DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.027
金相楠, 孙冬梅, 冯平. 顺河跨海大桥工程对河道影响数值分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 164-170. JIN Xiang-nan, SUN Dong-mei, FENG Ping. Numerical analysis on the influence of sea-crossing bridge engineering on river courses[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 164-170. (in Chinese)

顺河跨海大桥工程对河道影响数值分析

金相楠, 孙冬梅, 冯 平

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了研究顺河跨海大桥工程对河道产生的不利影响, 建立了包含桥梁工程在内的平面二维水动力数值模型, 采用实测潮位资料验证了模型的合理性, 并进一步分析了工程对河道壅水、流态以及河床冲刷的影响。研究表明: 跨海大桥工程的建立会导致河道水位有微弱的升高, 最大壅高仅为 6 cm; 桥位附近流态变化较大, 在桥墩处会形成许多小涡旋, 在人工岛与桥墩的共同作用下会形成一个局部大涡旋, 这些影响导致了河床的局部冲刷, 河床的最大冲刷深度为 0.83 m。

关键词: 跨海大桥; 数值模拟; 壅水高度; 流态; 冲刷

中图分类号: TV87 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)03-0164-07

Numerical analysis on the influence of sea-crossing bridge engineering on river courses

JIN Xiang-nan, SUN Dong-mei, FENG Ping

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Given that the construction of sea-crossing bridges may have adverse effects on rivers, a plane two-dimensional hydrodynamic numerical model was established. The model was tested and proven to be valid with the measured data of tide water, and was used to analyze the effects of the engineering on the rise of water level, the changes of flow regime, as well as the depth of riverbed scour. The study indicated that the sea-crossing bridge engineering will cause a slight rise in the backwater height of the rivers. The maximum backwater height is only 6 cm. But the flow regime will vary greatly as numerous vortices will emerge at the vicinity of the bridge location. These influences will result in local scour of the riverbed, and the maximum scour depth is 0.83 m.

Key words: sea-crossing bridge; numerical simulation; backwater height; flow regime; scour

随着我国工业化、现代化进程的加快以及国家对基础设施建设投入的加大, 跨河跨海桥梁等建筑物逐渐增多。由于桥梁的墩台阻水, 将减小桥墩之间的有效过水面积, 增加桥位下的单宽流量, 使桥梁上游水面升高形成桥前壅水; 同时水流流速加大, 经过桥孔的水流冲走桥孔上下游床面的泥沙, 形成桥孔附近河床的冲刷; 水流在桥墩周围被迫产生绕流, 流速、流向急剧变化, 引起涡旋和较大的床面剪切力, 随着时间的推移, 会形成局部冲刷坑[1]。这些影响都会威胁桥梁的安全及河道行洪安全。因此, 分析涉水桥梁工程对河道各方面的影响是至关重要的。

近年来, 国内外关于桥梁建造对河道的影响研究成果很多, 并且随着计算机技术的发展, 数值模拟

收稿日期: 2016-11-02 修回日期: 2017-02-16 网络出版时间: 2017-05-06
网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1118.013.html
基金项目: 海河干流河网水量水质综合调控数学模拟技术(2014ZX07203-009-03-01); 国家自然科学基金(51438009)
Funds: Mathematical Simulation Technology for Comprehensive Regulation of Water Quantity and Water Quality of River Network of Haihe River Mainstream (2014ZX07203-009-03-01); National Natural Science Foundation of China (51438009)
作者简介: 金相楠(1992-), 女(朝鲜族), 辽宁营口人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: tju_jinxiangnan@126.com。
通讯作者: 孙冬梅(1978-), 女, 辽宁朝阳人, 副教授, 博士(后), 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: sundongmei@tju.edu.cn。

技术被越来越多的应用到该领域。针对不同条件下桥墩对河道壅水影响的问题，有大量学者曾应用经验公式法和一维[2-3]、二维[4]、三维[5]数值模拟方法来进行分析讨论，研究内容涵盖桥墩壅水特性[2,5]、壅水回水计算方法[3]和河道水位流速变化[4]等；此外，对于不同桥梁工程对河流流态以及冲刷影响方面的研究也不在少数，主要研究方向包括桥墩对流场的扰动情况[6-7]和桥梁所在河道的水位流速变化情况[8,9]等。这些研究所涉及到的桥梁均为正交桥，但受地形、水文条件和公路走向的制约，许多桥梁桥位往往不得不设计成与河渠斜交的形式[10]。关于斜交桥对河道的影响，国内外也有部分研究。Erduran K S 等[11]模拟了四种不同类型斜交桥所在河道的三维流动，可以用于预测河道上下游剖面的水位变化。张大茹等[12]通过平面二维水流数学模型考虑桥梁结构、斜交角度和漫水桥高度等影响因素，分析了桥梁工程对河道水位、流速及淹没范围的影响；李大鸣等[13]为考察斜跨桥梁桥墩形状和布设方位对水流的阻碍作用和桥墩的局部冲刷深度，用集中质量的有限元方法建立了数学模型，并应用于西河特大桥防洪影响计算中。

现如今，新建或规划的涉河桥梁纵轴线与水流的夹角越来越大，甚至出现了顺河桥。何彬[14]就曾以盐窝峡库两座顺河桥为例，对冲淤平衡河道进行了壅水和冲刷计算。与普通跨河桥梁相比，顺河桥桥墩的布置形式与水流流动方向平行，其阻水作用会更加明显，桥位周围的水流流态及河床边界条件也与正交桥有很大的不同，因此有必要对顺河桥工程影响进行模拟分析。

本文以连接某人工岛的顺河跨海大桥拟建工程为例，基于张扬所建的人工岛水动力数值模型[15]，对顺河桥进行合理概化，在模型中加载桥墩并进行不过水处理，从而建立一个新的包含桥梁工程的平面二维水动力数值模型，以研究顺河跨海大桥工程对河道壅水情况、河流流态以及河床冲刷的影响。

1 工程概况

跨海大桥工程区位于河流甲和河流乙的入海口处(图 1)。为了保证人工岛对外交通联系的顺畅，拟在河流乙西岸线位修建一条顺河跨海桥，大桥起点接河流乙西侧，并自北向南入海。桥身全长 1.74 km，桥宽约 22 m，共计有桥墩 180 个，桥墩直径为 1.2 m。桥墩大体上呈规则分布，大桥起点处，桥墩分布比较密集，每排横向分布 4 至 6 个桥墩，其余每排均横向分布 3 个桥墩。

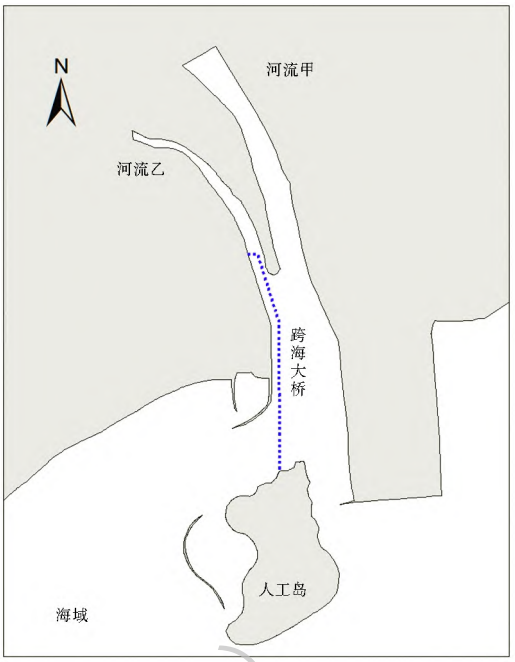


图 1 跨海大桥位置示意图

Fig. 1 Sketch map of the location of the sea-crossing bridge

2 二维水动力数值模型的建立与验证

2.1 基本控制方程

工程区属于河口沿岸浅海地区，区域内水平尺度远大于垂向尺度，可忽略各个水力参数在垂向上的变化，并假设沿水深方向动水压强符合静水压强分布规律，因此可以采用平面二维浅水方程作为模型基本控制方程。二维浅水方程守恒型通式为

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\Delta\cdot F(U)=W \tag{1}$$

式中：U 为守恒量向量，$U=\{h, hu, hv\}^{\mathrm{T}}$；$F=[F_x, F_y]$ 为通量向量，且 x 方向向量 $F_x=\left\{hu, hu^2+\frac{gh^2}{2}, huv\right\}^{\mathrm{T}}$，$y$ 方向向量 $F_y=\left\{hv, huv, hv^2+\frac{gh^2}{2}\right\}^{\mathrm{T}}$；$W$ 为源汇项向量，表达式为

$$W=\left\{\begin{array}{l}0, fvh+ghs_{wx}-g\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{C^2}+\\ \left(E_x\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+E_y\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right), -fuh+ghs_{wy}-\\ g\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{C^2}+\left(E_x\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+E_y\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)\end{array}\right\}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中：h 表示水深；t 为时间；g 为重力加速度常数；u 和 v 分别为沿 x 和 y 方向垂线平均速度；f 为柯氏力系数；E_x，E_y 分别为 x、y 方向的涡黏系数；C 为谢才系数；n 为曼宁粗糙系数。

2.2 数学方程求解

水动力模型采用有限体积法(FVM)，以守恒型

二维浅水方程式(1)为出发点,将方程在任意控制体积作体积分,并利用 Gauss 原理将体积分化成面积分。重写方程组为

$$\frac{\partial}{\partial t}\int U\mathrm{d}V = -\int_A F(U)\cdot n\mathrm{d}A + \int_v S\,\mathrm{d}V \qquad (3)$$

对控制体单元取平均后,得到 FVM 半离散化方程为

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\Delta v}\sum_{j=1}^{m} F_{n,j}A_j + S \qquad (4)$$

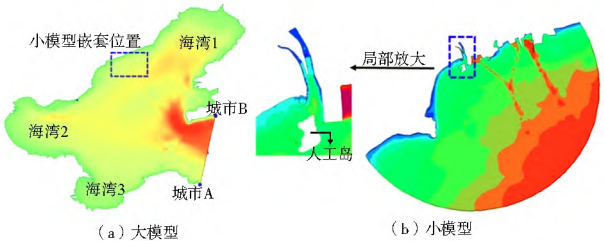
由于 F_x, F_y 具有旋转不变性,可将 $F_x(U)$, $F_y(U)$ 在法向上的投影转换为先投影 U 到法向上,即将 U 投影到 n 得到 U,且 $U = T(\theta)^{-1}\cdot U$,再将其代入 F 得到 $F(U)$,并根据公式 $F_n(U) = T(\theta)^{-1}F(U)$ 进一步求得 $F_n(U)$,从而将二维法向量计算问题转化为一维局部坐标下的黎曼问题进行求解。经旋转变换之后的 FVM 体积法半离散化方程式为

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{\Delta v}\sum_{j=1}^{m} T(\theta)^{-1}F_j(U)A_j + S \qquad (5)$$

式(3)和(5)是等价的,都是有限体积法离散的基本方程,但式(5)把二维问题法向量计算转化为求解一维局部坐标系统下的黎曼问题,使得确定数值通量更为便捷。

2.3 数值模型的验证

平面二维水动力数值模型采用大、小两重模型嵌套进行计算(图 2)。其中,大模型包含研究区域附近 3 个海湾,开边界位于两个沿海城市 A、B 的潮位观测站连线上;小模型是以人工岛为中心、沿岸宽 33 km 的扇形区域,开边界设置在河流甲、乙的入河口处以及弧形外边界。大模型与小模型之间主要的数据交换是潮位过程,即通过大模型模拟整个流场,为小模型的弧形边界提供符合流场整体物理特征的潮位过程。



(a)大模型　(b)小模型

图 2　模型计算范围

Fig. 2　Model computational domain

根据有限体积法,采用三角形网格对模型进行离散(图 3),其中大模型共计网格节点 2 283 个,计算时间步长 10 s,小模型网格节点 6 153 个,最大空间步长 1 000 m,最小空间步长 10 m,计算时间步长为 0.5 s。

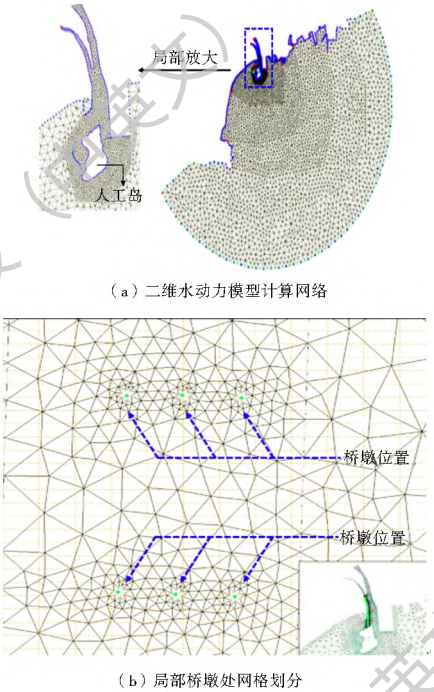
涡黏系数直接影响模型计算的稳定性。在小模型中,为准确描述各种涡的形成,采用 Samagorinsky 亚网格尺度模型来计算涡黏系数,其公式为:

$$A = c_s^2 l^2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2\right] \qquad (6)$$

式中:c_s 为 Smagorinsky 系数,取常数值,通常情况下在 0.25~1.0 之间,本文 c_s 取值为 0.28;A 位涡黏系数,由上述公式计算得到,在选取时应满足如下准则:

$$(A\cdot\Delta t)/(\Delta x^2) \leqslant \frac{1}{2} \qquad (7)$$

在数值模拟计算中,河床糙率系数的作用很关键,它反映了边界粗糙程度、河床条件等对水流阻力的综合影响,文中小模型计算时底部糙率取值在 0.012~0.022 之间。



(a)二维水动力模型计算网络

(b)局部桥墩处网格划分

图 3　模型计算网格

Fig. 3　The computational mesh of the model

采用入海口处冬季 2011 年 2 月 25 日 9:00–26 日 13:00 的大潮和 3 月 5 日 8:00–6 日 12:00 的小潮水文观测资料对模型计算出的潮位、流速和流向进行了验证[15]。验证内容包括图 4 所示的 H1、H2 两个潮位点和 V1 至 V8 共 8 个潮流点的潮位、流速、流向。限于篇幅,本文只给出了 H1、H2 点的潮位验证图和 V1、V2 点的流速和流向验证图,见图 5、图 6。

从图 5 和图 6 中可以定性地看出潮位、流速和流向的模拟值与实测值吻合较好,模型计算较为准确。为了定量地评价模型的性能,本文采用基础统计量均方根误差(root-mean-squared error, RMSE)

南水北调与水利科技(中英文)

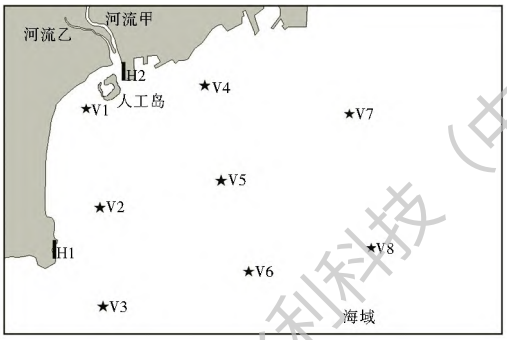


图 4　验证点位置图

Fig. 4　The locations of the verification points

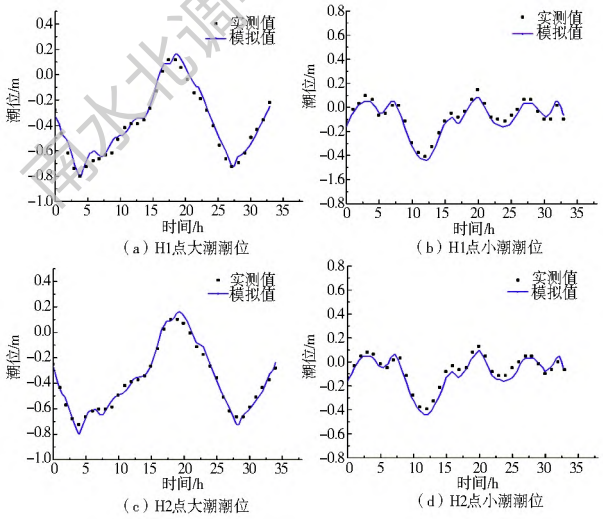


图 5　H1、H2 点潮位验证图

Fig. 5　Tide level verification at H1 and H2

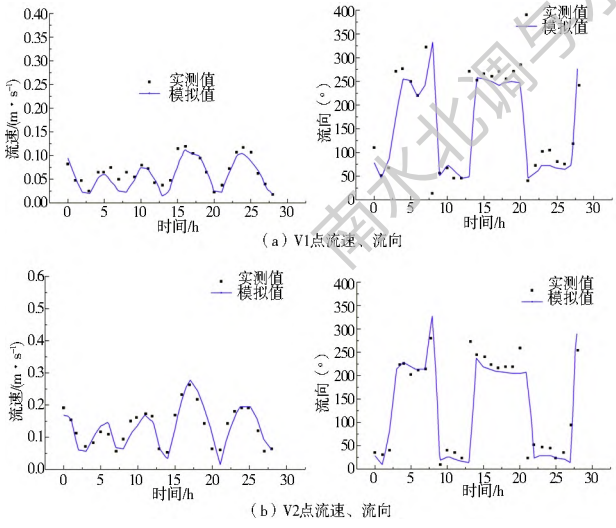


图 6　V2 点流速、流向验证图

Fig. 6　Velocity and flow verification at V1 and V2

为评价准则。其公式为

$$RMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[(X_m)_i-(X_s)_i]^2/n} \qquad (8)$$

式中: X_m 和 X_s 分别代表实测值和模拟值; n 代表实测值的个数。

经计算, 得出各观测点潮位模拟值与实测值的均方根误差在 3.3~6.4 cm 之间, 流速模拟值与实测值的均方根误差在 0.03~0.04 m/s 之间。可见, 误差较小, 说明模型可以较好地模拟人工岛附近海域的流动规律, 能够为跨海大桥工程的模拟提供必要的水动力条件。

3　跨海大桥工程对河道的影响分析

桥梁工程势必对河道行洪产生影响。考虑到顺河跨海大桥纵轴线方向与河岸平行这一特殊性, 本文将从河道壅水、河流流态以及河床冲刷三个方面分析工程对河道的影响。

3.1　河道壅水影响分析

依据上述平面二维水动力模型, 模拟了河流甲、乙在跨海大桥工程建设前、后洪峰时刻的河道水位, 见图 7。

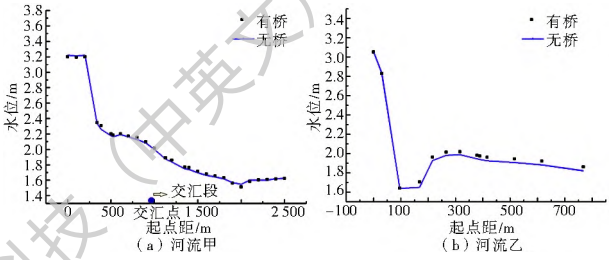


图 7　工程前后河道水位对比

Fig. 7　Comparison of water level before and after the construction

根据两种工况的模拟结果, 可以发现在建造跨海大桥后, 甲、乙河流的水位均有升高趋势, 其中河流甲水位最大上升高度为 5 cm, 平均上升高度仅为 1.65 cm, 河流乙水位最大上升高度为 6 cm, 平均上升高度为 3 cm。这是由于桥墩的存在使河道的过水断面减小, 水流在上游收缩, 下游扩散, 加上桥墩本身的阻力作用, 使河道产生壅水。在两条河的交汇段, 由桥梁工程造成的河道壅水现象不明显, 这主要是因为在河流交汇后, 过流断面突然增大, 加上河流乙因壅水使得过流能力有所减小所致。

综上所述, 顺河跨海大桥工程对河道壅水的影响不大。

3.2　河流流态影响分析

当河道中的水流遇到阻水建筑物时, 水流就会从建筑物两侧或缝隙中通过, 从而导致河流多处处于紊动状态, 流态发生很大的改变, 产生一系列脉动、涡旋等运动形态。在桥梁工程的建设中, 桥墩常呈圆柱形, 水流流至桥墩正前方时, 墩柱前沿会受到水流高压影响, 且水流遇到桥墩后分向两侧, 导致桥墩两侧壅水, 局部流速加大, 桥墩后形成回流区, 并产生涡旋[16-17]。涡旋在一定程度上影响了水工建筑

南水北调与水利科技（中英文）

物的桩基稳固以及河道的航运安全，有必要对其造成的影响进行分析。

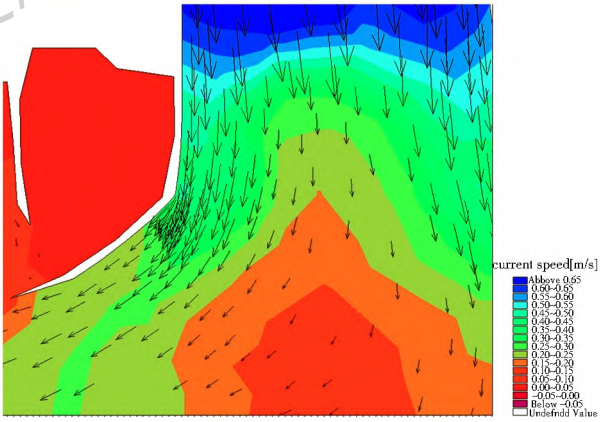
本文利用上述数值模型，模拟了河道遭遇 50 年一遇洪水时，桥墩附近在洪峰时刻的平面流场情况，分析了人工岛和顺河跨海大桥工程对河道涡旋产生的影响。

图 8 分别为无桥有岛(a)、有桥无岛(b) 和有桥有岛(c) 三种工况下，河流的局部平面流场模拟结果。根据图(a) 和图(c) 的对比，可以明显看出，在没有跨海大桥的工况下，虽然受人工岛的影响，水流具有分流现象，但并未产生涡旋；而修建跨海大桥后，由于桥墩的阻水作用，墩台周围产生了具有高紊动和高流速特性的局部水流，水流在桥墩圆壁上产生边界层流动而损耗能量，当紊动逐渐加剧时，水流会在临界点发生分离，速度由正向变为负向，形成墩后回流，而另一部分水流则继续向下游流动并形成自由剪切层，由于该桥为顺河桥，向下游流动的水流会继续遭遇桥墩，做圆柱绕流，因此在每个桥墩周围都会产生许多小涡旋，并不停地向下游传播和发展。由此可知，跨海大桥的建立是导致河道涡旋产生的直接原因。根据图(b) 和图(c) 的对比，可以发现，在有桥无岛的工况下，河道内的涡旋仅为桥墩附近的小涡旋；而在人工岛和桥梁工程的双重影响下，整体桥梁周围的河道流场上还形成了一个大涡旋。可见，人工岛的存在对涡旋具有一定影响。

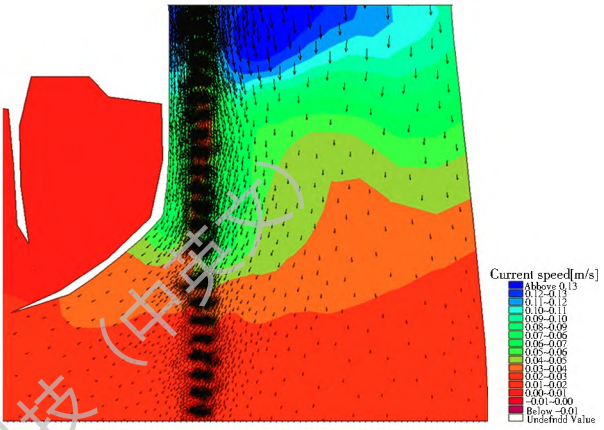
综上所述，跨海大桥的建立会造成河流流态的显著变化，且桥梁的纵轴线方向使得产生的涡旋更加复杂。这些涡旋会对河床产生很大的切向力，并在桥墩周围形成局部河床冲刷，威胁桥梁的安全。因此有必要通过具体的计算来分析河床冲刷的影响(详见 3.3 节)。

3.3 河床冲刷影响分析

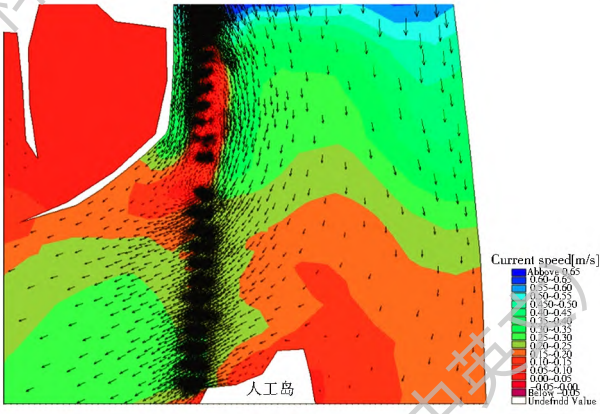
在天然状况下，由于流域的来水、来沙及河床边界条件的不断变化，河床形态总是处在不断的冲淤变化过程中，但在长时间内，冲淤量可以相互补偿，河道处于一个相对平衡的状态[18]。而由于跨海大桥工程的建立，该平衡会遭到破坏，桥墩的存在使得过流断面收缩，河流流速增大，水流挟沙能力增强，且桥墩受单方向作用的径流和周期变化的潮流两种水流形式共同作用，水文和河床变形较为复杂，会有一定冲刷作用。但当前国内对于潮流冲刷认识还不够深入，只是认为潮流的最大冲刷深度可借鉴单向流的冲刷深度，李梦龙[19] 总结了前人在这方面研究的主要两种观点，第一种认为潮汐冲刷与单向流冲刷深度相同，只是发展速度缓慢，第二种认为潮汐冲刷比单向流冲刷深度小，并给出了折减范围。因此本文以百年一遇洪水作为前提条件，计算桥墩单向流冲刷深度，并以此作为最大冲刷深度。



(a) 无桥有岛



(b) 有桥无岛



(c) 有桥有岛

图 8 局部流场分布

Fig. 8 Local flow field distribution

桥梁的单向流冲刷包括自然演变冲刷、一般冲刷和局部冲刷，由于河流甲、乙的河床基本稳定，自然演变冲刷影响较小，因此采用一般冲刷和局部冲刷相叠加的结果对河床的冲刷影响进行分析。一般冲刷是指由于桥梁建筑物侵占河流的过水断面，使水流流速及挟沙能力增大而造成的河床冲刷，局部冲刷是指桥墩周围的马蹄型涡流造成的河床冲刷[20]。

南水北调与水利科技（中英文）

一般冲刷采用《公路工程水文勘测设计规范》JTGC 30- 2002 中规定的黏性土河床桥墩的一般冲刷公式:

$$h_p = \left[A_d \frac{Q_2}{\mu B_{ij}} \left(\frac{h_{cm}}{h_{cq}} \right)^{\frac{5}{3}} \Big/ \left(0.33 \times \frac{1}{I_L} \right) \right]^{\frac{5}{8}} \quad (9)$$

$$Q_2 = \frac{Q_C}{Q_C + Q_{tl}} Q_P \quad (10)$$

式中: h_p 为桥下一般冲刷后的最大水深(m); A_d 为单宽流量集中系数; Q_P 为频率为 P% 的设计流量(m^3/s); Q_2 为桥下河槽部分通过的设计流量(m^3/s), 当河槽能扩展至全桥时取 Q_P; Q_C 为天然状态下河槽部分设计流量(m^3/s); Q_{tl} 为天然状态下河滩部分设计流量(m^3/s); B_{ij} 为河槽部分桥孔过水净宽(m); μ 为桥墩水流侧向压缩系数; h_{cm} 为河槽最大水深(m); h_{cq} 为桥下河槽平均水深; I_L 为冲刷坑范围内黏性土液限指数, 取 0.17。

局部冲刷采用《公路工程水文勘测设计规范》JTGC 30- 2015[21] 中黏性土河床桥墩的局部冲刷公式计算桥墩的局部冲刷:

$$\text{当 } h_P/B_1 \geqslant 2.5 \quad h_b = 0.83 K_\zeta B_1^{0.6} I_L^{1.25} V \quad (11)$$

$$\text{当 } h_P/B_1 < 2.5 \quad h_b = 0.55 K_\zeta B_1^{0.6} h_p^{0.1} I_L^{1.0} V \quad (12)$$

式中: h_b 为桥墩局部冲刷深度(m); K_ζ 为墩形系数; B_1 为桥墩计算宽度; h_p 为桥下一般冲刷后的最大水深(m); V 为一般冲刷后墩前行进流速(m/s); I_L 为冲刷坑范围内黏性土液限指数。

在桥址处沿河道顺流方向选取四个点, 按照上述公式进行桥下河床冲刷深度计算。计算结果见表 1。

表 1 冲刷深度计算成果

Tab. 1 Calculation results of scour depth

桩号	频率(%)	水位/m	设计流量/(m^3 • s)	一般冲刷深度/m	局部冲刷深度/m	总冲刷量/m
0+ 280	1	1.85	1 895	0.43	0.4	0.83
0+ 580	1	1.65	1 895	0.25	0.38	0.63
0+ 880	1	1.57	1 895	0.24	0.2	0.44
1+ 080	1	1.59	1 895	0.25	0.35	0.6

从表 1 中可以看出, 一般冲刷深度和局部冲刷深度各占 50% 左右; 在设计流量相同的情况下, 水位越高的地方, 冲刷深度越大; 河床最大冲刷深度为 0.83m, 未超过 1 m。根据《公路工程水文勘测设计规范》JTC 30- 2015[21], 特殊大桥基底埋深安全值为 2 m, 由于本工程桥梁基础较深, 因此本工程满足桥梁基底埋深安全标准。冲刷深度对桥梁自身安全不会构成大的威胁。但对桥墩和附近的河道采取适当的保护措施是有必要的, 如在桥墩周围河床铺设粗颗粒材料防护层或抛石; 在桥墩周围设立护脚和沉箱, 防止下冲流和马蹄形涡流直接冲击泥沙颗粒等。

4 结语

本文以连通某人工岛的顺河跨海大桥工程为范例, 以该区域平面二维水动力数值模型为计算工具, 分析了跨海大桥工程对河道的影响。

研究表明, 跨海大桥工程的建立会导致河道的水位有所升高, 最大壅高为 6 cm, 但整体河段并未出现大幅度的水面壅高现象; 而工程产生的最大影响是引起了河流流态的改变, 水流会在桥墩周围做圆柱绕流, 形成许多小涡旋, 对桥墩造成局部冲刷影响, 且由于桥墩排列方向与河道水流方向一致, 涡旋会向下游发展和延伸, 并在人工岛和桥墩的双重作用下, 形成一个河道局部大涡旋, 这些影响会加大水流对河床及桥墩的冲刷作用; 通过对桥梁一般冲刷和局部冲刷的计算, 可知发生洪水时, 河床最大冲刷深度为 0.83 m, 冲刷造成的影响不会对桥梁安全构成威胁。但与正交桥相比, 这种顺河大桥会引起河流流态的改变, 在桥墩周围形成涡旋, 造成局部冲刷, 产生较大范围的局部阻水现象。这样出于防洪安全考虑, 应该尽量避免这种顺河大桥的建设。

参考文献(References):

[1] 杨文海, 路志强, 刘涛. 跨河桥梁防洪影响评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 163-165. (YANG Wen-hai, LU Zhi-qiang, LIU Tao. Assessment of flood control impact for crossing bridge[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(2): 163-165. (in Chinese))

[2] 梁昭云. 山区跨河桥梁的阻水壅高影响研究[J]. 广东水利水电, 2015(12): 21-25. (LIANG Zhao-yun. Influence of river-crossing bridge backwater in mountainous areas[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2015(12): 21-25. (in Chinese))

[3] 张永华, 刘国梁, 丁昌春. 呼口大桥防洪评价壅水及回水计算分析[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(1): 10-13. (ZHANG Yong-hua, LIU Guo-liang, DING Chang-chun. Backwater and return water calculation analysis of Hukou Bridge flood control evaluation[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2016, 44(1): 10-13. (in Chinese))

[4] 段璆. 基于二维水流数学模型的壅水分析计算[J]. 湖南水利水电, 2016(2): 42-45. (DUAN Qiu. The calculation and analysis of backwater based on 2-d flow mathematical model[J]. Hunan Hydro & Power, 2016(2): 42-45. (in Chinese))

[5] 陈文学, 穆祥鹏, 崔巍. 南水北调中线工程桥墩壅水特性研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(11): 121-125. (CHEN Wen-xue,

南水北调与水利科技(中英文)

MU Xiang-peng, CUI Wei. Study on backwater characteristics of bridge-piers of Mid-Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(11): 121-125. (in Chinese))

[6] Chang W Y, Constantinescu G, Lien H C, et al. Flow structure around bridge piers of varying geometrical complexity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(8): 812-826.

[7] 果有娜. MIKE21 在圆形桥墩对河道洪水影响数值模拟中的探讨[J]. 水利水电工程设计, 2012, 31(1): 15-18. (GUO You-na. Discussion on numerical simulation of influence of circular bridge piers on river flood with MIKE21[J]. Design of Water Conservancy and Hydropower Engineering, 2012, 31(1): 15-18. (in Chinese))

[8] 徐林春, 黄本胜, 郑国栋, 等. 扩建桥梁工程通航安全水流流态数值模拟研究[J]. 广东水利水电, 2008(8): 19-22. (XU Lin-chun, HUANG Ben-sheng, ZHENG Guo-dong, et al. Numerical simulation of water flow regime in bridge extension project with navigation safety[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2008(8): 19-22. (in Chinese))

[9] 王川, 程伟平, 陈一帆. 平面水流数值模拟在涉水桥梁防洪影响中的应用[J]. 科技通报, 2014(11): 35-40. (WANG Chuan, CHENG Wei-ping, CHEN Yi-fan. Application of plane water flow numerical simulation in river flood control of a wading bridge[J]. Bulletin of Science and Technology, 2014(11): 35-40. (in Chinese))

[10] 孙东坡, 杨苏汀, 宋永军, 等. 公路斜交桥壅水特性[J]. 水利水运工程学报, 2007(1): 41-46. (SUN Dong-po, YANG Su-ting, SONG Yong-jun, et al. Backwater characteristics of speedway skew bridges[J]. Hydro-Science And Engineering, 2007(1): 41-46. (in Chinese))

[11] Erduran K S, Seckin G, Kocaman S, et al. 3D numerical modelling of flow around a skewed bridge crossing[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2012, 6(6): 475-489.

[12] 张大茹, 王向东, 朱毕生. 山区河道跨河工程的防洪影响研究[J]. 泥沙研究, 2015(2): 17-23. (ZHANG Da-ru, WANG Xiang-dong, ZHU Bi-sheng. The influence of river-crossing engineering on flood-control in mountainous areas[J]. Journal of Sediment Research, 2015(2): 17-23. (in Chinese))

[13] 李大鸣, 白玲, 王志超, 等. 跨河道大桥防洪影响数学模型的研究与应用[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 103-106. (LI Da-ming, BAI Ling, WANG Zhi-chao, et al. Study on mathematical model for impact from huge river-crossing bridge on flood control and its application[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 103-106. (in Chinese))

[14] 何彬. 库区河道桥梁防洪评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. (HE Bin. Study on flood control evaluation of bridge in reservoir area-based on the project of rapid channel from Lanzhou to Yongjing[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese))

[15] 张杨. 人工岛对河口行洪与冲淤影响的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (ZHANG Yang. Numerical simulation research on the impacts of man-made island on flood propagation and erosion-deposition of estuary[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))

[16] 张新润. 有限水深中圆柱型桥墩绕流的模型实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (ZHANG Xin-run. Experimental study on the flow field around cylinder piers in the Limited Depth water[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))

[17] 左生荣. 跨海大桥深水桥墩波浪效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. (ZUO Sheng-rong. Research on wave response of deepwater pier[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese))

[18] 董胜男. 跨河桥梁对河道防洪影响评价问题的研究[D]. 济南: 山东大学, 2010. (DONG Sheng-nan. Study on the problem of evaluating the flood-control influence of crossing bridge[D]. Jinan: Shandong University, 2010. (in Chinese))

[19] 李梦龙. 潮流作用下桥墩局部冲刷研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (LI Meng-long. The research of pier scour under tidal flow[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))

[20] 齐梅兰. 采沙河床桥墩冲刷研究[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 835-839. (QI Mei-lan. Riverbed scouring around bridge piers in river section with sand pits[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 835-839. (in Chinese))

[21] 河北省交通规划设计院. 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30-2015[M]. 人民交通出版社, 2015. (Hebei Provincial Communications Planning and Design Institute. Design specifications for hydrologic survey of highway engineering: JTG C30-2015[M]. China Communications Press, 2015. (in Chinese))

南水北调与水利科技(中英文)