

三维水沙模型在永定河河势分析中的应用

韩凤霞¹, 何国建^{2,3}, 方红卫^{2,3}

(1. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084;

3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:为了检验永定河现状治导工程能否有效控制河势, 采用 CREST 三维水沙数值模拟系统模拟分析河势走向、水沙浓度以及河床变形。根据永定河卢梁段河流泥沙和河床变化特征, 引入合理床面悬移质平衡输沙浓度、推移质平衡输沙率以及平面分配系数, 建立永定河卢梁段三维水沙模型并进行河床变形验证; 模拟分析了河道流速场分布、悬沙浓度分布及河床变形规律, 以及现状治导工程在控导河势方面发挥的作用, 得到了河道环流、丁坝头绕流等复杂水流规律, 并对游荡型河道流势、流向和顶冲点位置以及洪水主槽冲刷、边滩丁坝保护区淤积情况进行了预测。分析结果表明, 河道治导工程在控制河势方面依然起到主导作用, 部分丁坝坝顶受漫流冲刷破坏, 局部河道需要添加少量短丁坝以巩固堤防安全。

关键词: 三维水沙模型; 平衡输沙率; 河势; 河床变形; 治导工程; 永定河

中图分类号: TV143⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2014)06-0056-06

Application of three-dimensional flow-sediment model in flood control planning of Yongding River//HAN Fengxia¹, HE Guojian^{2,3}, FANG Hongwei^{2,3} (1. *Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China*; 2. *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: In order to examine whether the training structures could effectively control the river regime or not, a three-dimensional (3D) model CREST is applied to analyze the river regime trend, sediment transportation, and river bed deformation of Yongding River. According to the characteristics of sediment and riverbed variation of Lu-Liang section of Yongding River, a 3D numerical model is set up with a proper equilibrium concentration of suspended load, the bedload transport rate, and plane partition coefficient. The model is calibrated by bed deformation. Then, the rule of training structures played in controlling the river regime is studied by simulating the velocity field, the sediment concentration distribution and bed deformation. As a result, complex flow laws of the vortex and the spur dike flow are obtained. Additionally, the flow tendency, flow direction, scouring point location, erosion in main channel due to flood, and deposition owing to spur dike protection are predicted. The 3D numerical model is applied to simulate the river regime variation, sediment transport, and bed deformation of Yongding River. The results show that long spur dikes control the river regime, and some of them are suffered from overflow and local scour on the head. For levee safety, short groins need to be added to some local river banks where the erosion often happened.

Key words: three-dimensional flow-sediment model; equilibrium transport rate; river regime; riverbed variation; training structure; Yongding River

绝大多数天然河道流动具有三维特性, 尤其工程近区泥沙运动及物质输移具有强烈的三维特性, 因此, 仅仅考虑一维和二维数学模型已不能满足工程实践要求。随着计算机及网络技术的发展、相关数学模型理论的完善以及工程实践要求的提高, 三维数学模型在水利、泥沙和环境领域的应用更加广泛, 也逐步走向成熟。

泥沙三维数学模型起步于 20 世纪 80 年代, 其

研究精度在很大程度上依赖于河床表面条件的选取, 90 年代以后, 三维水沙模型得到了迅速发展。Shimizu 等^[1]在假设垂线方向流速为对数分布的基础上建立了简化三维模型, 用于弯道水槽动床试验计算中, 并将结果与二维模型计算值进行了比较分析; Olsen 等^[2-3]模拟了圆柱绕流的最大冲刷坑问题, 利用 $k-\varepsilon$ 紊流模型求解 N-S 方程, 得到床面剪切力, 然后根据床面剪切力与床面上泥沙浓度关系计算泥

沙输移扩散方程,并利用该方法模拟了沉沙池床面变化情况;Wang 等^[4]发展了一个三维泥沙数学模型,该模型采用有限元离散,计算过程采用静压假定,模型可以模拟冲积河流中水流、泥沙运动和河床地形变化,特别适用于模拟桥墩附近局部冲刷问题;Gessler 等^[5]利用美国工程兵团的三维模型 CH3D-SED 计算了密西西比河下游弯道河流泥沙输运过程,预测了深挖航道工程对河道冲淤的影响;Li 等^[6]利用考虑了浮力作用的 $k-\varepsilon$ 紊流模型计算了泥沙在不同水流条件下的沉积形态;Wu 等^[7]在 Zhu^[8]开发的水动力学模型基础上,添加泥沙输运和河床变形计算,建立了一个河道水沙运动三维数学模型,该模型使用了基于二维泊松方程求解自由水面,通过求解悬沙输运方程计算悬沙浓度,推移质输运采用非平衡输沙模式计算方法,通过泥沙连续方程计算出河床变形。

国内在三维水沙模型研究上也做了大量工作。Fang 等^[9-10]考虑了非饱和悬移质计算模式和全沙模式,并在永定河河床变形模拟中对平衡输沙和非平衡输沙模式进行了比较^[10];方红卫^[11]研究了天然水沙条件下变密度紊流在一般曲线坐标系中的基本方程和边界条件,并计算了浮运沉井施工期三维冲刷问题;Fang 等^[12]利用有限分析方法求解非正交曲线网格上水流泥沙输运方程,模拟了三峡工程坝区 1976 年以来水库冲淤规律;陆永军等^[13]根据紊流随机理论,利用壁函数模拟了葛洲坝水利枢纽修建前后水沙变化以及三峡工程坝区泥沙冲淤规律;夏云峰^[14]建立了基于 $k-\varepsilon$ 模式的三维水沙模型,模拟了天然河道长江南京大胜关至西坝分汉河段水流流速分布、泥沙浓度分布及汉道冲淤情况等;假冬冬等^[15]建立了考虑黏性河岸变形的三维水沙模型,将崩岸模型与局部网格可动技术相结合,重现了弯道实验中河道摆动过程;吴修广等^[16]基于 FVCOM 模型模拟了杭州湾大潮期间泥沙输运过程,对涉水建筑物附近三维水沙影响进行了分析评估。

三维水沙模型是完整模拟流体运动以及泥沙输运和河床变形的工具,但由于目前水沙输移理论体系尚不完善,还缺乏普遍适用的统一标准,不同研究者建立的三维水沙模型各有特点,数值求解方法各不相同。这些模型在一定条件下针对工程问题都可以取得满足要求的结果,具有一定的理论价值和工程应用价值,同时又都存在一定的局限性。因此,对已有模型进行分析,不断补充完善,提高精度,扩大应用范围是发展三维水沙模型研究的有效途径。本文是在前人工作基础上,针对研究区域水沙特征,选取合适的三维水沙模型及离散方法,对永定河卢沟

桥至梁各庄段水沙输移及河床变形进行模拟,分析百年一遇洪水条件下,水面变化、流势分布以及河床变化情况,为永定河河势分析提供技术支撑。

1 研究区域特征

永定河是对北京市防洪威胁最大的一条河,为季节性河流,夏季洪水陡涨陡落,含沙量高,尤其中游河道具有冲刷和强烈堆积并存的游荡性。永定河在北京境内的卢沟桥至梁各庄段河道(以下简称卢梁段)长约 60 km,河道两岸堤距 220 ~ 2 600 m,宽窄变化较大,河床粒径约 2 mm,悬沙中值粒径约为 0.05 mm。由于两岸堤防及河床多为砂(沙)质,冲淤不稳,中泓游荡,险工往往上提下错,洪水期间险情迭出,历来是北京市防汛重点之一。

为了治理永定河洪灾,1959—1961 年根据卢梁段河道特点以及“三固一束”规划治理原则(固定险工,以改善和解决永定河防洪问题;固定河槽,以保障行洪顺畅;固定滩地,以防止滩地显没无常;束窄河道,以使河槽逐渐刷深)实施了治导工程。为了控制河势和保护堤防,沿河道两侧修建了大量丁坝和丁坝群。图 1 为该河段中金门闸至阎家铺段全长约 13 km 的地形图,两岸共有丁坝 26 座(图中长短实线为丁坝)。由图 1 可见,该段河道宽窄不一,深槽和浅滩相互交错,丁坝群与单个长丁坝相互呼应,地形极为复杂,水沙输移具有强烈的三维特性。

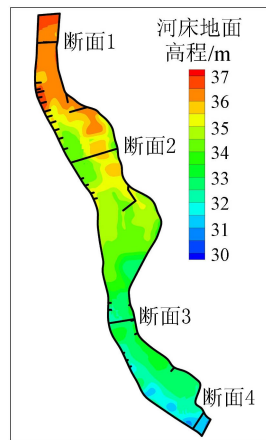


图 1 永定河计算区域地形和断面布设

2 模型原理及主要参数

本研究水沙模拟计算采用清华大学研制的 CREST 三维水沙数值模拟系统。三维水沙模型关键在于选取合适的泥沙输移模型及边界条件,水动力学模块采用标准 N-S 方程耦合 $k-\varepsilon$ 紊流模型求解,在同位网格下利用 SIMPLE 算法求解。

2.1 悬移质输移

研究河段内悬沙浓度较小,不足以影响水流密

度,因而在悬移质控制方程中不考虑密度变化。悬移质泥沙浓度控制方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\omega_s \delta_{\beta} c) \quad (1)$$

式中: σ_c 为紊动 Schmidt 数; u_j 为水流三维方向上的流速; ω_s 为泥沙颗粒沉降速度。

水面处悬移质通量为零,其浓度 c_n 由下一层网格点浓度 c_{n-1} 通过指数关系求得。床面上泥沙浓度作为求解的一个边界条件,是正确求解悬沙浓度场的重要因素;已知床面上一层单元网格点含沙量 c_2 ,得到床面附近含沙量 c_b :

$$c_b = c_2 + c_{b*} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{\omega_s \sigma_c}{\nu_t} (z_2 - b) \right] \right\} \quad (2)$$

式中: c_{b*} 为床面附近的悬移质平衡输沙浓度; b 为床面泥沙交换层厚度,Einstein 认为 $b = 2D_{50}^{[17]}$,本文在河道计算中取为 0.02 倍水深,即 $b = 0.02h$ 。

对于 c_{b*} 的计算方法, van Rijn^[18] 于 1984 年在床面单个颗粒受力分析的基础上,推出床面上一点悬移质平衡输沙浓度 $c_{b*} = 0.015 \frac{d_{50}^{1.5}}{aD_*^{0.3}}$,其中 D_* 为泥沙颗粒特性参数, T 为输运状态参数。这一公式后来得到了广泛应用,但当颗粒粒径较小、浓度较大时,尤其是天然河道河床床面形态复杂、悬移质和推移质交换频繁情况下,对单个颗粒受力分析得出的公式往往存在较大误差,有时甚至会导致错误计算结果,因而许多学者直接根据水流条件,凭借大量数据回归分析,经验得出垂向平均挟沙力和水流流速关系,代表公式有张瑞瑾公式 $c_* = k \left(\frac{U^3}{gR\omega_s} \right)^m$ 、李义天公式 $c_* = k \left(0.1 + 90 \frac{\omega_s}{U} \right) \frac{U^3}{gR\omega_s}$ 等^[19],其中 c_* 为垂线平均平衡输沙浓度, U 为垂线平均流速。三维计算中,可利用沿水深平均的平衡输沙浓度和泥沙浓度沿垂线分布公式得到床面上平衡输沙浓度,即

$$c_{b*} = c_* / \int_{\eta_a}^{\eta_b} \exp \left\{ \frac{\omega}{ku_*} [f(\eta) - f(\eta_a)] \right\} d\eta \quad (3)$$

其中 $\eta = 1 - z/h$

式中: $f(\eta)$ 为含沙量沿垂线分布函数; η_a 和 η_b 分别为距离床面和水面相对位置。

2.2 推移质输移

清水冲刷河床粗化过程中,由于进口断面没有来沙,水流就要从河床中补充泥沙,冲刷河床,水流和河床之间通过泥沙交换趋向平衡,使得下游断面输沙率要大于上游断面输沙率,这就是推移质不平衡输移的表现。将推移质不平衡输沙方程推广到平面二维情况:

$$\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = \frac{1}{L_s} (q_{b*} - q_b) \quad (4)$$

其中

$$q_{bx} = \alpha_{bx} q_b \quad q_{by} = \alpha_{by} q_b$$

式中: q_b 和 q_{b*} 分别为推移质输沙率和平平衡输沙率; q_{bx} 和 q_{by} 为 q_b 在 x, y 方向的分量; α_{bx} 和 α_{by} 分别为垂线平均流速和河床切应力的方向系数; L_s 为不平衡输沙长度,取为 $\sqrt{\Delta x \Delta y}$ 。

对推移质平衡输沙率 q_{b*} ,各研究学者在不同理论上提出了大量计算公式,具有代表性的有 Meyer-Peter 公式、Bagnold 公式、Einstein 公式、Yalin 公式、Engelund 公式以及 Achters-White 公式等;钱宁等^[20] 对各家计算公式进行了分析统计和说明。根据公式适用范围以及数值计算的可操作性,本文采用 van Rijn 提出的公式^[18]:

$$q_{b*} = 0.053 \sqrt{(s-1)g} \frac{d_{50}^{1.5} T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \quad (5)$$

其中

$$D_* = d_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

$$T = (u_*'^2 - u_{*c}^2) / u_{*c}^2$$

$$u_*' = \frac{u\sqrt{g}}{C'} \quad C' = 18 \lg \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right)$$

式中: d_{50} 为中值粒径; u_{*c} 为床面临界剪切速率,可由 Shields 曲线获得。

推移质输沙率在平面二维方向上分配系数计算公式通常采用 $\alpha_{bx} = u / \sqrt{u^2 + v^2}$, $\alpha_{by} = v / \sqrt{u^2 + v^2}$,该计算公式是基于水平床面试验结果推导而得到的,不能正确反映河床坡度和不同水流方向对推移质输沙率的影响。在河床复杂、起伏变化较大情况下,局部河床横向及纵向坡度对推移质输沙率有着较大影响,需要考虑地形坡度的影响,令:

$$\frac{q_{bx}}{q_{by}} = \frac{\sin \theta_b - \beta \frac{\partial z_b}{\partial x}}{\cos \theta_b - \beta \frac{\partial z_b}{\partial y}} \quad (6)$$

其中

$$\beta = \beta^* (\tau_{bc} / \tau_b)^m$$

式中: $\frac{\partial z_b}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ 为河床坡度; θ_b 为床面附近切应力方向与 y 轴夹角, $\theta_b = \tan^{-1} (\tau_{bx} / \tau_{by})$; τ_b 、 τ_{bc} 分别为拖曳力和起动拖曳力。对于 β^* 和 m ,不同研究人员采用值也不一样,本文采用 $\beta^* = 1/1.5\tau_c^*$, $m = 1$ ^[21]。

2.3 河床变形

根据质量守恒原理,某一点河床变形等于该点处泥沙进出通量差:

$$\rho_s' \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{\partial (q_{bx} + q_{sx})}{\partial x} + \frac{\partial (q_{by} + q_{sy})}{\partial y} \quad (7)$$

式中: ρ_s' 为泥沙的干密度; q_{sx} 和 q_{sy} 为该点水柱内悬沙通量,经过积分得

$$q_{sx} = \int_{\delta_b}^h \left(uc - \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial x} \right) dz \quad q_{sy} = \int_{\delta_b}^h \left(vc - \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial y} \right) dz \quad (8)$$

其中 δ_b 为床面粗糙层高度。

3 模型验证及结果分析

治理永定河卢梁段这样的游荡型河道,主要任务就是分析河势变化情况,并采取适当措施进行控制;只有河势得到了一定的控制,主流才能比较稳定,游荡程度才会有所减弱。最近几十年,永定河河道上游来水来沙条件发生了较大变化,为了检验现状丁坝能否有效控制河势,并分析判断是否需要新设丁坝巩固堤防安全,根据前面建立的三维水沙数学模型(以下简称本文模型),对该河段河势走向、水沙浓度以及河床变形进行模拟。由于自永定河治导工程实施以来,永定河基本未再发生较大洪水,无实际资料可供验证;本研究利用北京市水利科学研究所完成的动床河势物理模型试验对模型进行率定验证^[22],该物理模型试验平面比尺为 500,垂直比尺为 60,采用电木粉作为模型沙,密度为 1.45 t/m^3 ,中值粒径为 0.1 mm 。对应物理模型试验条件,选用标准洪水洪峰流量 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、来水悬移质浓度 3 kg/m^3 作为边界条件。

3.1 河床变形验证

图 2 为沿程 4 个断面本文模型冲淤计算值与北京市水利科学研究所物理模型试验值对比,可见计算值与试验值拟合较好,表明本文模型能够反映河床变形的实际情况。

3.2 流速场分布

该河段河势的控制、险工位置的固定,除了有赖于护岸工程外,还与滩地能否得到保护有关。长短

丁坝所形成的“凸出”和“凹入”型险工分别具有以下特点:凸出型险工外形比较显著地凸出河中,有着显著的挑流作用,能将主流挑向对岸预定部位;如果靠溜长度较长,则水流能顺着险工岸线流动,出水方向比较固定,还能起到导流作用。凹入型险工外形为凹入的弧形,有如弯道凹岸;这类险工经常靠溜,且靠溜范围较长,变化小,水流经过险工后,出水方向颇为稳定,能顺着凹岸弧线平顺地流出,既能迎托水流,又能导引水流,在控制河势方面比平顺型和凸出型相对都好。

通过本文模型计算得到该区域丁坝控制下的流速和流线分布如图 3 所示,可以看出,长丁坝坝身较长而突入河中,挑托主流离开堤岸,以掩护下游堤岸不受冲刷;短坝略呈下挑式,迎托水流,消减水势,减轻急流对堤岸冲刷。长丁坝起到控制河势作用,主流被控制在河道中间,险工处短丁坝群则起到保护堤岸的作用。图 4 为局部河道流场图,可见长丁坝控制河势处流速较大,特别是丁坝头部绕流流速大;丁坝群附近、两个丁坝之间水流形成漩涡。

3.3 悬沙浓度分布

根据悬沙输运对流扩散方程,即可进一步计算出悬沙浓度的三维分布规律。本文使用的模型模式已经成功用于多种复杂区域的泥沙输移及河床变形计算,如三峡水库、德国易北河等(具体见文献[9, 12]等),从河床变形的数据对比也可看出本文模型适用于永定河的水沙计算。图 5 分别为沿垂向深度 $0.1H$ 、 $0.4H$ 、 $0.7H$ (H 为总水深) 和水面表面 4 层的悬沙浓度(质量浓度)平面分布。

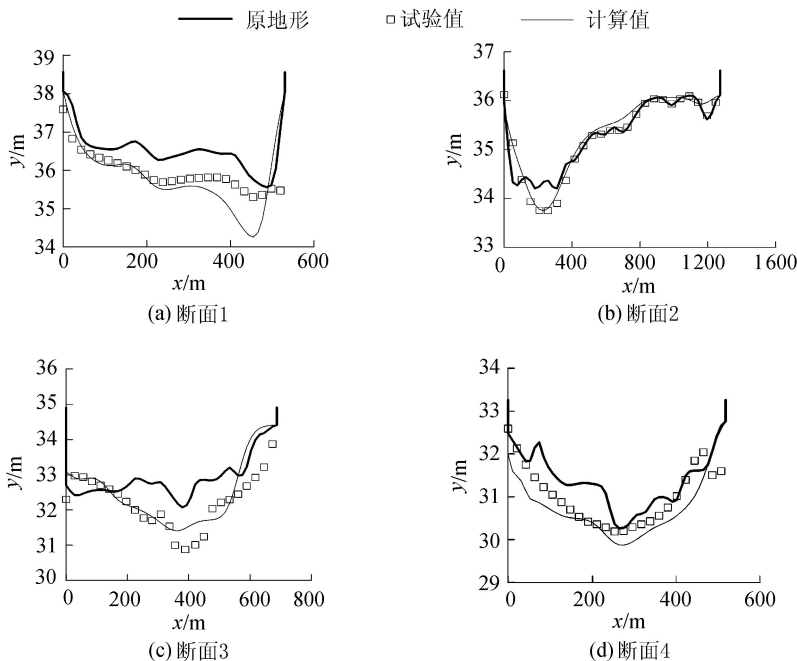


图 2 河床变形计算值与试验值对比

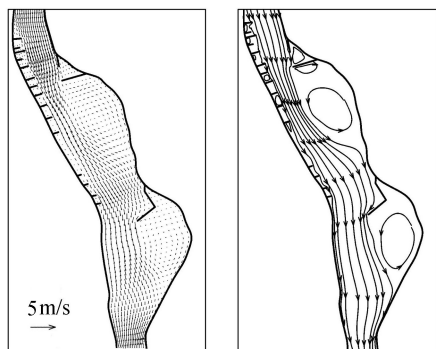


图3 流量 $2500\text{ m}^3/\text{s}$ 时河道流速和流线分布

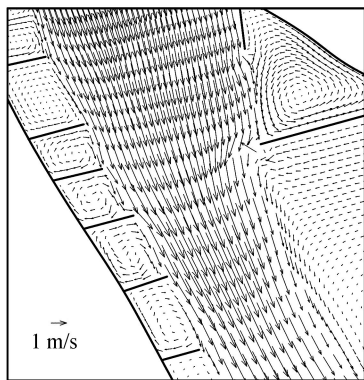


图4 局部河道流场

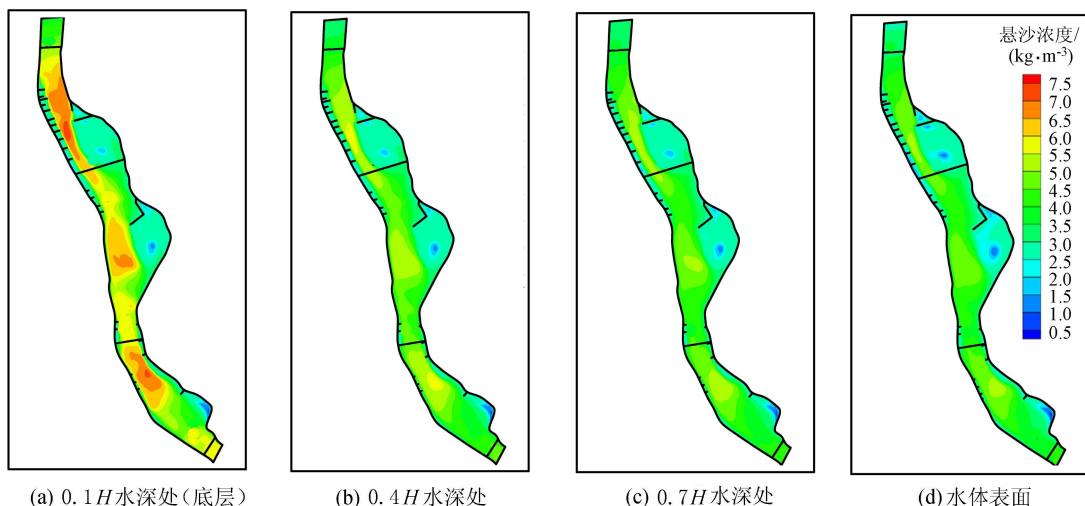


图5 不同深度悬沙浓度平面分布

从图5可以看出,在垂向分布上,由于重力和浓度梯度扩散的共同作用,悬沙浓度从水体表层到水体底层浓度逐渐增加,符合悬移质泥沙输移一般规律。同时从滩、槽部位泥沙分布来看,主槽是泥沙输移主要区域,如断面2,其滩面泥沙浓度不到主槽泥沙浓度一半,主槽中由于河势影响还伴有螺旋流输沙现象。

从同水深处平面悬沙浓度分布可见:无论是在长丁坝还是短丁坝群挑流处,由于丁坝控制主流区域流速较大,易发生冲刷,使水体含沙量较高,而在受长丁坝保护的边滩及短丁坝群内有较多漩涡,泥沙易发生淤积,水体中含沙量较小,这也是河流洪水期典型的刷槽淤滩自然现象。

3.4 河床变形

图6为洪水期间整个区域河床冲淤分布图。由图6可见,河床冲刷主要发生在两处,一处是河道主槽区域,除了在下游局部河段外,沿程主槽均发生冲刷,平均冲刷接近 50 cm ;第二处为丁坝头部,该处由于挑流作用导致局部流速较大,长丁坝头处冲深均在 1 m 以上。因此永定河发生 $2500\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水(相当于百年一遇)情况下,在做好堤防防护的同时,还应注意丁坝头的保护。从图6还可见:受丁坝保护的边滩区域泥沙落淤,淤积厚度一般在 30 cm

以内;这些淤积物保护了堤岸使其免受冲刷,但淤积在滩面的泥沙一般难以重新被冲入主槽;洪水后期如果主槽也发生淤积,则将减少河道过流断面面积,对防洪不利。

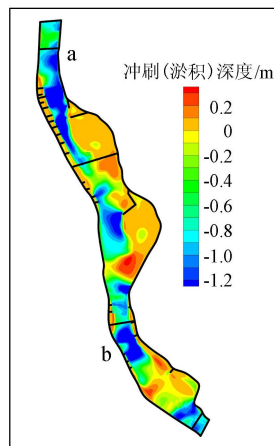


图6 河床冲淤分布

由上述水流流速分布、泥沙浓度分布等计算结果分析可知,目前该河段丁坝及丁坝群在控制河势方面仍然起到了主导作用,与过去相比河势规律没有发生大变化,长丁坝和短丁坝群仍然是主流靠溜处,丁坝依然是保护堤防和导引水流的主要水工建筑物。

但在某些局部河段,由于洪水来流能量较大,靠近边坡处仍会发生冲刷现象,例如图6中a、b两处,需要添加少量短丁坝,以起到保护该处堤防的作用。

4 结 论

a. 在永定河河势变化分析上,获得了河道横流、斜流以及平面环流、三维环流、丁坝头绕流等复杂水流规律,预测分析了游荡型河道流势、水流流向和顶冲点位置等。

b. 在泥沙输运上,得到了平面及垂向悬移质浓度的分布规律,结合河床冲淤特征,再现了洪水主槽冲刷、边滩丁坝保护区淤积的现象。

c. 模型模拟的流速场和流势等分析结果显示,该段河道治导工程在控制河势方面依然起到主导作用,部分丁坝坝顶受漫流冲刷破坏,局部河道需要添加少量短丁坝以巩固堤防安全。

参考文献:

[1] SHIMIZU Y, YAMAGUCHI H, ITAKURA T. Three-dimensional computation of flow and bed deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(9): 1090-1109.

[2] OLSEN N R B, KJELLESVIG H M. Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(4): 579-590.

[3] OLSEN N R B, KJELLESVIG H M. Three-dimensional numerical modeling of bed changes in a sand trap[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(2): 189-198.

[4] WANG S Y, JIA Y. Computational modelling and hydroscience research: advance in hydro-science and engineering [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Hydro-Science and Engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 2147-2157.

[5] GESSLER D, HALL B, SPASOJEVIC M, et al. Application of 3D mobile bed, hydrodynamic[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(7): 737-749.

[6] LI C W, MA F X. 3D numerical simulation of deposition patterns and sand disposal in flowing water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(3): 209-218.

[7] WU W M, RODI W, WENKA T. 3-D calculations of flow and sediment transport in rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(1): 4-15.

[8] ZHU J. An introduction and guide to the computer program FAST3D [R]. Karlsruhe, Germany: University of Karlsruhe, 1992.

[9] FANG H W, RODI W. Three-dimensional calculations of flow and suspended sediment transport in the neighborhood

of the dam for the Three Gorges Project (TGP) reservoir in the Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(4): 379-394.

[10] FANG H W, HE G J, WANG L X. Influence of vertical resolution and nonequilibrium model on three-dimensional calculations of flow and sediment transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2010, 136(2): 122-128.

[11] 方红卫. 浮运沉井施工期三维冲刷的数值模拟[J]. 中国科学: A 辑, 1995, 25(1): 107-112. (FANG Hongwei. Numerical simulation of three-dimensional erosion in floating caisson construction[J]. Science in China: Ser A, 1995, 25(1): 107-112. (in Chinese))

[12] FANG H W, WANG G Q. Three-dimensional mathematical model of suspended-Sediment transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(8): 578-592.

[13] 陆永军, 窦国仁, 韩龙喜, 等. 三维紊流悬沙数学模型及应用[J]. 中国科学: E 辑, 2004, 34(3): 311-328. (LU Yongjun, DOU Guoren, HAN Longxi, et al. Three-dimensional mathematical model of suspended load and its application[J]. Science in China: Ser E, 2004, 34(3): 311-328. (in Chinese))

[14] 夏云峰. 感潮河道三维水流泥沙数值模型研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2002.

[15] 假冬冬, 邵学军, 王虹, 等. 考虑河岸变形的三维水沙数值模拟研究[J]. 水科学进展, 2009(3): 311-317. (JIA Dongdong, SHAO Xuejun, WANG Hong, et al. 3D mathematical modeling for fluvial processes considering bank erosion[J]. Advances in Water Science, 2009(3): 311-317. (in Chinese))

[16] 吴修广, 刘光生, 程文龙. 基于 FVCOM 的杭州湾三维泥沙数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2011(4): 86-96. (WU Xiuguang, LIU Guangsheng, CHENG Wenlong. 3D numerical simulation of sediment in the Hangzhou Bay based on FVCOM [J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(4): 86-96. (in Chinese))

[17] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[18] van RIJN L C. Sediment transport, part I: bed load transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(10): 1431-1456.

[19] 王兴奎, 邵学军, 李丹勋. 河流动力学基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

[20] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[21] FANG H W. Three dimensional calculations of flow and bed load transport in the Elbe River (Report No. 763) [R]. Karlsruhe, Germany: University of Karlsruhe, 2000.

[22] 永定河卢沟桥下游河势动床模型试验[R]. 北京: 北京市水利科学研究所, 1991.

(收稿日期: 2013-10-12 编辑: 熊水斌)