

沙质海岸河口航道回淤计算方法及其应用

陈一梅

(河海大学港口航道及海岸工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 :从沙质海岸的水流泥沙运动基本理论出发 ,提出了沙质海岸河口泥沙回淤计算模式 ,推导出了适合闽江通海航道挖槽回淤计算的推移质输沙率公式和悬移质回淤强度计算公式 ,利用该公式计算闽江口二期航道回淤的结果与实际情况一致 ,据此 ,对闽江口深水航道回淤进行了预报计算。
关键词 :回淤强度 ;推移质 ;悬移质 ;闽江口 ;航道
中图分类号 :U617.6 ;TV148.5 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)06-0082-05

建国初期为了解决天津港的淤积以及 70 年代为解决连云港淤积问题 ,对淤泥质海岸航道与港池淤积开展了研究 ,积累了大量实测资料和科研成果 .经过多年研究 ,许多学者对淤泥质海岸挖槽回淤提出了多种形式的计算公式^[1~3] .但对闽江口、羊口港这类沙质海岸河口深水航道回淤问题的研究成果却很少 ,理论也不成熟 ,因此 ,需要进一步研究 .

本文从沙质海岸河口泥沙回淤特性出发 ,结合闽江口的泥沙及水流资料 ,提出了适用于沙质海岸河口航道淤积的计算模式和公式 .

1 沙质海岸泥沙沉积特性

1.1 泥沙组成及运动方式

沙质海岸河口泥沙粒径远粗于淤泥质海岸 .闽江口试挖槽淤积物质中占优势的泥沙是中砂和细砂 ,这类泥沙主要来自上游 ,由径流和潮流搬运 ,并随落潮流流向海扩散 .同时 ,径流挟带的泥沙 ,以推移运动的方式搬运、沉积 ,继后经潮流和波浪的作用使粒级高度聚集 .以跳跃形式为主的泥沙占总量 80% ~ 98% ,悬移质占总量的 2% ~ 10% .

口外细沙运动受波浪影响很大 .细砂搬运中推移质占 80% ~ 95% ,悬移质占 5% ~ 10% .主要由入海的悬浮泥沙在潮流输移过程中 ,不断凝聚沉积而形成 .沉积物的粒度组成 ,砂级含量居多 ,为 45% ~ 60% ,其次是粘土 ,其含量为 21% ~ 35% .运移方式为推移和悬浮两种搬运方式并存 .

过渡类型的沉积物 ,砂—粉砂—粘土、粉砂—砂—粘土、粘土—砂—粉砂、粉砂—粘土—砂 ,在几种水动力因素参与下形成 ,泥沙搬运方式也不单一 ,对沉积条件敏感 ,与洪水和风暴等密切相关 .

闽江口深水航道泥沙的沉积以推移质运动为主 ,同时存在悬沙淤积 ,波浪掀沙在悬沙淤积中起较大作用 .

羊口港淤积泥沙主要有细砂、极细砂、粉砂质砂、矿质粉砂、砂—粉砂—粘土等 .其中以砂质粉砂及极细砂为主 .细砂平均粒径为 0.127 mm ,极细砂平均粒径为 0.098 mm ,砂质粉砂平均粒径为 0.049 mm .泥沙运动以底沙运动为主 ,并以波浪掀沙、潮流输沙为主要特征 .泥沙淤积方式分为悬沙淤积和底沙淤积两部分 .

综上所述 ,沙质海岸河口的泥沙组成及运动与淤泥质海岸不同 ,推移质运动对河床冲淤影响占有优势 .悬移质运动对河床冲淤影响在某些情况下可忽略不计 ,在另一些情况下 ,沙质海岸河口河床冲淤变形是推移质和悬移质共同作用的结果 .

1.2 泥沙来源

闽江口通海航道淤积泥沙来源可分为直接来源和间接来源 .直接受河口输沙条件控制的称直接泥沙来源 ,来自航道附近浅滩在风浪和潮流综合作用下的掀沙和输沙称间接泥沙来源 .

收稿日期 :1999-09-01
作者简介 陈一梅(1961 —)女 ,江苏南京人 ,博士研究生 ,东南大学副教授 ,港口航道及海岸工程专业 ,主要从事港口航道工程及泥沙研究 .

闽江口直接泥沙来源在洪水期,由于水体含沙量受河口条件控制,处于饱和和超饱和状态,在此期间航道淤积。间接泥沙来源主要表现为洪水季节大量的泥沙沉积于河口地区,在台风时期,海洋水文状况突变,水动力强度猛增,沉积物进行再分配,不同粒级的沉积物在河口区发生分离,而相应的沉积物发生再搬运。此外,在优势强风的作用下,当风速达到 6 m/s 时,海岸沙滩的滩肩以上部位的中细砂被掀起并顺风移动^[4]。闽江口内沙浅滩位于川石水道口门附近,河床质粒径在 0.25 ~ 0.4 mm 之间,悬沙甚少参与造床,可忽略不计,河床冲淤变形与推移质密切相关。外沙浅滩紧接内沙,横于川石水道出口,是闽江口最外边一个浅滩,泥沙既有直接来源也有间接来源,河床冲淤变形与推移质密切相关,但由于外沙水域宽广,动力条件与内沙有所不同,受风浪等因素影响,悬沙冲淤变化占有相当份额。因此,闽江口航槽回淤既有推移质淤积又有悬移质淤积,不同部位,不同时段各有侧重。

羊口港泥沙主要来源于海底丰厚的极细粉砂在波浪作用下起动悬浮和推移搬运,河流来沙较少,航槽冲淤变形以悬移质为主,推移质造床占有一定份额,不可忽视。

2 挖槽回淤计算

沙质海域泥沙运移形式为推移质和悬移质并存。浅滩开挖槽后,原来水流、泥沙、环境发生变化,航槽出现淤积。淤积方式分为推移质方式和悬移质方式。由于推移质和悬移质运动机理不同,回淤计算模式也不相同,应分别考虑。

2.1 推移质回淤计算

河床的冲淤变形是由于不平衡引起的,当仅研究推移质输沙造成的冲淤时,可用下面模式进行计算。为便于分析,取单宽航槽上一个河段的高程变化来分析。于是有

$$\Delta Z = \frac{g_{b_1} - g_{b_2}}{\gamma_0 \Delta L} \Delta t \tag{1}$$

式中: γ_0 ——泥沙的干容重 kg/m^3 , $\gamma_0 = 1750 d_{50}^{0.183}$, 其中 d_{50} 以 mm 计。

用式(1)推求推移质回淤的关键是推导出适合沙质海岸推移质运动的输沙公式。目前由于天然实测资料不足,推移质输沙率公式虽然很多,但大多在试验室内求得,适用范围受到限制。各家公式所得结果相差甚大。就闽江口内沙挖槽回淤而言,根据二期工程,采用 1998 年 4 月和 9 月实测所得的挖槽地形资料,选用冈恰洛夫和窦国仁的推移质输沙率公式^[5],计算出挖槽回淤量,计算结果如图 1 所示。从图 1 可见,冈恰洛夫公式在内沙的第一、第二小段计算值较实际值偏大,而第三和第四小段较实测值小,窦国仁公式在第一段计算值为淤,实际情况为冲,第二段以后计算结果较实际偏小。若调整公式中的修正系数,一部分与实际相近,另一部分与实际偏离更大。这就是说公式所描绘的规律与闽江口内沙回淤特性间存在一定的差别,仅用实际资料调整修正系数不能满足要求。因此,有必要推导出适合沙质海岸输沙规律的推移质输沙率公式。

设推移质前进速度为 u_b , 床面层厚度为 kd , 则

$$g_b = \gamma_s u_b m_s kd \tag{2}$$

式中: u_b ——床面泥沙运动速度, $u_b = A(u_0 - u_{0c})$; u_0 ——河底作用流速, $u_0 = (1 + m)\alpha^m U (\frac{d}{h})^n$; u_{0c} ——泥沙的运动速度, $u_{0c} = (1 + m)\alpha^m U_c (\frac{d}{h})^n$; A 为比例系数; m_s ——动密实系数,即床面层运动着泥沙体积占整个床面层体积的分数。

闽江口淤积泥沙颗粒粗,沿程由粗到细变化大,泥沙的重力因素对输沙影响大。因此, m_s 不仅与 $\frac{U}{U_H}$ 有关,而且直接受泥沙颗粒的大小即重力的影响,即 $m_s = f(\frac{U}{U_H}, d)$:

取
$$m_s = \gamma (\frac{U}{U_c})^n - 1) d^{-n_1}$$

于是有
$$g_b = \varphi \gamma_s d^{1-n_1} (U - U_c) (\frac{U^n}{U_H^n} - 1) (\frac{d}{h})^n \tag{3}$$

$$\varphi = (1 + m)\alpha^m A k \eta$$

参照列维、沙莫夫公式结构形式取 $1 - n_1 = \frac{1}{3}$, $m = \frac{1}{3}$, $n = 3$ 并令 $f = \varphi\gamma_s$ 整理得

$$g_b = (-1)^{1/3} f d^{1/3} (U - U_c)^{1/3} \left(\frac{U^3}{U_H^3} - 1 \right)^{1/3} \left(\frac{d}{h} \right)^{1/3} \tag{4}$$

$$U_H = \frac{U_c}{1.4} \qquad U_c = 6.0 d^{1/3} h^{1/6}$$

式中 f 为综合修正系数,与泥沙起动机率和水流动力及波浪等因素有关,其数值应根据实测资料确定.考虑到河口区潮流对输沙的影响,式(4)中“ $-$ ”表示涨潮时泥沙向上输移;“ $+$ ”表示落潮时泥沙向下输移.

根据闽江口内沙 1998 年 4 月和 9 月挖槽实测资料求得 $f = 45.0$. 验证表明,计算情况与实际吻合较好,见图 1.

2.2 悬移质回淤计算

2.2.1 回淤计算模式

根据龚国仁潮汐水流悬沙运动方程:

$$\frac{\partial (AS)}{\partial t} + \frac{\partial (Q_x S)}{\partial x} + B\omega(S - S_*) = 0 \tag{5}$$

式中: A ——过水面积; S ——悬沙含沙量; B ——河面宽; S_* ——水流挟沙能力; x ——沿程坐标.

采用文献 [1] 的处理方式有

$$\frac{\partial (qS)}{\partial t} + \alpha\omega(S - S_*) = 0 \tag{6}$$

式中: q ——单宽流量,将上式改写成差分形式,则

$$\Delta (qS) = \alpha\omega(S - S_*) \Delta x \tag{7}$$

式(7)中所得结果“ $+$ ”表示淤积,“ $-$ ”表示冲刷.于是,单位时间内增加的单宽淤积量为

$$q_2 S_2 - q_1 S_1 = \alpha\omega(S_2 - S_1) \Delta x + \alpha\omega(S_{*1} - S_{*2}) \Delta x \tag{8}$$

脚标 1、2 表示挖槽前后,因挖槽不会改变河口来沙条件,可以假设 $S_1 = S_2$, 于是,在 Δt 时段内单位面积上淤积厚度为

$$\Delta Z = \frac{1}{\gamma_0} \alpha\omega S_* \left(1 - \frac{S_{*2}}{S_{*1}} \right) \Delta t \tag{9}$$

用弗氏数形式表示的挟沙力公式 $S_* = \beta\gamma_s \left(\frac{V}{\sqrt{gh}} \right)^3$ 代入式(9)整理得

$$\Delta Z = \frac{KS_{*1}\omega\Delta t}{\gamma_0} \left(1 - K \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \right) \tag{10}$$

考虑到河口治理前后挟沙力公式中的系数 β 有可能发生变化,式(10)中取 $K_1 = \frac{\beta_2}{\beta_1}$.

2.2.2 参数的确定

由上述公式可见,悬沙不冲不淤平衡条件为

$$1 - K \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \left(\frac{h_1}{h_2} \right) = 0 \tag{11}$$

式中 K_1 值应根据实际情况确定. 闽江口外沙堵塞支汊戛斗等水道后,输沙再次达平衡情况时,由挖槽前后流速比和水深比,推得航槽不冲不淤时 K_1 的取值为 0.78.

K 与泥沙沉降机率有关,也与用公式估算挟沙力与实际情况间的差异有关,是一个综合待定系数,也应由现场资料确定.对于闽江外沙,根据 1998 年 4 月和 9 月两次地形资料推得 $K = 1.05$. 验证结果与外沙实际

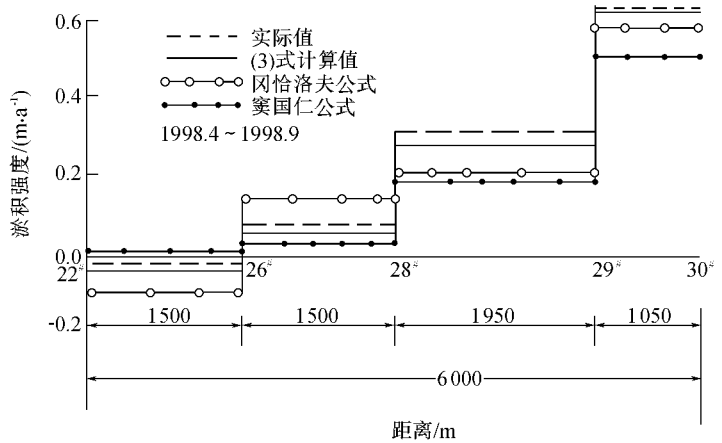


图 1 内沙航槽推移质沿程回淤强度

Fig.1 Bed-load siltation thickness along navigation channel at Neisha

的淤积规律一致,见图 2。

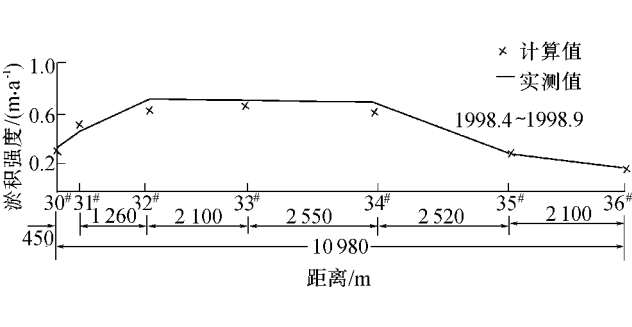


图 2 外沙悬移质淤积强度沿程变化

Fig.2 Suspended sediment siltation thickness along navigation channel at waisha

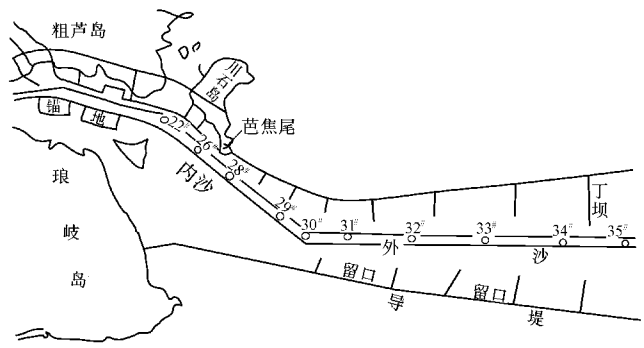


图 3 闽江口深水航道工程方案布置

Fig.3 Layout of navigation channel in the entrance of Minjiang

沙质海岸现场海域浅滩的潮流不稳,风浪具有随机性,挟沙力与风、风浪和潮流均有关,因此开挖前浅滩上水流挟沙力^[2]

$$S_{*1} = 0.0273 \frac{(|V_a| + |V_c|)^2}{gh}$$

(12)

式中: γ_s ——泥沙重率; h ——浅滩平均水深; $|V_a| = |V_b + V_1|$ ——风吹流和潮流合成流速; V_b ——风吹流的时段平均流速, $V_b = 0.02 w$, w ——时段平均风速; V_1 ——潮流流速; V_c ——波浪的平均水平波动流速, $V_c = 0.02 C (\frac{h_c}{h})$,其中 C 为波速, h_c 为波高.对于无风情况,水流挟沙力 S_{*1} 采用多年平均含沙量。

3 计算实例

闽江口通海航道经二期工程后(1998 年 4 月竣工),乘潮可通航 20 000 吨级海轮,现开辟 50 000 吨级深水航道.内沙和外沙是口门两大碍航浅滩,内沙冲淤变形以推移质为主,悬移质影响甚微可忽略不计,外沙冲淤变形是推移质和悬移质共同作用的结果。

利用本文推出的推移质和悬移质计算模式,对内沙和外沙在 3 种不同整治方案(见图 3)的情况下的回淤量进行了计算,结果见表 1~3。

表 1 内沙各方案推移质淤积强度
Table 1 Bed-load siltation thickness at Neisha for different plans

方案	淤积强度/(m·a ⁻¹)				航深 /m
	1	2	3	4	
1 川石有锚地,无港池	0.225	-0.163	0.172	0.693	12.8
2 川石顺岸码头,无锚地	0.180	-0.130	0.104	0.516	13.8
3 川石二期,无锚地港池	0.444	-0.016	0.228	0.456	内沙 13.8 外沙 15.0

表 2 外沙各方案推移质淤积强度
Table 2 Bed-load siltation thickness at Waisha for different plans

方案	淤积强度/(m·a ⁻¹)					航深 /m
	1	2	3	4	5	
1 川石有锚地,无港池	0.105	-0.348	0.241	0.393	-0.271	12.8
2 川石顺岸码头,无锚地	0.120	-0.301	0.242	0.372	0.283	13.8
3 川石二期,无锚地港池	0.424	0.344	0.272	-0.067	0.305	内沙 13.8 外沙 15.0

表 3 外沙各方案悬移质淤积强度
Table 3 Suspended sediment siltation thickness at Waisha for different plans

方案	淤积强度/($\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)				航深 /m
	1	2	3	4	
1 川石有锚地,无港池	0.080	0.348	0.279	0.000	12.8
2 川石顺岸码头,无锚地	0.113	0.347	0.281	0.017	13.8
3 川石二期,无锚地港池	0.131	0.403	0.327	0.057	内沙 13.8 外沙 15.0

由表 1 可知,内沙由推移质输移产生的淤积强度,每年约 10~70 cm,各段不同,靠近芭蕉尾的区段有局部冲刷,内沙尾段,接近外沙的区段回淤强度较大,约 60~70 cm. 方案 2 即川石顺岸码头无锚地,淤积强度最小,虽与方案 1 相差不大,但方案 2 航槽水深较前者大,可见方案 2 是比较好的方案.

外沙航道上接内沙末端,下至-14.0 m 外海等深线,推移质回淤强度在 10~42 cm 之间,推移质回淤强度较内沙小. 悬移质在外沙中产生约 30 cm 左右的回淤强度,方案 2 因航道底高降至-13.8 m,比方案 1 深 1 m,故回淤强度略大. 综合分析,以上结果是合理的.

4 结 语

闽江口沉积物质以中、细砂占优势,底沙运动是这类沙质海岸河口航道泥沙运动的主要形式,悬沙运动受径流、潮流和风浪的共同作用,航槽回淤既有底沙淤积又有悬沙淤积,不同部位所占比重不同. 本文从闽江口内、外沙浅滩泥沙特性及回淤特点出发,推导出了适合沙质海岸河口通海航道挖槽回淤计算的回淤模式和相应的计算公式(4)和(10). 计算结果与闽江二期挖槽回淤的实际情况一致. 在此基础上,对闽江口 50 000 吨级深水航道的回淤进行了预报计算,结果表明,在堵塞各分流汊道,集中水流的基础上,闽江口深水航道经少量维护可达到设计目标. 此外,公式中的参数应根据实测资料确定,文中的公式还有待更多的资料验证补充.

参考文献：

[1] 罗肇森. 河口航道开挖后的回淤计算[J]. 泥沙研究, 1987(2): 13~19.
[2] 刘家驹. 淤泥质海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用[J]. 水利水运科学研究, 1993(4): 301~320.
[3] 赵晓冬, 陈志昌. 河口航道挖槽水力学研究及回淤计算[A]. 两岸港口及海岸开发研讨会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1993. 311~317.
[4] 石谦. 闽江河口砂入海后的再搬运[A]. 第九届全国海岸工程学术讨论会论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1999. 459~464.
[5] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 175~176.

Siltation Predication for Estural Navigation Channels on Sand Beaches

CHEN Yi-mei

(College of Harbor , Waterway and Coastal Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract On the basis of basic sediment theory , a siltation calculation model is built , formulas of bed-load transport rate and the intensity of suspended sediment siltation are derived , which are suitable for Mingjiang estuary. Navigation channel siltation for the second phase project at the entrance of the Minjiang river is calculated , and the results show a good agreement with real siltation. On this basis siltation prediction is made for water depth of the navigation channel at the entrance of the Minjiang River.

Key words intensity of sedimentation ; bed-load ; suspended sediment ;Minjiang estuary ;navigation channel