

永定河三家店至卢沟桥段生态治理工程 河道生态数学模型分析计算

刘海莲¹ 白静² 杨毅³ 方红卫²

(1 北京市永定河管理处 100165 2 清华大学水利水电工程系 100083

3 北京市水利规划设计研究院 100048)

摘要 由于永定河流域内的水量减少,水资源短缺,该段河道已经干涸,甚至出现沙化情况,挖沙造成河床上存在大大小小的砂石坑。20世纪70年代以来,北京市把永定河主要作为泄洪河道,忽视了其生态涵养和城市景观的作用,使得永定河及沿岸的生态环境逐步恶化,需要进行生态治理。根据永定河卢三段的设计原则和目标,通过二维水动力学模型,计算了主河道流速分布、河道走势情况,分析大洪水条件下对生态工程、堤防的冲刷破坏情况。结果表明,河道内的砂石坑,对卢三段的流速和流势以及对行洪安全影响很大。

关键词 永定河 数值模拟 二维模型 生态治理

中图分类号 X171.4

文献标志码 B

文章编号 1673-4637(2011)03-0033-04

永定河绿色生态走廊建设的目标是把永定河建设成有水的河,生态的河,安全的河,构建溪流—湖泊—湿地连通的健康河流生态系统,主要针对既有的砂石坑进行整理,疏挖主河槽,保留自然生长状况良好的本土植被,并加以适当的人工干预,逐步恢复河道生命。

防洪在永定河生态治理的设计目标中处于首位。在生态治理中需要考虑2个重要因素:一是河道现有的过洪水能力。二是滩地上植被恢复后,改变现有的河道阻力。这两者决定了治理后的永定河的防洪标准。

过去的研究主要集中在河道淹没滩地植物生长对阻力的影响上,例如文献^[1-4]给出都是一个简单的综合糙率系数,而对于河道设计的原理和目标研究较少。

因此本文在现有的永定河设计目标下,利用二维模型具体模拟主河道流速分布、河道走势情况,分析大洪水条件下对生态工程、堤防的冲刷破坏情况,分析河道内砂石坑对行洪安全的影响。

1 二维水动力学模型

1.1 模型基本原理

对二维水动力学模块采用ADI方法进行计算模型

总体控制方程采用二维水流连续方程和运动方程。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0$$

$$\text{或 } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g \frac{u}{h} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2}$$

$$(2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g \frac{v}{h} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2}$$

$$(3)$$

式中, u 、 v 分别表示 x 、 y 方向水流运动速度; h 为水深, g 为重力加速度; C 为谢才系数; v_t 为紊动粘性系数。

1.2 模型参数

采用 $d_s = d_r = 20$ m 的正交均匀网格, 给定与一维相同的非恒定流条件, 计算时间步长 $d_t = 1$ s。深槽部分糙率 $n = 0.035$, 滩地部分糙率 $n = 0.035 \times (1 + 1/H)$ 。上游进口断面(三家店)给定流量, 下游出口断面(卢沟桥)给定水位条件, 水位条件取自三家店至卢沟桥段一维计算模型相应工况的计算结果。根据《永定河卢

收稿日期: 2011-02-18

作者简介: 刘海莲(1967—), 女, 工程师。

沟桥调度方式研究》，当洪水流量小于 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时，卢沟桥拦河闸的过闸流量为实时的洪水流量，当洪水流量大于 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时，卢沟桥拦河闸的过闸流量为 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 。

上述建立的数学模型也在《永定河卢沟桥调度方式研究》等报告中应用，并得到实测资料和物理模型试验的率定和验证。

1.3 计算工况

三家店至卢沟桥河段的防洪任务有两个：河堤的防洪安全和河道内的防洪安全。即洪水来临时，100 a 一遇的洪水不过堤，在设计标准洪水下河道内的生态设施不被破坏。主流路计算任务为，在河段内布设生态设施之后河段内的主流路和现状河道内的主流线相符，计算工况见表 1，采用非恒定流计算，流量过程见图 1。

表 1 卢三段计算工况

洪水级别	2%	5%	10%	20%	33.3%
主流区分析	是	是	是	是	是
流速分布	是	是	是	是	是
流路分析	是	是	是	是	是

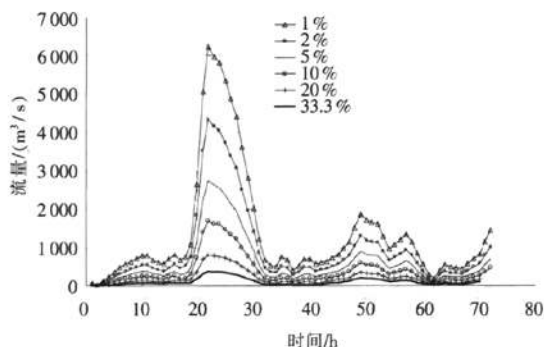


图 1 设计洪水过程线

2 水动力计算成果与分析

2.1 计算区域地形

图 2 为研究所在的三家店至卢沟桥拦河闸河段地形图，其中颜色深浅表示河底高程。该河段长 16.6 km，河道从上游三家店约宽 250 m 逐渐展宽至下游卢沟桥的 600 m，河底纵坡为 2.65‰。

由于采沙挖沙的影响，河道内存在大量砂石坑，如在京原路附近存在长约 1 850 m、宽约 350 m 的砂石坑，尤其是京九铁路下游的砂石坑，最大挖深达 20 m，

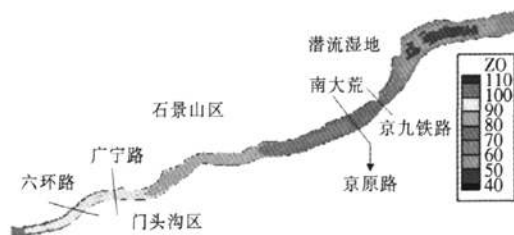


图 2 卢三段的地形图

这些砂石坑的存在将对水流流态产生巨大影响。

2.2 主流区分析

利用二维数学模型计算得到 5 个频率洪水条件下（不含 100 a 一遇的洪水）三家店至卢沟桥段河道的主流区，在每种工况下，从三家店到卢沟桥，随着河道宽度的增加，主流区的宽度是逐渐增大的。而且随着流量级别的减小，主流区逐渐缩窄。在小洪水条件下，河道主流区在六环路与京原路之间偏向右岸。主流区进行叠加分析，剔除 50 a 一遇设计洪水主流区偏离较大的部分，得到综合主流线，在石景山区和京九铁路的下游河段，该主流线与设计图中堤岸的导线不完全重合，见图 3。

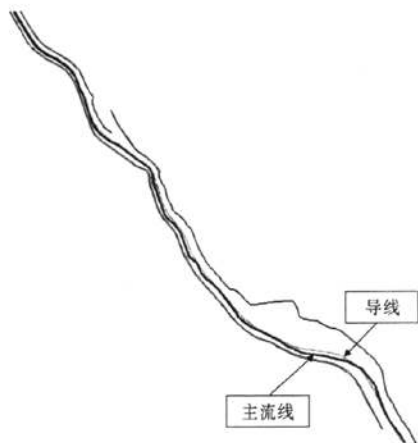


图 3 综合 5 种计算工况的主流线

2.3 流速分布

一般认为 3 m/s 及以上的水流流速对河道的稳定构成威胁，利用二维水动力学模型计算得到永定河三家店至卢沟桥段河道流速分布情况，见图 4—图 8，图中的颜色深浅表示的是流速大小，即为 x 方向 u 和 y 方向流速 v 的平方和的开平方。图 9—图 12 表示的是 50 a 一遇的设计洪水条件的局部流路的流速分布图，其中箭头表示方向，线段的长度表示流速大小。

从图 4—图 8 中可以看出，随着设计洪水流量级

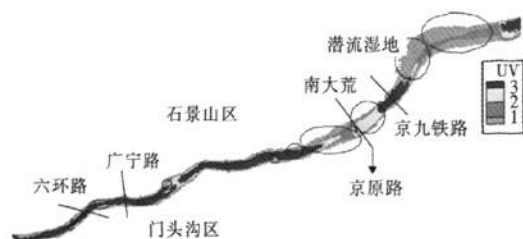


图4 50 a一遇设计洪水流速分布

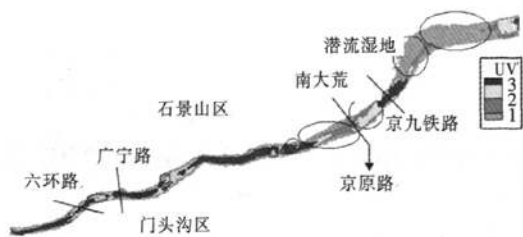


图5 20a一遇设计洪水流速分布

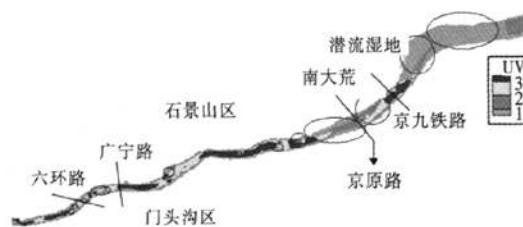


图6 10a一遇设计洪水流速分布

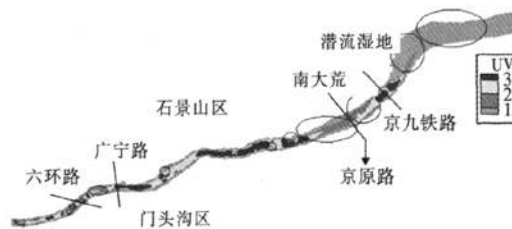


图7 5a一遇设计洪水流速分布

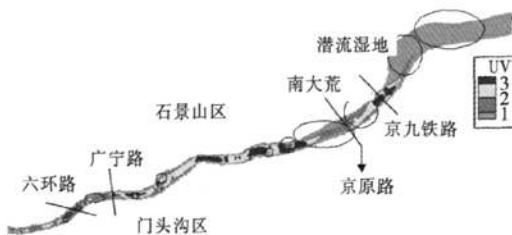


图8 3a一遇设计洪水流速分布

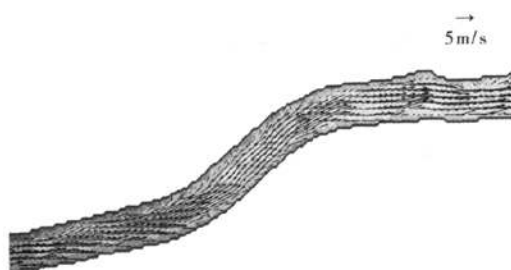


图9 六环路附近河段流速分布

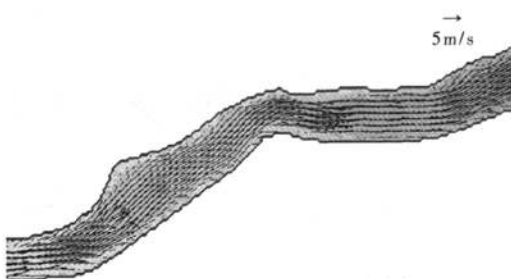


图10 石景山区河段流速分布

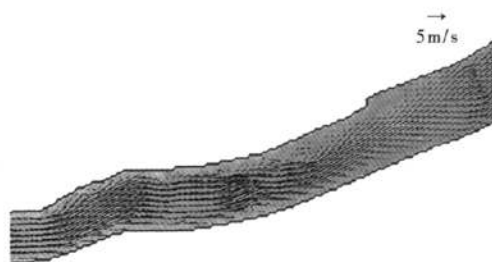


图11 京原铁路附近流速分布

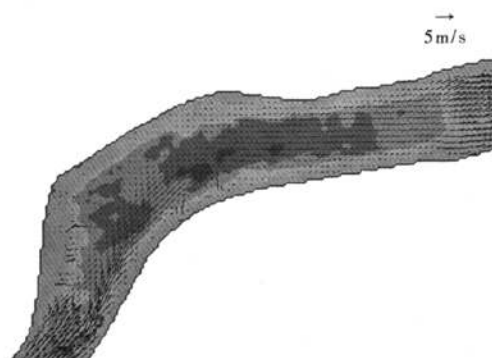


图12 京九铁路下游河段流速分布

别的增大,流速大于3 m/s的水流分布范围越来越广泛,对河道稳定的威胁也越来越大。

在石景山附近(距三家店8 805 m处)的河段和在京九铁路附近(距三家店1万1 605 m处)的河段的流

速始终在 3 m/s 以上, 这些区域应该重点防护。

2.4 砂石坑之间主要流路的最大流速

永定河三家店至卢沟桥段河道多砂石坑, 砂石坑改变了局部的流速分布和河势。根据二维水动力学模型可以确定三家店至卢沟桥段河道砂石坑之间的主要流路, 及主要流路上的最大流速, 见图 13—图 17。图中数据为砂石坑主要流路上的最大流速, 从图中可以看出砂石坑之间的连接段的水流较急, 砂石坑中的水流平缓, 连接段的流速大于砂石坑中的流速。

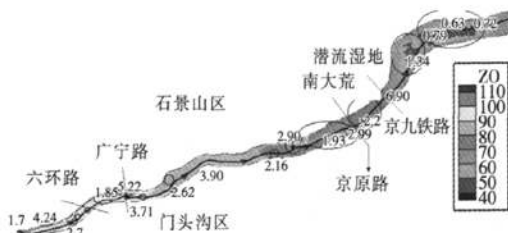


图 15 10a 一遇设计洪水砂石坑之间的主要流路
(m/s)

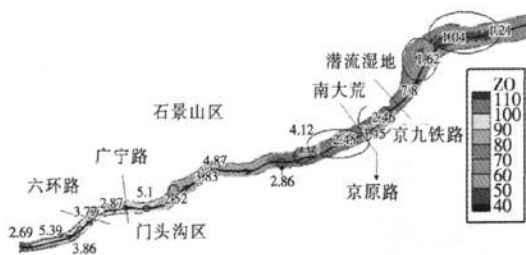


图 13 50a 一遇设计洪水砂石坑之间的主要流路
(m/s)

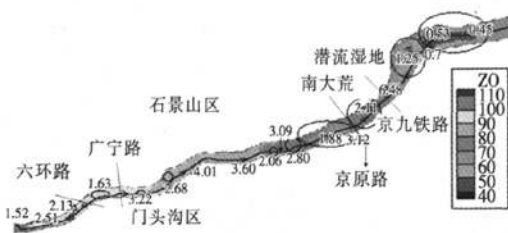


图 16 5a 一遇设计洪水砂石坑之间的主要流路
(m/s)

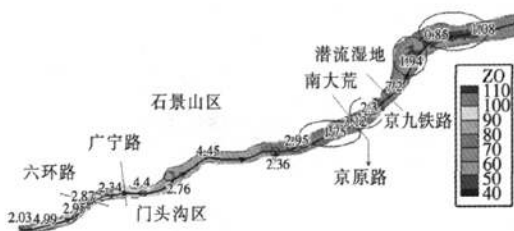


图 14 20a 一遇设计洪水砂石坑之间的主要流路
(m/s)

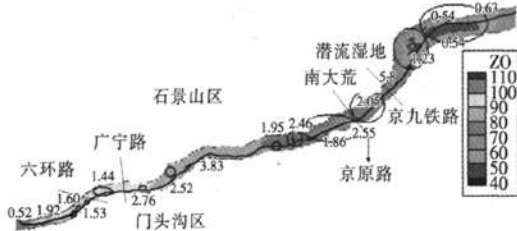


图 17 3a 一遇设计洪水砂石坑之间的主要流路
(m/s)

3 结 论

本文采用基于 ADI 方法的二维水动力学模型研究永定河卢三段的流速, 流势是可行的。

从三家店到卢沟桥,随着河道宽度的增加,主流区的宽度是逐渐增大的。而且随着洪水流量级别的减小,主流区逐渐缩窄。在小洪水条件下,河道主流区偏向右岸。通过叠加分析的5种设计洪水工况下的主流线与设计图中堤岸的导线不完全重合,给设计工作提供了依据。

由于采沙挖沙的影响,河道内存在大量砂石坑,这些砂石坑的存在将对水流流态产生巨大影响。砂石坑之间的连接段的水流较急,砂石坑中的水流平缓,

连接段的流速大于砂石坑中的流速。

在石景山附近(距三家店 8 805 m 处)的河段和在京九铁路附近(距三家店 1 万 1 605 m 处)的河段的流速始终在 3 m/s 以上, 这些区域应该重点防护。

参考文献

- [1] 中国水利学会泥沙专业委员会.泥沙手册[M].中国环境科学出版社,北京,1992.
- [2] 董曾南.水力学[M].高等教育出版社,1995.
- [3] 韩其为.三峡水库库区淤积前后糙率变化初步分析[M].长江水利水电科学研究院,1977.
- [4] Van Te Chow, Open-Channel Hydraulics, Mcgraw-Hill Book Company, 1959.

(责任编辑:穆金元)