



天津南港工业区东港池支航道回淤模拟^{*}

张 静¹, 韩 信², 孙 波²

(1. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 天津南港工业区位于渤海湾典型的淤泥质海岸, 其东港池拟建设连接大港航道的支航道。为准确预测航道的泥沙回淤状况, 通过建立波浪潮流共同作用下的泥沙运动数学模型, 选取现场实测大潮作为代表潮、以工程海域附近测波资料的能量加权平均结果作为代表波, 对邻近的天津港 15 万吨级航道年均回淤资料进行验证。在此基础上, 采用数学模型计算南港工业区海域的泥沙运动, 预测南港工业区东港池支航道的年均泥沙回淤分布。结果表明, 航道回淤主要发生在大港港区口门段与支航道前半段。

关键词: 淤泥质海岸; 航道工程; 泥沙运动; 数值模拟

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0106-05

Siltation simulation on branch channel of east basin of Nangang industry zone in Tianjin

ZHANG Jing¹, HAN Xin², SUN Bo²

(1.CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Nangang industrial zone in Tianjin is located on a typical muddy coast in Bohai Bay, and an inner branch channel connecting to the Dagang channel is proposed to be built in its eastern basin. To predict the siltation of the channel, we establish a numerical model of sediment transport coupling with wave-current interaction, choose the spring tide data measured at the site as the representative tidal and the energy-weighted average of measured wave data from nearby observation station as the representative wave, and verify the model by the annual siltation data of the adjacent 150,000-ton waterway of Tianjin Port. On the basis, we apply the numerical model to calculate the sediment transport of the sea area of Nangang industrial zone, and predict the annual sedimentation along the branch channel of the east basin. The results show that the siltation mainly occurs in the entrance section of Nangang industrial zone and the first half part of the branch channel in the east basin.

Keywords: muddy coast; channel engineering; sediment transport; numerical simulation

泥沙回淤是人工开挖航道和港口面临的普遍问题, 其淤积量与港口所处的水域环境和工程平面布局密切相关。对于淤泥质海岸开敞海域的港口而言, 波浪和潮流均对泥沙运动起着重要作用^[1]。天津南港工业区的水域范围是天津港组成部分之一的大港港区, 该港区东港池目前聚集了中石化和北京燃气两座液化天然气 (liquefied natural gas, LNG) 接收站和配套码头。作为 LNG 接

卸码头工程设计中重要组成部分, 东港池内将布置与大港航道相连接的支航道。新建支航道泥沙淤积及其分布, 直接用于评估其基建投资和运行维护成本, 是设计中的关键技术参数。

对于港内泥沙回淤的问题, 根据天津港防淤减淤的研究和实践经验^[2-3], 缩小港内浅滩面积是有效的工程措施。目前南港工业区港内水域尚存在大面积的未开挖浅滩, 其东港池内支航道的泥

收稿日期: 2021-08-02

^{*}基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407506); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(Y221015)

作者简介: 张静(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计。

沙回淤问题需要计算分析。

数学模型计算是航道泥沙淤积问题的常用研究手段,考虑波浪对泥沙的掀动作用、动力地貌加速处理等模拟技术,可显著提高泥沙运动模拟的精度和效率^[4-6]。本文在充分掌握渤海湾潮流、波浪、泥沙等资料的基础上,建立波浪和潮流共同作用下的悬沙运动数学模型,采用邻近的天津港主航道泥沙回淤资料进行验证,进而模拟预测东港池支航道的年均泥沙回淤分布。

1 航道概况

南港工业区位于渤海湾西岸,其港口部分即天津港大港港区,口门位于海图等深线 5 m 处,见图 1。目前该港区已建成 10 万吨级大港航道,有效宽度 300 m,底高程-15.0 m(当地理论基面,下同),航道长度 46 km。东港池支航道设计宽度、底高程与主航道一致,转向点在主航道 12+000 处,转弯半径为 1.725 km(5 倍 LNG 船长),从主航道交点沿支航道再至掉头圆开挖底边线的距离约 3 km。

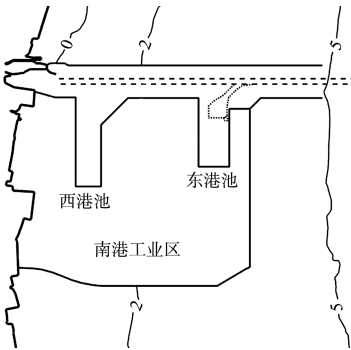


图 1 南港工业区东港池支航道布置 (单位: m)

渤海湾岸滩坡度平缓,约 1/2 000,低潮时露出宽阔的浅滩,表层分布着黏性细颗粒泥沙。根据南港工业区航道工程泥沙研究中现场海床底质采样分析^[7],附近海域表层沉积物平均中值粒径为 7 μm 左右,黏土含量占 30%~40%。《港口与航道水文规范》^[8]将底质中值粒径小于 0.03 mm 且黏土含量 25% 以上的海岸,归类为淤泥质海岸。该类型海岸的泥沙输运方式表现为“波浪掀沙、潮流输沙”特性,波浪和潮流对泥沙运动均具有显著影响。在波浪作用下,海床泥沙起动形成含

沙水体,当其跨越航道、或沿航道进入港内后,因潮流或波浪动力减弱,泥沙沉降最终形成航道、港池的泥沙回淤。

2 悬沙输移数学模型及验证

采用 Delft3D 软件建立覆盖南港工业区—天津港主港区的数学模型。通过矩形多重网格双向嵌套技术,整个模型分为天津港主港区(A)和大港港区(B)及其余部分共 3 个计算域,见图 2。外海计算域的网格边长为 250 m,A 和 B 两个港区计算域的网格边长则加密至 25 m,以保证航道、港池等局部地形的精确刻画。

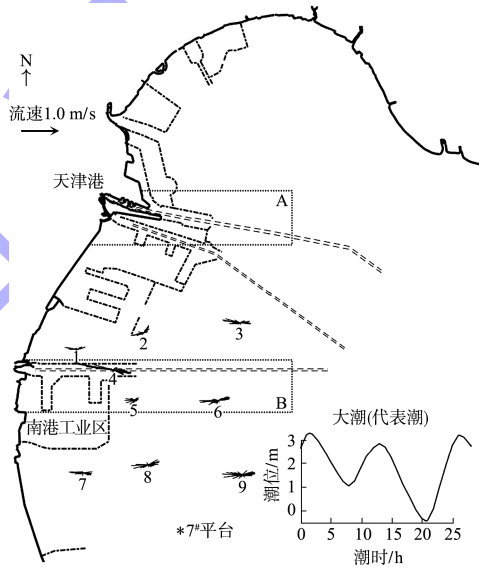


图 2 计算域范围与实测潮流潮位资料

模型以渤海湾湾口潮位过程作为外海边界条件,两个港区 A 和 B 的边界既由外向内传递驱动条件,又由内向外反馈计算结果。3 个计算域采用相同的初始条件,同时进行迭代计算,在边界上交换数据实现双向嵌套反馈的效果。

Delft 3D 中描述水流运动的基本方程为不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程。对大范围潮流的模拟,一般采用浅水假定和 Boussinesq 近似,考虑水深平均的二维计算,可满足解决工程问题的要求。基于波浪辐射应力理论,在水流运动方程中加入波浪辐射应力项^[9],以实现波浪和潮流共同作用。

泥沙运动的模拟中,考虑波浪增强临底切应力和引起紊动体现其对泥沙起动、悬浮的影响。

根据渤海湾淤泥质海岸的泥沙运动特征，计算中仅考虑悬移质输移，关键是计算水体含沙量。二维模型中含沙量求解采用以下方程：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (uc)}{\partial x} + \frac{\partial (vc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{w_s (c_e - c)}{h} \quad (1)$$

式中： c 为水深平均的含沙量； t 为时间； u 、 v 分别为水深平均的水流流速在 x 、 y 方向上的分量； $\varepsilon_{s,x}$ 、 $\varepsilon_{s,y}$ 分别为泥沙在 x 、 y 方向的紊动扩散系数，二维模型中两者取相同值； c_e 为水流挟沙能力； w_s 为泥沙沉速，对于淤泥质海岸的黏性细颗粒泥沙，一般取絮凝沉速； h 为水深。

海床地形的冲淤变化主要是水流近底切应力与底质泥沙的临界切应力相互作用的结果，表述为以下方程：

$$\frac{dh}{dt} = D - E \quad (2)$$

式中： D 、 E 分别为底床泥沙淤积量、冲刷量。黏性泥沙的淤积与冲刷源项采用 Partheniades-Krone 公式计算，其与波流共同作用的底部切应力、泥沙冲刷或淤积的临界切应力以及含沙量、沉速等参数有关。

数学模型计算中，每个时间步长内海床地形的冲淤变化实时更新，下一个时间步长的水流、波浪、含沙量则以更新的地形计算。

2.1 潮位与潮流验证

2011 年 6 月在南港工业区(独流减河口)附近海域进行了大小潮 9 点全潮水文测验，大潮潮位过程与潮流流速矢量见图 2。该海域潮汐为不规则半日潮，实测大、小潮潮差为 3.70、2.92 m。潮流整体表现为东西向往复流，涨潮历时短、落潮历时长，涨潮流速大于落潮。实测开敞海域的大潮平均流速为 0.17~0.32 m/s，最大流速为 0.46~0.72 m/s。位于大港港区口门的测点，平均流速为 0.52 m/s，最大流速为 1.36 m/s。

文献[7]对模型计算域中 3 个潮位站的大、小潮潮位、9 个测点的潮流流速进行了验证。通过调试数学模型中相关参数的设定，使计算域内潮位过程、流速流向精度能复演现场潮汐运动特征且

满足模拟技术规程要求。

在对航道泥沙年均回淤模拟中，选取此次实测大潮过程作为代表潮。因其较大的潮差和流速，相比小潮而言具有更强的动力，可以提高模型计算效率。经验证的大潮边界条件和相关模型参数也是后续泥沙运动和海床冲淤模拟的输入条件。

2.2 航道回淤验证

南港工业区于 2014 年 12 月完成 10 万吨级航道主体部分疏浚，2017 年渤西管线切改施工后航道贯通。除施工期航道测图外，没有能反映航道自然回淤的实测资料可供利用。邻近的天津港主航道回淤历经多年跟踪研究，且具有公开发表的文献[10]和[11]，故利用其作为验证目标。

泥沙数学模型采用 2003 年建成的天津港 15 万吨级主航道的淤积分析资料进行验证。该航道在此等级运行时，渤海湾沿岸尚未进行大规模开发，即图 2 中实线代表的海岸线，天津港口门位于航道 8+800 处。模型中进行航道泥沙回淤验证时，将渤海湾岸线退回至图 2 中实线，海床地形条件也恢复至大规模围填海之前。

泥沙运动模拟中的波浪条件选取南港海域东南方向约 25 km 处的 7[#]平台(位置见图 2)实测波浪资料分析结果。测波点位于 5 m 等深线附近，资料表明该海域以小周期风生浪为主。对大于 0.5 m 波高进行能量加权平均统计^[12]，年出现频率为 33.52%，波能平均波高 $H_{1/10}$ 为 1.13 m、周期 3.7 s、方向为 ENE。该波要素作为数学模型中 7[#]平台处的验证目标满足此验证结果的波浪场，则作为泥沙运动模拟的代表波浪动力条件。

泥沙数学模型的输入动力条件为以上代表潮和代表波，悬移质泥沙和底质泥沙的中值粒径均取细颗粒黏性泥沙的絮凝粒径 30 μm，由此计算得到的含沙量分布则为代表含沙量场。文献[11]分析了渤海湾大规模围填海工程前的天津港海域含沙量分布情况，结果表明港区口门位于 8+800 时的年均含沙量为 0.25~0.30 kg/m³。本文泥沙数学模型计算的含沙量场中，天津港口门含沙量约为 0.30 kg/m³，与以往分析结果相符。

天津港 15 万吨级航道全长 35 km，底宽 234 m，

底高程-15 m。根据航道建成运行后的实测和疏浚资料分析, 年均淤积峰值 2.43 m 出现在 10+000 附近(口门外 1.2 km), 见图 3, 淤积强度向外海沿程减小, 20+000 后基本没有淤积。该航道淤积资料缺乏港区口门内的数据, 根据天津港多年回淤观测资料, 港内浅滩面积缩小后, 含沙水体在进入口门后因流速和波高减小, 水体挟沙能力下降会导致大部分泥沙在口门附近沉降落淤。

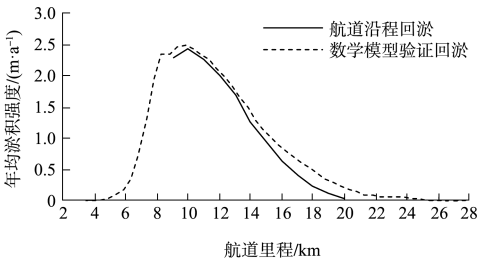


图 3 天津港 15 万吨级航道年均回淤验证

采用代表动力条件并率定各项泥沙参数后, 数学模型计算的天津港 15 万吨级航道沿程年均回淤分布见图 3 中虚线。回淤峰值位置与量值基本吻合实测结果, 外航道沿程淤积曲线能反映实测的变化特征, 计算值略大于实测值且淤积末端向外海延展范围大于实测结果。进入港区口门后的淤积曲线较短促, 能反映泥沙在口门附近集中落淤的现象。根据验证结果确定泥沙运动相关的主要验证参数, 其中沉速为 0.3 mm/s、海床的淤积临界切应力为 1 000 Pa, 冲刷临界切应力随水深增加而线性增大, 取值范围为 0.2~1.0 Pa。

3 东港池支航道回淤计算

3.1 潮流沿程分布

根据模型验证的边界条件与计算参数, 采用现有天津港各港区的港池航道布置及对应地形条件, 进行南港工业区东港池支航道的沿程回淤计算。

南港工业区海域涨潮流速大于落潮, 计算的大港航道(主航道)与东港池支航道的涨落急流速沿程分布见图 4。主航道在港区口门与支航道分汊处(即港区口门段)的涨落急流速相对较大。潮流进入支航道后, 涨落急流速均持续减小, 至掉头

圆处涨急流速已小于 0.1 m/s, 落急则更小。

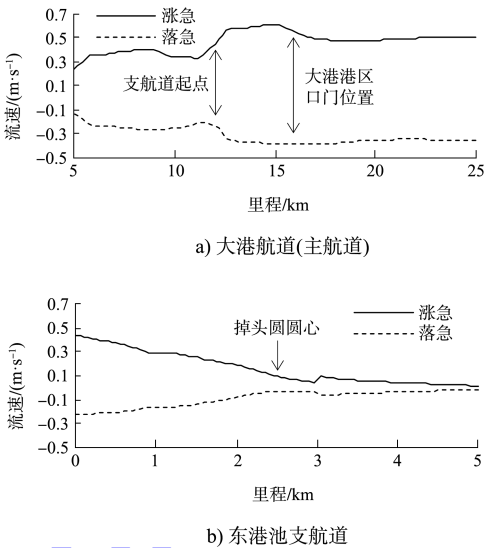


图 4 大港航道与东港池支航道涨落急流速沿程分布

3.2 含沙量与航道沿程淤积分布

模型计算的渤海湾现状平均含沙量分布见图 5。由于波浪掀沙作用, 浅水区域含沙量相对较大, 特别是南港工业区南侧近岸区域。大港港区口门位于 5 m 等深线附近, 模型计算的平均含沙量约 0.15 kg/m³, 相当于以往 2 m 等深线附近的天津港 8+800 口门含沙量的一半。现在的天津港口门含沙量则降至 0.05 kg/m³ 以下, 这反映出近岸大规模围填海以及口门外延后, 口门处含沙量下降明显, 意味着进入港内的泥沙总量减少。

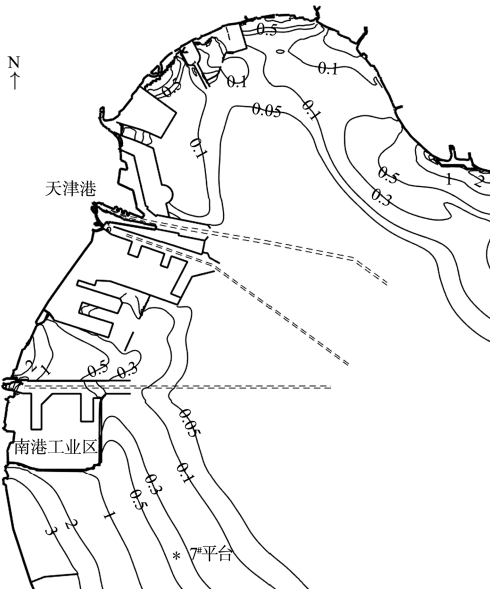


图 5 计算域内平均含沙量分布等值线 (单位: kg/m³)

大港港区主航道、东港池支航道的年均泥沙淤积沿程分布见图 6。主航道在港区口门处年均淤积强度为 1.65 m/a，在支航道分汊处达到峰值 1.77 m/a，主航道年均淤积强度然后向港内逐渐下降。支航道进入东港池后，由于潮流动力的减弱，航道沿程的年均淤积强度也快速下降，至掉头圆圆心处降至 0.51 m/a。

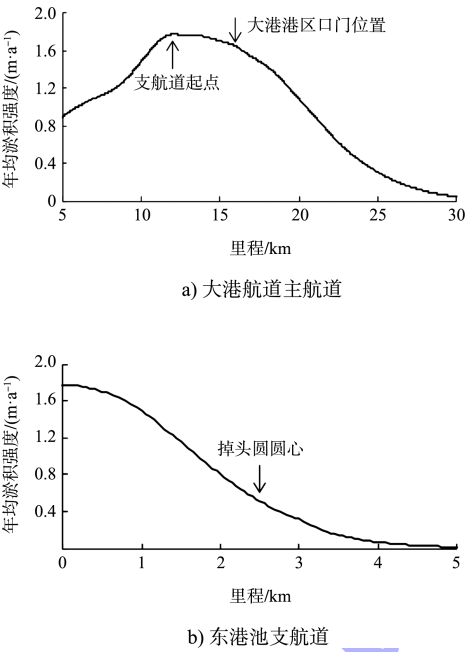


图 6 大港航道主航道和东港池支航道年均淤积强度分布

东港池支航道的年均淤积强度为 1.07 m/a，300 m 宽的航道年淤积量约为 100 万 m³/a。预测的大港港区口门段与支航道前半段的年均淤积强度超过 1.2 m/a，这是后续航道维护的重点区域。

4 结论

- 1) 考虑波流共同作用，选择代表动力边界条件和适当模型参数验证的天津港 15 万吨级航道年均回淤状况，在淤积峰值和沿程分布上均与实测资料较为吻合。模拟结果表明，近岸大规模围填海以及口门外伸后，天津港口门含沙量下降明显。
- 2) 对南港工业区主航道和东港池支航道内年均泥沙回淤的模拟结果表明，航道回淤主要发生在

港港区口门段与支航道前半段，预测年均淤积强度超过 1.2 m/a，是后续航道维护的重点区域。

参考文献：

[1] RIJN L C B. Harbour siltation and control measures[EB/OL]. (2016-05-15) [2021-08-15]. <http://www.Leovanrijn-sediment.com/papers/Harboursiltation2012.pdf>.

[2] 刘家驹. 海岸泥沙运动研究与应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.

[3] 孙连成. 淤泥质海岸天津港工程泥沙治理与功效[J]. 水运工程, 2011(1): 66-74.

[4] LESSER G R, ROELVINK J A, KESTER J A T M, et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model[J]. Coastal engineering, 2004, 51(8/9): 883-915.

[5] 匡翠萍, 钱从锐, 姚凯华, 等. 潮流与泥沙输运对黄骅港工程的响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 1516-1522.

[6] RAMAKRISHNAN B, SINGH N P, JEYARAJ S. Input reduction and acceleration techniques in a morphodynamic modeling: a case study of Mumbai harbor[J]. Regional studies in marine science, 2019, 31: 100765.

[7] 孙波, 肖立敏, 刘建军, 等. 天津港大港港区 10 万吨级航道工程泥沙回淤研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013.

[8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[9] HERMAN A. Three-dimensional structure of wave-induced momentum flux in irrotational waves in combined shoaling-refraction conditions[J]. Coastal engineering, 2006, 53(7): 545-555.

[10] 蒋睢耀, 温令平, 冯学英, 等. 天津港回淤现状与回淤规律研究[J]. 水道港口, 2000(1): 1-13.

[11] 孙连成, 张娜, 陈纯. 淤泥质海岸天津港泥沙研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.

[12] 孙波, 孙林云, 韩信, 等. 渤海湾南港工业区港池航道回淤研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 82-89.