

# 滨江路对重庆两江水流条件影响的研究\*

陈景秋, 赵万星, 季振刚, 文 岑, 刘雪兰

(重庆大学 工程力学系, 重庆 400030)

**摘要:**滨江路工程对于发展城市建设和缓解交通运输具有重要意义。但是同时,它也会给河道的水流条件带来变化,从而引起河流的水安全问题、泥沙冲淤问题、航道运输问题等。本文以重庆滨江路工程和长江、嘉陵江汇流河段为对象,对滨江路给河道水流条件带来的变化进行研究,建立了两江汇流数学模型,通过计算机数值模拟,对比滨江路修建前后的河流水位和流场变化情况,阐明了引起这些变化的相关因素及其后果。

**关键词:**滨江路工程;两江汇流;水壅现象;数值模拟

**中图分类号:**TU723.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)04-0047-05

## Influence of the Flood - Control - Projects on the Hydrodynamic State of the Rivers Confluence in Chongqing

CHEN Jing - qiu, ZHAO Wan - xing, JI Zhen - gang, WEN Cen, LIU Xue - lan

(Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Though the Flood - Control - Projects along Yantze River and Jialing River in Chongqing may well improve the urban traffic and construction, it may change the river hydrodynamic characters. There may be two consequences, one is to reduce the size of cross section and the other is to change the river shape, such as the curvature radius. The phenomena of the local backwater and velocity variety are obvious, which result in some problems for the navigation; sediment, transport and so on. In this paper, the study object is the Flood - Control - Projects and Yangtse River and Jialing River, and the aim is to study the influence of the Flood - Control - Projects on the hydrodynamic state of the two rivers. Using the numerical technique, with the two rivers hydrodynamic model the flow field's change of river after completion of Flood - Control - Projects is simulated and the reasons caused by the change are analyzed.

**Keywords:** Flood - Control - Projects; two rivers confluence; the backwater phenomena; numerical simulation

### 1 概述

#### 1.1 河道障碍物对水力条件的影响

天然河流大多处于缓流状态,当遇到障碍物如河道缩窄或河槽中的桥墩,其上游水位会涌高,同时伴随局部流场的改变,有水头损失。这些障碍物对水流条件的影响主要体现:一是在河道横向上使过流截面减少,直接影响过流能力;二是在河道纵向上对河流主流大小和方向的改变,如改变了河道曲率半径。而后一种情况对水力条件的改变有时会更加突出,不可小视。

过流断面上,水深变化  $dh$  与过水面积  $dA$  有<sup>[1]</sup>:

$$dh = \frac{aQ^2}{gA^3}dA \quad (1)$$

在弯曲河段,由于离心力的作用,会出现螺旋副流。河流通过水面的抬高来克服在副流上的能耗。

\* 收稿日期:2005-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(10472136);教育部重点科技项目(02058)资助

作者简介:陈景秋(1944-),男,贵州人,教授,博士生导师,主要从事计算流体力学研究。

河流弯道上的纵向水头损失<sup>[1]</sup>: 
$$\Delta h_w = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

这里,  $v$  为断面平均流速,  $\zeta$  为弯道局部损失(根据 Ahmed Shukry 的试验结果, 其值与来流雷诺数、曲率半径、水面宽度、水深和转角有关)。

同时, 弯曲河段的横向上, 凸岸的水面比凹岸水面高, 形成横向比降。弯道上的横向比降<sup>[1]</sup>:

$$\Delta h = \frac{k^2}{2g} \left( \frac{1}{r_m^2} - \frac{1}{r_n^2} \right) \quad (3)$$

这里,  $r_m, r_n$  是凸岸、凹岸的曲率半径,  $k$  是自由涡强度。

## 1.2 重庆两江水流条件和地理特点

重庆地处长江上游、四川盆地东南部山地丘陵区, 属于亚热带季风气候。长江多年平均流量 11 400  $\text{m}^3/\text{s}$ , 多年平均年水量 3 513  $\times 10^8 \text{ m}^3$  (寸滩水文站), 约占长江年入海总水量的一半。嘉陵江多年平均流量 2 250  $\text{m}^3/\text{s}$ , 最大流量 44 800  $\text{m}^3/\text{s}$ , 最小流量 244  $\text{m}^3/\text{s}$ 。从年内水量分配看, 来水量主要集中在汛期, 寸滩站 6~10 月来流量占全年的 74.6%。地形上, 受长江及其支流长期侵蚀, 地表切割剧烈, 岸坡陡峭, 河面狭窄, 弯道多, 滩地发达。汛期水量集中, 河水陡涨陡落, 这是地质和水灾害的主要自然诱因, 河流两岸是灾害的主要分布地。正是这样, 值得关注的是重庆滨江路建成后, 会给两江的水力条件和流场状态带来哪些人为的变化?

## 2 数学模型

### 2.1 模型方程

两江汇流水动力模型的建立基于 EFDC 的水动力模型<sup>[2]</sup>, 根据 Boussinesq 近似, 密度的影响仅表现在重力项, 于是水平方向动量方程和连续性方程如下:

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHu) + \partial_x(m_y)Huu + \partial_y(m_xHvu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv \\ & = -m_y H \partial_x (g\zeta + p) - m_y (\partial_x h - 0.5\partial_x H) \partial_x p + \partial_z(mH^{-1}A_v \partial_z u) + Q_u \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHv) + \partial_x(m_y)Huv + \partial_y(m_xHvv) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu \\ & = -m_x H \partial_y (g\zeta + p) - m_x (\partial_y h - 0.5\partial_y H) \partial_x p + \partial_z(mH^{-1}A_v \partial_z v) + Q_v \end{aligned} \quad (5)$$

$$\partial_t(m\xi) + \partial_x \left( m_y H \int_0^1 u dz \right) + \partial_y \left( m_x H \int_0^1 v dz \right) = 0 \quad (6)$$

这里, 垂向压力梯度是密度的函数,  $\partial_x p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb$ ; 这里,  $u, v$  是水平方向流速,  $f$  是 Coriolis 力,  $m_x, m_y$  是坐标变化张量,  $\zeta$  是水位,  $\rho$  是密度,  $A_v$  为垂向紊动粘度, 采用 Mellor - Yamada(1982) 紊流模型求解。采用 MAC 网格变量定义(Peyret and Taylor, 1983)<sup>[3]</sup>。水底摩擦:  $(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_b \sqrt{u_1^2 + v_1^2} (u_1, v_1)$ , 下标 1 表示底层水体流速, 假定近床流场剖面满足对数分布, 有  $c_b = \left( \frac{\kappa}{\ln(\Delta_1/2z_0)} \right)^2$ ,  $\kappa$  是 von Karman 常数,  $\Delta_1$  是底层厚度,  $z_0 = z_0^*/H$  是无量纲糙度高度。

### 2.2 预处理部分

2.2.1 数字地形的生成 采用 DEM(数字高程方法), 将散乱的地形高程转换到规则平面, 如图 1 为地形等高线, 以便在物理网格中实现插值。

2.2.2 贴体正交网格以及滨江路的标识 采用坐标拟合的方法将变量从物理平面  $(x, y)$  变换到计算平面  $(\xi, \eta)$ <sup>[4]</sup>; 同时, 将滨江路标识在网格中, 如图 2, 剔除河岸和滨江路外超部分。

### 2.3 模型的检验和校准

模型分别以 3 组典型流量校核水位和流场, 模型结果与实测资料相吻合。如下表 1, 长江/嘉陵江流量为: 20 000/8 000, 26 420/14 680 和 25 000/25 000, 汇流比分别为: 0.40, 0.56, 1.00, 实测数据与模型结果吻合较好。

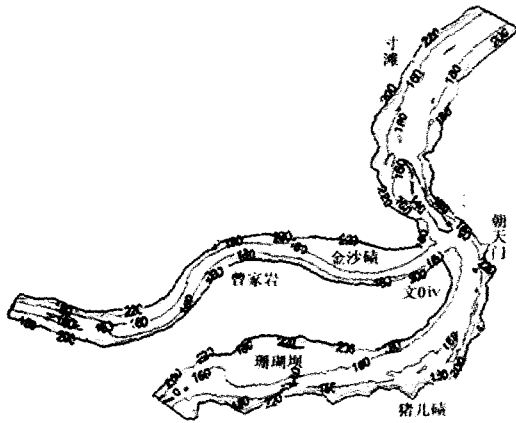


图1 重庆两江汇合口地形等高线图

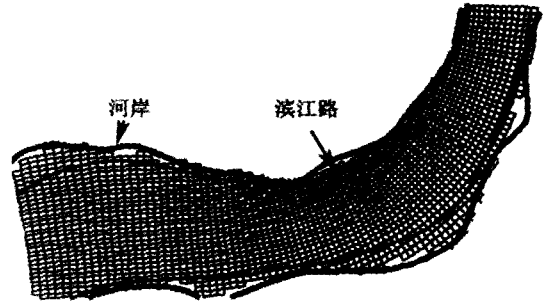


图2 滨江路在网格的标识

表1 主要的水尺水位表和校核结果

流量	汇流比	项目	朝天门	珊瑚坝	嘉陵江(文0IV)	曾家岩
20 000/8 000 m <sup>3</sup> /s	0.4	实测值	172.36	173.18	172.13	172.32
		计算值	172.37	173.18	172.15	172.35
26 420/14 680 m <sup>3</sup> /s	0.56	实测值	177.50	178.06	177.29	177.31
		计算值	177.50	178.10	177.30	177.40
25 000/25 000 m <sup>3</sup> /s	1.00	实测值	181.04	181.31	180.83	181.05
		计算值	180.97	181.30	180.84	181.01

### 3 模型在滨江路问题上的应用

根据对模型数据和实测资料的分析显示,由于两江汇流河段呈现汇流河口特点,两江来流的流量组合即汇流比( $Q_{嘉陵江}/Q_{川江}$ )是影响该河段流速和水面比降的主要因素<sup>[5]</sup>。与此同时,由于滨江路修建后,对水流条件的复合影响,使汇流河段的水动力状况发生了新的变化。表2是修建滨江路后,河流的水位和壅高状况。

表2 滨江路修建后的水位和壅高

流量	汇流比	项目	朝天门	珊瑚坝	嘉陵江(文0IV)	曾家岩
20 000/8 000 m <sup>3</sup> /s	0.4	水位	172.44	173.25	172.22	172.41
		壅高	0.07	0.07	0.07	0.06
26 420/14 680 m <sup>3</sup> /s	0.56	水位	177.62	178.26	177.41	177.50
		壅高	0.12	0.16	0.11	0.10
25 000/25 000 m <sup>3</sup> /s	1.0	水位	181.13	181.50	180.95	181.03
		壅高	0.08	0.20	0.11	0.02

#### 3.1 现象的分析

**水位变化:**当小汇流比时,长江汇合口上游的坡降大,流速较大,壅水现象明显。如图3,左边是修建前的比降图,右边是修建后的结果,长江/嘉陵江流量为20 000/8 000 m<sup>3</sup>/s,寸滩水位171.0 m(以黄海基准),长江汇合口上游的朝天门到珊瑚坝之间的比降约为0.8~1 m,嘉陵江汇合口上游的金沙碛出现倒比降,长江对嘉陵江的顶托现象明显。滨江路工程后,朝天门上游的猪儿碛右岸,水壅明显,部分可以达到0.2 m左右。这也符合弯道水流的特点。随汇流比增加,长江在汇合口上游的水位抬高,过流面积增加,流速反而减小,当长江/嘉陵江流量为25 000/25 000 m<sup>3</sup>/s,汇流比达到1.0时,嘉陵江对长江顶托明显,使朝天门到珊瑚坝之间的比降减少到0.2~0.3 m,流速减缓,此时水位依然壅高,据分析这主要是由于滨江路对河道过流截面的减少引起的。

**流速变化:**滨江路修建后,两江部分河段的主航道流速大小和方向略有变化。图4、图5是流量为20 000/8 000 m<sup>3</sup>/s的朝天门到珊瑚坝段流场图,河道主流流速增加了约10%,方向偏向右岸。图6是朝天门典型断面流速对比图。滨江路修建后,上行船舶较以前困难就证实了这一点。另外,弯道流速的

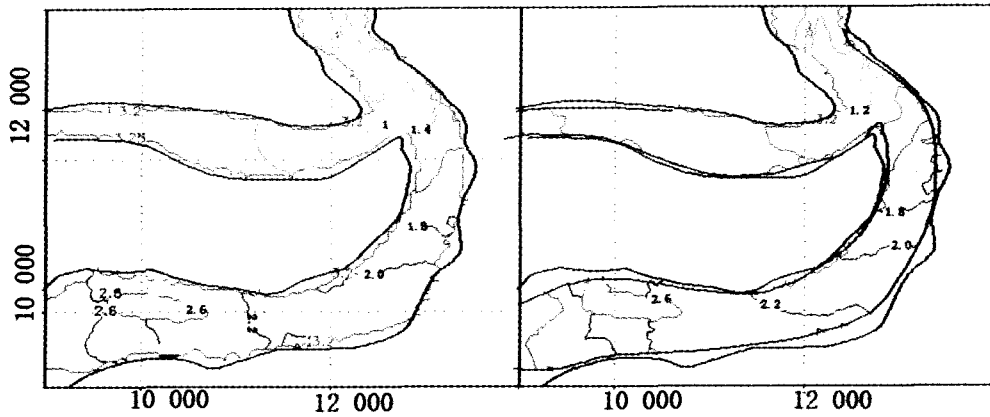


图 3 滨江路修建前后水面比降图

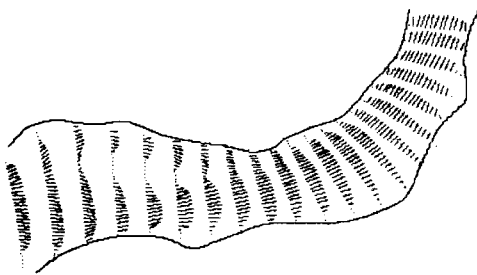


图 4 滨江路建前流场

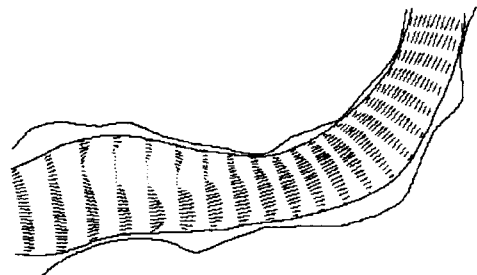


图 5 滨江路建后流场

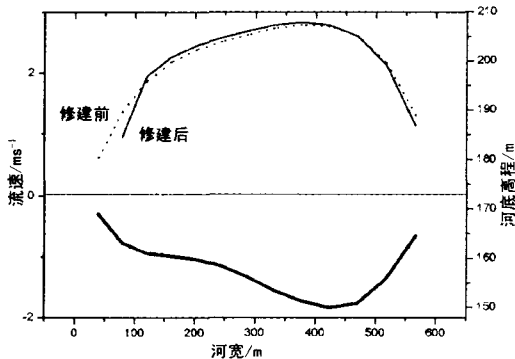


图 6 20 000/8 000 朝天门断面流速

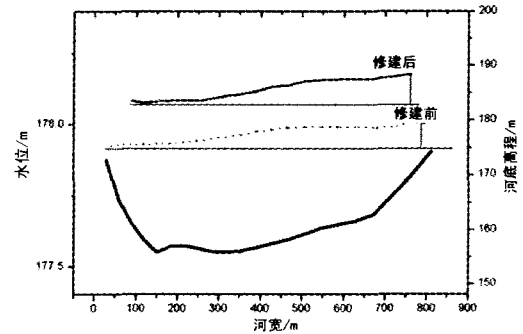


图 7 26 420/14 680 猪儿碛断面水面线

增减会影响河道断面横向比降的变化。如图 7, 滨江路建成后, 流量达 26 420/14 680 m<sup>3</sup>/s 时, 猪儿碛流速增加约 1 m/s, 横向比降增加了 0.028 m。图 8 是 25 000/25 000 m<sup>3</sup>/s 流量时, 断面流速增加 0.3 m/s, 横向比降增加了 0.009 m, 说明此时曲率变化的影响很小。

### 3.2 模型试验的结论

1) 从时间上看, 水量集中使滨江路对河流水安全危险增加。从地理上看, 嘉陵江在汇合口上游即有比较开阔的金沙碛, 槽蓄功能比较明显; 长江在汇合口上游 5~6 km 处的珊瑚坝地势开阔, 但距离较远, 调节能力弱。

2) 滨江路对河流的影响体现在两个方面: 一是使过流截面减少, 反映在河流横向; 二是使河流主流方向发生变化, 如曲率半径的改变, 反映在河流纵向上。两者共同作用, 增加了洪水威胁, 不可忽视。

3) 滨江路对河流水流条件的影响受汇流比的制约。在大汇流比时, 嘉陵江对长江的顶托明显, 长

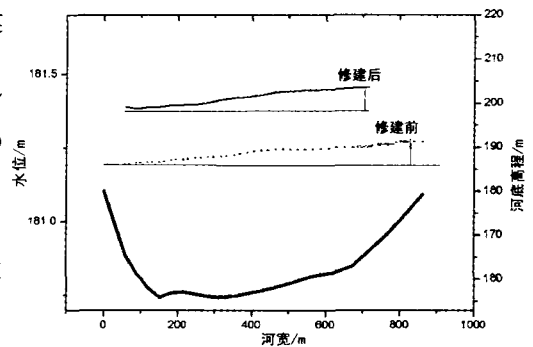


图 8 25 000/25 000 猪儿碛断面水面线

江在汇合口上游的水面被抬高,流速减缓。水面壅高主要是由滨江路对过流截面的减少引起的;而在小汇流比时,长江对嘉陵江顶托明显,嘉陵江流速减缓,甚至在金沙碛会出现倒比降,长江在汇合口上游的流速大,其水面壅高主要由滨江路对河道弯曲特性的改变引起的。

综上所述,滨江路对河流影响,表现在过流截面和曲率两个方面;而两江来流的流量组合,是决定两种表现强弱的主要原因。

#### 4 总结

重庆两江汇流段是一个有复杂地形和水流条件影响的河段。支流的汇入使汇流比在水动力因素中占主导地位。同时,滨江路的存在使该河段的水动力状况发生新的变化。本文采用干湿点法和网格变换等技术,利用非定常流的三维水动力模型,模拟了有汇流比因素和滨江路影响共同作用下的两江汇流段河流水位和流场状况,分析了影响水动力状况的相关因素及其后果。全部程序用 FORTRAN77 语言实现,结合了 MATLAB、AUTOCAD 等应用软件的二次开发,完善了数学模型。

#### 参考文献:

- [1] 董曾南,章梓雄.非粘性流体力学[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [2] Ji,Z. -G.,M. R. Morton,J. M. Hamrick. Wetting and drying simulation of estuarine processes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2001,53:683-700.
- [3] 陈景秋,王宗笠.多维双曲波问题的双特征方法[M].重庆:重庆大学出版社,2001.
- [4] Joe F. Thompson, Numerical grid generation[M]. The Netherlands, Elsevier Science Publishing Co. inc., 1982.
- [5] 刘建新,程昌华.山区河流干支流汇流特性研究[J].重庆交通学院学报,1996,15(4):90-94.
- [6] 杨胜发,赵志丹.三峡工程对嘉陵江朝天门至井口河段的影响及治理研究[J].水动力研究与进展,2002,17(5):586-591.
- [7] 吴江航,韩庆书.计算流体力学的理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,1988.

(上接第14页)

7) 该方法除夏热冬冷地区之外,不仅适用于冬冷地区的保温节能控制,而且还可适用于夏热地区的隔热节能控制。

#### 参考文献:

- [1] GB50176-93,民用建筑热工设计规范[S].
- [2] JGJ-134-2001,J116-2001,夏热冬冷地区居住建筑节能设计校准[S].
- [3] 黄恒栋,谯京旭.建筑热环境与建筑节能设计标准相关控制法研究在确定建筑围护结构的隔热控制与节能控制指标中的应用[J].重庆建筑大学学报,2000,(2):20-26.
- [4] 黄恒栋,黄煜.室内空调条件下围护结构(墙体、屋盖)的隔热控制—建筑热环境与节能研究(一)[J].华中建筑,2002,(5):75-79.
- [5] 黄恒栋,李运江.窗墙相关性原理与窗的隔热控制——建筑热环境与节能研究(二)[J].华中建筑,2002,(6):38-40.
- [6] 黄恒栋,谯京旭.室内采暖条件下围护结构(墙,屋顶)的保温控制与节能控制—建筑热环境与节能研究(三)[A].全国建筑节能应用技术研讨会论文集[C].2004.
- [7] 黄恒栋,谯京旭.室内采暖条件下围护结构(窗)的保温控制与节能控制—建筑热环境与节能研究(四)[A].全国建筑节能应用技术研讨会论文集[C].2004.