

天津南港航道工程疏浚施工备淤深度研究

王兴博¹, 张志国¹, 孙永奎¹, 李磊²

(1. 中交天津港航建设工程有限公司, 天津 300450; 2. 中交天津港航勘察设计研究院有限公司, 天津 300450)

摘要: 以天津南港大航道项目为依托, 通过研究航道施工期间的回淤规律, 计算并推荐在施工中应预留出的备淤深度, 从而达到既能满足航道设计要求、又以最优的超挖量实现施工经济性的目的, 从实际施工效果来看具有良好的指导意义, 为今后类似工程积累了宝贵经验。

关键词: 航道疏浚; 回淤; 数学模型; 泥沙扩散

中图分类号: U 616⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0162-05

On depth reserved for sedimentation on dredging construction in Tianjin Nangang port

WANG Xing-bo¹, ZHANG Zhi-guo¹, SUN Yong-kui¹, LI Lei²

(1. CCCC Tianhang Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

2. CCCC Tianjin Port & Waterway Prospection & Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Based on Tianjin waterway project, we study the waterway siltation law during construction, and calculate and recommend the depth reserved for sedimentation during construction, so as to achieve the goal of both satisfying the requirement of channel design and realizing the economicalness of construction. The actual construction effect may serve as a guidance and provide reference for similar projects.

Keywords: waterway dredging; back silting; mathematical model; sand diffusion

施工期的泥沙淤积与自然条件有关, 更主要与航道施工工艺, 即疏浚及抛泥方式有关。本文通过考虑航道工程疏浚施工期间的影响因素, 建立数学模型, 明确关键因素, 预测回淤规律, 以便为施工留出适当的备淤深度, 实现航道施工的经济性和交验要求。

南港大航道项目, 总长度 46 km。其中 0+000~5+460 段为 5 万吨级航道, 5+460~46+000 段为 10 万吨级航道, 工程于 2013 年 5 月开始实施, 2014 年 9 月验收。

1 工程施工区段划分

1.1 绞吸式挖泥船施工区段

该区段为南港航道 11+250~12+450、13+920~20+000, 施工船舶采用绞吸式挖泥船, 整个

施工期内共有 3 艘挖泥船进行作业, 泥土处理方式方式为吹填造陆。

1.2 耙吸式挖泥船

该区段为南港航道 20+000~46+000, 分为 7 个施工区段, 共有 5 艘施工船在作业, 泥土处理方式方式为吹填造陆, 主要施工船型为带艏吹装置的大型自航耙吸挖泥船, 进行自挖自吹。吹填区位置在纳泥 I 区和纳泥 II 区。

2 施工期回淤影响因素及数学模型

2.1 施工期回淤影响因素

1) 天津南港是建立在淤泥质海岸上的港口, 泥沙的中值粒径很小, 易被掀动形成浮泥, 造成回淤。水文地质因子是引起施工期泥沙回淤风险的基础条件^[1-2]。2) 抛泥区影响。3) 挖泥船溢流

收稿日期: 2015-10-30

作者简介: 王兴博 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程技术管理。

对回淤的影响^[3]。其中第一个因素为自然回淤因素, 这个在任何阶段都存在。

南港工业区航道 20+000 以里为绞吸船施工, 20+000 以外采用耙吸式挖泥船进行施工。装舱溢流是耙吸式挖泥船常用的施工方法。船舶施工过程中, 由于扰动、溢流、洒漏等因素, 导致海水悬沙浓度增加。一般来说, 随着泥沙粒径的增加, 船舶施工溢流损失将明显减少。天津南港海域泥沙属淤泥质, 溢流对回淤的影响是不可忽略的, 特别是工期的选择与挖泥船溢流对回淤影响比其他几点影响更大。

2.2 回淤数学模型

根据已有的历史资料, 结合施工时间、船舶作业情况、施工期回淤资料, 建立新的数学模型, 使其能有效考虑施工期船舶施工溢流对回淤的影响。

2.2.1 波浪数学模型

波浪数学模型计算主要是为工程水域泥沙运动数学模型的计算提供波浪条件, 以使其更为准确地模拟波浪综合作用下的泥沙运动^[4]。波浪模型在这里主要是给泥沙运动计算提供波浪场, 采用 MIKE21 SW 波浪数学模型。该模型考虑了波浪传播中的折射、底摩擦、浅水变形、波浪破碎、非线性作用, 计算采用的是非结构三角形网格。

SW 模型控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}C_x N + \frac{\partial}{\partial y}C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma}C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

$$(C_x, C_y) = \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{C}_g + \mathbf{U} \quad (2)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla_x d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \quad (3)$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right) \quad (4)$$

式中: N 为动谱密度; t 为时间; \mathbf{x} 为笛卡尔坐标系; \mathbf{v} 为波群速度; ∇ 为微分算子; s 为波浪的传播方向; θ 和 m 为垂直于 s 的方向; ∇_x 为在 \mathbf{x} 空间上的二维微分算子; S 为能量平衡方程中的源项, 其中包括风能输入、非线性波波相互作用、白浪、底摩擦阻及破碎耗散项。

2.2.2 二维潮流数学模型

潮流数学模型采用 Mike21 系列软件中的三角

形网格水力模块 (FM 模块)。FM 模块 (Flexible Mesh) 采用无结构三角形网格, 在处理潮流边界、复杂工程建筑物边界等方面具有强大的功能, 且计算稳定性良好, 模拟结果具有较高的承认度。

控制方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (5)$$

$$\frac{\partial (h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} +$$

$$\frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (6)$$

$$\frac{\partial (h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{v}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} +$$

$$\frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (7)$$

式中: $h = \eta + d$, η 和 d 分别为水面高度和静水深; x 和 y 分别为横轴和纵轴坐标; t 为时间; g 为重力加速度; \bar{u} 和 \bar{v} 分别为沿 x 和 y 方向的深度平均流速; f 为柯氏力系数; ρ 为流体密度; ρ_0 为参考密度; S 为点源流量; u_s 与 v_s 为点源流速; T_{ij} 为应力项, 包括黏性应力、紊流应力和对流等, 根据水深平均的流速梯度计算。

2.2.3 泥沙扩散数学模型

悬沙输运扩散方程如下:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \cdot \frac{1}{h} - S \quad (8)$$

式中: \bar{c} 为垂线平均含沙量; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向的泥沙扩散系数; S 为淤积或者侵蚀项; Q_L 为单位面积的源流量; C_L 为源浓度; h 为水深。

在 2011 版本的 MIKE 软件中, 已能考虑船舶疏浚施工的影响, 一方面疏浚溢流能造成局部含沙量的增加, 另一方面一部分疏浚溢流的泥沙会落淤下来造成局部地形增加。在模型设置中, 需要给定以下输入参数: 船舶所处的位置、源强 (kg/s)、溢流率 (%)。

2.3 计算域选取及网格剖分

潮流模型计算范围: 为避免边界处的数值传

入误差，模型范围应足够大。本次研究中潮流数学模型采用大、小两层嵌套形式计算。大尺度模型计算范围为整个渤海区域，可为小模型提供潮位边界条件；小模型范围为工程局部海域，东西长约 64 km、南北宽约 81 km。各尺度模型计算范围见图 1。

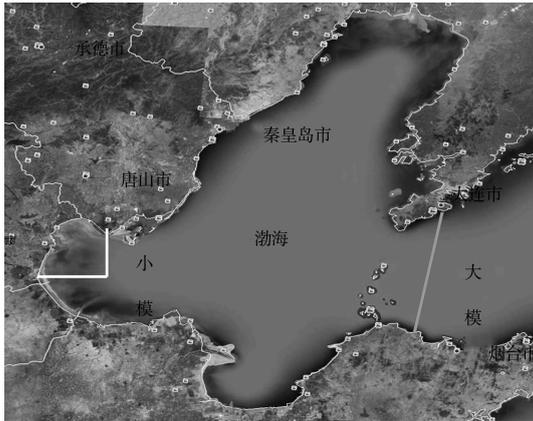
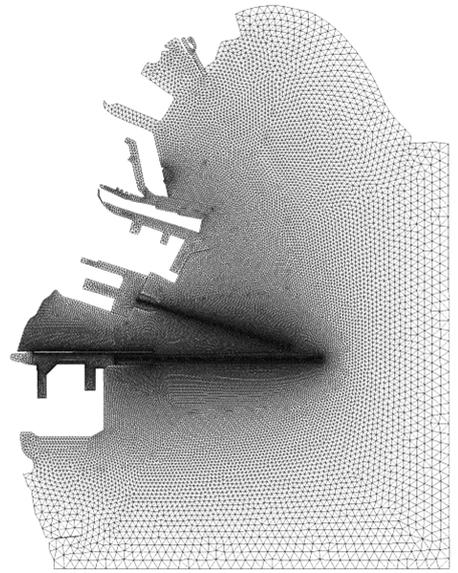


图 1 模型计算范围

计算域剖分采用无结构三角形网格。网格剖分时外疏内密，小模型开边界处相邻网格节点最大步长约 1 910 m，工程区附近网格进行了局部加密，工程网格最小步长为 30 m，各方案网格节点约 36 000 个，三角形单元约 72 000 个。图 2 为小模型的网格剖分形式。

波浪采用两层嵌套计算，嵌套模型的计算范围和网格剖分与潮流模型相同。泥沙模型计算范围和网格剖分与第 2 层潮流模型相一致。



b) 小模型

图 2 大、小模型网格剖分

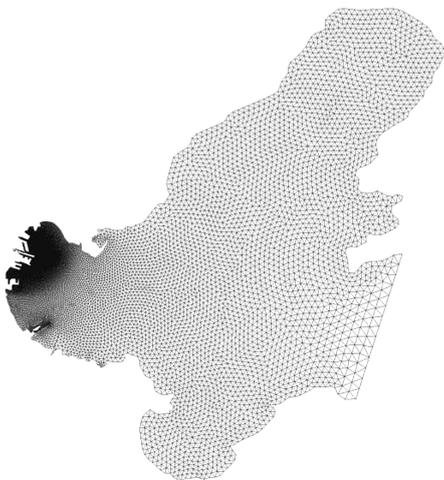
2.4 模型验证

为了满足研究问题的需要，建立了适应的波浪、潮流和泥沙数学模型，通过采用近年来现场实测水文、含沙量资料，以及相邻区域临港工业区航道回淤等资料进行验证，通过比较分析数值模拟结果与实测结果吻合良好，满足相关规范要求^[5-6]。

2.5 航道回淤预测

根据潮流泥沙数学模型，对各航道里程从疏浚完工至验收期内的回淤进行计算，以便在航道疏浚时预留适当的备淤深度，保证验收时满足设计水深要求。数模计算得到的各航道里程至验收时回淤厚度见表 1。

从表 1 可知，航道 8+000 以内完工日期距离验收日期较近，且相邻航道段早已疏浚完成，不会受到其他船舶施工影响，其淤积厚度均在 0.30 m 以内；9+000~11+000、14+000~16+000 段完工时间距离验收日期约 10 个月~13 个月，回淤厚度为 1.0~1.6 m；17+000~19+000 位于口门外，含沙量相对较高，且完工时间距离验收日期较远（14~16 个月），回淤厚度相对较大，基本接近 2.0 m；航道 20+000~24+000，回淤厚度介于 1.0~1.3 m；26+000~34+000，回淤厚度介于 0.6~1.0 m；其它航道回淤基本在 0.50 以内。



a) 大模型

表 1 航道各里程平均淤积厚度

航道里程	完工日期	截止验收时长	淤积厚度/m
4+000			0.16
5+000	2014-04-07	6 个月	0.22
6+000			0.15
7+000			0.18
8+000	2014-04-20	6 个月	0.30
9+000			1.43
10+000	2013-11-12	13 个月	1.43
11+000			1.61
12+000	2013-04-23	5 个月	0.41
13+000	2013-10-03	12 个月	1.28
14+000	2013-12-02	10 个月	1.04
15+000			1.22
16+000	2013-11-18	11 个月	1.38
17+000	2013-06-14	16 个月	2.01
18+000			1.74
19+000	2013-08-18	14 个月	1.73
20+000	2013-11-28	12 个月	1.25
20+000			1.25
21+000			1.19
22+000			1.14
23+000	2013-11-28	12 个月	1.07
24+000			1.02
25+000			1.02
26+000			0.92
27+000	2013-12-10	13 个月	0.85
28+000			1.01
29+000	2013-09-05	14 个月	0.93
30+000			0.85
31+000	2013-09-11	14 个月	0.77
32+000			0.72
33+000			0.66
34+000			0.59
35+000			0.53
36+000	2013-10-07	13 个月	0.46
37+000			0.42
38+000			0.42
39+000			0.41
40+000	2013-09-11	14 个月	0.37
41+000			0.33
42+000			0.29
43+000			0.25
44+000			0.20
45+000	2013-09-11	14 个月	0.15
46+000			0.00

3 航道备淤深度分析

本文所指的备淤深度并非是航道设计时的备淤富裕深度, 而是为了满足航道顺利验收而超挖的部分。根据计划, 部分区域在施工完成后 1 a、甚至 16 个月才验收, 此间航道势必发生回淤, 同时身处施工期, 其回淤量值可能较正常回淤大。

3.1 掩护段以里(4+000~14+000)

掩护段以里泥沙淤积有别于开敞段, 其泥沙淤积主要是口门附近悬沙在涨潮流带动下, 由外向内的逐渐落淤。其泥沙来源相对有限, 但由于是封闭水域, 施工时产生的悬沙易于在水流带动下进入航道, 造成航道淤积, 因此施工影响相对较大。根据施工期及正常回淤预报, 结合项目完工及验收时间, 备淤深度见图 3。

3.2 口门外绞吸船施工区段(14+000~20+000)

本工程掩护段以外泥沙来源主要是两侧滩面的就地泥沙搬运, 泥沙来源相对丰富。在施工期, 由于施工扰动、施工溢流等将会提供额外的部分沙源。

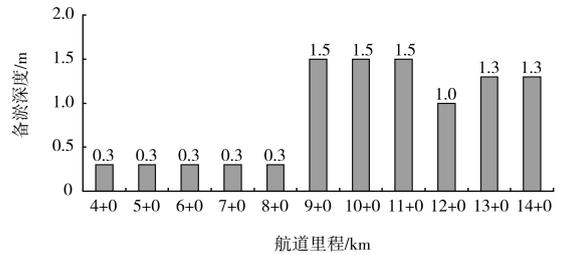


图 3 掩护段以里(4+000~14+000)备淤深度

同时根据分析, 此段绞吸式施工区段施工期回淤更接近于自然回淤状态, 结合项目完工及验收时间, 口门外绞吸船施工区段(14+000~20+000)各区段备淤深度见图 4。

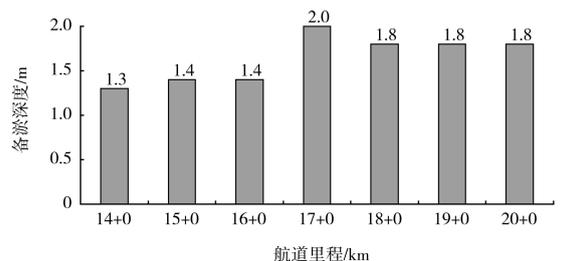


图 4 口门外绞吸式施工区段(14+000~20+000)备淤深度

3.3 耙吸船施工区段(20+000~46+000)

本工程掩护段以外泥沙来源主要是两侧滩面

的就地泥沙搬运。施工期由于施工扰动、施工溢流等会提供额外部分沙源，特别是耙吸式施工，其溢流对施工期泥沙回淤影响较大。

耙吸船施工时在航道两侧边滩会出现明显堆积体，这部分堆积体极易在风浪作用下起

并会很快回淤到航道内。而根据施工计划，该段施工结束到验收时间接近 1 a，故其备淤深度应在预测回淤厚度的基础上叠加两侧边滩堆积泥沙。口门外耙吸船施工区段建议备淤深度见图 5。

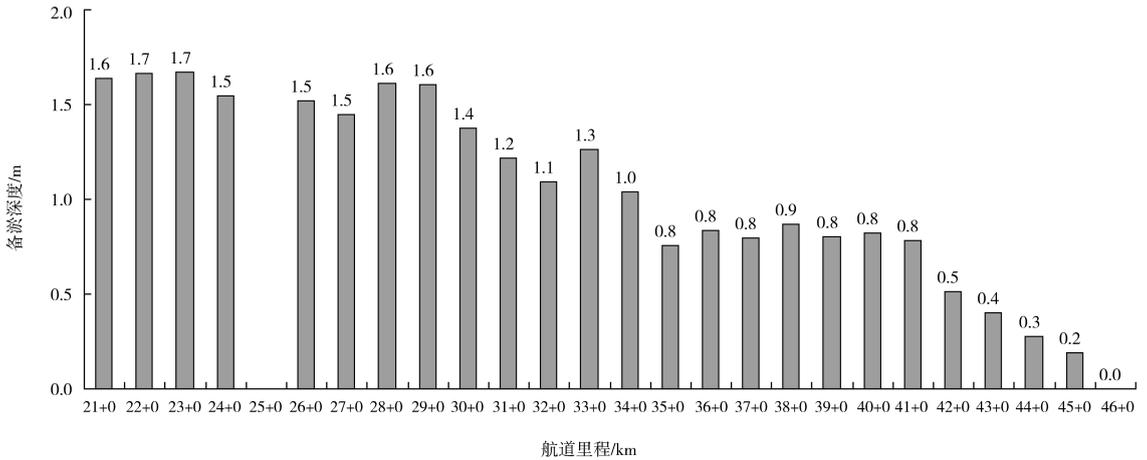


图 5 口门外耙吸船施工区段 (21+000~46+000) 备淤深度

4 结论

1) 掩护段以内泥沙淤积主要是口门附近悬沙在涨潮流带动下从外向内作用下的逐渐落淤。同时由于是封闭水域，港内施工时产生的悬沙易于在水流带动下进入航道，造成航道淤积，因此受施工影响相对较大，备淤深度应适当加大。

8+000 以内竣工至验收间隔约 6 个月，建议备淤深度为 0.3 m；9+000~14+000 之间竣工至验收间隔约 5~13 个月，建议备淤深度为 1.3~1.8 m。

2) 口门外绞吸式施工区，施工期回淤量更接近于自然回淤状态，其泥沙来源主要是两侧滩面的就地泥沙搬运，泥沙来源相对丰富。其备淤深度可参考自然回淤的预测情况。14+000~20+000 之间竣工至验收间隔约 10~16 个月，建议备淤深度为 1.3~2.0 m。

3) 口门外耙吸式施工区，其自然回淤的泥沙来源主要是两侧滩面的就地泥沙搬运。同时由于耙吸船施工，在航道两侧边滩出现明显堆积体，这部分堆积体在风浪作用下会很快回淤到航道内，其备淤深度应在预测回淤厚度的基础上叠加两侧

边滩堆积泥沙。20+000~46+000 之间竣工至验收间隔约 12~14 个月，建议备淤深度为 0~1.7 m。

参考文献:

- [1] 孙连成, 张娜. 天津港总体规划海洋动力泥沙关键技术研究[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2010.
- [2] 张娜, 孙连成. 天津南港工业区规划方案水动力泥沙及航道可行性研究[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2010.
- [3] 戴明新, 王怀义. 挖泥船疏浚扰动及扩散影响范围的试验与分析[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 1991.
- [4] 张娜. 风浪作用下黏性泥沙运动的三维数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [5] 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.
- [6] 陈纯, 孙连成. 南港工业区围海建港远期工程对周边环境泥沙的影响研究[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2009.

(本文编辑 武亚庆)