

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.007

甬江感潮河流桥梁群对防洪纳潮累积影响

褚晓岑,唐洪武,袁赛瑜,陈 珺

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为研究甬江上已建桥梁群对感潮河流防洪纳潮的影响,基于 Delft3D 模型建立甬江二维非恒定流数学模型,并使用原型观测数据对模型进行参数率定和验证,开展典型洪水和潮汐条件下桥梁群对甬江水流流速和水位的影响研究。结果表明:单个桥梁对水流的影响主要在桥位近区,桥梁群因影响范围的重叠而产生累积影响,且增加了对水流的影响范围。通过不同洪水和潮汐条件下桥梁群对水流的影响比较发现,大潮小洪情况下桥梁群对甬江水流的影响较大洪小潮情况下更为明显。

关键词:感潮河流;桥梁群;流速;甬江

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)03-0223-07

Effects of a group of bridges on flood and tide control of Yongjiang River

CHU Xiaocen, TANG Hongwu, YUAN Saiyu, CHEN Jun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effects of a group of bridges built across the Yongjiang River, a tidal river, on the flood and tide control of the river, a two-dimensional numerical model was established for the unsteady flow of the Yongjiang River based on the Delft3D model. The established model was calibrated and verified by the field observation data and used to study the influence of the group of bridges on the flow velocity and water level of the river under different flood and tide conditions. The results show that a single bridge has an effect on the flow near the bridge, while a group of bridges have a much greater accumulative influence on the flow velocity and water level and increase the influenced area. The effects of the bridges on water flow under different flood and tide conditions were compared. It was found that the effects of the bridges were more significant under the conditions of a spring tide and a small flood than under the conditions of a large flood and a neap tide.

Key words: tidal river; a group of bridges; flow velocity; Yongjiang River

甬江流域共建有 7 座过江桥梁,分布在姚江、奉化江和甬江等感潮河流上(图 1),其中江夏桥、解放桥、新江桥、甬江大桥和外滩大桥等 5 座桥梁在河道内设有桥墩。桥墩会引起附近水域河床阻力、水流流态、流速分布及过流能力等发生变化,并对河势稳定和防洪纳潮安全带来一定影响,特别在水位、流速随时间周期性变化的感潮河段,水动力条件更为复杂。

赵淳逸^[1]以甬江大桥为例,分析了桥墩对潮流场的影响。潘仁友^[2]分析了惊驾桥对三江口河道流速、水位、纳潮量的影响。Li 等^[3-5]针对单个桥墩对水流的影响进行了数值模拟研究。除了单座桥梁的影响,桥梁群对河道水流的累积影响也越来越受到关注。李振青等^[6]研究了长江下游世业洲汊道段岸线上所有桥梁码头等涉水建筑物对该河段防洪的累积影响,发现涉河工程群在长江洪水时会引起整个河段水位明显抬高。陈细兵等^[7]选取武汉河段和扬中河段作为代表性河段,分析了桥梁群和码头群两类主要涉河工程群对

收稿日期:2013-09-05

基金项目:国家自然科学基金委员会面上项目(51279046);国家杰出青年科学基金(51125034)

作者简介:褚晓岑(1988—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事河流动力学研究。E-mail:chuxiaocen77@163.com

通信作者:唐洪武,教授。E-mail:hwtang@hhu.edu.cn

河道洪水水位及流场的累积影响,结果表明,当群体工程的影响积累到一定程度,会造成整个河道水位普遍壅高、主流线摆动及汉道分流比变化,从而可能对河道的行洪与河势稳定带来不利影响。英晓明等^[8-13]建立了感潮河流的数学模型以研究感潮河流的水流特征。目前对于桥梁群累积影响的研究多为定性分析,且水流条件相对简单;而感潮河流水位和流速随时间周期性变化,加上桥梁群阻水影响,水流条件非常复杂。本文采用二维非恒定流数学模型研究甬江感潮河流桥梁群对河道防洪纳潮的累积影响。

1 模型建立

1.1 基本控制方程

本文使用 Delft3D 模型的 Flow 水动力模块进行三江口的水流计算。Delft3D 模型具有计算稳定、精度高等特点,其水动力模型可用于模拟二维或三维非恒定流,其控制方程组成如下。

a. 水流运动连续性方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = 0 \tag{1}$$

b. 曲线网格坐标系下 ξ, η 方向动量方程:

ξ 方向(水平方向)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta} - \frac{vv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_{\xi} + F_{\xi} + M_{\xi} \tag{2}$$

η 方向(垂直方向)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{uu}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_{\eta} + F_{\eta} + M_{\eta} \tag{3}$$

式中: ζ ——参考水平面上的水深; t ——时间步长; $\sqrt{G_{\xi\xi}}、\sqrt{G_{\eta\eta}}$ —— $\xi、\eta$ 方向的坐标变换系数; d ——参考水平面下的水深; $u、v$ ——在正交曲线网格坐标系下 $\xi、\eta$ 方向上的流速; $F_{\xi}、F_{\eta}$ —— ξ 和 η 方向上的紊动动量通量; ρ_0 ——水体密度; f ——科式力系数; $P_{\xi}、P_{\eta}$ —— $\xi、\eta$ 方向上的水压力梯度; $M_{\xi}、M_{\eta}$ —— $\xi、\eta$ 方向上动量的源或汇。

1.2 网格布置和参数率定

模型采用交替方向隐式差分格式对方程进行离散求解,计算范围从上游姚江的姚江大闸(边界1)和奉化江的澄浪堰(边界2)开始,一直到甬江入海口(边界3),全长约 32 km(图1)。采用非均匀正交曲线网格坐标系统,根据研究区域的重要程度以及局部水流复杂情况确定网格剖分精度。纵向网格宽度为 15 ~ 70 m,网格节点数为 732 个;横向网格宽度为 15 ~ 60 m,网格节点数为 132 个。在岸线剧烈变化处边界附近模型网格正交性稍差,其他区域网格节点基本保持正交,正交偏差 $\pm 3^{\circ}$ 。桥墩分为两类:(a)主桥墩,由于尺寸较大,与计算网格尺度相当,因此直接将桥墩所在的网格节点作不过水处理;(b)其他桥墩,采取修改地形和糙率的方法进行概化^[14-15]。滩槽采用不同糙率反映其不同的床面阻力,河槽糙率取 $n=0.018 \sim 0.020$,滩地糙率取 $n=0.03 \sim 0.05$ ^[16],时间步长取为 6 s。

2 模型验证

2.1 实测资料

地形资料采用宁波水文站 2010 年的实测数据。开边界条件采用 2010 年 7 月 12 日 12:00 至 13 日 15:00 和 2010 年 7 月 20 日 12:00 至 21 日 15:00 历时 27 h 的整点实测大、小潮潮位和流速资料。入口边界条件采用姚江和奉化江实时潮位,出口边界条件采用甬江实时流量。对 2010 年 7 月 12 日和 20 日 2 次实测的大、小潮水流进行二维非恒定流数学模型计算,使用三江口、镇海水利局处水尺得到的实时潮位以及断面 DM1、DM2 的流速及流

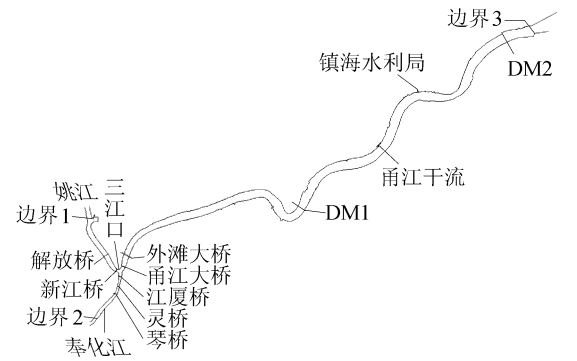


图1 三江口桥梁群分布

Fig. 1 Distribution of bridges in Sanjiang Estuary

向实时数据对该模型进行验证。

2.2 潮位验证

三江口水文站、镇海水利局站实时潮位验证结果如图 2 所示。潮位基面为 85 基面。验证结果表明:计算潮位的相位和潮位值与实测潮位吻合良好,相位误差小于 0.25 h,水位值误差小于 0.15 m。

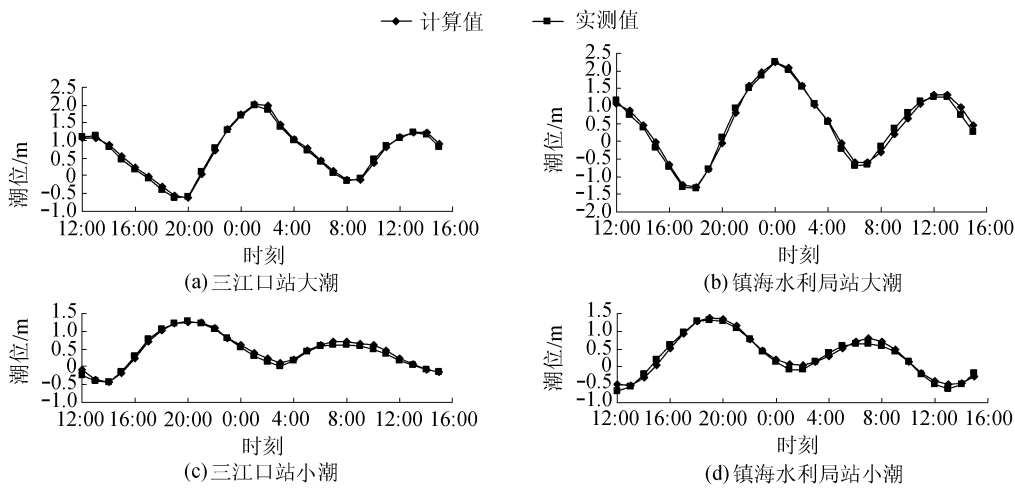


图 2 潮位站潮位验证
Fig. 2 Verification of tide levels at tidal stations

2.3 流速流向验证

断面 DM1、DM2 的水流流速和流向验证结果如图 3、图 4 所示。图中,二维非恒定流数学模型较好地复演了流域范围内的潮流运动过程,模型计算所得的流速、流向和相位与实测值基本吻合。可见,本文所建二维非恒定流数学模型能较好地模拟感潮河流的非恒定流水流运动情况,可以用来预测桥梁群对感潮河流水流的累积影响。

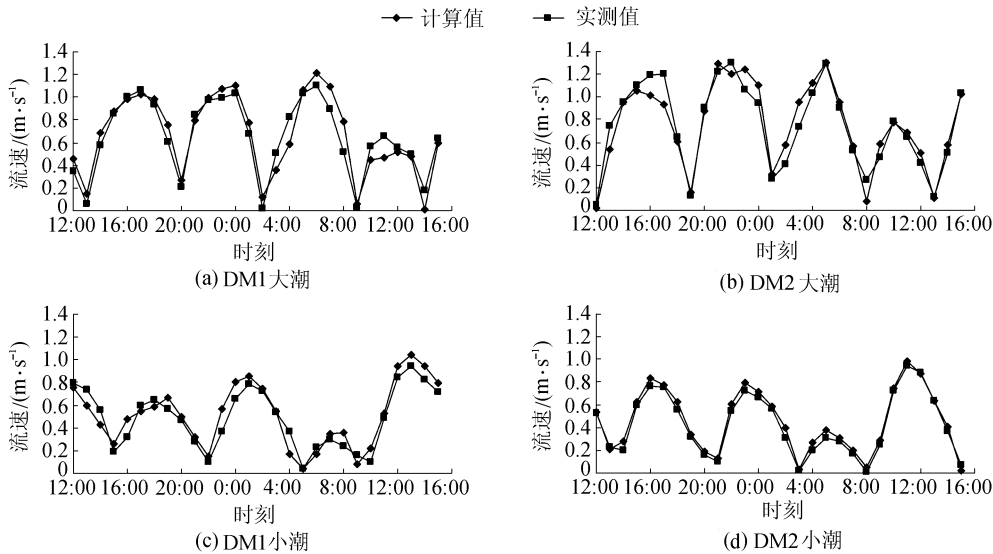


图 3 流速验证
Fig. 3 Verification of flow velocities

3 模型计算及结果分析

3.1 模拟方案

使用验证后的甬江二维非恒定流数学模型使计算不同洪潮组合条件下不同桥梁组合对甬江水流的影响。潮洪工况如下:工况 1,5 a 洪水流量+100 a 潮位;工况 2,100 a 洪水流量+5 a 潮位。边界条件见图 5,姚江和奉化江选用潮位边界,甬江选用流量边界。3 种桥梁组合分别为:方案 1,单座桥梁影响,选取甬江大桥;方

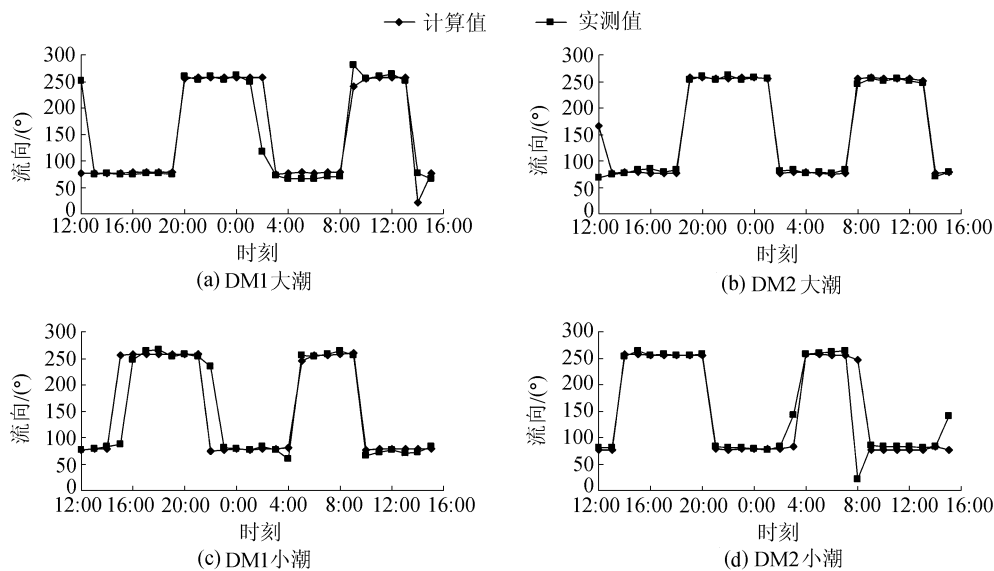


图 4 流向验证

Fig. 4 Verification of flow directions

案 2,2 座桥梁影响,选取甬江大桥和外滩大桥;方案 3,桥梁群影响,选取 5 座涉水桥梁共同作用的情况。

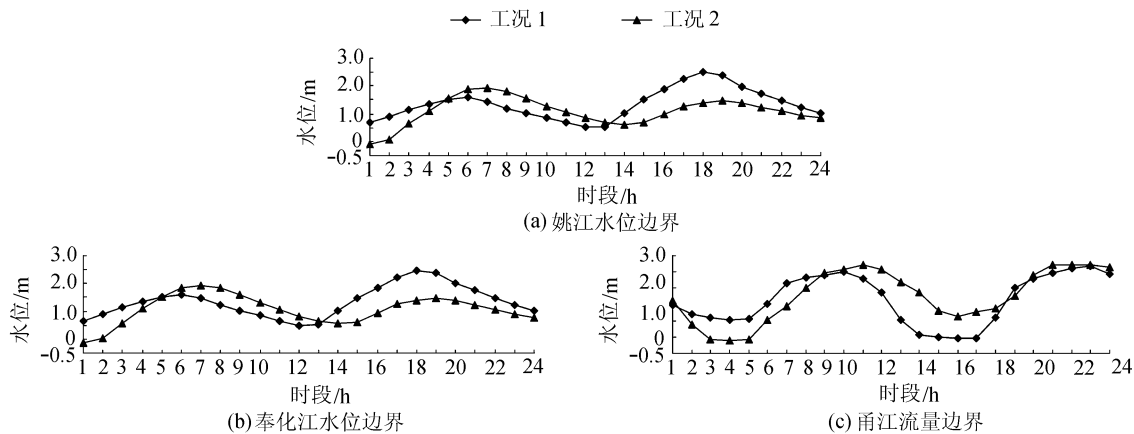


图 5 2 种工况下的边界条件

Fig. 5 Boundary conditions under two hydrological conditions

表 1 为 5 座涉水桥梁的桥墩情况,表中阻水面积比由百年一遇洪水条件下得到。甬江大桥、外滩大桥、新江桥便桥因桥墩尺寸较大,桥墩所在的网格节点作不过水处理;解放桥和江厦桥由于桥墩尺寸很小,采取修改地形和加大糙率进行概化。

3.2 流速变化

桥墩对水流的影响一般在潮位涨急和落急时最为明显,本文选取涨急和落急时刻的流速分别进行比较,并以工况 1 为例。为体现桥梁群对水流的累积影响,选取甬江大桥上游 100 m 处 DM3 和下游 100 m 处 DM4 进行平均流速比较,见表 2,表中流速变化相比于无桥梁情况增加为正,减小为负。图 6 为工况 1 不同桥梁组合下涨急和落急的等流速线图。

3.2.1 单桥影响

如图 6 所示,单座桥(甬江大桥)主要影响在桥位近区,桥墩的阻水作用造成局部水流改变。工况 1,涨

表 1 桥墩尺寸统计

桥梁名称	跨数/ 跨	桥墩数/ 个	桥墩尺寸/m		阻水面积 比/%
			宽	长	
江厦桥	5	2	1.5	22	7.17
新江桥便桥	4	3	3.7	21.2	9.36
解放桥	11	11	0.8	20.0	8.52
甬江大桥	2	1	15.5	35.0	5.62
外滩大桥	2	1	22.0	40.0	2.69

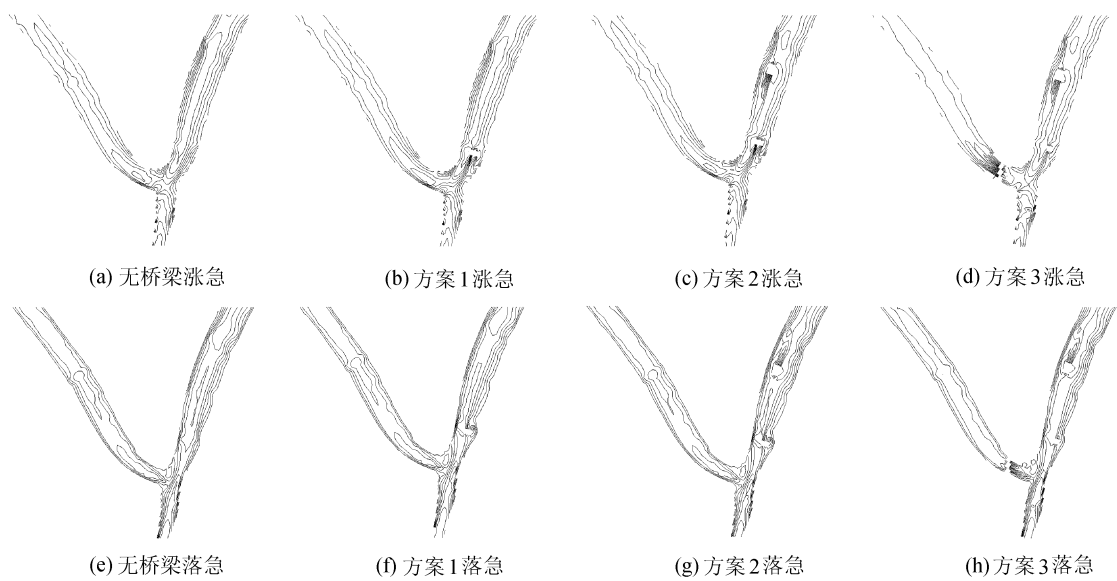


图 6 工况 1 涨急、落急时刻流速对比

Fig. 6 Comparison of flow velocities during flood and ebb tides in case 1

急时上游流速增大,下游流速略有减小;落急时上游流速略有减小,下游流速增大,距离大桥越近所受影响越明显。桥墩对上下游一定范围内的水流都有影响。涨急时上游受影响的范围约为 1 km,下游受影响的范围较小,约为 0.4 km;落急时上游受影响的范围约为 0.5 km,下游约为 0.8 km。由于大尺寸桥墩有束窄河道的作用,甬江大桥桥墩偏向右岸,过水面积变小且水流偏于左侧。由于桥墩阻水,桥墩右侧形成马蹄状水流;桥墩后方流速减小,且水流状态比较复杂。

3. 2. 2 两桥影响

对比两桥与单桥的计算结果发现,由于甬江大桥和外滩大桥的累加影响,导致不管是涨急还是落急,位于两桥同一侧的 DM3 流速变化幅度都比单桥的要大。而甬江大桥和外滩大桥对两桥中间区域水流的影响是相反的。在甬江大桥的影响下,外滩大桥的存在增大了涨急时 DM4 的流速,甚至使该断面流速较无桥时都有所增加,同时减小了落急时 DM4 的流速。两座桥的影响区域较一座桥时有所增大,涨急时影响区域延伸到甬江大桥上游约 2 km,外滩大桥下游约 0.5 km;落急时延伸到甬江大桥上游约 0.8 km,外滩大桥下游约 1.5 km。由此可知,两桥对水流的累积影响与单桥影响相比有明显增加,甚至改变了单桥时流速的变化趋势。外滩大桥桥墩偏向左岸,与单桥影响类似,过水面积变小且水流偏于右侧。

3. 2. 3 多桥影响

与单桥和两桥相比,由于新江桥和江夏桥位于 DM3 的上游,对该断面流速的影响与下游两座大桥的影响相反,削弱了方案 1 及方案 1 对于该断面流速的影响程度。而在 DM4 则加强了甬江大桥对该处流速的影响,而削弱了外滩大桥的影响。多座桥梁叠加产生的影响范围远远大于单桥和两桥,涨急时影响范围上游延伸到奉化江边界处,下游延伸到外滩大桥下游约 5 km 处;落急时延伸到甬江大桥上游约 1.5 km 处,外滩大桥下游约 8 km 处。由于新江桥和解放桥的影响,涨急时,姚江的流速大幅降低,奉化江和甬江流速有所增大;落急时,姚江和甬江流速有所减小,奉化江流速变化不明显。

3. 2. 4 潮洪影响

大潮小洪,涨急时影响范围上游延伸到奉化江边界处,下游延伸到外滩大桥下游约 5 km 处;落急时到甬江大桥上游约 1.5 km 处,外滩大桥下游约 8 km 处。大洪小潮,涨急时影响范围上游延伸到奉化江澄浪堰处,外滩大桥下游约 4 km 处;落急时到甬江大桥上游约 1 km,外滩大桥下游约 5 km。可见,大潮小洪时的影

表 2 流速变化统计

Table 2 Velocity variations of all cases

类型		流速变化/%					
		工况 1			工况 2		
		单桥	两桥	多桥	单桥	两桥	多桥
涨潮	DM3	15.8	18.3	4.6	7.6	8.6	1.2
	DM4	-2.1	2.2	3.8	-1.6	0.7	1.4
落潮	DM3	-3.2	-5.0	-2.7	-3.7	-4.9	-2.8
	DM4	11.8	10.5	0.3	7.4	6.7	0.9

响范围大于大洪小潮。涨急时,大潮小洪时的流速明显大于大洪小潮;落急时,2种工况的计算结果差异不明显。总的来说,桥梁群对大潮小洪情况下流速影响要大于大洪小潮情况。

3.3 水位壅高

分析桥梁群对水位的影响,选取水位最大值时刻绘制各方案的水位等势线,见图7和图8。工况1,单座桥梁影响下涨潮时甬江大桥上游水位降低,下游壅高;DM3处水位降低1%,DM4处水位壅高0.1%。落潮时水位变化与涨潮时相反,水位壅高影响范围约为甬江大桥上游4 km至下游5 km。两桥影响下,甬江大桥上下游水位均有所提高,DM3处水位提高约0.05%,DM4处水位提高0.5%,影响范围则为甬江大桥上游约8 km处至外滩大桥下游约6 km。这是由于外滩大桥和甬江大桥叠加影响,导致外滩大桥上游水位壅高比较明显。多桥影响下,DM3处水位壅高1.2%,DM4处水位壅高1.1%,明显大于单桥和两桥的影响。影响范围延伸至二维非恒定流数学模型上游边界处,下游达外滩大桥下游约15 km。可见,桥梁数越多,水位壅高越明显,影响范围越大。对比不同水文条件下桥梁群计算结果发现,与流速变化情况类似,桥梁群在大潮小洪情况下水位变化较为明显。

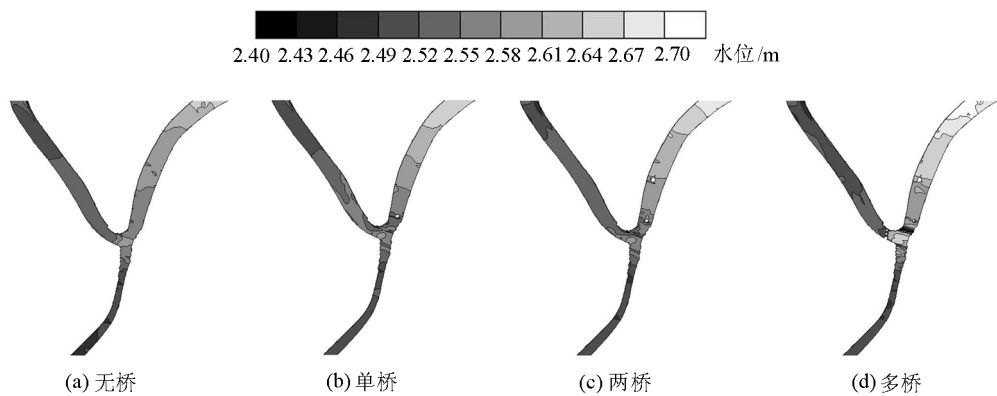


图7 工况1无桥梁及3种桥梁组合的水位等势线

Fig. 7 Comparison of water levels without bridge and with combination of three bridges in case 1

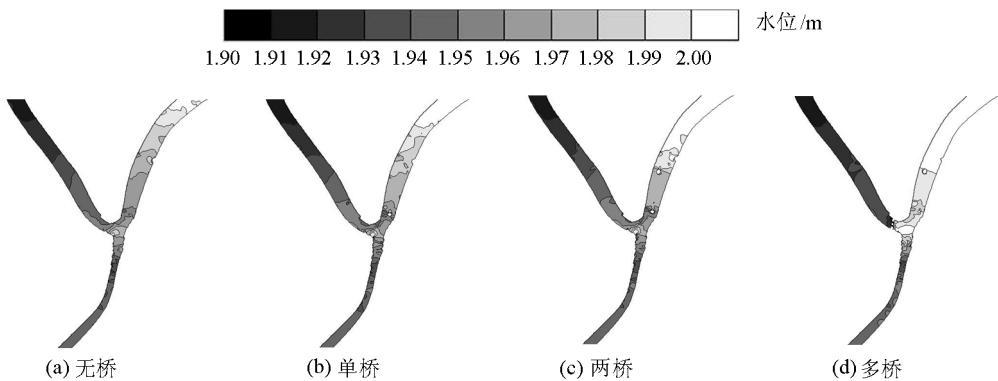


图8 工况2无桥梁及3种桥梁组合的水位等势线

Fig. 8 Comparison of water levels without bridge and with combination of three bridges in case 2

4 结 论

感潮河流甬江上建有多座过江桥梁,对甬江水流形态和行洪纳潮能力产生一定的影响。本文使用Delft3D建立了甬江平面二维非恒定流数学模型,开展了典型洪水和潮汐条件下桥梁群对甬江水流流速和水位的影响研究。结果表明:单个桥梁对水流的影响主要在桥位近区;两桥对同在两桥上流或下游区域的水流产生累加效应,而对两桥之间区域水流的影响有相互削弱的作用;桥梁群因影响范围的重叠而产生累积影响,且增加了对水流的影响范围。桥梁群的存在也将改变河道的水流形态,对流场产生一定的影响。通过对不同潮洪条件下水流的比较发现,在大潮小洪条件下桥梁群对甬江流域水流的影响较大小潮条件下更为明显。桥梁群的影响并不是单个桥梁影响的简单叠加,涉水工程在评估时需要考虑河段内其他工程和水流条件,尽量减少工程群的累积影响。

参考文献:

[1] 赵淳逸. 桥梁工程对感潮河段水动力影响研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[2] 潘仁友. 浅析宁波中心城区桥梁对三江河道行洪的影响[J]. 浙江水利科技,2007(5):50-51. (PAN Renyou. Influence of bridges in Ningbo urban areas on discharge capacity of Sanjiang River[J]. Zhejiang Hydrotechnics,2007(5):50-51. (in Chinese))

[3] LI Yuanya. 3-D numerical modeling of local scour around bridge pier[C]//Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. Yichang:[s. n.],2004:1492-1496.

[4] 赵春霞,王凯,马海峰,等. 二维水流数学模型在涉水工程中数值模拟研究[J]. 水科学与工程技术,2011(3):22-23. (ZHAO Chunxia,WANG Kai,MA Haifeng,et al. 2-D flow mathematical model of numerical simulation study in water related project [J]. Water Sciences and Engineering Technology,2011(3):22-23. (in Chinese))

[5] WANG Fei,ZHONG Tieyi,GU Zhengwei,et al. Research on nonlinear numerical simulation of bridge pier[C]//CHEN Feng. International Conference on Railway Engineering. Beijing:China Railway Publishing House,2012:806-810.

[6] 李振青,廖小永. 涉河工程群对防洪的累积影响研究[J]. 水利水运工程学报,2011(4):121-125. (LI Zhenqing,LIAO Xiaoyong. The cumulative impact of river construction projects on flood control[J]. Hydro-Science and Engineering,2011(4):121-125. (in Chinese))

[7] 张细兵,卢金友,蔺秋生. 长江中下游岸线利用对防洪累积影响初步研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(9):1138-1142. (ZHANG Xibing,LU Jinyou,LING Qiusheng. Preliminary study on accumulated influence of the bankline use on flood control in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011,20(9):1138-1142. (in Chinese))

[8] 英晓明. 平原地区感潮河流的水质数值模拟研究[J]. 黑龙江水专学报,2005(4):128-129. (YING Xiaoming. Research on water quality numerical modeling for tidal river[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College,2005(4):128-129. (in Chinese))

[9] 李文杰,邵学强. 甬江流域入海径流量研究[J]. 浙江水利科技,2007(3):53-55. (LI Wenjie,SHAO Xueqiang. Research on runoff amount into sea in Yongjiang River Basin [J]. Zhejiang Hydrotechnics,2007(3):53-55. (in Chinese))

[10] 方国华,金德钢,刘俊,等. 甬江流域河网水利计算模型研究及应用[J]. 灾害学,2009,24(2):128-129. (FANG Guohua,JIN Degang,LIU Jun,et al. Study and application of hydro-calculation model in river network of Yongjiang River Basin[J]. Journal of Catastrophology,2009,24(2):128-129. (in Chinese))

[11] 钱小娟,肖玉兵,陈艳. 长江南通段大型排污口影响预测[J]. 水资源保护,2013,29(2):48-52. (QIAN Xiaojuan,XIAO Yubing,CHEN Yan. Prediction of influence of large-scale sewage outlet in Nantong reach of Yangtze River[J]. Water Resources and Protection,2013,29(2):48-52. (in Chinese))

[12] 包为民,张小琴,瞿思敏,等. 感潮河段圣维南方程应用问题分析与改进研究[J]. 水动力学研究与进展,2010,25(3):359-366. (BAO Weimin,ZHANG Xiaoqin,QU Simin,et al. Improvement on the Saint-Venant equations for tidal rivers[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2010,25(3):359-366. (in Chinese))

[13] 朱文瑾,李瑞杰,干岳良,等. 感潮河段底床阻力特性分析[J]. 水利水电科技进步,2009,29(6):25-28. (ZHU Wenjin,LI Ruijie,GAN Yueliang,et al. Analysis on the riverbed resistance characteristic of tidal river[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(6):25-28. (in Chinese))

[14] 张细兵,余新明,金琨. 桥渡壅水对河道水位流场影响的二维数值模拟[J]. 人民长江,2003(4):23-24. (ZHANG Xibing,YU Xinming,JIN Kun. Numerical simulation of water levels and flow field in upstream back water area of bridge and aqueduct [J]. Yangtze River,2003(4):23-24. (in Chinese))

[15] 唐磊,张玮,解鸣晓,等. 等效阻力法在感潮河段桥墩群概化中的运用研究[J]. 水道港口,2010,31(5):357-364. (TANG Lei,ZHANG Wei,XIE Mingxiao,et al. Research on application of equivalent resistance to simplify bridge piers group for tidal river section[J]. Journal of Waterway and Harbor,2010,31(5):357-364. (in Chinese))

[16] 张书农,华国祥. 河流动力学[M]. 北京:水利电力出版社,1988:157-163.