



徐圩港区环抱式港池最大流速研究*

张 玮¹, 耿 聪²

(1. 河海大学水运工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
2. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要: 在利用潮流数学模型对连云港徐圩港区防波堤工程方案进行比选优化时, 发现港区内涨潮最大流速是决定方案能否成立的关键指标之一。经过分析认为, 港区内涨潮最大流速与港区水域面积、防波堤口门过水断面面积有关, 此外还受涨潮潮差和涨潮历时的影响。根据潮流数学模型的计算结果, 拟合了港区内涨潮最大流速计算的经验公式, 相关性较好, 计算精度较高, 可以用于徐圩港区防波堤工程方案的初步评估。

关键词: 环抱式港池; 港区布置; 港区最大流速; 潮流数学模型; 经验公式

中图分类号: U 653.3*3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0035-05

Simulation of maximum velocity in encircled breakwater of Xuwei port

ZHANG Wei¹, GENG Cong²

(1. Research Institute for Water Transport, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: In the use of a tidal mathematical model to optimize the layout of the encircled breakwater in Xuwei port, the maximal velocity in the port area is considered as a very important index. It is found through analysis that the maximum velocity is related to the waterside area, the flow section area of port entrance, and the tidal range and last of flood tide. According to the simulation results of the mathematical model, we develop an empirical formula to calculate the maximum velocity, which can be used to estimate the design plan in preliminary evaluation.

Key words: encircled breakwater; port layout; maximum velocity in port area; tidal mathematical model; empirical formula

根据规划, 连云港的港口布局为“一体两翼”, 其中, “一体”就是目前的主港区, “两翼”分别为“南翼”的徐圩港区和“北翼”的赣榆港区。徐圩港区位于主港区以南靠近埭子口处, 属于淤泥质浅滩开敞海域, 水浅坡缓, 波浪作用明显, 水沙运动复杂。为在徐圩港区建设30万吨级航道, 达到“浅水深用”的目的, 需要布置环抱式防波堤, 防浪挡沙, 改善港区泊稳条件, 减少泥沙回淤, 降低运营成本。经过分析论证, 在一期工程中, 就应建设大环抱防波堤, 这

样可以一次形成港口布局, 减少重复建设, 节约部分工程造价。当然, 大环抱防波堤也有不足之处, 其中需要特别引起关注的就是: 在开发建设初期, 港区内的水域面积较大, 造成港内涨潮流速过高, 不利于船舶进出。经过分析, 认为港区内最大流速主要与港区水域面积有关, 可通过减少港区水域面积来达到降低流速的目的。通常可使用潮流数学模型来研究各种工程措施的效果^[1-6], 但是, 这样往往需要一定的时间, 而且还要花费一定的人力和物力。如能提供更为简单可靠的手段,

收稿日期: 2012-03-21

*基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA112509); 江苏省交通科学研究计划项目(20100714-30HDKY001-2)

作者简介: 张玮(1958—), 男, 教授, 主要从事港口航道工程研究。

比如说经验公式，预估不同方案港区内最大流速，由此对工程方案进行初步评价，则可以大大提高工作效率。

本文拟采用潮流数学模型，模拟计算徐圩港区防波堤不同布置方案港区内的涨潮最大流速，根据计算结果，分析主要影响因素，拟合经验公式，可供方案初步评估时使用。

1 环抱式方案

在进行徐圩港区防波堤起步工程方案研究时，分别考虑了“大环抱”、“中环抱”和“小环抱”等多种方案。其中，大环抱类方案6个，防波堤口门宽600~1 000 m，布置于-5 m（理论基面，下同）等深线处，进港航道为30万吨级，航道底宽360 m，航道底高程-22.5 m；中环抱类方案3个，口门布置于-4 m等深线处，进港航道与大环抱类方案相近；小环抱类方案1个，口门布置于-3 m等深线处，进港航道仅为10万吨级。作为参考，仅给出大环抱类方案中的初选方案2、优化方案1以及规划终期方案（图1~3）。

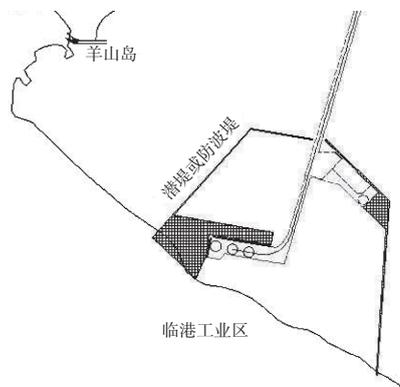


图1 大环抱初选方案2

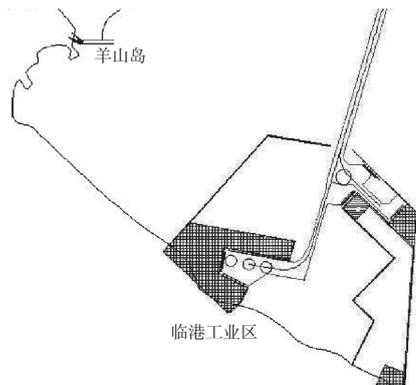


图2 大环抱优化方案1

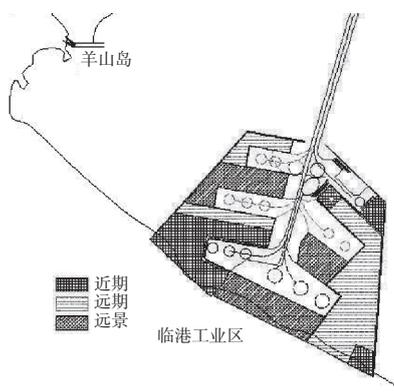


图3 规划终期方案

2 潮流数学模型

2.1 基本方程

1) 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。

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

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

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 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 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 为波流共同作用下床面剪切应力在 x, y 方向的分量。

2.2 求解方法

采用ADI算法数值求解上述方程组，也就是把每一个时间步长分成两步进行，前半步隐式计算 x 方向流速分量及潮位，显式计算 y 方向流速分量；后半步隐式计算 y 方向流速分量及潮位，显式计算 x 方向流速分量。

2.3 模型建立及求解条件

数学模型西自现有岸线，北起日照（ $35^\circ 22' 30''N, 119^\circ 33'E$ ），东至（ $35^\circ 22' 30''N, 120^\circ 17'E$ ），南至废黄河口附近（ $34^\circ 17' 00''N,$

120°17'E), 东西宽约99.7 km, 南北长约119.3 km, 模型范围内水域面积约8 648 km²。

采用矩形网格对于模型计算区域进行离散, 并利用网格嵌套法进行逐渐加密, 模型最大网格尺度为405 m×405 m, 工程区域网格尺度为15 m×15 m, 见图4。

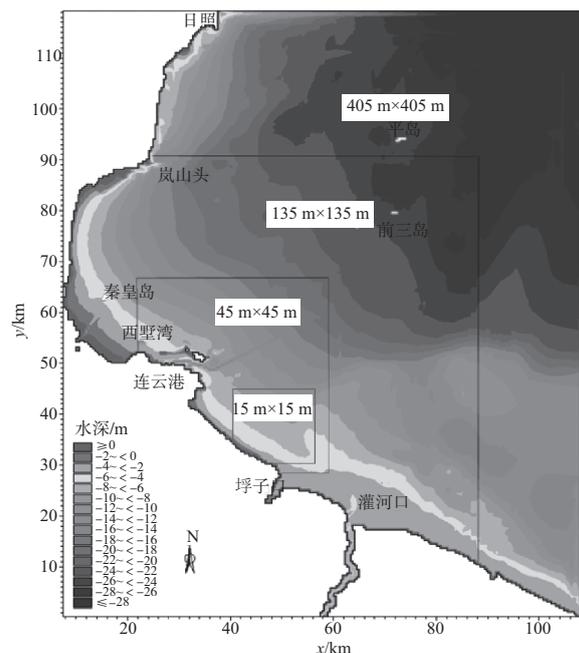


图4 连云港海域潮流数学模型范围

模型边界使用开边界(水边)和闭边界(岸边)两种边界条件。对于开边界, 由东中国海模型提供潮位过程; 对于闭边界则根据不可入原理, 取法向流速为0。此外, 还采用了干湿判别技术进行动边界处理。

计算的初始条件通过估算给出, 与实际值并不一致, 不过, 经过一定时间以后, 即使初值有一定的误差, 在计算过程中也将会随着时间而逐渐消失。

2.4 模型验证

潮流验证参见已有文献[1-2], 模型计算的潮位、流速、流向过程与实测值吻合较好, 可以用来进行方案研究。

3 单一潮型时港内最大流速

选用2005年9月实测大潮作为计算潮型, 计算了各方案工程后港内涨潮最大流速, 结果见

表1, 同时给出每个方案的港内水域面积(S_g)、口门过水断面面积(S_k)以及两者之间的比值 $K=S_g/S_k$ 。由计算结果可以看出: 在初选方案中, 大环抱类3个方案的港内涨潮最大流速较大, 可达2.37~2.53 m/s, 中、小环抱类方案的涨潮最大流速相对较小, 为1.33~2.27 m/s。显然, 大环抱类方案的港内水域面积较大, 所以其流速较大是有一定道理的, 但是, 中环抱初选方案2的港内水域面积比小环抱初选方案的要大, 但为什么其流速反而要小呢? 为了回答这个问题, 还需要关注口门的过水断面面积, 经过分析认为: 各方案的涨潮最大流速主要应与港内水域面积 S_g 与口门过水断面面积 S_k 的比值 K 有关, 也就是说, 在口门过水断面面积相同的情况下, 港内水域面积越大, 则涨潮最大流速也越大; 同样, 在港内水域面积相同的情况下, 涨潮最大流速则随着口门过水断面面积的增加而减小。

根据表1的计算结果, 可以绘出港区涨潮最大流速 v_{max} 与 $K=S_g/S_k$ 之间的关系曲线, 见图5, 并得出两者之间的回归关系:

$$v_{max} = 0.446 \frac{K}{1000} + 0.144 \quad (4)$$

式中: v_{max} 为港区内最大涨潮流速(m/s); K 为港区水域面积与口门过水断面面积比值。拟合曲线的相关系数 R^2 超过0.95, 由式(4)计算的最大流速也列在表1中, 与数模计算结果的误差大部分在10%以内, 精度较高, 可以用来进行流速的初步估算。

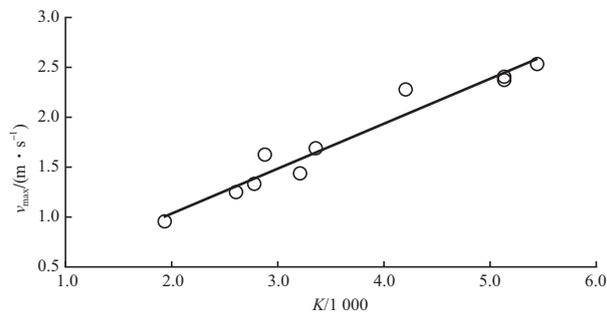


图5 单一潮型港内最大流速 v_{max} 与 K 之间关系

4 不同潮型时港内最大流速

应该注意的是, 式(4)仅仅对于2005年9月大潮是适用的, 因为其中没有包括潮差的影响。

表1 港内涨潮最大流速(2005年9月大潮)

方案	水域面积 S_g/km^2	过水断面 S_k/km^2	$K=S_g/S_k$	数模计算最大流速/($m \cdot s^{-1}$)	公式计算最大流速/($m \cdot s^{-1}$)	误差/%
大环抱初选方案1	71.8	0.013 2	5 439.4	2.53	2.57	1.6
大环抱初选方案2	67.7	0.013 2	5 128.8	2.39	2.43	1.7
大环抱初选方案3	67.7	0.013 2	5 128.8	2.37	2.43	2.6
中环抱初选方案1	51.2	0.012 2	4 196.7	2.27	2.02	-11.2
中环抱初选方案2	38.0	0.013 7	2 773.7	1.33	1.38	3.8
小环抱初选方案	20.4	0.007 1	2 873.2	1.62	1.43	-12.0
大环抱优化方案1	54.6	0.016 3	3 349.7	1.68	1.64	-2.5
大环抱优化方案2	52.2	0.016 3	3 202.5	1.43	1.57	10.0
中环抱优化方案	38.5	0.014 8	2 601.4	1.24	1.30	5.2
规划终期方案	31.4	0.016 3	1 926.4	0.95	1.00	5.6

实际上,影响港区口门涨潮流速的因素除了港区水域面积、口门过水断面面积以外,还应包括涨潮潮差、涨潮历时等因素,即:

$$v_{max}=f(\Delta H, \Delta T, S_g, S_k) \quad (5)$$

式中: v_{max} 为港内最大流速; ΔH 为涨潮潮差; ΔT 为涨潮历时; S_g 为港区水域面积; S_k 为口门过水断面面积。

参考回归公式(4),并根据量纲和谐的原则,可以假定港内最大流速为:

$$v_{max}=a\left(\frac{S_g}{S_k}\right)\left(\frac{\Delta H}{\Delta T}\right)+b \quad (6)$$

式中: a, b 为系数,需要根据数模计算结果给出。

为了研究潮差对于港区水流流速的影响,除计算了2005年9月大潮之外,又分别计算了2004年6—7月的大、中、小潮,计算结果见表2。

由表2的计算结果和图6,可以得到考虑不同潮型后的港内涨潮最大流速计算公式为:

$$v_{max}=2.231\left(\frac{S_g}{S_k}\right)\left(\frac{\Delta H}{\Delta T}\right)+0.389 \quad (7)$$

由图6可见,拟合曲线的相关系数 R^2 接近0.9,应用该式计算所得港内涨潮最大流速与数学模型的计算结果较为接近,两者之间的误差大部分在10%以内,精度较高,见表2。

表2 不同潮型港区涨潮最大流速计算结果

潮位过程	方案	涨潮潮差/m	水域面积/ km^2	过水断面/ km^2	涨潮历时/s	数模计算最大流速/($m \cdot s^{-1}$)	公式计算最大流速/($m \cdot s^{-1}$)	相对误差/%
2004年大潮	大环抱1	5.01	71.80	0.013 2	23 100	3.08	3.02	-1.9
	中环抱1	5.01	51.20	0.012 2	23 100	2.82	2.42	-14.2
	小环抱	5.01	20.40	0.007 1	23 100	1.98	1.78	-10.1
2004年中潮	大环抱1	4.84	71.80	0.013 2	23 100	2.78	2.93	5.5
	中环抱1	4.84	51.20	0.012 2	23 100	2.51	2.35	-6.3
	小环抱	4.84	20.40	0.007 1	23 100	1.76	1.73	-1.6
2004年小潮	大环抱1	3.50	71.80	0.013 2	23 100	2.06	2.23	8.1
	中环抱1	3.50	51.20	0.012 2	23 100	1.86	1.81	-2.8
	小环抱	3.50	20.40	0.007 1	23 100	1.23	1.36	10.6
2005年大潮	大环抱1	4.30	71.80	0.013 2	23 100	2.53	2.65	4.7
	大环抱2	4.30	67.70	0.013 2	23 100	2.39	2.52	5.4
	大环抱3	4.30	67.70	0.013 2	23 100	2.37	2.52	6.3
	中环抱1	4.30	51.20	0.012 2	23 100	2.27	2.13	-6.1
	中环抱2	4.30	38.00	0.013 7	23 100	1.33	1.54	15.9
	小环抱	4.30	20.40	0.007 1	23 100	1.62	1.58	-2.3

