



直湾岛 LNG 码头工程潮流数学模型研究 及泥沙淤积分析*

曹永港^{1,2}, 陈宜展¹, 廖世智¹, 欧阳永忠^{1,2}, 杨 威¹, 张 燕¹, 肖志建¹, 马 媛¹

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510300;

2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 针对直湾岛 LNG 码头工程的平面布置设计需求进行了潮流数学模型研究及泥沙淤积分析。基于水动力模拟结果, 结合码头回淤经验公式, 计算工程前后码头、泊位所处位置的正常天气和极端天气下的泥沙回淤强度。计算结果表明: 1) 工程所在海域潮流主要以往复流为主, 工程后仅在码头附近流速有较小变化。2) 正常天气下仅直湾岛西南侧的码头泊位会出现回淤, 但年平均淤积不超过 0.02 m, 其余海域不会出现回淤。3) 极端天气下工程海域的回淤也较小, 50 a 一遇风浪淤积厚度为 0.32 m。研究主要结论为: 1) 工程所在位置水清沙少, 流速强度弱, 泥沙回淤小。2) 工程后对周边海域水动力泥沙环境影响整体较小。

关键词: 直湾岛; LNG 码头; 潮流; 数值模拟; 泥沙淤积

中图分类号: U 612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0015-08

Mathematical model of tidal currents for LNG wharf project on Zhiwan Island and analysis on sediment siltation

CAO Yong-gang^{1,2}, CHEN Yi-zhan¹, LIAO Shi-zhi¹, OUYANG Yong-zhong^{1,2}, YANG Wei¹, ZHANG Yan¹, XIAO Zhi-jian¹, MA Yuan¹

(1. South China Sea Marine Engineering Surveying Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China;

2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China)

Abstract: This paper studies the mathematical model of tidal currents and analyze sediment siltation for the planar layout design requirement of the LNG wharf project on Zhiwan Island. On the basis of the hydrodynamic simulations and the empirical equation of siltation at the wharf, the intensity of sediment siltation under normal and extreme weather at the wharf and berths is calculated before and after the project. The calculations reveal that 1) the tidal currents are mainly reciprocating flow, and there is only a small change in flow velocity near the wharf after the project; 2) under normal weather, only the berths on the southwest side of Zhiwan Island can witness siltation, but the annual average siltation does not exceed 0.02 m, and the rest of the sea area does not encounter siltation; 3) little siltation occurs at the sea areas of the project under extreme weather, and the thickness of siltation in 50 years is 0.32 m in the case of wind and waves. The main conclusions of the study are as follows: 1) The project is in a place featuring clear water, little sand, weak flow intensity, and little sediment siltation; 2) after the completion of the project, the overall impact on the hydrodynamic sediment environment of the surrounding sea areas is small.

Keywords: Zhiwan Island; LNG wharf; tidal current; numerical simulation; sediment siltation

收稿日期: 2021-11-09

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42174013); 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金资助项目(粤自然资合[2020]022号、[2021]38号); 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金项目(180106); 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金项目(MESTA-2020-B010)

作者简介: 曹永港(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 从事泥沙运动理论及河口海岸动力学研究。

目前，世界各国面临应对气候变化及环境持续恶化的挑战，均将目光投向最清洁的石化能源—天然气，纷纷看好其未来发展趋势。中国作为世界上最大的能源消费大国和天然气消费增长最快的国家，积极参与未来全球性天然气市场治理过程。直湾岛 LNG 项目功能定位是为粤港澳及周边区域增加一个新的可靠的供气气源，推动清洁能源利用和节能减排，保障港澳地区天然气的供应。直湾岛 LNG 接收站码头工程位于珠江口外伶仃海域担杆列岛西部直湾岛北侧，拟于东湾顺着浪向布置1座装卸码头，于西湾顺着岸线依次布置1座装船码头、1座罐箱(兼重件)码头、1座加注码头和1座工作船码头，见图1。工程区实测资料稀少，工程后产生的水流条件及泥沙回淤情况是值得关注的问题，码头泊位淤积问题是码头设计和建设关注的重点。泥沙冲淤结合潮流数值模拟技术是目前被广泛采用的科学技术手段之一，用于论证项目选址、工程方案合理性等。戴勇等^[1]建立二维潮流数学模型模拟分析通用码头工程后的流场变化，利用刘家驹公式预测工程实施后泥沙回淤情况；张娜等^[2]、张焯等^[3]采用潮流泥沙数值模拟方法研究了 LNG 码头建设后的水动力泥沙问题，主要涉及工程实施后的水流及海床冲淤变化情况。另外，还有顺岸式栈桥码头工程^[4]、厦门双鱼岛游艇码头工程^[5]、舟山岱山岛燕窝山码头工程^[6]、杭州湾开敞式长栈桥码头工程^[7]等论证研究。



图1 工程平面布置

为满足工程的平面布置设计需求，基于最新实测海流、悬沙、底质及地形资料，开展潮流数

学模型试验，预测工程实施后的水流条件，利用经验公式进行泥沙回淤分析，为工程科学决策及建设实施提供可靠的技术依据。

1 水动力及泥沙环境

2019年4月22日—23日在工程海域进行16个站春季大潮水文调查，调查内容包括海流、悬沙、表层沉积物等。同时收集附近大万山(21°56'N, 113°43'E)、珠海(22°15'N, 113°35'E)和赤湾(22°28'N, 113°53'E)海洋站2019年4月的气象与潮位资料。

1.1 潮汐和海流

观测海区的潮汐主要表现为不规则半日潮特征。大万山站、珠海站和赤湾站最大潮差分别为1.92、2.16、2.45 m。图2为2019年4月22—23日珠江口垂线平均海流矢量($v_{垂线}=0.3v_{表}+0.5v_{0.6H}+0.2v_{底}$)。珠江口外附近海域的实测海流主要受珠江冲淡水、南海北部沿岸流和潮汐3种动力过程共同作用。冲淡水自珠江上游河道而来，在科氏力作用下沿着珠江河口西侧进入南海北部；南海北部沿岸流主要影响西侧站位中底层及桂山岛东侧站位，主要表现为东向流；潮汐作用为不规则半日潮特征，由口门外向上游河口方向逐渐增强，涨潮流为北向，落潮流为南向。

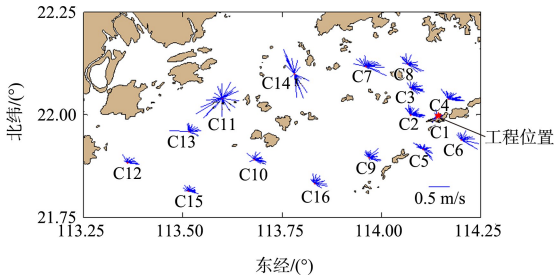


图2 珠江口垂线平均海流矢量图

1.2 含沙量特征

直湾岛离珠江口河口较远，几乎无内河沙源。工程海域海水含沙量低，拟建码头附近C1站实测含沙量在0.000 1~0.013 5 kg/m³，大潮期平均含沙量为0.003 7 kg/m³，中值粒径为0.019 mm。

1.3 表层沉积物特征

表层沉积物总体颗粒较细,中值粒径范围为0.009~0.012 mm,类型为细粉砂。沉积物中粉砂含量最高,平均值为77.30%;黏土含量次之,平均值为17.79%;砂含量第3,平均值为4.92%。

2 二维潮流数学模型及泥沙淤积

2.1 潮流数学模型

水流连续方程^[8]:

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

x 、 y 方向水平动量方程分别为:

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} -$$

$$\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} -$$

$$\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: t 为时间; x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; $h=\eta+d$ 为总水深; η 为水位; d 为静止水深; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向上的平均速度分量; f 为科氏力系数, $f=2\omega\sin\varphi$, ω 为地球自转角速度, φ 为当地纬度; g 为重力加速度; p_a 为当地大气压; ρ 为水的密度; ρ_0 为水的参考密度; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为水平黏滞应力项; S 为源项; (u_s, v_s) 为源项水流流速; τ_{sx} 、 τ_{bx} 分别为表面风切应力、底部切应力 x 向的分量; τ_{sy} 、 τ_{by} 分别为表面风切应力、底部切应力 y 向的分量。

2.2 泥沙淤积计算

2.2.1 正常天气下回淤

直湾岛港址所处海域开阔,-20 m等深线距岛最近距离约80 m,根据图1可知,受直湾岛掩护,西湾码头泊位和重件泊位等港池均属于掩护

式港池;东湾北侧的接卸泊位港池则为开敞式,码头和港池离开陆岸有一定距离,码头和栈桥均为透空式高桩梁板结构。这种类型的港口布置几乎不改变近岸水流的流路,港池回淤计算公式^[9]如下:

$$P_1 = \frac{\omega_0 ST}{\rho_0 g} K_0 \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right] \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{A}{A_0} \right)^{1/3} \right] \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\omega_0 ST}{\rho_0 g} K_1 \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right] \quad (5)$$

式中: P_1 和 P_2 分别为掩护式和开敞式港池泥沙年淤积强度(m/a); K_0 为经验系数,取值为0.14~0.17; K_1 为淤积系数,取0.35; ω_0 为黏性细颗粒泥沙絮凝沉速(m/s),取0.000 6~0.000 8 m/s; v_1 、 v_2 分别为工程实施前后平均流速(m/s); S 为当地实测平均含沙量(kg/m³); T 为1 a回淤时间(s); ρ_0 为泥沙干密度; A 为港内水下浅滩水域面积(m²); A_0 为港内总水域面积,包括港池和水下浅滩面积(m²),本工程 A 与 A_0 的面积取相同。

2.2.2 风浪天气下回淤

首先进行水体含沙量修正^[10],计算得到风浪情况下的平均含沙量。风浪作用下的泥沙可能一部分或大部分以底沙或浮泥形式进入港区、码头泊位水域。工程海域表层沉积物平均中值粒径为0.009~0.012 mm,泥沙输移采用的浮泥输沙率计算公式^[11]如下:

$$q_{sf} = M_c \left(\frac{u_{bmax}^2}{u_c^2} - 1 \right) \frac{v_m}{u_b} \sin\varphi \quad (7)$$

$$u_b = \frac{2h}{T} \left[1 + 4.263 \left(\frac{H}{L} \right)^{1.692} \right] \sinh^{-1} \frac{2\pi H}{L} \quad (8)$$

$$u_{bmax} = \frac{\pi}{2} u_b \quad (9)$$

式中: q_{sf} 为浮泥单宽输沙率[(kg/(s·m))]; M_c 为冲刷系数[(kg/(m²·s))],由试验确定; u_{bmax} 为波浪的最大轨道速度(m/s); u_c 为泥沙起动流速; v_m 为潮流、波流(传质速度)和风吹流的合成速度(m/s); u_b 为波浪的平均轨道速度(m/s); φ 为波流传质速度方向与航道方向的夹角(°)。

泥沙参数参考全潮水文观测的实测结果,大潮期悬沙中值粒径平均值为0.019 mm,悬沙含量

平均值为 0.0037 kg/m^3 ，表层沉积物中值粒径平均值为 $0.009\sim0.012\text{ mm}$ 。

2.3 模型网格与相关参数

模型计算区域和网格见图 3，模型网格数为 275 620 个、节点数为 139 540 个。采用三角形非结构化网格，码头工程区域进行适当加密。根据桩基实际位置情况，基于等效过水面积对桩基处网格进行概化，模型最小网格为 1 m。岸边界采用可滑不可入条件，靠近陆地的水边界根据实测潮位值得出，外海水边界利用全球潮汐模型 (TPX09) 通过 15 个分潮 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_M 、 M_F 、 M_4 、 M_{N4} 、 M_{S4} 、 $2N_2$ 、 S_1) 推算得到。糙率根据水深进行插值计算获取。

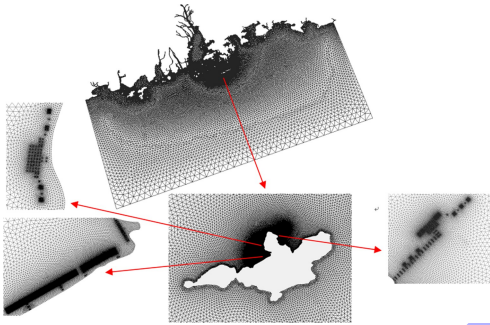
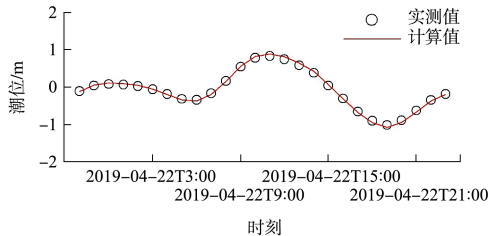


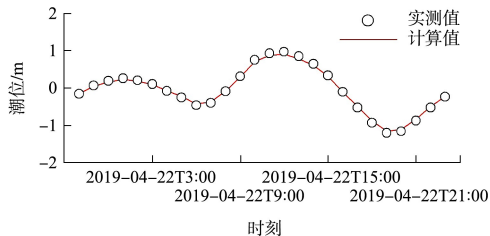
图 3 计算域及网格剖分

2.4 模型验证

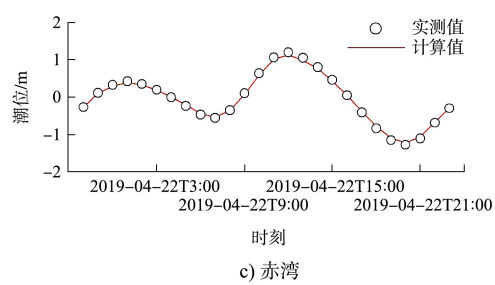
具体验证过程见文献[12]，选取 2019 年 4 月 22 日—23 日工程海域春季大潮水文调查其中 6 个站进行对比，由图 4、5 可知，计算值与实测值吻合较好，满足精度要求。



a) 大万山

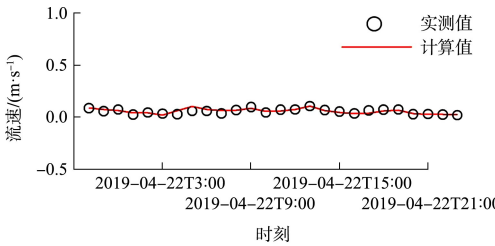


b) 珠海

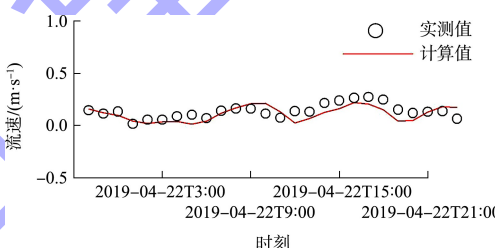


c) 赤湾

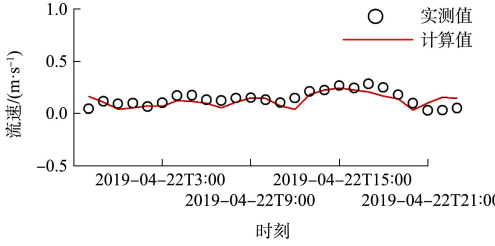
图 4 潮位验证



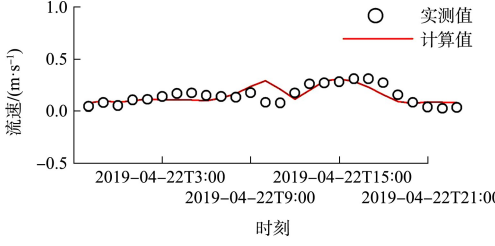
a) C1 流速



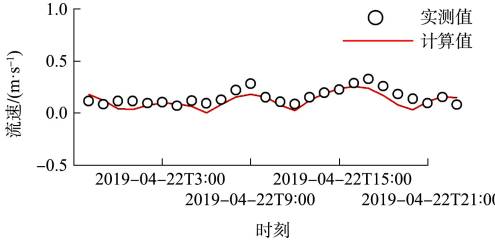
b) C2 流速



c) C3 流速



d) C4 流速



e) C5 流速

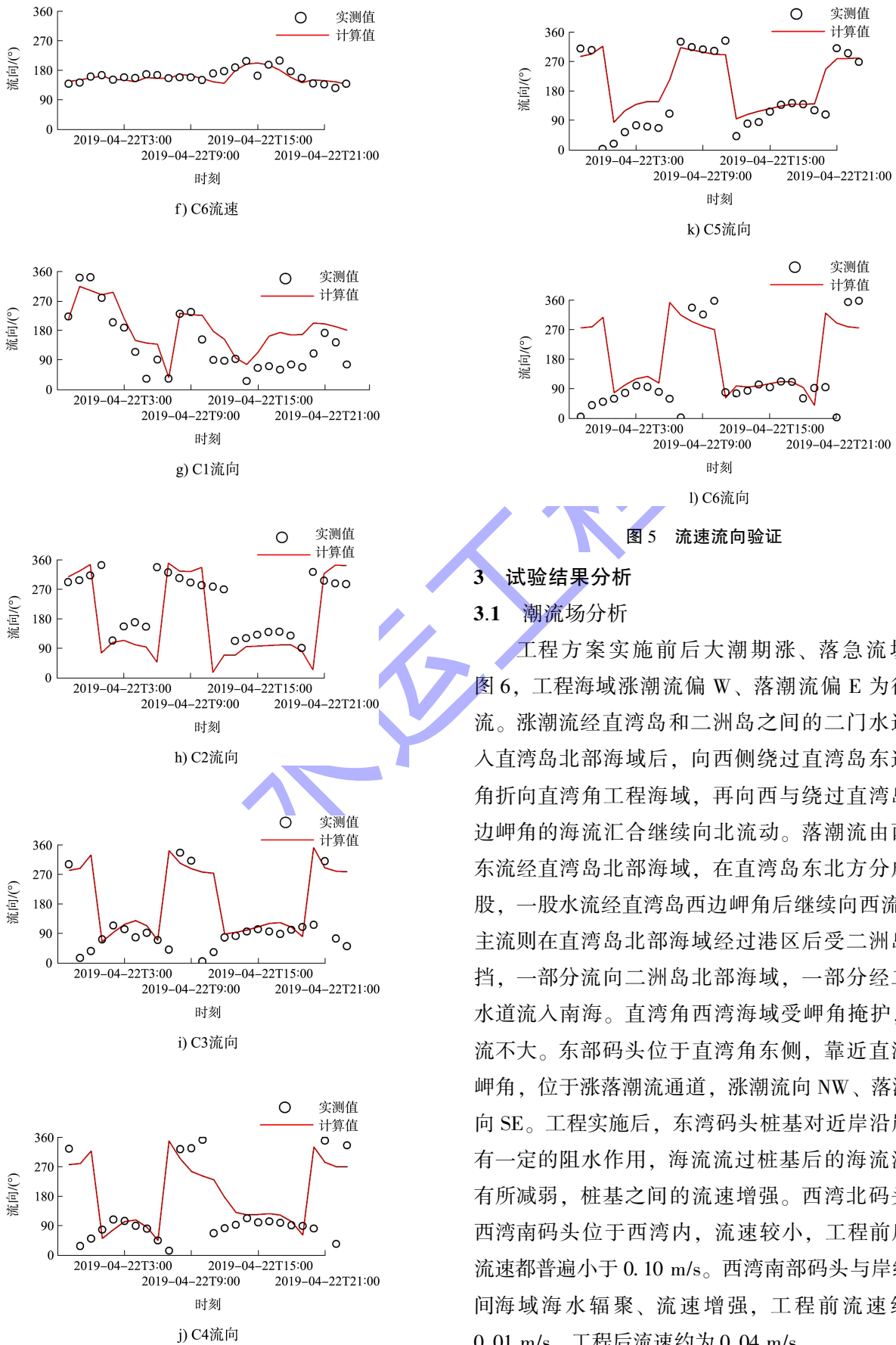


图 5 流速流向验证

3 试验结果分析

3.1 潮流场分析

工程方案实施前后大潮期涨、落急流场见图 6, 工程海域涨潮流偏 W、落潮流偏 E 为往复流。涨潮流经直湾岛和二洲岛之间的二门水道进入直湾岛北部海域后, 向西侧绕过直湾岛东边岬角折向直湾角工程海域, 再向西与绕过直湾岛西边岬角的海流汇合继续向北流动。落潮流由西向东流经直湾岛北部海域, 在直湾岛东北方分成两股, 一股水流经直湾岛西边岬角后继续向西流动; 主流则在直湾岛北部海域经过港区后受二洲岛阻挡, 一部分流向二洲岛北部海域, 一部分经二门水道流入南海。直湾角西湾海域受岬角掩护, 潮流不大。东部码头位于直湾角东侧, 靠近直湾角岬角, 位于涨落潮通道, 涨潮流向 NW、落潮流向 SE。工程实施后, 东湾码头桩基对近岸沿岸流有一定的阻水作用, 海流流过桩基后的海流流速有所减弱, 桩基之间的流速增强。西湾北码头和西湾南码头位于西湾内, 流速较小, 工程前后的流速都普遍小于 0.10 m/s。西湾南部码头与岸线之间海域海水辐聚、流速增强, 工程前流速约为 0.01 m/s、工程后流速约为 0.04 m/s。

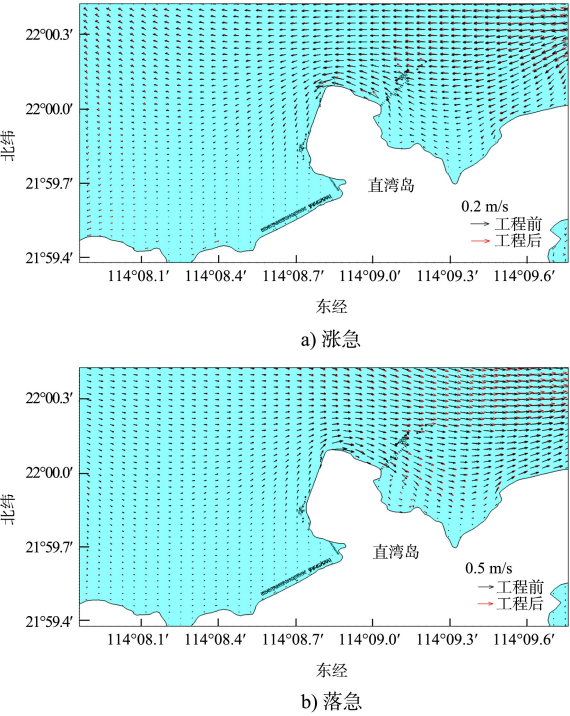


图 6 工程方案实施前后大潮期涨、落急流场

工程建设后直湾岛海域流场变化见图 7。码头工程建设后，管桩起到阻水作用，管桩附近海流流速减小，管桩之间和码头外围水体辐聚、流速增大。东湾海域位于直湾岛东侧，靠近水道，海水流速相对较大，流速变化范围也较大，主要表现为：外围管桩繁密海域和近岸海域流速变小，码头中部海域海水辐聚、流速增大，流速变大和减小幅度都达到 0.04 m/s。西湾北海域的流场变化表现为近岸管桩附近海域流速明显减弱，流速减小最大值达到 0.08 m/s。西湾南位于直湾岛西侧弱流区，码头建设后流速相对变化较小，表现为码头区流速明显变小，码头外侧海域流速小幅增大。从中可比较出，直湾岛西侧海域较东侧海域流速小、属弱流区，更适合码头建设。

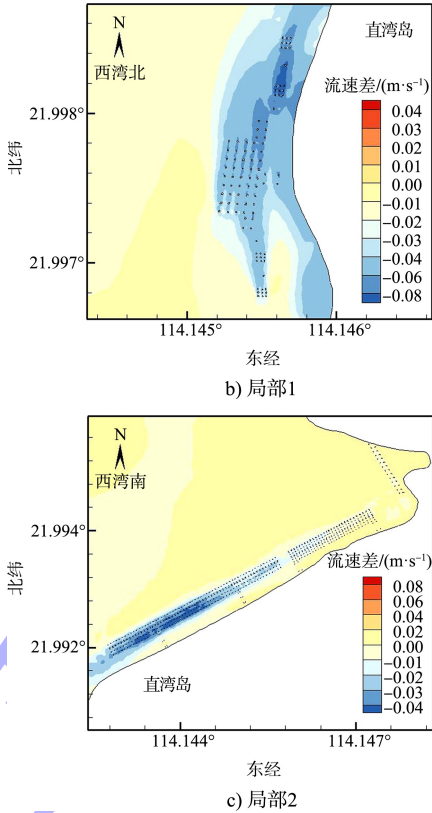
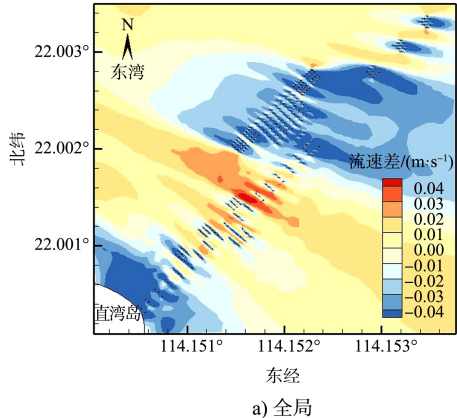


图 7 工程前后平均流速差(工程后-工程前)等值线

3.2 泥沙回淤分析

考虑 22 个特征点^[13](图 8)，代表了东湾码头、西湾北码头、西湾南码头、直湾岛东侧大回旋圆海域和直湾岛西侧小回旋圆海域的波浪以及泥沙回淤特征，其水深范围为 5~39 m。工程海域不利波向主要集中在 NE 与 WSW 向。5 a、10 a、50 a 和 100 a 一遇有效波高范围分别为 2.8~4.6、3.0~4.9、3.5~5.6、3.8~6.1 m。年回淤计算考虑波浪各向年平均波高以及相应的频率分布。S 向波浪对码头所在地的影响很小，1[#]、10[#]~12[#]点的不利波向为 NE 向，2[#]~3[#]点的为 ENE 向，其余计算点的为 WSW 向。骤淤计算历时取 12 h，10 a 一遇对应各特征点的有效波高见表 1。

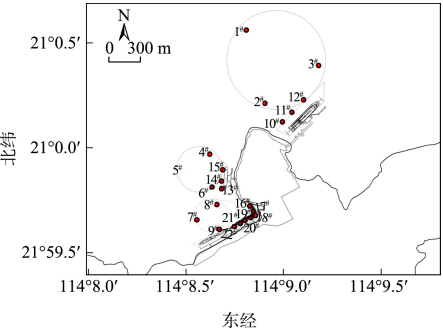


图 8 特征计算点

表 1 计算点最大有效波高

位置	序号	50 a 一遇对应有效波高/m
大回	1 [#]	5.62
	2 [#]	4.85
	3 [#]	4.90
中回	4 [#]	4.02
	5 [#]	4.18
	6 [#]	4.15
小回	7 [#]	4.02
	8 [#]	4.15
	9 [#]	3.80
东湾	10 [#]	4.73
	11 [#]	4.76
	12 [#]	4.75
西湾北	13 [#]	4.15
	14 [#]	4.11
	15 [#]	4.06
西湾南东	16 [#]	3.75
	17 [#]	3.96
	18 [#]	3.89
西南	19 [#]	3.96
	20 [#]	3.93
	21 [#]	3.96
	22 [#]	3.95

直湾岛沿岸水深可满足大型船舶停靠，码头工程建设不需要进行清淤，1[#]~22[#]特征点不需要开挖。工程后泥沙回淤主要考虑码头工程建设后泥沙的自然回淤和骤淤。正常天气条件下，工程海域水体含沙量较低，约为 0.003 7 kg/m³，计算特征点工程前后的流速变化很小，仅直湾岛西南侧的码头泊位会出现回淤，且年平均淤积不超过 0.020 m，其余海域未出现回淤，年平均回淤厚度为 0.016 m。考虑 50 a 一遇风浪后，工程海域水体含沙量有所增加，深水区域约为 0.04~0.17 kg/m³，量级仍不大，回淤的程度较小。直湾岛西南侧的码头泊位水深小于 10 m，受水流和波浪动力的影响较东北侧的开敞水域要大，含沙量相对较高，可出现较大的回淤。计算大风浪作用下的泥沙输移，各计算特征点淤积最大的区域为 18[#]，50 a 一遇风浪的淤积厚度为 0.32 m；淤积最小的区域为 2[#]，50 a 一遇的淤积厚度为 0.02 m。见表 2。

表 2 工程后泥沙回淤预测结果

位置	序号	年淤积/ (m·a ⁻¹)	50 a 一遇淤积厚度/ [m·(12 h) ⁻¹]
大回	1 [#]	—	0.05
	2 [#]	—	0.02
	3 [#]	—	0.06
中回	4 [#]	—	0.04
	5 [#]	—	0.05
	6 [#]	—	0.07
小回	7 [#]	—	0.07
	8 [#]	—	0.07
	9 [#]	—	0.06
东湾	10 [#]	—	0.02
	11 [#]	0.016	0.03
	12 [#]	—	0.06
西湾北	13 [#]	—	0.07
	14 [#]	—	0.06
	15 [#]	—	0.06
西湾南东	16 [#]	—	0.11
	17 [#]	—	0.15
	18 [#]	—	0.32
西南	19 [#]	—	0.20
	20 [#]	—	0.18
	21 [#]	—	0.27
	22 [#]	—	0.17
平均		0.016	0.10

注：“—”表示该位置不会发生回淤。

4 结语

- 1)工程海域涨潮流偏 W、落潮流偏 E，为往复流。直湾岛西侧海域较东侧海域流速小，属弱流区，更适合码头建设。工程后并未引起工程海域流场发生较大变化，仅在码头建设区域附近有较小程度变化，对周围水动力环境的影响较小。
- 2)正常天气条件下仅直湾岛西南侧的码头泊位会出现回淤，年平均淤积不超过 2 cm，其余海域不会出现回淤。极端天气下工程海域短期回淤也较小，50 a 一遇风浪淤积厚度为 0.32 m。
- 3)工程位置离河口较远，泥沙来源不丰富，水清沙少，泥沙回淤较小，工程后对周边海域泥沙环境影响整体较小。

参考文献：

[1] 戴勇, 徐孟飘. 南通港东灶港作业区码头工程潮流数值模拟及泥沙回淤计算分析[J]. 水道港口, 2021, 42(1): 52-59.

[2] 张娜, 赵雪夫, 李孟国. 天津浮式 LNG 码头建设水动力泥沙问题研究[J]. 水运工程, 2014(10): 13-17.

[3] 张焯, 姚姗姗. LNG 码头取排水工程潮流泥沙数值模拟研究[J]. 中国水运, 2021(1): 151-153.

[4] 宋晓军, 白志刚, 臧颖. 某顺岸式栈桥码头泥沙淤积成因分析[J]. 水运工程, 2016(4): 60-67.

[5] 陈纯, 张春生, 张义丰. 厦门双鱼岛游艇码头潮流泥沙数学模型试验研究[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 26-31.

[6] 李玉婷, 宋志尧, 李瑞杰, 等. 舟山岱山岛燕窝山码头工程潮流泥沙数值模拟[J]. 水道港口, 2019, 40(2): 135-143.

[7] 齐越, 廖鹏, 崔峥, 等. 杭州湾开敞式长栈桥码头布置潮流泥沙数值分析[J]. 港工技术, 2017, 54(1): 12-16.

[8] 杨燕华. 二维潮流泥沙数学模型理论及工程应用[D]. 天

津: 天津大学, 2012.

[9] 刘家驹, 张镜潮. 淤积质海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用: 兼论连云港建西大堤后的泥沙问题[J]. 水利水运科学研究, 1993, 93(4): 301-320.

[10] 中交第一航务勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[11] 罗肇森. 河口治理与大风骤淤[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.

[12] 曹永港, 陈宜展, 廖世智. 直湾岛 LNG 接收站项目码头及陆域工程可行性研究咨询服务: 潮流泥沙数学模型试验专题报告[R]. 广州: 国家海洋局南海调查技术中心, 2020.

[13] 曹永港, 黄艳松, 廖世智. 直湾岛 LNG 接收站项目码头及陆域工程可行性研究咨询服务: 波浪整体数学模型试验专题报告[R]. 广州: 国家海洋局南海调查技术中心, 2020. (本文编辑 武亚庆)

(上接第 14 页)

3 结论

1) 基于开源软件 OpenFOAM 建立数值波浪水槽模拟了波浪对弧形防浪墙的冲击过程。基于层流模型与湍流模型的数值结果存在一定差异, 尤其对于波陡较大的工况; 基于湍流模型的数值结果更接近试验数据, 可为分析波浪与海岸结构物相互作用的强非线性问题提供可靠的依据。

2) 在不同波浪要素条件下, 直立堤弧形防浪墙迎浪面所受到的波浪力随着圆弧半径的增大而减小, 不同圆弧半径防浪墙上的压力随高度的增加非线性减小, 实际工程中可以根据这一特性对防浪墙的构造形式进行优化。

参考文献：

[1] 刘丽娜, 黄明毅. 大圆弧防浪墙在防波堤工程中的应用[J]. 水运工程, 2013(10): 149-151, 154.

[2] 于龙基, 杨森, 张华昌, 等. 弧形防浪墙的迎浪面波压力数值模拟[J]. 水运工程, 2017(11): 29-35.

[3] 黄先北, 郭嫻. OpenFOAM 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021

[4] CHEN L F, ZANG J, HILLIS A J, et al. Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM[J]. Ocean engineering, 2014, 88: 91-109.

[5] CHEN L F, SUN L, ZANG J, et al. Numerical study of roll motion of a 2-D floating structure in viscous flow[J]. Journal of hydrodynamics, 2016, 28(4): 544-563.

[6] 孙亮, 那鑫宇, 陈柯宇, 等. 波浪在潜堤和潜堤地形上的传播变形[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(1): 139-144.

[7] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam[J]. International journal for numerical methods in fluids, 2012, 70(9): 1073-1088.

[8] DEVOLDER B, RAUWOENS P, TROCH P. Application of a buoyancy-modified k-omega SST turbulence model to simulate wave run-up around a monopile subjected to regular waves using OpenFOAM[J]. Coastal engineering, 2017, 125: 81-94.

[9] DEVOLDER B, TROCH P, RAUWOENS P. Performance of a buoyancy-modified k- ω and k- ω SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM [J]. Coastal engineering, 2018, 138: 49-65.

[10] TING C K, KIRBY T. Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone[J]. Coastal engineering, 1994, 24(1/2): 51-80.

[11] 李雪艳. 弧形防浪墙水动力特性的试验研究与数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

(本文编辑 武亚庆)