

开潭水利枢纽河道行洪影响分析

包中进¹,张才夫²

(1.浙江省水利河口研究院,浙江 杭州 310020;2.浙江水利水电专科学校,浙江 杭州 310018)

摘要 采用无结构网格的有限体积法二维数学模型,模拟浙江省丽水市开潭水利枢纽工程建设对上游铁路大桥行洪的影响。根据河流的特点,采用四边形和三角形混合网格剖分,并耦合过闸的水力计算,对方程联立求解。结果表明该模型能较好地模拟河道的水流特性和涉水工程建设后的影响,成果为管理部门决策提供了依据。

关键词 泄洪闸 数学模型 洪水位 开潭水利枢纽

中图分类号 :TV87 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2008)01-0050-04

Influence analysis of river channel flood discharge of Kaitan Hydro Project//BAO Zhong-jin¹, ZHANG Cai-fu²(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China ; 2. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018, China)

Abstract :The two-dimensional mathematical model for the finite volume method on unstructured meshes was used for simulating the influence of flood discharge by the Kaitan Hydro Project on the upper railway bridge. According to the characteristics of rivers, the triangular and quadrangular hybrid meshes were employed for hydraulic calculation of lockage water flow. The calculated results by solving the simultaneous equations show that the model can effectively simulate the water flow characteristics and the effects of hydraulic structures and provide a basis for management departments to make decisions.

Key words :flood discharge gate ; mathematical model ; flood water level ; Kaitan Hydro Project

浙江省的水利电力资源经过多年的开发,河道上游坝址条件较好、利用高水头发电、经济指标较好的坝后式或混合式水电站项目建设已经基本开发完毕。因此,开发的重点开始向河道中游低水头、大流量河床式电站项目转移,越来越多的梯级开发河床式电站项目提上了建设日程,在确定枢纽布置和规模时,需要经常进行防洪影响评价工作。而防洪评价的基础工作之一是进行数学模型计算分析或物理模型试验研究,分析工程建成后对上游河道的壅水影响和河道冲淤变化等。本文结合开潭水电站建设对上游3.0 km处铁路特大桥行洪的影响研究,介绍二维数学模型的应用情况。

开潭水利枢纽为浙江省重点水利工程^[1],位于丽水市境内瓯江干流大溪上,坝址在丽水市区东南约 7 km 处的开潭村下游。电站总装机容量为 3 × 16 MW,多年平均发电量为 13 161 万 kW·h。枢纽建筑物主要由泄洪闸、船闸、发电厂房和升压站组成。泄洪闸总净宽为 216 m,共有 18 孔,每孔净宽 12 m。泄洪闸按 50 年一遇洪水设计,200 年一遇洪水校核。水电站上游 3.0 km 处为金温铁路大溪特大桥。

大桥全长 546.85 m,按照 100 年一遇洪水设计。

1 数学模型原理

1.1 控制方程

二维非恒定流的控制方程^[2-3]为浅水方程,即

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Hu}{\partial t} + \frac{\partial Hu^2}{\partial x} + \frac{\partial Huw}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} - fvH + \\ g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} = E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Hv}{\partial t} + \frac{\partial Huw}{\partial x} + \frac{\partial Hv^2}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} + fuH + \\ g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} = E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \end{aligned} \tag{3}$$

式中:ζ 为水位;H 为水深;u,v 分别为 x,y 方向的流速分量;f 为哥氏力系数;C 为 Chezy 系数;E_x,E_y 分别为 x,y 方向的虚拟黏性系数;g 为重力加速度。

式(1)~(3)可以写成如下守恒形式:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (4)$$

式中: $q = [\zeta \ H_u \ H_v]^T$; $f(q) = [H_u \ H_u^2 + gH^2/2 \ H_{uv}]^T$ 代表沿 x 方向的通量; $g(q) = [H_u \ H_{uv} \ H_v^2 + gH^2/2]^T$ 代表沿 y 方向的通量。

1.2 有限体积法离散的基本原理

有限体积法的基本原理^[4]是将计算区域分割成四边形、三角形或四边形与三角形的混合区域,称为单元。单元的角点称之为结点。将式(4)在每个单元上积分,得出离散方程,再数值求解。

定义矩阵 $F(q) = [f(q) \ g(q)]^T$ 。在单元 Ω 上对式(4)进行积分:

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial q}{\partial t} d\Omega + \iint_{\Omega} F(q) d\Omega = \iint_{\Omega} b(q) d\Omega \quad (5)$$

根据 Green 积分定理,式(5)可以写成

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial q}{\partial t} d\Omega = - \int_S F(q) n dl + \iint_{\Omega} b(q) d\Omega \quad (6)$$

式中: S 为单元 Ω 的边界; n 为 S 的外单元法向矢量; $F(q) n$ 为通过边界 S 的外向通量。

参考文献[3],无结构网格有限体积法离散得到的基本方程:

$$A \frac{\partial q}{\partial t} = - \sum_{j=1}^m T(\alpha)^{-1} f(\bar{q}) L_j + Ab(q) \quad (7)$$

式中: A 为单元 Ω 的面积; $T(\alpha)$ 为坐标转化矩阵; L_j 为单元边 j 的长度。

1.3 边界条件

1.3.1 开边界条件

考虑缓流流动,假定在边界处 q_L 是区域内的已知解, q_R 是边界处的未知解。

a. 水位给定: 下游水位已经给定,则 H_R 已知, u_R 可用黎曼不变量关系求出。

$$u_R = u_L + 2\sqrt{g}(\sqrt{H_L} - \sqrt{H_R}) \quad (8)$$

b. 单宽流量:

$$q_R = u_R H_R \quad (9)$$

1.3.2 陆地边界

$$u_R = -u_L \quad H_R = H_L \quad (10)$$

1.3.3 内部闸门边界条件

闸门按内部边界条件处理,分全开启自由出流、全开启淹没出流、局部开启自由出流和局部开启淹没出流4种情况:

闸门全开启自由出流

$$Q_g = C B_g H_e^{3/2} \quad (11)$$

闸门全开启淹没出流

$$Q_g = C_s B_g h \sqrt{2g\Delta H} \quad (12)$$

闸门局部开启自由出流

$$Q_g = C_g B_g G_o \sqrt{2gH_g} \quad (13)$$

闸门局部开启淹没出流

$$Q_g = C_{gs} B_g G_o h \sqrt{2g\Delta H} \quad (14)$$

式中: C 为闸门全开启自由出流流量系数; C_s 为闸门全开启淹没出流流量系数; C_g 为闸门局部开启自由出流流量系数; C_{gs} 为闸门局部开启淹没出流流量系数; B_g 为闸孔净宽; H_e 为闸底堰上水头; h 为闸下游水位与闸底堰的高差; $H_g = H_e - G_o/2$; $\Delta H = H_e - h$ 。

2 模型的建立

2.1 边界条件

a. 上边界。根据河道走势以及工程布设,模型上边界位于泄洪闸上游4000m处,取流量边界。

b. 下边界。根据观测资料以及河道走势,模型下边界为水位边界,位于泄洪闸下游1000m处。

2.2 网格划分

为了考虑桥墩的尺寸及其对水流流态的影响,模型在划分网格时将桥墩附近的网格划分为三角形网格,闸室以及其他地方均为四边形网格,共计成网格单元4933个,节点5609个。其中,流量边界单元8个,出口水位边界单元18个。网格划分见图1和图2。

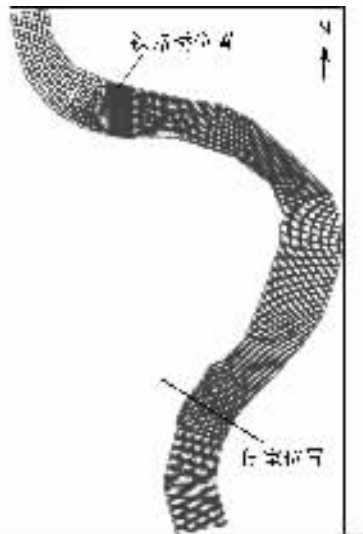


图1 整体区域网格布置

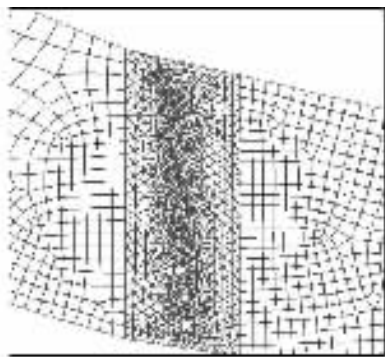


图2 大桥附近局部网格布置

2.3 模型验证

利用 1982 年 8 月 31 日以及 1994 年 6 月 17 日的两场洪水资料对该计算模型进行了验证,计算误差在 0.10 m 以内,主槽率定糙率为 0.022,滩地率定糙率为 0.035。

模型经过率定和验证后,达到满意精度,可以应用在河道行洪影响分析中。

3 计算成果

3.1 计算方案

为了对比工程实施前后对上游河道行洪能力的影响,数学模型对现状和工程后 4 种频率设计洪水进行计算,计算方案见表 1。

表 1 工程实施前后计算方案

方案		洪水频率 $P/\%$	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	下游水位/ m
工程前	工程后			
1	5	20	8 380	48.03
2	6	2(设计工况)	13 857	51.00
3	7	1(大桥设计工况)	15 300	51.58
4	8	0.5(校核工况)	16 700	52.02

注 方案 1~4 为现状地形,方案 5~8 为工程后地形。

3.2 计算成果分析

3.2.1 建闸对洪水水位的影响

4 种洪水工况的沿程水面线如图 3 所示,图中距离 0 m 处即为闸轴线位置。从图 3 中可以看出,由于闸室的阻水作用,闸前 200 m 范围内水位普遍壅高,但闸室上游 450 m 以上的河道水面线普遍下降到现状以下,并且同现状相比变化不大。在大桥下游附近,建闸后的洪水位比建闸前普遍下降 1~3 cm。大桥附近洪水水位变化的等值线见图 4 和图 5。

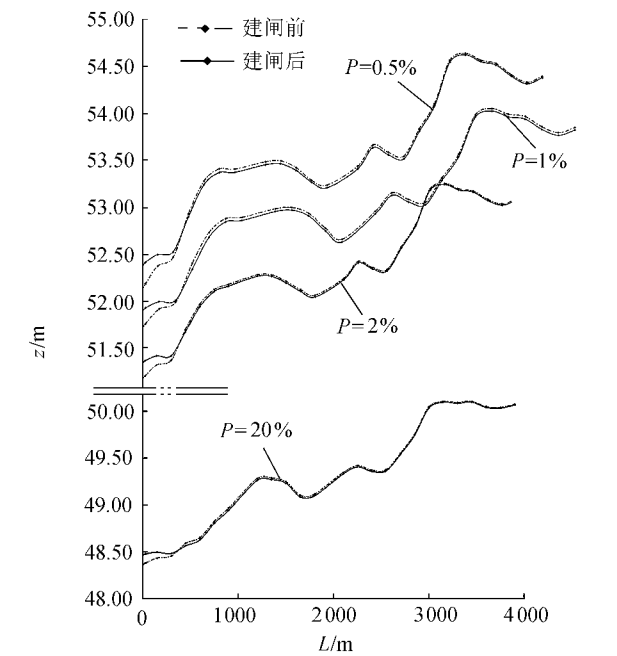


图 3 各工况沿程水面线

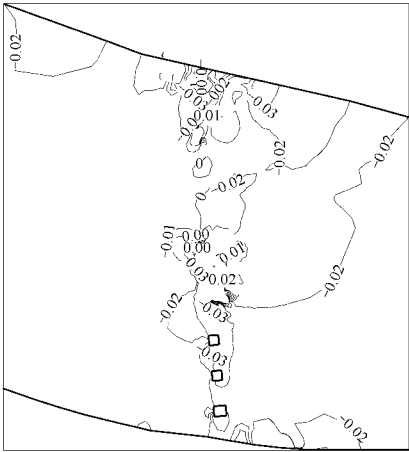


图 4 $P=0.5\%$ 水位变化等值线

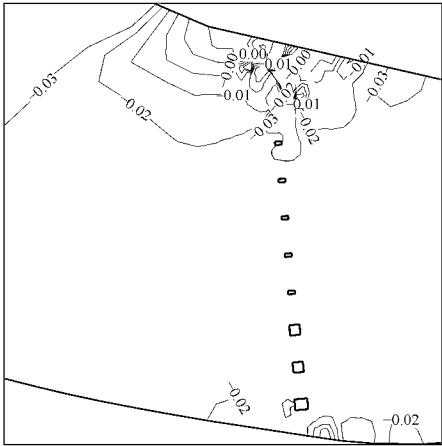


图 5 $P=1\%$ 水位变化等值线

3.2.2 建闸对流速分布的影响

大桥附近流场、流速变化等值线如图 6~9 所示,各工况流态均相似。

从图 6~9 中可见,建闸后大桥附近的流场没有实质性的变化,流速变化普遍在 1% 以下。从桥前 20 m、桥前 50 m 和桥后 50 m 这 3 个断面的流速分布来看(表 2),流速、流向均没有什么变化。其余工况结果相似。另外,从定性角度来看,工程后小流量运行时,闸门不是全开运行,大桥附近的洪水位将抬高,导致流速减小,有利于大桥附近河床本身的防冲。

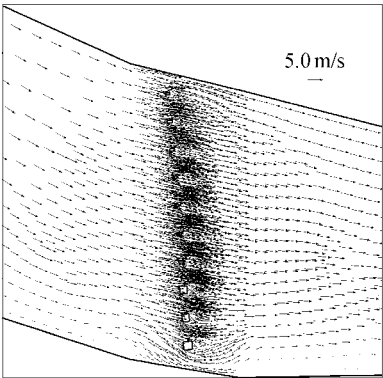


图 6 $P=1\%$ 建闸后大桥附近流场

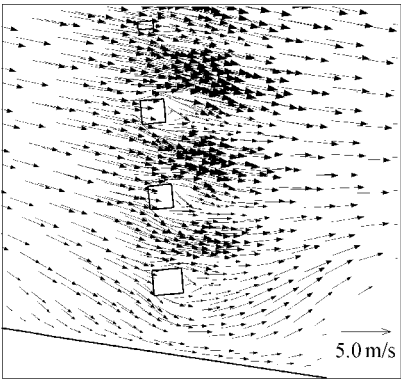


图 7 $P = 2\%$ 建闸后大桥附近流场



图 8 $P = 2\%$ 洪水流速变化等值线

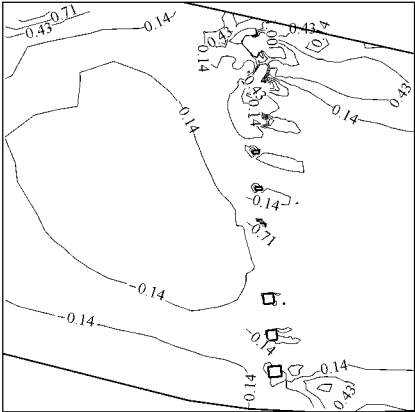


图 9 $P = 1\%$ 洪水流速变化等值线

4 结 语

根据河流的特点,本文采用了较为符合实际的四边形和三角形混合网格剖分,并耦合过闸的水力计算,对方程联立求解。计算结果表明,建闸后壅水影响主要在闸上 450 m 范围内;大桥附近的洪水位将降低 1.0~3.0 cm,流速变化在 1% 以内,流向基本没有变化。洪水期行洪时,开潭水利枢纽的建设对大桥附近流场的影响非常小,不会对大桥附近河道的行洪造成不利影响。

表 2 $P = 1\%$ 建闸前后大桥上下游断面流速分布

工 况	水 平 位 置	桥前 50 m		桥前 20 m		桥后 50 m	
		流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^{\circ}$)	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^{\circ}$)	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^{\circ}$)
建 闸 前	左	1.852	339	1.521	348	1.691	348
		2.717	339	2.205	343	1.960	348
		3.156	338	2.734	340	2.384	348
		3.508	338	3.467	340	3.212	348
		3.659	339	3.820	339	3.487	349
		3.626	340	3.708	340	3.777	350
	中	3.516	341	3.703	342	3.946	350
		3.289	343	3.549	344	4.047	352
		3.216	345	3.523	347	4.069	353
		3.136	347	3.442	351	3.940	354
		3.029	349	3.284	354	3.410	354
		2.965	350	3.385	351	3.160	357
	右	3.148	349	3.520	350	2.860	360
		3.947	348	4.124	347	2.977	2
		3.353	348	3.137	342	2.841	360
建 闸 后	左	1.854	339	1.522	348	1.696	348
		2.720	339	2.213	343	1.973	348
		3.157	338	2.735	340	2.390	348
		3.505	338	3.472	340	3.212	348
		3.653	339	3.824	339	3.485	349
		3.618	340	3.708	340	3.774	350
	中	3.508	341	3.702	342	3.943	350
		3.282	343	3.542	344	4.042	352
		3.209	345	3.518	347	4.064	353
		3.134	347	3.434	351	3.936	354
		3.029	349	3.280	354	3.410	354
		2.962	350	3.381	351	3.159	357
	右	3.146	349	3.519	350	2.863	360
		3.953	348	4.128	347	2.986	2
		3.363	348	3.143	342	2.856	360

参考文献：

[1] 包中进.开潭水利枢纽对金温铁路大溪特大桥行洪流场的影响分析报告[R].杭州:浙江省水利河口研究院,2004.

[2] 包中进,周杰.曹娥江大闸导流堤方案水力学数值模拟[J].水动力学研究与进展,2004,19(增刊):948-953.

[3] 汪德.计算水力学(理论与应用)[M].南京:河海大学出版社,1990:165-167.

[4] OSHER S, SOLOMONE F. Upwind difference scheme for hyperbolic systems of conservation laws [J]. Mathematical Computation,1982,38:339-374.

(收稿日期 2007-02-27 编辑 方字形)

