



开敞海域淤泥质深水航道 设计年回淤量计算方法及应用*

应 铭, 马兴华, 张 华, 丁 琦

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 连云港深水航道是开敞海域淤泥质浅滩深水航道的典型。航道回淤规律和实践表明, 连云港淤泥质浅滩深水航道中风天回淤量为航道回淤的主体, 占年回淤总量的60%左右。由于中风天频率年际变化较大, 导致航道年际回淤水平变幅较大。现有设计回淤量计算模式均未考虑风天分级。提出了“按小、中、大3个概化波浪动力计算回淤强度、再组合各自波浪频率得到设计回淤量”的开敞海域淤泥质浅滩深水航道设计年回淤量计算方法。该方法能够较为合理地体现全年波浪水平和波浪频率年际间差异对年回淤量的影响程度, 显著提高了设计年回淤量预报精度, 为合理确定开敞海域淤泥质浅滩深水航道的设计年回淤量水平和变化范围、正确评价航道的稳定性和技术可行性提供科学依据。经连云港区25万吨级航道和徐圩港区10万吨级航道工程实践检验, 预报回淤量与实际回淤量偏差不超过25%。

关键词: 开敞海域; 淤泥质深水航道; 航道回淤量; 波浪频率

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0114-07

The methods and application on the muddy deepwater channel siltation prediction method in the open sea

YING Ming, MA Xing-hua, ZHANG Hua, DING Qi

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

Abstract: Lianyungang port deepwater channel is the typical case of the deepwater channel of muddy shoal in open waters. Siltation law and practice show: The siltation intensity which accounts for about 60% of total annual siltation amount of middle wave day is the main part of the channel siltation. Due to obvious interannual variability of middle wave frequency, the range of siltation amount is large. Wave classification has not been considered by all existing siltation calculation mode. It is proposed innovatively that deepwater channel siltation prediction method for muddy shoal in open waters, which is “based on the siltation intensity of three generalized wave levels, gets the design siltation amount according to each wave level frequency.” The method can reasonably reflect the effect to siltation of year-round wave intensity and wave level frequency range in different years. And it significantly improves the forecast accuracy of design siltation amount. It provides a scientific basis for ensuring the deepwater channel siltation amount and range prediction, the channel stability and technical feasibility research. It had been verified by 250 000 DWT of Lianyungang port waterway and 100 000 DWT of Xuwei port waterway engineering practice. The deviation between prediction and actual amount is less than 25%.

Keywords: muddy shoal in the open sea; deepwater channel; siltation; wave frequency

收稿日期: 2016-04-05

*基金项目: 国家高技术研究发展计划课题 (2012AA112509)

作者简介: 应铭 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事航道工程设计研究。

连云港深水航道是开敞海域淤泥质浅滩深水航道的典型。航道回淤规律研究和实践表明^[1-9]:

1) 航道回淤以悬沙落淤为主, 回淤物质主要来源于附近滩面。2) 航道回淤的动力条件为浅滩波浪掀沙、潮流输沙, 航道区域流速下降导致挟沙力不足而引起悬沙落淤。3) 航道回淤沿程分布与滩面水深、航槽水深和滩槽高差具有较好的相关性, 回淤峰值区段位于常年破波带范围, 是较高含沙量水平、较大滩槽高差、与航道交角较大的横向潮流 3 方面因素造成的。4) 大风天对通航产生实质性影响的回淤强度不超过 0.3 m/次, 不存在骤淤碍航风险, 且多年平均大风天出现次数仅 1.13 次/a, 大风天回淤仅占年回淤总量的 10%; 中风天尽管回淤强度小于大风天但频率较高, 导致中风天回淤量成为航道回淤的主体, 占年回淤总量的 60%, 由于中风天频率年际变化较大, 导致航道年际回淤水平变幅较大。

目前航道设计年回淤量计算有以下 3 种模式:

1) 第 1 种模式^[10-14]: 航道设计年回淤量 = 多年平均含沙量条件下的年回淤量。2) 第 2 种模式^[15-16]: 航道设计年回淤量 = 正常天气条件年回淤量 + 大风作用下的年骤淤量。正常天气下年淤积量采用多年平均含沙量计算, 大风作用下的年骤淤量采用一定重现期大风计算。3) 第 3 种模式^[17-19]: 航道设计年回淤量 = 正常天气条件年回淤量 + “三碰头”条件回淤量。

第 1 种模式一般用于无大风骤淤问题的情况。该模式得到的预测航道年回淤量实际上是多年平均的回淤量, 未反映年际间航道回淤量的差异, 实际上, 不同年份由于自然条件变化, 航道年回淤量存在一定波动甚至是较大波动, 导致预测航道年回淤量与实际年回淤量差异较大。

第 2 种模式一般用于粉沙质海岸航道。正常天气条件下回淤强度不大, 大风天回淤强度大以至于会发生骤淤碍航问题。典型案例有黄骅港进港航道回淤计算, 采用多年平均含沙量计算正常天气年回淤量, 再计算重现期为 10 a 一遇的大风

天回淤量。该模式通过计算不同重现期大风条件下航道骤淤量, 可反映出大风条件差异对航道年回淤量的影响。

第 3 种模式一般用于河口拦门沙航道, 台风、天文大潮、洪水遭遇, 对回淤贡献很大。典型案例有长江口深水航道治理二期和三期工程回淤量预测计算, 采用多年平均含沙量计算年回淤强度, 同时计算极端条件下一次台风、天文大潮、洪水“三碰头”条件航道回淤量。

对连云港航道等开敞海域淤泥质海岸深水航道而言, 中风天尽管回淤强度小于大风天, 但频率高, 导致中风天回淤成为航道回淤的主体, 引起年际回淤量差异的主要因素是年际中风天频率的差异。由于中风天是常见天气过程, 不能采用回淤计算的第 2 种模式的重现期概念进行研究; 并且连云港海域中风天频率年际变化较大, 导致航道年际回淤水平变幅较大。现有 3 种设计回淤量计算模式均未考虑中风天回淤的问题, 不能反映出连云港港航道等开敞海域淤泥质海岸航道年回淤量的年际差异, 不能适应该类型航道回淤预报的需要。

本研究针对开敞海域淤泥质浅滩深水航道回淤规律, 提出了“按小、中、大 3 个概化波浪动力计算回淤强度、再组合各自波浪频率得到设计回淤量”的开敞海域淤泥质浅滩深水航道设计年回淤量计算方法。

1 开敞海域淤泥质浅滩航道设计年回淤量计算方法

1.1 计算模式的提出

研究开敞海域淤泥质航道设计年回淤量计算模式, 需要从淤泥质航道回淤强度计算、含沙量与动力的基本关系入手。刘家驹公式^[16]反映了基本关系:

$$P = \frac{\omega St}{\rho_0} \left\{ K_1 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 \right] \sin \theta + K_2 \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{d_1}{d_2} \left(1 + \frac{d_1}{d_2} \right) \right] \cos \theta \right\} \quad (1)$$

$$S = 0.045 \frac{\rho_s \rho}{\rho_s - \rho} \frac{(|v_1| + |v_2|)^2}{gH} \quad (2)$$

$$v_2 = 0.2 \frac{H}{d_1} C \quad (3)$$

式中： P 为航道回淤强度(m/a)； S 为平均含沙量(kg/m³)； v_1 为潮流和风吹流的合成流速(m/s)； v_2 为波浪水质点平均水平速度(m/s)。

当潮流和风吹流的合成流速较小，波浪较大时， $v_2 \gg v_1$ 。因此， $P \propto S$ (回淤强度与平均含沙量成正相关关系)， $S \propto v_2^2$ (平均含沙量与波浪水质点平均水平速度平方成正相关关系)， $v_2 \propto H$ (波浪水质点平均水平速度与波高成正相关关系)。则， $P \propto H^2$ 和 $S \propto H^2$ (回淤强度和平均含沙量与波高的平方成正相关关系)。同时，年平均波高的平方 $\overline{H^2} \neq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i^2$ (年平均波高平方不等于各级波浪波高的平方和)。故，年回淤强度 P 、平均含沙量 S 不正比于年平均波高的平方 $\overline{H^2}$ 。

因此，年平均波高不能代表年波浪条件对含沙量的影响，以及对航道回淤的贡献；未体现波浪频率年际间的变化所导致的航道回淤的动力条件和含沙量条件的变化，无法解释实际年回淤量与设计年回淤量的差异。

开敞海域淤泥质浅滩深水航道回淤主体是中浪(风)天回淤量，但中浪(风)天频率年际变化大，导致航道年际回淤水平变幅大，针对这一特点，提出以下计算模式：将波浪动力概化成小浪(风)、中浪(风)、大浪(风)3个概化波浪动力，

分别计算相应的航道回淤强度；根据历年波浪频率表，选取中浪(风)天频率较高年份、平均年份和较低年份，分别代表高、中、低3个波浪代表水平年，并统计得到3个概化波浪动力的频率；将3个概化波浪动力的航道回淤强度与频率组合得到高、中、低3个波浪代表水平年的设计回淤量(即航道设计年回淤量的高位数、中位数和低位数)及小浪(风)天回淤量、中浪(风)天回淤量、大浪(风)天回淤量。计算公式如下：

$$Q_h = Q_{1h} + Q_{2h} + Q_{3h} = SP_1 f_{1h} + SP_2 f_{2h} + SP_3 f_{3h} \quad (4)$$

$$Q_m = Q_{1m} + Q_{2m} + Q_{3m} = SP_1 f_{1m} + SP_2 f_{2m} + SP_3 f_{3m} \quad (5)$$

$$Q_l = Q_{1l} + Q_{2l} + Q_{3l} = SP_1 f_{1l} + SP_2 f_{2l} + SP_3 f_{3l} \quad (6)$$

式中： Q_h 、 Q_{1h} 、 Q_{2h} 、 Q_{3h} 分别为航道设计年回淤量高位数、高波浪代表水平年的小浪天回淤量、中浪天回淤量和大浪天回淤量(万 m³)； Q_m 、 Q_{1m} 、 Q_{2m} 、 Q_{3m} 分别为航道设计年回淤量中位数、中波浪代表水平年的小浪天回淤量、中浪天回淤量和大浪天回淤量(万 m³)； Q_l 、 Q_{1l} 、 Q_{2l} 、 Q_{3l} 分别为航道设计年回淤量低位数、低波浪代表水平年的小浪天回淤量、中浪天回淤量和大浪天回淤量(万 m³)； S 为航道面积(万 m²)； P_1 、 P_2 、 P_3 分别为小浪天、中浪天、大浪天回淤强度(m/a)； f_{1h} 、 f_{2h} 、 f_{3h} 分别为高波浪代表水平年的小浪天、中浪天、大浪天频率(%)； f_{1m} 、 f_{2m} 、 f_{3m} 分别为中波浪代表水平年的小浪天、中浪天、大浪天频率(%)； f_{1l} 、 f_{2l} 、 f_{3l} 分别为低波浪代表水平年的小浪天、中浪天、大浪天频率(%)。波浪频率取值见表1。

表1 波浪频率取值

航道设计年回淤量	f_1	f_2	f_3
航道设计年回淤量高位数 Q_h	高波浪代表水平年的小浪天频率 f_{1h}	高波浪代表水平年的中浪天频率 f_{2h}	高波浪代表水平年的大浪天频率 f_{3h}
航道设计年回淤量中位数 Q_m	中波浪代表水平年的小浪天频率 f_{1m}	中波浪代表水平年的中浪天频率 f_{2m}	中波浪代表水平年的大浪天频率 f_{3m}
航道设计年回淤量低位数 Q_l	低波浪代表水平年的小浪天频率 f_{1l}	低波浪代表水平年的中浪天频率 f_{2l}	低波浪代表水平年的大浪天频率 f_{3l}

注：高、中、低波浪代表水平年分别取中浪天频率较高、平均和较低年份。

这一模式在理论上更为合理，有以下优点：
1) 较为合理地体现了全年波浪水平对含沙量和航

道回淤的影响，克服了以往采用年平均波浪研究回淤的不足；2) 较为合理地体现了波浪频率年际

间差异对年回淤量变化的影响程度, 为解释实际年回淤量与设计年回淤量的差异提供了科学依据;

3) 可以得到小浪(风)天、中浪(风)天和大浪(风)天的回淤强度, 对于评价小、中、大浪(风)天回淤占全年的比例、破波带航段的可行性等问题具有重要意义。这一模式为合理确定开敞海域淤泥质浅滩深水航道的设计年回淤量、正确评价航道的稳定性和技术可行性提供科学依据。

1.2 计算流程

1) 概化波浪动力及频率。将波浪动力概化成小浪(风)、中浪(风)、大浪(风)3个概化波浪动力; 根据历年波浪频率表, 选取中浪(风)天频率较高年份、平均年份和较低年份, 分别代表高、中、低3个波浪代表水平年, 并统计得到3个概化波浪动力的频率。

2) 率定并计算概化波浪动力的回淤强度。采用二、三维数模或回淤计算经验公式, 根据回淤观测期波浪动力条件和实测回淤, 率定小浪(风)天、中浪(风)天和大浪(风)天回淤强度。经率定后, 计算确定拟建航道的小浪(风)天、中浪(风)天和大浪(风)天回淤强度。

3) 计算航道年回淤量。将3个概化波浪动力的航道回淤强度与频率组合, 得到中浪(风)天频率较高年份年回淤量、平均年份和较低年份的年回淤量, 作为航道年回淤量的高位数、中位数和低位数(分别代表高、中、低波浪代表水平年)及大浪天回淤量、中浪天回淤量和小浪天回淤量。

4) 根据回淤主导因素和回淤环境分析、实测水沙回淤观测数据、回淤规律与机理, 对计算成果进行合理性判断。

5) 在以上基础上, 综合确定航道设计年回淤

量的中位数(多年平均)、低位数(中浪天频率较低年份)和高位数(中浪天频率较高年份)。

2 开敞海域淤泥质浅滩深水航道设计年回淤量计算方法在连云港深水航道中的应用

2.1 概化波浪动力及频率

2.1.1 波浪动力水平的划分

将全年波浪的分级概化成小浪(风)、中浪(风)、大浪(风)3个概化波浪动力时, 参考国际波级表的分级波高, 将“小浪”定义为 $H_{1/10}$ 波高 $0 \sim 1.25$ m, “中浪” $H_{1/10}$ 波高范围为 $1.25 \sim 2.5$ m, “大浪” $H_{1/10}$ 波高大于 2.5 m。

2.1.2 中浪、大浪过程概化原则

通过对影响本海域的台风及寒潮作用过程进行分析, 概化得到一场中浪和海浪作用过程。中浪和海浪作用过程的概化遵循以下几个原则:

- 1) 波高要有较为明晰的增长、持续作用和衰减过程。中浪的持续作用过程以出现 $H_{1/10} = 1.6 \sim 1.8$ m 为起止判断标准, 大浪的持续作用过程以出现 $H_{1/10} = 2.5 \sim 3.0$ m 为起止判断标准。
- 2) 考虑含沙量随波浪动力的变化有一定的滞后性, 且形成一定的航道回淤需要滩面的持续掀沙, 因而较大波高的持续作用时间应在 6 h 以上。
- 3) 考虑数学模型对波浪过程模拟的适应性, 波浪过程的概化应使波高有较为平缓的增长和衰减过程, 同时大浪波高的增长和衰减时间应长于中浪。

2.1.3 波浪频率

根据历年波浪频率表, 选取中浪天(中风天)频率较高年份、平均年份和较低年份, 分别代表高、中、低3个波浪代表水平年, 得到3个概化波浪动力的频率(表2)。

表 2 波浪频率取值

%

档位	观测期	小浪	中浪	大浪
		$H_{1/10} < 1.25$ m	$1.25 \text{ m} \leq H_{1/10} \leq 2.5$ m	$H_{1/10} > 2.5$ m
低位数	连云港区 25 万吨级航道观测期	92.61	7.09	0.30
中位数	连云港区海洋站多年平均	89.66	9.96	0.39
高位数	徐圩港区 5 万吨级航道观测期	85.17	14.11	0.72

2.2 航道回淤的率定和验证

2.2.1 航道回淤的率定

利用二维潮流泥沙模型,对连云港港15万吨级航道、徐圩港区5万吨级航道(图1)在3种风浪条件下的回淤强度进行计算,然后采用各自回淤观测期的波浪频率进行组合,得到年回淤计算值(图2)。计算回淤强度分布与实测数据基本吻合,连云港15万吨级航道回淤强度峰值区段位于W弯段附近,徐圩5万吨级航道回淤强度峰值区段位于近岸区。

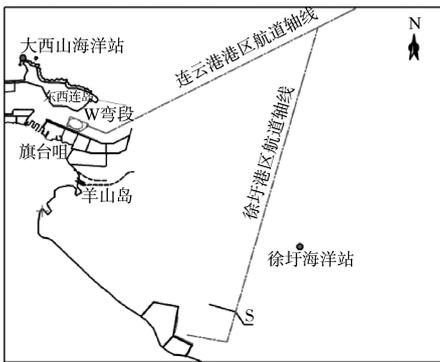
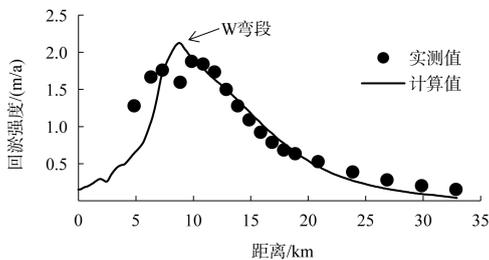
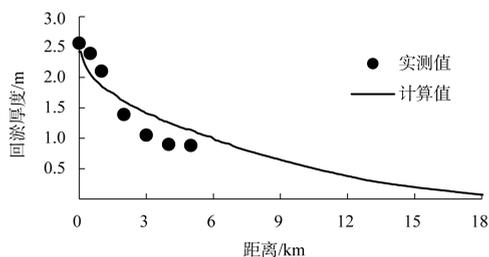


图1 连云港港航道工程位置



a) 连云港港15万吨级航道



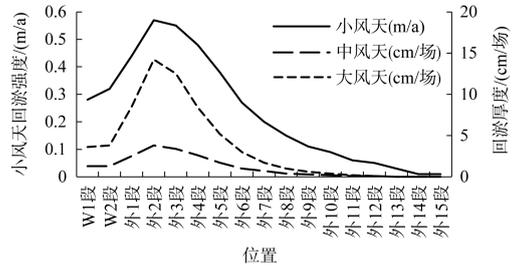
b) 徐圩港区5万吨级航道

图2 数模回淤计算率定结果

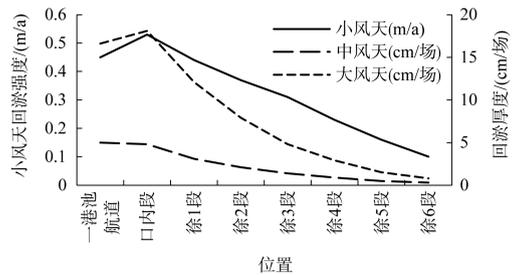
2.2.2 航道回淤的验证

利用率定后的二维潮流泥沙模型,对连云港区25万吨级航道、徐圩港区10万吨级航道在3种波浪动力条件下的回淤强度(图3)进行了计算,采用各自回淤观测期的波浪频率(表3)进行组合,

得到观测期回淤计算值(图4、5)。



a) 连云港区25万吨级航道

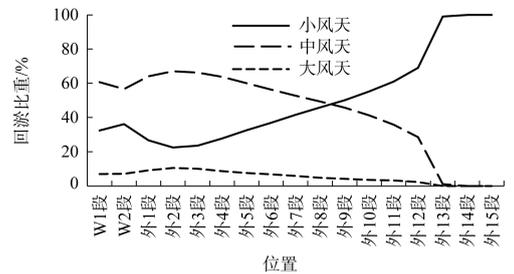


b) 徐圩港区10万吨级航道

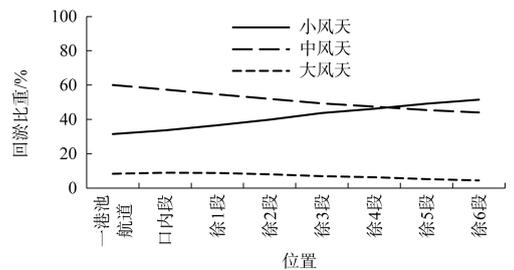
图3 连云港30万吨级航道一期工程不同风浪条件回淤强度计算结果

表3 回淤观测期间概化波浪频率 %

航道	小浪 $H_{1/10} < 1.25\text{ m}$	中浪 $1.25\text{ m} \leq H_{1/10} \leq 2.5\text{ m}$	大浪 $H_{1/10} > 2.5\text{ m}$
连云港区25万吨级航道	92.61	7.09	0.30
徐圩港区10万吨级航道	89.86	9.71	0.43

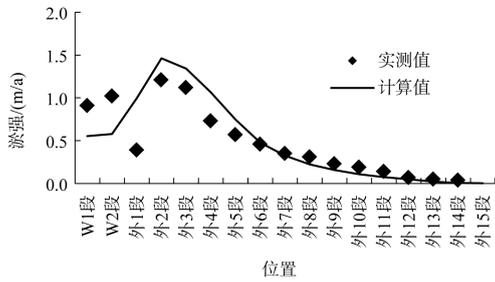


a) 连云港区25万吨级航道

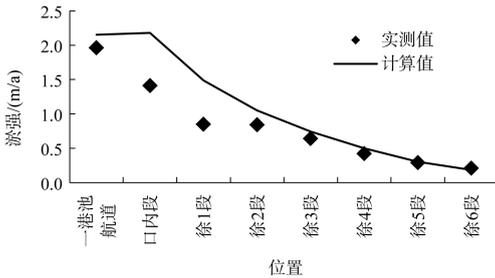


b) 徐圩港区10万吨级航道

图4 连云港30万吨级航道一期工程不同风浪条件回淤比重计算结果



a) 连云港区 25 万吨级航道



b) 徐圩港区 10 万吨级航道

图 5 连云港 30 万吨级航道一期工程回淤验证

连云港区 25 万吨级航道计算回淤量为 $537 \text{ 万 m}^3/\text{a}$, 较实测年回淤量 $515 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 约大 4%; 其中, 小浪(风)天回淤比重约 39%, 中浪(风)天回淤比重约 54%, 大浪(风)天回淤比重约 7%。年回淤强度峰值约 1.45 m/a , 其中小浪(风)天的最大回淤强度为 0.57 m/a , 一场中浪(风)过程的最大淤厚为 3.8 cm , 一场大浪(风)过程的最大淤厚为 14.2 cm 。

徐圩港区 10 万吨级航道(含一港池航道)计算回淤量为 $952 \text{ 万 m}^3/\text{a}$, 较实测年回淤量 $773 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 约大 23%; 其中, 小浪(风)天回淤比重约 19%, 中浪(风)天回淤比重约 70%, 大浪(风)天回淤比重约 11%。年回淤强度峰值约 2.18 m/a , 其中小浪(风)天的最大回淤强度为 0.53 m/a , 一场中浪(风)过程的最大淤厚为 5.0 cm , 一场大风过程的最大淤厚为 18.1 cm 。

2.3 连云港 30 万吨级航道设计年回淤量计算

在率定和验证基础上, 计算确定了连云港 30 万吨级航道二期工程航道的小浪(风)天、中浪(风)天和大浪(风)天回淤强度; 与波浪动力频率组合, 得到航道设计年回淤量的高位数、中位数和低位数(分别代表高、中、低波浪代表水

平年)。

连云港区 30 万吨级航道年回淤总量的低位数、中位数和高位数依次为 599 万、721 万和 $933 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。设计回淤量中位数年回淤强度峰值为 1.5 m/a , 其中小浪(风)天的最大回淤强度为 0.43 m/a , 一场中浪(风)过程的最大淤厚为 2.7 cm , 一场大浪(风)过程的最大淤厚为 13.0 cm 。

徐圩港区航道年回淤总量的低位数、中位数和高位数依次为 670 万、816 万和 $1\,067 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。设计回淤量中位数年回淤强度峰值为 1.15 m/a , 其中小浪(风)天的最大回淤强度为 0.37 m/a , 一场中浪(风)过程的最大淤厚为 2.0 cm , 一场大浪(风)过程的最大淤厚为 10.8 cm 。

3 结语

1) 连云港港深水航道是开敞海域淤泥质浅滩深水航道的典型。航道回淤规律研究和实践表明, 连云港淤泥质浅滩深水航道不存在骤淤碍航风险, 中浪(风)天回淤量为航道回淤的主体, 占年回淤总量的 60%, 由于中浪(风)天频率年际变化较大, 导致航道年际回淤水平变幅较大。

现有的 3 种设计回淤量计算模式均未考虑中浪(风)天回淤的问题, 不能反映连云港港航道等开敞海域淤泥质海岸航道年回淤量的年际差异, 不能适应该类型航道回淤预报的需要。

2) 本研究针对开敞海域淤泥质浅滩深水航道回淤规律, 研究提出了“按小、中、大 3 个概化波浪动力计算回淤强度、再组合各自波浪频率得到设计回淤量”的开敞海域淤泥质浅滩深水航道设计年回淤量计算方法。该模式将波浪动力概化成小浪(风)天、中浪(风)天和大浪(风)天 3 个概化波浪动力, 分别计算相应的航道回淤强度; 根据历年波浪频率表, 统计得到 3 个概化波浪动力的频率; 将 3 个概化波浪动力的航道回淤强度与频率组合得到高、中、低 3 个波浪代表水平年的设计回淤量(即航道设计年回淤量的高位数、中位数和低位数)及小浪(风)天回淤量、中浪(风)天回淤量、大浪(风)天回淤量。

3) 该方法能够较为合理地体现全年波浪水平和波浪频率年际间差异对年回淤量的影响程度,显著提高了设计年回淤量预报精度,为合理确定开敞海域淤泥质浅滩深水航道的设计年回淤量水平和变化范围、正确评价航道的稳定性和技术可行性提供科学依据。

4) 该方法应用于连云港港 30 万吨级航道一期工程连云港区 25 万吨级航道、10 万吨级航道中,与实际回淤量偏差分别为 4%和 23%。

参考文献:

[1] 顾勇,陈学良,马兴华,等.连云港港 30 万吨级航道工程预可行性研究报告[R].上海:中交上海航道勘察设计研究院有限公司,2008.

[2] 顾勇,陈学良,马兴华,等.连云港港 30 万吨级航道一期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,2009.

[3] 马兴华,顾勇,金雪英,等.连云港港 30 万吨级航道一期工程初步设计[R].上海:中交上海航道勘察设计研究院有限公司,2010.

[4] 应铭,张华,马兴华,等.连云港港 15 万吨级航道回淤观测研究[J].水运工程,2012(1): 143-147.

[5] 顾勇,马兴华,金雪英,等.连云港港 30 万吨级航道建设主要技术问题[J].水运工程,2012(4): 122-128.

[6] 顾勇,马兴华,金雪英.连云港港 30 万吨级航道二期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,2014.

[7] 马兴华,顾勇,金雪英,等.开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道总体设计关键技术研究[R].上海:中交上海航道勘察设计研究院有限公司,2014.

[8] 马兴华,顾勇,沈雪松,等.连云港港深水航道岸滩稳定性及回淤研究与实践[R].上海:中交上海航道勘察设计研究院有限公司,2015.

[9] 虞志英,陈德昌,唐寅德,等.连云港地区泥沙运移和冲淤趋势[C]//连云港建港指挥部.连云港回淤研究论文集.南京:河海大学出版社,1990: 233-241.

[10] 金缪,虞志英,陈德昌.淤泥质海岸浅滩人工挖槽回淤率计算方法探讨[J].泥沙研究,1985(2): 14-22.

[11] 刘家驹.连云港外航道回淤计算与预报[J].水利水运科学研究,1980(4): 34-45.

[12] 张玮,李醒,解鸣晓,等.连云港外海含沙量推求及航道回淤预测[J].中国港湾建设,2008(3): 1-4.

[13] 罗肇森.珠江口伶仃洋深水航道开发方案的回淤研究[J].水利水运科学研究,1995(2): 111-118.

[14] 曹祖德,孔令双.淤泥质海岸开敞航道的回淤计算[J].水道港口,2004,25(2): 59-63.

[15] 刘家驹.淤泥质、粉沙质及沙质海岸航道回淤统一计算方法[J].海洋工程,2012,30(1): 1-7.

[16] JTS 145—2015 港口与航道水文规范[S].

[17] 窦希萍.长江口深水航道回淤量预测数学模型的开发及应用[J].水运工程,2006(S1): 159-164.

[18] 陆永军,李浩麟,王红川,等.强潮河口拦门沙航道回淤及治理措施[J].水利学报,2005,36(12): 1 450-1 456.

[19] 左利钦,陆永军,李浩麟.再论甬江口拦门沙回淤及治理研究[J].水利水运工程学报,2012(6): 6-13.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 87 页)

[2] 华晓敏,周晓春,李增光,等.镇江港大港港区 2#~5#泊位码头结构加固改造工程设计[J].水运工程,2011(10): 71-75.

[3] 汪宏,田力,刘湘,等.高桩码头的结构加固改造与岸坡稳定性研究[J].港工技术,2015(1): 33-36.

[4] JTS 145—2015 港口与航道水文规范[S].

[5] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

[6] 杨荣君,秦武,沈斌,等.高桩码头结构新型加固改造方

案设计[J].水运工程,2013(10): 122-127.

[7] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].

[8] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].

[9] GB 50367—2006 混凝土结构加固设计规范[S].

[10] JTS 311—2011 港口水工建筑物修补加固技术规范[S].

[11] 黄伟.宁波港镇海港区 4#泊位改造技术经济可行性分析[D].上海:上海海事大学,2006.

(本文编辑 武亚庆)