

河口航道边抛弃土运动的计算

徐福敏

(河海大学交通与海洋工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 简述边抛疏浚原理和边抛施工的水动力依据,将边抛泥沙作为点源,边抛弃土分为悬沙和浮泥两部分.介绍了悬沙运动基本方程,得到悬沙浓度、水体中悬沙含量随时间、运动距离的变化.对边抛浮泥运动基本方程进行简化处理得到边抛浮泥运动速度、厚度在上层水流、重力、底部摩擦等因素作用下的运动规律.对长江口北槽下段挖槽边抛弃土中悬沙和浮泥进行模拟计算并进行分析,以提高边抛成槽率.

关键词 边抛 悬沙 边抛浮泥 边抛成槽率

中图分类号 U616

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2003)04-0449-04

疏浚弃土在海岸河口区域运动,在重力、波浪、潮流、风吹流等因素作用下,泥沙运动形态可以为悬移质,也可以为浮泥,一般情况下两者兼有.天津港疏浚抛泥研究结果^[1]认为在装箱抛泥疏浚弃土中 80% 以上是浮泥.边抛施工时,疏浚土被挖泥船耙头打碎,随水流吸入泥泵,随即以泥浆流的形式被吹入水中.对于泥沙颗粒较细、潮流较强的航道采用边抛疏浚应有较高成槽率,在大、中潮期间,由于边抛泥量较装箱抛泥量少得多,而且边抛时抛泥管在水面以上离水面较远,淤泥粒径又很小,绝大部分边抛弃土成为悬移质随水流运移,当水流速度较小时,有相当部分弃土直接落淤于河底成为密度流——浮泥.

对航道进行边抛疏浚施工时,若根据潮型、水流速度合理地选择抛泥时刻及抛泥方向,能大大缩短工期,提高疏浚效率.若选择不当,在水流、底面坡度等环境因素作用下,疏浚弃土有可能重新回流到港口或航道中,导致疏浚效率降低.因此,边抛弃土运动的研究对于港口及航道的建设、使用和维护具有重要意义.

1 悬沙运动基本方程^①

悬沙运动基本方程如下:

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} - \frac{\partial\left(hD_x \frac{\partial c}{\partial x}\right)}{\partial x} - \frac{\partial\left(hD_y \frac{\partial c}{\partial y}\right)}{\partial y} + W_s(c - c_e) = 0 \quad (1)$$

式中: c ——沿水深的平均含沙量; h ——水深; u, v ——沿水深在 x, y 方向的平均水流速度; D_x, D_y —— x, y 方向的泥沙扩散系数; W_s ——悬沙静水沉降速度; c_e ——抛泥前沿水深的平均含沙量.

对于边抛而引起的悬沙,假设悬沙浓度沿水深相同,并且其移动速度、方向与沿水深的平均水流速度相同.将沿水深的平均水流运动拉格朗日轨迹分成若干折线段,每一段折线在相应时段内作为 x 轴,则方程(1)简化为

$$\frac{\partial(c)}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{W_s}{h}(c - c_e) = 0 \quad (2)$$

将边抛的泥沙分为若干相间隔的抛泥点,各点处的抛泥量 Q 可根据挖泥船的航速和设计数据得到,则 t 时刻的悬沙浓度为

收稿日期 2002-08-31

基金项目 河海大学港口航道及海岸工程学院基金资助项目(3833)

作者简介 徐福敏(1967—),女,天津人,博士,副教授,主要从事海岸动力、海洋环境研究.

① 曹祖德,王桂芬.浮泥流动特性及其数值模拟.全国泥沙基本理论研究学术讨论会文集.中国水利学会泥沙专业委员会,1992.713—719.

$$c(x,y,t) = \frac{Q}{4\pi\text{th}(D_xD_y)^{1/2}}\exp\left\{-\frac{1}{4t}\left[\frac{(x-ut)^2}{D_x} + \frac{y^2}{D_y}\right] - \frac{W_st}{h}\right\} + c_e$$

对上式在 x 和 y 方向积分,得到相应水体中 t 时刻悬沙含量为

$$Q_s = Q\exp\left(-\frac{W_st}{h}\right)$$

2 边抛浮泥运动基本方程^[2]

浮泥在波浪、潮流等海岸动力作用下对海岸、河口的泥沙输送、底部形态和航槽淤积起着重要作用.浮泥是贴近海底的一层高浓度含沙流体,其流型为宾汉体,容重 $\gamma \in (1.03, 1.30)$,流变方程为 $\tau = \tau_B + \eta \frac{du}{dz}$ (其中 τ_B 为宾汉体临界剪切应力, η 为刚度系数).对于边抛疏浚施工,不能被水流悬移挟运的泥沙就地落淤,在航槽边线一侧形成高浓度密度流——浮泥.一般大、中潮期间平均流速大,水流挟沙能力较强,边抛泥浆就地落淤率较小,小潮期间平均流速较小,边抛泥浆就地落淤率较大.与分层流的浮泥连续方程不同,对于作为点源的边抛浮泥,不存在浮泥场中某点浮泥质量、动量随时间的变化项.忽略浮泥与上层水体、底层的质量交换,其运动基本方程为

$$h_mS_m = M$$

连续方程为

$$\frac{\partial(u_mh_m)}{\partial x} + \frac{\partial(v_mh_m)}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

运动方程为

$$u_m \frac{\partial(h_mS_mu_m)}{\partial x} + v_m \frac{\partial(h_mS_mv_m)}{\partial y} + g \frac{\rho}{\rho_m} \frac{\partial(h_mS_m\xi)}{\partial x} + g \frac{\Delta\rho}{\rho_m} \frac{\partial(h_mS_m\xi_m)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_m}(\tau_{bx} + \tau_{Bx} - \tau_x)S_m = 0 \tag{4}$$

$$u_m \frac{\partial(h_mS_mv_m)}{\partial x} + v_m \frac{\partial(h_mS_mv_m)}{\partial y} + g \frac{\rho}{\rho_m} \frac{\partial(h_mS_m\xi)}{\partial y} + g \frac{\Delta\rho}{\rho_m} \frac{\partial(h_mS_m\xi_m)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_m}(\tau_{by} + \tau_{By} - \tau_y)S_m = 0 \tag{5}$$

式中: M ——边抛浮泥量; u_m, v_m ——浮泥在 x, y 方向的流速; h_m ——浮泥厚度; S_m ——浮泥面积; ρ, ρ_m ——上层水体和浮泥的密度; $\Delta\rho$ ——浮泥与上层水体的密度差,即 $\Delta\rho = \rho_m - \rho$; ξ, ξ_m ——自由水面与静水面距离、浮泥自由面与静浮泥面距离; τ_x, τ_y ——上层水体对浮泥面剪切应力在 x, y 方向的分量; τ_{Bx}, τ_{By} ——浮泥的宾汉应力在 x, y 方向的分量; τ_{bx}, τ_{by} ——浮泥对底床的剪切应力.

3 边抛浮泥模型的简化处理^[3]

忽略自由水面水位变化对浮泥的影响,则方程(4)和(5)中第 3 项为零; $\frac{\partial\xi_m}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial\xi_m}{\partial y}$ 代表 x 和 y 方向的水底坡度 $\tan(\theta_x)$ 及 $\tan(\theta_y)$.对于缓坡情形, $\frac{\partial\xi_m}{\partial x} \approx \theta_x, \frac{\partial\xi_m}{\partial y} = \theta_y$,因此式(4)和(5)中的第 4 项代表地形坡度导致的在 x, y 方向的分力.

假设水体流动为沿 x 方向的一维情形,浮泥运动时受到水底处的剪切阻力 $\tau_b = \rho_m C_m u_m^2$,上层水体对浮泥的剪切阻力 $\tau = \rho C(u - u_m)^2$ (其中 C 和 C_m 分别为上层流体对浮泥、浮泥对底面的剪切系数).浮泥的宾汉应力为 $\tau_B = \alpha \exp(\beta\gamma)$,其中 α 和 β 与当地的泥沙特性有关,我国连云港、天津港、长江口和黄河口地区进行大量浮泥特性试验得到相应的 α, β 值.基于以上假设及相应的算式,则方程(3)(4)(5)化为

$$\frac{\partial(u_mh_m)}{\partial x} = 0 \quad \text{亦即} \quad u_mh_m = \text{Con}(\text{Con 为常数}) \tag{6}$$

$$\frac{\partial(Mu_m^2)}{\partial x} = \left[gh_m \frac{\Delta\rho}{\rho_m} \theta + \frac{1}{\rho_m}(\tau - \tau_B - \tau_b) \right] (M/h_m) \tag{7}$$

可见,式(6)代表浮泥厚度与速度的关系,式(7)代表浮泥在重力、上层水体及底面剪切力作用下动能的变化.式(7)右边第 1 项表示斜坡上浮泥由重力所致的能量增加,第 2 项代表浮泥由于摩擦而消耗的能量.

解微分方程即得到边抛浮泥运动速度 u_m 、厚度 h_m 随地面坡度 θ 、上层水流速度 u 的关系.

4 长江口北槽下段挖槽边抛弃土运动计算

长江口深水航道北槽下段某处进行边抛疏浚,拟在挖槽两侧底边线 50 m 范围内采用边抛施工方法进行疏浚,挖泥船做平行于航道轴线的运动,挖泥的同时将疏浚弃土沿溢流管抛于航道边坡外,因此可将边抛弃土视为在边坡上平行于航槽轴线的一系列点源,由于溢流管抛泥出口处高度较大,施工观测发现边抛弃土进入水体后约 60% 作为悬移质随水流运移,40% 直接落淤于水底形成浮泥.抛泥处位于航道边坡外 50 m 处,其底面坡度 1:60,航槽横断面见图 1.

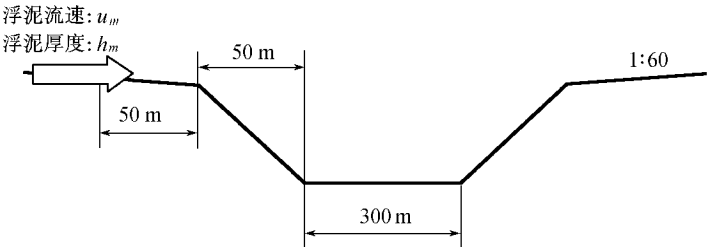


图 1 长江口北槽下段某处航槽断面示意图
Fig.1 Cross-section of lower reach of the North Channel in the Yangtze River Estuary

4.1 边抛悬沙的处理

边抛管出口距船舷 100 m,高于水面 11 m,边抛管直径 1 400 mm,边抛泵吸流量平均为 6 960 m³/h,平均泥浆浓度为 21.33%,边抛出口泥浆容重为 1.17 t/m³,相应的含沙量为 274.6 kg/m³.以 10 min 连续边抛入水泥沙(1 493 t)为一点源,初始水体含沙量为 15.6 kg/m³.对其中 1 次抛泥的落淤悬沙进行计算,结果见图 2.

由图 2 可见,边抛初期落淤最为明显,入水后第 1 h 的落淤占悬沙总落淤的 20% 左右.边抛泥沙入水后,含沙量增量迅速衰减,经过 1 个潮周期后,已接近于零.因此,应选择适当的抛泥时刻与方向,在潮流与挖槽交角较大时段施工,尽量减少边抛初期悬沙在槽边滞留的时间,使水流有效地将悬沙带离挖槽.

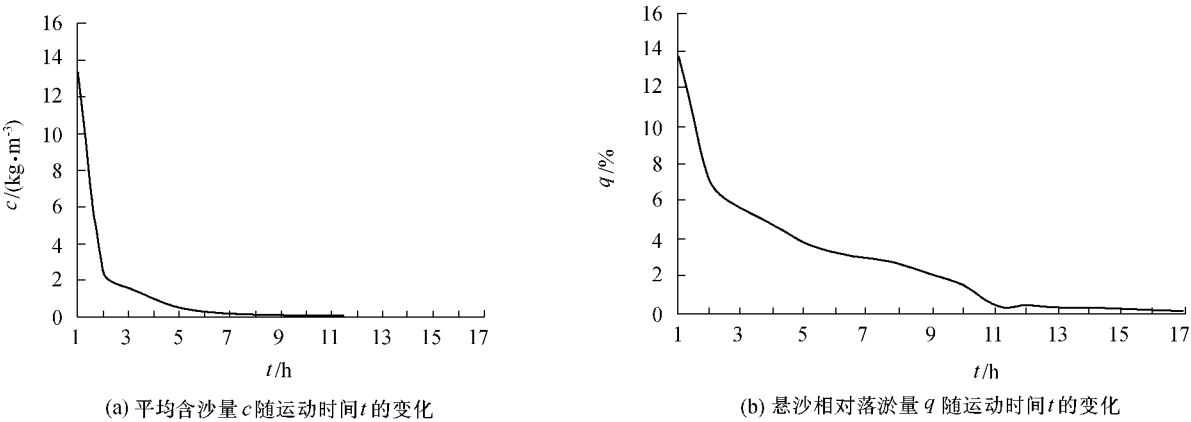


图 2 边抛悬沙相对落淤量及含沙量随运动时间变化情况

Fig.2 Variation of relative sedimentation and concentration of sidecast dredged suspended sediment with time

4.2 边抛浮泥的处理

直接落于底面的弃土(视为浮泥)有一定的初始速度,其初始速度和厚度均可以由抛泥管尺度及底泥组成计算得到.在一定的时间内,由浪、流引起的底面水流速度近似视为定常.当弃土落淤于底面后,若恰逢底面水流速度较大,且流速为垂直于航槽轴线方向并跨越航槽,则极易将底面弃土带至边坡,淤积在航槽内.

根据挖泥船设计指标计算得到浮泥初始速度为 1.0 m/s,厚度为 0.07 m.在某些时段内,波浪、水流在航槽区域形成近似定常的水平跨槽水流,且在沿航槽断面范围内流速大致相同,与航道轴线正交,航道附近流速分布可由三维水流层流模型数值模拟得到.将浮泥界面处水流速度分为 0.9 m/s,0.7 m/s,0.6 m/s,0.5 m/s,0.4 m/s,0.3 m/s 几种情形,分析浮泥在水流、重力等因素作用下的运动.参数的选取为: $\alpha = 0.1596$, $\beta =$

1.5204 ; $C' = g/C^2$, C 为谢才系数, $C = \frac{(h + \xi_0)^{1/6}}{n}$, n 为糙率, 根据现场实测数据分析, 取浮泥对底面的剪切系数 $C_m = 10C'$. 经计算得到水流速度为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m/s 时, 相应的浮泥运移距离分别为 14.2, 22.2, 32.5, 45.1 m. 水流速度大于 0.6 m/s 时, 浮泥进入航槽.

计算表明, 当浮泥界面处水流速度足够大 (> 0.6 m/s) 并跨越航槽时, 浮泥能在水平底面运行相当长的距离而进入航槽边坡, 即使在很小的坡度下, 浮泥也能回流至航槽成为永久性落淤; 当水流速度较小时 (< 0.5 m/s), 浮泥不会进入边坡, 有可能在较大逆向水流的作用下而远离航槽.

5 结 语

目前国内在边抛疏浚方面实践较少, 相应的数值和试验技术信息也较少, 虽然杭州湾、黄骅港采取边抛疏浚未达到预期效果, 但事实上对于水流较强、泥沙较细的海岸、河口航道的疏浚清淤施工中选择性使用边抛施工技术, 可以大幅度提高成槽效率, 减少疏浚强度和工期. 国外大量采用边抛疏浚方案, 前提是必须先期确定抛泥时刻、时段、方向等因素. 对长江口北槽下段挖槽边抛弃土的跟踪表明, 适当选择抛泥时刻、时段、方向等因素进行边抛施工成槽效率在 56% 左右.

对长江口北槽下段边抛弃土进行计算模拟得到的边抛含沙量随时间、运动距离的变化说明, 悬沙在第 1 h 的落淤占总落淤量的 1/5 左右, 以后迅速递减. 边抛浮泥在较强的横跨航槽水流作用下能在水平底面运行相当长的距离而进入航槽边坡, 并回流至航槽成为永久性落淤. 因此须选择适当的抛泥时刻与抛泥方向, 让水流尽早将泥沙带离航槽, 提高疏浚效率.

参考文献:

- [1] 曹祖德, 浮泥特性研究进展[J]. 水道港口, 1992(1): 34—40.
- [2] DELO E A, BURT T N. Dispersion of sidecast dredged spoil: a mathematical prediction and field study[M]. United States: World Dredging Congress, 1986. 517—528.
- [3] MICHAELIS W. Estuarine water quality management[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. 245—252.

Numerical simulation of sidecast dredged spoil movement along estuarine waterways

XU Fu-min

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract The principle and hydrodynamic basis of sidecast dredging are briefly described. The sidecast spoil is taken as point sources and divided into suspended sediment and fluid mud. The basic equation of motion of suspended sediment is introduced, and the regularity of variation of concentration and quantity of suspended sediment in water bodies with time and distance is obtained. By simplification of the basic equation of sidecast fluid mud, the variations of the moving velocity and thickness of fluid mud are deduced under the actions of the current velocity over the fluid mud surface, gravity, and bed friction. Finally, with sidecast dredging at the lower reach of the North Channel in the Yangtze River Estuary as an example, the suspended sediment and sidecast fluid mud are numerically simulated and analyzed for improvement of the trench formation efficiency of sidecast dredging.

Key words sidecast dredging; suspended sediment; sidecast fluid mud; trench formation efficiency of sidecast dredging