



港珠澳大桥建设对水沙环境影响 数学模型研究——II. 模型的应用

李孟国¹, 李文丹¹, 杨树森¹, 王晨阳²

(1.交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室,天津 300456;

2.长沙理工大学,湖南长沙 410076)

摘要: 对港珠澳大桥工程方案实施后潮流泥沙进行数值模拟,将桥墩附近网格进行加密处理,把桥墩本身刻画为固边界。根据数值模拟结果,对大桥工程实施后附近海区潮位、流速和潮量变化及水下地形冲淤变化进行了分析,研究结果表明,港珠澳大桥对伶仃洋海域潮流泥沙影响仅限于大桥附近,对伶仃洋滩槽格局没有影响,对伶仃航道没有负面影响。

关键词: 港珠澳大桥; 三角形网格; 伶仃洋; 潮流; 泥沙; 数学模型

中图分类号: TV 81

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)S1-0201-07

Mathematical modeling of the effect of constructing Hongkong-Zhuhai-Macao bridge on hydrodynamic sediment environment: II. Application of the model

LI Meng-guo¹, LI Wen-dan¹, YANG Shu-sen¹, WANG Chen-yang²

(1.Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: The numerical simulations of tidal current and sediment are carried out after the implementation of the project of Hongkong-Zhuhai-Macao bridge. The piers are treated as solid boundary and the grids near the piers are enriched. According to the results of the numerical simulation, the changes of tidal level, velocity of tidal current, tidal volume and the siltation and erosion of the underwater topography in nearby sea area after the implementation of the project are analyzed. The results show that the effect of constructing Hongkong-Zhuhai-Macao bridge on the hydrodynamic sediment environment is only limited to the vicinity of the bridge, and it has no negative effect on Lingding navigational channel and has no influence on the patterns of shoal and channels of Lingdingyang bay.

Key words: Hongkong-Zhuhai-Macao bridge; triangular grid; Lingdingyang bay; tidal current; sediment; mathematical model

拟建的港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,是连接香港特别行政区、广东省珠海市、澳门特别行政区的大型跨海通道(图1),是列入《国家高速公路网规划》的重要交通项目。港珠澳大桥自西向东,横跨伶仃洋,总长35.5 km。自伶仃洋东侧的香港机场至西侧珠海口岸,依次与香港侧

航道、铜鼓航道、广州出海航道、青州航道、江海直达航道以及九州航道相交,其中与铜鼓航道和广州出海航道交汇处采用隧道方式,隧道两侧建东、西两个人工岛,其它航道则采用较大跨度的桥梁方式进行联通。

港珠澳大桥位于伶仃洋,伶仃洋是一个受多

收稿日期: 2011-03-16

作者简介: 李孟国(1964—),男,博士,研究员,主要从事海岸河口水动力泥沙研究。

股水流作用河口湾。受不同潮型、不同径流和喇叭型边界以及众多岛屿的影响,使伶仃洋水流运动、泥沙分布等规律在湾内不同部位产生差异,水沙运动非常复杂,在地貌上呈现“三滩二槽”的基本格局,伶仃航道是广州港的出海航道。因此,港珠澳大桥建设对伶仃洋滩槽格局的影响、对港口、航道的影响及大桥桥墩的冲刷问题是必须要进行研究和论证的。本文在文献[1]的基础上,对港珠澳大桥工程方案进行了潮流泥沙模拟计算,分析了港珠澳大桥建设对工程海区潮流泥沙环境的影响。

1 工程方案介绍

港珠澳大桥建设内容包括(图1):自香港散石湾至珠海、澳门口岸间的海中桥隧及人工岛工程、珠海口岸、珠海接线、澳门口岸等。港珠澳大桥主体工程“海中桥隧”长达35.5 km,海底隧道长

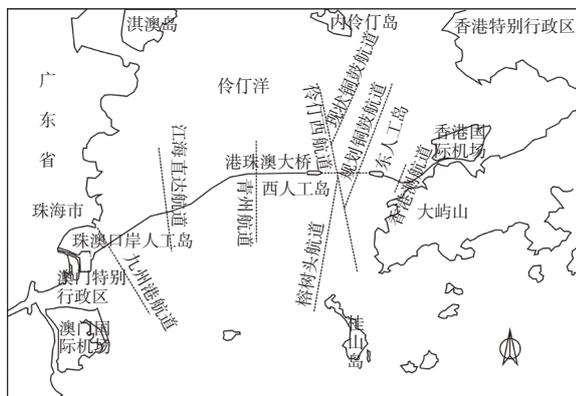


图1 工程海区与工程方案

6 648 m,共设伶仃航道、铜鼓航道、青州航道、江海直达船航道、九州航道和香港航道等6处通航孔。

1.1 非通航孔段

港珠澳大桥非通航桥孔可分为3段:

第1段为香港侧桥段,粤港分界线东段全长5 973 m,桥墩均为双墩结构,桥墩形式为75 m桥墩布局,粤港分界线至东人工岛长366 m,共9组,采用双墩形式。

第2段从西人工岛往西至桥位桩号K28+720处,总长约15.5 km。该段桥墩采用110 m跨距,桥墩承台埋入土中。

第3段位于珠海一侧海域,从K28+720到终点共计6.8 km,该桥段桥墩采用75 m跨距,该桥段承台全部沉入泥面,人工岛岛桥结合部为双墩形式。

1.2 通航孔段

港珠澳大桥通航桥孔可分为4段:1)香港侧航道,主桥墩4根,迎水面18.5 m,顺水面长度33.5 m。2)青州航道,主桥墩2根,迎水面32.5 m,顺水面长度53.5 m;副主桥墩4根,迎水面18.5 m,顺水面长度39.5 m。3)江海直达航道,主桥墩3根,迎水面宽26.0 m,顺水面长度42.5 m。4)九州航道,主桥墩2根,迎水面宽25.7 m,顺水面长度48.25 m。

1.3 人工岛

港珠澳大桥在广州港出海航道——伶仃航道处采用隧道方式,隧道两侧建东、西两个人工岛,人工岛和海底隧道的尺寸见表1。

表1 人工岛尺寸数据

项目	形状	人工岛迎水面/m	人工岛宽度/m	人工岛面积/m ²	两人工岛间距/m	海底隧道长度/m
西人工岛	鹅卵形	625	100~183	94 774	5 584	5 584
东人工岛	鹅卵形	625	115~225	103 026	5 584	5 584

1.4 珠澳口岸

珠澳人工岛南北向长1 930 m,东西向宽965 m,面积约2 km²,距岸边约1 100 m。桥头人工岛采用曲线外形,人工岛与珠海连接部分为透空式栈桥+人工半岛。

2 桥墩概化与处理

大桥桥墩群为透水建筑,一方面由于桩基

阻力的影响,流速将减小;另一方面,又因桩柱体存在而使过水断面缩小,流速将增加;此外,由于桩的存在,水流中还会形成旋涡,非常复杂。因此,在有桩基的潮流数值模拟中,应该考虑桥墩的影响。数值计算中桥墩对水流的影响是通过网格节点上的参数参与计算的,而桥墩的尺寸往往很小,现有的处理方法主要有:加密网格法^[2]、附加糙率法^[3]和附加阻力法^[4-5]等。本工程

项目涉及到众多桥墩和人工岛问题, 为了准确了解大桥若干桥墩和人工岛建设对周围水流动力和泥沙环境的影响, 首先通过局部网格加密将桥墩处理为陆地, 并采用文献[6-7]中的处理方法考虑桥墩阻力影响。

采用不规则三角形网格剖分计算域, 大模型网格节点数为108 548个^[1], 小模型网格节点数为84 170个, 最小空间步长均为3.85 m。图2为小模型网格示意图; 图3为加密后的东侧人工岛网格图; 图4为加密后的青州航道桥网格图。

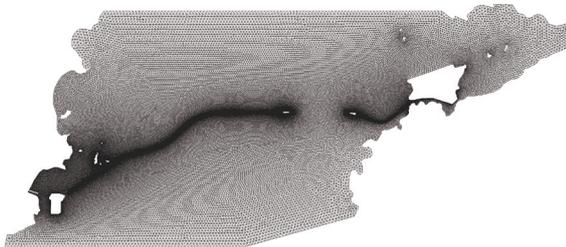


图2 小模型网格

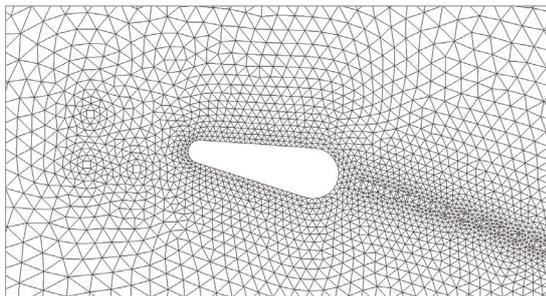


图3 东侧人工岛网格

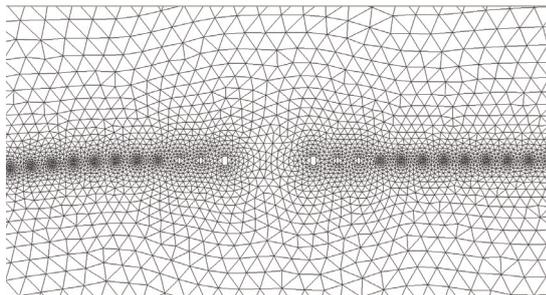


图4 青州航道桥附近桥墩网格

3 工程区潮流影响分析

3.1 工程后流态

对港珠澳大桥规划方案进行了二维潮流泥沙数值模拟研究^[8]。通过分析计算可知: 港珠澳大桥工程实施后仅大桥及人工岛附近的流态发生变化, 远离大桥的海区流态不受影响; 人工岛的涨

落潮背流面为弱流区。图5和图6分别为方案实施后工程附近涨落潮流场。

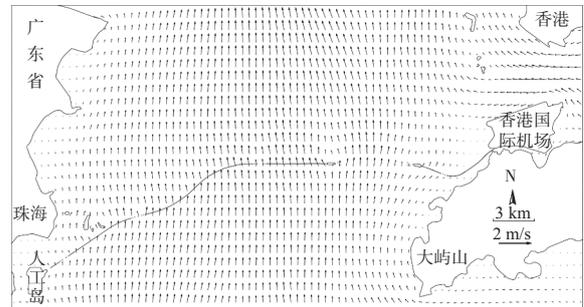


图5 桥区附近涨潮流场

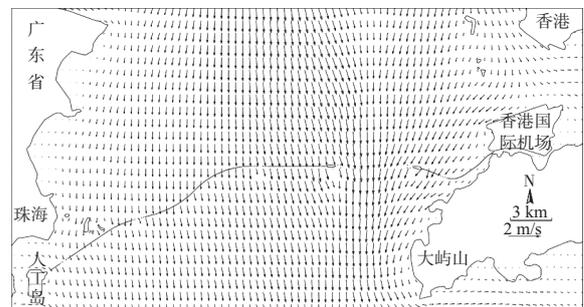


图6 桥区附近落潮流场

3.2 工程对流场的影响范围

为了了解港珠澳大桥工程方案对周围流场的影响范围, 在大桥与江海直达航道、青州航道和伶仃西航道的交点沿正南北方向取3个断面, 在断面上选取37个特征点(图7), 其中1[#]~12[#]特征点位于伶仃航道断面, 13[#]~24[#]特征点位于青州航道断面, 25[#]~37[#]特征点位于与江海直达航道断面。其中1[#]~12[#]特征点之间的距离分别为11 000 m, 4 000 m, 3 000 m, 2 000 m, 1 000 m, 1 000 m, 2 000 m, 3 000 m, 4 000 m, 11 000 m, 13 000 m; 13[#]~24[#]特征点之间的距离分别为11 000 m, 4 000 m, 3 000 m, 2 000 m, 1 000 m, 1 000 m, 2 000 m, 3 000 m, 4 000 m, 11 000 m, 13 000 m; 25[#]~37[#]特征点之间的距离分别为13 000 m, 5 000 m, 4 000 m, 3 000 m, 2 000 m, 1 000 m, 1 000 m, 2 000 m, 3 000 m, 4 000 m, 6 000 m, 11 000 m。通过计算分析可知: 如果流速变化精确到0.01 m/s作为有影响的界定标准, 那么工程前后1[#], 13[#], 25[#], 11[#], 12[#], 23[#], 24[#], 36[#], 37[#]的流速均无变化, 因此, 大桥对潮流的影响界于内伶仃岛与桂山岛之间。如果流速变化精确到0.05 m/s作为有显著影响的界定标准,

那么大桥对潮流的影响在其南北两侧各3 km的范围内。因此,港珠澳大桥建设对伶仃洋的三滩二槽格局不会产生影响。

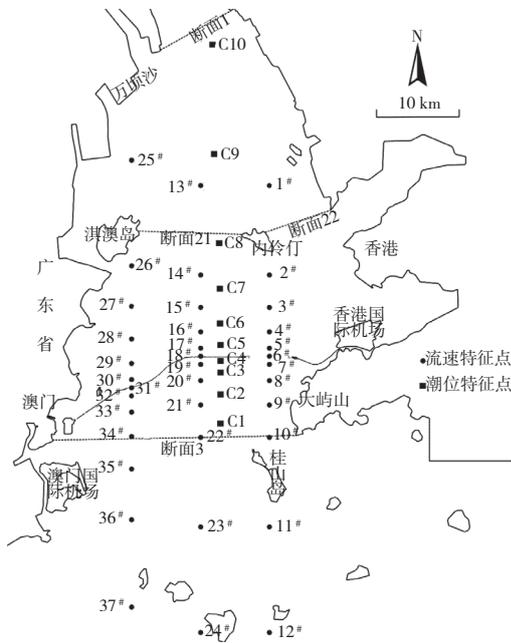


图7 特征点分布

3.3 工程对航道流速的影响

为了了解港珠澳大桥工程方案实施后通航孔处流速的变化,把工程方案各通航孔工程前后涨落潮的平均流速差值进行绘图。图8和图9分别为港珠澳大桥工程方案东西人工岛附近工程前后的流速差等值线(工程后-工程前)。通过计算分析可以看出:

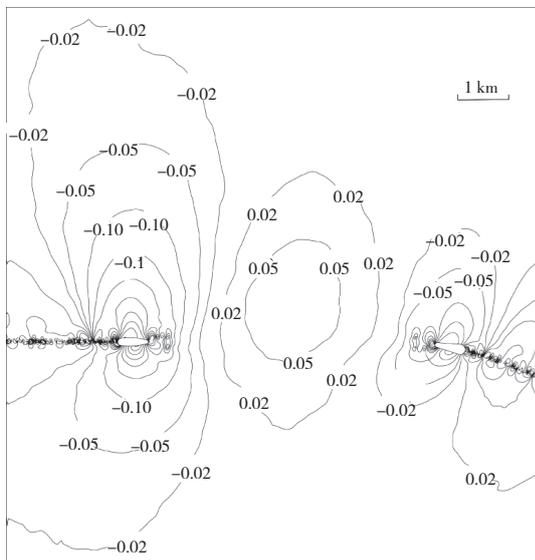


图8 人工岛附近涨潮平均流速差分布(单位:m)

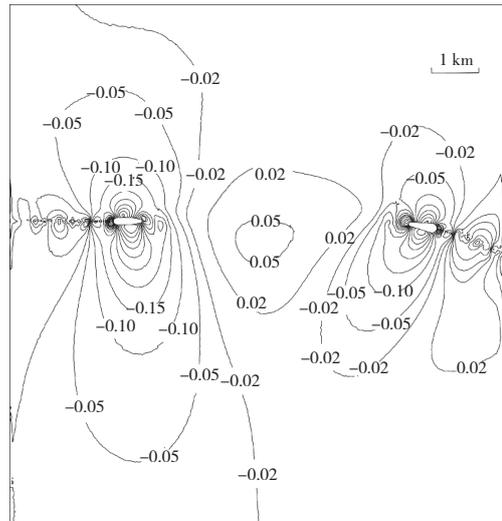


图9 人工岛附近落潮平均流速差分布(单位:m)

1) 大桥桥线附近、人工岛附近流速流向均发生了变化。

2) 东西人工岛南北两侧的背流面流速都减小。

3) 东西人工岛之间的伶仃航道和香港侧航道呈增加趋势,而青州航道、江海直达航道、九州航道靠近大桥部分流速有减小的趋势。

3.4 工程对潮位潮量的影响

3.4.1 工程对潮位的影响

为了了解港珠澳大桥工程方案实施后的潮位变化,沿伶仃洋南北取一断面,断面上选取了C1~C10共10个点(图7),通过研究工程方案实施前后这10个点的潮位变化可知:

1) 港珠澳大桥工程方案实施后对伶仃洋潮位影响很小,高低潮位变化量在1.2 cm以内。

2) 港珠澳大桥工程方案实施后,伶仃洋的潮位呈现出高潮位降低、低潮位抬高的现象,但幅度很小,大桥并未产生明显的阻水造成潮位雍高现象。

3) 潮差变化量在2 cm以内。

3.4.2 工程对潮量的影响

为了了解港珠澳大桥工程方案对潮量的影响,在大桥南、北取了3条断面,即断面1(南沙—深圳机场断面)、断面2(淇澳岛—内伶仃岛—赤湾断面,其中淇澳岛—内伶仃岛为断面21,内伶仃岛—赤湾断面为断面22)、断面3(大桥南侧的澳门—大濠岛断面),断面宽度分别为:9 456.7 m, 12 593.2 m, 8 488.2 m和 29 592.7 m(图7)。由计算可知:大桥建设

后, 伶仃洋各断面涨落潮量均呈减小趋势: 减小幅度为0.3% ~ 2.1%。

4 工程实施后悬沙变化

以2009年6月洪季水体含沙量为例对方案实施后的悬沙场进行了计算, 图10~13分别为方案实施前后桥区附近涨落急含沙量分布场, 由图可见: 方案实施后, 大桥工程并没有改变周围海区悬沙浓度的总体分布。

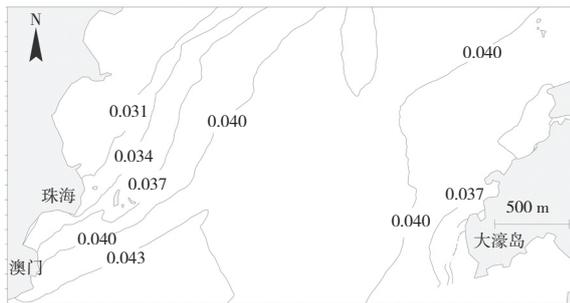


图10 工程前涨急含沙量分布 (单位: kg/m^3)

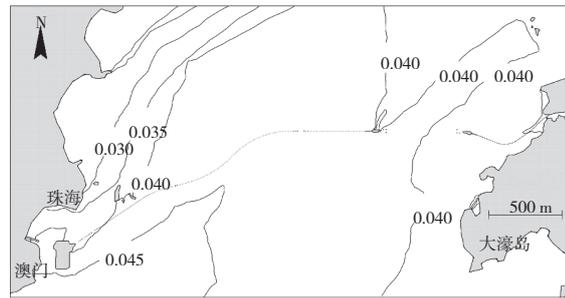


图11 工程后涨急含沙量分布 (单位: kg/m^3)

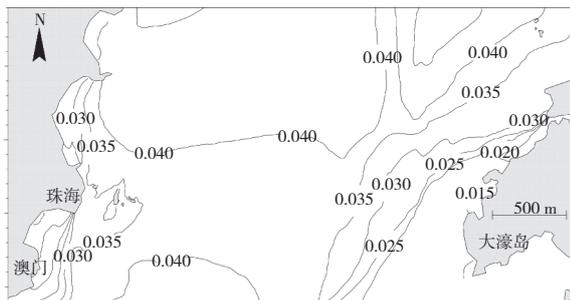


图12 工程前落急含沙量分布 (单位: kg/m^3)

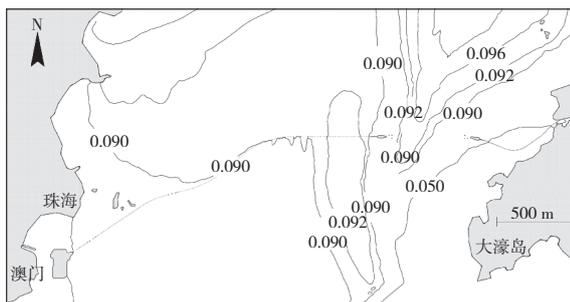


图13 工程后落急含沙量分布 (单位: kg/m^3)

5 工程实施后冲淤分布

5.1 冲淤影响范围

利用已经验证好的冲淤模型对港珠澳大桥工程实施后伶仃洋海域的冲淤进行计算^[1, 8]:

1) 总体上看, 港珠澳大桥工程方案实施后, 冲淤影响仅限于工程区附近。

2) 冲刷区域分别为珠澳口岸人工岛东北侧桥头人工岛附近、珠澳口岸人工岛西南侧、伶仃航道、人工岛两侧和香港侧航道附近。

3) 淤积区域分别为人工岛南北两侧、大濠岛北侧香港机场西侧附近和西人工岛西侧桥区附近南北两侧大部分区域。

5.2 人工岛冲淤情况

图14和图15分别给出了东西人工岛附近冲淤分布图 (“-”表示冲刷, 下同), 由图可见: 港珠澳大桥工程方案实施后, 人工岛东西两侧呈冲

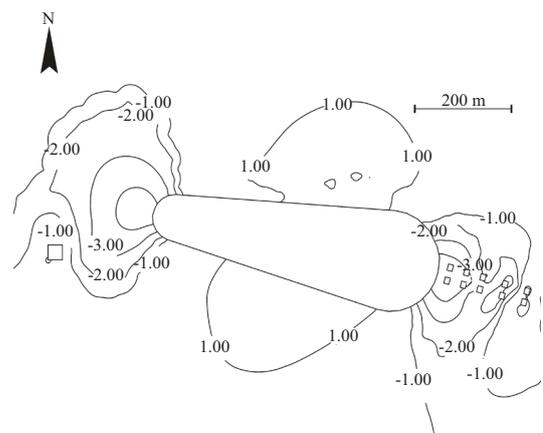


图14 东侧人工岛冲淤分布 (单位: m)

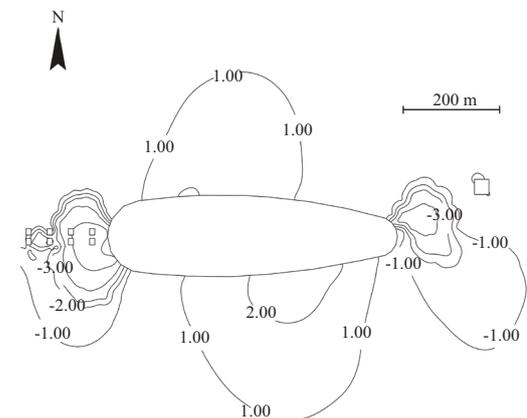


图15 西侧人工岛冲淤分布 (单位: m)

刷状态, 南北两侧迎背水面为淤积状态; 西侧人工岛西侧冲刷大于东侧, 最大冲刷深度为5.0 m, 最大淤积厚度约为2.0 m左右; 东侧人工岛最大冲刷深度为4.0 m, 最大淤积厚度约为2.0 m左右。

5.3 各个通航孔冲淤情况

伶仃航道、青州航道、江海直达航道、九州航道和香港侧航道冲淤情况为:

1) 达到平衡状态时, 各个通航孔附近呈轻微冲刷状态, 最大冲刷深度不超过1.2 m。

2) 伶仃航道(图16)以西各个通航孔两侧一定距离附近呈轻微淤积状态, 淤积厚度为0.1~0.4 m。

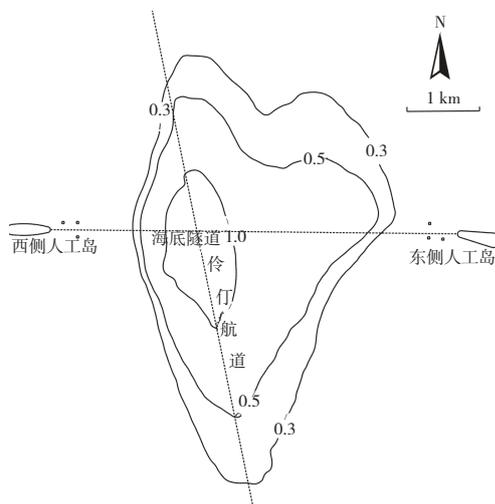


图16 伶仃航道冲淤分布(单位:m)

3) 伶仃航道呈冲刷趋势, 大桥建设对伶仃航道水深无负面影响。

6 结论

本文在已建立并经过充分验证的基于三角形网格的潮流泥沙数学模型基础上, 将桥墩附近网格进行加密处理, 将桥墩刻画为固边界, 对港珠澳大桥工程方案进行了模拟分析, 研究结果表明:

1) 港珠澳大桥工程方案实施后仅大桥及人工岛附近的流态发生变化, 远离大桥的海区流态不受影响, 人工岛的涨落潮背流面为弱流区。

2) 如果流速变化精确到0.01 m/s作为有影响的界定标准, 大桥对潮流的影响界于内伶仃岛与桂山岛之间。如果流速变化精确到0.05 m/s作为有

显著影响的界定标准, 那么大桥对潮流的影响在其南北两侧各3 km的范围内。

3) 港珠澳大桥工程方案实施后伶仃洋的潮位呈现出高潮位降低、低潮位抬高的现象, 但高、低潮位变化量在1.2 cm以内, 潮差变化量在2 cm以内。大桥并未产生明显的阻水造成潮位雍高现象。

4) 港珠澳大桥建设后, 伶仃洋各断面涨落潮量均呈减小趋势: 减小幅度为0.3%~2.1%。

5) 港珠澳大桥工程方案实施后造成的冲淤影响仅限于工程区附近: 各个通航孔附近呈轻微冲刷状态, 最大冲刷深度不超过1.2 m; 西侧人工岛西侧冲刷大于东侧, 最大冲刷深度为5.0 m, 最大淤积厚度约为2.0 m左右。东侧人工岛最大冲刷深度为4.0 m, 最大淤积厚度约为2.0 m左右。

6) 综上, 港珠澳大桥建设对水沙环境的影响仅局限于桥区附近, 对伶仃航道及各通航孔水深无负面影响, 对伶仃洋潮量影响很小, 对伶仃洋的滩槽格局不会产生影响。从对水沙的影响角度考虑, 大桥建设是可行的。

参考文献:

- [1] 李文丹, 李孟国, 杨树森, 等. 港珠澳大桥建设对水沙环境影响的数学模型研究: I. 模型的建立和验证[J]. 水运工程, 2011(8):1-8.
- [2] 鞠俊, 闻云呈. 桥墩对水流影响的二维数值模拟[C]//左其华, 窦希萍. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 284-288.
- [3] 曹民雄, 甘小荣. 潮汐河段桥墩对水流影响的数值计算与分析[J]. 人民长江, 2006(4): 81-84.
- [4] 张细兵, 余新明, 金琨. 桥墩雍水对河道水位流场影响的二维数值模拟[J]. 人民长江, 2003(4): 23-48.
- [5] 张照举, 张永良, 余锡平. 象山大桥建设对湾内潮流特性的影响[J]. 水运工程, 2005(11): 382-385.
- [6] 唐士芳. 二维潮流数值水槽的桩群数值模拟[J]. 中国港湾建设, 2002(3): 15-21.
- [7] 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.

- [8] 李孟国, 李文丹, 杨树森. 港珠澳大桥工程方案二维潮流悬沙数学模型研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2009.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

论文对港珠澳大桥工程方案进行的潮流泥沙数学模型计算研究, 验证海区范围大、河口多、航道多、桥墩多、岛屿多、水沙条件复杂, 数模难度堪称巨大。

作者利用三角形网格可以随意局部加密的特点, 成功刻画了计算海区, 通过局部网格加密将桥墩处理为陆地, 通过考虑桩群阻力等, 成功地处理了存在多桥墩的数学模拟问题。通过对流态、流场的影响、航道流速的影响、潮位的影响、潮量的影响、悬沙场的影响、通航孔冲淤的影响、人工岛冲淤的影响等多方面的计算和分析, 得出了港珠澳大桥对伶仃洋海域潮流泥沙影响仅限于大桥附近、对伶仃航道没有负面影响等结论。

以上结论的获得对大桥建设的投资、工期、效益具有显著的现实意义和类似工程建设的理论价值。

文立

2012年12月

评委简介:

文立, 教授, 研究员级高级工程师。大连港集团有限公司副总工程师。

曾承担《深水防波堤新型结构形式研究和斜向波与直立式防波堤相互作用研究》获2003年度国家科技进步二等奖; 2001年荣获交通部青年科技英才称号; 2005年享受国务院特殊津贴; 2009年评为辽宁省首批科技领军人才。

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。