

文章编号:1002-3682(2015)02-0040-11

青岛胶州湾大桥建设对周边海域水动力环境影响的数值研究*

张莞君,迟万清,胡泽建,刘建强,张永强

(国家海洋局第一海洋研究所,山东青岛266061)

摘要:应用 MIKE21 建立胶州湾平面二维潮流模型,对青岛胶州湾大桥建设前后胶州湾内的潮流场进行数值模拟,探讨了青岛胶州湾大桥建设对周边海域的潮位、潮流、潮流量等水动力环境的影响。通过胶州湾大桥两侧连续实测海流、潮位资料与模拟结果进行比较,可以看出两者趋势基本符合,说明该模型能够较精确地反映胶州湾大桥建设前后的潮流场分布情况。计算结果表明,大桥的建设具有一定的阻流作用并减小了过水断面,从而对周边海域的水动力环境产生一定的影响,但对胶州湾整体潮流场改变较小,影响范围限于桥位南北 1.5 km 范围内。

关键词:胶州湾;大桥;水动力;数值模拟

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

随着沿海经济的快速发展以及近年来岛屿的充分开发利用,跨海大桥的建设规模空前,青岛胶州湾大桥(青岛海湾大桥)、杭州湾跨海大桥、港珠澳大桥、厦漳跨海大桥、舟山跨海大桥等的建设极大地缩短了地区之间的距离,缓解了城市交通压力、促进大桥两岸经济的交流和发展。但大桥建设后增加了桥位水域阻力并减小了过水断面,对周边海域的水动力环境产生了一定的影响。

已有学者^[1-3]研究跨海大桥对水动力环境的影响,但主要都是针对潮汐河口附近的大桥。鲁海燕等结合数模和物模的方法对位于钱塘江河口赭山湾弯道下游的江东大桥建设影响进行了研究,认为建桥后桥孔内水流趋于集中,涨、落潮流速分别增加 4.6%~6.2% 和 3.7%~5.7%,离桥轴线 1.5 km 附近区域,涨、落潮流速减小幅度均在 5% 之内,5 km 以外区域基本不受影响^[1];韩海骞等通过定床模型实验分析了杭州湾大桥对钱塘江河口水流的影响,认为大桥建设对涌潮、上游行洪基本没有影响^[2];方神光和陈文龙利用数学模型对位于珠江河口的港珠澳大桥建设前后水域纳潮量变化进行研究,认为大桥的建设总体造成了伶仃洋纳潮量的减少,但在一定程度上增加了虎门口门的纳潮量^[3]。

孙英兰等根据山东省交通规划设计院编制的《青岛海湾大桥可行性研究报告》,按当时大石头至瑞昌路的大桥建设方案对建桥前后胶州湾水动力变化进行了一系列的研究^[4-6]。但由于研究时间较早,桥体设计参数与实际出入较大,桥体整体北移且增加红岛连线;同时,模型使用的水深、岸线资料较旧,因此不能真实、准确地反应出已建大桥

* 收稿日期:2015-03-15

作者简介:张莞君(1990-),女,硕士研究生,主要从事区域海洋动力学方面研究。E-mail:zhangwanjun@fio.org.cn

(李燕 编辑)

对胶州湾水动力环境的实际影响。本文以大桥实际建设参数为基础,通过建立胶州湾的平面二维潮流数学模型进行计算,分析大桥建设后周围海域水动力环境的变化情况。

1 工程概况

世界上最长的跨海大桥——青岛胶州湾大桥始建于 2006-12-26,于 2011-06-30 实现全线通车。它位于我国著名的对外港口贸易城市青岛市,地处黄海中部、山东半岛南部的胶州湾内(120°04'~120°23'E,35°58'~36°18'N)^[7]。大桥东接青岛主城区,西至黄岛红石崖,北侧与红岛相接,南临黄海,包括 3 座可以通航的航道桥和两座互通立交,以及路上引桥、黄岛侧接线工程和红岛连接线等,全长 35.4 km,其中海上长度 26.75 km。红石崖侧陆上段桥梁及道路共 0.9 km,红岛连接线长 1.9 km,该项目总投资 99.38 亿元。青岛海湾大桥是国家高速公路路网规划中的青岛至兰州高速青岛段的起点,也是山东省“五纵四横一环”公路网主框架中南济青高速公路的重要组成部分,同时还是青岛市道路交通规划网络布局中胶州湾东西岸跨海通道中“一路、一桥、一隧”的重要组成部分^①。整个桥体共有钻孔灌注桩 5 110 根,承台 1 103 个,墩身 1 691 个,3 个主航道桥(沧口、红岛和大沽河航道桥)分别采用钢箱梁双塔斜拉桥、钢箱梁独塔斜拉桥和独塔自锚式悬索桥^[8-9]。

2 数学模型介绍及数值结果验证

2.1 模型方程

二维潮流基本方程包括连续方程和动量方程,连续方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \\ & \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = & -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \\ & \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t 为时间;总水深 $h=\eta+d$,其中 η,d 分别为潮位高程和静水深度; \bar{u},\bar{v} 分别为 x,y 方向的流速分量; f 为科氏力系数; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; ρ_0 为基准水密度; S 为源汇项; $s_{xx},s_{xy},s_{yx},s_{yy}$ 为辐射应力张量分量; T_{xy} 为水质点侧向应力,包括黏滞摩擦力、紊流摩擦力、对流力等; τ_{sx},τ_{sy} 为海面风摩阻的 x,y 向分量; τ_{bx},τ_{by} 为海底摩阻的 x,y 向分量; u_s,v_s 为奇点(源)排水量的 x,y 向分量^[10-11]。

2.2 模型参数设置及边界条件

本研究计算区域为(120°00'57"~120°41'01"E,35°35'43"~36°15'58"N)(图 1),宽约

① 张学雷,徐宗军.红岛经济区海岸带基础调查及专题研究专题三——生态环境调查研究报告.2014.

50 km, 长约 55 km, 总面积为 2 750 km²。外海的计算网格分辨率在 200~300 m, 为了清楚了解大桥建设对周边海域水动力环境的影响, 对工程区进行加密, 网格分辨率在 50 m 左右。整个计算区域内共有节点数 33 796 个, 计算网格如图 1 所示。本次模型试验中胶州湾采用国家海洋局第一海洋研究所于 2013 年测量的 1:2.5 万的水深数据, 外海采用海军航保部电子海图水深插值后取得计算水深。模拟以 2013-11-19 大潮实测潮流的潮型为计算条件, 计算时岸线采用的是海流观测期间岸线, 在计算建桥后影响时只是与建设预测情景相比增加了桥墩, 桥墩按实际尺寸在模型中设计为不透水的构筑物。

计算水域与其他水域相通的开边界上, 通过给定开边界水位驱动模型运行, 水位表达式为

$$\eta = \sum_{i=1}^m f_i R_i \cos(\sigma_i t + \theta_{i0} - \theta_i) \quad (4)$$

式中, f_i 为各分潮的交点因子; R_i 为各分潮的振幅; σ_i 为各分潮的角速度; θ_{i0} 为各分潮的初相位; θ_i 为各分潮的相位滞后; m 为分潮个数。在开边界处的调和常数结合《黄渤海海洋水文图集》及胶州湾外的董家口、麦岛、灵山岛、古镇口等处的观测资料调和所获得的调和常数通过线性插值方法给定^[12]。计算域与陆地交界的侧边界上满足物质、动量、热量和湍流等通量为零。

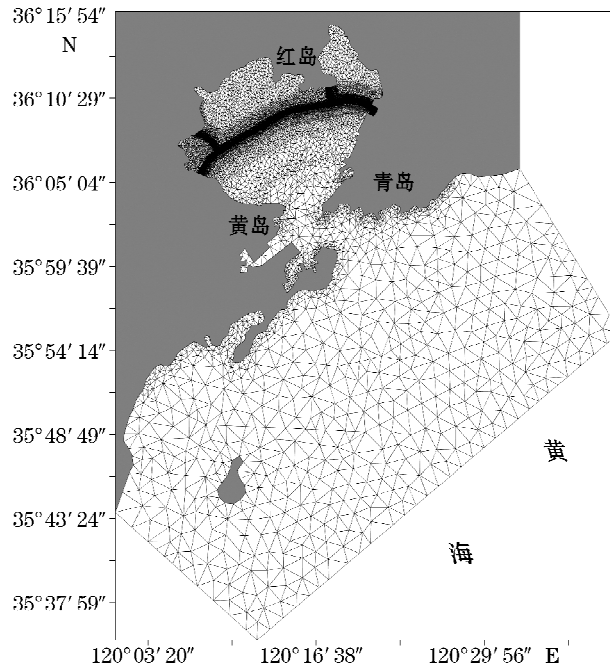


图1 研究区域及计算网格图

Fig. 1 Location of the study area and computation grid

2.3 模型数值结果验证

海流采用工程海域 2013-11-19T19:00—11-20T20:00 六站(L01~L06 站)大潮垂线平均海流数据、潮位采用同时段 L04 站潮位数据对模型进行验证,观测站位见图 2。潮位及各站流速、流向实测值与计算值的验证曲线见图 3 和图 4。由图可见,模拟结果与实际结果的潮位误差小于 0.2 m,各站实测与模拟流向基本一致,流速量级一致,模型模拟出来的流速、流向过程与大部分测站的实测过程基本吻合,模式计算所得结果基本上反映了流速的涨急落急的状态,流向的模拟值与实测值也相差不大,说明模型采用的参数基本合理,计算方法可靠,可用于建桥对水动力影响的预测。

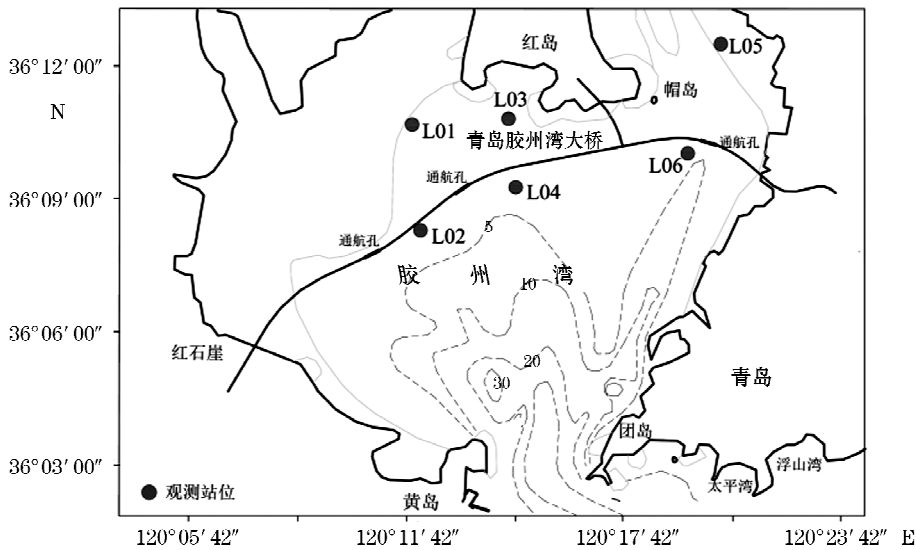


图 2 胶州湾验证点位置图

Fig. 2 Locations of the verification points in the Jiaozhou Bay

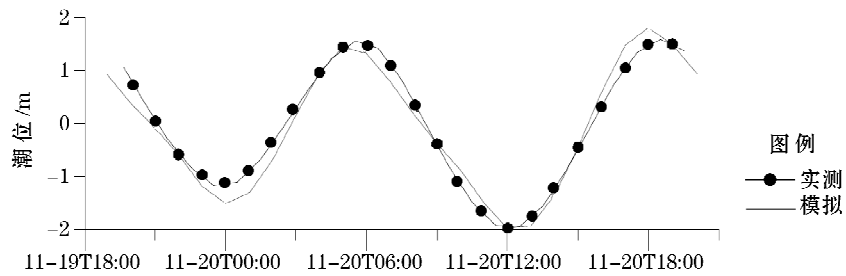


图 3 L04 站大潮潮位验证图

Fig. 3 Verification of the water level of spring tide at Station L04

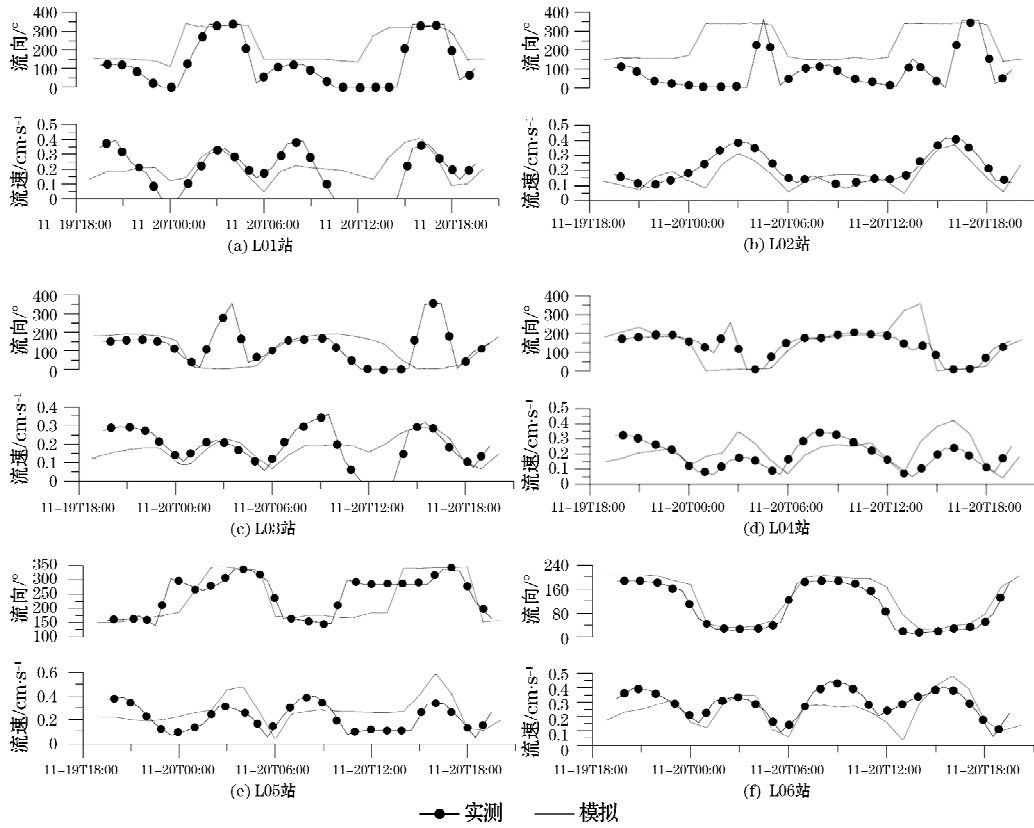


图4 L01~L06站大潮流速流向验证图

Fig. 4 Verification of the tidal current velocity and direction during spring tide at stations L01 to L06

3 大桥建设对水动力条件的影响分析

3.1 潮流影响分析

3.1.1 大桥建设对周边潮流场的影响

图5和图6分别为大桥附近海域建桥前后大潮期涨、落急时刻流速矢量图,可以看出大桥的建设对胶州湾整体潮流场的改变较小,但对局部流场有一定的影响,水流在桥墩附近发生类似绕流现象,这与唐士芳和李蓓桩认为的桩群断面后将出现漩涡的观点是一致的^[13]。建桥对涨、落潮流场的影响主要在桥位南北1.5 km的范围内。对比建桥前后大桥附近涨、落急时流向可发现,落急时流向改变整体表现为大桥建设后流向较建设前流向在东部海域呈逆时针方向偏转,在西部海域呈顺时针偏转;涨急时流向改变整体表现为大桥建设后流向较建设前呈逆时针方向偏转。

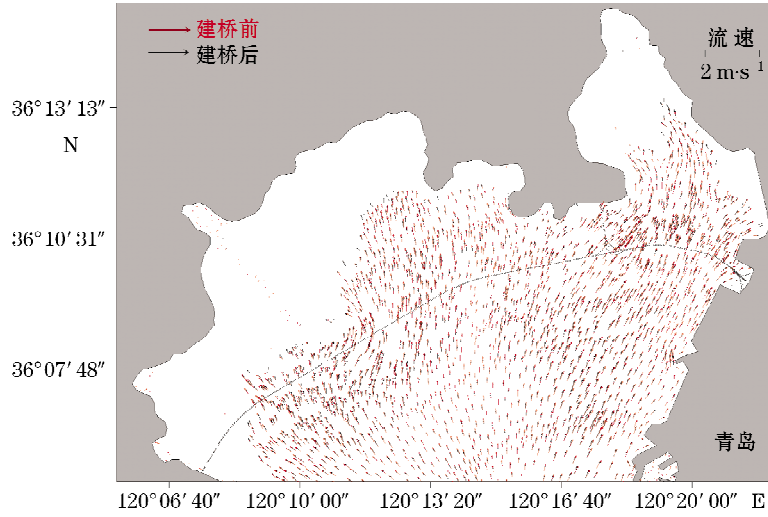


图 5 建桥前后大潮涨急时流场比较图

Fig. 5 Current fields during the flood of spring tide before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge

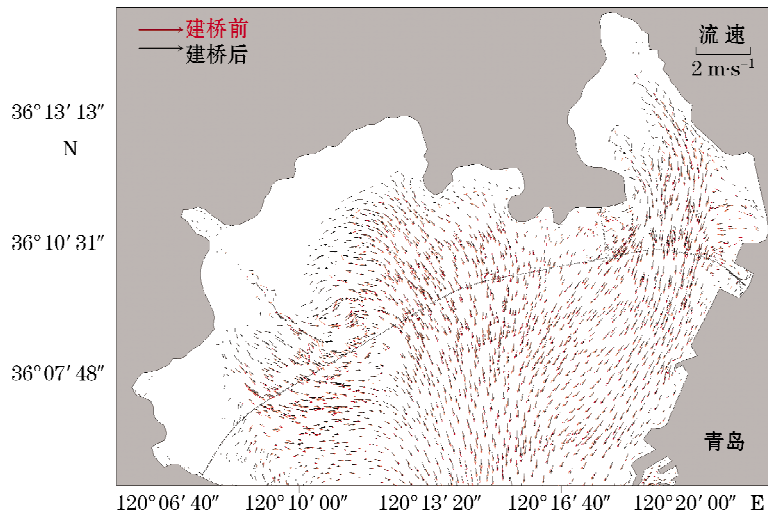


图 6 建桥前后大潮落急时流场比较图

Fig. 6 Current fields during the ebb of spring tide before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge

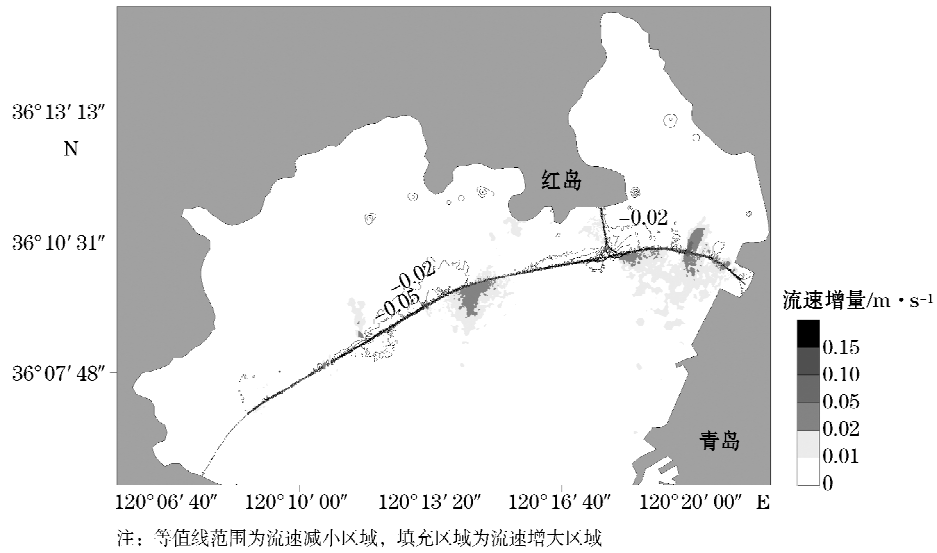


图7 建桥前后大潮涨急时流速比较图

Fig. 7 Current velocities during the flood of spring tide before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge

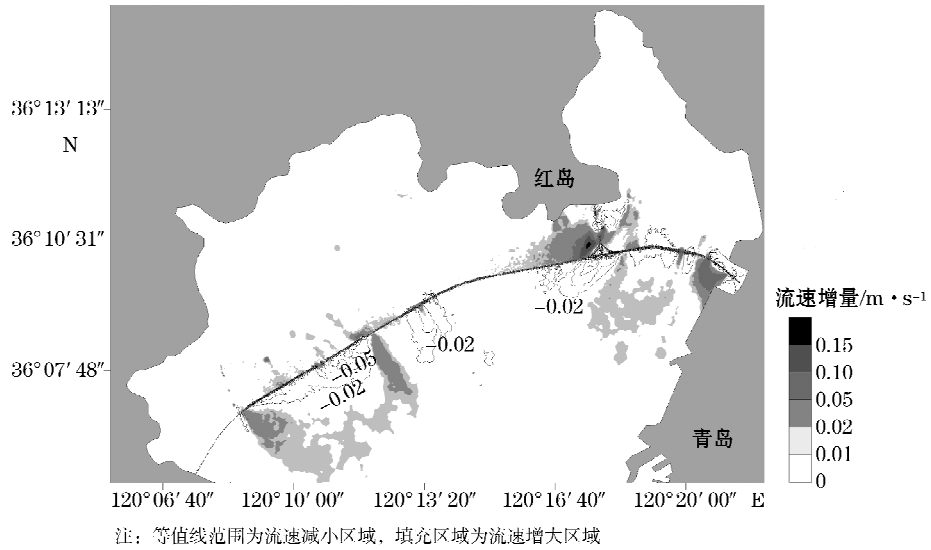


图8 建桥前后大潮落急时流速比较图

Fig. 8 Current velocities during the ebb of spring tide before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge

图 7 和图 8 分别为大潮期工程区附近建桥前后涨、落急流速比较图,分析可知,建桥前后涨、落潮流速变化有以下特点:1)除通航孔桥和红岛连接线附近,整个海区流速整体变化趋势为涨急时大桥北侧海域流速较建桥前明显减小,落急时大桥南侧海域流速较建桥前明显减小;2)红岛连接线附近海域在涨急时流速较建桥前变小,变小幅度在 $0.02 \sim 0.14 \text{ m/s}$,落急时在连接线的东西两侧海域流速增大,幅度在 0.02 m/s 以上,在连接线的三角区及南部海域流速较建桥前变小,幅度在 $0.02 \sim 0.14 \text{ m/s}$;3)在通航孔桥跨度最大的桥墩之间工程后流速较工程前变大,增幅可达 0.06 m/s 以上,最大跨桥墩东西两侧海域流速较工程前变小;幅度均在 0.04 m/s 以内;4)大桥的其他桥墩附近海域可以看到在桥墩南北两侧工程后流速均较工程前变小,在桥墩东西两侧工程后流速较工程前变大,但流速改变的海域范围不大。

3.1.2 建桥前后最大流速的变化

如图 9 所示,在跨海大桥向湾和向海两侧各取 3 个代表点来分析建桥前后最大流速的变化,计算结果见表 1。根据潮流场模拟结果,大桥的建设具有一定的阻流作用,各代表点最大流速基本呈现减小的趋势,所选的 6 个代表点中最大流速变化点出现在桥向湾 0.2 km 处,减小幅度约为 0.06 m/s ,离桥距离越远,最大流速的绝对变化越小,至大桥两侧 5.0 km 处变化幅度降至 0.01 m/s 以内。

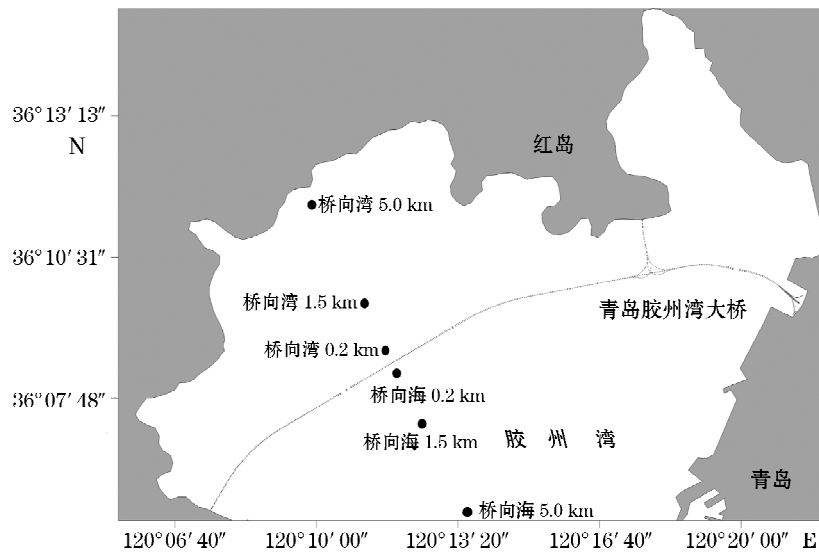


图 9 建桥前后潮汐、潮流变化代表点站位图

Fig. 9 Locations of the representative stations showing the changes of tide and tidal current before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge

表1 建桥前后桥位附近代表点流速变化

Table 1 Changes of tidal current velocity at representative stations near by the bridge site before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge

位置 /km	建桥前最大流速 /m·s ⁻¹	建桥后最大流速 /m·s ⁻¹	绝对变化 /m·s ⁻¹	最大变化流速 /m·s ⁻¹
桥向海 5.0	0.587 4	0.581 9	-0.005 4	-0.008 0
桥向海 1.5	0.561 2	0.547 1	-0.014 1	-0.014 1
桥向海 0.2	0.636 7	0.613 1	-0.023 6	-0.026 0
桥向湾 0.2	0.667 1	0.603 0	-0.064 0	-0.080 2
桥向湾 1.5	0.720 3	0.716 8	-0.003 5	-0.003 6
桥向湾 5.0	0.300 2	0.301 6	0.001 4	-0.006 5

3.2 大桥建设后潮位变化

大桥建设后桥位水域阻力增加,引起潮位变化如下:大桥向湾内一侧(桥后)海域涨潮时存在潮位降低现象,落潮时出现壅水现象,且潮位变化随距离桥体距离增加而逐渐减小。对选取的6个代表点进行分析(图9),发现在大桥向湾0.2 km的海域,潮位逐时最大变化大约为0.08 m,至湾顶0 m等深线附近潮位变化小于0.01 m;大桥向海一侧(桥前)海域潮位逐时变化主要体现在桥体附近0.2 km内的涨潮时段,涨潮时大桥附近水体出现壅水现象,潮位提升0.03 m左右,其它时刻潮位变化不大;同时,在大桥两侧建桥前后在高潮、低潮时潮位变化不大。这主要是由于桥墩占据的过水面积相对于整个水道的过水面积所占比例甚小,因此桥墩对水流的影响范围较小,水位变化程度也会有限。

表2 建桥前后桥位附近代表点潮位变化

Table 2 Changes of tidal level at representative stations near by the bridge site before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge

位置 /km	建桥前最大潮差 /m	建桥后最大潮差 /m	最大潮差变化 /m	逐时最大变化 /m
桥向海 5.0	3.890	3.890	<0.01	<0.01
桥向海 1.5	3.950	3.950	<0.01	0.01
桥向海 0.2	3.957	3.956	0.01	0.03
桥向湾 0.2	3.955	3.953	0.02	0.08
桥向湾 1.5	3.959	3.958	0.01	0.03
桥向湾 5.0	3.973	3.973	<0.01	<0.01

3.3 大桥对周围海区潮通量的影响

根据模型计算结果,选取连续的12个涨、落潮过程沿着大桥断面对建设前后分别进行潮通量累加,结果发现大桥建成后桥墩的存在使得过水断面减小,造成潮通量略有减小。建桥前后涨潮期的累加潮通量变化幅度在0.04%以内,落潮累加潮通量变化不超过0.06%。因此可以说明大桥建设后,大桥断面潮通量呈减小趋势,但是变化量甚微,且影响范围有限。

3.4 大桥建设对胶州湾纳潮量的影响

将每小时得到湾口截面的流量通过积分获得胶州湾的纳潮量^[14],胶州湾附近的河流

径流相比纳潮量极小,并且多数河流现在已经断流,对纳潮量的影响可以忽略。本文基于建立的二维数学模型,对工程前后相同时段一个潮周期进行了模拟计算,对工程前后纳潮量变化进行分析比较,发现大桥建设对整个胶州湾的纳潮量改变影响较小,大桥建设前纳潮量计算结果约为 $9.88 \times 10^8 \text{ m}^3$,大桥建成后纳潮量略有减小,为 $9.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

4 结 论

本文利用 MIKE21 建立胶州湾二维潮流模型,研究了青岛胶州湾大桥建设对周边海域水动力环境的影响情况,获得如下结论:大桥建设对胶州湾整体潮流场改变较小,大桥的影响限于桥位南北 1.5 km 的范围内,在通航孔桥跨度最大的桥墩之间基本表现为流速较周边附近海域流速稍大,在小的桥墩的南北两侧流速均较周边海域小,在桥墩的东西两侧海域流速均较周边海域流速大。大桥的建设造成大桥断面两侧的潮通量和潮位都有所减小,但变化量甚微且基本只在 0.2 km 内的海区体现,随距桥体距离增加逐渐减小,大桥对潮位、潮通量的影响范围基本在桥位附近。

参考文献:

- [1] 鲁海燕,史英标,杨元平. 江东大桥建设对钱塘江水动力的影响[J]. 海洋学研究, 2008, 26(2): 20-26.
- [2] 韩海骞,熊绍隆,朱军政,等. 杭州湾跨海大桥对钱塘江河口水流的影响[J]. 东海海洋, 2002, 20(4): 57-63.
- [3] 方神光,陈文龙. 港珠澳大桥对伶仃洋河口水域纳潮影响分析[J]. 人民珠江, 2011(1): 18-22.
- [4] 孙英兰,孙长青,王学昌,等. 青岛海湾大桥对胶州湾潮汐、潮流及余流的影响预测 I. 胶州湾及邻近海域潮流[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, (增刊 1): 105-119.
- [5] 孙英兰,田晖,郑连远,等. 青岛海湾大桥对胶州湾潮汐、潮流及余流的影响预测 II. 预测方法的探讨[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, (增刊 1): 120-125.
- [6] 孙英兰,王学昌,孙长青,等. 青岛海湾大桥对胶州湾潮汐、潮流及余流的影响预测 III. 预测方法及预测结果[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, (增刊 1): 126-133.
- [7] 王文海,夏东兴,高兴辰,等. 中国海湾志·第四分册·山东半岛南部和江苏省海湾[M]. 北京:海洋出版社, 1993.
- [8] 孟凡超,杨晓滨,王麟,等. 我国北方海域第一座超大型跨海大桥——青岛海湾大桥设计[C]//全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社, 2008: 77-93.
- [9] 于坤,姜美文. 青岛海湾大桥红岛航道桥设计和关键技术研究[J]. 公路, 2009, 9(9): 7-10.
- [10] 刘建强,马琳娜,张永强,等. 港口工程建设对莱州湾水动力环境影响的数值研究[J]. 海域开发与管埋, 2013, (4): 77-81.
- [11] 安永宁,杨鲲,王莹,等. MIKE21 模型在海洋工程研究中的应用[J]. 海岸工程, 2013, 32(3): 1-10.
- [12] 海洋图集编委会. 渤海 黄海 东海 海洋图集: 水文[M]. 海洋出版社, 1993.
- [13] 唐士芳,李蓓桩. 群阻力影响下的潮流数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2001, (5): 25-29.
- [14] 乔贯宇,华峰,范斌,等. 基于 ADCP 湾口测流的纳潮量计算[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 285-291.

Numerical Study on the Effect of the Jiaozhou Bay Bridge Construction on the Hydrodynamic Conditions in the Surrounding Sea Area

ZHANG Wan-jun, CHI Wan-qing, HU Ze-jian, LIU Jian-qiang, ZHANG Yong-qiang

(*The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: A two dimensional tide current model is established by using MIKE21 and used for the numerical simulation of tidal current field in the Jiaozhou Bay before and after the construction of the Jiaozhou Bay Bridge. Based on these, the effects of the construction of the bridge on the hydrodynamic conditions such as the water level, the tidal current velocity and the tidal flux in the sea area surrounding the bridge are discussed. A comparison has been made between the data measured continuously for tidal current and tidal level in the areas at the two sides of the bridge and the results from the simulation and shows a similar trend between the two results, indicating that the model can reflect accurately the distributions of tidal current field before and after the construction of the bridge. The results from the calculation indicate that the construction of the bridge has, to a certain extent, a choke effect and has reduced the area of the flow section in the sea area around the bridge, thus influencing, to some extent, the hydrodynamic environment in the sea area surrounding the bridge. But the overall current field in the Jiaozhou Bay has been changed little, and the influenced scope is limited within 1.5 km to the north and south of the bridge site.

Key words: Jiaozhou Bay; bridge; hydrodynamic conditions; numerical simulation