m



(b)门顶3.5 m,外河水位4.0 m

图 10 内河侧河床速度分布比较
表 5 内河侧床面速度比较

工况	最大速度值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大速度位置(x 坐标)/m
II -1	0.24	- 2.80
II -2	0.46	- 5.26
II -3	0.13	- 3.21
II -4	0.19	- 5.06
II -5	0.21	- 3.42

总之,与正向挡内河水工况相比,反向挡潮时,溢顶水流对内河侧河床的冲刷较弱。当内河侧水位较低时,溢流对床面的冲刷作用较强。

表 6 为水闸受到的力矩计算结果,可以看出反向挡水时水闸受到的力矩为负值,即逆时针方向,且闸门两侧水位差越大时作用在闸门上的力矩的绝对值也越大。

表 6 反向挡水时单宽闸门的力矩 $10^5\text{N}\cdot\text{m}$				
工况	II -1	II -2	II -3	II -4
压力矩	- 6.0	- 7.0	- 6.1	- 9.0

4 结 论

a. 正向挡水工况,闸门门顶较高时,过流流量较小,对下游床面冲击作用弱。随着闸门门顶高程降低,溢流水体流动方向与水平方向夹角减小,在闸门下形成强劲的旋涡,最大流速点下移,最大流速一般不会超过 3.0 m/s 。当苏州河外侧水位为低水位时,形成的回流区中心较低,形成较大的床面流速,对底面护坦的冲击较强。

b. 与正向挡内河水工况相比,反向挡潮时,溢顶水流对内河侧河床的冲刷较弱。当内河侧水位降低时,溢流对床面的冲刷作用增强。

c. 正向挡水工况时,作用在水闸上的力矩为正值(顺时针方向)。反向挡潮时,作用在水闸上的力矩为负值(逆时针方向)。

参考文献 :

[1]周勤俊,王本龙,兰雅梅,等.海堤越浪的数值模拟[J].力学季刊,2005(4):629-633.
[2]张九山.带人工块体的海堤越浪数值模拟[D].上海:上海交通大学,2006.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 熊水斌)

· 简讯 ·

第三届亚洲非饱和土学术会议在南京召开

第三届亚洲非饱和学术会议于 2007 年 4 月 21 ~ 23 日在河海大学召开。本届会议是在国际土力学与岩土工程协会(ISSMGE)非饱和土专业委员会(TC6)的支持下召开的,是继在新加坡(2000 年)和日本大阪(2003 年)举办的第一与第二届亚洲非饱和土学术会议(UNSAT ASIA)后非饱和土研究领域的又一次盛会。来自 20 多个国家和地区的 100 余名专家学者参加了大会。会议有主题报告 3 个,邀请报告 6 个。与会代表围绕着非饱和土基本特性、测试技术与现场监测、膨胀土与黄土等特殊土、边坡稳定、废弃物处置与污染物扩散等方面进行了广泛的学术交流和讨论,共交流学术论文 80 余篇。会议交流结束后,代表们还参观了河海大学、南京水利科学研究所的岩土工程实验室及南京水利科学研究所铁心桥实验基地。经过 TC6 委员会讨论,下一届亚洲非饱和土学术大会将在澳大利亚纽卡斯尔大学召开。

(本刊编辑部供稿)