

Study towards the Influence of Bridge Pier Layout on Flood Carrying Safety in River-Lake Confluence Section

Tao Wang¹, Zhenhua Zou^{2*}, Chao Zhang², Beiping Mao²

¹Agencies Service Center of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²Middle Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Email: 27523276@qq.com, *zouz82@126.com

Received: Dec. 4th, 2018; accepted: Dec. 20th, 2018; published: Dec. 27th, 2018

Abstract

The confluence section of the Yangtze River and the Dongting Lake has always been a sensitive section for flood control, where schemes need to be adopted to calculate the impact of the project on flood discharge and river regime. In this paper, both mathematical and physical models are compared in analyzing the impact of the construction of a super-large bridge on river flood discharge in the confluence area of rivers and lakes. The results show that the construction has little effect on the water level and velocity of the main channel and the distribution pattern of cross-section velocity changes little, and the main flow line has not changed before and after the project. The comparison shows that the results between the two methods are not much different and the qualitative conclusions are consistent. There is no essential difference between the results obtained by the two methods, which can be used as the basic data for the analysis of Engineering impact degree and provide reference for design and river management.

Keywords

Confluence Section of the Yangtze River and the Dongting Lakes, Layout of Piers, Flood Discharge Safety, Study on Influences

江湖汇流段桥墩布设对行洪安全的影响研究

王涛¹, 邹振华^{2*}, 张潮², 毛北平²

¹长江水利委员会机关服务中心, 湖北 武汉

²长江水利委员会长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉

Email: 27523276@qq.com, *zouz82@126.com

收稿日期: 2018年12月4日; 录用日期: 2018年12月20日; 发布日期: 2018年12月27日

作者简介: 王涛, 男, 高级工程师, 硕士学历, 主要从事水文分析、河道整治研究。

*通讯作者。

摘要

江湖汇流段历来是防洪较为敏感河段,在此修建的桥梁工程,需采取桥墩布设尽量减少数量、规避主泓区域的设计措施,降低对行洪安全的影响。采用数学模型及物理模型两种方法分别分析了采用这一新理念设计的特大桥梁工程对江湖汇流区河道行洪的影响程度,并对两种模型成果进行对比分析。结果表明,工程建设对主槽水位、流速影响较小,断面流速分布形态改变甚微,工程前后水流主流线没有发生变化。经比较两种方法计算结果差别不大,定性结论一致。两种方法取得成果无本质区别,均可以作为工程影响程度分析的基础数据,为设计及河道管理提供参考。

关键词

江湖汇流段,桥墩布设,行洪安全,影响研究

Copyright © 2018 by authors and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江、洞庭湖河段(简称江湖汇流段)包括长江下荆江出口河段、洞庭湖出口段和长江汇流段,历来是防洪较为敏感河段[1]。随着社会发展,大量的桥梁、码头等工程兴建,涉水建筑物建设的前提是满足功能、结构要求的基础上,对天然河道影响最小。目前,一般多采用实体模型试验、数学模型计算等手段来研究工程对河势的影响[2][3]。许多专家学者采用二维水流模型、二维水沙模型、物理模型对涉水建筑物对行洪的影响进行了研究。张慧等采用河工模型分析荆岳铁路专线洞庭湖大桥及二七路长江大桥建成后对工程河段河势及防洪的影响程度[4][5],曹兵等采用二维水流模型分析江湖汇流区某特大桥梁对行洪影响[6],龚延庆等采用河工模型分析了松花江某大桥建设对行洪的影响[7][8]。现有研究成果多是基于某一种模型得出的结论,由于不同模型计算原理不同,对于同一工程计算结果可能有所差别,本文采用二维水流模型和物理模型两种计算模型,分别分析了某特大桥梁建设,采取桥墩布设尽量减少数量、规避主泓区域的设计措施后,对江湖汇流区河道行洪的影响程度,并对两种模型成果进行对比分析。研究成果一方面可以为模型计算互为验证,另一方面可为工程设计及河道管理部门决策提供参考。

工程河段河势图,见图1。

2. 研究区概况

2.1. 河段概况

拟建桥梁工程位于洞庭湖出流段七里山附近。洞庭湖出口段是控制洞庭湖洪水入汇长江的通道,洞庭湖除承纳湘、资、沅、澧四水的来水来沙外,还接纳松滋、太平、藕池三口分泄长江水沙,水沙经湖泊调蓄后由城陵矶汇入长江[9][10]。

七弓岭至城陵矶河段(下荆江出口段),由七弓岭和观音洲两个反向河弯组成,为荆江河段中最典型的蜿蜒型河道。本河段演变趋势为:受上游来水来沙作用,加上弯道环流的影响,凹岸逐渐崩退,凸岸不断淤长,河岸易动地段崩塌严重,岸线急剧后退,河道平面位移较大。历年来,由于河曲单向蠕动,弯长和摆幅越来越大,其河弯半径弯距和狭颈宽度则越来越小,河道平面外形已成为极度弯曲的狭长葫芦状。荆江出流与洞庭湖出流

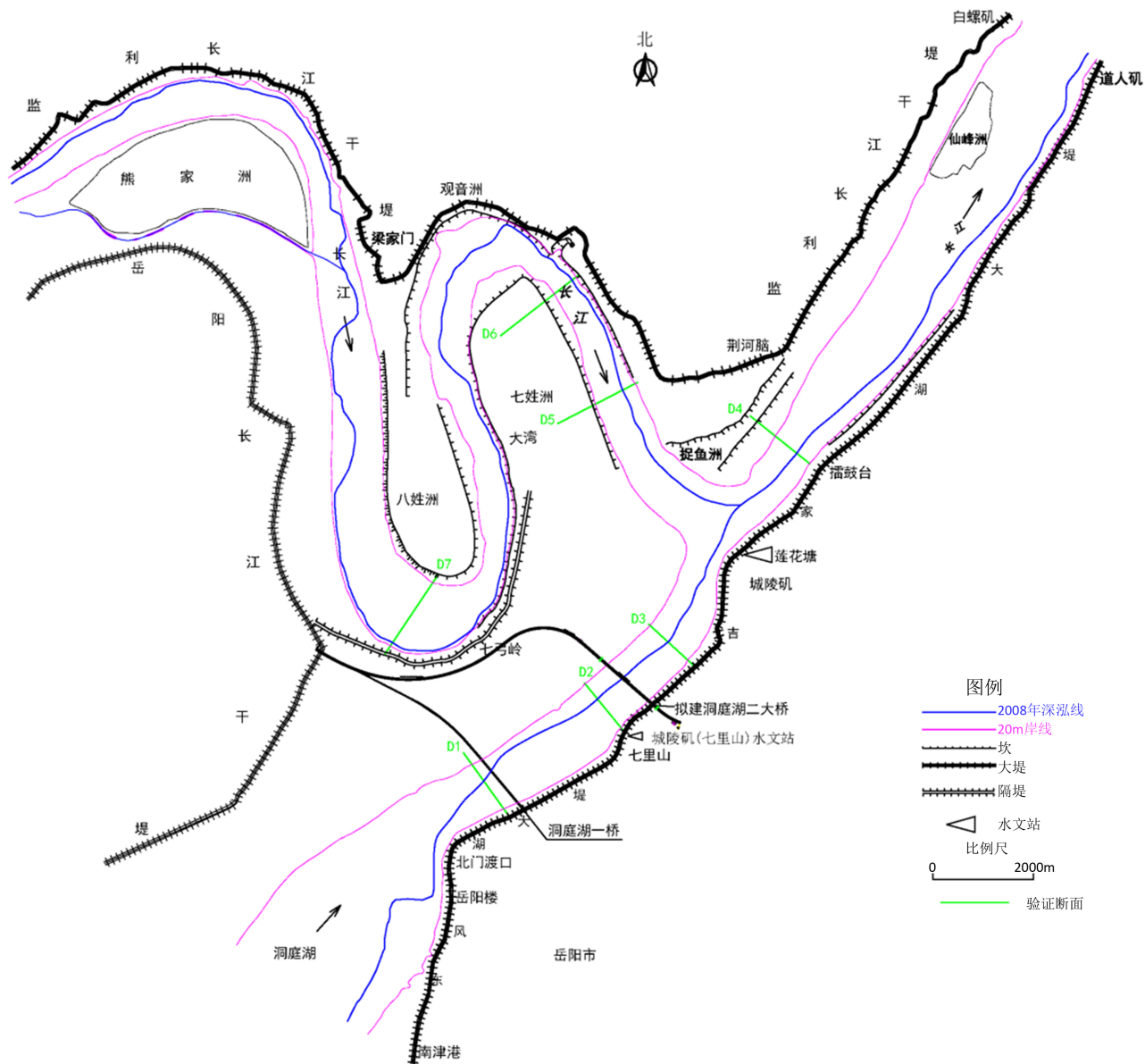


Figure 1. River trends of the engineering river section
图 1. 工程河段河势图

的汇流点在近 40 年内下移超过 1000 m, 而近年变幅较小; 根据洞庭湖区泥沙淤积及荆江水沙下泄的发展趋势, 在自然演变状态下, 汇流点仍将呈小幅度下移趋势。从 1985 年开始实施护岸工程以来, 基本控制了河道岸线的崩坍趋势。目前, 下荆江河道岸线变化较小, 河势渐趋稳定。

城陵矶至道人矶河段位于洞庭湖与下荆江的汇流段, 受上游来水来沙的影响较为敏感, 表现为河床冲淤、洲滩消长。由于该河段边界条件较好, 河道岸线变化较小, 主流基本保持稳定, 河道将继续保持顺直分叉的河道形势。

三峡工程蓄水后, 下游河段水流含沙量较蓄水前明显减小, 总体上看, 一定时期内坝下游河道将可能发生沿程冲刷。受此影响, 工程河段可能发生一定程度的冲刷, 但由于上游来水来沙量大小及其过程具有一定的随机性, 三峡工程蓄水后在坝下游河段总体表现为冲刷的背景下, 本河段仍可能发生冲淤交替的现象, 但这种冲

淤交替不会对总体河势造成较大影响。

2.2. 拟建工程概况

考虑到工程位于江湖汇流段,属防洪敏感点,同时兼顾通航及水利规划要求,拟建桥梁主桥采取桥墩布设尽量减少数量、规避主泓区域的设计措施,即:尽量加大跨径、减少河段内的桥墩数,且将桥墩布设在非主流的滩地上,降低对行洪安全的影响。设计采用双塔双跨钢桁架梁悬索桥,尽量加大跨径,将左岸桥墩布设于左岸滩地上、右岸桥墩布设于右岸大堤背水面,主河道内不布设桥墩,降低对行洪安全的影响。拟建桥梁主桥跨径组成为(1480 + 460) m。东塔(右岸)桩号 K53 + 76,位于东洞庭湖岳阳岸大堤内侧陆地上;西塔(左岸)桩号 K54 + 556,位于东洞庭湖君山侧滩地上。东锚碇(右岸)散索鞍 IP 点桩号 K52 + 616,西锚碇(左岸)散索鞍 IP 点桩号 K55 + 47,主缆跨径布置为(460 + 1480 + 491) m。

主桥左岸桥塔位于左岸滩地上,右岸桥塔位于右岸大堤背水侧;岳阳侧和君山侧主桥副孔均为 55 m 连续刚构。君山侧引桥为 55 m 现浇连续梁,跨君山干堤时引桥为(70 + 110 + 70) m 悬浇连续梁,之间引桥有(37.59 + 3 × 55 + 37.59) m 现浇连续梁过渡。

3. 模型构建与验证

3.1. 二维水流数学模型

1) 计算范围

综合考虑拟建工程所在河道的河势、工程修建后可能的影响范围等因素,选取长江进口处为梁家门(熊家洲洲尾)附近,洞庭湖进口处为南津港;出口为长江仙峰洲洲头附近,总共长约 20 km 的河段作为二维数学模型的计算区域。

2) 网格布置

为了合理布置计算网格,采用混合网格(采用分块对接法生成,即分别生成贴体结构网格和非结构三角形网格,并进行拼接)。因计算区域内地形比较复杂,采用 Delaunay 三角化法对计算区域进行网格划分,网格间距最大为 100 m,最小为 40 m;为能较好反映工程处真实地形,对工程沿线采用沿河宽方向网格宽度约 5~10 m,沿水流方向网格长度约 10~20 m 的贴体结构网格。在计算区域内共布置了 43,196 个网格节点和 82,081 个计算单元(见图 2)。

3) 工程概化

拟建大桥的主要阻水建筑物为桥墩,工程 Z12#桥墩为索塔(主墩),Z13#~Z25#、Y1#~Y91#桥墩为辅墩。

为在数学模型中反映拟建工程对河道水流的影响,一方面在网格剖分时尽可能在工程附近对网格进行局部加密,另一方面则采用局部地形修正与局部加糙进行概化处理来反映其影响。地形修正的主要方法是假定河底高程增加值所阻挡的流量与工程阻挡的流量相同,通过增加工程所在网格节点的河底高程来反映工程的阻水影响;局部加糙的主要方法是认为桥墩的阻水效果可通过增加局部阻力来实现。

3.2. 物理模型设计

物理模型设计范围同数学模型。

1) 几何相似

根据试验目的和要求以及试验场地情况,确定模型平面比尺 $\lambda L = 600$,垂直比尺 $\lambda h = 150$,模型变率 $\eta = 4$ 。

2) 水流运动相似

物理模型按照阻力相似和重力相似设计。地形采用水泥砂浆抹面,由于水泥砂浆抹面的一般糙率在 0.013 左右,故根据河道实际糙率进行适当加糙,在主槽内对水泥砂浆抹面后的床面进行打毛处理,在滩地则采用塑

料花加糙。模型平面布置见图 3。

3) 模型制作

模型采用 2008 年 11 月实测的地形资料制作。沿河道共布置 15 个固定水位测点(P1、P2...P15)和 8 个流速观测断面(CS1、CS2...CS8)。此外,另布置流速观测点 48 个,其中拟建桥位及洞庭湖一桥桥位上、下游流速观测点 26 个,近岸近堤流速观测点 22 个。

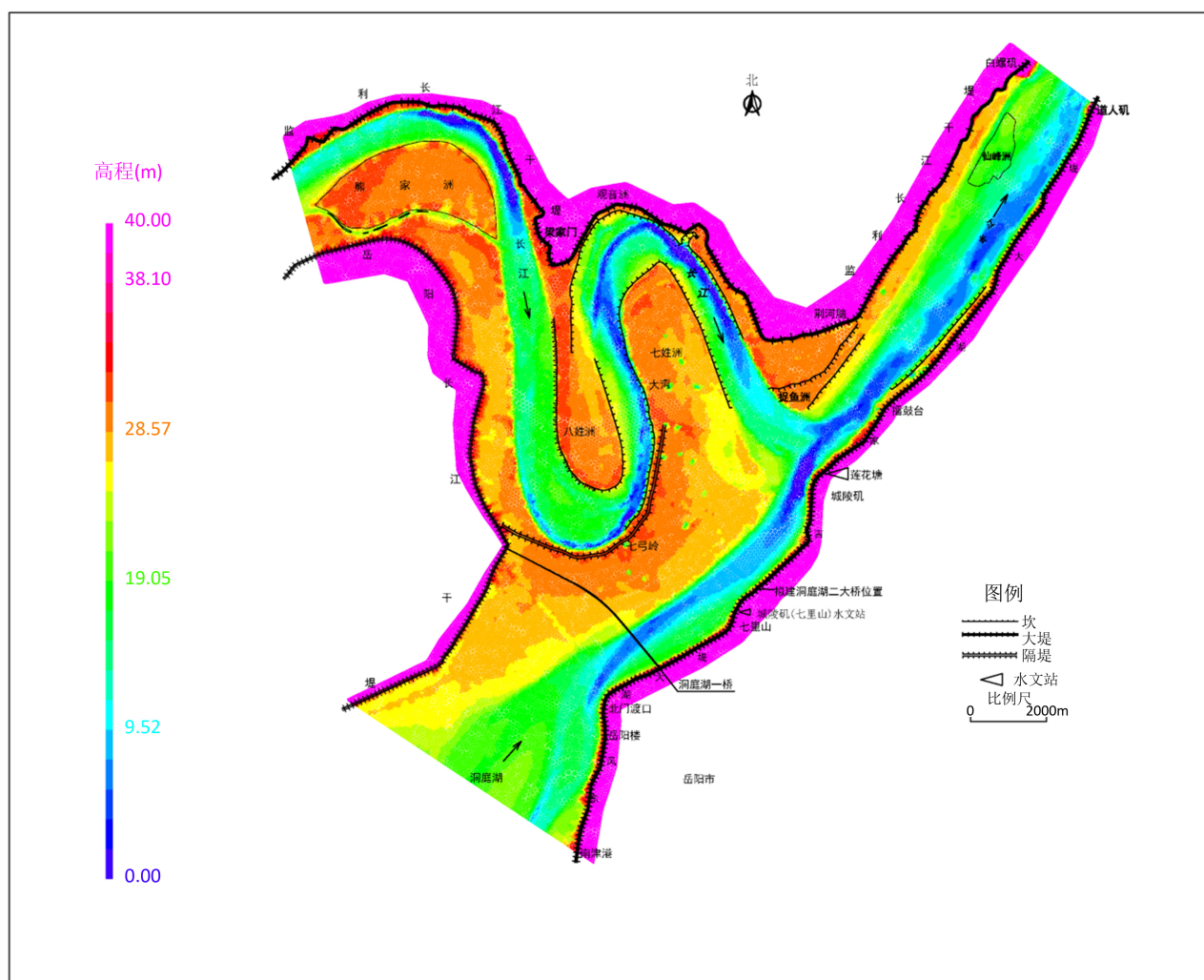


Figure 2. Grid arrangement of computing area

图 2. 计算区域网格布置

3.3. 模型验证

3.3.1. 模型验证资料

采用计算河段 2008 年 11 月实测水下地形资料,采用该河段 2008 年 11 月($Q_{\text{长江}} = 12,000 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{洞庭湖}} = 13,100 \text{ m}^3/\text{s}$)实测同步资料,作为低水验证资料。采用城陵矶(七里山)和莲花塘站 1996 年 7 月实测洪水资料($Q_{\text{长江}} = 23,700 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{洞庭湖}} = 43,800 \text{ m}^3/\text{s}$),作为高水验证资料。

3.3.2. 二维水流数学模型验证成果

经验证,水位的计算值与实测值基本吻合,其误差一般不超过 3 cm;流速的计算值与实测值基本一致,两

者的误差一般小于±5%。见图 4、图 5。

3.3.3. 物理模型验证成果

经验证，模型与原型水位最大误差值为 0.05 m，说明模型水面线与原型水面线基本一致，满足模型与原型综合阻力相似的要求。模型中各个验证断面的水深平均流速的大小及其沿河宽方向的分布均与原型较为吻合；水深平均流速相对误差大部分在 5%以内。水位及流速误差均在模型允许的误差范围内。

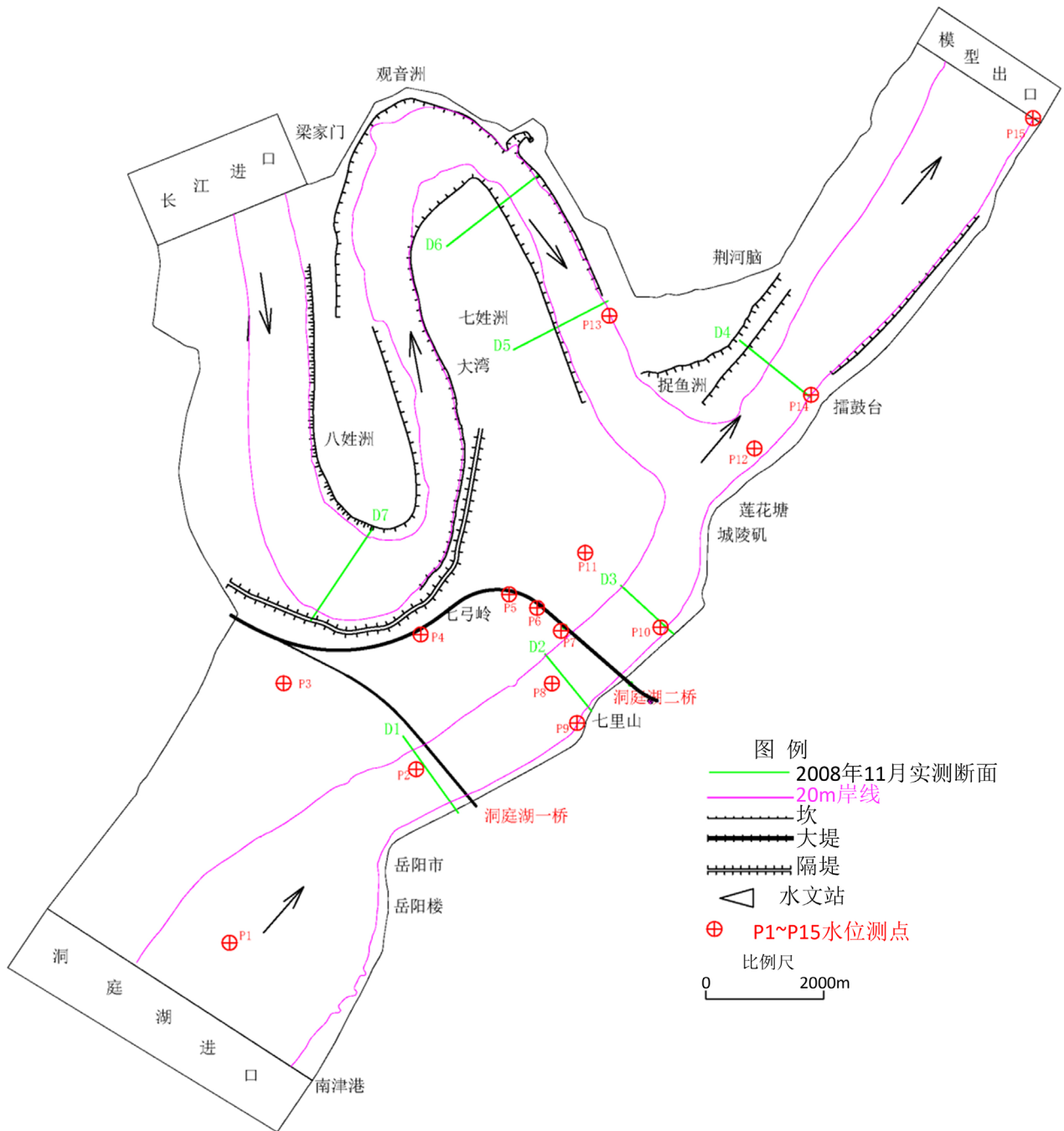


Figure 3. Layout of model test section

图 3. 模型试验段平面布置图

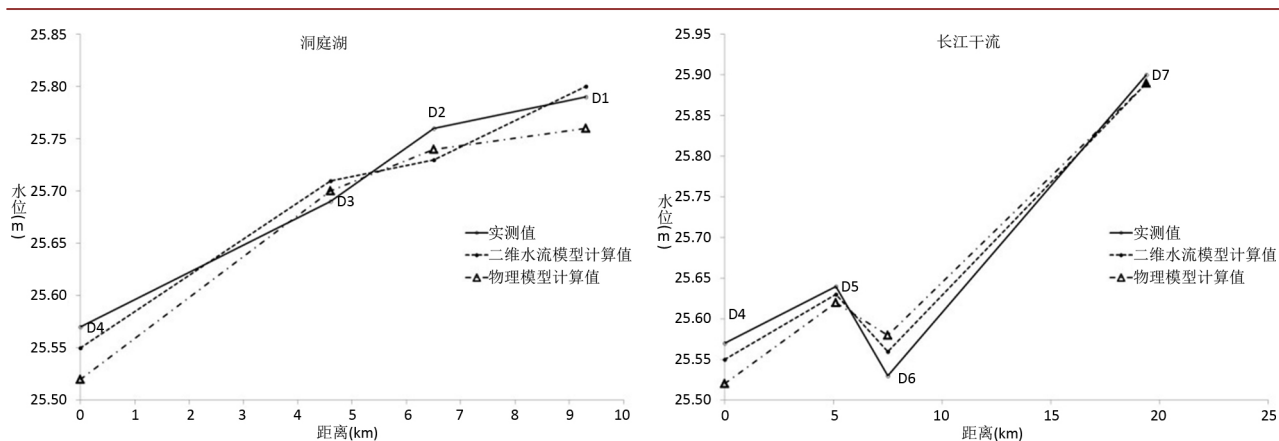


Figure 4. Verification of water surface line

图 4. 水面线验证成果

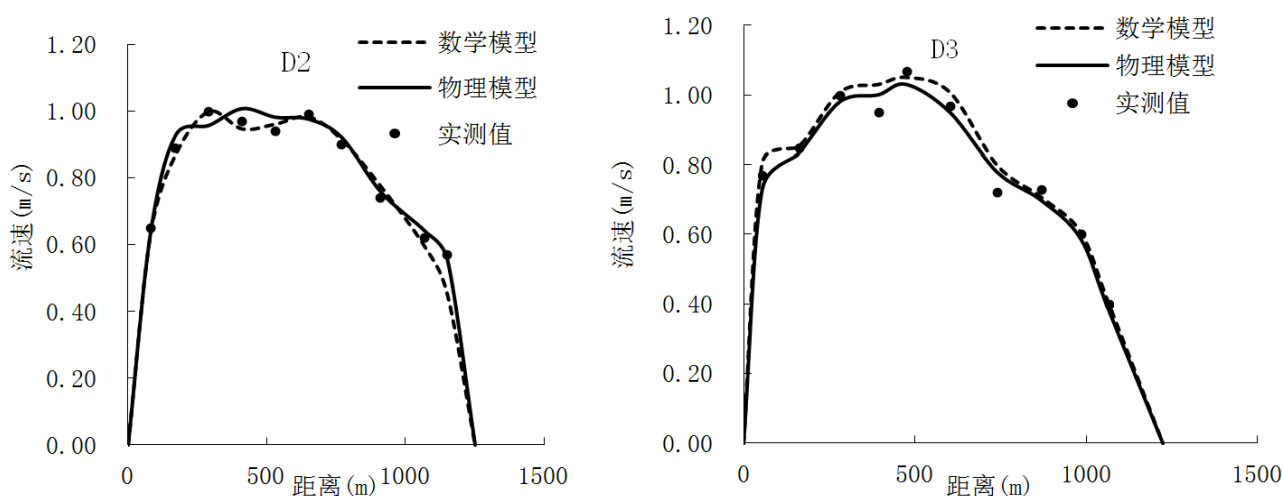


Figure 5. Verification of current velocity

图 5. 流速验证成果

4. 工程对河道行洪的影响分析

4.1. 模拟条件

分别选取防洪设计洪水、98'洪水及 96'洪水三种工况作为计算工况，就工程修建前、后河道水位和流速的变化进行了分析计算。计算工况见表 1。

Table 1. Calculation engineering conditions

表 1. 计算工况表

工况	洪水频率(%)	长江流量(m ³ /s)	洞庭湖流量(m ³ /s)	螺山水位	桥位处水位(m)
工况 1	防洪设计洪水	37,000	28,000	32.03	32.60
工况 2	98' 洪水	35,600	28,900	32.96	33.99
工况 3	96' 洪水	23,600	43,900	32.08	33.30

注：以上高程均采用 1985 国家高程系统。

4.2. 二维水流数学模型分析成果

4.2.1. 水位变化分析

工程实施后,主槽水位基本上无变化;河道水位的变化主要集中在工程附近左岸滩地上的局部区域内,具体表现为工程上游水位壅高,而在其下游水位则有所降低。在不同的上游来流条件下,水位的变化在定性上是一致的,但在定量上则有所不同:

综合以上各种工况的计算成果,96'洪水,工程实施后水位的变化值及变化范围最大,水位壅高最大值为2.7 cm,水位降低最大值为2.4 cm,水位变化值大于0.3 cm的最大影响范围位于桥位上游约980 m和桥位下游约1400 m的区域内。

4.2.2. 流速变化分析

建桥后流速变化主要集中在桥位断面上下游附近的局部区域内,主要表现为:

- 1) 拟建工程的实施对右岸的流速无影响;
- 2) 12#主墩两侧局部区域流速有所增加,其中右侧流速增加区域位于主槽内;
- 3) 左岸滩地上桥墩附近局部区域流速主要表现为减小。

综合以上各种工况的计算成果,对96'洪水,工程实施后流速的变化值及变化范围最大,工程附近局部区域水流流速增加的最大值为0.14 m/s,左岸滩地上流速减小的最大值为0.18 m/s,其中流速减小值大于0.02 m/s的区域位于桥位上游约430 m,及桥位下游约1620 m的范围内;流速增加值大于0.02 m/s的区域位于桥位上游约150 m,及桥位下游约760 m的范围内。

4.2.3. 流向变化分析

桥位断面上主流流向与桥轴线法向夹角一般均在 3° 以内;工程实施前后桥位断面上主槽内流向的变化局限在距左岸滩地约300 m的横向范围内,变化幅度在 2° 以内。

4.3. 物理模型分析成果

4.3.1. 水位试验成果

表1给出了工程修建前后水位观测点上的水位变化情况。在试验条件下,工程实施后主槽中水位基本无变化,滩地上的水位变化表现为:相应于96'洪水工况时水位壅高值最大,水位壅高最大值为4 cm;在防洪设计洪水条件下,水位壅高最大值均为3 cm。

工程修建后桥位附近河段水位壅高最大值为4 cm,位于左岸锚碇上游55 m处(测点P6);其Z12#主墩上游70 m(测点P7)水位壅高3 cm。主槽中的水位基本无变化,桥位附近滩地上的水位变化表现为:Y32#辅墩上游120 m处(测点P4)工程前水位为33.34 m,工程后水位为33.35 m,水位壅高1 cm;Z25#辅墩上游120 m处(测点P5)工程前水位为33.27 m,工程后水位为33.29 m,水位壅高2 cm。

4.3.2. 流速变化试验成果

工程实施前后桥位附近流速变化具有如下特点:

- 1) 拟建工程的实施对流速的影响局限在工程附近的局部区域内,且对右岸的流速无影响,对左岸主槽流速的影响表现为Z12#主墩附近流速增加,其最大增加值为0.05 m/s,最大流速增加区域在横向上距Z12#主墩约400 m。
- 2) 拟建工程的实施将导致滩地上流速的变化,其中桥位上游流速减小最大值为0.15 m/s;桥墩之间流速增加最大值为0.09 m/s;最大影响范围为桥址上游0.5 km、下游1.5 km。
- 3) Z12#主墩及锚碇前缘水流流速减小,其中距Z12#主墩前缘15 m处水流流速减小最大值为0.14 m/s;距锚碇前缘15 m处水流流速减小最大值为0.16 m/s。

4.3.3. 流向变化试验成果

拟建大桥建成后,桥墩对水流会产生一定的绕流和导向作用,导致桥位附近水流流向发生变化。分别分析了工程修建前后桥址断面及其附近断面上主流区的流向变化。结果表明,工程实施前后桥位及其附近主流区流向变化具有如下特点:1)在不同试验工况下,桥位断面上主流流向与桥轴线法向夹角一般在 4° 以内;建桥后桥位断面上主流流向的变化局限在距左岸滩地约300 m的横向范围内,变化幅度在 2° 以内;2)工程修建后,工程上、下游河段流向变化在 2° 以内,局限在桥位上游0.8 km、下游1.5 km的纵向范围内,横向上距左岸滩地约300 m。

4.4. 结果对比

数学模型计算左岸滩地桥位上游水位壅高值略小于物理模型,流速变化略大于物理模型计算成果。

现状地形条件下:防洪设计洪水条件下,滩地水位壅高最大值,数学模型为0.024 m,物理模型为0.03 m,左岸滩地流速增加最大值,数学模型为0.10 m/s,物理模型为0.08 m/s,流速减小最大值,数学模型为0.14 m/s,物理模型为0.12 m/s;96'洪水条件下,滩地水位壅高最大值,数学模型为0.027 m,物理模型为0.04 m,左岸滩地流速增加最大值,数学模型为0.14 m/s,物理模型为0.09 m/s,流速减小最大值,数学模型为0.18 m/s,物理模型为0.15 m/s。见表2、表3。

5. 结论

1)桥梁主桥采用双塔双跨钢桁架梁悬索桥,采取桥墩布设尽量减少数量、规避主泓区域的设计措施后,数学模型和物理模型结果均显示,工程建设对河道水位及流场改变不大,影响范围有限,不会对工程河段河道行洪产生明显不利影响。

Table 2. Water level changes before and after construction

表 2. 工程修建前后水位变化表

测点	距桥址距离(m)	变化值(cm)			备注
		防洪设计洪水	98'洪水	96'洪水	
P1	8060	0	0	0	模型进口
P2	3635	0	0	0	一桥 12#墩上游 400 m
P3	4050	0	0	0	一桥 70#墩上游 600 m
P4	120	1	1	1	拟建大桥 Y32#墩上游 120 m
P5	90	2	2	2	拟建大桥 Z25#墩上游 90 m
P6	55	3	2	4	拟建大桥左岸锚碇上游 55 m
P7	70	2	2	3	拟建大桥 Z12#墩上游 70 m
P8	900	0	0	0	拟建大桥上游 900 m
P9	1125	0	0	0	城陵矶(七里山)水文站右岸
P10	-550	0	0	0	拟建大桥下游 550 m (主槽)
P11	-1040	0	0	0	拟建大桥下游 1040 m
P12	-4350	0	0	0	莲花塘水位站
P13	-5000	0	0	0	长江利 12 断面
P14	-5700	0	0	0	拟建大桥下游 7 号测流断面
P15	-11,700	0	0	0	模型出口

Table 3. Comparison of physical model test and mathematical model calculation results

表 3. 物理模型试验及数学模型计算成果比较

洪水	模型	水位抬高最大值(cm)	水位降低最大值(cm)	流速增加最大值(m/s)	流速减小最大值(m/s)
防洪设计洪水	物理模型	3.0	/	0.08	0.12
	数学模型	2.4	2.0	0.10	0.14
98'洪水	物理模型	2.0	/	0.03	0.10
	数学模型	2.1	1.8	0.08	0.12
96'洪水	物理模型	4.0	/	0.09	0.15
	数学模型	2.7	2.4	0.14	0.18

2) 两种方法取得的成果进行相互对比、校核,避免了一种方法可能存在的误差对评价结论带来的影响,两种方法取得成果无本质区别,均可以作为工程影响程度分析的基础数据。考虑到数学模型计算水位壅高值略小于物理模型,流速变化略大于物理模型计算成果,按照偏安全的原则,工程影响程度以计算中较大值作为评价工程建设影响的依据。

3) 为进一步减小工程建设对河道行洪的影响,建议加强河段内桥墩的尺寸和形状研究,尽量减小阻水面积,提升桥墩的流线型设计与河段内不同洪水流态的吻合度。

基金项目

国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402305)。

参考文献

- [1] 罗敏逊, 卢金友. 荆江与洞庭湖汇流区演变分析[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(3): 11-16.
LYO Minxun, LU Jinyou. Analysis on fluvial processes of confluence area of Jingjiang River and Dongting Lake. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(3): 11-16. (in Chinese)
- [2] 唐峰, 李发政, 渠庚, 朱勇辉. 长江城陵矶汇流河段水流运动特性试验研究[J]. 人民长江, 2011, 42(7): 43-46.
TANG Feng, LI Fazheng, QU Geng and ZHU Yonghui. Experimental study on flow features of Chenglingji confluence reach of Yangtze River. Yangtze River, 2011, 42(7): 43-46. (in Chinese)
- [3] 张细兵. 江湖河网水沙运动数值模拟技术[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2012.
ZHANG Xibing. Research and application on flow and sedimentation simulation technology for the river and lake network. Wuhan: Wuhan University. (in Chinese)
- [4] 张慧, 谷利华, 李会云. 荆岳铁路专线洞庭湖大桥河工模型试验研究[A]. 水水泥沙研究新进展, 2010: 266-270.
ZHANG Hui, GU Lihua and LI Huiyun. Study on river model test of Dongting Lake Bridge on Jingyuerailway special line. New Progress in Hydrological and Sediment Research, 2010: 266-270. (in Chinese)
- [5] 张慧, 黎礼刚, 郑文燕, 李三琪. 武汉河段二七路长江大桥河工模型试验研究[J]. 人民长江, 2008, 39(1): 57-58.
ZHANG Hui, LI Ligang, ZHNG Wenyan and LI Sanqi. Study on river model test of Erqi Road Yangtze River bridge in Wuhan Reach. Yangtze River, 2008, 39(1): 57-58. (in Chinese)
- [6] 曹兵, 王海洋. 江湖汇流段特大涉水建筑物行洪影响研究[J]. 山东水利, 2015(4): 18-19.
CAO Bing, WANG Haiyang. Study on flood discharge effect of extra-large water related buildings in river confluence section of Yangtze River and Lake. Shandong Water Resources, 2015(4): 18-19. (in Chinese)
- [7] 龚延庆, 王智, 郭学仲. 松花江华龙大桥河工模型试验[J]. 东北水利水电, 2004, 22(7): 48-50.
GONG Yanqing, WANG Zhi and GUO Xuezhong. River model test of Hualong Bridge on Songhua River. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2004, 22(7): 48-50. (in Chinese)
- [8] 张正波. 嫩江大桥动床河工模型试验研究[J]. 东北水利水电, 2017, 35(5): 39-40.
ZHANG Zhengbo. Test study on river models with moveable bed material for Nenjiang Bridge. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2017, 35(5): 39-40. (in Chinese)
- [9] 梅军亚, 夏薇, 毛北平, 王驰. 长江江湖汇流段河床演变分析[J]. 人民长江, 2006, 37(12): 68-71.

MEI Junya, XIA Wei, MAO Beiping and WANG Chi. Analysis of river bed evolution in the confluence section of Yangtze River and Lake. *Yangtze River*, 2006, 37(12): 68-71. (in Chinese)

- [10] 孙元元, 毛北平, 夏薇, 王驰. 三峡水库蓄水后长江江湖汇流段河道演变分析[J]. *长江工程职业技术学院学报*, 2013, 30(2): 1-5.

SUN Yuanyuan, MAO Beiping, XIA Wei and WANG Chi. Analysis on the river channel evolution of the convergence of the Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Changjiang Engineering Vacation College*, 2013, 30(2): 1-5. (in Chinese)