



黄沙洋水道末梢浅水槽建港工程 潮流数值模拟与泥沙淤积计算

董佳^{1,2}, 马洪亮^{1,2}, 熊伟^{1,2}

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏南京 210000;

2. 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏南京 210005)

摘要: 为研究有关潮汐通道浅水槽建港问题, 以辐射沙脊群黄沙洋水道末端的条渔港为例, 首先, 进行了自然条件分析; 其次, 构建二维水动力数学模型, 根据实测资料对水动力模型进行验证, 并对工程前后整体海区的潮流流态、特征点横流大小进行了分析; 最后, 应用泥沙经验公式计算条渔港区港池及航道的年回淤量。以上数据可为港区方案设计提供科学依据。

关键词: 浅水槽; 条渔港; 水动力模型; 回淤量

中图分类号: P 751

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0073-07

Tidal current numerical simulation and sediment deposition calculation of port construction in shallow water tank at the end of Huangshayang channel

DONG Jia^{1,2}, MA Hong-liang^{1,2}, XIONG Wei^{1,2}

(1. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. Jiangsu Provincial Technology Research Center for Water Transport Engineering, Nanjing 210005, China)

Abstract: Taking Tiaoyugang as a case study, the port, which locates at the end of the Huangshayang channel's of radial sandridges, is being built in shallow tank of tidal channel. First of all, the natural conditions are analysed. Then, based on the calibration of two-dimensional hydrodynamic mathematical model, the results act in accord with the measured data. The tide current field of whole computational region and the characteristic point's cross flow on before and after the project are discussed. Finally, using the sediment experience formula calculates the yearly deposition quantity in the harbor basin and channel. The conclusion can provide the scientific basis for the port design.

Key words: shallow water tank; Tiaoyugang; hydrodynamic model; deposition quantity

随着经济的快速发展和投资环境日趋完善, 为促进临港产业发展, 多数沿海地区都兴建港口。条渔港地处江苏盐城东台市弶港镇南侧, 南黄海辐射沙脊群潮汐水道—黄沙洋水道(天然水深-5~15m)的末梢, 具备一定的建港条件。处于深槽浅滩相间分布^[1-2]的条渔港水下地形复杂多变, 具有低潮位时出露、高潮时淹没的特征, 因此拟建港工程的实施, 不仅要考虑浅水槽建港本

身的稳定性, 还要深入认识建港工程引起的流场变化是否与现状潮流动力场相适应等问题。工程位置见图1。

结合工程所处自然地形条件, 拟建航道利用黄沙洋水道深槽, 港区可布置2个5 000吨级泊位(图2)。码头平台通过栈桥和后方的方塘和方东垦区的围垦相连。连接后方的栈桥长895 m, 宽10 m; 码头平台长293 m, 宽40 m, 码头面高

收稿日期: 2013-01-16

作者简介: 董佳(1987—), 女, 助理工程师, 从事水动力及泥沙运移研究。

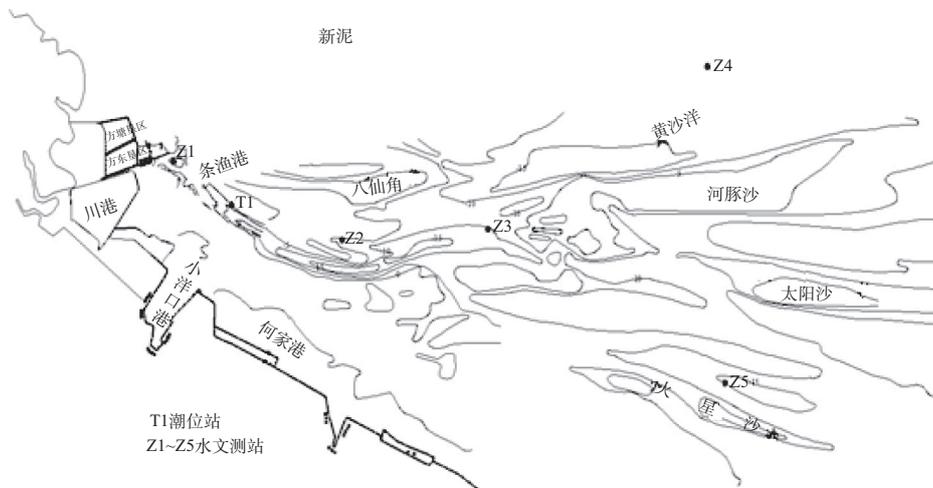


图1 工程海区概况及水文观测站分布

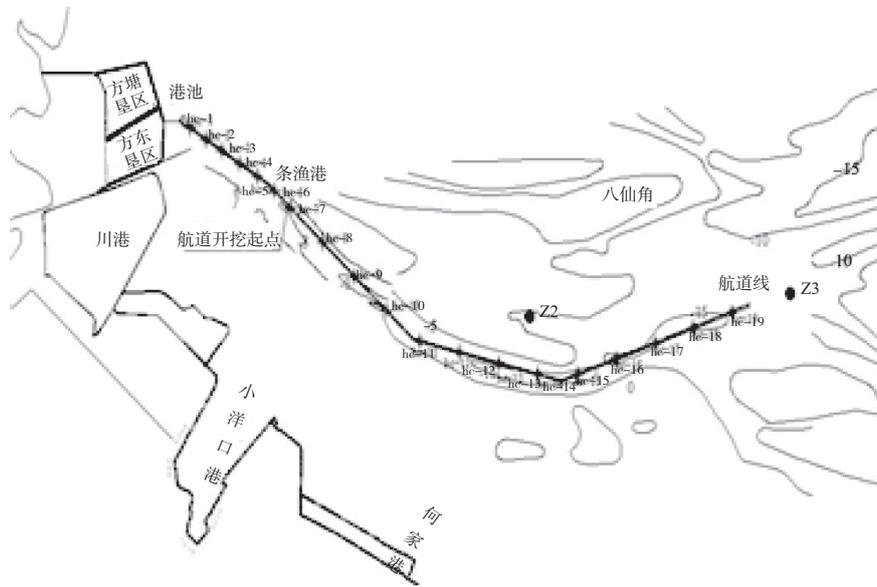


图2 工程布置

程9.1 m，码头前沿停泊水域设计底高程-5.2 m；船舶回旋水域呈椭圆形布置（图3），长轴372 m，短轴248 m，设计底高程与航道设计底高程相同，

即-2.80 m（乘潮3 h保证率为90%计算）；进港航道按通行5 000 DWT船舶的单向航道设计，航道宽95 m，设计底高程-2.8 m，航道边坡1:7。

根据实测水深地形及设计底高程计算可知，港池内停泊水域平均挖深6 m，回旋水域平均挖深4 m，航道疏浚长度约6.5 km平均挖深3 m，港池开挖量约54.9万m³，航道开挖量约185.2万m³，工程总开挖量约226.8万m³。

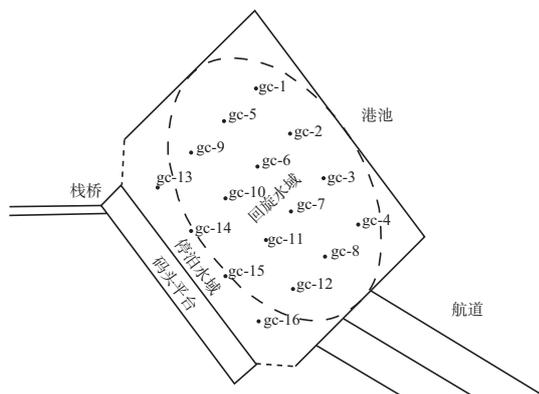


图3 水动力特征点分布

1 自然条件分析

1.1 潮汐和潮流

江苏沿海南受东海前进潮波控制，北受南黄海旋转潮波控制，两者在琼港一带辐合，工程海

域潮汐类型呈正规半日潮^[3], 在一太阴日内有两次高低潮, 且高低潮的潮位几乎相等, 但受浅水及地形的影响, 涨、落潮历时不等, 涨潮平均历时6 h 49 min, 落潮平均历时5 h 51 min。工程海域属正规半日潮流, 浅海分潮流比较显著, 沙洲区的辐射中心弥港涨潮流一般强于落潮流, 而在沙洲外围则相反, 落潮流占优, 黄沙洋水道的小洋口附近及小庙洪水道的吕四附近, 最大可能流速达2.55 m/s。

1.2 波浪

根据吕四海洋站(32°08'N, 121°31'E) 1968—1977年实测资料分析可知^[4], 工程所在海域全年盛行偏北向浪, 频率为63%, 常浪向为东北偏东, 其频率为8%, 强浪向为西北和北向; 波高低于1 m的出现率为85%, 在1~2 m的出现率为10%, 大于2 m的出现率为5%左右。可见近岸部分由于浅滩的掩护, 波浪较小。

1.3 泥沙

拟建工程区域不论何种流态, 其悬沙中值粒径在0.007~0.050 mm, 以絮凝沉降为主; 底砂中值粒径在0.016~0.107 mm。工程处于辐射状沙脊群沉积区, 沉积物在复杂水动力环境下来回运动, 经过充分分选成为纯净的细沙和粗粉沙, 从平面分布看, 近岸含沙量较高, 最高达1.2 kg/m³, 向海方向含沙量降低; 从垂直分布看, 含沙量由表层向底层逐渐增大。

1.4 海床稳定性

辐射沙洲的地形与辐聚—辐散的潮流流场相一致, 决定了辐射沙洲的整体格局在相当长的时间内保持相对稳定。潮流、波流共同作用是辐射沙洲演变的动力因素, 其中潮流是维持滩槽长期稳定的主控因素。在潮流作用下, 潮汐通道不断冲刷加深, 冲刷的泥沙通过横向环流, 堆积到沙脊上, 使沙脊淤高增大。因此黄沙洋水道海底海床稳定, 没有发生大的冲淤性变化。

2 潮流数学模型验证及计算

由于该海域面积与平均水深相比, 水平尺度远大于垂向尺度, 因而流速等水力学参数沿垂直

方向的变化较之沿水平方向的变化要小得多, 本研究采用MIKE21-HD模块进行计算, 该模型可模拟拟建港区海域的潮位、潮流流场、流速等变化。

2.1 二维潮流数学模型

潮流运动的基本方程包括连续性方程和动量守恒方程, 对连续方程和动量方程在 $h=\eta+d$ 范围内进行积分后可得到下列二维浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + u \frac{\partial(hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(hu)}{\partial y} - hf v =$$

$$-hg \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{sx} - \tau_{by}}{\rho} + h \varepsilon_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + u \frac{\partial(hv)}{\partial x} + v \frac{\partial(hv)}{\partial y} + hf u =$$

$$-hg \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{sy} - \tau_{bx}}{\rho} + h \varepsilon_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: t 为时间; η 为潮面高程; d 为静水深度; $h=\eta+d$ 为总水深; u, v 为深度平均流速 x, y 方向分量; f 为科氏力系数; g 为重力加速度; ρ 为水密度; τ_{sx}, τ_{sy} 为水面风应力在 x, y 方向分量; τ_{bx}, τ_{by} 为水底摩擦阻在 x, y 方向分量; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 为 x, y 方向的水流紊动黏性系数。

2.2 定解条件

对于水动力模型, 初始条件为 $\eta|_{t=0}=0, u|_{t=0}=0, v|_{t=0}=0$, 边界条件有水—陆边界(固边界), 水—水边界(开边界)。关于固边界假定垂直于海岸的法向速度为零, 即 $\nabla \phi \times \mathbf{n} = \mathbf{V} \times \mathbf{n} = 0$; 关于开边界, 本次研究外海开边界潮位由东中国海潮波数学模型^[5]提供, 近岸开边界采用实测潮位资料。

2.3 模型求解

采用有限体积法对方程进行离散^[6], 采用三角形网格剖分计算区域, 可准确地模拟曲折多变的岸线, 重点研究区域进行加密, 以提高计算精度和效率^[7]。网格剖分见图4: 网格节点数为45 070个, 单元个数为89 734个, 网格节点最大间距为1 000 m, 最小间距为30 m。为准确模拟工程海域的水动力情况, 模型计算范围取东西长约65 km, 南北长约35 km。在该计算域的4面

边界中, 3面(南面、北面、东面)为开边界, 1面(西面)为固边界。潮流数学模型时间步长取10 s, 水平涡动黏性系数采用Smagorinsky公式^[8]计算, 对于干湿交替区域则采用“干湿判断法”处理^[9]。

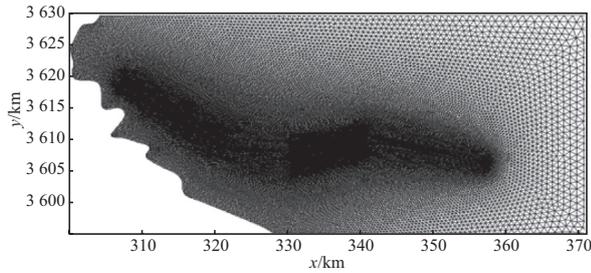


图4 数学模型网格剖分图

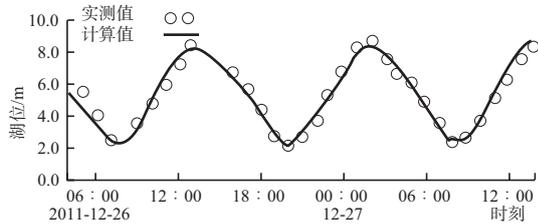
2.4 模型验证

潮流验证采用2011年12月18日至2011年12月28日的大、小潮(本文仅给出大潮的验证结果)实测资料, 具体时间见表1, 测站位置见图1, 包括1个潮位站(T1)及5个潮流站(Z1, Z2, Z3, Z4, Z5)。

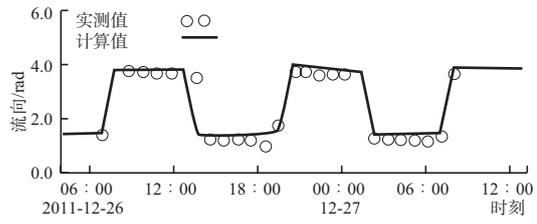
2011年12月各潮位站的潮位过程、各潮流测点的流速过程验证结果见图5。整个潮位过程计算值与实测值吻合较好, 高潮位最大偏差值为8 cm、低潮位最大偏差值为9 cm, 各测点流速、流向计算值与实测值相差不大, 满足规程^[10]的相关要求, 模拟结果较好地反映了该海域潮流的运动特点, 可用于预测工程后的潮流变化。

表1 大、小潮测流时间

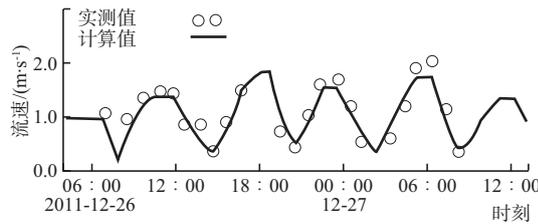
潮型	开始时间	结束时间
小潮	2011-12-18 (农历十一月二十四) T11:00	2011-12-19 (农历十一月二十五) T14:00
大潮	2011-12-26 (农历十二月初二) T 07:00	2011-12-27 (农历十二月初三) T09:00



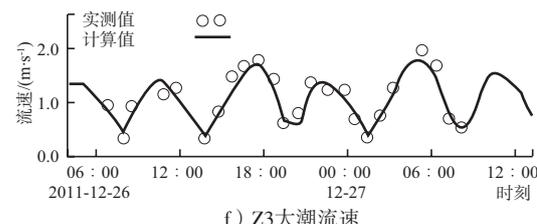
a) T1大潮潮位



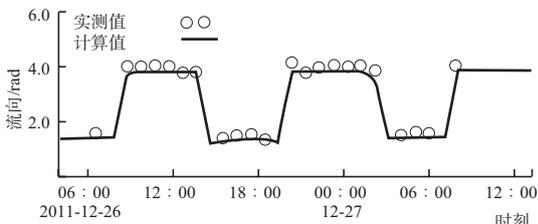
e) Z2大潮流向



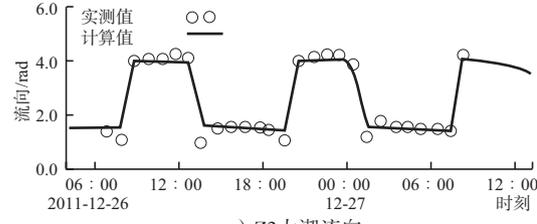
b) Z1大潮流速



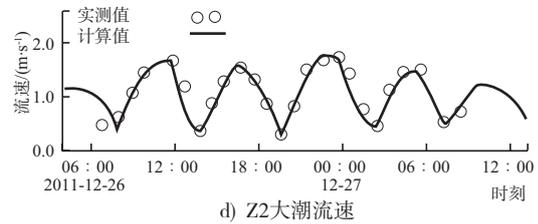
f) Z3大潮流速



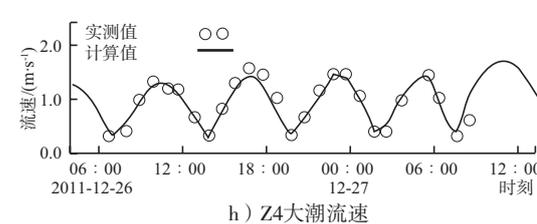
c) Z1大潮流向



g) Z3大潮流向



d) Z2大潮流速



h) Z4大潮流速

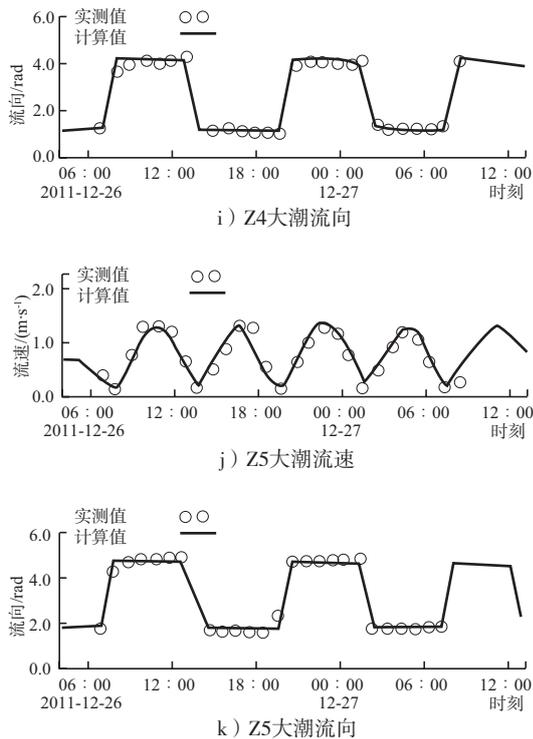


图5 大潮潮流验证

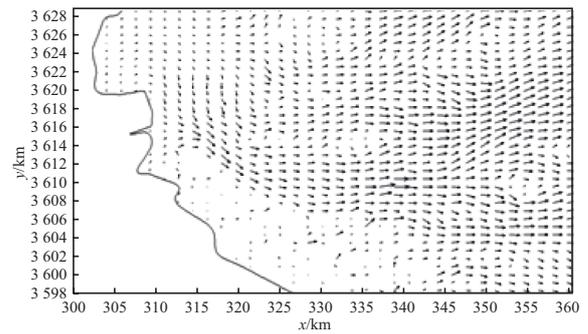
3 工程海区水动力情况分析

3.1 工程海区流场现状

拟建港区水深在理论基面1 ~ -3 m, 自然状况下涨、落潮流速较小, 航道涨、落潮平均流速在1 m/s左右, 港池平均流速在0.7 m/s左右, 见图6。由于受海底辐射状地形的影响, 由条渔港延伸出去的黄沙洋水道呈往复流, 涨、落潮流向基本与深槽走向一致。

3.2 工程后海区流场计算结果分析

在工程建设前计算条件的基础上, 增加港池航道工程方案, 工程后流场见图7。从表2可知, 工程后潮流变化如下: 1) 由工程前涨落潮平均差值①-②和工程后涨落潮平均差值③-④可知, 开



b) 大潮落急

图6 工程建设前海区大范围流场

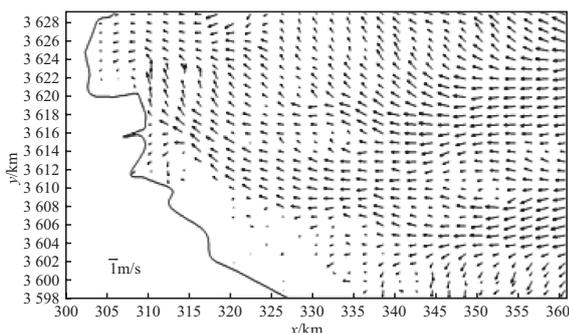
挖段航道及港池特征点涨潮平均值一般大于落潮平均值, 开挖区域主要由涨潮流控制; 2) 工程后较工程前航道涨潮平均流速略有增大, 由③-①可得最大增值为0.07 m/s, 而港池涨潮平均流速相对于工程前稍有减小的趋势, 最大减小值为0.09 m/s, 工程后较工程前航道及港池落潮平均流速几乎都减小, 由④-②可得最大减小值为0.1 m/s; 3) 由③-①/(④-②)可知, 从工程后和工程前的涨落潮差值变化来看, 其涨潮平均流速的变化幅度大于落潮平均流速的变化, 最大变化值为0.05 m/s, 出现在航道开挖段; 4) 总体而言, 由于开挖范围较小, 因而除了开挖段及港池以外, 整体流速未有大的改变。

为研究工程实施后航道及港池的横流大小, 沿航道轴线共布置35个特征点(港池16点, 航道19点)为研究对象, 特征点位置见图3。从特征水动力点的横流来看, 由于拟建航道顺着自然深水槽潮流流向(由外海向岸航线走向分别为75°~225°, 110°~290°, 130°~310°), 因此横流强度并不大, 工程后航道涨潮最大横流流速为0.46 m/s, 落潮最大横流流速为0.45 m/s, 即航道最大横流流速均小于0.5 m/s, 港池最大横流流速为0.14 m/s。

4 工程后泥沙回淤分析

4.1 泥沙回淤计算方法

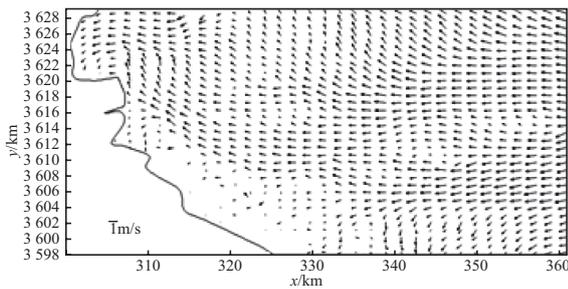
在平面二维潮流数值模拟取得满意验证结果的基础上, 利用罗肇森提出的泥沙回淤半经验半理论公式^[11]进行港池航道在正常天气条件下的泥沙淤积计算, 具体公式如下:



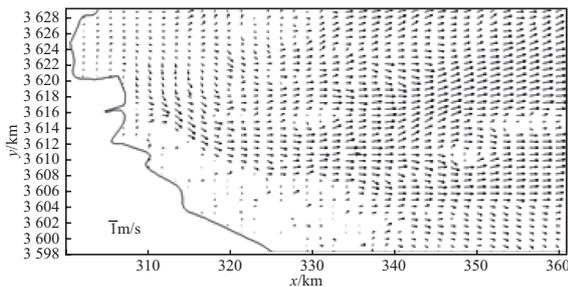
a) 大潮涨急

表2 条渔港航道工程前后大潮流速变化

位置	测点	工程前			工程后							
		涨潮平均①/ (m·s ⁻¹)	落潮平均②/ (m·s ⁻¹)	(①-②)/ (m·s ⁻¹)	涨潮平均③/ (m·s ⁻¹)	落潮平均 ④/(m·s ⁻¹)	(③-④)/ (m·s ⁻¹)	(③-①)/ (m·s ⁻¹)	$\frac{③-①}{①}/\%$	(④-②)/ (m·s ⁻¹)	$\frac{④-②}{②}/\%$	$\frac{③-①}{④-②}/\%$
航 道 内	hc-1	0.69	0.41	0.28	0.71	0.38	0.33	0.02	0.03	-0.03	-0.08	-0.01
	hc-2	0.73	0.50	0.23	0.80	0.48	0.32	0.07	0.10	-0.02	-0.04	0.05
	hc-3	0.85	0.67	0.18	0.89	0.66	0.23	0.04	0.04	-0.01	-0.01	0.03
	hc-4	0.93	0.85	0.08	1.00	0.83	0.17	0.07	0.08	-0.02	-0.02	0.05
	hc-5	1.07	1.13	-0.06	1.12	1.12	0.01	0.05	0.05	-0.02	-0.01	0.04
	hc-6	1.15	1.26	-0.11	1.20	1.25	-0.05	0.05	0.04	-0.01	-0.01	0.04
	hc-7	1.16	1.30	-0.14	1.18	1.29	-0.11	0.02	0.02	-0.01	-0.01	0.01
	hc-8	0.98	1.12	-0.14	1.02	1.16	-0.14	0.04	0.04	0.04	0.03	0.01
	hc-9	0.95	1.15	-0.20	0.96	1.12	-0.16	0.01	0.01	-0.03	-0.02	-0.02
	hc-10	0.79	1.06	-0.27	0.85	1.03	-0.18	0.06	0.07	-0.03	-0.03	0.03
	hc-11	0.91	0.79	0.12	0.95	0.78	0.17	0.04	0.04	-0.02	-0.02	0.02
	hc-12	1.00	0.85	0.15	1.04	0.83	0.21	0.04	0.04	-0.01	-0.02	0.03
	hc-13	1.04	0.80	0.24	1.09	0.82	0.27	0.04	0.04	0.01	0.02	0.03
	hc-14	1.16	1.00	0.16	1.19	1.02	0.17	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
	hc-15	1.05	1.04	0.01	1.07	1.03	0.04	0.02	0.02	-0.01	-0.01	0.01
	hc-16	1.02	1.04	-0.02	1.05	1.02	0.03	0.03	0.03	-0.02	-0.02	0.01
	hc-17	1.01	1.13	-0.13	1.03	1.14	-0.12	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	hc-18	1.01	1.11	-0.10	1.04	1.08	-0.04	0.03	0.03	-0.03	-0.03	0.00
	hc-19	1.06	1.02	0.04	1.10	1.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01
港 池 内	gc-5	0.71	0.49	0.22	0.64	0.39	0.24	-0.08	-0.11	-0.10	-0.20	-0.02
	gc-6	0.61	0.43	0.19	0.56	0.36	0.20	-0.05	-0.08	-0.07	-0.15	-0.02
	gc-7	0.61	0.41	0.20	0.58	0.37	0.20	-0.03	-0.05	-0.04	-0.09	-0.01
	gc-8	0.61	0.41	0.20	0.59	0.31	0.27	-0.02	-0.03	-0.09	-0.23	-0.07
	gc-13	0.62	0.46	0.16	0.59	0.43	0.16	-0.04	-0.06	-0.04	-0.08	0.00
	gc-14	0.57	0.40	0.16	0.48	0.34	0.13	-0.09	-0.16	-0.06	-0.15	0.03
	gc-15	0.51	0.38	0.13	0.43	0.35	0.08	-0.08	-0.15	-0.03	-0.07	0.05
	gc-16	0.48	0.35	0.13	0.43	0.32	0.11	-0.06	-0.12	-0.03	-0.09	0.03



a) 大潮涨急



b) 大潮落急

图7 工程建设后海区大范围流场

$$P = \frac{\alpha \omega S t}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \right] (\cos n\theta)^{-1} \quad (4)$$

式中： P 为回淤厚度； α 为泥沙沉降几率； ω 为淤泥质泥沙沉降速度，考虑到泥沙絮凝，取0.000 5 m/s； S 为含沙量浓度，港池由实测点Z1求得，其值为0.83 kg/m³，开挖段航道由T1求得，其值为0.52 kg/m³； t 为淤积历时； ρ_0 为泥沙的淤积干密度； v_1 、 v_2 分别为建港工程前后的流速； d_1 、 d_2 分别为建港工程前后的水深； θ 为水流方向与航道轴线的夹角； n 为水流跨越航道的转向系数。

4.2 泥沙回淤强度分析

条渔港拟建港工程需开挖港池及航道，潮流计算结果表明工程前后水流条件没有大的改变，且涨潮流起主导作用，因此建港工程对海域泥沙回淤分布没有明显的影响，主要影响港池及开挖航道水域。港池内由于工程前水深比航道内小得多，开挖深度相应较大，经泥沙回淤公式计算港

池内水域泥沙回淤强度在 1.7 m/a 左右, 淤积较为严重; 航道内, 与港池相连接处水深条件较差, 挖深也较大但小于港池, 航道起始处淤积强度在

0.6~1.5 m/a, 随着航道向外海延伸, 水深条件逐步转好, 泥沙回淤强度也渐渐减弱直至冲淤平衡, 开挖厚度和航道年回淤厚度见图 8。

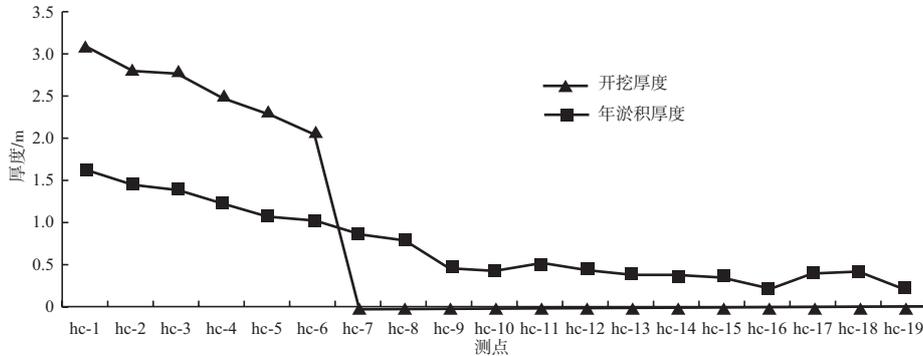


图 8 工程后航道开挖厚度和年回淤厚度对比

从工程后港池航道年泥沙回淤情况 (表 3) 可得: 1) 回淤面积。新开挖的港池几乎全部处于淤积状态, 而航道的回淤面积 (hc-1~hc-14, 图 2) 约占航道总面积的 70%。2) 回淤总量。由于航道回淤面积大于港池回淤面积, 因此航道回淤总量也相应大于港池的回淤总量。3) 平均淤积强度。港池、航道的平均淤强呈两极分化的特点, 港池回淤强度大于航道回淤强度; 港池开挖深度大, 相应的回淤强度也较大, 航道开挖水深相对较小, 回淤强度也较小。

表 3 工程后港池航道泥沙回淤情况

位置	平均开挖深度/m	回淤总量/ 万m ³	回淤面积/ 万m ²	平均淤积强度/ (m·a ⁻¹)
港池	5	17.8	10.4	1.7
航道	3 (港池外 6.5 km)	112.6	225.2	0.5

5 结语

辐射沙脊群环境下的浅水槽具有低潮时出露、高潮时淹没的特征, 在此建港会涉及航道开挖进而产生泥沙淤积问题, 需十分慎重。本文基于海区现场实测资料, 应用二维潮流数学模型进行了潮位、流速的充分验证, 说明潮流模型是合理可靠的, 并利用泥沙经验公式估算了港池航道在常风天条件下的年回淤量。结果表明: 拟建工程对周边海区潮流动力几乎没有影响, 开挖的港池航道会出现不同程度的回淤, 但影响程度相对于开挖深度来说是可以接受的, 若不考虑港区运营的维护费用, 拟建工程所选位置基本上是可行

的, 可为后续建港工程的具体方案设计提供一定技术支持。

参考文献:

- [1] 陈君, 王义刚, 张忍顺. 江苏岸外东沙沙脊群的沉积特征[J]. 海洋通报, 2006, 25(6): 37-46.
- [2] 王颖, 朱大奎, 周旅复, 等. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J]. 中国科学, 1998, 28(5): 385-393.
- [3] 吴德安, 严以新, 马林艺, 等. 江苏辐射沙洲海域最大可能潮差的计算与分析[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(4): 75-78.
- [4] 陆培东, 俞国华, 刘家驹, 等. 南通港腰沙-冷家沙港区建港自然条件研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [5] 张东生, 张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的 M2 潮波[J]. 河海大学学报, 1996, 24(5): 35-40.
- [6] 丘兆山. 有限体积法及其在近岸潮流计算中的研究应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [7] 李孟国. 三角形网格在水动力水环境数学模型中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2001(3): 59-64.
- [8] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations I: the basic experiment[J]. Journal of Computational Physics, 1990, 86(1): 56-74.
- [9] 孙健, 陶建华. 潮流数值模拟中动边界处理方法研究[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 22(1): 44-52.
- [10] JTJS/T 231—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规范[S].
- [11] 罗肇森, 罗勇. 浮泥挟沙力和输沙规律的研究和应用[J]. 泥沙研究, 1997(4): 42-46.

(本文编辑 武亚庆)