

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.006

周口港弯道码头工程水动力特性

王玲玲^{1,2}, 徐雷诺^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用三维水动力数值模型, 研究修建于弯曲河道凸岸处的挖入式码头工程港池内的水动力特征及其对工程河段行洪流态的影响, 分析工程建设对水位、河道断面流速分布规律的影响, 以及不同流量条件下港池内流场的变化规律。结果表明, 工程建成后, 在洪水条件下, 主河槽壅水主要出现在弯道出口前的缩窄河段, 弯曲河道局部缩窄对水位壅高影响明显。弯道出口段的水位和流速变化幅度高于其他区域, 码头前沿局部流速变化幅度较大, 可能会引起冲刷, 工程建设对弯道出口段影响高于入口段和中段。码头运行工况下, 港池内有明显回流产生, 但流速较小, 可能会产生淤积, 影响码头运行。

关键词: 弯曲河道; 周口港码头; 港池; 防洪影响; 数值模拟; 水动力特性

中图分类号: TV92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)02-0134-06

Hydrodynamic characteristics of wharf project in bend river at Zhoukou Harbor

WANG Lingling^{1,2}, XU Leinu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A three-dimensional hydrodynamic numerical model was used to study the hydrodynamic characteristics of the excavated basin built in the convex side of a bend river and the influence of the project on the river. The results showed the project's influence on the water level and velocity distribution of the river section. It showed that after the wharf built, the backwater in the main channel occurred mainly in the narrow river before the bend end, indicating that the narrowed section of a meandering channel had great influence on the backwater. The range of the water level and velocity near the wharf apron was larger than other regions, perhaps resulting in scouring in this area. The wharf construction influenced the bend exit more than the entrance and middle. In the wharf working condition, there was obvious backflow in the basin, while the velocity was small. It may cause the depositing that will obstruct the wharf operating. The results were useful for studying the hydrodynamic characteristics of excavated harbor basins and its influence on flood control in the meandering river. The results could also provide the basis for the wharf management.

Key words: meandering river; Zhoukou Harbor wharf; excavated basin; flood control; numerical modeling; hydrodynamic characteristic

港口码头的建设会对附近河道的流态、流速以及水位产生显著影响, 复杂的水流状态、港池的淤积也会影响码头的正常使用^[1-2], 所以分析研究码头工程对河道行洪、河势稳定、堤防安全等方面影响对于补救措施的确具有十分重要的意义^[3]。随着计算技术的发展, 数学模型已成为码头港池水动力场模拟研究的主要手段。尹章昭等^[4]采用平面二维水流数学模型, 模拟了长江某顺岸式码头对所在河段的水位、流速及河道

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405600, 2016YFC0401503); 国家自然科学基金(51239003, 51479058, 51609068)

作者简介: 王玲玲(1966—), 女, 教授, 博士, 主要从事计算水力学研究。E-mail: wanglingling@hhu.edu.cn

引用本文: 王玲玲, 徐雷诺. 周口港弯道码头工程水动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 134-139. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.006.

行洪的影响;孙东坡等^[5]采用平面二维水沙数学模型,研究某油码头扩建前后所在河道的水流及泥沙冲淤变化规律。挖入式港池作为一种常见的港口平面布置形式,在我国得到了广泛的应用^[6],为此国内外学者也做了大量研究。袁涛峰等^[7]、王剑楠等^[8]采用平面二维水流数学模型,分析了港池对工程河段水流条件、通航条件的影响,并提出优化措施建议;沈小雄等^[9]通过模型试验观察描述了挖入式港池回流的形成过程;葛建忠等^[10-11]基于 FVCOM 模型对长江口横沙浅滩挖入式港池规划方案的不同平面布置进行了模拟分析对比;戴勇等^[12]基于 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型建立了三维数学模型,研究不同港池轴线与主流流向的夹角对港池内水流运动特性的影响;王家会等^[13]研究了微分方程迭代求解时的“不同步修正”方法对港池水流流态、自由水面位置、垂线平均流速的影响。上述研究中,码头工程多位于顺直河段,部分研究采用概化模型在实验室尺度下进行,侧重于机理研究。依托实际工程,研究弯曲河道上具有挖入式港池的码头工程水动力特性的研究成果尚不多见。

周口港码头位于淮河支流沙颍河周口段,为挖入式港池,由于周口市中心城区位于沙颍河南岸即凸岸一侧,受当地规划等多方面因素限制,拟将码头布置于水流状况较为复杂的弯曲河段凸岸一侧,其下游河段有局部缩窄。特殊的选址与布置方式使得该工程水动力条件复杂,水流三维特性明显^[14-15],具有很好的研究意义。笔者对周口港码头工程河段的行洪流态和港池内流场特性进行数值模拟,分析工程河段的三维水动力特性,以及工程建设对河道流态、水位及断面流速分布规律的影响。研究成果对探讨天然弯曲河道中挖入式港池的水动力特性及其防洪影响具有重要意义。

1 模型建立

1.1 工程概况

周口港码头河段内堤间平均距离约为 620 m,其中主河槽宽约 180 m,滩地平均宽度约为 220 m,主河槽平均底高程约为 36 m,工程河段上游弯道入口处有一深坑,深度约为 8 m,边滩平均底高程约为 46 m,河道断面整体呈宽滩深槽形。自上游到下游,主河槽从右岸偏向左岸,码头位于弯道凸岸的滩地上,拟采用 8 个挖入式港池(图 1),自上游向下游依次为 1~8 号港池,港池尺寸为 152 m×106 m,港池底高程为 37.6 m,其中 1 号和 8 号港池由于位于弯道进口、出口,分别进行了适当的扩大以方便船只进出。

综合考虑工程可能的影响范围及所处河段的河势,选取码头上下游约 4.9 km 河段作为计算区域,并将区域的进出口边界置于顺直河段。为便于分析河道横断面水动力场在工程前后的变化情况,在工程河段自上游向下游共设置了 6 个观测断面——A~F 断面(图 1)。

1.2 控制方程

采用 Deflt3D 软件建立 σ 坐标系下的三维水动力数值模型,为更好地贴合天然河道的不规则边界,平面采用正交曲线网格^[16],垂向采用 σ 坐标系,该坐标系定义为

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (1)$$

式中: z ——沿垂直方向的实际坐标; ζ ——相对于参考平面($z=0$)的水头; d ——相对于参考平面的水深; H ——总水深。

$\xi-\eta-\sigma$ 坐标系下的连续方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \right\} = (d + \zeta)Q \quad (2)$$

式中: $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ 、 $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ ——直角坐标系(x, y)到正交曲线坐标系(ξ, η)转换系数; U, V —— ξ, η 方向上沿水深的平均流速; Q ——单位面积上的流量变化。

ξ 和 η 方向上的动量方程分别为

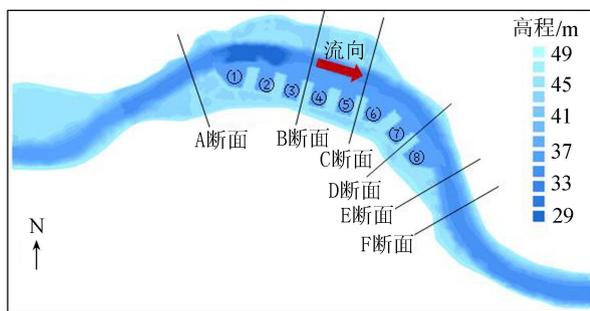


图1 周口港码头示意图

Fig.1 Engineering sketch of the Zhoukou Habor

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv =$$

$$- \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_{\nu} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu =$$

$$- \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_{\nu} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \quad (4)$$

式中: u, v, ω —— ξ, η, σ 方向上的流速分量; $P_{\xi}, F_{\xi}, M_{\xi}$ —— ξ 方向上的静水压力梯度、紊动动量通量、源项; $P_{\eta}, F_{\eta}, M_{\eta}$ —— η 方向上的静水压力梯度、紊动动量通量、源项; ρ_0 ——水体密度; f ——柯氏力系数; v_{ν} ——垂向涡动系数。

定义在 σ 坐标下的垂向流速 ω 可由连续方程(2)得到, 真实物理域中的垂向流速 w 可根据 ω 由下式计算:

$$w = \omega + \frac{1}{g_{\xi} g_{\eta}} \left[u g_{\eta} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v g_{\xi} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (5)$$

有多种方法求解方程(2)~(5)^[17-18], 本文将一个时间步长分2个时间层, 每一层上分别交替改变方向隐式求解控制方程。在计算区域上布置交错C网格, 防止出现棋盘式的物理量分布。模型中将水位等标量性变量布置在网格单元的中心, 流速等矢量性变量布置在单元面上, 计算采用迎风格式和中心差分格式来离散对流项和扩散项, 用循环隐式进程的有限差分ADI算法求解控制方程, 每一时间步交替地沿 ξ, η 方向扫描。区域平面网格数为 800×100 , 垂向为15层, 图2为计算区域平面网格示意图。

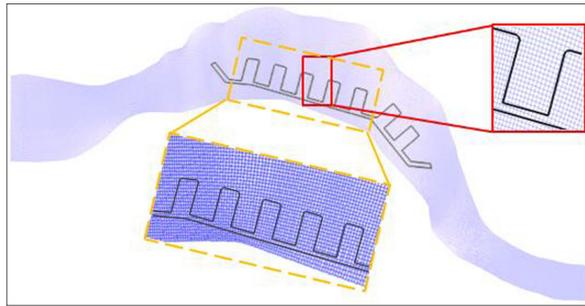


图2 计算区域平面网格划分

Fig. 2 Grids of the computational domain

1.3 模型率定

根据《沙颍河整治可行性研究报告》^[19], 选取20年一遇设计流量及水面线率定码头河段糙率参数, 计算区域上边界流量为 $3250 \text{ m}^3/\text{s}$, 下边界水位 $Z=46.98 \text{ m}$ 。取时间步长 0.1 min , 计算时长为 4 h , 各参数的组合可以满足计算收敛与稳定要求。经多组糙率比选, 最终确定河槽糙率为 0.02 , 边滩糙率为 0.0275 。图3为计算水面线与设计水面线对比, 沿程水位分布总体吻合良好, 表明模型取值基本合理。

2 计算工况及结果分析

根据区域防洪规划, 工程河段50年一遇洪水设计流量为 $3750 \text{ m}^3/\text{s}$, 水位为 47.78 m 。实测资料表明, 沙颍河流量年际变化大, 工程河段多年平均流量为 $420 \text{ m}^3/\text{s}$, 水位为 43.07 m 。本文选取50年一遇洪水工况研究工程建设前后水动力场的变化情况, 以分析工程建设对河道行洪的影响。50年一遇洪水条件下水流会漫过堆场, 而多年平均流量工况下水位低于滩面。为全面深入分析港池内的水流情况, 选取50年一遇洪水和多年平均流量2种工况, 研究工程建成后所在河道尤其是港池内的水动力特征。

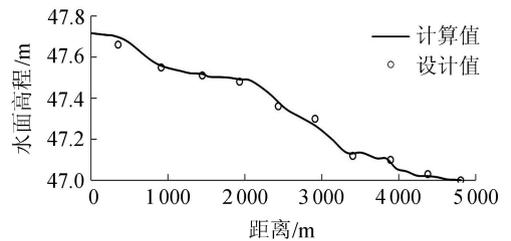


图3 水面线计算值与设计值对比

Fig. 3 Comparison of water surface profiles between calculated and designed values

2.1 水位变化分析

图4为50年一遇洪水条件下工程建成后水位壅高值云图,图中黑色实线表示堆场轮廓。由图4可知,工程建设对其所在区域的影响主要表现为:主河槽和弯道凹岸以5号港池为界,上游水位下降、下游水位壅高,5号港池下游河道有局部缩窄现象,该缩窄段对工程河段水位壅高影响明显。除2号港池外,各港池均出现水位壅高,弯道出口段即6~8号港池所在河段的壅高值达到0.1~0.15 m,堆场迎流面局部壅高接近0.2 m,表明弯道出口段的堆场起到了淹没式丁坝的阻水作用。由于该区段河道同步缩窄,因此丁坝效应更为显著地抬高了工程后的水位值。1号港池附近区域因工程前后地形变化较大,致使水位也有较明显变化。

2.2 流速变化分析

图5为50年一遇洪水条件下各观测断面工程建成后流速增大值云图,各断面左侧为凹岸右侧为凸岸。由图5可知:工程建成后该河段主槽流速均增加,在弯道出口附近的E断面,流速增幅达到最大。码头堆场上方及其前沿区域的流速增幅明显大于主河槽和凹岸,尤其是弯道后段的D断面、E断面即8号港池附近,码头前沿局部区域的流速增幅达1 m/s。表明工程建成后在弯道后段主流将可能逼近凸岸,改变主河槽凸岸一侧及堆场前沿区域的冲淤情势,影响岸坡稳定。因此工程建成后应加强对堆场前沿区域冲刷情况的观测。

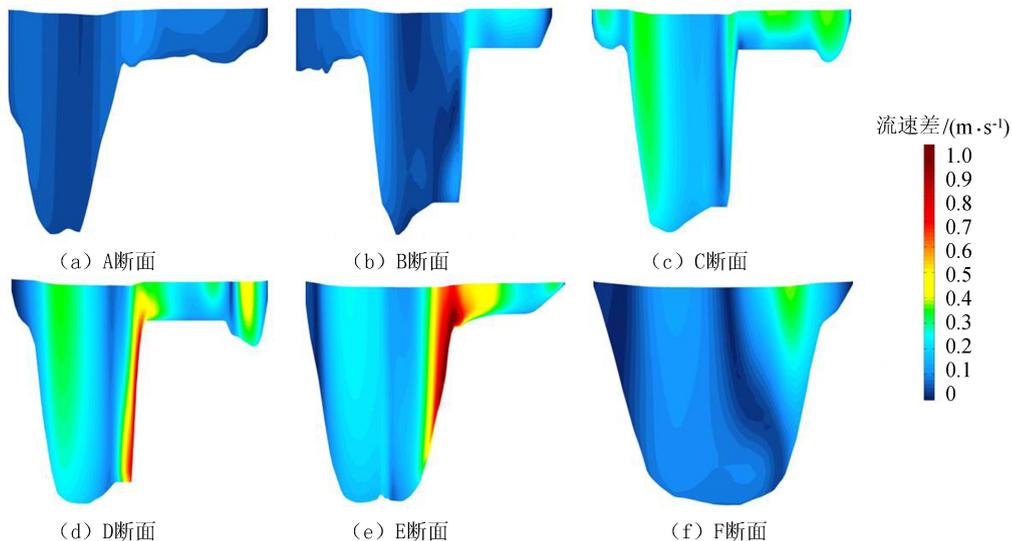


图4 50年一遇洪水条件下工程建成后水位变化云图

Fig. 4 Changing value of water level after the completion of project under 1/50-year flood condition

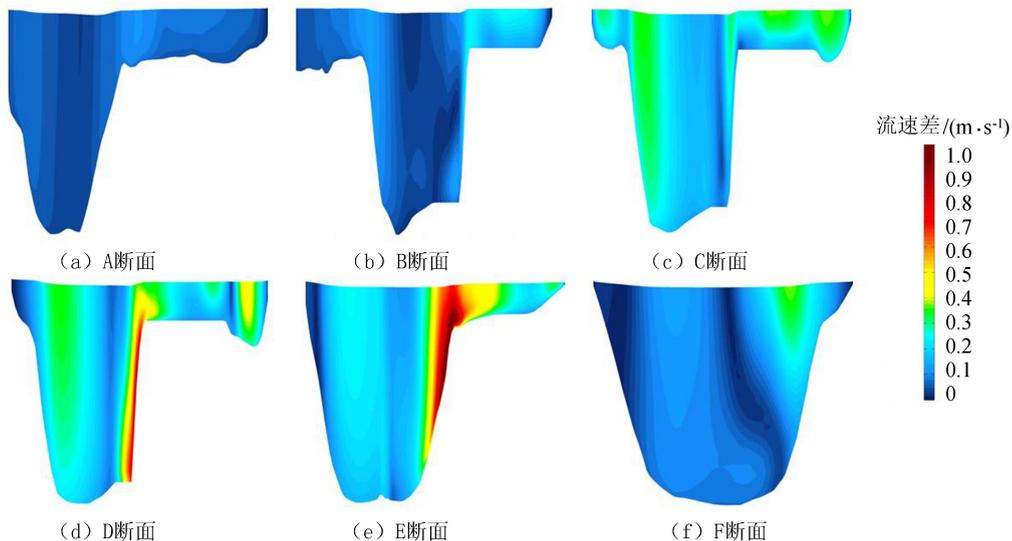


图5 50年一遇洪水条件下各观测断面工程建成后流速增大值云图

Fig. 5 Values of increased velocity in observation section under 1/50-year flood condition

图5还表明,对于本文所研究的宽滩深槽型河道断面,虽然码头工程的建设显著加大了凸岸近岸流速,但对堤坡附近流速影响普遍较小,最大值仅约为0.2 m/s,位于C断面即弯道凹岸顶冲点附近。

2.3 工程建成后流场分析

图6为多年平均流量条件下表层水面流速矢量及流速云图,图7为50年一遇洪水工况下的计算结果。由图6~7可知:工程建成后,码头区域水流平顺,流场总体形态不会改变,但洪水上滩后堆场位置的流向将可能受丁坝效应的影响而发生较明显变化。

多年平均流量条件下水流不会漫滩,港池内有顺时针方向回流产生,但流速极小,除1号港池达到0.2 m/s外,其余均小于0.1 m/s。港池流速明显小于主河槽,主河槽内水流平稳,流速在0.3~0.6 m/s之间。码头长期运行后,港池内的低速回流可能使港池出现淤积。50年一遇洪水条件下洪水将漫滩,流速较多年平均流量工况明显加快,凸岸与凹岸流速均在0.4~1 m/s,堆场顶部流速稍高于港池,由于弯道顶冲作用,凹岸流速略高于凸岸。

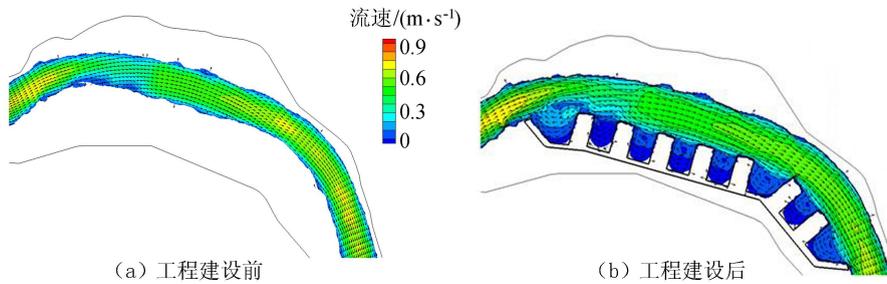


图6 多年平均流量条件下的流场

Fig. 6 Flowing field under average discharge conditions over years

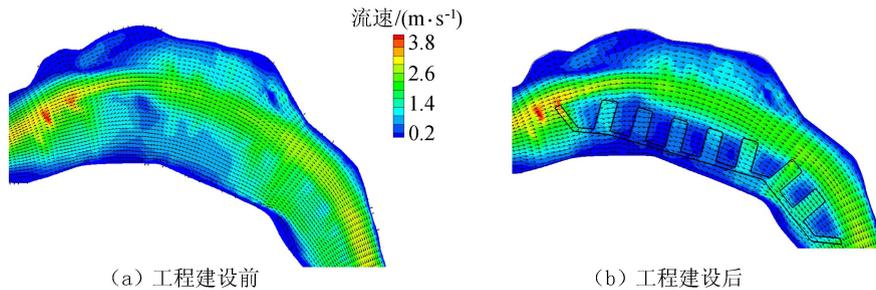


图7 50年一遇洪水条件下的流场

Fig. 7 Flowing field under 1/50-year frequency condition

3 结 论

a. 以缩窄河段起始断面为界,工程的建设将使其上游水位下降、下游水位壅高,弯曲河道局部缩窄对水位壅高影响明显。港池内均出现水位壅高,弯道出口段的水位壅高值明显高于其他区域,最大值可达0.1~0.15 m,堆场的潜坝效应对工程河道水位影响显著。

b. 工程建成后,该河段主槽断面流速均增大,在弯道出口附近达到最大。各断面堤坡附近流速变化幅度较小,凸岸岸坡一侧流速增大幅度明显高于主河槽和凹岸,码头前沿局部最大增幅达到1 m/s。工程建设对弯道出口段堆场前沿区域可能形成冲刷态势。

c. 码头运行工况下,港池内均有顺时针方向的回流产生,但强度较小,流速普遍低于0.1 m/s。长期低速回流作用下可能使港池产生淤积,应加强对港池内泥沙淤积的观测,并制定清淤措施。

参考文献:

- [1] 杨春瑞. 码头工程防洪评价中壅水计算公式浅析[J]. 工程与建设, 2012, 26(1): 54-56. (YANG Chunrui. Analysis of backwater calculation formula for flood control evaluation of wharf project[J]. Engineering and Construction, 2012, 26(1): 54-56. (in Chinese))
- [2] 胡清玲, 蔺秋生, 高海静, 等. 河道范围内修建码头工程的防洪影响评价[J]. 人民长江, 2008, 39(10): 23-25. (HU Qingling, LIN Qiusheng, GAO Haijing, et al. Flood control assessment of wharf construction in riverway[J]. Yangtze River, 2008, 39(10): 23-25. (in Chinese))
- [3] 刘俊勇. 涉水码头工程防洪补救措施典型案例[J]. 人民珠江, 2013, 44(5): 16-19. (LIU Junyong. Analysis of typical cases of remedial flood control measures for wharf projects[J]. Pearl River, 2013, 44(5): 16-19. (in Chinese))
- [4] 尹章昭, 高柱, 陈辉, 等. 某H码头工程建设对长江行洪影响分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 6-10. (YIN Zhangzhao, GAO Zhu, CHEN Hui, et al. Impact of H wharf construction on flood discharge in Yangtze River[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2016, 38(1): 6-10. (in Chinese))
- [5] 孙东坡, 曹兵, 王鹏涛, 等. 甬江扩建油码头对所在河段的行洪影响分析[J]. 水利水运工程学报, 2008(3): 1-7. (SUN Dongpo, CAO Bing, WANG Pengtao, et al. Influence of oil wharf expansion on the floodway reach[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(3): 1-7. (in Chinese))
- [6] 韩时琳, 赵利平, 贺晖. 我国内河挖入式港池现状分析[J]. 水运工程, 2003(4): 44-45. (HAN Shilin, ZHAO Liping,

- HE Hui. Current situation analysis of china inland excavated-in basin[J]. Port and Waterway Engineering, 2003(4): 44-45. (in Chinese))
- [7] 袁涛峰,周卫东. 唐坊码头工程挖入式港池对航道的影响及对策研究[J]. 中国水运, 2015, 15(7): 257-263. (YUAN Taofeng, ZHOU Weidong. Study on the influence of Tangfang Excavated Basin on the channel[J]. China Water Transport, 2015, 15(7): 257-263. (in Chinese))
- [8] 王剑楠,李彬,郑国栋,等. 内河挖入式港池洪水演进数值模拟[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 43-47. (WANG Jiannan, LI Bin, ZHENG Guodong, et al. The coupling analysis of seawall seepage field-stress field under the influence of tide level[J]. Yellow River, 2015, 37(8): 43-47. (in Chinese))
- [9] 沈小雄,韩时琳,刘虎英. 内河挖入式港池回流范围的试验研究[J]. 长沙交通学院学报, 2003, 19(6): 49-53. (SHEN Xiaoxiong, HAN Shilin, LIU Huying. Experimental study of the range of circulating flow in dug-into basin[J]. Journal of Changsha Communications University, 2003, 19(6): 49-53. (in Chinese))
- [10] 葛建忠,郭文云,丁平兴. 长江口横沙浅滩挖入式港池对流场的影响分析 I: 数值模型和验证[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013(4): 79-90. (GE Jianzhong, GUO Wenyun, YU Pingxing. Hydrodynamic influence of proposed excavated-in habor in the Hengsha Shoal of the Yangtze Estuary I: numerical model and validation[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2013(4): 79-90. (in Chinese))
- [11] 葛建忠,郭文云,丁平兴,等. 长江口横沙浅滩挖入式港池对流场的影响分析 II: 对周边流场影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013(4): 91-105. (GE Jianzhong, GUO Wenyun, YU Pingxing, et al. Hydrodynamic influence of proposed excavated-in habor in the Hengsha Shoal of the Yangtze Estuary II: influence on the current field[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2013(4): 91-105. (in Chinese))
- [12] 戴勇,王定略. 内河挖入式港池回流流速分布规律的数值模拟[J]. 水道港口, 2012, 33(4): 299-302. (DAI Yong, WANG Dinglue. Numerical simulation of counterflow velocity distribution rule in dredged harbor basin[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33(4): 299-302. (in Chinese))
- [13] 王家会,李岩,袁月平,等. 挖入式港池水流特性数值模拟[J]. 人民黄河, 2009, 31(6): 36-41. (WANG Jiahui, LI Yan, YUAN Yueping, et al. Numerical simulation of counterflow velocity distribution rule in dredged harbor basin[J]. Yellow River, 2009, 31(6): 36-41. (in Chinese))
- [14] 陈启刚,钟强,李丹勋,等. 明渠弯道水流平均运动规律试验研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 369-375. (CHEN Qigang, ZHONG Qiang, LI Danxun, et al. Experimental study of open channel flow in a bend[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 369-375. (in Chinese))
- [15] SHANKAR N J, CHAN E S, ZHANG Q Y. Three-dimensional simulation for an open channel flow with a constriction[J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(2): 187-201.
- [16] YE Jian, McCORQUODALE J A. Simulation of curved open channel flows by 3D hydrodynamic model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(7): 687-698.
- [17] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [18] 汪德燿. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [19] 中水淮河工程有限责任公司. 沙颍河整治可行性研究报告[R]. 合肥: 中水淮河工程有限责任公司, 2005.

(收稿日期: 2017-06-22 编辑: 刘晓艳)