

灌河燕尾港 2 万吨级码头防洪影响潮流数模研究

窦 峰¹, 李 国 臣², 杨 尧¹, 毕 忠 飞²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 河海大学 港口航道与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为了研究大型涉水建筑物的修建对潮汐河段防洪的影响,以灌河燕尾港 2 万吨级码头防洪影响为研究内容,采用有限体积方法,建立三角形非结构网格二维潮流数学模型,分析码头建设前后工程区水位、流速和流场的变化。结果表明,码头兴建后对工程区河道的水位和流速影响均较小,流场变化局限在局部小范围地区,故对灌河的防洪影响较小。

关键词:防洪影响; 无结构网格; 潮流数值模拟; 水位; 流速; 流场
中图分类号: TV87 **文献标志码:** A

在进行防洪减灾系统建设过程中,需要对洪水演进规律有一个清晰、科学的了解。现场测量数据、卫星遥感等都是研究水工建筑物防洪影响的一些有效手段。物理模型虽较为直观,但在缩尺模拟时存在观测精度问题,且费时费力^[1-3]。相比之下,数值模拟技术优点更为突出,在保证工程精度的前提下,费用低廉、能较好地反映水流运动情况、提前对未来水流运动情况做出预报,对于防洪减灾意义重大。

本文以灌河燕尾港 2 万吨级码头防洪影响潮流数值模拟为例,研究不同上游来水和下游潮型条件下,建设项目实施前后工程区的流场、潮位、流速等变化,从而评价项目实施对于灌河行洪所产生的影响。该工程位于灌河口燕尾港,岸线条件复杂,河道弯曲,滩地分布广泛,水面宽度变化很大,水下地形十分复杂。为克服这些自然条件给计算带来的困难,模型采用三角形无结构网格,外海域最大网格尺度为 6 000 m,工程区最小网格尺度可达 10 m,以保证计算精度。

1 二维潮流数学模型

1.1 基本方程

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)U_x]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)U_y]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = fU_y - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho(h + \zeta)} + N_x \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} = -fU_x - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho(h + \zeta)} + N_y \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中, x, y 为直角坐标系坐标; t 为时间变量; h 为平均水深; ζ 为相对于平均海平面的潮位; U_x, U_y 分别为 x, y 方向上的垂线平均速度; ρ 为水流密度; g 为重力加速度; N_x, N_y 分别为 x, y 方向的水平紊动黏性系数; f 为科氏参数 ($f = 2\omega \sin\phi$, ω 为地球旋转角速度, ϕ 为纬度); τ_x, τ_y 分别为波流共同作用下床面剪切应力在 x, y 方向的分量。

1.2 边界条件

数学模型通常使用开边界(水边)和闭边界(岸边)两种边界条件。对于开边界,采用潮位过程进行控制;对于闭边界则根据不可入原理,取法向流速为 0,即

$$\eta|_b = \eta(x, y, t) \quad (4)$$

$$\vec{U} \cdot \vec{n} = 0 \quad (5)$$

拟建工程河段岸滩条件复杂,边滩淹没和露滩频繁,为了合理模拟该流域的水流形态,模型闭边界采用

干湿判别的动边界。

1.3 初始条件

计算开始时,整个计算区域内各点的水位、流速值就是计算的初始条件,即

$$\zeta(x, y, t_0) = \zeta_0(x, y) \quad (6)$$

$$U_x(x, y, t_0) = U_{x0}(x, y) \quad (7)$$

$$U_y(x, y, t_0) = U_{y0}(x, y) \quad (8)$$

一般情况下初值都是通过估算给出的,与实际值并不一致,但经过一定时间以后,即使初值有一定的误差,在计算过程中误差也将会随着时间的增加而逐渐消失。

1.4 求解方法

利用有限体积法(Finite Volume Method)求解基本方程的数值解,该法是基于有限单元法和有限差分法的一种数值方法^[4]。

1.5 计算区域

数学模型计算范围北起日照市,南至废黄河口附近,外海至 -20 m 等深线外,灌河上游至盐东控制工程,东西宽约 104 km,南北长约 140 km,面积约 14 560 km²。

1.6 计算边界条件

灌河及口外大范围平面二维潮流数学模型,除东边界和北边界为水边界外,其余都为陆边界,进行潮流数值计算时需要给定开边界的潮位过程。计算域的潮流场受东中国海潮波系统控制,为了使计算域的潮流场能够反映实际的潮流运动,本模型的开边界由东中国海潮波数学模型提供^[5]。

2 模型率定及验证

使用 2007 年 9 月的大潮和中潮两次水文测验资料对于所建立的潮流数学模型进行率定。使用 2006 年 5 月 28 ~ 29 日大潮、2004 年 6 月大潮(4 ~ 5 d)和中潮(8 ~ 9 d)3 次水文测验资料对所建立的潮流数学模型进行验证,验证精度满足规范要求。

3 工程简介及计算工况

灌河港区燕尾港 2 万吨级散杂货码头工程位于江苏省连云港市灌云县燕尾镇灌河口西岸,泊位总长度 360 m^[6]。拟建工程区水域具有河面宽阔、水深良好、水流平顺等特点^[7-8],码头前沿即为 -8 m 等深线,码头与陆地联系方便,拦门沙整治航道距码头前沿约 320 m 左右,便于船舶的航行与靠离作业。防洪等级为 II 级,防洪标准为 50 a 一遇,按当地历史最高潮校核。

本次计算的工况共有 6 组,详见表 1,将双导堤和拦门沙整治航道工程实施后情况视为自然状态(工程前),考虑灌河和新沂河排洪以及燕尾港潮位采用频率 2%(重现期 50 a 一遇)的高潮位控制分别进行计算,其中,潮型采用 2004 年 6 月 4 ~ 5 日大潮潮型修正放大。盐东控制工程武障河、六塘河、龙沟河、义泽河 4 闸全部泄洪,且均达到实测最大流量,则 4 闸流量之和为 2 544 m³/s。此外在流域汇流计算中,面积取 6 767 km²,排涝模数 K 取 0.3,则计算得到的流域汇流量为 2 030 m³/s。取 $Q = 4 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 为数模的计算入流量。新沂河泄洪流量按 50 a 一遇洪水下泄流量 7 800 m³/s 计算。

表 1 数学模型计算工况

工况	计算条件	上游流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	新沂河排洪/ (m ³ ·s ⁻¹)
1	自然状态(工程前)	0	0
2	工况 1 + 泄洪流量	4500	7800
3	50 a 一遇高潮位 + 泄洪流量	4500	7800
4	工况 1 + 码头工程	0	0
5	工况 2 + 码头工程	4500	7800
6	工况 3 + 码头工程	4500	7800

4 计算结果分析

4.1 潮位影响分析

工程区潮位测点布置见图 1,1 ~ 5 号测点布置在工程区下游侧,6 ~ 8 号测点布置在码头前沿,9 ~ 12 号测点布置在工程区上游侧,13 号测点位于五灌河闸,14 号测点位于锦豪船厂。各工况大潮高潮位变化见表 2。

(1) 无泄洪流量时,工程区附近高潮位略有变化。与工况 1 相比,工况 4 下,工程区高潮位略有降低,但是降低幅度甚微,最大降幅为 0.06 cm,出现在 9,10 号点,码头前沿水位最大壅高 0.02 cm,工程后水位的变化主要集中在码头上、下游局部分区域内,影响范围不超过码头工程上游下游 1 km,且影响甚小。灌河行洪时,工程区高潮位略有增加,且行洪流量越大,对高潮位的影响越小。与工况 2 相比,工况 5 下,工程区高潮位各测点增幅在 0.03 cm 左右。50 a 一遇高潮位时,工程前后码头前沿及上下游附近高潮位基本无变化。与工况 3 相比,工况 6 下,工程区高潮位前后基本无变化。

(2) 本工程位于灌河河口区凹岸,右岸凸岸分布有大片滩地,河面开阔,码头前沿距离拦门沙整治航道边缘约 320 m,水深条件良好,涨落潮期间水流归槽现象明显。对于无泄洪流量时,工程区高潮位略有降低且最大降幅为 0.06 cm,分析原因为码头工程阻水作

用导致灌河口纳潮量略有减小且上游无径流,进而导致工程区高潮位降低;而灌河行洪时,码头建好后各测点高潮位增幅大致在 0.03 cm 左右,则是因为上游约 12 000 m³/s 泄洪所引起的潮位壅高;50 a 一遇高潮位时,工程区前后高潮位变化基本为 0,其原因为 50 a 一遇高潮位和上游泄洪约 12 000 m³/s 对工程区潮位的影响有相互抵消之势,所以表现为工程前后高潮位变化基本为 0。

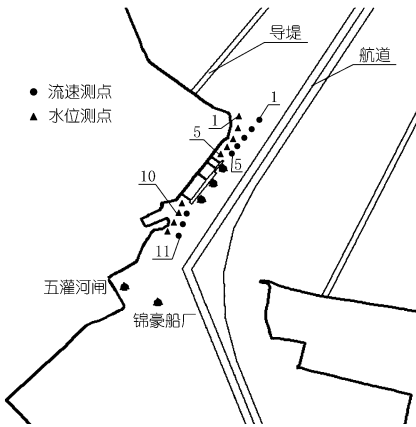


图 1 潮位、流速测点布置示意

表 2 各工况大潮高潮位变化 cm

测点	工况 1	工况 4	差值	工况 2	工况 5	差值	工况 3	工况 6	差值
1	252.50	252.49	-0.01	264.44	264.46	0.02	407.69	407.69	0
2	253.58	253.58	0.00	264.51	264.54	0.03	408.54	408.54	0
3	254.14	254.13	-0.01	264.87	264.89	0.02	409.56	409.56	0
4	254.08	254.07	-0.01	265.20	265.22	0.02	410.08	410.08	0
5	254.16	254.16	0.00	265.59	265.60	0.01	410.48	410.47	-0.01
6	254.06	254.08	0.02	266.05	266.05	0.00	411.01	411.01	0
7	254.43	254.43	0.00	266.10	266.12	0.02	411.25	411.25	0
8	254.84	254.81	-0.03	266.49	266.51	0.02	411.81	411.81	0
9	255.20	255.14	-0.06	266.75	266.78	0.03	412.27	412.28	0.01
10	255.26	255.20	-0.06	266.78	266.81	0.03	412.34	412.34	0
11	254.99	254.95	-0.04	266.83	266.85	0.02	412.50	412.50	0
12	254.87	254.85	-0.02	266.95	266.97	0.02	412.92	412.92	0
13	254.07	254.06	-0.01	272.98	273.00	0.02	419.72	419.72	0
14	253.41	253.40	-0.01	273.04	273.06	0.02	420.48	420.48	0

4.2 流场影响分析

以工况 4 为例,研究码头建设后工程区流场变化。在工况 4 下(上游流量和新沂河排洪均为 0),涨潮时由于码头的挑流作用,水流一部分沿码头前沿流向上游,另一部分顺着码头流向近岸,并在工程区域形成微弱回流区,见图 2。落潮时在码头上游侧分成两股,一股流向下游,一股沿码头流向近岸,且会形成微弱的回流区,但流速甚微,见图 3。流场变化基本局限在工程区附近局部位置,且变化很小。

4.3 流速影响分析

工程区流速测点布置见图 1,1~5 号测点在

工程区下游侧,6~8 号测点布置在码头前沿,9~11 号测点布置在工程区上游侧,12 号测点位于五灌河闸,13 号测点位于锦豪船厂。各工况涨落潮时的流速变化见表 3,4。

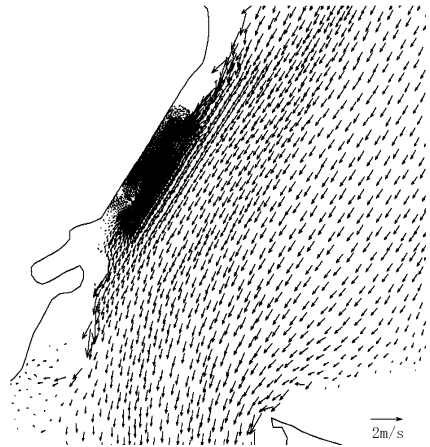


图 2 工况 4 涨急时刻流场

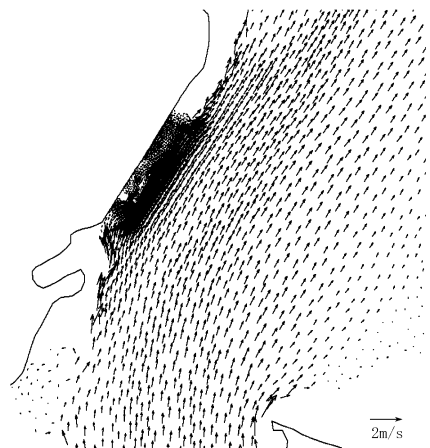


图 3 工况 4 落急时刻流场

表 3 各工况落潮时最大流速变化 m/s

测点	工况 1	工况 4	差值	工况 2	工况 5	差值	工况 3	工况 6	差值
1	0.61	0.61	0	1.65	1.64	-0.01	2.24	2.22	-0.02
2	0.75	0.74	-0.01	1.95	1.92	-0.03	2.63	2.60	-0.03
3	0.69	0.68	-0.01	1.83	1.78	-0.05	2.46	2.40	-0.06
4	0.60	0.57	-0.03	1.69	1.62	-0.07	2.28	2.20	-0.08
5	0.90	0.83	-0.07	2.36	2.24	-0.12	3.05	2.91	-0.14
6	0.56	0.55	-0.01	1.33	1.35	0.02	1.70	1.72	0.02
7	0.63	0.63	0	1.59	1.60	0.01	2.03	2.03	0
8	0.55	0.55	0	1.42	1.41	-0.01	1.79	1.78	-0.01
9	1.15	1.15	0	1.21	1.20	-0.01	1.94	1.93	-0.01
10	0.97	0.96	-0.01	1.02	1.01	-0.01	1.67	1.66	-0.01
11	1.00	1.00	0	1.05	1.05	0	1.79	1.78	-0.01
12	0.64	0.64	0	0.81	0.81	0	1.87	1.87	0
13	1.01	1.01	0	0.72	0.72	0	2.49	2.49	0

(1) 落潮时,工程区上游流速变化较小,下游变化范围在 800 m 以内。无泄洪流量时,对比工况 1 和工况 4,流速最大减小幅度为 0.07 m/s,码头前沿水域流速增加甚微;泄洪时,对比工况 2 和工况 5,流速最大

减小幅度为 0.12 m/s,流速最大增加幅度为 0.02 m/s;洪水期遭遇 50 a 一遇高潮位时,对比工况 3 和工况 6,流速最大减小幅度为 0.14 m/s,流速最大增加幅度为 0.02 m/s。

表 4 各工况涨潮时最大流速变化 m/s

测点	工况 1	工况 4	差值	工况 2	工况 5	差值	工况 3	工况 6	差值
1	1.09	1.09	0	1.28	1.27	-0.01	1.33	1.32	-0.01
2	1.17	1.17	0	1.50	1.48	-0.02	1.56	1.54	-0.02
3	1.20	1.19	-0.01	1.35	1.32	-0.03	1.40	1.37	-0.03
4	1.26	1.26	0	1.23	1.17	-0.06	1.27	1.22	-0.05
5	1.37	1.37	0	1.76	1.66	-0.10	1.83	1.73	-0.10
6	0.68	0.67	-0.01	1.02	1.03	0.01	1.06	1.08	0.02
7	0.80	0.80	0	1.23	1.23	0	1.28	1.29	0.01
8	0.77	0.77	0	1.09	1.08	-0.01	1.13	1.13	0
9	1.94	1.93	-0.01	1.15	1.15	0	1.21	1.20	0
10	1.67	1.66	-0.01	0.97	0.96	-0.01	1.02	1.01	-0.01
11	1.79	1.78	-0.01	1.00	1.00	0	1.05	1.05	0
12	1.87	1.87	0	0.64	0.64	0	0.81	0.81	0
13	2.49	2.49	0	1.01	1.01	0	0.72	0.72	0

(2) 涨潮时,工程区下游流速变化较小,上游变化范围在 400 m 以内。无泄洪流量时,对比工况 1 和工况 4,流速最大减小幅度为 0.01m/s,码头前沿水域流速增加甚微;泄洪时,对比工况 2 和工况 5,流速最大减小幅度为 0.10 m/s,流速最大增加幅度为 0.01 m/s;洪水期遭遇 50 a 一遇高潮位时,对比工况 3 和工况 6,流速最大减小幅度为 0.10 m/s,流速最大增加幅度为 0.02 m/s。

5 结语

(1) 利用三角形非结构网格建立大范围潮汐河段潮流数学模型,经过实测资料验证,可以模拟工程区域水流运动情况。针对灌河燕尾港 2 万吨级码头进行防洪影响数模研究,在工程实践中具有一定的参考价值。

(2) 码头兴建后对工程区河道的水位和流速影响均较小,流场影响局限在局部小范围地区,故对灌河的防洪影响较小。

(3) 实际应用中,可根据工程方案特点优化模型,使数模计算更合理、可靠,在防洪评价中更好的发挥作用。

参考文献:

- [1] 程晓陶. 中国防洪形势的演变与治水方略的调整[J]. 水利发展研究, 2002, (2): 1-5.
- [2] 姚汉源. 中国水利史纲要[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 耿艳芬, 王志力. 桥墩对河道水流影响的二维无结构网格模型[J]. 水利水运工程学报, 2008, (4): 78-83.
- [4] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [5] 宋志尧. 东中国海潮波系统与海岸演变模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [6] 河海大学. 连云港港灌河港区燕尾港 2 万吨级散杂货码头工程可行性研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2011.
- [7] 南京水利科学研究院. 江苏国华陈家港电厂一期工程取排水及煤码头工程泥沙物理模型试验研究[R]. 南京: 河海大学, 2007.
- [8] 南京水利科学研究院河港研究所. 灌河口河势分析和港口航道论证[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1994.

(编辑:李慧)

Study on influence of Yanweigang 20000 t terminal by Guanhe River on flood control using numerical simulation of tidal current

DOU Feng¹, LI Guochen², YANG Yao¹, BI Zhongfei²

(1. CCCC Fouth Harbour Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. College of Harbor, Costal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of large-scale water related building on flood control of the tidal reaches, taking the Yanweigang 20000 t terminal by Guanhe River as an example, the two-dimensional triangular unstructured grid numerical model is established using finite-volume method. The variation of water level, flow velocity and flow field in the project area before and after the construction is analyzed. The results show that the influence of the terminal on the water level and flow velocity in the project area is little, and the changes of flow field are restricted in small areas, so the influence on the flood control of Guanhe River is little as well.

Key words: flood control impact; unstructured grid; tidal current numerical modeling; water level; flow velocity; flow field