

淤泥质海岸环抱式港池建设期的 潮流泥沙数值模拟*

丁琦

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 利用二维数值模型, 对徐圩港大环抱方案工程期间的流场和含沙量分布进行了模拟计算, 研究了口门尺度和港内布置形式对口门附近水动力特征及泥沙淤积的影响。结果表明, 港内水域面积与口门过水面积的比值决定了口门附近水动力条件的强弱, 而水动力条件则与口门附近港池、航道的淤积强度存在一定的反比例关系。在环抱式港池的建设初期, 应尽量减小港内无效水域的面积, 适当放宽口门宽度, 从而在改善口门水流条件的同时, 降低港内的淤积强度。

关键词: 徐圩港; 环抱式港池; 口门尺度; 港内布置; 水动力特征; 泥沙淤积; 二维数值模拟

中图分类号: U 653.3*3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0038-08

Numerical simulation of tidal current and sediment during construction of surrounding basin in muddy coast

DING Qi

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: A 2D numerical model is established to simulate the flow field and the sediment concentration during construction of Xuwei Harbor surrounding project. The impact of the entrance scale and the layout of the inner harbor on the hydrodynamic characteristics and sediment deposition are studied. The result shows that the hydrodynamic condition near the entrance of the surrounding basin is determined by the ratio of the area in the harbor and the cross section area of the entrance, and the sediment deposition of the waterway and the basin near the entrance is inverse proportional to the hydrodynamic condition. In order to improve the flow condition near the entrance and reduce the siltation intensity in the harbor at the initial stage of the construction of the surrounding basin, the area of the useless waters in the harbor should be reduced and the entrance should be widened appropriately.

Key words: Xuwei Harbor; surrounding basin; the scale of the entrance; the layout of the inner harbor; hydrodynamic characteristics; sediment deposition; 2D numerical simulation

环抱式港池是淤泥质海域常见的港口布置形式, 具有一次成型、便于港区布局安排的优点。由于它的口门一般设置在破波带以外, 因而能有效降低港内水域在风浪作用下的淤积, 减少港口后期维护工程量。但在建设初期, 此类港池也会存在局部水域航行条件较差、冲淤幅度较大等问

题。根据研究成果^[1-3], 一般环抱式港池淤积主要集中于口门区, 由港内、外水动力条件变化及回流产生。因这些研究主要采用经验公式计算, 无法体现口门水沙交换过程, 有一定局限性。本文选取连云港徐圩港区的大环抱方案作为研究对象, 利用二维潮流泥沙数学模型, 研究建设期各

收稿日期: 2012-09-27

*基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA112509)

作者简介: 丁琦(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事河口海岸潮流泥沙数值模拟工作。

阶段不同口门尺度、港内布置形式对其流场特征及泥沙回淤的影响, 为环抱式港区的建设提供参考。

1 数学模型的建立

1.1 模型计算范围及网格划分

模型计算范围东至东经 $120^{\circ}16'$, 北至日照港, 西侧及西南侧为陆地岸线。网格划分采用任意曲线坐标网格, 空间步长为 $30 \sim 1\,200\text{ m}$, 加密区域为航道及港区所在水域(图1)。

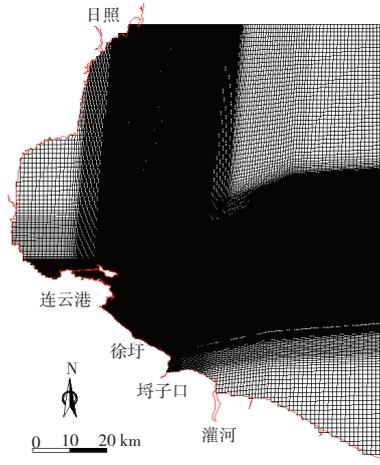


图1 模型范围及网格划分

1.2 控制方程及定解条件

连云港海域从海岸性质上属于典型的淤泥质海岸, 泥沙运动的机理为波浪掀沙、潮流输沙, 其水文要素在垂向上变化较小, 故采用任意曲线坐标下的二维潮流泥沙模型进行模拟, 其控制方程为:

连续方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (\sqrt{\alpha} H u) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (\sqrt{\gamma} H v) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\sqrt{\alpha}}{J} u \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\sqrt{\gamma}}{J} v \frac{\partial u}{\partial \eta} + a_1 u^2 + b_1 u v + c_1 v^2 + \\ \frac{g v \nabla}{c_2 H} - f(\beta u + \sqrt{\alpha} v) / J + g \left(\sqrt{\alpha} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} - \frac{\beta}{\sqrt{\alpha}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) / J = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\sqrt{\alpha}}{J} u \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\sqrt{\gamma}}{J} v \frac{\partial v}{\partial \eta} + a_2 u^2 + b_2 u v + c_2 v^2 + \\ \frac{g v \nabla}{c^2 H} + f(\beta v + \sqrt{\alpha} u) / J + g \left(\sqrt{\gamma} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} - \frac{\beta}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) / J = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma, J, a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 为坐标 x, y 函数; ξ, η 为任意曲线坐标轴线; ζ 为潮位;

u, v 分别为沿 η, ξ 法向流速分量; ∇ 为潮流流速; H 为总水深; c 为谢才系数; $f=2\omega \sin \phi$, ω 为地球自转角速度, ϕ 为所在地区纬度。

悬沙运动方程

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\sqrt{\alpha}}{J} u \frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{\sqrt{\gamma}}{J} v \frac{\partial S}{\partial \eta} = \frac{\mu \omega (S - S_s)}{H} \quad (4)$$

河床变形方程

$$\rho_0 g \frac{\partial z_b}{\partial t} = \mu \omega (S - S_s) \quad (5)$$

式中: S 为含沙量; μ 为泥沙沉降机率; ω 为泥沙沉降; S_s 为挟沙力, 在流、波浪共同作用下悬沙挟沙力 $S_s = k \frac{(|\nabla| + |v_2|)^2}{gH}$; k 为挟沙力系数; v_2 为平均波动流速; ρ_0 为泥沙干密度。

方程(1)~(4)定解条件为:

初始条件:

$$\begin{cases} \zeta(\xi, \eta, t)|_{t=t_0} = \zeta_0(\xi, \eta) \\ u(\xi, \eta, t)|_{t=t_0} = 0 \quad v(\xi, \eta, t)|_{t=t_0} = 0 \\ S(\xi, \eta, t)|_{t=t_0} = S_0(\xi, \eta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: ζ_0, S_0 为计算初始时刻潮位、含沙量空间分布函数。

边界条件:

$$\text{在水边界上} \quad \zeta(\xi, \eta, t) = \zeta_B(\xi, \eta, t) \quad (7)$$

$$\text{悬沙按入流} \quad S(\xi, \eta, t)|_r = S^*(\xi, \eta, t) \quad (8)$$

$$\text{出流} \quad \frac{\partial S}{\partial t} + u_n \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

在固边界上 $u=0$ 或 $v=0, \partial S / \partial n = 0$

1.3 计算方法

本模型采用有限差分法中的DSI法, 网格为交错网格, 变量 ζ, u, v 在网格上交错布置, 对时间微分采用前差, 对流项微分采用迎风格式, 其余空间微分均采用中心差分。离散后得到两组三对角系数矩阵, 用追赶法求解。

1.4 模型参数及验证

模型的计算时间步长为 10 s , 糙率系数取为 0.02 , 悬沙沉降机率取为 0.45 , 絮凝沉速取为 0.05 cm/s , 挟沙力系数 k 根据率定, 取为 134 kg/m^3 。

模型对2004年7月(测点位置见图2)和2005年9月的潮流场、本海域常年含沙量以及连云港7万和15万吨级主航道的实测回淤进行了验证。2004年

7月水文测验的部分验证结果见图3~4, 15万吨级主航道回淤验证结果见图5, 其余见参考文献[5]。从验证结果来看, 模型的计算精度达到了相关规范^[7]的要求。

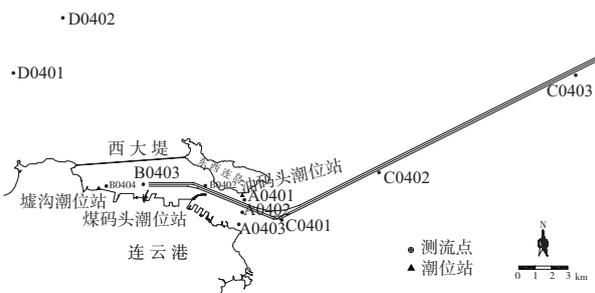


图2 2004年7月水文测点位置

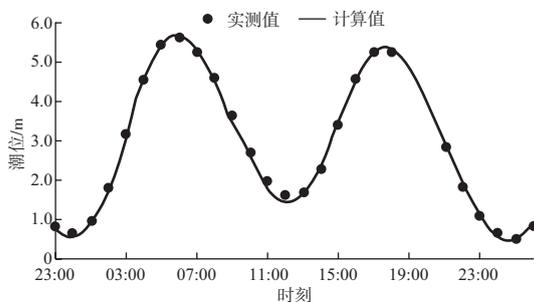
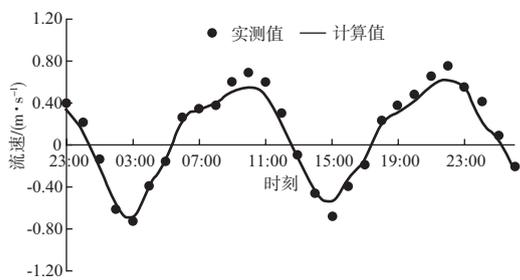
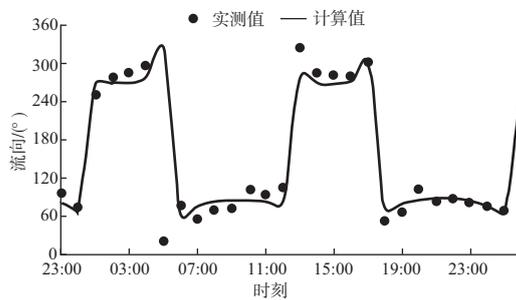


图3 油码头站大潮潮位验证结果



a) 流速



b) 流向

图4 A0401站大潮流速验证结果 (2004-07-01—07-03)

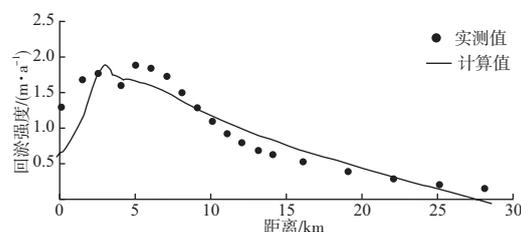


图5 连云港15万吨级主航道回淤验证结果 (2008-08—2009-08)

2 计算方案及条件

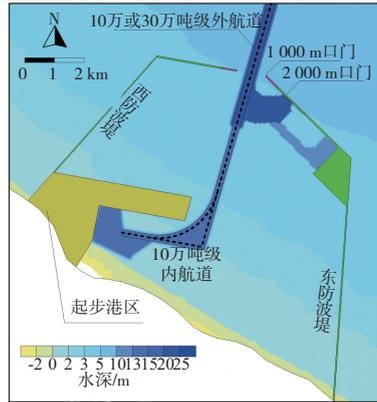
本文的研究方案, 原型选自《连云港徐圩港区详规防波堤工程预可研究》中的大环抱初选方案2、大环抱优化方案1以及规划终期方案(以下分别简称初选方案、优化方案和终期方案)。这3个方案可以看作是徐圩港大环抱港区的3个建设阶段: 初选方案在徐圩起步港区的基础上增设了东、西防波堤, 将港区口门外推至-5 m水深处; 优化方案在初选方案的基础上增加了港口陆域面积, 减小了无效水域面积; 终期方案则在优化方案的基础上充分利用了港内水域。

表1 各计算方案布置情况

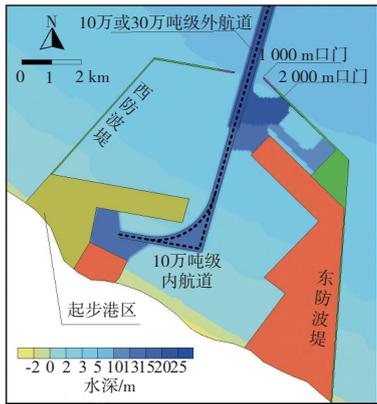
方案	口门宽度/m	口门及港外航道 吨级/万t	口门及港外航道 底高程/m	口门及港外航道 有效宽度/m	港内水域面积 A_1/km^2	口门过水面积 A_2/m^2	港内水域面积与口门过水 面积比 A_1/A_2
初选方案	1 000	10	13.3	210	66.62	10 125	6 580
		30	22.5	290	66.62	15 118	4 407
	2 000	10	13.3	210	66.38	18 025	3 683
		30	22.5	290	66.38	23 018	2 884
优化方案	1 000	10	13.3	210	50.52	10 125	4 990
		30	22.5	290	50.52	15 118	3 342
	2 000	10	13.3	210	50.28	18 025	2 789
		30	22.5	290	50.28	2 3018	2 184
终期方案	1 000	30	22.5	290	31.56	15 118	2 088

注: 口门过水面积的起算基面为徐圩平均海平面, 航道高程基面为理论最低潮面。

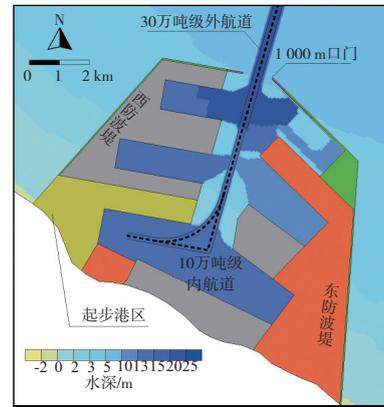
为研究各阶段口门尺度对港区水动力及泥沙淤积的影响，对前两个原型方案的布置进行一定的改变，分别配以10万和30万吨级港外航道，口门宽度也分为1 000 m和2 000 m来进行研究。各方案的具体布置形式见表1及图6。



a) 初选方案



b) 优化方案



c) 终期方案

图6 工程布置

对上述的组合方案进行水动力特性分析时，采用2004年7月1日—3日中的大潮潮型；正常天气下的含沙量及泥沙淤积计算，采用2004年7月1日—18日中的包含大、中、小潮的完整潮周期来进行重复计算，得到常年的平均含沙量及冲淤强度。

3 计算结果分析

3.1 港区附近水动力特征

各方案工程后，进出口门的潮量、口门附近的最大流速列于表2。

由表2数据可见，在一个封闭的潮周期中，进出港区口门的潮量与港内水域的面积呈现出良好

表2 各方案工程后口门进出潮量及最大流速

方案	口门宽度/m	口门航道等级/万t	A_1/A_2	进、出潮量/亿 m^3	最大流速/($m \cdot s^{-1}$)	
					涨潮期口门航道	落潮期口门航道
初选方案	1 000	10	6 580	3.10	3.35	2.23
		30	4 407	3.05	2.66	1.75
	2 000	10	3 683	3.08	1.96	1.32
		30	2 884	2.97	1.68	1.15
优化方案	1 000	10	4 990	2.23	2.71	1.77
		30	3 342	2.18	2.13	1.45
	2 000	10	2 789	1.91	1.52	1.03
		30	2 814	1.93	1.38	0.90
终期方案	1 000	30	2 088	1.42	1.29	0.84

的线性关系（图7），港内水域的面积越大，进出潮量也越大，而口门宽度及航道尺度对其影响较小。口门段航道中的最大流速则与港内水域面积 A_2 与口门过水断面面积 A_1 的比值（简称 A_2/A_1 值）存在良好的线性关系（图8），此比值越大，口门

附近最大流速也越大。其中初选方案在口门1 000 m宽、外航道为10万t的条件下，进出港内潮量最大，口门过水面积最小，因而口门附近流速最大，最大涨潮流速能够达到3.35 m/s，落潮流速也能达到2.23 m/s。

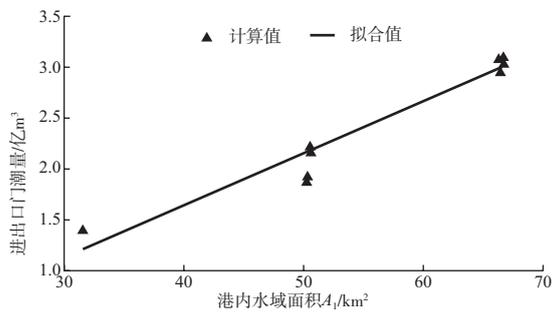
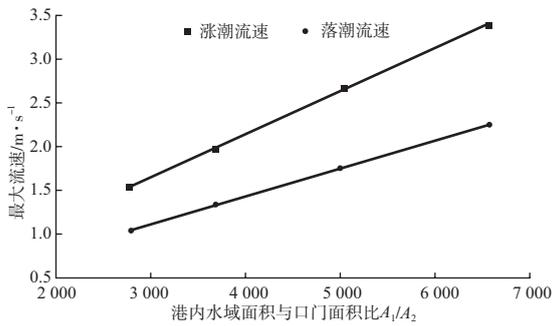
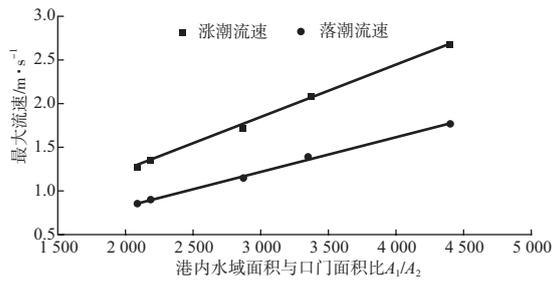


图7 港内水域面积与进出潮量对应关系



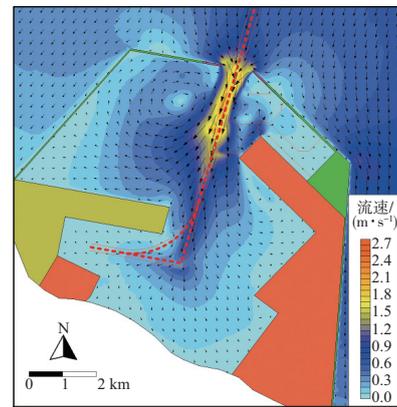
a) 10万吨级外航道口门段最大流速



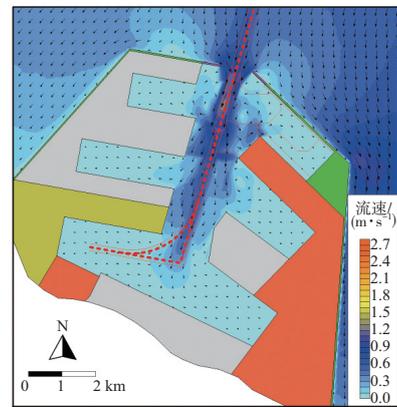
b) 30万吨级外航道口门段最大流速

图8 港内水域面积、口门过水面积之比与口门段航道中最大流速对应关系

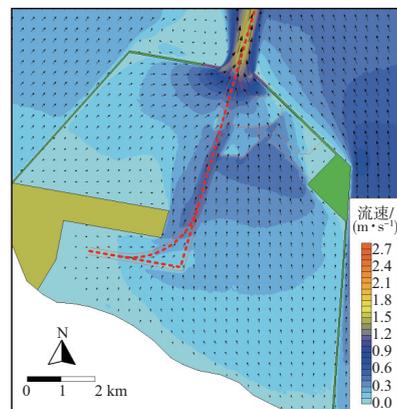
部分方案工程后的急流流场见图9。在初选及优化方案中，由于 A_1/A_2 值较大，口门附近流速较大，在涨潮时，口门内航道的两侧产生了明显的回流区，较为开阔的西侧水域回流强度较大，由



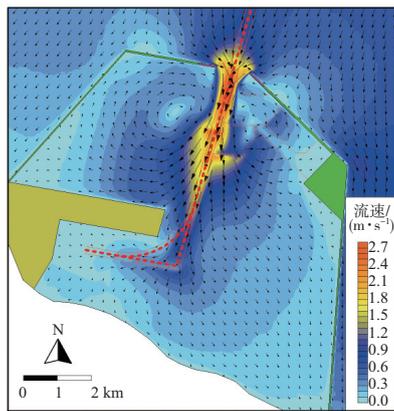
b) 涨急优选方案



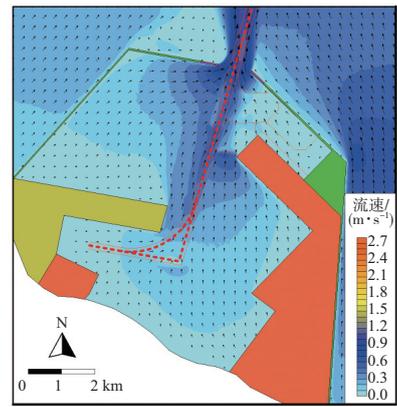
c) 涨急终期方案



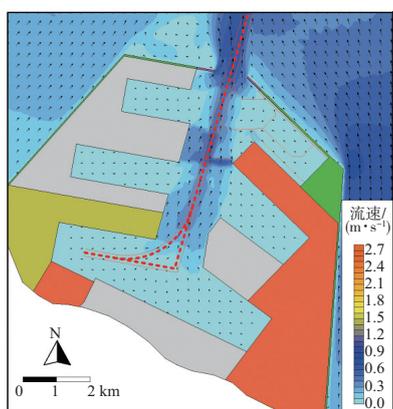
d) 落急初选方案



a) 涨急初选方案



e) 落急优化方案



f) 落急终期方案

注: 口门宽度1 000 m, 港外航道为30万吨级。

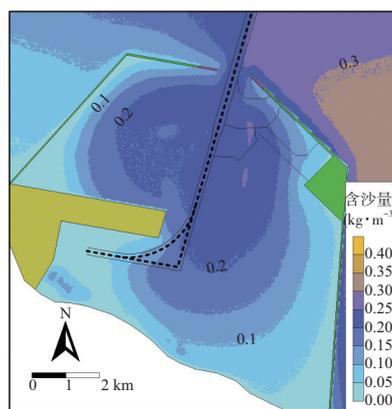
图9 工程后流场

于初选方案中 A_1/A_2 值更大, 因而回流的范围和强度也要略大于优化方案; 落潮时, 港内流态相对平顺, 无明显回流现象产生。在终期方案中, 港内水域被充分利用, 口门附近流速小于初选及优化方案, 回流现象也被显著削弱。

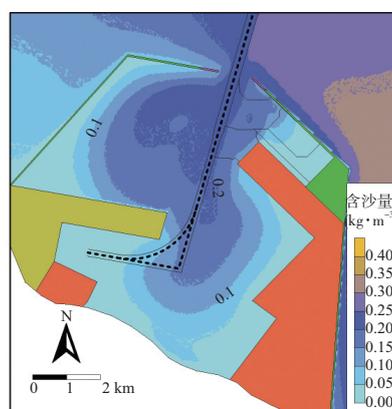
由上述分析可知, 类似于徐圩港的环抱式港池, 其口门附近的水动力条件主要取决于口门的尺度(由口门宽度和航道尺度共同决定)及港内布置形式(影响到水域面积)。由于徐圩港大环抱方案的建设规模较大, 需要分期实施, 在建设初期, 其布置形式可能接近于初选方案, 即港内无效水域的面积较大、口门航道等级较低。若在初期将口门宽度设置得较窄, 就会出现港内纳潮量较大, 而口门过水断面的面积较小的情况, 使口门附近流速偏大, 在涨潮主流的两侧易形成明显的回流区, 不利于船舶的进出港以及靠泊。而随着工程的实施, 港内的无效水域逐渐被圈围成陆, 纳潮量减小, 口门流速逐步降低、回流减弱, 对船舶正常的航行及靠泊影响不大。

3.2 港区附近含沙量分布及冲淤情况

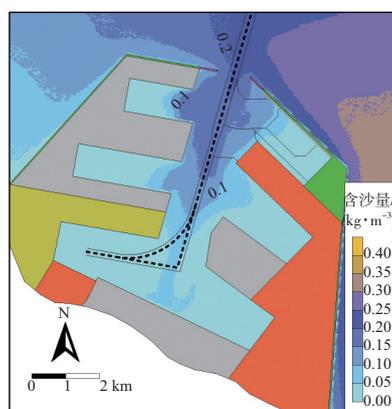
工程后港区附近年平均含沙量分布见图10。各方案中年平均含沙量分布趋势基本一致, 均由口门向港内逐步降低。口门附近含沙量的高低与水动力强弱有关, 流速越大, 对滩面泥沙冲刷能力越强, 含沙量也越高。在口门尺度相同的情况下, 由于初选方案的 A_1/A_2 值最大, 口门流速最大, 含沙量也最高, 而随港内圈围工程的实施, 口门及港内含沙量会逐步降低。



a) 初选方案



b) 优化方案

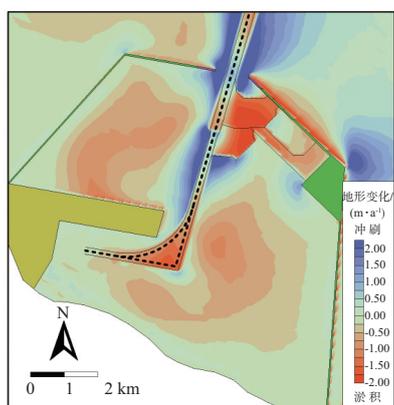


c) 终期方案

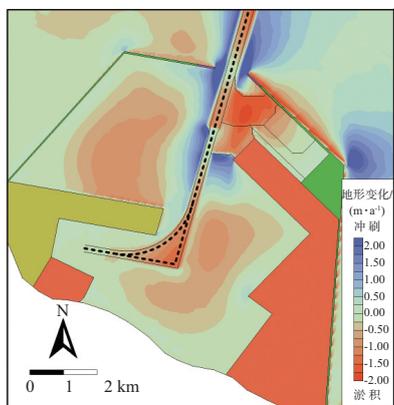
图10 工程后港区附近年平均含沙量分布

工程后港区附近常年地形冲淤变化分布见图11, 航道沿程回淤分布见图12。

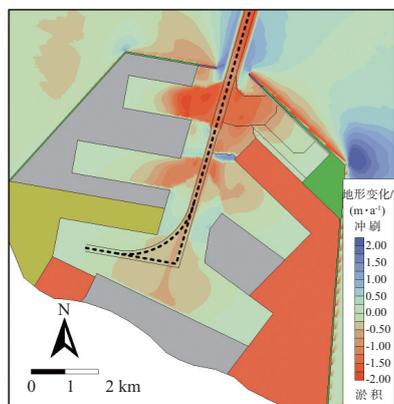
从港内冲淤分布来看, 初选及优化方案中的趋势比较接近, 产生淤积的水域主要是港池、内航道段和航道两侧的开阔滩面, 口门航道及防波堤堤角附近则存在一定冲刷。口门附近的冲淤幅度主要取决于口门水动力的强弱, 初选方案中口门流速大, 悬沙难以落淤, 航道中淤强较小甚至出现冲刷, 港池处于回流区中, 挖深大, 因而



a) 初选方案

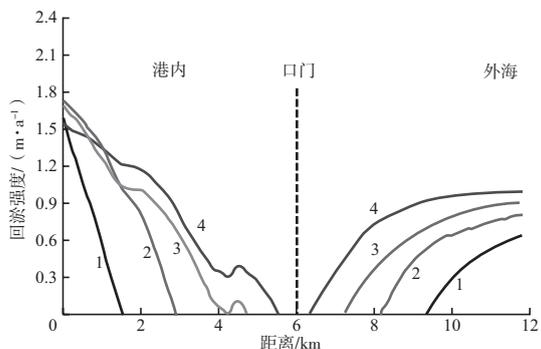


b) 优化方案



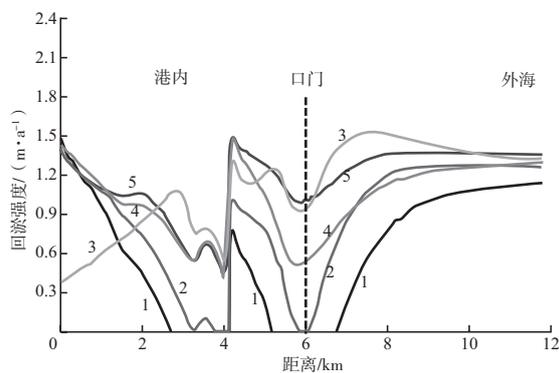
c) 终期方案

图11 工程后港区附近常年冲淤变化分布



1—大环抱初选方案(口门宽度1 km) 3—大环抱初选方案(口门宽度2 km)
2—大环抱优化方案(口门宽度1 km) 4—大环抱优化方案(口门宽度2 km)

a) 10万吨级内航道+10万吨级外航道



1—大环抱初选方案(口门宽度1 km) 4—大环抱初选方案(口门宽度2 km)
2—大环抱优化方案(口门宽度1 km) 5—大环抱优化方案(口门宽度2 km)
3—终期规划方案

b) 10万吨级内航道+30万吨级外航道

图12 航道沿程回淤分布

淤强较大；航道西北和东南侧开阔的滩面有一定程度淤积，主要由涨潮主流扩散变弱和回流的形成造成；内航道中的淤强要大于口门段，其原因在于悬沙被较强的涨潮流挟带至港内较深部位后落淤，而落潮流较弱，无法将泥沙再度掀起进入水体中并带出港外；优化方案中港内水域面积稍小，口门附近水动力稍弱，因而港内整体冲淤幅度要小于初选方案；终期方案中，港内水域被充分利用，口门水动力条件最弱，淤积分布较为规则，淤强由口门向港内逐渐减小。

可见，口门附近航道及港池的回淤强度与口门处的水动力条件强弱成反比例关系。在建设的初期，口门附近水动力条件强，泥沙不易落淤，有利于维持口门段航道的水深，但要注意避免将口门设置过窄，以防止离口门较远水域淤积的显著增大，以及因口门附近水域局部流速过大而造成不利冲刷。随着港内无效水域逐渐被圈围成陆，口门附近水动力逐步减弱，淤积强度将增加，需要注意对航道及港池进行必要的疏浚维护。

5 结论

1) 一般的环抱式港池中，港内水域面积决定了纳潮量的大小，它与口门过水面积的比值决定了口门附近流速大小、回流强弱以及含沙量的高低；而口门附近航道及港池的淤积强度则与水动力条件的强弱呈现出一定反比例关系。

2) 类似于徐圩港这样的大型环抱式港区，在分期实施的过程中，若布置不当，很可能在口门

水域出现不利于船舶航行安全的水流条件, 以及局部水域冲淤幅度较大的情况。根据本文的研究结果, 在徐圩港大环抱方案的建设初期, 应减小港内的无效水域面积, 同时适当放宽口门, 以达到改善口门附近水流条件的同时, 降低航道、港池回淤以及局部水域不利冲刷的效果。

参考文献:

- [1] 刘家驹. 海岸泥沙运动研究及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [2] 徐啸, 张镜潮. 淤泥质海岸半封闭港池回淤规律的初步研究[J]. 泥沙研究, 1993(1): 51-59.

- [3] 徐啸. 海岸河口半封闭港池悬沙淤积规律研究[J]. 泥沙研究, 1993(4): 11-21.
- [4] 曹祖德, 杨华, 张书庄. 环抱式与挖入式港池的纳潮淤积计算[J]. 水道港口, 2008(2): 77-81.
- [5] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港30万吨级航道一期工程潮流泥沙数模研究补充报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2010.
- [6] 河海大学. 连云港港徐圩港区控制性详细规划起步方案潮流泥沙数模研究[R]. 南京: 河海大学, 2010.
- [7] JTS/T 231-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规范[S].

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

(上接第37页)

#### 4 结语

1) 通过解读, 充分理解新规范, 以更好地指导工作。

2) 通过新旧规范的对比分析, 探讨新规范的变化原因。新规范在保持原规范体系和框架的同时, “节”有了增加和变化, 并总结了防波堤模型试验成果资料完善规范条款, 同时增加了专门针对深水防波堤的规范条款, 而且根据工程实践补充和完善了规范条款。

3) 通过笔者在设计实践中的经验, 针对新规范中斜坡堤堤顶高程确定问题、非砂质海底斜坡堤前的海底冲刷问题、破碎波区斜坡堤护底块石稳定性问题提出看法。

4) 新规范在设计上更加完善、明确、严格。通过2个工程实验加以分析。

5) 新规范实施时间还不长, 相信随着时间推移, 斜坡式防波堤工程实践经验将不断增加, 对于新旧规范之间比较的认知将会更加丰富。

6) 尽管新规范的修订是建立在最新的研究成果基础上的, 但鉴于防波堤稳定问题的复杂性, 不可能解决所有问题, 适应所有情况, 因此, 新规范规定防波堤结构应进行波浪模型验证是否稳定。笔者建议, 对于新规范规定程度为“可”的内容, 当波浪模型验证表明按新规范取值偏保守, 可按照模型验证取值。

#### 参考文献

- [1] JTJ 298—1998 防波堤设计与施工规范[S].
- [2] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [3] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [4] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [5] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 天津临港工业区东防波堤工程施工图设计[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2011.
- [6] 中交天津港湾工程研究院有限公司, 中交海岸工程水动力重点实验室. 天津港临港工业港区北防波堤工程结构断面波浪物理模型试验研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2012.
- [7] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 天津港大沽口港区北防波堤工程施工图设计[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2012.
- [8] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 唐山港京唐港区东南防波堤工程工程可行性研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2011.
- [9] 交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室. 唐山港京唐港区东南防波堤工程围堤断面波浪物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2011.
- [10] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 唐山港京唐港区东南防波堤工程初步设计[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)