

· 综 合 ·



强潮流海域人工岛建港潮流泥沙动力学研究

王 卉¹, 余小建², 崔 峥², 曹向明²

(1. 浙江海港佛渡集装箱码头有限公司, 浙江 舟山 316100;

2. 南京水利科学研究院, 河流海岸研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 以梅山港人工岛建港为例, 研究强潮流海域人工岛建港潮流泥沙动力学问题。研究表明, 受人工岛阻挡影响, 落潮流形成绕岛水流, 设计方案码头前出现缓流区; 涨潮流主要受码头桩基阻水影响, 在西侧码头前沿局部出现缓流区。通过优化布置斜向码头导流, 优化方案码头前落潮流态有所改善; 规划方案码头连片实施后, 码头前涨潮流有所改善。设计方案实施后 16[#]~21[#]泊位停泊区年平均淤积厚度 2.2 m, 年最大淤积厚度 4.3 m, 停泊区和回旋水域年总淤积量 385 万 m³, 优化方案实施后年总淤积量减少约 8 万 m³, 规划方案实施后年总淤积量减少约 185 万 m³。

关键词: 人工岛建港; 潮流运动; 泥沙淤积; 物理模型试验

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0014-09

Study on currents and sediment dynamics for port construction of artificial island in strong tidal current areas

WANG Hui¹, SHE Xiaojian², CUI Zheng², CAO Xiangming²

(1. Zhejiang Seaport Fodu Container Terminal Co., Ltd., Zhoushan 316100, China;

2. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Taking the port construction of artificial island in Meishan Port as an example, this study investigates the currents and sediment dynamics in strong tidal current areas. The findings indicate that due to the obstruction of artificial islands, the ebb current forms a bypass flow around the island, resulting in a slack water zone in front of the wharf in the design scheme. The flood currents are primarily influenced by the obstruction of the wharf pile foundations, creating a localized slack water zone along the western wharf frontage. By optimizing the layout with diagonally oriented wharves to guide the flow, the optimization plan improved the ebb current conditions in front of the wharf. After implementing the planned scheme with interconnected wharves, the flood current conditions also showed improvement. After the implementation of the design scheme, the average annual siltation thickness in the berthing areas of berths 16[#]–21[#] is 2.2 m, with a maximum annual siltation thickness of 4.3 m. The total annual siltation volume in the berthing and maneuvering areas reached 3.85 million m³. After implementing the optimization scheme, the total annual siltation volume is reduced by approximately 80,000 m³, and after implementing the planned scheme, the reduction is about 1.85 million m³.

Keywords: port construction of artificial island; tidal current movement; sediment siltation; physical model experiment

海上人工岛建设是开发利用海洋资源的重要方式之一^[1], 可为重大工程项目的建设提供宝贵土地资源。人工岛建设势必改变工程区的流场分

布, 强潮流海域人工岛的阻水和挑流作用更为显著, 进一步增加了流场的复杂性。本文以梅山港口基础设施重点项目人工岛建港为例, 开展强潮

收稿日期: 2024-12-16

作者简介: 王卉 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为港口与航道工程。

流海域人工岛建港潮流泥沙研究, 重点分析码头前沿流态和工程区域回淤情况, 并提出优化工程方案。

1 工程概况

工程项目位于宁波梅山岛北侧、穿山半岛南侧海域, 项目拟建设人工岛和码头工程, 见图 1、2, 其中人工岛面积为 4.76 km^2 。当地潮差大, 涨落潮流速和含沙量大, 潮流泥沙条件复杂^[2]。码头工程实施后的水流条件和泥沙淤积直接影响码头运营情况, 一方面码头附近流场的平顺性影响船舶系泊安全, 另一方面泊位淤积影响码头经济效益的发挥, 需要定期清淤。因此, 针对码头工程布置方案, 开展系列物理模型试验, 预演工程海域潮流运动情况, 分析不同码头布置方案的流场和淤积情况。



图 1 工程区地理位置

Fig. 1 Geographical location of project area



图 2 设计方案码头布置 (单位: m)

Fig. 2 Wharf layout of design plan (unit: m)

物理模型具有直观、形象、可靠等优点, 能够形象地模拟湍流、涡流等小尺度紊动现象, 可以最大限度地反映所研究问题的物理本质, 在港口、桥梁、电厂取排水等工程建设实践中被广泛应用。徐啸等^[3-5]通过潮流泥沙物理模型研究宝钢马迹山矿石码头、洋山水深港码头及厦门嵩屿港区码头等复杂水流泥沙条件下的码头布置问题, 总结出海岛水域潮流运动的两大类型 (绕流型和环抱型) 及建港整治规律; 高正荣等^[6-7]采用物理模型研究苏通大桥桥墩冲刷问题和防护问题, 解决了特大型桥梁桥墩冲刷和防护问题; 余小建等^[8]采用物理模型研究曹妃甸挖入式五港池航道与防波堤工程潮流泥沙问题; 赵永印等^[9]通过波浪潮流泥沙物理模型研究三亚新机场人工岛工程。本文将采用潮流泥沙物理模型手段, 研究拟建工程实施后码头区水流条件和泥沙淤积情况, 旨在为码头工程的实施提供科学依据和技术支撑。

2 工程海域自然条件

2.1 地形地貌

工程海域属杭州湾和东海之间的潮汐通道, 海域内岛屿众多。受岛屿岸线的约束, 峡道内水流强劲, 深槽众多, 岸坡陡峭, 水深和水下地形高差起伏较大。工程区海岸地貌为人工海岸, 近岸退潮时泥面出露, 属于泥质滩涂; 水下岸坡位于堤坝以外的广阔海域, 总体坡度较缓, 泥面高程一般为 $-1.00 \sim -10.00 \text{ m}$ (1985 国家高程基准) 不等, 自北向南倾斜, 坡度小于 5° 。从不同时期卫片来看, 近 30 多年来, 海域岸线稳定, 局部岸线的变化主要是局部围垦和港口工程建设等人类活动所致。

2.2 潮汐

舟山群岛海域潮汐来自东中国海前进潮波。潮汐受岛屿、岸线和水下地形影响显著, 工程区海域潮汐类型为正规半日潮。根据 2021 年 12 月水文测验期间潮汐特征值统计, 该海域平均潮差为 2.65 m , 最大潮差为 4.21 m , 平均落潮历时比涨潮历时长, 历时差为 44 min 。

2.3 潮流

东海潮波以前进波的形式,由东南向西北挺进,传播进入宁波舟山海域时,受虾峙、六横、登步诸岛分割,形成多股潮流,经由虾峙门、牛鼻山、葛藤等水道传入。根据2021年12月9条垂线大、中、小潮水文资料统计,工程海域潮流整

体以往复流为主,涨、落潮流的方向与水道方向基本一致,大潮涨潮最大流速 $0.68\sim 1.33\text{ m/s}$,涨潮平均流速 $0.40\sim 0.83\text{ m/s}$;大潮落潮最大流速 $0.80\sim 1.27\text{ m/s}$,落潮平均流速 $0.49\sim 0.77\text{ m/s}$ 。大潮流平均流速矢量图见图3。

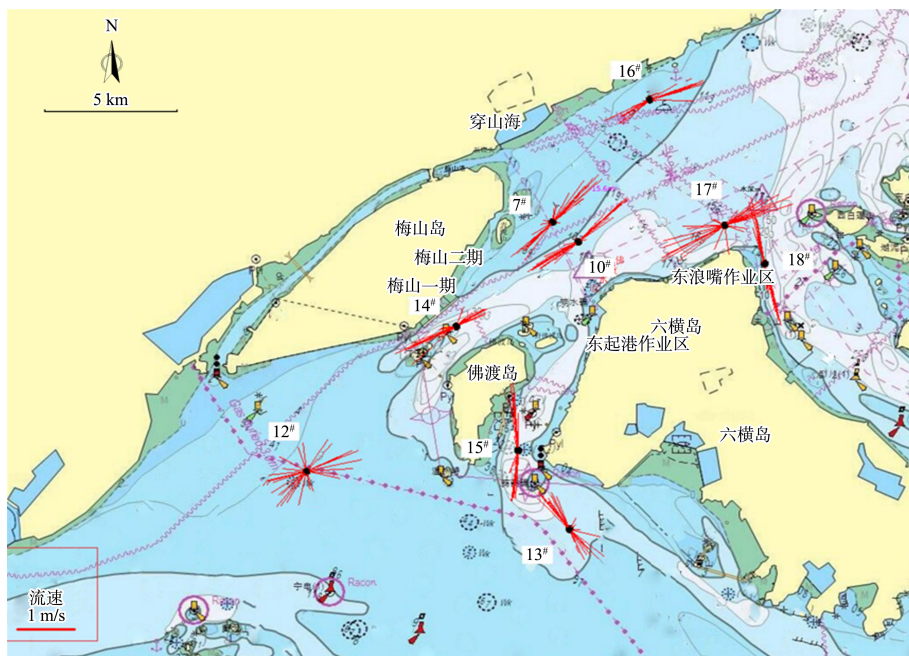


图3 2021年12月水文测验大潮垂线平均流速矢量图

Fig.3 Depth-averaged velocity vector map for hydrological survey in December 2021

2.4 泥沙

2.4.1 悬沙

2021年8月夏季测区大、中、小潮平均含沙量分别为 0.27 、 0.28 、 0.14 kg/m^3 。2021年12月冬季测区大、中、小潮平均含沙量分别为 0.35 、 0.29 、 0.26 kg/m^3 。工程区海域冬季含沙量大于夏季含沙量。工程区水域夏季中值粒径平均值为 0.0077 mm ,冬季中值粒径平均值为 0.0074 mm ,夏季与冬季的悬沙中值粒径相当。

2.4.2 底质

工程区水域底质中粉砂含量最高,其次是黏土。夏季各水文测站底质样品中粉砂含量在 $64.28\%\sim 70.71\%$,平均值为 67.66% ;黏土含量在 $18.06\%\sim 34.29\%$,平均值为 28.20% 。冬季各水文测站底质样品中粉砂含量在 $64.04\%\sim 74.81\%$,平均值为 68.81% ;黏土含量在 $21.98\%\sim 30.97\%$,

平均值为 25.60% 。夏季各水文测站底质中值粒径变化范围为 $0.0072\sim 0.0230\text{ mm}$,平均值为 0.011 mm 。冬季各水文测站底质中值粒径变化范围为 $0.0086\sim 0.0150\text{ mm}$,平均值为 0.012 mm 。夏季与冬季底质粒径相近,底质均较细。

2.5 已建梅山港码头港池淤积情况

2021年3月—2021年10月,梅山港一期码头停泊区平均年淤积厚度 2.2 m ,最大年淤积厚度 4.6 m ;二期 $6^\#\sim 8^\#$ 泊位平均年淤积厚度 0.9 m ,最大年淤积厚度 3.4 m 。2022年5月—2022年12月,梅山港一期码头停泊区平均年淤积厚度 2.6 m ,最大年淤积厚度 5.3 m ;二期 $6^\#\sim 10^\#$ 泊位平均年淤积厚度 1.4 m ,最大年淤积厚度 4.8 m 。

3 物理模型设计及验证

由自然条件分析可知,工程地点潮流动力强,

波浪掩护条件好, 潮流是泥沙运动的主要动力, 因此建立潮流泥沙物理模型, 并开展相关研究工作。

3.1 模型相似准则

3.1.1 潮汐水流相似要求

工程海域为强潮水域, 整体物理模型首先应满足潮汐水流运动相似。根据模型相似理论可知, 变态模型中垂直方向动态和动力是不相似的, 考虑到潮波垂直方向速度一般远小于水平方向流速, 一般情况可近似作二维潮流处理, 在模型中无法复演柯氏地转力影响, 且扩散项作用在量级上要小于惯性项、重力项及阻力项, 自由流平面二维潮波方程可简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{uU}{C^2 h} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{vU}{C^2 h} = 0 \quad (2)$$

$$\text{其中: } U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

连续性方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

式中: u 、 v 分别为垂向平均流速在 x 和 y 方向的分量; h 为水深; C 为无尺度谢才系数, $C = C_1 / \sqrt{g}$, C_1 为谢才系数; t 为时间; g 为重力加速度。

由式(1)~(4)可得以下相似关系:

重力相似:

$$\lambda_u = \sqrt{\lambda_h} \quad (5)$$

阻力相似:

$$\lambda_c = \sqrt{\lambda_l / \lambda_h} \quad (6)$$

$$\lambda_n = \lambda_h^{2/3} \lambda_l^{-1/2} \quad (7)$$

平面流态相似:

$$\lambda_u = \lambda_v \quad (8)$$

水流运动相似:

$$\lambda_l = \lambda_l / \lambda_u \quad (9)$$

式中: λ 为比尺, 表示原型量与模型量的比值, 其下标表示各相应的量; n 为曼宁系数; l 为水平长度。

3.1.2 泥沙运动相似条件

窦国仁悬沙运动方程和海底变形方程式为:

$$\frac{\partial(hS)}{\partial t} + \frac{\partial(hSu)}{\partial x} + \frac{\partial(hSv)}{\partial y} + \alpha\omega(S - S_*) = 0 \quad (10)$$

$$\gamma_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} = \alpha\omega(S - S_*) \quad (11)$$

式中: S 为含沙量; α 为悬沙沉降系数; ω 为悬沙沉速(泥沙絮凝时即为其絮凝沉速); S_* 为水流挟沙能力; γ_0 为床面泥沙干容重; η 为悬沙引起床面高程变化。

由以上方程可得如下相似关系:

沉降相似要求:

$$\lambda_\omega = \lambda_u \frac{\lambda_h}{\lambda_l} \quad (12)$$

含沙量相似要求:

$$\lambda_s = \lambda_{s_*} \quad (13)$$

悬沙泥沙冲淤时间相似要求:

$$\lambda_{t1} = \frac{\lambda_{\gamma_s} \lambda_l}{\lambda_s} \quad (14)$$

由挟沙力关系式 $S_* = K \frac{\gamma \gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \left(J \frac{V}{\omega} \right)$, 可得到

挟沙力相似要求:

$$\lambda_{s_*} = \frac{\lambda_{\gamma_s}}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \quad (15)$$

式中: γ_s 为泥沙颗粒重力密度; γ 为水的重力密度; J 为水流比降; V 为垂线平均流速; K 为系数。

3.2 模型布置

3.2.1 模型边界和平面比尺的选择

模型范围一般需要结合数模计算的工程海域潮流情况首先确定物理模型走向, 同时结合工程范围和海域附近的情况确定边界范围。物模范围和比尺的选择不仅需考虑水流条件、地形条件和研究对象的工程规模, 还需考虑实验室条件、设备条件以及物模的特殊要求。

1) 模型范围。工程海域岛屿众多, 码头水域水流流态受岛屿和汊道影响明显, 为保证工程水域水流流态相似及各种方案条件下研究区域内水流条件不受边界的影响, 必须保证边界与研究区域之间有充分的距离, 同时还要保证工程方案的尺度, 保证试验精度。为此, 选择模型范围见图4, 现场范围长 27.5 km、宽 15 km, 研究区域

位于模型中部。

2) 比尺选择。试验厅模型范围长 46 m、宽 28 m, 根据选择的模型范围, 确定模型水平比尺为 1:600。模型垂直比尺选择时, 为了保证模型与原型水流相似, 还需同时满足: ①模型水流必须是紊流; ②为了避免模型内水流运动受表面张力的影响, 要求模型具有一定水深。工程海域水深流急, 深槽最大水深约 80 m, 最大流速近 1.5 m/s, 考虑到模型生潮设备条件, 为保证模型水流运动相似, 确定模型垂直比尺 1:150, 模型变率 4, 选用的模型比尺和变率为海岸工程物理模型常用比尺。

3.2.2 模型验证点和加沙位置

图 4 中给出了模型潮位站和潮流站的位置。工程海域实测资料较少, 模型范围内仅有 1 个潮位实测点。研究模型范围不大, 模型内潮位偏差小, 因此 1 个潮位站也可满足模型验证的需要。动床试验时, 模型中设置 2 处加沙位置, 分别位于工程区域西南侧和东北侧。



图 4 物理模型布置与走向

Fig. 4 Layout and orientation of physical model

3.3 模型沙的选择

根据现场底质取样资料分析结果可知, 工程海域海底沉积物主要成分为粉砂质黏土, 码头前沿底质中值粒径变化范围为 0.007 48~0.019 50 mm, 平均值为 0.010 45 mm, 大潮涨、落水体中平均悬

沙中值粒径为 0.007 74 mm, 说明近期沉积以细颗粒悬沙沉积为主, 因此模型中首先考虑悬沙运动相似, 由式(12), 得 $\lambda_\omega = 3.06$ 。

中值粒径 $d_{50} < 0.1$ mm 的细颗粒泥沙在静水中沉降属于层流区运动, 其沉速 ω 可由斯托克斯公式计算:

$$\omega = \frac{gd^2}{18\nu} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \quad (16)$$

泥沙考虑絮凝沉降, 原型沙絮团静水沉速取 $\omega_p = 0.05$ cm/s。根据沉速比尺, 可计算得模型沙沉速要求为 $\omega_m = 0.016 3$ cm/s。选择 $d_{50,m} = 0.046$ mm 的木粉作为模型沙, 可以满足悬沙沉降相似要求。

3.4 试验方案

码头设计方案布置 16#~21# 共 6 个码头泊位, 位于人工岛东侧。码头岸线长 2.5 km, 泊位区和回旋水域水深见图 2。码头优化方案在 21# 泊位东侧增加 2 个泊位, 与设计方案码头形成一定夹角。码头规划方案为 16# 泊位以西至梅山二期之间码头连片, 底床开挖至设计水深。

3.5 模型验证

模型分别对 2021 年 8 月和 12 月大潮的潮位及流速、流向过程进行验证, 限于篇幅, 只给出部分测站 2021 年 12 月大潮潮位、流速和流向的验证结果, 验证情况见图 5、6。泥沙淤积验证选用 2022 年 5—12 月梅山港一、二期港池泥沙回淤资料, 试验潮型为实测大潮。一期码头停泊区 7 个月平均淤厚 1.5 m, 二期码头停泊区平均淤厚 0.8 m。梅山港一、二期港池泥沙回淤试验淤积厚度和淤积分布与实测基本一致。验证试验表明, 模型能较好地复演原型潮汐水流运动和泥沙运动, 可以用于各工程方案的比选和优化试验。

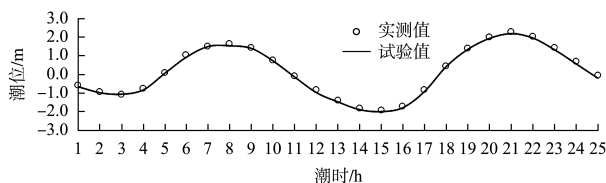


图 5 2021 年 12 月大潮潮位验证

Fig. 5 Validation of spring tide tidal level in December 2021

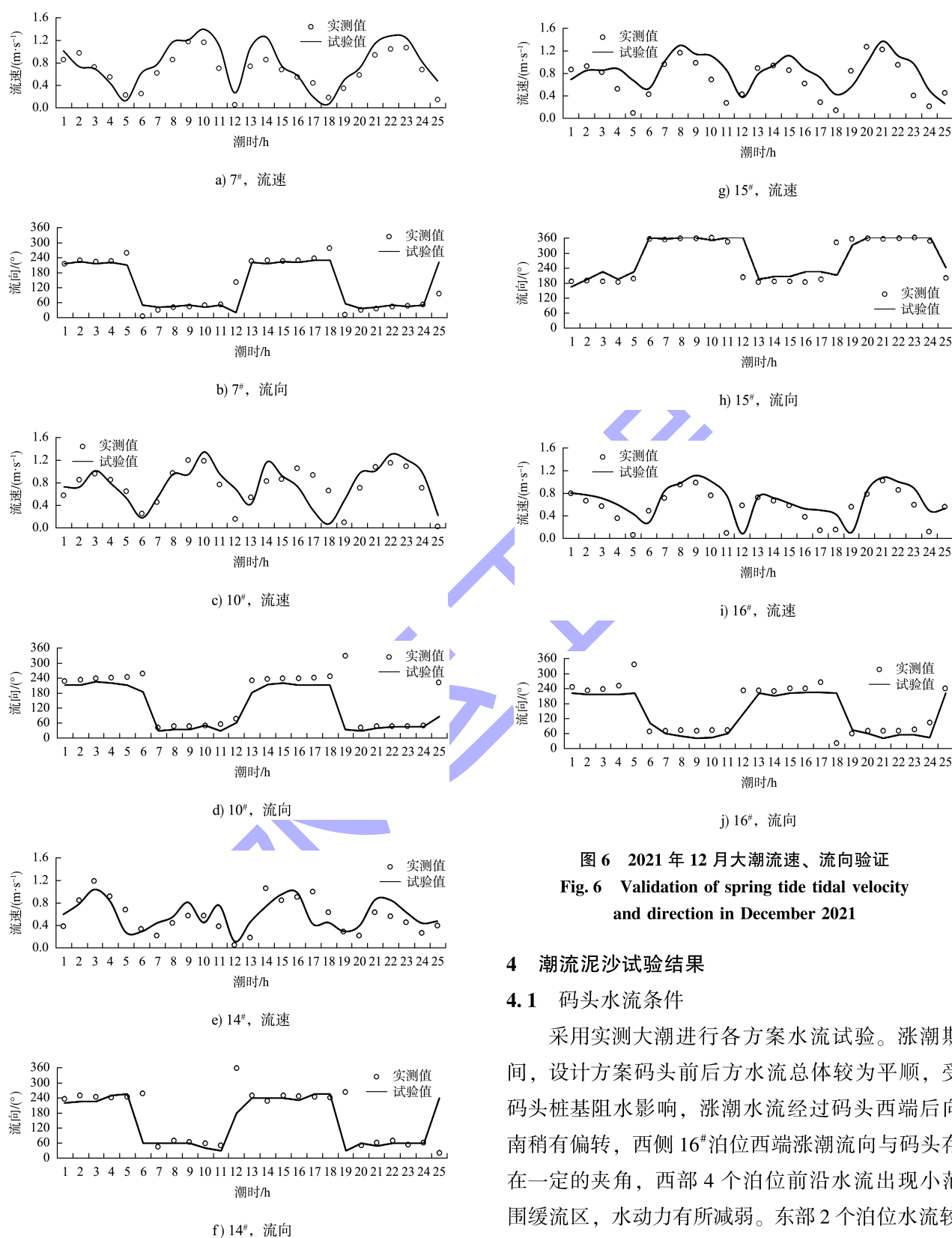


图6 2021年12月大潮流速、流向验证
Fig. 6 Validation of spring tide tidal velocity and direction in December 2021

4 潮流泥沙试验结果

4.1 码头水流条件

采用实测大潮进行各方案水流试验。涨潮期间,设计方案码头前后方水流总体较为平顺,受码头桩基阻水影响,涨潮水流经过码头西端后向南稍有偏转,西侧16#泊位西端涨潮流向与码头存在一定的夹角,西部4个泊位前沿水流出现小范围缓流区,水动力有所减弱。东部2个泊位水流较

为平顺, 流速有所增强。

落潮期间流态相比涨潮更为复杂, 由于人工岛的阻水效应, 东部原先的 NE 向水流经过人工岛后逐渐向南偏转, 贴近人工岛东部向码头区流动, 大致以接近正南向进入码头东端, 与码头前沿形成较大夹角。这种不利流态造成的影响有两个方面, 一方面码头前沿产生横流影响作业安全, 尤其是东端码头港区的停泊区横流较大; 另一方面整个码头前沿水动力较弱, 形成较大的缓流区域, 可能使得码头前沿淤积量过大。缓流区域范围覆盖整个泊位区及部分回旋水域, 形状为月牙形。码头后方受码头桩基导流作用, 水流较为平顺, 为大致与人工岛岸线平行的沿岸流。从全潮平均流速看, 整个码头停泊区存在月牙形的缓流区, 流

速相对较弱, 码头停泊区西侧流速 $0.1 \sim 0.5 \text{ m/s}$, 东侧流速 $0.3 \sim 0.5 \text{ m/s}$, 码头后方流速 $0.4 \sim 0.5 \text{ m/s}$, 回旋水域流速 $0.5 \sim 0.8 \text{ m/s}$ 。

根据码头东侧落潮流特性, 对码头东段水流条件进行优化。在 21#泊位东侧增加 2 个泊位, 与原码头形成一定夹角, 引导水流自然贴近码头前沿, 沿岸流动。增加的泊位与原码头夹角为 30° 。试验显示, 优化方案对 21#泊位东端流态有明显改善作用, 码头前落潮水流与码头夹角明显减小, 夹角由优化前的 55° 减小为 27° , 横流流速由 0.78 m/s 减小为 0.51 m/s 。

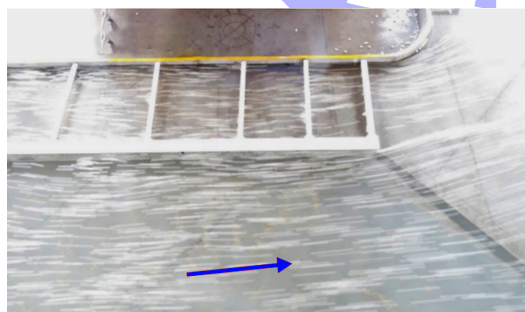
模型试验显示, 规划方案实施码头连片后, 16#码头水流变平顺, 有利于改善码头水流条件, 各方案流态照片见图 7。



a) 设计方案涨急



b) 设计方案落急



c) 设计方案东段涨急



d) 设计方案东段落急



e) 优化方案东段涨急



f) 优化方案东段落急

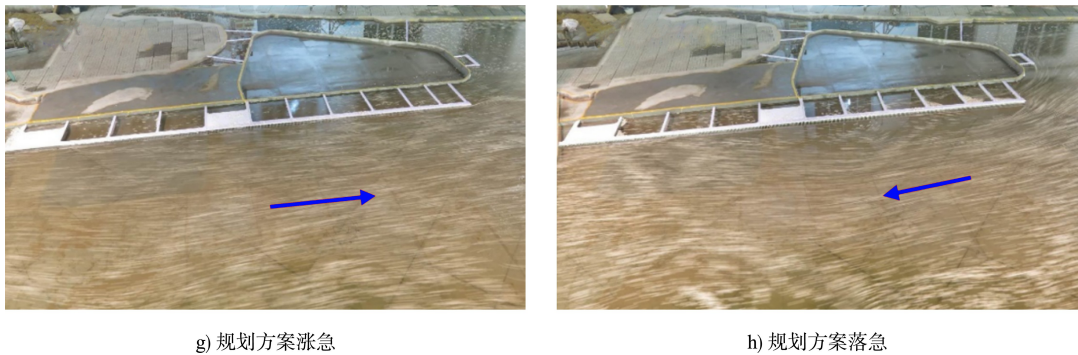


图 7 各方案模型试验流态照片
Fig. 7 Flow pattern photographs of model tests for each plan

4.2 泥沙淤积情况

由于码头桩基的阻流作用，码头停泊区水动力较弱，淤积相对较大，端部淤积相对少些，形成大致月牙形的码头近岸高淤积区，同时由于涨、落潮期间两端的挑流作用，回旋水域北侧靠近停泊区形成半月形的少淤积区，回旋水域两侧和南侧淤积则相对较多。设计方案实施后，16[#]~21[#]泊位停泊区年平均淤积厚度 2.2 m，最大淤积厚度 4.3 m，年回淤量 70 万 m³；回旋水域平均年淤积厚度 1.3 m，最大淤积厚度 2.6 m，年回淤量 315 万 m³；16[#]~21[#]泊位停泊区和回旋水域年淤积量总计 385 万 m³。优化方案实施后，16[#]~21[#]泊位停泊区年平均淤积厚度 2.0 m，最大淤积厚度 3.2 m，年回淤量 66 万 m³，年总回淤量比设计方案减少 8 万 m³。规划方案实施后，除了港区东侧 20[#]、21[#]泊位仍然受落潮流影响较大外，港区其他泊位涨、落潮水流均较为平顺，缓流区域相对减小，码头停泊区和回旋水域回淤也明显减少。16[#]~21[#]泊位停泊区年平均淤积厚度 1.3 m，最大淤积厚度 3.3 m，年回淤量 42 万 m³，比设计方案减少 32 万 m³；回旋水域平均年淤积厚度 0.8 m，最大淤积厚度 2.0 m，年回淤量 205 万 m³，比设计方案减少 153 万 m³；16[#]~21[#]泊位停泊区和回旋水域年淤积量比设计方案总计减少 185 万 m³。码头连片后 16[#]~21[#]泊位停泊区和回旋水域泥沙回淤量明显减小。

表 1 各方案条件下 16[#]~21[#]泊位停泊区和回旋水域年泥沙回淤统计
Tab. 1 Annual sediment deposition for Wharf 16[#]~21[#] and turning basins under each plan condition

方案	区域	年平均淤积厚度/m	年最大淤积厚度/m	年淤积量/万 m ³
设计方案	停泊区	2.2	4.3	70
	回旋水域	1.3	2.6	315
	总回淤量	—	—	385
优化方案	停泊区	2.0	3.2	66
	回旋水域	1.2	2.5	312
	总回淤量	—	—	377
规划方案	停泊区	1.3	3.3	42
	回旋水域	0.8	2.0	205
	总回淤量	—	—	247

5 结论

- 1) 受人工岛阻挡，落潮时人工岛东侧明显形成绕岛水流，东侧码头岸线与流向存在较大夹角，由于水流外挑，16[#]~21[#]泊位前出现缓流区。涨潮时受上游岛屿掩护，人工岛挑流不明显，码头附近水流总体平顺，受码头桩基阻水影响，西部 4 个泊位前沿出现小范围缓流区。从全潮平均流速看，整个码头停泊区存在月牙形的缓流区，流速相对较弱，停泊区西侧 0.1~0.5 m/s，东侧 0.3~0.5 m/s，码头后方 0.4~0.5 m/s，回旋水域 0.5~0.8 m/s。
- 2) 针对 21[#]泊位东侧横流的优化方案试验结果表明，优化方案在 21[#]泊位东部增加 2 个码头泊位、码头走向与原码头转角 30°左右，可以有效改

善 21#泊位的横流问题,且可以增加有效利用的码头岸线长度。

3) 设计方案实施后,16#~21#泊位停泊区年平均淤积厚度 2.2 m,最大淤积厚度 4.3 m,回旋水域平均年淤积厚度 1.3 m,最大淤积厚度 2.6 m,停泊区和回旋水域年总淤积量约 385 万 m^3 。规划方案实施后,除了港区东侧 20#、21#泊位仍然受落潮流影响较大外,港区其他泊位涨、落潮水流均较为平顺,码头连片后 16#~21#泊位停泊区和回旋水域泥沙回淤量明显减小,年总淤积量比设计方案减少 185 万 m^3 。

参考文献:

- [1] 王李吉,陈国平,严士常.人工岛建设对周围水域潮流场影响研究[J].水运工程,2013(9):17-23.
WANG L J, CHEN G P, YAN S C. Impact of construction of artificial island on neighboring tidal field[J]. Port & waterway engineering, 2013(9): 17-23.
- [2] 蔡相芸,周朝丰,章卫胜,等.穿山半岛东部海域潮流泥沙运动特征分析[J].浙江水利科技,2015,43(2):20-25,47.
CAI X Y, ZHOU C F, ZHANG W S, et al. Water and sediment movement analysis of seas east of Chuanshan Peninsula[J]. Zhejiang hydrotechnics, 2015, 43(2): 20-25, 47.
- [3] 徐啸.宝钢马迹山矿石码头工程潮流问题研究[J].水道港口,2020,41(1):22-28.
XU X. Study on the tidal current of Baosteel Majishan ore wharf project[J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(1): 22-28.
- [4] 徐啸,余小建.洋山深水港西港区岸线功能规划调整[J].水运工程,2018(7):59-64.
XU X, SHE X J. Adjustment of shoreline function planning of west port area in Yangshan deep harbor[J]. Port & waterway engineering, 2018(7): 59-64.
- [5] 徐啸,余小建,崔峥,等.厦门港嵩屿港区潮流特性物理模型试验[J].水运工程,2017(9):76-82.
XU X, SHE X J, CUI Z, et al. Tidal current physical model test in the Xiamen Songyu Port Area[J]. Port & waterway engineering, 2017(9): 76-82.
- [6] 高正荣,黄建维,卢中一.苏通大桥主塔墩冲刷防护工程关键技术[J].水利水运工程学报,2005(2):18-22.
GAO Z R, HUANG J W, LU Z Y. Key techniques for scouring protection of the main pylon pier of Sutong Bridge[J]. Hydro-science and engineering, 2005(2): 18-22.
- [7] 高正荣,杨程生,唐晓春,等.大型桥梁冲刷防护工程损坏特性研究[J].海洋工程,2016,34(2):24-34.
GAO Z R, YANG C S, TANG X C, et al. Study on failure characteristics of scour protection engineering of large bridges[J]. The ocean engineering, 2016, 34(2): 24-34.
- [8] 余小建,张磊,孙路.曹妃甸挖入式五港池航道与防波堤工程潮流泥沙物理模型试验研究[J].中国港湾建设,2014(1):32-38.
SHE X J, ZHANG L, SUN L. Tidal current and sediment model test and study on channel and breakwater of the fifth excavated-in harbor of Caofeidian[J]. China harbour engineering, 2014(1): 32-38.
- [9] 赵永印,于广年,赵家强,等.三亚新机场人工岛工程波浪潮流泥沙物理模型试验研究[J].中国水运(下半月),2017,17(3):194-196.
ZHAO Y Y, YU G N, ZHAO J Q, et al. Experimental study on physical model of wave, tidal current and sediment in artificial island project of Sanya New Airport[J]. China water transport (the second half of the month), 2017, 17(3): 194-196.
- [10] 崔峥,章卫胜,余小建.梅山港口基础设施重点项目潮流泥沙整体物理模型试验研究成果[R].南京水利科学研究院,2024.
CUI Z, ZHANG W S, SHE X J. Research results of overall physical model experiment on tidal current and sediment transport for key infrastructure projects at Meishan Port [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2024.

(本文编辑 王传瑜)