

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.01.002

河道疏浚工程悬浮物影响预测模型

辛小康¹, 叶 闽¹, 王 凤²

(1. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051; 2. 长江科学院河流研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要 介绍用于预测河道疏浚施工活动对周围水体悬浮物质量浓度影响的数学模型。针对衰减模型预测方法存在的不足, 提出基于泥沙运动方程的预测模型, 并将该模型运用于工程实践。采用泥沙模型对深圳经济特区罗芳村附近施工时深圳河不同工况(雨季、旱季)的悬浮物质量浓度沿程分布进行模拟, 结果表明其能够反映泥沙运动的真实情形。该模型已运用于第 4 期深圳河治理工程的环境影响评价中, 效果较好。

关键词 河道疏浚; 悬浮物; 衰减模型; 泥沙模型; 数学模型

中图分类号: U616 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2011)01-0008-03

Prediction model for impact of river dredging projects on suspended substance//XIN Xiao-kang¹, YE Min¹, WANG Feng²
(1. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China; 2. River Research Department of Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract : A mathematical model for predicting the impact of river dredging projects on the concentration of suspended substance (SS) was introduced. With regard to the shortcomings in prediction by use of the attenuation model, a prediction model based on sediment motion equations was proposed. The proposed model was employed to simulate the impact of dredging activities in Luofang Village of Shenzhen Special Economic Zone on the concentration profiles of SS under different working conditions (rainy season and dry season). The results indicate that this model can reflect the real state of motion of sediment particles. It has been used in the environment impact assessment of the forth stage of training project of Shenzhen River, and satisfactory efficiency has been achieved.

Key words : river dredging; suspended substance; attenuation model; sediment model; mathematical model

随着我国经济发展与城市化建设速度的日益加快, 对河道防洪、航运、环境及景观的要求越来越高, 因此开展了多项河流综合治理项目, 其中多数项目涉及河道疏浚工程。河道疏浚能降低河底高程, 提高河道的防洪能力; 可清除碍航浅滩, 增加通航能力, 可改善水流条件, 优化河流水质。但疏浚工程施工作业区将产生高浓度悬浮泥沙, 从而对施工期河流水环境产生影响^[1]。在建设项目环境影响评价过程中, 必须对悬浮物(SS)的影响程度和范围进行预测, 以选择正确的施工方案和环保措施。现行的 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》没有将 SS 作为常规因子列出, 因此 HJ/T 2.3—1993《环境影响评价技术导则——地面水环境》也未对 SS 预测模型做专门介绍, 导致环境评价工作中套用非持久性污染物衰减模型预测 SS 的现象时有发生^[2], 这是不合理的。笔者提出基于泥沙运动方程的一维泥沙模型,

从 SS 的运动机理上分析衰减模式与该模型的差异, 并将该模型应用于治理深圳河第 4 期工程环境影响预测中, 结果表明该模型具有物理意义准确、可靠度高的特点。

1 衰减模型与泥沙模型

HJ/T 2.3—1993《环境影响评价技术导则——地面水环境》中给定的一维动态混合衰减模式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) - K_1 C + S_p \quad (1)$$

式中: C 为污染物质量浓度; u 为水流流速; A 为过水断面面积; D 和 K_1 分别为扩散系数和衰减系数; S_p 为源项。

衰减模式建立在非持久性污染物质在水体中随时间的变化而发生沉降、吸附、分解和转化机理之上, 因此它只能模拟污染物质的衰减过程。衰减系

数的含义就是污染物质在单位时间(1 d)内质量浓度减少的比例。而悬浮物在水体中的运动比较复杂,并不像常规非持久性污染物质一样为单向衰减。悬浮物颗粒在重力作用下发生沉降,而在水流紊动切应力作用下又上扬。泥沙的悬浮与沉降主要取决于这2种力的对比关系,当紊动应力大于重力,则水中悬浮物不但不沉降,河床表面的细颗粒泥沙还会被冲刷进入水体;反之亦然。张瑞瑾^[3]根据“制紊假说”和“重力理论”提出水流挟沙力的概念,并以此为基础建立了一维泥沙运动方程:

$$A \frac{\partial S}{\partial t} + Q \frac{\partial S}{\partial x} = -\alpha Bw(S - S_*) + S_p \quad (2)$$

其中

$$w = \sqrt{\left(13.95 \frac{\nu}{d}\right)^2 + 1.09gd \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} - 13.95 \frac{\nu}{d} \quad (3)$$

$$S_* = k \left(\frac{U^3}{ghw} \right)^m \quad (4)$$

式中: S 为含沙量; Q 为流量; B 为水面宽度; α 为泥沙恢复饱和系数; w 和 S_* 分别为泥沙沉降速度和挟沙力; ν 为水的动力黏滞系数; d 为泥沙粒径; ρ_s 为泥沙密度; ρ 为水的密度; g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; h 为断面平均水深; k 和 m 为水流挟沙力系数,需根据实测资料率定或由设计部门提供。

泥沙模型建立在水流对泥沙作用力基础之上,一般认为,一定水流和泥沙条件下水流能携带的泥沙量为定值,这个定值就称为挟沙力^[3]。当水中含沙量大于挟沙力时,水中泥沙处于超饱和状态,泥沙会发生沉降;反之就会悬浮。模型应既能模拟SS的衰减过程,又可模拟SS的悬浮过程,从物理机理上讲,采用泥沙模型模拟悬浮物比衰减模型更具有科学性和代表性。

2 泥沙模型模拟疏浚悬浮物的处理方法与求解格式

泥沙模型的求解建立在水动力模型基础之上,水动力模型的控制方程为圣维南方程,其求解方法一般采用Preissmann格式和追赶法求解^[4-6]。泥沙模型的求解一般采用迎风格式,求解步骤参考文献[7-8]。施工活动导致的泥沙再悬浮量可在模型中反映为源项,但如果施工作业点下游采用防泥幕帘后,断面的SS质量浓度会骤然变小,目前没有合适的辅助方程来刻画该过程,笔者提出采用附加“汇”的办法模拟防泥幕帘对泥沙的拦截作用。即在方程(2)中,当描述施工再悬浮泥沙对SS的影响时, S_p 为正;当描述防泥幕帘对SS的影响时, S_p 为负。将

“源”和“汇”分别附加到相应的网格上,就能很好地模拟施工活动对SS质量浓度的影响。方程(2)离散后可得到如下形式的代数方程组(式(5)(6)):

当水流为顺流时

$$\alpha_j S_{j-1}^{n+1} + \beta_j S_j^{n+1} = D_j \quad (5)$$

当水流为逆流时

$$\xi_j S_j^{n+1} + \zeta_j S_{j+1}^{n+1} = O_j \quad (6)$$

式中: $\alpha_j, \beta_j, D_j, \xi_j, \zeta_j, O_j$ 为离散系数。反映“源”和“汇”的 S_p 包含在 D_j 和 O_j 中。

该代数方程的求解视水流流态的不同有4种不同的求解模式。当水流为全顺流时,给定上游泥沙边界条件,递推求解;当水流为全逆流时,给定下游泥沙边界条件,逆推求解;当水流为顺逆流时,找出流速转折点,分2段分别按全顺流和全逆流求解;当水流为逆顺流时,找出转折点,同时确定转折点处的含沙量,分2段分别按全逆流和全顺流求解。求解过程可参考文献[9]。

3 模型在工程中的应用

深圳河是深圳经济特区与香港特别行政区的界河。为提高深圳河的防洪能力,深港双方于1995—2007年完成治理深圳河第1~3期工程,目前第4期工程正处于工程可行性研究阶段,需要对工程的环境影响进行评价。工程主体施工为拓宽、挖深平原河口—长岭村共4.465 km长的河道,河道内土方开挖量约40万 m^3 ,主要环境影响为涉水工程导致SS显著升高。深圳河地理位置及模型模拟范围见图1。根据相关文献类比分析,采用开放式抓斗施工时的泥沙再悬浮速率为 $0.193 \text{ kg/s}^{[10]}$ 。

分别采用2007年1月和8月的水文泥沙资料作为泥沙模型雨季和旱季预测工况的边界条件。采用2009年的实测地形作为模型的地形资料,泥沙粒径采用中值粒径 $d_{50} = 0.017 \text{ mm}$ 。模拟罗芳村附近施工时不同工况下深圳河SS质量浓度的沿程分布见图2。

将“废弃物排放不得致使自然环境的悬浮物水平升高30%”^[10]作为评判施工作业点上游500 m和下游1000 m处SS的增加是否会对河流水环境造成不可接受的影响的依据。第4期工程河段不受潮汐影响,水流为单向流,因此施工再悬浮泥沙对深圳河SS的影响仅局限于作业点下游河段。模型计算结果表明,施工作业点处的SS质量浓度显著增加,但由于水流挟沙能力的控制,泥沙迅速沉降。在旱季,施工点下游1000 m处的SS质量浓度增加10.0%;在雨季施工点下游1000 m处的SS质量浓度增加22.7%。为减少施工活动对深圳河水质的影响,开

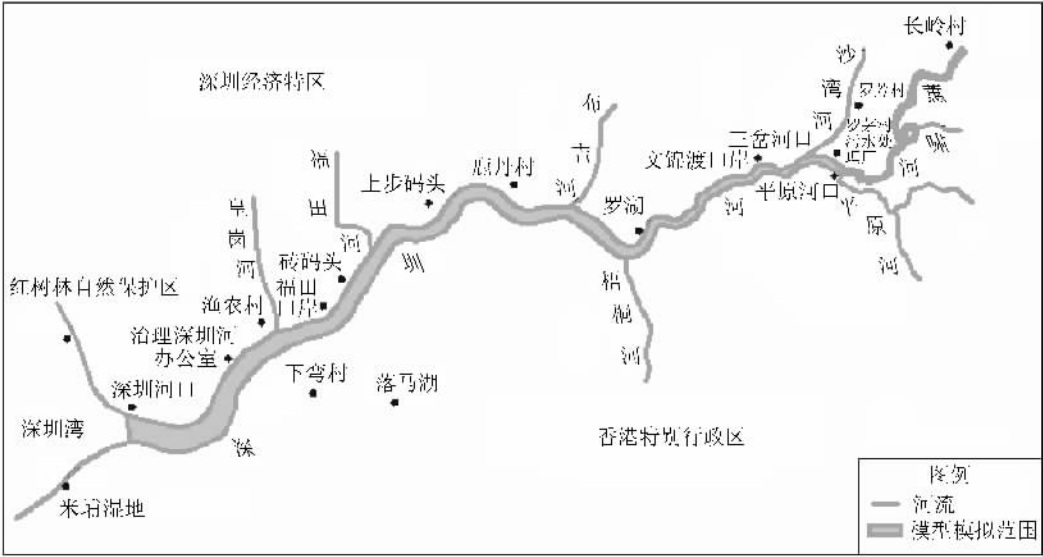


图 1 深圳河地理位置及模型模拟范围示意图

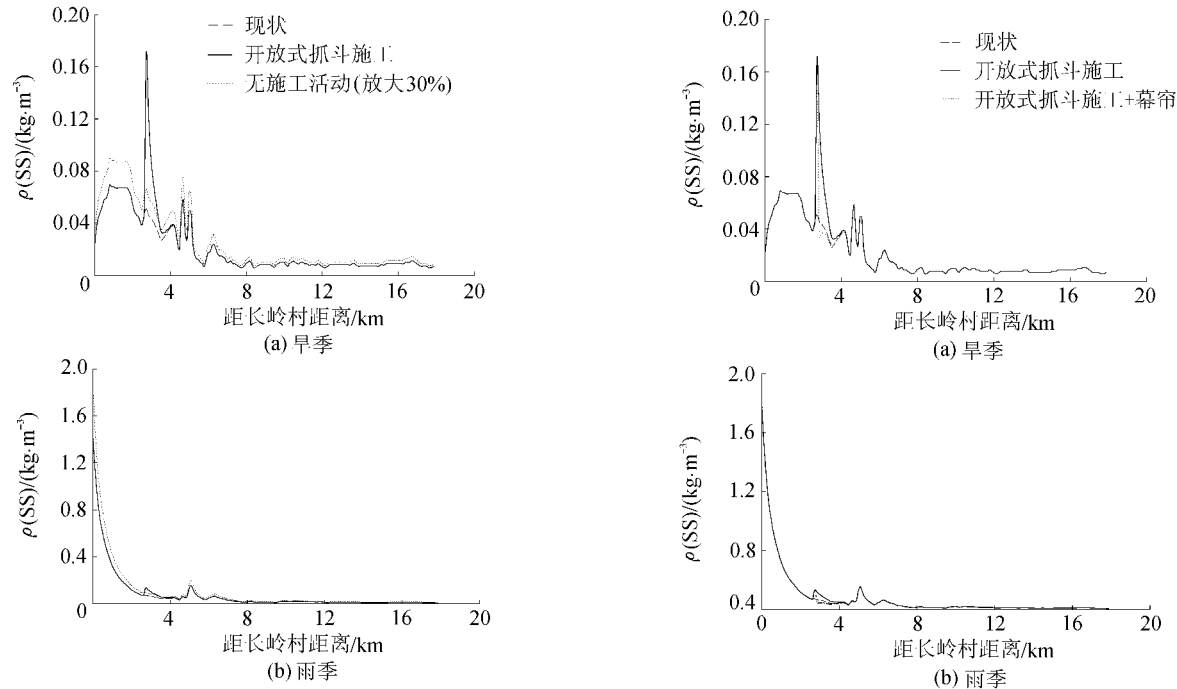


图 2 采用实测地形资料模拟罗芳村附近施工时深圳河 SS 质量浓度沿程分布

图 4 采用防泥幕帘布设方案罗芳村附近施工时深圳河 SS 质量浓度沿程分布

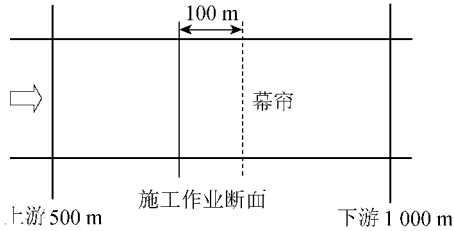


图 3 防泥幕帘布设方案示意图

开放式抓斗施工时在下游 100 m 处布设防泥幕帘,以拦截悬浮泥沙。防泥幕帘的布设方案见图 3。采用防泥幕帘以后,不同工况下深圳河 SS 质量浓度的沿程分布见图 4。

质量浓度急剧减少,然后迅速恢复至其背景浓度。特别从图 4(b)中可以看出,由于防泥幕帘的拦截,幕帘下游部分断面的 SS 质量浓度甚至小于其背景值,但由于床面泥沙冲刷补给,又恢复至其背景值,这种情况符合泥沙在水流中运动的真实情形,采用泥沙模型模拟 SS 质量浓度比衰减模式更能反映泥沙的运动状况。根据泥沙模型计算结果统计,增加防泥幕帘后旱季施工点下游 1000 m 处的 SS 质量浓度不增加,雨季施工点下游 1000 m 处的 SS 质量浓度降低,11.36%。

由图 4 可以看出,设置防泥幕帘后,水中的 SS

(下转第 49 页)

本消除上弯段弯道效应对压力分布的影响。

3 结 语

通过测量与引水道、尾水道上弯段毗邻的门井段流速分布,揭示了上弯段弯道效应对流速分布的影响,通过测量沿引水道上弯段圆周测压管水头,揭示了上弯段弯道效应对压力分布的影响,对位于铅直平面内的上弯段弯道效应有如下结论:①将水流推向边壁,加大了近壁流速;②管道中心流速分布呈扭曲状,有别于顺直管道流速分布形态;③过渡段长度 $L=5.0D$ 时,流速分布形态可以符合顺直管道流动特性,流速分布基本无弯道效应影响;④过渡段长度 $L=7.0D$ 时,时均压力分布符合顺直管道流动特性,压力分布基本无弯道效应影响。

通过对响水涧抽水蓄能电站引、尾水道上弯段水力特性进行研究,明确了避免弯道效应的过渡段长度,给工程设计带来了便利,研究成果已用于响水涧工程设计。本文的研究基于原型压力管道内平均流速 $4\sim 5\text{ m/s}$ 左右,当弯道内流速增加后上述结论是否成立有待后续研究做出判断。

致谢:上海勘测设计研究院响水涧抽水蓄能电站项目部总工程师肖贡元教授级高工对本项研究提出了许多建议,在此表示诚挚的谢意。

(上接第 10 页)

4 结 语

水流中悬浮物的运动状态既可能是沉降也可能是上扬,衰减模型难以真实地反映 SS 质量浓度的沿程变化,因此采用衰减模型预测疏浚施工时 SS 对环境的影响并不合理。笔者提出采用泥沙模型预测疏浚施工时 SS 对水环境的影响,通过附加“汇”的方法模拟防泥幕帘的拦泥效果,可反映泥沙运动的真实情形,物理意义更加明确。将该模型运用于治理深圳河第 4 期工程的环境影响评价中,效果较好。

参考文献:

[1] 贾怡然,孙英兰,张学庆.港池疏浚过程悬浮物影响预测研究及应用[J].港工技术,2007(3):3-5.
[2] 邹家祥.环境影响评价技术手册.水利水电工程[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
[3] 张瑞瑾.河流泥沙运动力学[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1998.

参考文献:

[1] 清华大学水力学教研组.水力学(上册)[M].北京:人民教育出版社,1979.
[2] 柴恭纯,马萍章.单项涡旋内消能工的试验研究(二)[R].南京:南京水利科学研究院,1993.
[3] 谭颖.抽水蓄能电站取水口水力学的基本问题[R].北京:水利水电勘测设计院,水利电力部北京勘测设计院,1988.
[4] 张兰丁.抽水蓄能电站侧式进/出水口水力学问题研究[R].南京:南京水利科学研究院,2003.
[5] 张兰丁.琅琊山抽水蓄能电站上、下库进/出水口模型试验研究总报告[R].南京:南京水利科学研究院,1995.
[6] 张兰丁.响水涧抽水蓄能电站下库进/出水口水工模型试验研究(上册)[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
[7] 张兰丁.响水涧抽水蓄能电站下库进/出水口水工模型试验研究(下册)[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
[8] 张兰丁.响水涧抽水蓄能电站上库进/出水口体型验证试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2009.

(收稿日期 2010-01-05 编辑:方宇彤)

[4] 辛小康,刘刚,张向东,等.基于遗传优化的河网数学模型糙率参数反演[J].水利水电科技进展,2009,29(6):21-24.
[5] MU Jing-bin,ZHANG Xiao-feng. Real time flood forecasting method with 1-D unsteady flow model[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B,2007,19(2):150-154.
[6] ZHANG Ming-liang,SHEN Yong-ming. Study and application of steady flow and unsteady flow mathematical model for channel network[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B,2007,19(5):572-578.
[7] 张丽春,方红卫,府仁寿.一维非恒定均匀泥沙数学模型研究[J].泥沙研究,1998(3):81-85.
[8] 张蔚.河网与河口地区耦合模型研究及应用[D].南京:河海大学,2006.
[9] 诸裕良,严以新,贾良文,等.一维河网非恒定流及悬沙数学模型的节点控制法[J].水动力研究与进展:A辑,2001,16(4):503-510.
[10] 长江水资源保护科学研究所.治理深圳河第四期工程环境影响评估报告[R].武汉:长江水资源保护科学研究所,2000.

(收稿日期 2010-07-14 编辑:高建群)