

# 二维潮流数学模型在码头防洪影响分析中的应用

陈秀瑛, 马进荣

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 码头建设会对河道行洪、堤防及其他防洪工程的安全造成不利影响. 防洪影响分析是码头工程设计中一项重要技术工作. 采用平面二维潮流数学模型, 对长江镇扬河段水流运动以及拟建码头工程对防洪的影响进行了数值模拟计算. 结果表明, 在防洪设计洪水、平滩水位流量和多年平均流量 3 种水流条件下, 工程兴建后水位壅高最大值约 1.2 cm, 水位降低最大值约 1.5 cm, 流速最大增幅约 0.05 m/s, 最大减幅约 0.23 m/s. 码头兴建后对工程河段的水位和流场影响较小, 不会对河段的行洪带来不利影响.

**关键词:** 二维潮流数学模型; 码头; 防洪影响; 长江镇扬河段

**中图分类号:** O247

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2010)02-0085-07

我国每年因洪水灾害所造成的损失相当严重, 而且随着经济的发展, 这一灾害对国民经济的影响也越来越大. 因此, 防洪影响分析是河道内非防洪工程设计中的重要内容. 依据国家计委、水利部《河道管理范围内建设项目管理的有关规定》(水政[1992]7号), 对在河道管理范围内建设的码头工程, 应进行防洪评价. 目前研究防洪影响分析这类问题的主要手段有河工模型、数学模型和经验计算等方法<sup>[1]</sup>. 但河工模型由于投资大、周期长等原因, 使其适用性受到一定限制; 数学模型可细致模拟河道内工程位置附近水流泥沙的运动规律, 且具有投资少、周期短等优势, 可同时进行多方案分析计算, 具备极好的灵活性, 目前在此类问题研究中应用较为广泛<sup>[2-6]</sup>.

江苏联合水泥有限公司水泥专用码头位于长江下游感潮河段, 水流流态较为复杂. 本文采用平面二维潮流数学模型, 对码头建设前后的河道水流流速、水位、流态的变化情况进行模拟和计算, 并由此分析工程建设对防洪的影响, 为该工程的实施和审批提供科学依据.

文中高程系统除特别注明外均为 85 国家高程基准, 平面坐标系为 1954 年北京坐标系.

## 1 防洪影响计算模型的机理及方法介绍

码头建设对河道、堤防的影响主要是建筑物的阻水、挑流以及局部流态改变对河道行洪和堤防及其他防洪工程安全的影响. 数值模拟技术, 能在保证精度的前提下较好地反映水流运动的内部规律, 获得全面的数据, 更重要的是, 它能提前对水流未来的运动情况做出预报, 这点对防洪减灾工作意义重大<sup>[7-8]</sup>.

防洪评价数学模型的建立以河道、河网或泛区的水流数值模拟技术为基础, 属于计算浅水动力学的范畴. 计算浅水动力学的计算方法主要有有限差分法、有限元法、有限体积法、特征线法等. 有限差分法是数值计算方法中最古老的方法, 它的基本原理是将求解域划分成许多矩形网格, 将应变变量予以离散化, 然后用离散化后应变变量的差商来作为应变变量导数的近似, 将原来的微分方程简化为代数方程求解. 直至今日, 在求解流体运动问题的数值方法中, 有限差分法仍占主导地位<sup>[9]</sup>.

本文主要基于有限差分法建立平面二维潮流数学模型进行码头防洪计算.

收稿日期: 2009-06-05

作者简介: 陈秀瑛(1965-), 女, 河南罗山人, 高级工程师, 主要从事港口工程咨询、设计工作. E-mail: xychen@nhri.cn

## 2 平面二维潮流数学模型介绍

### 2.1 基本方程

工程区为河道,采用贴体正交曲线坐标系,其水流基本方程如下:

$$\text{连续方程:} \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (DuC_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta} (DvC_\xi) \right] = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \frac{v^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} = \quad (2)$$

$$fv - \frac{g}{C_\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + E_\xi \left( \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial B}{\partial \eta} \right) - \frac{gu}{C^2 D} \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} = \quad (3)$$

$$-fu - \frac{g}{C_\eta} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + E_\eta \left( \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial B}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) - \frac{gv}{C^2 D} \sqrt{u^2 + v^2}$$

式中:  $A = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v) \right]$ ,  $B = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta v) - \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi u) \right]$ ; 总水深  $D = \zeta + h$ ,  $\zeta$  为水位,  $h$  为水深;  $\xi, \eta$  分别为正交贴体坐标的纵横向计算网格方向;  $u, v$  分别为沿  $\xi, \eta$  的水流速度分量;  $C_\xi, C_\eta$  为拉梅系数;  $f = 2\omega \sin\varphi$  为科氏力系数 ( $\omega$  为地球自转角速度);  $E$  为水平涡黏扩散系数;  $C$  为谢才系数,  $C = \frac{1}{n} (h + \zeta)^{1/6}$ ,  $n$  为曼宁系数;  $g$  为重力加速度.

### 2.2 定解条件

(1) 初始条件

$$\begin{cases} u(t, x, y) |_{t=t_0} = u_0(x, y) \\ v(t, x, y) |_{t=t_0} = v_0(x, y) \\ \zeta(t, x, y) |_{t=t_0} = \zeta_0(x, y) \end{cases}$$

其中:  $u_0, v_0, \zeta_0$  分别为初始流速、潮位, 通常取常数;  $t_0$  为起始计算时间.

(2) 边界条件

$$\text{开边界采用流速边界: } u|_{\Gamma_0} = u(t, x, y)$$

$$v|_{\Gamma_0} = v(t, x, y)$$

$$\text{或采用水位边界: } \zeta|_{\Gamma_0} = \zeta(t, x, y)$$

其中:  $u, v, \zeta$  均为根据现场观测资料确定的已知量, 分别用流速过程或潮位过程控制. 当上游入流量过程已知时, 采用水深加权法确定上游开边界网格节点流速过程.

闭边界  $\Gamma_n$  采用不可入条件, 即  $V_n = 0$ , 法向流速为 0,  $n$  为边界的外法向.

### 2.3 计算方法

二维数值计算采用 ADI 法, 该方法的网格剖分、差分格式及算法已被录入《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》. 微分方程离散时, 时间采用前差分格式, 空间采用交错网格的中心差分格式. 把一个时间步长分成两步进行, 前半步隐式计算方向流速分量及潮位, 显式计算方向流速分量; 后半步隐式计算方向流速分量及潮位, 显式计算方向流速分量. 该方法理论成熟、计算效率高、稳定性好, 在工程数值模拟计算中得到了广泛应用.

### 3 码头防洪计算实例

#### 3.1 工程概况

**3.1.1 工程位置及规模** 拟建的码头地处长江镇扬河段高资河口下游.港区位于镇江市丹徒区境内,属镇江港高资港区,码头上游侧为船山矿5 000 t级散货码头,新建的码头均与上游码头保持足够的安全距离.工程位置及附近河势见图1.

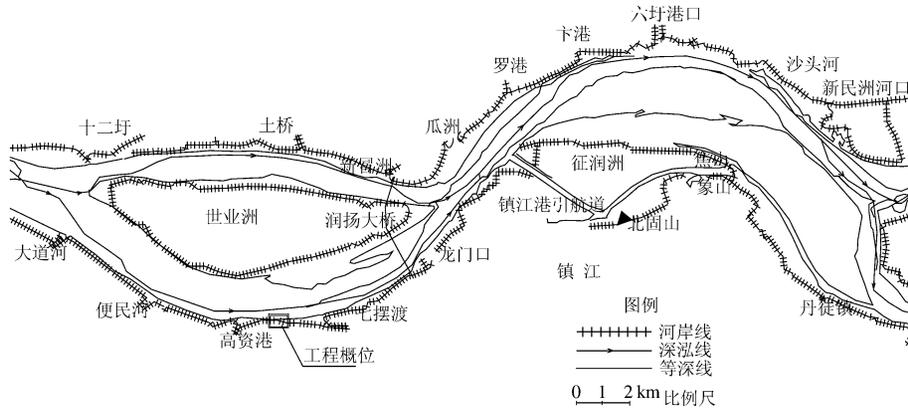


图1 工程所在位置河势图

Fig.1 River regime of the project

本工程为一座50 000 t级水泥专用码头,占地88 960 m<sup>2</sup>,占用长江岸线275 m、长江水域9 400 m<sup>2</sup>.

**3.1.2 工程河段河势概况** 长江镇扬河段上起三江口(与南京河段相接),下迄江阴市五峰山(与扬中河段相接),上、下两端有三江口、五峰山两节点控制,河段全长约为74 km,自上而下平面形态为单一微弯和弯曲分汊河型组成,按河道平面形态的不同分为仪征水道、世业洲汉道、六圩弯道、和畅洲汉道以及大港水道.

#### 3.2 模型率定和验证

**3.2.1 模型范围及相关问题处理** 模型上边界取在胥浦河口附近,距离泗源沟水尺较近,下边界取在六圩河口附近,模型网格数为59×282,码头工程区局部加密,纵向最小网格步长为7 m,横向最小约为2.5 m.

工程河段有江心洲及岸边浅滩,为正确反映浅水域在不同洪水水位下的网格干湿特征,需做动边界处理,计算过程中采用常用的冻结法进行动边界处理.

由于河床的阻力与水深有一定的关系,通常水深越浅糙率越大,根据经验选用基础糙率与附加糙率组合公式计算:

$$n = n_0 + n'/H \quad (4)$$

式中: $n_0$ 为基础糙率,第2项为附加糙率.

紊动黏性系数与尺度、水流动力等因素有关,采用Smagorinsky公式<sup>[10]</sup>计算,

$$E = 0.1\Delta x\Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \quad (5)$$

本次计算中,计算时间步长采用2 s.

**3.2.2 模型验证** 数学模型采用2005年7月12-13日实测资料进行验证,包括潮位过程、断面流速分布和分流比的验证.验证计算时上边界采用泗源沟潮位过程控制,下边界采用六圩河口潮位过程控制.

部分站点模型潮位验证成果见图2,部分断面流速分布验证成果见图3.可见,计算潮位过程和实测潮位过程基本吻合,经统计可知,计算的潮位过程与实测值误差一般小于5 cm,且整个潮位过程的相位也符合良好.各断面上不同测点计算的流速值与实测值误差一般在0.10 m/s以内,个别点最大误差约为0.16 m/s.

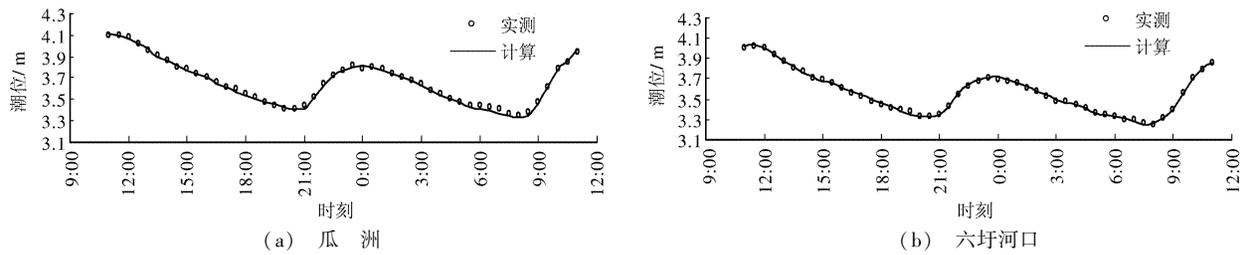


图 2 潮位过程验证

Fig. 2 Tide process verification

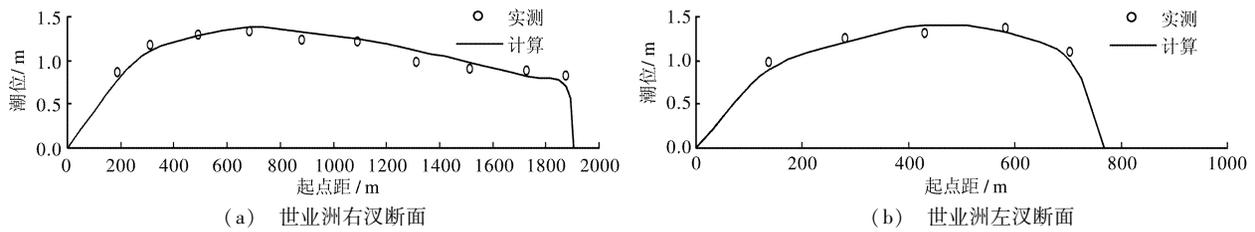


图 3 断面流速分布验证

Fig. 3 Verification of velocity distribution of river cross section

总体而言,模型验证结果良好,精度满足要求,可用于拟建码头工程对河道水流影响的计算分析。

### 3.3 防洪影响计算分析

拟建工程位于长江的潮流界附近,径流影响大于潮汐影响.考虑工程行洪影响分析的需要,工程影响计算选取长江防洪设计洪水、平滩水位流量和多年平均流量作为水流条件进行计算.其具体条件为:①防洪设计洪水:洪水位时流量为 85 400 m<sup>3</sup>/s,镇江站水位 6.93 m,低潮位时流量为 85 400 m<sup>3</sup>/s,镇江站水位 5.97 m;②平滩水位流量:流量为 48 000 m<sup>3</sup>/s,镇江站水位 3.77 m;③多年平均流量:流量为 28 700 m<sup>3</sup>/s,镇江站水位 2.47 m.

由于镇江东石物贸有限公司 50 000 t 级码头紧邻拟建码头,该码头目前还没有开工,限于篇幅,本文仅考虑在无东石码头的前提下,拟建码头兴建的工程影响.因此每一个水流条件,都对应 2 组计算工况(即天然条件下的现状和现状基础上兴建拟建码头),4 个水流条件,故共有 8 个计算组次.

由于数学模型边界需设定在工程建设影响范围外,通常模型范围较大,模型网格尺度明显大于码头桩柱尺度,本文采用附加阻力法<sup>[12]</sup>进行工程概化处理.

### 3.4 计算结果及分析

3.4.1 码头建设壅水分析 表 1 列出了不同水文情况下工程建设后水位变化值及影响范围.图 4 为防洪设计洪水低潮位下工程建设后水位变化等值线图.

表 1 工程建设影响水位变幅及范围

Tab. 1 The maximum variation of water level and its influence scope after construction completion

流量条件	水位变化最大值/cm		壅水范围/m	
	壅高	降低	码头上游	码头下游
防洪低潮位	1.2	1.5	350	890
平滩水位	0.5	1.0	240	690
多年平均	0.3	0.5	80	160

由表1可见,在防洪设计洪水低潮位计算条件下,工程后水位变幅和影响范围达到最大,工程后码头上游水位壅高,壅高最大值为1.2 cm,位于码头上游约20 m处,水位壅高影响范围(壅高值大于0.3 cm的范围)在码头上游约350 m内;码头下游水位降低,最大降低值为1.5 cm,位于码头平台下游70 m以内,水位降低范围(降水值低于0.3 cm的范围)在码头下游约890 m以内,防汛大堤近岸水位壅高值在1.0 cm以内.由此可见,码头工程对河道行洪水位影响不大.

**3.4.2 码头建设对河道流场影响分析** 码头工程将引起工程区河道局部流场改变.从对比流态图(见图5)可以看出,码头的桩基结构对水流有局部分流作用,码头平台前沿水流略有左偏;平台后沿则略有右偏.从各组计算水流条件看,与工程前相比,码头平台外侧流向的变幅一般在 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 以内,工程后平台前沿流态较为平顺;码头平台内侧水浅,多为滩地,工程实施后由于受码头平台的挤压,流速增大,因此流向的变幅略大.

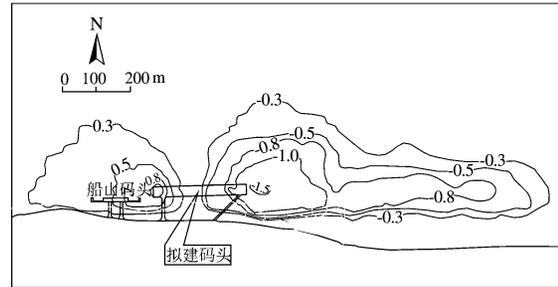


图4 工程建设后水位变化等值线(单位:cm)

Fig. 4 Contour lines of water level variation after construction completion (unit: cm)

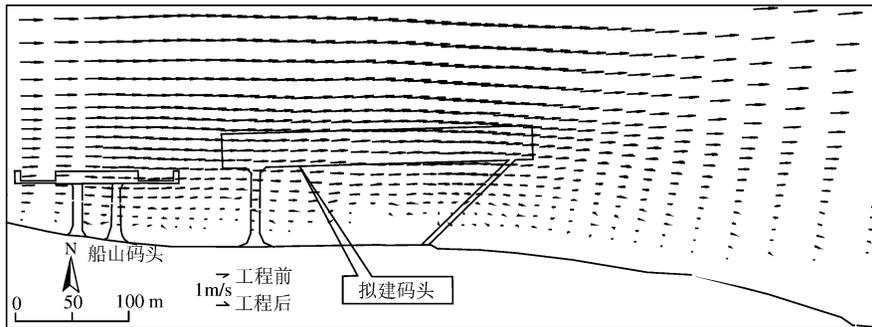


图5 工程建设前后流态对比(防洪设计洪水低潮位)

Fig. 5 The comparison between flow patterns before and after project construction

工程实施后,船山码头平台前沿流态平顺,流向基本不变,因此工程实施对已建码头船舶停靠无明显不利影响.

表2列出了各计算水流条件下流速的最大变化值及其发生部位.图6为防洪设计洪水低潮位下工程后流速变化等值线图.由图6、表2可见,在防洪设计洪水低潮位下,流速变化达最大,影响范围亦达最大.流速最大增幅约0.05 m/s,流速最大减幅约0.23 m/s,流速变化的最大影响范围仅在码头上游200 m、下游1.6 km和码头平台外侧450 m内.

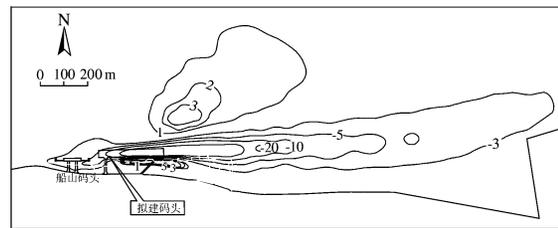


图6 工程后流速变化等值线(单位:cm·s<sup>-1</sup>)

Fig. 6 Contour lines of velocity variation after project construction completion (unit: cm·s<sup>-1</sup>)

表2 工程后流速最大变化值及发生部位

Tab. 2 The maximum variation of flow velocity and its location after construction completion

项 目	流速变化最大值/(m·s <sup>-1</sup> )		发生位置	
	增大	减小	增 大	减 小
防洪低潮位	0.05	0.23	码头内侧	码头下游100 m
平滩水位	0.02	0.15	码头内侧	码头下游100 m
多年平均	0.01	0.07	码头外侧200 m内	码头下游100 m

由此可见,码头工程兴建后,对码头附近的流场影响不大,流速变化影响范围仅在码头工程局部区域.码头平台后沿局部区域流速虽有增加,但幅度不大,防洪大堤附近流速基本不变,码头平台后沿的局部流速增加区不会影响防洪大堤安全.

## 4 结 语

(1) 本项研究建立了从胥浦河口至六圩河口的平面二维潮流数学模型,模拟计算了工程河段的水流运动.从验证结果看,模型的计算潮位过程、断面流速分布均与实测过程吻合较好;计算的汉道分流比合理.数学模型可用于工程影响分析计算;

(2) 选取防洪设计洪水、平滩水位流量和多年平均流量为计算的水流条件,计算工程河段工程前后的水位、流场,分析工程前后水位和流场的变化和影响范围.以上各组来流条件中,一般流量越大,工程对水位、流速的影响也越大;

(3) 由数模计算结果可知,在防洪设计洪水、平滩水位流量和多年平均流量水流条件下,工程后水位壅高最大值为 1.2 cm,水位降低最大值为 1.5 cm,流速最大增幅约 0.05 m/s,流速最大减幅约 0.23 m/s;

(4) 综合分析表明,码头兴建后对工程河段的水位和流场影响较小,影响仅在局部区域且影响范围有限.码头兴建后,随着河床的自动调整,工程对水流的影响会趋于减小.所以码头兴建后,不会对本河段的行洪及河势带来明显不利的影响.

## 参 考 文 献:

- [1] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. (YANG Guo-lu. River mathematical model[M]. Beijing: Ocean Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 余新明, 谈广鸣, 赵连军, 等. 天然分汊河道平面二维水流泥沙数值模拟研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(1): 3-37. (YU Xin-ming, TAN Guang-ming, ZHAO Lian-jun, et al. Planar 2-D flow and sediment numerical modeling of branching river[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(1): 3-37. (in Chinese))
- [3] 余明辉, 袁雄燕, 刘合翔, 等. 守恒性平面二维水流数学模型的研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(3): 1-4. (YU Ming-hui, YUAN Xiong-yan, LIU He-xiang, et al. A horizontal 2D hydraulic numerical model of fine conservation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(3): 1-4. (in Chinese))
- [4] 张细兵, 殷瑞兰. 平面二维水流泥沙数值模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 665-667. (ZHANG Xi-bing, YIN Rui-lan. Planar 2-D flow and sediment mathematical modeling[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(6): 665-667. (in Chinese))
- [5] 谈广鸣, 赵连军, 韦直林, 等. 海河口平面二维潮流水沙数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20: 546-547. (TAN Guang-ming, ZHAO Lian-jun, WEI Zhi-lin, et al. Research on a 2-D horizontal current and sediment numerical model in the Haihe river estuary[J]. Journal of Hydrodynamics(Ser A), 2005, 20: 546-547. (in Chinese))
- [6] 董耀华. 河势贴体河道平面二维正交网格生成方法的研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(4): 14-17. (DONG Yao-hua. Research on generating method of 2-D river-regime-fitted orthogonal grid for river channels and its application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(4): 14-17. (in Chinese))
- [7] 钟伟强, 唐造造, 陈灿辉. 西江金鱼沙游艇码头工程防洪影响分析[J]. 红水河, 2008, 27(2): 44-47. (ZHONG Wei-qiang, TANG Zao-zao, CHEN Can-hui. Research on flood prevention of Jinyusha yacht dock project in the Xijiang River[J]. HongShui River, 2008, 27(2): 44-47. (in Chinese))
- [8] 喻涛, 王平义. 河市州河大桥通航水流平面二维数学模型研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(2): 302-305, 329. (YU Tao, WANG Ping-yi. Study on two dimensional mathematic model for navigation flow of Zhouhe Bridge in Heshi[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Sciences), 2009, 28(2): 302-305, 329. (in Chinese))
- [9] 谭维炎. 计算浅水水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. (TAN Wei-yan. Computational shallow water hydrodynamics [M]. Beijing: Tsinghua Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [10] S MAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations[J]. Mon Weather Rev, 1963, 91(3): 99-

164.

- [11] 长江科学院. 镇江东石物贸有限公司五万吨级码头工程防洪评价报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2005. (Changjiang River Scientific Research Insitute. Flood prevention assessment report of 50 000 Dwt warf in Zhenjiang [R]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2005. (in Chinese))
- [12] 李国斌, 傅津先, 周维军. 平面二维水流计算中墩柱群处理方法比较[J]. 水利水运工程学报, 2001(增刊). (LI Guo-bin, FU Jin-xian, ZHOU Wei-jun. The treatment methods comparison of pier column group in computation of 2-D plane flow in river[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(Suppl). (in Chinese))

## A 2D numerical model for tidal current application in dock's flood control impact analysis

CHEN Xiu-ying, MA Jin-rong

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** The dock construction has adverse effects on the safety of river flood, dike and other flood control structures. Flood control impact analysis is an important technical aspect in dock design. Based on a 2D numerical model for tidal current, the paper has done the analogue and calculation of numerical values in the water flow movement of the Zhenjiang-Yangzhou(Z-Y) Reach of Yangtze River as well as the influence on the flood-control by the dock project. The results show that after project completion, the maximum increment of water level is about 1.2 cm while the maximum decrement is about 1.5 cm and the maximum increment of flow velocity is about 0.04 m/s while the maximum decrement is about 0.23 m/s under the three water flow conditions of flood control design's flood, bank-full discharge and mean annual discharge. The construction of the dock has little influence on the water level and flow field of the project reach and it will not cause adverse influence on the flood channel.

**Key words:** 2D numerical model for tidal current; dock; flood control impact; Zhenjiang-Yangzhou Reach of Yangtze River