

高桩码头桩群对水动力参数影响的数值模拟

薛玉娆, 张金凤, 张庆河, 尤再进, 季则舟

Numerical simulation of the impact of pile groups of high-pile wharves on hydrodynamic parameters

XUE Yurao, ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe, YOU Zaijin, JI Zezhou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240321004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

内河框架码头桩柱绕流水动力特性的二维数值模拟

2D numerical simulation of hydrodynamic characteristics of water flowing around inland river frame wharf in tandem and parallel arrangement

水利水运工程学报. 2020(1): 74 <https://doi.org/10.12170/20181204005>

基于位移的高桩码头地震易损性分析

Seismic vulnerability analysis of pile-supported wharves based on displacement

水利水运工程学报. 2019(3): 76 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.010>

高桩承台基础波流荷载数值模拟

Numerical simulation of wave-current load on high pile cap foundation

水利水运工程学报. 2023(5): 56 <https://doi.org/10.12170/20220119002>

规则波对大直径群桩作用的数值模拟研究

Numerical simulations of the group effect of large-diameter columns in regular waves

水利水运工程学报. 2020(6): 121 <https://doi.org/10.12170/20191006001>

砂土中钻井船插桩对邻近群桩影响的模型试验

Model tests on effects of spudcan penetration on an adjacent pile group

水利水运工程学报. 2020(3): 75 <https://doi.org/10.12170/20190316001>

船舶撞击荷载作用下高桩墩的破坏分析

Damage analysis of high-pile cleat under ship's impact load

水利水运工程学报. 2019(2): 25 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.004>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240321004

薛玉娆, 张金凤, 张庆河, 等. 高桩码头桩群对水动力参数影响的数值模拟 [J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 95-102. (XUE Yurao, ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe, et al. Numerical simulation of the impact of pile groups of high-pile wharves on hydrodynamic parameters[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(5): 95-102. (in Chinese))

高桩码头桩群对水动力参数影响的数值模拟

薛玉娆¹, 张金凤^{1,2}, 张庆河¹, 尤再进³, 季则舟⁴

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 地震工程模拟与抗震恢复中国地震局重点实验室, 天津 300350; 3. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 4. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要: 桩基码头是常用的码头结构形式, 应用广泛。高桩码头桩群基础改变了周围水动力场, 引起泥沙冲淤规律的变化, 从而对码头结构稳定性产生影响, 研究圆柱桩群阻力特性, 对水流和底床冲淤变化研究具有重要意义。基于 FVCOM 的三维水动力模型, 将桩柱绕流阻力等效为水流阻力, 提出一种桩群阻水效果的概化方法, 通过增加桩群阻力项来研究桩群对水动力环境参数的影响, 构建了群桩下方和后方水动力规律的三维水动力改进模型。该模型应用于舟山某高桩码头附近流场的模拟计算, 结果与实测值吻合良好, 证明了模型的有效性; 计算结果表明, 桩群影响使得码头后方的流速减小, 比码头前方减小约 67%。所构建的模型可进一步研究高桩码头下方和后方冲淤演变规律, 为码头建设和运维提供技术支撑。

关键词: 水流阻力; 桩群概化; FVCOM 三维模型; 水动力; 高桩码头

中图分类号: U651

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)05-0095-08

高桩码头在使用过程中, 水下泥沙会发生淤积, 特别是河港和存在沿岸流的海港, 泥沙淤积会使码头前沿水深变浅, 影响船舶进出港口, 同时也会导致高桩的损伤。王益烽等^[1]、陆培东等^[2] 分别对宁波穿山港区和金塘水道码头建设前后岸滩变化情况进行观测和分析, 结果表明, 宁波海域码头群桩基础使其附近水动力场产生变化, 进而导致泥沙淤积。

对于桩群绕流特性, 目前尚难有准确的理论解, 主要依靠物理模型试验或数值计算方法。王春华等^[3-4] 针对不同排列群桩对水流的影响进行试验, 得到流场变化规律。对桩群绕流的数值模拟主要有概化模拟和直接模拟两种方法^[5]。直接模拟指直接将桩群刻画为固边界进行计算, 杨帆等^[6-7] 利用 FLUENT、FLOW-3D 软件对水槽尺度考虑群桩的水动力场进行了模拟, 结果与实测数据验证良好。考虑到高桩码头海域较大, 且相较而言桩直径尺度较小, 采用直接模拟将会有较多的网格数量和固体边界。因此, 常采用概化模拟的方式来表达群桩的影响^[8], 如在群桩区域增加糙率^[9], 或将桩群阻水面折算成水底地形^[10], 或在方程中直接引入群桩的阻力项以反映桩群对水流的影响。解鸣晓等^[11] 经过比较, 认为引入等效阻力项的模拟效果更优; 邓绍云等^[12-15] 利用二维数学模型对群桩阻力项进行了研究。

由于桩群对水动力场的影响是三维问题, 一些学者将等效阻力项引入到三维模型中。Lam 等^[16] 研究了三维下 2~4 根桩柱在不同排列条件下的流场变化及桩间阻力效应; Rennau 等^[17] 将风机桩群结构引起的额外混合和摩擦进行了参数化, 并将阻力项扩展到 $k-\epsilon$ 湍流闭合模型中, 提出校准参数, 利用含有校准参数阻力项的 RANS 模型对西波罗的海水动力模型进行验证; 李绍武等^[18] 在已开发的准三维浅水波运动模型控制

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2601100)

作者简介: 薛玉娆 (1999—), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。

E-mail: yr_xue@tju.edu.cn

方程中加入了杆状植被阻力项,同时引入前人提出的植被密度概念,发现模型对植被范围以下和以上流速垂向分布模拟效果良好;Wu等^[19]利用引入阻力项的方法在FVCOM中实现了海带群对水流影响的模拟,拟合效果良好。本文在前人研究基础上,利用FVCOM数值模型为主要研究手段,探讨面向工程实际的桩柱水流运动特性模拟方法,验证桩群对码头水动力特性的影响,探讨模型的适用性,进而为码头淤积成因研究提供依据。

1 数值模型构建

引入桩群阻力概化系数后的控制方程如式(1)~(3)所示。

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} v_h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_h \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_z \frac{\partial u}{\partial z} - \lambda u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} v_h \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_h \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_z \frac{\partial v}{\partial z} - \lambda v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

式中: x 、 y 、 z 分别表示笛卡尔坐标; u 、 v 、 w 分别为水流速度在笛卡尔坐标系各轴的分量; f 为科氏力系数; ρ 为水体密度; v_h 和 v_z 分别为水平和垂直涡黏系数; λ 为群桩阻力概化系数。

文献^[19]中将海带群概化为刚性圆柱群,通过在控制方程中增加阻力源项的方法表示刚性圆柱群对水流的阻碍作用,进而得到存在刚性圆柱群的水动力场,其中 λ 作为圆柱群阻力概化系数。桩群概化时也将影响考虑为刚性圆柱群对水流的影响,采用文献^[19]中阻力等价方法,在控制方程中引入桩群阻力项,工程尺度一般采用《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010)中所提供的计算方法。对于桩群阻力的计算,通过物理模型试验^[12]及数值模拟试验^[13-15],均可得到引入桩群阻力的控制方程及桩群阻力系数的取值方法。用桩群阻力概念建立控制方程时,桩群阻力系数与雷诺数 Re 、桩径和速度无关,只与桩距桩径比(B/d , B 为桩距, d 为桩径)有关。王智辉^[15]通过试验得到二维模型中不同 B/d 下桩群的阻力系数取值,本文将其结论扩展应用到三维,近似认为桩基础纵向不同深度处阻流效果相同,即不同深度处的阻力系数相同, λ 计算如下:

$$\lambda = \frac{1}{2} C_D \frac{A}{a \times b} \quad (4)$$

$$C_D = N K_L K_B C_{D0} \quad (5)$$

式中: C_D 为群桩阻力系数; A 为桩群迎流投影面积; $a \times b$ 为桩群概化区域面积; N 为桩数; C_{D0} 为单桩阻力系数,按照《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010)取值; K_L 为纵向折减系数, K_B 为横向影响系数,根据文献^[15]中的曲线进行取值。

2 工程实例应用及数值模拟

本研究码头周围有一系列岛屿为天然屏障,受外海波浪影响较小。由于码头群桩基础的存在,对码头周围区域流场产生较大影响,进而影响泥沙的淤积,引起地形变化。为探究群桩基础存在对高桩码头周围区域水动力场影响的规律,利用前文所述群桩概化模型,对本研究码头群桩进行概化模拟。

2.1 概化方法计算群桩阻力

本研究码头桩群基础横向模拟长度 940 m, 共 1 008 根桩, 纵向模拟长度 48.9 m, 纵向桩间距为 10.5 m, 则 $B/d=4.56$; 横向桩间距取沿岸到近岸侧桩间距平均值 8.15 m, 则 $B/d=3.54$, 根据文献^[13] 确定横向、纵向影响系数分别为 $K_B=1.4$ 、 $K_L=0.85$, 单桩的阻力系数按照《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2014)取为 0.73, 由式(4)~(5)计算得本研究码头对应的桩群阻力系数为 0.027, 高桩码头概化区域见图 1。

2.2 数值计算结果

采用的 FVCOM 模型在平面上使用三角形网格形式, 本研究码头计算区域的地形水深数据为 2022 年的实测水深数据。为充分考虑计算效率与计算准确性, 计算采用大小区域嵌套的方式, 大区域包括本研究码头所在海湾, 应用北京 54 坐标的非结构化三角网格, 网格分辨率为 1 100~13 000 m, 垂向分为 5 层。小区域主要包括本研究码头附近海域, 亦采用北京 54 坐标的非结构化三角网格, 网格分辨率为 190~1 950 m, 垂向分为 10 层。大小区域网格划分及水深数据如图 2 所示, 大小模型 FVCOM 计算时间步长 0.02 s。

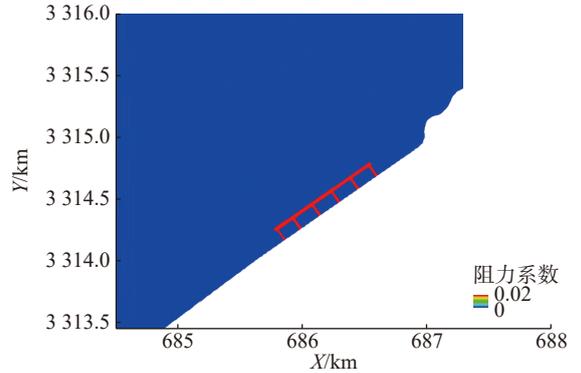


图 1 高桩码头桩群概化区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of the generalized area of the pile groups at a high-pile wharf

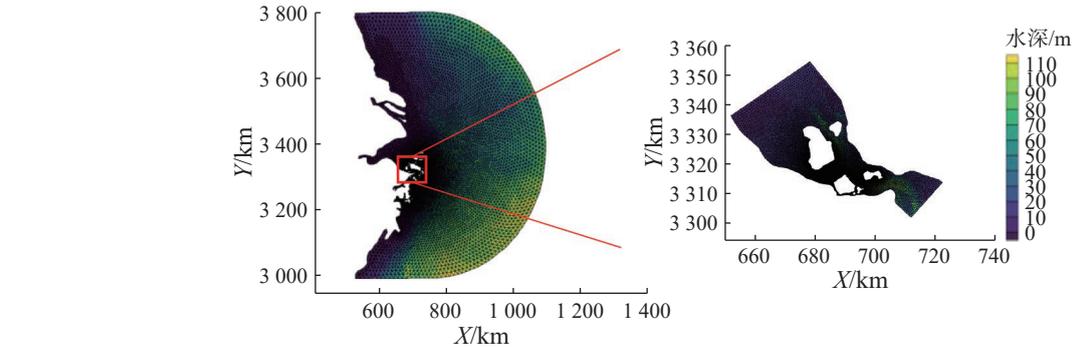


图 2 大小模型概化地形及网格划分

Fig. 2 Generalized terrain and mesh division of the large and small models

在开边界处用潮位强迫边界驱动 FVCOM 模型, 大区域的开边界水位数据采用 TPXO 潮汐预报数据, 小区域的开边界水位数据从大区域的计算结果中提取。

本研究码头水域介于正规半日潮与非正规半日潮的过渡状态, 属非正规半日混合潮类型, 具体表现为 1 个太阴日中 2 次高潮和 2 次低潮, 但相邻的高潮或低潮的高度不相等, 而且涨潮时间与落潮时间不相等。工程水域的潮差不大, 镇海海域的多年平均潮差为 188 cm, 相对东海沿岸的潮差, 本区属弱潮区。工程海域多年月平均潮差的变化总体呈现二高一低, 即 3 月和 9 月平均潮差大, 6 月最小, 本次测验期的潮差为一年中最大的季节。

金塘水道的潮流运动形式以往复流为主, 涨、落潮流主流流向与水道走向一致, 与等深线方向基本一致, 涨落潮方面, 大潮流速皆由南往北逐渐递增, 南部浅水区以落潮流占优势, 北部深水区以涨潮流占优势, 小潮期的落潮流是南强北弱, 而涨潮流则是南弱北强。无论大潮还是小潮, 始终存在着北部深水区以涨潮流为主, 南部浅水区以落潮流为主, 这就形成了在金塘水道东部的逆时针的潮、余流环流。

采用 2017 年本研究码头海域全潮水文观测潮位、流速和流向的实测资料, 潮位测站布置如图 3 所示, 流速流向测站位置如图 4 所示。



图 3 潮位测站位置示意



图 4 流速测站位置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the location of tide gauge stations

Fig. 4 Schematic diagram of the location of velocity measurement stations

本文采用图 3、图 4 所示测点观测数据对模型进行验证。潮位验证如图 5 所示,测站 C1~C5 的垂向平均流速及流向验证如图 6 所示,潮位图中时刻为 2017 年 2 月 27 日 0 时—2017 年 2 月 28 日 23 时,流速流向图中时刻为 2017 年 2 月 27 日 11 时—2017 年 2 月 28 日 23 时。从验证结果可知,潮位、流速、流向的模拟值与实测值整体吻合较好,有部分流速模拟值偏小的情况,可能是因为水深描述不够精细。

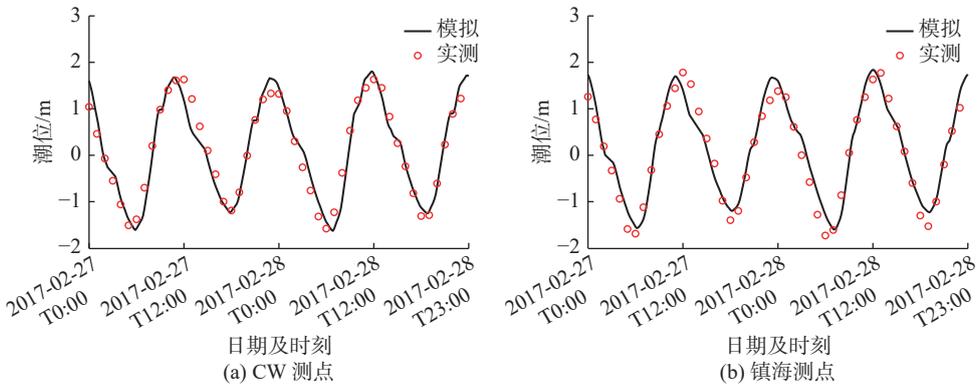
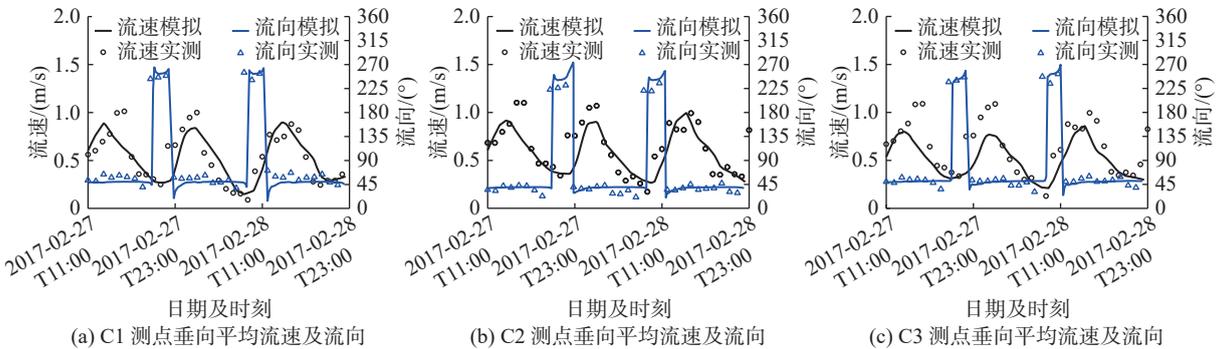


图 5 潮位验证

Fig. 5 Tide level validation

分别模拟码头区域不考虑和考虑桩群的流场,流速对比如图 7 所示。可见桩群的存在对码头下方、后方、及沿岸下游区域的流速产生明显影响,使区域范围内的流速明显减小,由码头前方流速 0.6 m/s 减小至码头下方流速 0.2 m/s,减小了约 67%。



(a) C1 测点垂向平均流速及流向

(b) C2 测点垂向平均流速及流向

(c) C3 测点垂向平均流速及流向

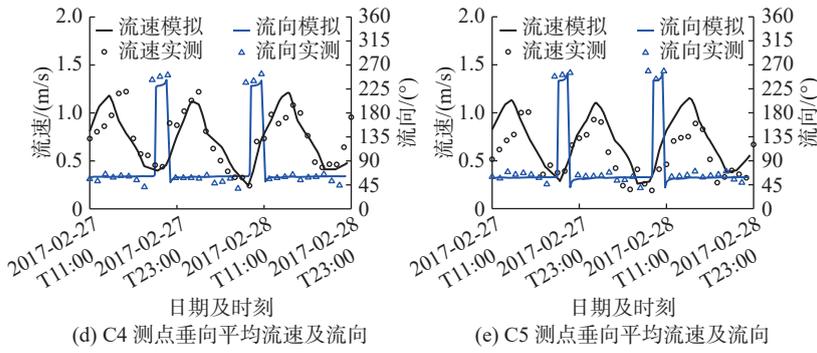


图 6 测站 C1~C5 流速流向验证

Fig. 6 Validation of flow speed and direction at stations C1~C5

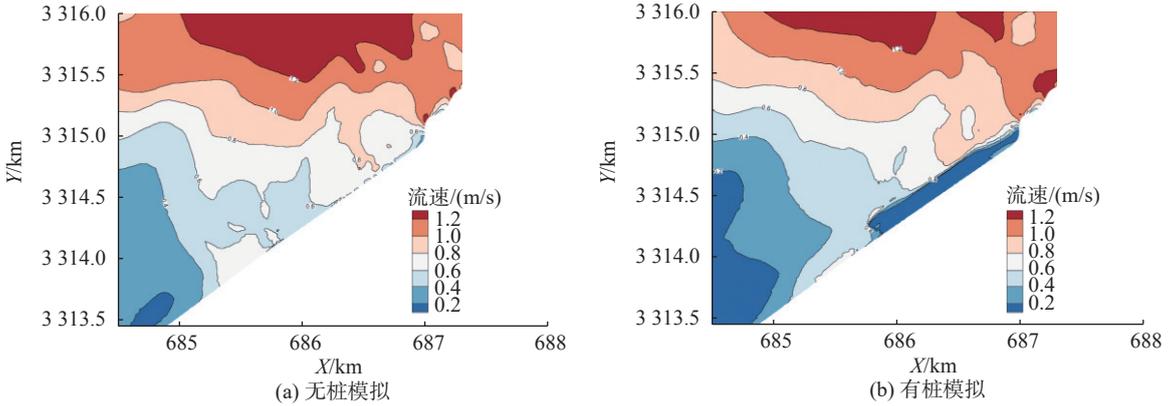


图 7 无桩和有桩群概化流场对比

Fig. 7 Comparative analysis of flow fields with and without generalized pile groups

2022 年 11 月 26 日—12 月 7 日期间在码头后方布置 3 个测点利用 ADV 坐底测量, 测点分布在码头 4#泊位后沿、4#引桥后沿及 1#泊位后沿, 同时为观测群桩对水流分布的影响, 2022 年 12 月 3 日—12 月 10 日期间在码头 5#引桥下方布置 1 个测点, 利用 ADV 对测点位置表层、中层及底层流速进行实测, 具体位置如图 4 所示。

图 8 给出了考虑群桩影响和未考虑群桩影响的码头后方测点流速与实测值的比较。可见, 考虑群桩影响流场的流速更接近实测数据。未考虑群桩影响时, 测点最大流速约 1 m/s; 考虑群桩影响后, 流速减小到约 0.2 m/s, 减幅约为 80%。同时, 对码头 5#引桥下方测点分层流速进行了比较(见图 9), 可见在不同深度处, 三维群桩概化模型均能准确描述群桩的阻流作用。根据实测数据进行模型验证, 模拟结果良好, 证明概化模型可以较准确反映桩群对水流的减弱作用, 且减弱数值大小合理, 验证了模型的正确性。

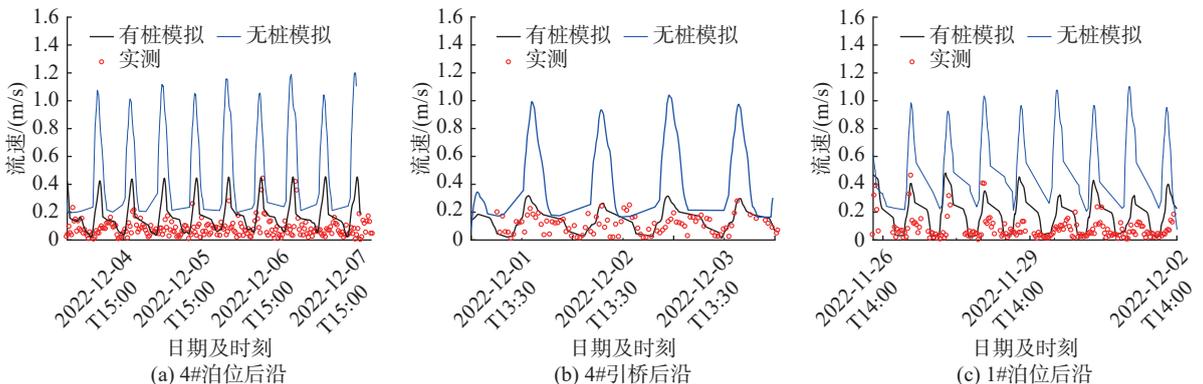


图 8 码头后方测点流速验证

Fig. 8 Flow speed validation at measurement points behind the wharf

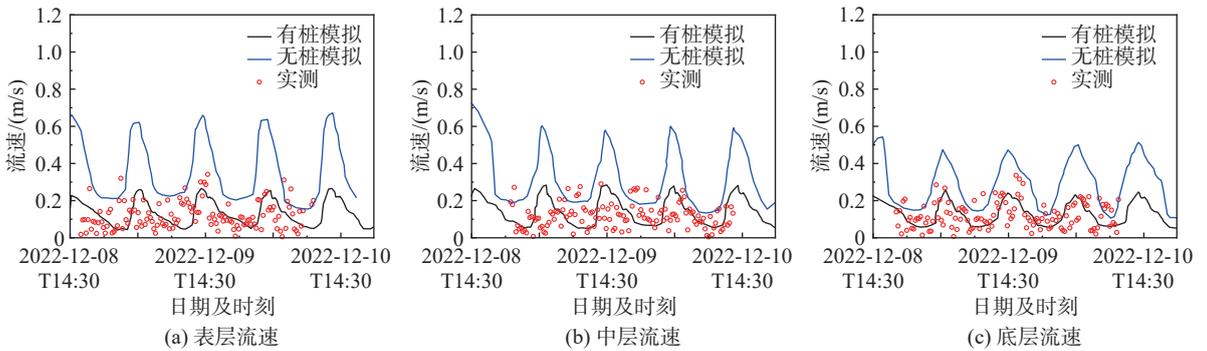


图9 码头下方测点分层流速验证

Fig. 9 Layered flow speed validation at measurement points below the wharf

表1对比了是否考虑群桩影响的数值模拟结果与实测数据的相对均方根误差。可见,在码头后方水域,由于群桩阻水作用,使得不考虑群桩影响的流速和实测流速比较偏差较大;然而,考虑了群桩影响后三维数值模拟结果和实测值比较,偏差为22%~63%,这进一步证明了采用概化模型构建的考虑群桩影响的三维数值模型的准确性更高。

表1 各测点相对均方根误差

Tab. 1 Root mean square error relative to each measurement point

| 桩群影响 | 相对均方根误差/% | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|--------|------|------|
| | 4#泊位后沿 | 4#引桥后沿 | 1#泊位后沿 | 5#引桥下方 | | |
| | | | | 表层 | 中层 | 底层 |
| 不考虑 | 231.0 | 265.0 | 338.0 | 107.0 | 94.9 | 75.2 |
| 考虑 | 63.0 | 55.6 | 50.1 | 24.0 | 27.4 | 22.3 |

测点1#泊位后沿位于码头东侧,其附近岸线有向海延伸的凸起,由图8可知此处考虑桩群影响较不考虑桩群影响流速减小较大,这是由于高桩码头的建设使其与岸线凸起共同作用,在其间形成天然掩护区域,使流速减小,不考虑桩群影响无法刻画出现象。测点1#泊位后沿位于此掩护区域,其考虑桩群影响的相对均方根误差相较于不考虑桩群影响在3个测点中减小最显著,这说明此概化模型较好刻画了结构物及其周围的影响。

测点5#引桥下方位于码头下方,与另外3个测点不同,测点布置在桩间,由于桩的存在使水流产生绕流,其实测流速在大部分和相近的测点流速相同的前提下,个别流速偏大,符合桩间流速较大的趋势。分层来看呈现出越靠表层流速越大的趋势,符合分层流速特点。且分层相对均方根误差均为25%左右,相较而言,此模型对码头下方流速刻画较码头后方更为准确。

受现场其他因素影响,码头后方及下方实测流速并未能如远离桩的C1~C5测站处呈现较好的周期性,波动性较大,但比较图像和相对均方根误差值,仍可明显看到考虑桩群影响明显优于不考虑桩群影响的模拟,且通过测点分层流速数据可知,不同层流速存在区别,尤其是底层流速较垂向平均流速小,三维模型较二维模型对底层流速的刻画更加准确,可为后续计算泥沙冲淤提供更准确的流场数据。

3 结 语

本文研究了高桩码头建设对其附近水域水动力的影响,通过将桩群阻力作为源项引入浅水方程中,并进行公式推导和系数选取,得出桩群概化模型与适用于工程尺度桩群模拟的理论计算式,某码头模拟结果表明,概化方法适用于模拟工程尺度范围内桩群的概化模拟,能准确描述高桩码头下方、后方及受已建码头

影响的周围流场;桩群的存在对码头附近水域(下方、后方及下游)流速有明显的减弱作用,考虑桩群影响更符合数值模拟计算精度的要求;三维模型较二维模型更能刻画分层流速特点,三维概化模型可为进一步研究高桩码头附近泥沙冲淤和地形演变提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 王益烽,倪云林. 宁波穿山港区海域岸滩演变和冲淤变化[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(10): 207-209, 211. (WANG Yifeng, NI Yunlin. Beach evolution and erosion and deposition changes in Chuanshan Port area of Ningbo[J]. China Water Transport, 2016, 16(10): 207-209, 211. (in Chinese))
- [2] 陆培东,徐敏. 金塘水道南岸码头建设对岸滩动态的影响[J]. 水利水电工程学报, 2002(4): 24-27. (LU Peidong, XU Min. Influence of dock construction along the south shore of Jintang Channel on beach development[J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(4): 24-27. (in Chinese))
- [3] 王春华. 高桩码头桩群对流场及底床影响试验研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2010. (WANG Chunhua. Impact of high-pile wharf on flow field and topography[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [4] 郑薇薇. 不同排列桩群对水流特性影响的试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2009. (ZHENG Weiwei. Experimental study on the flow characteristics of pile group in different arrangement[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2009. (in Chinese))
- [5] 方许闻,干岳良,李瑞杰,等. 不同结构形式桩基在数值模拟中的概化方法研究[J]. 水道港口, 2017, 38(4): 392-397. (FANG Xuwen, GAN Yueliang, LI Ruijie, et al. Study on generalized method of pile foundation with different structures in numerical simulation[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38(4): 392-397. (in Chinese))
- [6] 杨帆. 群桩不同空间分布对周围水流的影响研究[J]. 吉林水利, 2023(4): 32-35. (YANG Fan. Study on the influence of different spatial distribution of pile group on surrounding water flow[J]. Jilin Water Resources, 2023(4): 32-35. (in Chinese))
- [7] 吴承伟. 桥梁圆形墩柱水流力及流场研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019. (WU Chengwei. Analysis of force and flow characteristics of flow around columns of bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [8] 苏畅. 几种桥墩概化方法在 MIKE 21FM 模型中的应用及适用性分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(8): 123-126. (SU Chang. Analysis of several methods for generalizing piers in MIKE 21FM[J]. Pearl River, 2019, 40(8): 123-126. (in Chinese))
- [9] LEENDERTSE J J. A water quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas: Volume I, Principles of computation[R]. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1970.
- [10] 庄茜. 建筑物绕流数学模型理论及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2017. (ZHUANG Qian. Study on theory and application of mathematical model for flow around structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [11] 解鸣晓,张玮,谢慧姣. 桩群数值模拟中的概化方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008, 23(4): 464-471. (XIE Mingxiao, ZHANG Wei, XIE Huijiao. Simplification method in numerical modeling of bridge pier group[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(4): 464-471. (in Chinese))
- [12] 邓绍云. 圆柱桩群阻力特性及其对底床冲淤影响的研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2007. (DENG Shaoyun. Study on drag force characteristics of cylinder piles and influence on scour-deposit of bottom sediment[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [13] 唐士芳. 二维潮流数值水槽的桩群数值模拟[J]. 中国港湾建设, 2002(3): 14-16, 21. (TANG Shifang. Numerical simulation for pile group in numerical water flume of two dimensional tidal flow[J]. China Harbour Engineering, 2002(3): 14-16, 21. (in Chinese))
- [14] 李恩赐,王磊,庄茜,等. 基于断面和阻力等效的桩群调流效果研究[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(6): 935-943. (LI Enci, WANG Lei, ZHUANG Qian, et al. Study on flow regulation effect of pile groups based on equivalent section and resistance[J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(6): 935-943. (in Chinese))
- [15] 王智辉. 水流数值模拟中群桩阻力系数研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (WANG Zhihui. Research of the resistance coefficient of pile groups in the current numerical simulation[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [16] LAM K, ZOU L. Three-dimensional numerical simulations of cross-flow around four cylinders in an in-line square

configuration[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, 26(3): 482-502.

- [17] RENNAU H, SCHIMMELS S, BURCHARD H. On the effect of structure-induced resistance and mixing on inflows into the Baltic Sea: a numerical model study[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 60: 53-68.
- [18] 李绍武, 涂伟伟, 李明哲. 基于三维浅水方程的刚性植被水流特性研究[J]. *水道港口*, 2022, 43(1): 8-15. (LI Shaowu, TU Weiwei, LI Mingzhe. Study on flow characteristics of rigid vegetation based on 3d shallow water equation[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2022, 43(1): 8-15. (in Chinese))
- [19] WU Y S, HANNAH C G, O'FLAHERTY-SPROUL M, et al. Representing kelp forests in a tidal circulation model[J]. *Journal of Marine Systems*, 2017, 169: 73-86.

Numerical simulation of the impact of pile groups of high-pile wharves on hydrodynamic parameters

XUE Yurao¹, ZHANG Jinfeng^{1,2}, ZHANG Qinghe¹, YOU Zaijin³, JI Zezhou⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 4. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Pile foundation wharves are commonly used dock structures with widespread applications. The foundations of high-pile wharves, consisting of groups of piles, alter the surrounding hydrodynamic field, causing changes in the sedimentation and erosion patterns, thereby affecting the stability of the dock structures. The study of cylindrical pile group resistance characteristics is of significant importance for the research on water flow and bed-load sediment transport changes. Based on the three-dimensional hydrodynamic model of FVCOM, this study equates pile flow resistance to water flow resistance and proposes a generalized method for the water-blocking effect of pile groups. By adding a pile group resistance term, the study investigates the impact of pile groups on hydrodynamic environmental parameters and constructs a three-dimensional hydrodynamic improvement model for water dynamics below and behind the pile groups. This model was applied to simulate the flow field near a high-pile wharf in Zhoushan, and the results closely matched measured values, proving the model's effectiveness. The findings indicate that the pile group effect results in a decrease in the flow velocity behind the wharf by approximately 67% compared to the front. The constructed model can further investigate the evolution of sediment transportation patterns below and behind the high-pile wharf, providing technical support for wharf construction and operation.

Key words: water flow resistance; pile group generalization; FVCOM three-dimensional model; hydrodynamics; high-pile wharf