

# 青白江铁路大桥防洪评价数值模拟研究

金 瑞<sup>1</sup>, 张绪进<sup>2</sup>, 彭永勤<sup>2</sup>

(1 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

**摘要:** 建立了二维水流数学模型, 对青白江铁路大桥进行可行性分析。比较了工程建设前后桥区水域条件变化情况; 分析了桥墩周围流速、水面线变化对桥墩的冲刷作用; 论证了铁路桥工程可行性, 为该工程的实施提供技术支持。

**关 键 词:** 二维水流数学模型; 有限元法; 防洪

中图分类号: U 661

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)04-0510-04

## Numerical Simulation and Analysis of Flood Assessment of the Qingbaijiang Railway Bridge

JIN Rui<sup>1</sup>, ZHANG Xu-jin<sup>2</sup>, PENG Yong-qin<sup>2</sup>

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2. Southwest Research Institute of Water Transport Engineering, Chongqing 400016, China)

**Abstract** Two dimensional mathematical model of water flow was used to conduct feasibility study on the Qingbaijiang railway bridge. By comparing water condition changes before and after the bridge construction, the scouring impact of velocity around bridge piers and change of water surface line on piers was investigated. The feasibility of railway bridge provided technical support for the implementation of the project.

**Key words** planar 2-D water mathematical model; finite element method; flood control

拟建的成都至都江堰铁路彭州支线是连接成都主城区—彭州的快速铁路客运通道, 其线路位于四川省成都市和彭州市境内, 是一条以服务城际客流为主、兼顾地方沿线客流的快速客运专线铁路。彭州市位于成都市北部, 距成都 19 km, 素有“天府金盆宝地”“天府金彭”“蜀中膏腴之地”等美称。“5·12”汶川大地震后, 彭州作为重灾区之一, 迫切需要一条快速轨道交通, 以加强对外的通道连接, 带动地区的经济重建, 加快实现灾后重建<sup>[1]</sup>。该铁路的建设还将大幅提升区域旅游资源开发的力度, 推进川西地区旅游业的持续快速发展, 打造世界级最佳旅游地, 提高成都市及彭州市的整体竞争优势。

笔者针对青白江大桥行洪问题, 采用资料整理分析和工程河段二维水流数学模型相结合的方法进行研究。数学模型采用有限元方法, 对铁路桥以及其以下 300 m 处的高速公路桥进行精细离散, 主要研究工程修建后对河道的影

## 1 工程河段概况

青白江大桥位于彭州市太清镇境内的青白江上, 该段河道较为顺直, 河道断面呈宽浅式的梯形,

河床受前几年无序采砂影响滩沱相间, 两岸均有混凝土面板堤防, 建于 20 世纪 80 年代后期, 防洪标准不高。

青白江为沱江二级支流, 水源来自岷江, 上段为蒲阳河, 通过都江堰枢纽蒲柏闸分流, 向东, 至彭县长寿桥始称青白江, 继向东, 汇入沱江。区境流长 2.74 km, 平均河宽 120 m、水深 3.5 m、比降 2.5‰, 过洪能力 1 300 m<sup>3</sup>/s, 特大洪水 1 600 m<sup>3</sup>/s, 区境集雨面积 18.5 km<sup>2</sup>, 多年平均流量 54.56 m<sup>3</sup>/s<sup>[2]</sup>。

目前拟建青白江大桥下游主要涉河建筑物为彭州迎宾大道公路桥, 该桥桥轴线位于拟建青白江大桥桥轴线下游 300 m 左右, 河中设有 6 排桥墩, 桥面宽 48.4 m, 桥面高程约 568 m, 桥孔标高 566.78~567.12 m。

## 2 河道二维水流数学模型的建立

### 2.1 基本方程<sup>[3-4]</sup>

水流连续方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$x$  方向动量方程:

收稿日期: 2010-03-08; 修订日期: 2010-04-19

作者简介: 金 瑞 (1984-), 女, 湖北随州人, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: king1014@126.com

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间;  $x$ 、 $y$  为空间坐标;  $z$  为水位;  $h$  为水深,  $h = z - z_b$  ( $z_b$  为河床高程);  $u$ 、 $v$  分别为沿  $x$ 、 $y$  方向的垂线平均流速;  $g$  为重力加速度;  $C$  为谢才系数,  $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$  ( $n$  为糙率);  $\varepsilon$  为紊动黏性系数。

2.2 基本方程的数值离散与求解

浅水方程的离散包括时间离散和空间离散, 时间的离散采用差分法, 空间的离散采用有限元法: 运用 Galerkin 加权余量法把浅水方程离散成非线性代数方程, 然后采用 Newton-Raphson 方法求解<sup>[5]</sup>。离散区域内采用三角形六节点等参单元和四边形八节点等参单元相耦合, 单元采用混合插值方法, 单宽流量  $r$ 、 $s$  采用二次插值函数, 水位  $h$  采用线性插值函数。

2.2.1 时间离散

方程中未知函数的时间导数采用差分格式来离散, 某一函数随时间变化关系式如下:

$$y = y_0 + at + bt^a \quad (4)$$

式中:  $y_0$  为  $r$ 、 $s$ 、 $h$  任一变量的初始值;  $a$ 、 $b$  为待定参数;  $a$  为常数。将式 (4) 对时间  $t$  求导得:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = a + abt^{a-1} \quad (5)$$

当  $t = 0$  时, 有  $\left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)_0 = a$ 。

将式 (4) 代入式 (5) 得:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{a}{t} (y - y_0) - (a - 1) a \quad (6)$$

取时间步长为  $\Delta t$ , 得函数关于时间  $t$  的导数关系式:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{a(y - y_0)}{\Delta t} - (a - 1) \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)_0 \quad (7)$$

$y_0$  和  $\left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)_0$  分别指出在  $\Delta t$  时段内初始时刻的值。

在实际应用中, 当  $a = 1.5$  时计算中可以得到比较稳定的解, 因此本数学模型选用此值。

2.2.2 空间离散

经运算可得任意单元  $e$  内的有限元控制方程:

$$A'r_i + B'r_i + C_i(h_i + \alpha) + D_i r_i + E'r_i - F's_i - W_i = 0 \quad (8)$$

$$A's'_i + B's'_i + C_i(h_i + \alpha) + D_i s'_i + E's'_i - F's_i - W_i = 0 \quad (9)$$

$$K_3 h'_i + M_3 r_i + N_3 s_i = 0 \quad (10)$$

式中:  $r'_i$ 、 $s'_i$  和  $s$  和  $h'$  分别表示单元第  $i$  节点上的未知函数的时间导数;  $A$  为质量矩阵;  $B$  为对流矩阵;  $C$  为压力矩阵;  $D$  为耗散矩阵;  $E$ 、 $F$ 、 $W$  为底数摩阻力矩阵;  $K$ 、 $M$ 、 $N$  为连续矩阵。

由于方程中含有未知函数的时间导数, 方程组为非线性方程组, 本数学模型用 Newton-Raphson 迭代法来求解有限元控制方程 (8) ~ 方程 (10) 的数值解<sup>[7]</sup>, 将前一步的结果作为下一步迭代的初值,  $X_{n+1} - X_n = \Delta X_n$ , 在各个时间步长的计算中, 当  $\Delta X_n$  满足收敛要求时停止迭代, 进入下一时间步长, 直至得到所要求的结果。

2.3 初始条件和边界条件

2.3.1 边界条件

1) 进口边界: 给定总流量, 计算根据水流输送量理论, 将总入流量分配至各节点;

2) 出口边界: 出口断面一般布置在河道顺直、单一、无特殊流态 (如回流等) 的河段, 并在出口断面上给定沿河宽分布的水位;

3) 岸边界: 岸边界无水流进出边界, 处理方式可分为滑动边界条件 (即假设沿边界的切线应力为 0) 和不滑动边界条件 (即假设沿边界的流速为 0)。本文计算中取非滑动边界, 即  $u = 0$   $v = 0$ ;

4) 动边界: 由于天然河流平面形态不规则, 平面二维水流数值模拟对不规则岸线的处理可根据计算区域平面形态具体情况采用三角形离散。天然河道的岸边界因水位变化而变, 数值模拟计算宜采用干湿判别法的动边界处理技术, 当单元平均水深不小于给定最小水深时, 整个单元作为湿单元参与计算; 否则整个单元视为干单元, 不参与计算, 按线性插值调整参与计算的单元个数<sup>[8]</sup>。

2.3.2 研究范围及网格布置

根据拟建大桥所处位置以及工程后可能引起的洪水位影响范围情况, 考虑计算需要的进出口长度, 为了更好地处理进口边界, 选取的计算区域为: 全长 1.52 km, 其中拟建大桥上游约 1 km, 拟建大桥下游约 0.52 km。

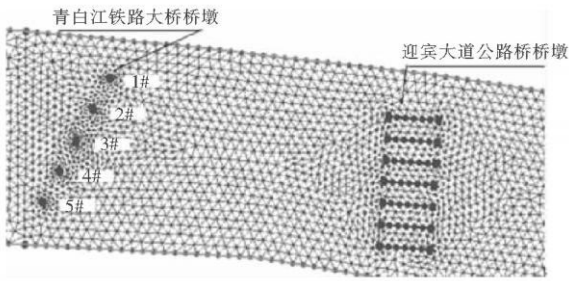


图 1 桥墩布置及网格处理

Fig. 1 Pier layout and grid processing

2 3 3 工程概化

为提高计算的精确性,建模中对圆形桥墩进行了正七边形的概化处理,在网格划分中,对桥墩局部网格进行了精细的加密,以尽可能反映工程河段桥墩的布置对水流的影响。工程前桥墩网格过流,工程后将桥墩网格作为内部边界不过流单元处理,可以较为准确反映桥墩对水位、流速等水力参数影响。选取洪水过流影响最大的 3#铁路桥桥墩作为参考,水流情况如图 2。

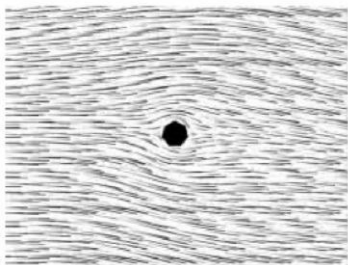


图 2 铁路桥桥墩处的水流流态

Fig 2 Flow pattern of railway bridge piers

2 4 数学模型验证

数学模型是根据 2009 年 8 月实测水面线进行水位验证,取桥位断面水位 562.50 m,相应流量为 103 m<sup>3</sup>/s。验证工程河段两岸成对布置的 12 把水尺,验证结果见表 1。计算河段糙率  $n$  值通过实测资料反求,并根据河道中不同部位分块调试,验证糙率为 0.030~0.040。验证结果表明,模型计算水位与原型实测水位最大差值为 0.05 m,在 ±0.1 m 以内,与河床条件吻合较好。

表 1 水位验证结果

Tab 1 Water test results sheet /m							
编 号	实测 水位	计算 水位	差 值	编 号	实测 水位	计算 水位	差 值
S1	562.60	562.60	0.00	S2	562.60	562.60	0.00
S3	562.53	562.55	0.02	S4	562.53	562.55	0.02
S5	562.51	562.56	0.05	S6	562.51	562.56	0.05
S7	562.50	562.51	0.01	S8	562.50	562.51	0.01
S9	562.17	562.18	0.01	S10	562.17	562.18	0.01
S11	561.32	561.32	0.00	S12	561.32	561.32	0.00

3 计算分析

3 1 计算工况选择

根据工程河段的防洪标准以及拟建工程的特点,选用洪水频率  $P$  为 1%、5% 和 50% 三级典型流量的水流条件计算,计算的流量水位组合如表 2。

表 2 计算工况

Tab 2 Calculations			
工况	洪水频率 $P/\%$	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	桥位处水位 /m
I	1	1 680	567.85
II	5	1 281	566.77
III	50	608	564.71

3 2 计算结果分析

3 2 1 工程前后过水面积变化

青白江大桥以主跨 32 m 的简支梁跨越青白江,水中桥墩 5 个,每个水中桥墩宽度均为 3.0 m,采用圆形独墩。桥区河段河道断面呈“U”型,河床宽浅,各频率洪水时桥墩占据的河宽不一致,  $P = 50\%$  时,流量较小,靠左岸的桥墩位于河堤上,未占据河道的过水面积;  $P = 5\%$  和 1% 时,桥墩占据的河宽一致,建桥后河道断面缩窄率为 7.97%~8.30%,具体值见表 3。

表 3 拟建大桥过水面积缩窄率计算

Tab 3 Water area narrowing rate of the bridge project

参数类型	工况 I	工况 II	工况 III
洪水频率 $P/\%$	50	5	1
流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	608	1 281	1 680
设计水位 /m	564.71	566.77	567.85
水面宽度 /m	120.66	136.77	138.41
断面面积 /m <sup>2</sup>	303.5	599.4	768.1
桥墩占用河宽 /m	10.8	13.5	13.5
桥墩占用过水面积 /m <sup>2</sup>	24.2	48.9	63.7
桥墩占用过水面积率 /%	7.97	8.16	8.30

3 2 2 工程前后水位及流速变化

各级流量情况下,桥墩附近水位和流速分布沿水流方向走势基本相同,墩前壅水作用随流量的增大而增大,流速的影响范围随流量增大也呈增大趋势。取流量  $Q = 1\,680\,m^3/s$  时 3# 桥墩附近水位和流速对比如图 3、图 4。

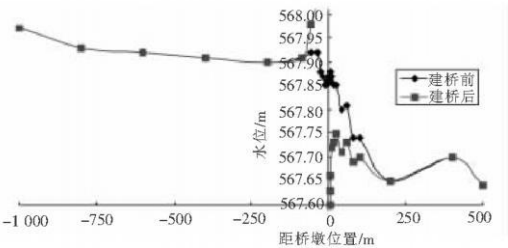


图 3 建桥前后桥墩处水位变化对比

Fig 3 Comparison of water level changes of piers before and after the bridge construction

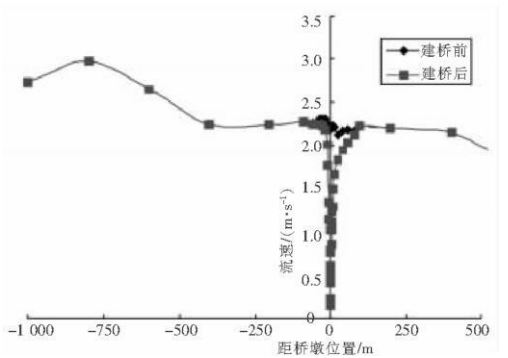


图 4 建桥前后桥墩处流速变化比较

Fig 4 Comparison of water velocity changes of piers before and after the bridge construction

表 4 建桥前后工程河段流速变化比较

Tab 4 Comparison of changes in velocity before and after the bridge construction /(m·s<sup>-1</sup>)

编号	距桥位 /m	$Q = 608 \text{ m}^3/\text{s} \text{ } P = 50\%$			$Q = 1\,281 \text{ m}^3/\text{s} \text{ } P = 5\%$			$Q = 1\,680 \text{ m}^3/\text{s} \text{ } P = 1\%$		
		建桥前	建桥后	差值	建桥前	建桥后	差值	建桥前	建桥后	差值
1	0- 1 000	2.74	2.74	0.00	2.53	2.53	0.00	2.63	2.63	0.00
2	0- 700	2.66	2.66	0.00	2.38	2.38	0.00	2.43	2.43	0.00
3	0- 300	2.25	2.25	0.00	2.38	2.38	0.00	2.43	2.43	0.00
4	0- 200	2.24	2.24	0.00	2.57	2.57	0.00	2.63	2.63	0.00
5	0- 140	2.25	2.25	0.00	2.59	2.58	- 0.01	2.65	2.64	- 0.01
6	0- 100	2.26	2.25	- 0.01	2.76	2.74	- 0.02	2.83	2.81	- 0.02
7	0- 40	2.30	2.34	0.04	2.96	2.99	0.03	2.83	2.94	0.11
8	0+ 0	2.21	2.42	0.21	2.75	2.97	0.22	2.81	3.07	0.26
9	0+ 50	2.18	2.39	0.21	2.76	2.95	0.19	2.83	3.04	0.21
10	0+ 100	2.23	2.30	0.07	2.73	2.79	0.06	2.79	2.87	0.08
11	0+ 150	2.22	2.28	0.06	2.57	2.60	0.03	2.63	2.65	0.02
12	0+ 200	2.20	2.21	0.01	2.53	2.56	0.03	2.38	2.40	0.02
13	0+ 300	2.19	2.40	0.21	2.19	2.42	0.23	2.24	2.52	0.28
14	0+ 350	2.18	2.37	0.19	2.63	2.83	0.20	2.69	2.95	0.26
15	0+ 450	2.16	2.20	0.04	2.48	2.52	0.04	2.54	2.62	0.08
16	0+ 520	2.06	2.06	0.00	2.23	2.24	0.01	2.28	2.32	0.05

计算结果表明, 流速最大增值出现在桥墩附近, 流速增加和减小均沿横向交替出现, 桥墩间流速增加, 墩前和墩后流速减小, 这种变化趋势沿上下游逐渐递减直到消失。由于铁路桥与河道断面成 26°斜交, 铁路桥下游 300 m 处还有一座 48 m 宽的公路桥, 使得桥墩对水流的影响范围扩大, 流速的影响范围从上游 140 m 处一直持续到下游 520 m 模拟河道出口处。

3.2.3 桥前壅水分析

因桥墩为局部阻水建筑物, 一般表现为工程上游河段的水位壅高、工程下游河段的水位降低, 这种水位壅高或降低将一定范围内逐渐消失。壅水高度分布一般是墩前局部壅水较高, 然后逐渐向上游和两岸递减, 直到消失, 桥墩前的壅水高度主要由桥墩大小、阻水面积和河道流速决定, 数模计算表明, 建桥后, 遇  $P = 1\%$  和  $2\%$  洪水时, 桥前最大水位壅高分别为 0.09 m 和 0.08 m;  $P = 50\%$  时, 墩前最大水位壅高为 0.05 m; 随着流量的减小, 壅水高度有减小的趋势。

当  $P = 1\%$  洪水时, 水位壅高 0.01 m 的范围为 700 m;  $P = 5\%$  洪水时, 水位壅高 0.01 m 的范围为 620 m; 当  $P = 50\%$  时, 水位壅高 0.01 m 的范围为 330 m。计算表明, 壅水范围主要集中在桥墩上游主槽, 桥轴线以下主要体现为水位降落; 洪水流量越大, 引起的桥前壅水越高, 其壅水影响范围愈大, 但这个壅高值与该河段在天然情况下水位的涨落幅度相比极低, 可以认为建桥引起的水位壅高是极其微小的, 水位壅高对该河段河势条件影响较小。

4 结 论

青白江大桥设计洪水标准为 100 a 一遇, 根据计算的  $P = 1\%$  洪水频率水位和桥梁壅水高度等因素, 对拟建桥梁桥面最低高程进行了复核。经计算桥区河段 100 a 一遇洪水水位为 567.85 m, 桥墩造成的最大壅水高度为 0.09 m, 因而 100 a 一遇洪水桥墩设计水位为 567.93 m。大桥按 300 a 一遇洪水校核, 此时洪水位为 568.40 m, 加上壅水值 (取 100 a 一遇壅高值) 则为 568.49 m, 而拟建大桥设计桥底面最低高程为 574.205 m, 所以满足防洪标准及行洪安全的要求。

参考文献:

[1] 张志勤. 成都至彭州铁路预可行性研究 [R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2009.

[2] 彭永勤, 谢岷. 新建成都至都江堰铁路彭州支线郫彭高架特大桥 DK13+ 600 跨青白江段行洪论证与河势稳定评价报告 [R]. 重庆: 西南水运工程科学研究所, 2009.

[3] 谢翠松, 余蔚卿, 余明辉. 码头和取水口建设对防洪影响的计算与分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(4): 31-35.

[4] 李义天, 赵明登. 河道平面二维水沙数学模型 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[5] 江春波, 安晓谏, 张庆海. 二维浅水流动的有限元并进行数值模拟 [J]. 水利学报, 2002(5): 63-67.

[6] 卜丁, 杨斌. 江津区仁沱大桥平面二维水流数值模拟 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(3): 78-82.

[7] 杨国录. 河流数学模型 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993.

[8] 陈雪. 山区河流重大件码头水域条件研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.