



港珠澳大桥建设对水沙环境影响数学模型研究 —I. 模型的建立和验证

李文丹¹, 李孟国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: 针对港珠澳大桥工程和其所在海区的特点, 基于TK-2D软件建立了不规则三角形网格的伶仃洋内外海域大范围二维潮流泥沙数学模型和大桥工程区附近的小范围局部细化的二维潮流泥沙数学模型, 根据现场实测资料对模型进行了充分的验证, 分析了工程海区的潮流悬沙特征, 为进一步论证港珠澳大桥建设方案对工程海区的影响奠定了基础。

关键词: 港珠澳大桥; 泥沙; 潮流; 数学模型; 数值模拟; TK-2D软件; 伶仃洋

中图分类号: TV 81

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972 (2013) S1-0078-08

Mathematical modeling of the effect of constructing Hongkong-Zhuhai-Macao bridge on hydrodynamic sediment environment: I. Development and verification of the model

LI Wen-dan¹, LI Meng-guo¹, 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: According to the feature of the project and the sea area, by TK-2D software and with irregular triangular grid, an integral mathematical model and a local refined one near project area of tidal current and sediment in Lingdingyang bay are set up. Verification and validation are carried out fully against measured data and numerical simulations of tidal current and suspended sediment field are made. The features of the tidal current field and the suspended sediment field of the Lingdingyang bay area are analyzed and the basis is established to demonstrate the effect of constructing Hongkong-Zhuhai-Macao bridge on the sea area.

Key words: Hongkong-Zhuhai-Macao bridge; sediment tidal current; mathematical model; numerical simulation; software TK-2D; Lingdingyang bay

拟建的港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域(图1), 全长35.5 km, 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, 是列入《国家高速公路网规划》的重要交通项目。港珠澳大桥建设对珠江口港口、航道的影响及大桥桥墩的冲刷问题是需要进行研究和论证的。

伶仃洋是一个受多股水流作用的河口湾^[1],

伶仃洋受不同潮型、不同径流和喇叭形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。本文建立了基于三角形网格的伶仃洋内外大范围 and 港珠澳大桥局部细化的二维潮流泥沙数学模型, 使用多年的现场实测资料对模型进行验证, 为进一步论证大桥建设方案对水流泥沙的影响奠定了基础。

收稿日期: 2011-03-16

作者简介: 李文丹(1982—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海岸河口水动力泥沙研究。

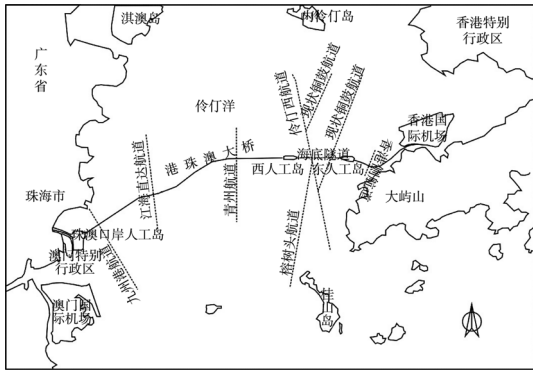


图1 工程海区

1 基于TK-2D软件^[2-3]的二维潮流泥沙数学模型

1.1 二维潮流数学模型

1.1.1 基本方程及定解条件

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)v]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} + \\ & \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} + \\ & \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x, y 为与静止海面(某一基准面)重合的直角坐标系坐标; u, v 分别为 x, y 方向的流速分量; h 为水深(基准面到床面的距离); ζ 为潮位(基准面到自由水面的距离); H 为总水深, $H = h + \zeta$; f 为柯式系数; g 为重力加速度, C 为谢才系数, $C = H^{1/6}/n$, n 为曼宁糙率系数; t 为时间; ε 为水平涡动黏性系数。

1.1.2 数值方法

在时间方向采用向前差分格式, 空间偏导数采用不规则三角形网格有限差分格式离散, 即可得到显式差分方程。

1.2 二维悬沙数学模型

1.2.1 基本方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(h + \zeta)S]}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)uS]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)vS]}{\partial y} + F_s = & \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[(h + \zeta)D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(h + \zeta)D_y \frac{\partial S}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: S 为铅直方向积分的水体含沙浓度; D_x, D_y 分别为 x, y 方向的泥沙扩散系数; F_s 为泥沙源汇函数或床面冲淤函数, 按下面方法确定:

$$F_s = \alpha \omega (S - S_*) \quad (5)$$

式中: S_* 为水体的挟沙力, 一般采用根据现场资料的经验公式法或半理论方法确定; ω 为泥沙沉降速度; α 为泥沙沉降几率。

1.2.2 数值方法

时间偏导数用前差离散, 空间偏导数用显式离散, 对流项使用“迎风”格式离散, 即可得到显式差分方程。

1.3 底床冲淤数学模型

1.3.1 悬沙造成的底床冲淤基本方程

$$\rho_0 g \frac{\partial \eta_s}{\partial t} = \alpha \omega (S - S_*) \quad (6)$$

式中: η_s 为悬沙引起的海底床面冲淤厚度; ρ_0 为悬沙干密度。

1.3.2 底沙造成的底床冲淤基本方程

$$\rho_b g \frac{\partial \eta_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

式中: η_b 为海底床面底沙引起的冲淤厚度; ρ_b 为床面底沙干密度; q_x 和 q_y 分别为单位时间内单宽底沙输移量 q_b 沿 x 和 y 方向的分量, q_b 采用窦国仁公式^[4]。

用基于不规则三角形网格的有限差分方法显式离散式(6)和式(7), 同时考虑悬沙和底沙的底床冲淤变化为 $\eta_s + \eta_b$ 。

2 计算域的确定及网格剖分

根据所研究问题的需要, 建立大范围和小范围两个模型。大模型整个计算域范围如图2所示: 南边界在大万山岛以南的 $21^\circ 52' N$ 纬度线, 北边界在虎门附近的 $22^\circ 49' N$ 纬度线, 西边界在 $113^\circ 30' E$ 经度线, 东边界在 $114^\circ 6' E$ 经度线, 东西距离约 63 km, 南北距离约 102 km, 整个计算域包括伶仃洋西四口门、香港水道、伶仃洋外万山群岛等; 小模型计算域范围如图2所示: 南边界在桂山岛北侧, 北边界在内伶仃岛南侧, 东西距离约 52 km, 南北距离约 22 km。

基于所研究问题的特点, 采用不规则三角形网格剖分计算域, 大模型现状情况下网格见图3, 考虑岛屿 55 个; 小模型现状情况下网格见图4; 工

程方案网格可根据情况进行局部加密。从图3和图4可见,图中的三角形网格较好地概括了伶仃洋内外复杂的岸线、岛屿和地形特征。大模型最大空间步长(三角形网格最大边长)1 552.91 m,最小空间步长(三角形网格最小边长)15.83 m,三角形网格节点68 599个,三角形单元数132 996个;小模型最大空间步长392.39 m,最小空间步长

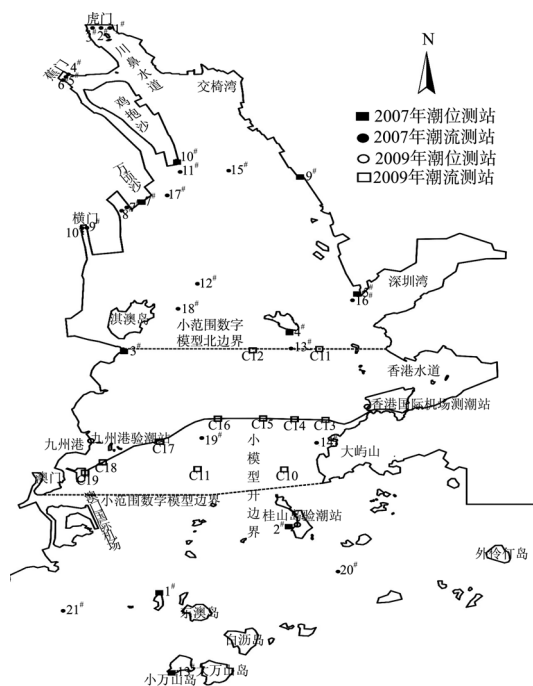


图2 模型范围



图3 大模型网格

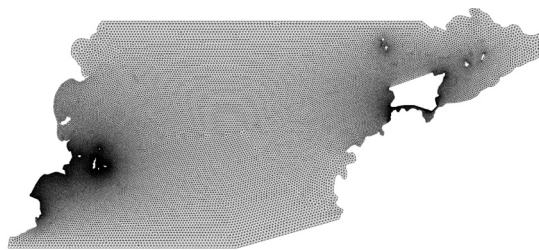


图4 小模型网格

15.83 m, 三角形网格节点28 816个, 三角形单元数 56 193个。

3 有关重要系数和参数的确定

1) n : 曼宁糙率系数 n 一般取值 0.010~0.025。

由于本文计算域较大, 因此在整个计算域中 n 不可能取同一数值, 根据验证情况进行局部调整。

2) ρ_0 : 根据文献[5]的研究, 悬沙干密度 ρ_0 可近似表达为:

$$\rho_0 = 175 d_{50}^{0.183} \quad (8)$$

式中: d_{50} 为悬浮泥沙中值粒径 (mm)。根据现场水文测验各站全潮期间悬沙取样分析, 本海区工程附近悬沙平均中值粒径 $d_{50} = 0.007 \text{ mm}$ [6], 则 $\rho_0 = 70.6 \text{ kg/m}^3$ 。

3) ω : 海水中细颗粒泥沙的沉降速度决定于其絮凝当量的大小。试验表明, 这样的当量粒径一般约为 0.015~0.030 mm, 其相应沉降速度为 0.01~0.06 cm/s, 本文取其平均值 0.04 cm/s。

4) ϵ 参照文献[7]中的规定选取。

5) D_x 和 D_y 参照文献[7]中规定选取。

6) S_s 在泥沙数学模型中是一个非常重要的量, 应根据现场实测资料进行确定, 本文采用窦国仁挟沙力公式 [8]:

$$S_s = \alpha_0 \frac{\rho_0 \rho_s}{\rho_s - \rho_0} \cdot \frac{\sqrt{(u^2 + v^2)^3}}{c^2 H \omega} \quad (9)$$

式中: ρ_s 为泥沙颗粒密度 ($\rho_s = 2.65 \text{ t/m}^3$); ρ_0 为水的密度 ($\rho_0 = 1 \text{ t/m}^3$); α_0 为系数 ($\alpha_0 = 0.023$)。

4 模型验证

4.1 潮位、流速流向和含沙量验证

采用 2007 年 8 月 13 日 17 时—8 月 14 日 22 时的大潮过程、2007 年 8 月 16 日 13 时—8 月 17 日 15 时的中潮过程对大模型进行了潮位、流速流向和

悬沙的验证,用于潮位验证的站位有8个,即黄茅岛站(1[#])、桂山岛站(2[#])、金星门站(3[#])、内伶仃岛站(4[#])、赤湾站(5[#])、宝安机场站(9[#])、南沙港区(10[#])、大万山岛站(13[#]);用于流速流向验证的站位有16个,即蕉门1站(4[#])、蕉门2站(5[#])、蕉门3站(6[#])、洪奇沥1站(7[#])、洪奇沥2站(8[#])、伶仃1站(11[#])、伶仃2站(12[#])、伶仃3站(13[#])、大濠岛站(14[#])、矾石站(15[#])、铜鼓航道站(16[#])、西滩站(17[#])、抛泥地站(18[#])、珠海站(19[#])、外海1站(20[#])、外海2站(21[#]) (水文测验点位见图2)。图5~8分别为部分测站的潮位、流速流向和悬沙过程的验证。

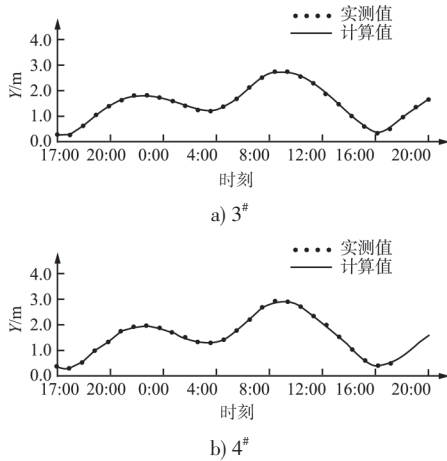


图5 2007年大潮潮位验证

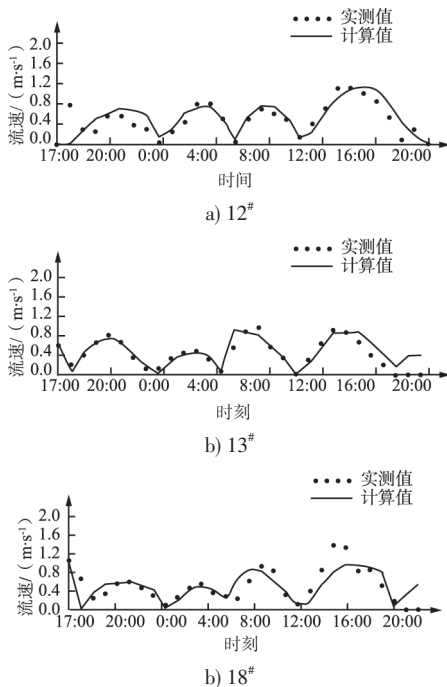


图6 2007年大潮流速验证

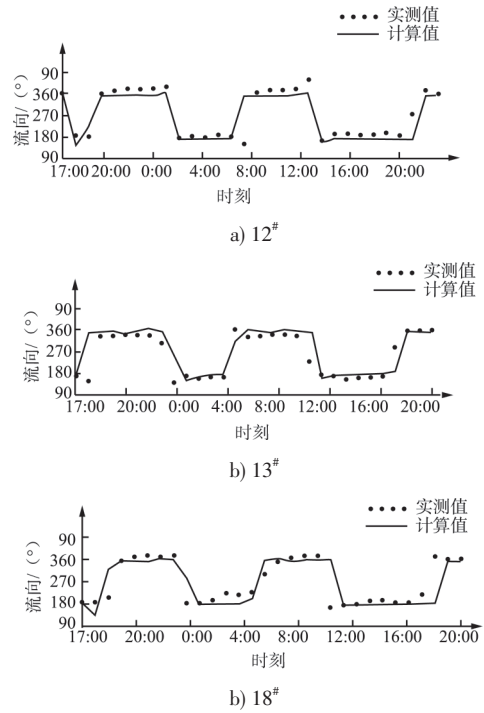


图7 2007年大潮流向验证

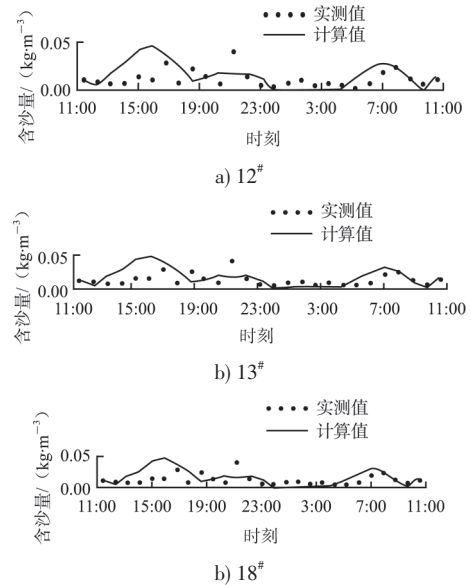


图8 2007年大潮悬沙验证

采用2009年3月27日10时—3月28日13时的大潮过程、2009年4月2日12时—4月3日16时的小潮过程、2009年6月22日8时—6月23日12时的大潮过程和2009年6月16日9时—6月17日14时的小潮过程对模型进行了验证,用于潮位验证的站位有2个,即九州港站(1[#])和香港国际机场站(2[#]);用于流速流向验证的站位有11个,即1[#], 2[#], 3[#], 4[#], 5[#], 6[#], 7[#], 8[#], 9[#], 10[#], 11[#] (水文测验点位见图2)。图9~12分别为部分测站的潮位、流速流向

和悬沙过程的验证。

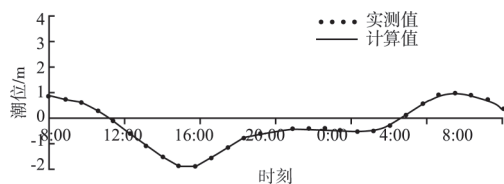
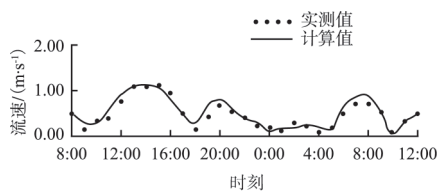
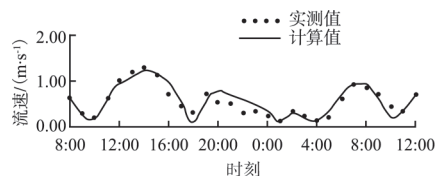


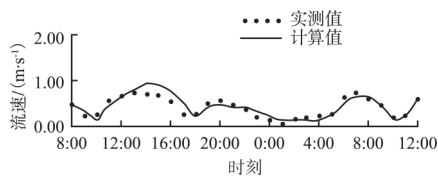
图9 九洲港1#站位2009年洪季大潮潮位验证



a) 3#

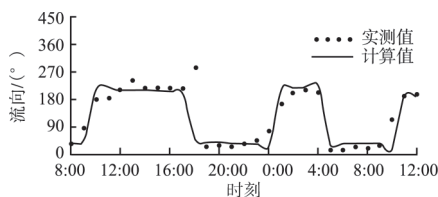


b) 5#

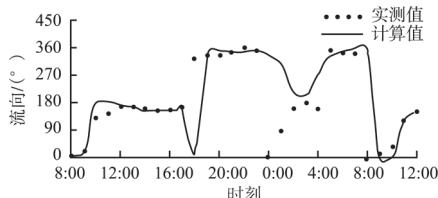


c) 7#

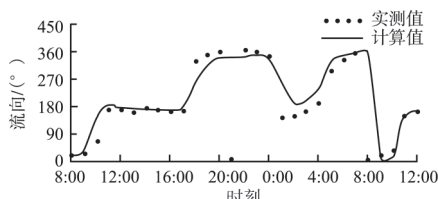
图10 2009年洪季大潮流速验证



a) 3#

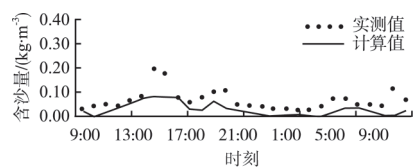


b) 5#

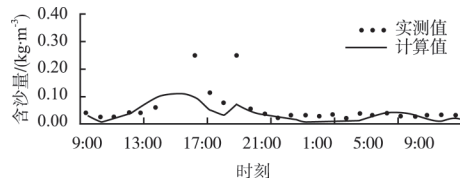


c) 7#

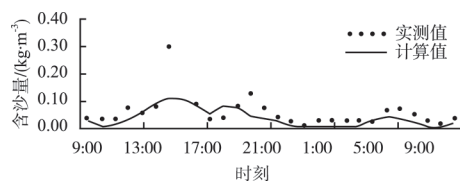
图11 2009年洪季大潮流向验证



a) 3#



b) 5#



c) 7#

图12 2009年洪季大潮悬沙验证

从以上模型的验证过程来看,无论是计算的量值还是位相,均与实测值基本吻合。因此可以认为模型的验证是成功的,可以应用本模型对计算海区内的工程方案前后的潮流场和悬沙场进行数值模拟的计算分析。

4.2 泥沙冲淤验证

文献[9]利用2004年和2008年桥区大比例尺水深测图(珠江基面),对工程区2004—2008年地形变化进行比较:桥区西部近岸浅滩冲淤交替,冲淤量变化很小;桥区西部-5~-10 m等深线之间呈现轻微淤积,年均淤积速率为3~4 cm/a;大濠水道除深槽中部出现了冲刷外,整体还是微淤状态。整个桥区附近(除部分伶仃航道受开挖影响)基本为冲淤平衡状态。本文以2008年4月和2008年9月实测的伶仃航道水深为资料对伶仃航道进行冲淤验证,并使用这些资料调整泥沙参数。结果表明,伶仃航道上段处于淤积状态,下段航道为天然深槽,处于微冲或不冲不淤状态,与前面岸滩稳定性分析得出的结论基本一致,这也进一步说明了该冲淤模型的合理性,用于本工程是可取的。

5 工程海区现状流场和含沙场分布特征

5.1 工程海区现状流场分布

根据工程海区大范围流场图(图13, 14)并结合

以往的研究, 工程海区 (伶仃洋内外海域) 工程方案前的流场分布具有以下特点^[1,6]:

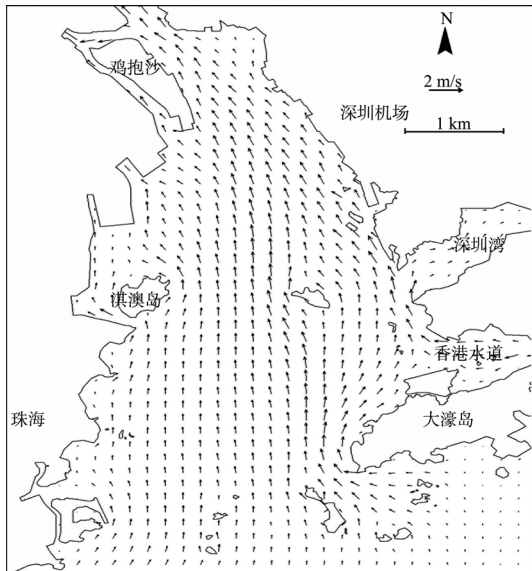


图13 涨潮流态

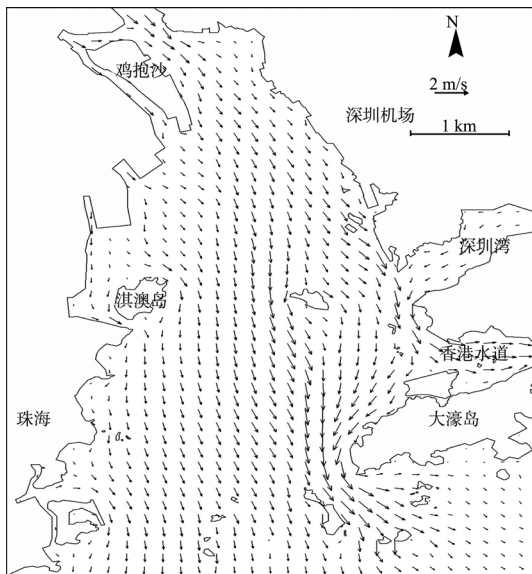


图14 落潮流态

1) 伶仃洋河口湾的潮流基本上呈往复流, 流动趋势是: ①涨潮时, 经香港水道的涨潮水体自东向西进入伶仃洋, 经珠海至大濠岛断面的涨潮水体自南向北进入伶仃洋。在自南向北进入伶仃洋的涨潮水体中, 靠近东侧的一部分在绕过大濠岛后转向东北, 与经过香港水道流入的涨潮水体在铜鼓海区相汇, 并转向偏北, 流向深圳湾和伶仃洋河口湾的湾底。对于虎门、蕉门、洪奇沥和横门, 它们既是径流下泄的通道, 在上游河道内

又具有一定的纳潮库区, 致使涨潮水体经各自河道的口门进入上游河道内。②落潮时, 各河道的纳潮水体与径流一起下泄进入伶仃洋, 并汇同伶仃洋的落潮水体向南退出。对于伶仃洋东侧的落潮水体在同深圳湾的落潮水体汇合后继续向南流动, 并在铜鼓海区分为两股, 一股转向偏东, 经香港水道退出, 另一股转向西南, 并绕过大濠岛后退出。

2) 伶仃洋海区水流运动取决于两个因素, 一是外海潮波, 二是径流。受径流影响, 涨潮流速小于落潮流速。同样受径流影响, 枯季涨、落潮历时相差较小, 但洪季落潮历时大于涨潮历时, 上述特征是洪季径流较大、涨潮水体在向上游运动时受阻的必然结果。

3) 伶仃洋河口湾的潮波运动方向为南北向, 由于南北方向距离较长, 所以存在着一定的位相差。当南部开始涨潮时, 北部仍在落潮, 经一段时间后才转为涨潮。当南部涨潮流速为最大时, 北部涨潮流速还在逐步增大, 经一段时间后才出现最大涨潮流, 而此时南部涨潮流速已开始减小。同样, 落潮和最大落潮流速发生时刻也是北部较南部滞后一段时间。这里所讲的一段时间就是南北方向的位相差。计算结果表明, 位相差的大小与潮型有关, 无论是枯季还是洪季, 当大落潮出现时, 伶仃洋南北向的位相差最为明显, 平均为2 h。

4) 大濠岛以外海区涨潮水流由于受多个岛屿的影响比较紊乱, 各区差异也比较大, 但总的变化趋势基本呈往复流动, 即涨潮时沿程水流由外侧东北向逐渐东偏, 到大濠岛附近时, 水流流向基本呈北向; 落潮时从大濠岛深槽的近似南向逐渐东偏, 到达模型南边界时, 水流流向基本呈东南向。但由于该段海区潮流动力不强, 所以流速的变化规律是涨潮流速小于落潮流速。

5) 桥区附近受地形的影响, 各垂线涨、落潮主流向略有不同, 但整体上涨潮主流是指向北, 落潮主流是指向南, 流速变化具有落潮大于涨潮, 深槽大于浅滩的特点。沿伶仃航道深槽内平均流速变化, 枯季涨潮0.24 ~ 0.55 m/s, 垂线平均最大流速0.37 ~ 0.97 m/s; 枯季落潮0.33 ~ 0.79 m/s,

垂线平均最大流速 $0.61 \sim 1.36 \text{ m/s}$ ；洪季涨潮 $0.19 \sim 0.56 \text{ m/s}$ ，垂线平均最大流速 $0.35 \sim 1.03 \text{ m/s}$ ；洪季落潮 $0.17 \sim 0.79 \text{ m/s}$ ，垂线平均最大流速 $0.52 \sim 1.47 \text{ m/s}$ 。西滩平均流速变化，枯季涨潮 $0.14 \sim 0.40 \text{ m/s}$ ，垂线平均最大流速 $0.28 \sim 0.77 \text{ m/s}$ ；枯季落潮 $0.15 \sim 0.50 \text{ m/s}$ ，垂线平均最大流速 $0.24 \sim 0.77 \text{ m/s}$ ；洪季涨潮 $0.16 \sim 0.39 \text{ m/s}$ ，垂线平均最大流速 $0.30 \sim 0.82 \text{ m/s}$ ；洪季落潮 $0.07 \sim 0.55 \text{ m/s}$ ，垂线平均最大流速 $0.18 \sim 1.00 \text{ m/s}$ 。

5.2 工程海区现状含沙量场特征^[6]

5.2.1 伶仃洋水体含沙量特征

伶仃洋海域含沙量的分布，一般规律是西北高、东南低，河口大于两槽，上段大于下段，伶仃水道大于矾石水道，洪季大于枯季。伶仃航道沿程平均含沙量变化，由川鼻水道向外呈逐渐减小规律，涨、落平均含沙量 $0.01 \sim 0.13 \text{ kg/m}^3$ 。

5.2.2 桥区附近含沙量特征

桥区附近含沙量分布特点是：西侧浅滩高于东侧大濠水道，落潮大于涨潮，大潮时略大于小潮。桥区附近平均含沙量约为 0.044 kg/m^3 ，其中涨潮时，平均含沙量 $0.026 \sim 0.057 \text{ kg/m}^3$ ，平均值约为 0.042 kg/m^3 ，落潮时平均含沙量 $0.024 \sim 0.131 \text{ kg/m}^3$ ，平均值约为 0.049 kg/m^3 。

图15~18为洪季和枯季工程区附近现状情况下含沙量分布情况，由图可见：现状情况下桥区

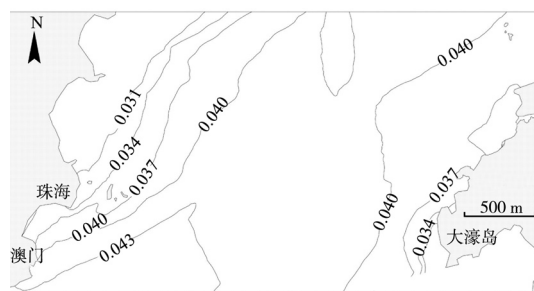


图17 洪季涨潮平均含沙量分布 (单位: kg/m^3)

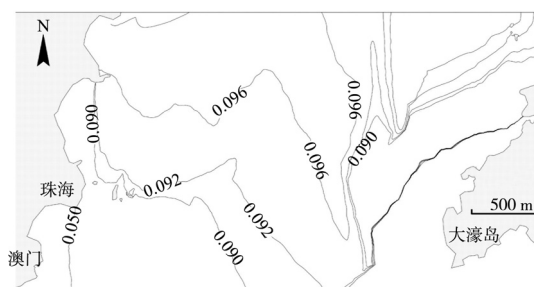


图18 洪季落潮平均含沙量分布 (单位: kg/m^3)

水域无论涨潮还是落潮含沙量都不大；枯季含沙量 $0.02 \sim 0.08 \text{ kg/m}^3$ ；洪季含沙量 $0.03 \sim 0.10 \text{ kg/m}^3$ ；落潮含沙量大于涨潮含沙量；洪季含沙量大于枯季含沙量。

6 结语

伶仃洋是一个受多股水流作用的河口湾，水沙运动非常复杂，本文基于伶仃洋海区现场实测资料的基础上，应用 TK-2D 软件建立了不规则三角形网格的伶仃洋内外海域大范围二维潮流泥沙数学模型和大桥工程区附近的小范围局部细化的二维潮流泥沙数学模型，对该模型的潮位、流速流向、悬沙和地形冲淤场进行了充分的验证模拟，分析了工程海区的潮流悬沙特征，结果表明，模型的验证是成功的，可以应用本模型对计算海区内的工程方案前后的潮流场、悬沙场和地形冲淤场进行数值模拟的计算分析，为分析大桥建设方案对工程海区水沙环境的影响奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李孟国, 韩西军, 杨树森, 等. 广州港南沙港区深水航道水沙问题研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008(3): 321-330.
- [2] 李孟国, 张华庆, 陈汉宝, 等. 海岸河口多功能数学模型

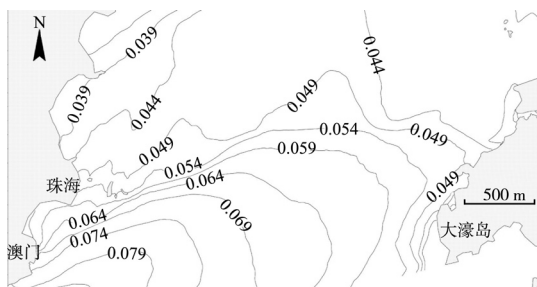


图15 枯季涨潮平均含沙量分布 (单位: kg/m^3)



图16 枯季落潮平均含沙量分布 (单位: kg/m^3)

- 软件包TK-2D的开发研制[J]. 水运工程, 2005(12): 51-56.
- [3] 李孟国, 张华庆, 陈汉宝, 等. 海岸河口多功能数学模型软件包TK-2D的研究与应用[J]. 水道港口, 2006, 27(1): 51-56.
- [4] 窦国仁, 赵士清, 黄亦芬. 河道二维全沙数学模型的研究[J]. 水利水运科学研究, 1987(2): 1-12.
- [5] 罗肇森. 潮汐通道口拦门沙航道的淤积计算[J]. 海洋工程, 1992(2): 32-40.
- [6] 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.
- [7] JTS/T 231-2—2010海岸河口潮流、泥沙数值模拟技术规程[S].
- [8] 窦国仁, 董风舞. 潮流和波浪的挟沙能力[J]. 科学通报, 1995, 40(5): 443-446.
- [9] 杨树森, 韩西军, 韩志远. 港珠澳大桥工程海床演变分析研究报告[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:

港珠澳大桥建成后将是世界最长的跨海大桥, 也是中国第一座桥梁加隧道的跨海大桥, 具有国家战略意义。但港珠澳大桥跨越多股水流作用、水沙运动非常复杂的珠江口、伶仃洋水域, 大桥建设是否会使周边流场发生较大变化, 从而对珠江口港口、航道造成影响; 同时因流场变化引起的大桥桥墩冲刷等问题都亟待验证, 这在一定程度上也凸显了本论文数模研究的必要性和价值。

论文作者应用TK-2D软件从理论上分析、建立了基于三角形网格的伶仃洋内外大范围 and 港珠澳大桥局部细化的二维潮流泥沙数模, 并就潮流场、悬沙场和地形冲淤场等结合多年实测资料成功进行了验证模拟, 同时分析了工程海区的潮流悬沙特征。论文通过验证得出该数学模型可用于海区内的工程方案前后的潮流场、悬沙场和地形冲淤场等数值计算分析的结论, 为分析大桥建设方案对工程海区水沙环境的影响奠定了理论基础。

该论文理论分析与工程实践相结合, 具有较强的针对性、实用性和创新性, 文章论据充分, 启发性强, 具有很好的实用和借鉴价值。

王丽华

2012年12月

评委简介:

王丽华, 博士, 高工, 中交上海航道局。

主持、参与完成了基于GIS水下地形测量测绘数据库的建立、测绘业务信息化处理系统设计和实现研究、航道动态分析等十余项结合生产的科技开发项目和课题, 多项研究成果获奖。多次代表上航局参加国际、国内行业学术会议, 发表论文10余篇, 多篇论文被ISTP、EI检索收录。