



水下开挖施工产生的悬浮泥沙 扩散数值分析*

黄海龙¹, 王 震²

(1. 南京水利科学研究院 河流海岸研究所, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了分析水下开挖施工产生的悬浮泥沙扩散特性, 以闽江口粗芦岛南侧水下沟槽开挖为例, 采用平面二维悬沙输移数学模型, 研究挖泥船不连续作业产生的悬浮泥沙扩散随水深和潮型变化的关系。计算结果表明: 若开挖地点水浅或小潮, 则悬浮泥沙不易扩散, 含沙量的增幅和高浓度 (含沙量增量超过 10 mg/L) 的浑浊水域面积都较大。

关键词: 不连续作业; 悬浮物扩散; 数学模型; 闽江口

中图分类号: TV 142⁺. 3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0025-04

Numerical analysis of suspended sediment diffusion caused by underwater excavation

HUANG Hai-long¹, WANG Zhen²

(1. River Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the characteristics of suspended sediment diffusion caused by excavation underwater, we take an excavation project of a channel on the south side of Culu island in the Minjiang estuary for example, to study the relationship between the diffusion of the suspended materials and the water depth and tide types by a two-dimensional numerical model. The results show that both the increments of suspended load concentration and the areas in which the increments of suspended load concentration more than 10 mg/L are larger with shallow excavating sites or neap tides, because the suspended sediments are hard to diffuse.

Keywords: discontinuous excavation; diffusion of suspended matter; numerical model; Minjiang estuary

水下开挖是工程初期以至施工过程中的主要工序, 广泛应用于河道治理、港口航道、给水排水等水利工程。水下开挖施工时, 部分底泥因受到挖掘机械的扰动而悬扬, 并随水流输移扩散, 最后悬浮泥沙在重力作用下又回落到床面。因而, 在开挖施工现场, 水中悬浮泥沙浓度增加, 形成一定范围的高浓度浑浊水体, 对水质和水生生物产生不利的影响^[1]。

20 世纪 50 年代以来, 水下开挖施工产生的悬浮泥沙对水环境的影响为人们所重视, 开展了有

关的研究工作。邳志等^[2]结合天津港水深维护疏浚工程, 通过对传统挖泥船和新型挖泥船疏浚作业产生的悬浮泥沙扩散的观测分析, 研究环保疏浚问题; 吴修广等^[3-7]采用平面二维悬沙输移数学模型, 预测水下开挖施工产生的悬浮泥沙扩散范围和程度。

本文以闽江口粗芦岛南侧水下沟槽开挖为例, 采用平面二维悬沙输移数学模型, 研究挖泥船不连续作业产生的悬浮泥沙扩散随水深和潮型变化的关系, 以揭示水下开挖施工产生的悬浮泥沙扩散特性。

收稿日期: 2014-11-07

*基金项目: 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金 (201102)

作者简介: 黄海龙 (1976—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程研究工作。

1 数学模型

1.1 基本方程

二维潮流的基本方程包括水体连续性方程和动量守恒方程, 即

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial(HUU)}{\partial x} + \frac{\partial(HVU)}{\partial y} = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho} - gH \frac{\partial(H + Z_b)}{\partial x} + fHV + \varepsilon_x H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial(HUV)}{\partial x} + \frac{\partial(HVV)}{\partial y} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} - gH \frac{\partial(H + Z_b)}{\partial y} - fHU + \varepsilon_y H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: t 为时间; x 、 y 分别为空间水平坐标; H 为全水深, 即海面到海底的距离; Z_b 为床面高程; U 、 V 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向的分量; f 为地转参数, $f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地转角速度, φ 为计算水域的地理纬度; g 为重力加速度; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为海面风应力分量, $(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = C_w \rho_a \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \cdot (W_x, W_y)$, ρ_a 为空气密度, C_w 为海面风应力系数, W_x 、 W_y 分别为海面上风速在 x 、 y 方向的分量; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为海底摩阻分量, $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_b \rho \sqrt{U^2 + V^2} (U, V)$, ρ 为海水密度, C_b 为海底阻力系数, $C_b = g/C_h^2$, C_h 为谢才系数; ε_x 、 ε_y 分别为 x 、 y 方向的涡动黏性系数。

二维悬沙输移方程:

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HUC)}{\partial x} + \frac{\partial(HVC)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x H \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y H \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \alpha \omega (\beta S_* - \gamma C) + S \quad (4)$$

式中: C 为垂线平均含沙量; S 为施工产生的悬浮泥沙源强; S_* 为水流挟沙力; α 为泥沙颗粒沉降几率; ω 为泥沙颗粒的沉速; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向的泥沙扩散系数; β 为系数, 当 $V = \sqrt{u^2 + v^2} \geq U_f$ 时, $\beta = 1$, 否则, $\beta = 0$; γ 为系数, 当 $V \geq U_c$ 时, $\gamma = 0$, 否则, $\gamma = 1$; U_c 为泥沙颗粒的起动流速; U_f 为泥沙颗粒的扬动流速。

1.2 初始条件和边界条件

上述基本方程是一个初边值问题, 求解它需要适当的初始条件和边界条件。

模型边界分为两类, 一类是岸边界, 另一类是水边界。在岸边界上, 速度的法向分量为零, 以及含沙量的法向梯度为零, 即

$$V_n = 0.0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0.0 \quad (6)$$

在水边界上,

$$H_r(t) = d_r + \zeta_r(t) \quad (7)$$

$$C_r(t) = c_r(t) \quad (8)$$

式中: d_r 、 $\zeta_r(t)$ 、 $c_r(t)$ 分别为水边界上的水深、潮位过程和含沙量过程。

初始条件与潮位、流速和含沙量的初始分布有关。若在憩流时刻开始计算, 则初始条件为

$$H(x, y, 0) = d(x, y) + \zeta_0 \quad (9)$$

$$U(x, y, 0) = 0.0 \quad (10)$$

$$V(x, y, 0) = 0.0 \quad (11)$$

$$C(x, y, 0) = c_0 \quad (12)$$

式中: $d(x, y)$ 为计算域内的水深; ζ_0 、 c_0 分别为初始潮位和初始含沙量, 取憩流时刻水边界上的平均值。

1.3 数值计算

采用有限体积法离散基本方程。通过离散得到的线性代数方程组, 用高斯消去法求解。

2 计算实例

连江县粗芦岛尾水排海工程是粗芦岛污水处理工程的一个组成部分, 它的作用是将粗芦岛生活污水和工业废水集中收集、输送、处理后离岸潜没多孔排入闽江口。工程建设规模, 近期为 1.0 万 m^3/d , 远期为 2.0 万 m^3/d 。排放尾水的管道铺设于川石水道 (图 1), 南偏西 7° 走向, 长 610 m。管道铺设采用开槽埋管法施工, 施工产生的悬浮泥沙将对水环境造成不利的影响。

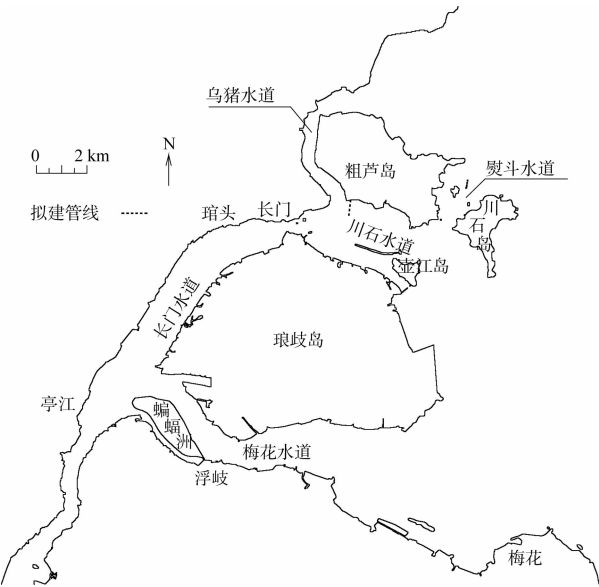


图 1 闽江口形势

2.1 模型建立与验证

2.1.1 模型建立

数学模型的计算范围（图 2）北起沙园头、南至琅岐岛的当里，南北间距 10.68 km；西起琯头、东至川石岛的东端，东西间距 12.87 km；计算面积约 137.45 km²。模型范围涵盖乌猪水道、川石水道、熨斗水道、壶江水道及部分的长门水道。采用不均匀网格剖分计算域。在工程远区，网格尺寸为 15 m×15 m；在工程近区，网格加密，网格尺寸为 5 m×5 m。在模型的水边界上，分别设定潮位和含沙量过程，对于随潮位变化的浅滩动边界，采用网格干、湿判断法进行处理。

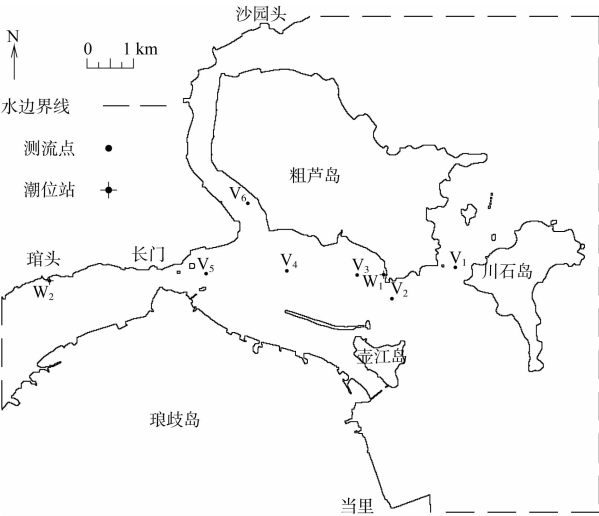


图 2 计算范围和水文测站位置

2.1.2 模型验证

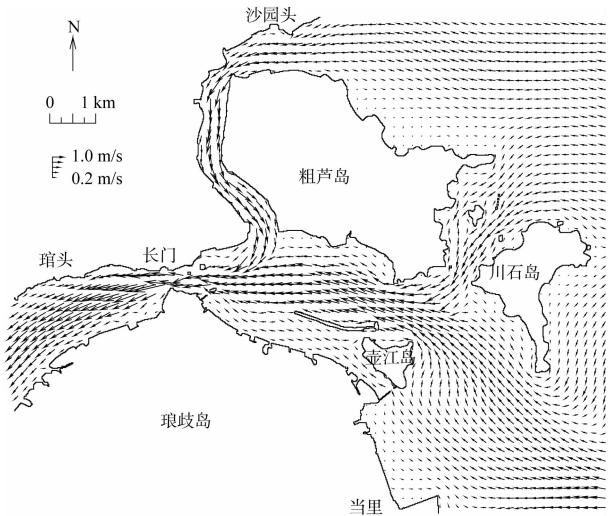
模型验证利用 2011 年 1 月粗芦岛附近水域水文泥沙实测资料。水文泥沙测验的测站位置见图 2，W₁ ~ W₂ 为潮位测站，V₁ ~ V₆ 为潮流测站。

上述实测资料分析结果显示，观测海域的潮差大、潮流急，底质的中值粒径一般小于 0.250 mm，以细砂为主。川石水道的平均潮差为 4.24 m，平均涨潮历时为 5 h 45 min，平均落潮历时为 6 h 40 min；中潮涨潮平均流速为 0.60 m/s，落潮平均流速为 0.62 m/s；中潮涨潮平均含沙量为 0.25 ~ 0.36 kg/m³，落潮平均含沙量为 0.23 ~ 0.27 kg/m³，悬沙的中值粒径为 0.008 mm，床沙的中值粒径为 0.180 mm。

比较这些验证点的计算值与实测值的结果表明，无论是潮位、潮流还是含沙量，计算值与实测值相差较小，过程吻合较好（潮位、流速和含沙量验证曲线从略）。

2.2 潮流数值模拟

闽江口口内受地形约束，潮流属往复流，涨、落潮流流向基本上与各个水道走向一致。图 3 显示，涨潮流以接近 270°的方位角进入闽江口口内，依次经川石水道与熨斗水道汇流、川石水道与乌猪水道汇流后进入长门水道；流出长门的落潮流经过两级分流后流向闽江口口外。在涨、落潮流的过程中，川石水道是主要的潮流通道。



a) 涨急

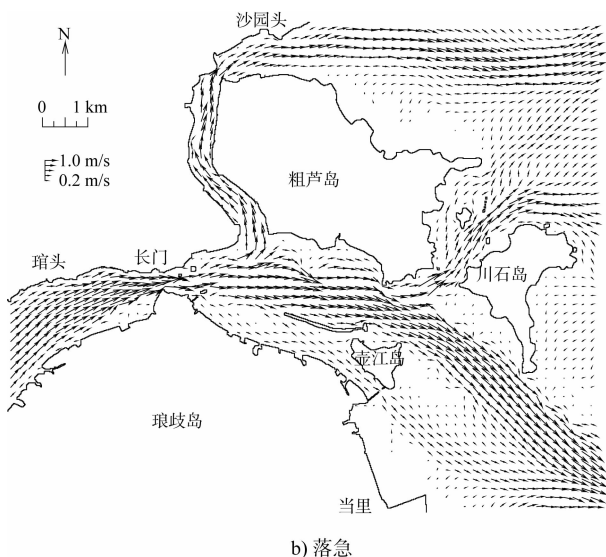


图 3 枯季大潮涨、落急流场

2.3 施工产生的悬沙扩散数值分析

2.3.1 源强确定

挖槽施工产生的悬浮泥沙强度可按下式计算^[8]：

$$S = \frac{R}{R_0} E W_0 \tag{13}$$

式中： W_0 为悬浮物发生系数 (t/m^3)，宜采用现场实测法确定，在缺少现场资料的情况下，可取 $0.038 t/m^3$ ； R 为发生系数 W_0 时的悬浮物粒径累计百分比 (%)，宜采用现场实测法确定，在缺少现场资料的情况下，可取 89.2%； R_0 为现场流速悬浮物临界粒径累计百分比 (%)，宜采用现场实测法确定，在缺少现场资料的情况下，可取 80.2%； E 为挖泥船工作效率 (m^3/h)。

连江县粗芦岛尾水排海工程拟用 $2 m^3$ 抓斗挖泥船开挖一个底宽 2.0 m、平均深度 4.0 m、边坡坡度 1:5 的沟槽，抓斗挖泥船工作效率为 120 斗/h，抓斗内充泥系数取 0.5，因此，挖槽施工产生的悬浮泥沙强度为 5.072 t/h，即 1.41 kg/s。

2.3.2 特性分析

假定抓斗挖泥船每天挖泥 12 h，属于不连续作业。沿管线由深到浅选择 3 个开挖点 $S_1 \sim S_3$ ，对于每个源点，分别模拟了大、小潮条件下的悬浮泥沙扩散。图 4 和表 1 分别为不同水深、潮型

条件下挖槽施工产生的含沙量增量包络线和包络面积。图 4 和表 1 显示：1) 大的含沙量增量围成区位于管线两侧，范围有限。例如，10 mg/L 的含沙量增量包络线范围位于管线两侧、每侧宽 30 ~ 50 m 的区域。2) 如果在深水开挖，则含沙量增大的幅度小，大的含沙量增量围成区的面积小；反之，则含沙量增大的幅度大，大的含沙量增量围成区的面积大。3) 对于大的含沙量增量围成区，小潮的含沙量增量包络面积大于大潮；对于小的含沙量增量围成区，大潮的含沙量增量包络面积大于小潮。

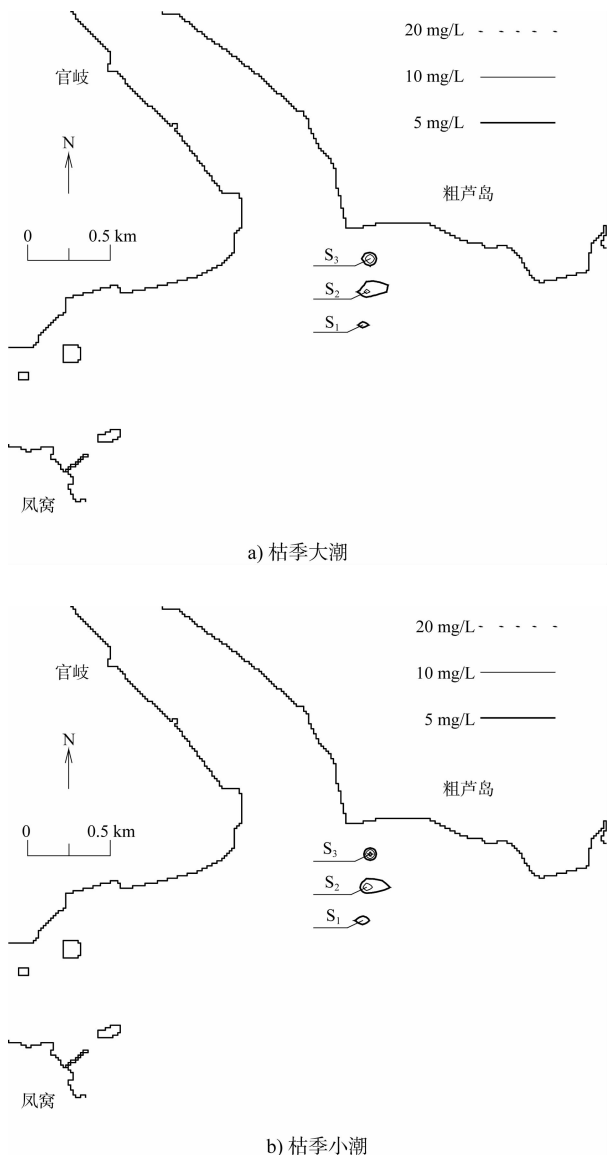


图 4 不同地点开挖产生的含沙量增量包络线

(下转第 35 页)