

# 沙质海岸外航道回淤计算方法及其检验

马进荣<sup>1</sup>, 徐相波<sup>2</sup>, 刘信华<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 北海市港务管理局, 广西 北海 536000; 3. 广西交通规划勘察设计研究院, 广西 南宁 530011)

**摘要:** 开挖航道的泥沙回淤已经有相对成熟的计算公式,但各公式及其参数的选取需结合具体海域及泥沙条件而定。在沙质海岸外航道回淤计算中,应考虑底沙和悬沙两种形式的淤积。针对现有公式的理论基础及适用条件,探讨了采用组合公式进行计算的方法及可行性。采用半理论半经验公式(刘家驹公式和罗肇森公式)估算了铁山港规划方案外航道开挖后的回淤强度,比较工程竣工和历时一年半后航道地形测图,该方法预报的回淤成果符合实际,说明在沙质海岸采用刘式计算悬沙落淤、采用罗式计算底沙回淤,组合得到航道回淤强度是一种有效的计算方法。

**关键词:** 沙质海岸; 航道; 泥沙回淤

**中图分类号:** TV148

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2011)01-0066-05

沿海港口建设基本上都涉及到外航道的开挖问题,航道的选线及开挖后回淤速率是关系港口运行成本的重要因素。从泥沙性质区分港址所在海岸,有淤泥质海岸和沙质海岸,尽管港区及航道沿程的泥沙条件千差万别,利用水流和泥沙相互作用的基本理论仍然可以建立半理论半经验的航道回淤预测方法。以刘家驹、罗肇森为代表的老一辈学者分别提出了开挖航道的回淤计算方法,其中刘家驹公式<sup>[1-2]</sup>被编入《海港水文规范》,这些公式在沿海港口航道新建和扩建过程中得到了广泛应用<sup>[3-4]</sup>。各公式均有较完整的理论体系,但不同公式在同一海域计算的结果均有差别,有些差别还相当大。鉴于泥沙回淤问题的复杂性,在不同的港域应用时需遵循当地的水沙运动特点。通常认为开挖航道的回淤泥沙分悬移质和推移质两部分,但也有学者提出在风浪作用下,引起粉沙质外航道淤积的泥沙有3部分,即上部主体水流的悬移质、临底高浓度水体中的推移质和底沙中的推移质<sup>[5]</sup>。这说明在泥沙回淤机理上的认识并没有统一,推导出的公式在实际工程中不可随便套用。

在沙质海岸外航道的泥沙回淤计算中,因底沙回淤所占比例较大而不可忽略,底沙和悬沙的组合计算问题尚有待明确。本文在广西北海港铁山港区航道规划方案研究过程中,采用刘家驹公式对开挖的外航道进行悬沙回淤强度预测,采用罗肇森风浪流共同作用下的底沙输运公式计算底沙回淤,预测工程竣工及其后一年半的回淤强度。

## 1 工程区自然条件

广西沿海东部的铁山港地处北部湾东北部顶端,位于 $109^{\circ}26'00'' \sim 109^{\circ}45'00''E, 21^{\circ}28'35'' \sim 21^{\circ}45'00''N$ ,海湾形似指状,湾口朝南敞开,呈喇叭状(图1)。口门宽32 km,全湾岸线长约170 km,其中人工海岸约70 km。海湾面积约 $340 \text{ km}^2$ ,其中滩涂面积约 $173 \text{ km}^2$ <sup>[6]</sup>。铁山港潮汐属非正规全日潮<sup>[6]</sup>,没有形成独立的潮波系统,其潮波振动主要受北部湾传入的潮波所控制。在港内,全日分潮效应比半日分潮大得多,潮振幅分布

收稿日期: 2010-05-07

基金项目: 海岸灾害及防护教育部重点实验室开放研究基金(200807)

作者简介: 马进荣(1971-),男,江苏高淳人,高级工程师,主要从事河口海岸水动力、水环境及工程泥沙研究。

E-mail: jirma@nhri.cn.

由湾口向湾顶逐渐递增.该港1年中约有60%的时间为1天1次潮,其余时间为1天2次潮.潮汐日不等现象相当显著,此外,还有月不等、年不等现象<sup>[6]</sup>.

工程海域潮差为华南沿海最大区域之一.据石头埠多年资料统计,平均潮差2.45 m,最大潮差6.25 m.平均涨潮历时在13~16 h之间,平均落潮历时为9~12 h,最高潮位6.31 m(理论最低潮面),最低潮位-0.09 m<sup>[7]</sup>.由于涨潮历时大于落潮历时,因此落潮流速一般大于涨潮流速.铁山港主要日分潮椭圆长轴方向与水道走向一致,为S-N向,旋转率在0.03~0.32之间,为逆时针方向旋转.潮流的运动形式,属往复流性质.铁山港沿岸没有实测波浪资料,海域受到东部雷州半岛的掩护,波浪相对较弱.

由于铁山湾及其周围海岸无大河注入,地表径流输送泥沙的作用微弱,海区水体含沙量仅为0.001~0.010 kg/m<sup>3</sup>,2005年5月水文测验表明,各垂线平均含沙量为0.009~0.012 kg/m<sup>3</sup>.铁山湾水域沉积物以较粗的砂质物占优势,海湾北段潮流槽分布有砾砂、中砂、中细砂、砂等;两侧浅滩以细砂为主,仅南部浅滩为粗中砂或砂.东槽及两侧浅滩为砂、细中砂、中细砂、粗中砂、中粗砂和砾砂等.西槽自北向南,分布着砾砂和细砂.大牛石西南的边缘沙坝,自岸向海依次分布着砾砂、粗砂、中粗砂和中砂.落潮三角洲东南部较深水域和丹兜港南侧外海分布着粉砂质砂、黏土质砂、中细砂、砂和砂-粉砂-黏土等物质,是细粒沉积物含量较高的区域.

2006年1月13日工程海域沿航道及两侧底质调查表明,近岸区泥沙相对较粗,外侧深水区逐渐细化.航道G点以北底质中径一般在0.3 mm以上,最粗采样中值粒径达0.7 mm,也有个别点的中径为0.007 mm;G点至C点之间包括原航道两侧滩地水域,底质中径一般在0.2~0.5 mm之间;中间沙附近底质较粗,中径在0.7 mm左右;B点以南底质逐渐变细,航道两侧绝大部分采样点的中径在0.2 mm以下,航道中有较细泥沙,中径在0.012 mm左右.

## 2 工程方案简介

铁山港港口建设方案包括航道建设工程方案和铁山港总体布局规划方案,拟先建设外航道,外航道在北海电厂航道基础上升级而成.航道工程方案由广西交通规划勘察设计研究院提供(2006年2月,见图1).航道建设首先实现5万t级标准,然后分阶段实施港域布置并对航道作相应的浚深与拓宽,航道先后达到10万t和15万t级标准.实现5万t级航道需开挖ABC段,浚深至-11.5 m,航道宽160 m.该段航道于2006年6月竣工,竣工后进行了地形观测,1年半后(2007年12月)又进行了地形检测.

## 3 开挖航道回淤预测

本文回顾2006年3月完成的航道回淤预测和现场回淤对比,评价沙质海岸外航道开挖回淤计算公式的适用性.铁山港外航道ABC航段升级至5万t级时,挖深幅度不大,其中A点附近及BC段无需开挖,AB段内开挖区的平均开挖深度相对较小(约2 m).因水深改变幅度不大,流速变化也相对较小,仅在开挖区段及附近稍有变化,流速变化值一般仅1 cm/s左右.

刘家驹的开挖航道回淤估算公式虽然是在淤泥质海岸试验、推导、检验下确定的,但公式的推导理论基础在沙质海岸并没有被破坏.刘家驹认为引起海岸工程泥沙淤积的3个前提条件分别是:第一要有泥沙;第二要有产生泥沙运动的水流动力;第三要有促使泥沙淤积的环境.在沙质海岸上述3个条件也同样具备:沙质海岸近岸水体中同样存在悬移质泥沙,悬沙粒径依然很细,与淤泥质海岸水体的悬沙粒径没有显著差别;

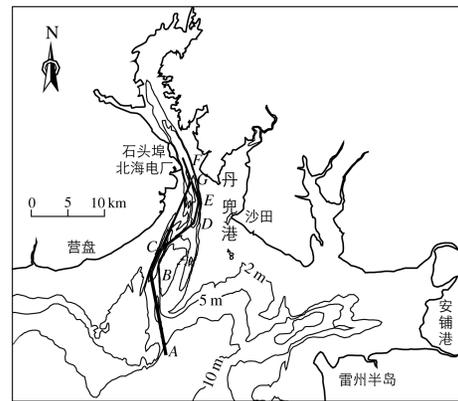


图1 铁山湾示意图

Fig.1 Sketch of Tieshan bay

沙质海岸开挖航道引起的水流动力减弱形成了水体中悬沙在航道的落淤环境. 水体中悬移质泥沙、水流运动及航道工程的相互关系, 淤泥质海岸与沙质海岸并没有本质差别, 存在差别的主要是水体中泥沙与床面泥沙的交换, 沙质海岸床面泥沙补给水体悬沙的沙源相对较少, 再悬浮的几率与淤泥质海岸可能有所差别, 这将在风浪引起的水体含沙量修正中得到体现. 刘家驹推导开挖航道淤积计算公式时将水流输沙在航道的淤积概化为横越航道引起的淤积和顺沿航道引起的淤积, 推导过程中应用到的含沙量、水深、流速等主要变量, 与底床为沙质或是淤泥质并无直接联系, 底床泥沙粒径对水流的作用体现在水流阻力项, 这一影响可以体现在水流流速的计算中, 对淤积机理并不影响. 因此, 2006年3月研究<sup>[8]</sup>时, 航道悬沙回淤强度预测计算采用刘家驹公式<sup>[1-2]</sup>如下:

$$P = \frac{\omega ST}{\gamma_0} \left\{ k_1 \left[ 1 - \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^3 \right] \sin\theta + k_2 \left[ 1 - \frac{V_2}{2V_1} \left( 1 + \frac{H_1}{H_2} \right) \right] \cos\theta \right\} \quad (1)$$

式中:  $P$  为  $T$  时段内的悬沙淤积强度 (m);  $\omega$  为细颗粒泥沙的絮凝沉降速度 (取 0.000 5 m/s);  $S$  为浅滩水体的平均含沙量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $T$  为淤积历时 (s);  $\gamma_0$  为淤积物的平均干密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 采用中值粒径关系式计算,  $\gamma_0 = 1\ 750 D_{50}^{0.183}$ ;  $k_1, k_2$  分别为横流和顺流淤积系数, 在缺少现场资料的情况下, 可分别取为 0.35, 0.13;  $H_1, H_2$  分别代表浅滩平均水深和工程开挖后水深 (m);  $V_1, V_2$  分别为工程前后的流速 (m/s);  $\theta$  为航道轴向与水流流向之间的夹角.

$$\text{含沙量修正计算公式为:} \quad S = K \frac{(|V_{td}| + |V_w|)^2}{gH_1} \quad (2)$$

式中:  $K$  为当地含沙量系数, 与淤积物、潮流动力及波浪动力等有关, 根据黄建维<sup>[9-10]</sup>、辛文杰<sup>[7,11]</sup>等的研究, 工程区  $K$  值约为 12 ~ 30;  $V_{td}$  为潮流与风吹流的合成速度;  $V_w$  为波浪水质点平均水平速度. 风浪引起水体含沙量的变化与海域具体位置有关, 一般近岸水浅, 波浪作用到底部的概率相对大于深水区, 因此浅水体的含沙量系数  $K$  一般大于深水区. 在沙质海岸应用时,  $K$  值依据实测资料确定, 不宜直接套用刘家驹在淤泥质海岸获得的经验系数值 ( $0.027\ 3\gamma_s = 72.345$ ).

工程海域多年平均风速约 5.0 m/s, 多年平均波高 0.67 m. 采用式 (2) 计算多年平均含沙量, 根据 2005 年 5 月实测资料推算式 (2) 的系数  $K$  (假定测量期无风浪影响). 涨潮时  $K$  约为 9.04, 落潮时  $K$  约为 5.48, 全潮平均为 7.26. 计算得到考虑平均风浪因素条件下的多年平均含沙量为  $0.027\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 该含沙量约为实测含沙量的 2.5 倍.

沙质海岸滩面泥沙的含泥量明显少于淤泥质海岸, 泥沙运动形式并非以悬移运输为主, 底沙输移不可忽略, 需补充底沙运动引起的淤积. 底沙回淤强度预测采用罗肇森的风、浪、流共同作用下近底泥沙输沙率公式<sup>[12]</sup>:

$$q_{sb} = \frac{K_b}{C_0} \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} (u_{b\max} - u_c) \frac{u_b^2 V_m}{g\omega} \sin\theta \quad (3)$$

式中:  $q_{sb}$  为近底泥沙单宽输沙率;  $C_0$  为无量纲谢才系数;  $\gamma_s$  和  $\gamma$  分别为泥沙和水的重度;  $u_{b\max}$  和  $u_b$  分别为波浪垂线平均的最大轨道速度和平均轨道速度,  $u_b = \frac{2h}{T} \left[ 1 + 4.263 \left( \frac{H}{L} \right)^{1.692} \right] \frac{1}{\sinh(2\pi H/L)}$ ,  $u_{b\max} = \pi u_b / 2$ , 其中,  $h, T, L, H$  分别为波高、周期、波长和水深;  $u_c$  和  $\omega$  分别为泥沙起动流速和泥沙沉降速度,  $u_c = \left( \frac{H}{d} \right)^{0.14} \left( 17.6 - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + H}{d^{0.72}} \right)^{1/2}$ ,  $\omega = \sqrt{\left( 13.95 \frac{\nu}{d} \right)^2 + 1.09 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d - 13.95 \frac{\nu}{d}}$ ,  $\nu$  为水的运动黏滞系数,  $d$  为泥沙粒径 (mm);  $V_m$  为波浪传质速度  $u_t$ , 潮流速度  $u_d$  和风吹流速度  $u_w$  的合成速度,  $u_t = \frac{1}{2} \pi^2 \frac{h^2}{LT} \left[ 1 + 57.04 \left( \frac{H}{L} \right)^{2.21} \right] / \sinh^2 \frac{2\pi H}{L}$ ,  $u_w = 0.03W$ ,  $W$  为风速,  $u_d$  取数学模型计算的平均流速;  $\theta$  为  $V_m$  方向与计算区域 (港池或航道) 轴向的夹角;  $K_b$  为综合系数,  $K_b = (0.12 \sim 0.18) d^{0.365}$ , 当  $K_b$  计算值大于

0.10 m时,取0.10。当泥沙粒径较大时,底沙输沙作用引起的淤积强度大于悬沙。

铁山港外航道2007年12月测图范围为AB段全部和BC段局部(约900 m航段),对比竣工后测图,绘制AB段两次地形的差值等值线见图2,淤积0.10 m的等值线与冲刷0.10 m的等值线交错分布,淤积分布范围略大于冲刷分布。统计得到AB段实际回淤总量为 $12.03 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,折算为1 a的回淤量为 $8.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,AB段年平均淤积强度为0.045 m/a。

悬沙回淤计算时沿航道轴线每1 km取1采样点,底沙回淤计算时沿航道两侧每1 km各取1采样点。表1列出了航道沿程计算结果,平均悬沙淤厚和平均底沙淤厚分别为0.026和0.021 m,进一步得出AB段常年回淤强度为0.047 m/a,与实测值非常接近,说明采用的回淤计算方法有效,可在沙质海岸外航道建设中推广应用。

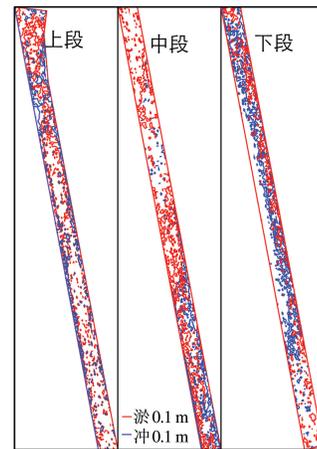


图2 外航道实测淤积强度分布  
Fig.2 Measured siltation distribution in offshore waterway

表1 航道泥沙回淤计算结果

Tab.1 Calculated siltation in waterway

距A点距离/ km	床沙中值粒径/ mm	开挖幅度/ m	工程前流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	工程后流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	悬沙淤厚/ m	底沙淤厚/ m
0	0.168	0.0	0.43	0.43	0.000	0.000
1	0.168	-1.4	0.36	0.36	0.029	0.000
2	0.178	-2.8	0.33	0.33	0.050	0.000
3	0.178	-3.2	0.33	0.32	0.059	0.000
4	0.182	-2.6	0.35	0.35	0.048	0.001
5	0.182	-1.1	0.37	0.37	0.023	0.000
6	0.180	0.0	0.41	0.42	-0.001	0.095
7	0.180	0.0	0.43	0.44	-0.001	0.007
8	0.189	-2.6	0.46	0.44	0.035	0.009
9	0.189	-2.6	0.50	0.48	0.033	0.032
10	0.198	-2.0	0.53	0.51	0.028	0.075
11	0.135	-0.4	0.52	0.52	0.008	0.035

## 4 结 语

铁山港外航道工程实施1年半后的回淤监测成果证明本文采用的沙质海岸开挖外航道回淤计算方法有效。沙质海岸外航道开挖后的回淤计算应分为悬沙回淤和底沙回淤分别计算,悬沙回淤可采用刘家驹公式计算,底沙回淤可采用罗肇森公式计算。悬沙回淤计算时应采用风浪修正后的代表年均含沙量,公式中的横流和顺流淤积系数宜采用规范推荐值。

## 参 考 文 献:

- [1] JTJ 213-98, 海港水文规范[S]. (JTJ 213-98, Code of hydrology for sea harbour[S]. (in Chinese))
- [2] 刘家驹, 张镜潮. 淤积质海岸航道、港池淤积计算方法及其应用推广[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1994. (LIU Jia-ju, ZHANG Jing-chao. Siltation prediction for navigation channels and harbour basins on muddy beach[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994. (in Chinese)).
- [3] 冯会芳, 胡旭跃, 张冠群. 天津中心渔港进港航道尺度论证与航道泥沙回淤研究[J]. 水道港口, 2009(3): 170-175. (FENG Hui-fang, HU Xu-yue, ZHANG Guan-qun. Research on approach channel dimension of Tianjin central fishing port and sediment siltation[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2009(3): 170-175. (in Chinese))

- [4] 刘卫平, 张金善. 长江口外高桥六期码头港池泥沙回淤分析[J]. 水运工程, 2009(5): 32-38. (LIU Wei-ping, ZHANG Jin-shan. Sediment siltation at Waigaoqiao Phase VI harbor basin of the Yangtze Estuary[J]. Port and Waterway Engineering, 2009(5): 32-38. (in Chinese))
- [5] 曹祖德, 杨华, 侯志强. 粉沙质海岸的泥沙运动和外航道淤积[J]. 水道港口, 2008(4): 247-252. (CAO Zu-de, YANG Hua, HOU Zhi-qiang. Sand movement of silt-sandy beach and the outer navigation siltation[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2008(4): 247-252. (in Chinese))
- [6] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第十二分册(广西海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. (The Compilation Committee of the China Bay Investigation. The China bay investigation, the 12th volume (bay of Guangxi)[M]. Beijing: Ocean's Publishing House, 1993. (in Chinese))
- [7] 辛文杰. 北海铁山港航道工程潮流数值计算分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1994. (XIN Wen-jie. The calculator program of numeric analyzing for waterway engineering on tidal flow in Tieshan Port in Beihai[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994. (in Chinese))
- [8] 马进荣, 罗肇森. 北海港铁山港区总体规划及航道建设潮流数学模型研究和泥沙回淤分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. (MA Jin-rong, LUO Zhao-sen. The research of tidal flow by numeric model and sediment silt analysis about port designing and channel constructing of Tieshan Port in Beihai[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [9] 黄建维, 郭颖. 北海铁山港出海航道工程泥沙淤积分析研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1994. (HUANG Jian-wei, GUO Ying. The report of sediment silt analysis about waterway engineering of Tieshan Port in Beihai[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994. (in Chinese))
- [10] 黄建维, 郭颖. 铁山港吹填造地工程泥沙淤积研究分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1994. (HUANG Jian-wei, GUO Ying. The sediment silt analysis of the land reclamation project in Tieshan Port[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994. (in Chinese))
- [11] 辛文杰. 北海铁山港吹填造地工程潮流数值计算分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1994. (XIN Wen-jie. The analysis of tidal flow by numeric model of the land reclamation project in Tieshan Port[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994. (in Chinese))
- [12] 罗肇森. 波、流共同作用下的近底泥沙输移及航道骤淤预报[J]. 泥沙研究, 2004(6): 1-9. (LUO Zhao-sen. Sediment transport under the coexisting action of waves and currents and prediction of sudden sedimentation in navigation channel[J]. Journal of Sediment Research, 2004(6): 1-9. (in Chinese))

## A method for sediment siltation calculation in sandy offshore waterway

MA Jin-rong<sup>1</sup>, XU Xiang-bo<sup>2</sup>, LIU Xin-hua<sup>3</sup>

(1. Key Sediment Research Lab of Harbors and Waterways of the Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Beihai Municipal Harbor Administration, Beihai 536000, China; 3. Guangxi Communications Planning, Surveying and Designing Institute, Nanning 530011, China)

**Abstract:** Some formulas have been used to calculate the siltation ratio in offshore waterway. Each formula and its parameters should be set according to the actual conditions of flow and sediment in certain water areas. In sandy coast area, the siltation ratio of waterway should consist of both bed load and suspended load. The method of combining different formulas, which are deduced from different theories and limited in kinds of conditions, is discussed in this paper. The semi-theoretical and semi-empirical formulas, Liu Jia-ju formula and Luo Zhao-sen formula, are applied to calculate sediment siltation ratio in the planned offshore waterway of Tieshan harbor. The results accord well with the natural siltation situation obtained by analyzing the filed data in the waterway measured after the dredging project one and a half years later. It is proved that Liu Jia-ju formula can be used to calculate the suspended load silting and Luo Zhao-sen formula can be used to estimate the bed load silting in offshore waterway of sandy coast.

**Key words:** sandiness coast; waterway; sediment silt