



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.024

郭立兵, 王亚东, 田福昌. 基于一维水动力模型分析涉水建筑对河道行洪能力的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 165-171. GUO L B, WANG Y D, TIAN F C. Effect of water related structures on flood discharge capacity of river based on one dimensional hydrodynamic model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 165-171. (in Chinese)

# 基于一维水动力模型分析涉水建筑对河道行洪能力的影响

郭立兵<sup>1</sup>, 王亚东<sup>2,3</sup>, 田福昌<sup>3</sup>

(1. 宁夏回族自治区防汛抗旱指挥部办公室, 银川 750004; 2. 深圳市水务规划设计院有限公司, 深圳 518000;  
3. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 针对涉水建筑物的调度运行影响河道行洪能力的现象, 构建基于 Saint Venant 方程组的一维水动力模型, 并由 Abbott 六点隐式有限差分法近似求解方程组。利用实测断面数据对模型进行了等间距插值加密, 根据建筑物实际属性结合模型计算要求, 对阻水建筑物进行了概化处理。在河道工况复杂的清水河固原城区段的应用结果显示, 该模型较为准确地模拟了橡胶坝及过水路面河道洪水演进的影响, 体现了挡水建筑物的过流阻水效果。模拟结果不仅可用于校核河道防洪设计标准, 而且对相关部门采取防洪决策也具有一定参考价值。

**关键词:** 行洪能力; Saint Venant 方程组; 一维水动力模型; 有限差分法; 概化处理

**中图分类号:** TV 131.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0165-07

## Effect of water related structures on flood discharge capacity of river based on one dimensional hydrodynamic model

GUO Libing<sup>1</sup>, WANG Yadong<sup>2,3</sup>, TIAN Fuchang<sup>3</sup>

(1. Ningxia Hui Autonomous Region Flood Control and Drought Relief Headquarters Office, Yinchuan 750004, China;  
2. Shenzhen Water Planning & Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;  
3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** This study focused on the impact of the scheduling and operation of water related structures on the flood discharge capacity of the river. We constructed a one dimensional hydrodynamic model based on the Saint Venant equations and used the Abbott six implicit finite difference method to approximately solve the equations. The measured cross sectional data were used for equal interval interpolation of the model. The water blocking structures were generalized according to the actual attributes of the structure and the calculation requirements of the model. The model was applied to the Guyuan City section of Qingshui river, where the river conditions were complicated. This model could simulate rather accurately the impact of the rubber dam and water crossing roads on the flood evolution of the river, and reflected the water blocking effect of water blocking structures. The simulation results can be used to check the flood control design standards for rivers, and have certain reference value for the relevant departments to make flood control decisions.

**Key words:** flood discharge capacity; Saint Venant equations; one dimensional hydrodynamic model; finite difference method; generalization

收稿日期: 2017-03-28    修回日期: 2017-07-17    网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.0950.011.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405601); 高等学校学科创新引智计划(B14012); 国家自然科学基金委创新团队(51621092)

Funds: National Key Research and Development Plan (2017YFC0405601); Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B14012); Innovation Team of National Natural Science Foundation of China (51621092)

作者简介: 郭立兵(1977-), 男, 宁夏银川人, 工程师, 主要从事防汛管理方面研究。E-mail: 120200241@qq.com

通讯作者: 王亚东(1992-), 男, 安徽亳州人, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: 2360226314@qq.com

为了改善城市水环境, 通常在主河道设立橡胶坝、水闸等建筑。但该措施会使得河道工况变得更为复杂。因此有必要对复杂河道内洪水演进的变化进行研究, 为相关部门的防洪工作提供科学依据。近几年, 国内外有关学者对河道水力模拟研究较多, 并获得大量成果。1995 年 Anderson J D<sup>[1]</sup> 系统地总结了有限差分法求解原理, 并将其分为隐格式有限差分和显格式有限差分两种。其中, 显格式有限差分包括 Dufort-Frankel 格式、蛙跳格式、Rusanov<sup>[2]</sup> 格式与 TVD<sup>[3]</sup> 格式等。隐格式有限差分主要有 Abbott<sup>[4]</sup> 格式、Preissmann<sup>[5]</sup> 格式, 应用最多的为 Preissmann 格式<sup>[6,9]</sup>, 但在空间精度与边界处理上 Abbott<sup>[10]</sup> 格式更为准确可靠。为使模型更为精确稳定, Ben Chie Yen 团队对 delivery curves(由 Bakhmeteff(1932 年) 提出) 进行了扩展, 研究了渐变流情况时河道下游尾水水位与水深的关系提出了适用于亚临界流与超临界流的 HPG(the hydraulic performance graph) 法<sup>[11-12]</sup>。王健<sup>[13]</sup> 等人针对自然河道一维水流数学模型做了相关的研究, 并开发了数学计算模型, 可应用于恒定流非恒定流等自然情况。胡四一<sup>[14]</sup> 等运用 TVD 显格式模拟了一维溃坝水流, 因显格式精度较低且不能很好地抑制虚假震荡的产生, 致使下游水流发生非物理扭曲。郝红升, 李克峰<sup>[15]</sup> 等将河道一维模型用于非恒定流水温预测中, 对四川省大渡河河段进行了水温预测, 计算结果与实测值较为接近, 模型可靠合理。综上所述, 一维河道水力模拟原理虽已得到很大发展, 但针对河道涉水建筑在不同运行工况下对河道行洪能力影响的应用研究较为罕见。本文采用具有计算稳定、精密度较高的 Abbott 隐格式法对一维水动力方程进行求解, 建立具有过水路面、橡胶坝和桥涵等复杂边界条件的清水河固原城区段一维水动力学模型, 根据模拟结果分析比较挡水建筑物对河道洪水演进的影响。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程

对于河道内洪水演进, 可采用由 Saint-Venant 基本方程构建的一维水动力学模型进行模拟<sup>[16]</sup>, 如式(1)、式(2)所示:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} + \left( gA - \frac{BQ^2}{A^2} \right) \frac{\partial Z}{\partial s} = B \frac{Q^2}{A^2} \left( i + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial s} \right) - g \frac{Q^2}{AC^2R} \quad (2)$$

式中:  $q$  为旁侧流量;  $Q$  为总流量;  $S$  为距离坐标;  $V$  为断面平均流速;  $h$  为水深;  $A$  为过水断面面积;  $i$  为渠底坡降。

### 1.2 离散求解

Saint Venant 方程求解方法主要包括: 特征线法与有限差分法。特征线法对于明渠非恒定流适用性较弱。而随着计算机技术的发展, 有限差分法的优势越发明显。其中主要的有限差分法又包括 Abbott 隐式格式和 Preissmann 隐式格式等。由于 Abbott 隐式格式在每一个网格节点按顺序交替计算水位和流量, 相比于 Preissmann 隐式使其能够在相当大的 Courant 数下具有计算稳定、精度高、可靠性强等优势, 因此本文选取 Abbott 隐式格式对控制方程进行离散求解。

Abbott<sup>[17-18]</sup> 六点隐式格式离散上述方程组, 得以水位点  $h$  和流量点  $Q$  为中心点的有限差分格式方程组见式(3):

$$\frac{\frac{Q_{j+1}^{n+1} + Q_{j+1}^n}{2} - \frac{Q_{j-1}^{n+1} + Q_{j-1}^n}{2}}{\Delta 2x_j} + \frac{(A_{0,j} + A_{0,j+1})(h_j^{n+1} - h_j^n)}{\Delta 2x_j \Delta t} = q \quad (3)$$

$$\frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} + \frac{\left[ \alpha \frac{Q^2}{A} \right]_{j+1}^{n+1/2} - \left[ \alpha \frac{Q^2}{A} \right]_{j-1}^{n+1/2}}{\Delta 2x_j} + gA \frac{\frac{h_{j+1}^{n+1} + h_{j+1}^n}{2} - \frac{h_{j-1}^{n+1} + h_{j-1}^n}{2}}{\Delta 2x_j} + \frac{gQ_1 Q_1}{C^2 A R} = 0 \quad (4)$$

其中二次项可引入式(5):

$$Q^2 \approx \theta Q_j^{n+1} Q_j^n - (\theta - 1) Q_j^n Q_j^n \quad (5)$$

式中:  $j$  为网格点编号;  $n$  为时间点;  $\theta$  角大小通过 HD 参数文件“THETA”系数来确定, 一般取值为 1。方程具体求解方法参考文献[19]。

## 2 模型应用

### 2.1 研究区基本概况

本文选择涉水建筑物分布密集, 类型多样及具有典型代表性的清水河固原城区段作为研究对象。清水河属于黄河一级支流, 发源于六盘山东麓固原市原州区的黑刺沟, 干流总长 320 km。其中研究区段位于二十里铺桥至沈家河水库库尾之间。河段长度 19.1 km, 河宽最窄 13 m, 最宽 350 m, 防洪设计标准为 20 年一遇, 河岸均已做砌护, 砌护高度 1.5 至 4 m 不等, 护岸边坡为 1:1.5。该段跨河挡水建筑物较多, 主要包括 4 条过水路面、6 座橡胶坝

及1座跨河房屋建筑。因该河段穿越固原城区,两岸人口密集,房屋道路等建筑较多。长期以来挡水建筑物上游泥沙沉积致使河道底高程抬升,使其极有可能在该处发生漫溢,威胁两岸安全。本文对清水河固原城区段进行数值模拟,建立一维河道水动力模型,分析计算其在不同运行工况下洪水演进情况。研究区位置见图1。



图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

## 2.2 河道行洪能力计算

### 2.2.1 橡胶坝及过水路面

遥感影像及实测数据显示,计算区共有过水路面4条、橡胶坝6座。在将其概化为宽顶堰处理时,算得橡胶坝立坝时坝上最大水深1.9,此时坝宽约是坝上水深的2.1倍;坝坝时坝上最大水深2.59m,坝宽与坝上水深之比为3.09。对于过水路面由计算结果可得最大路上水深2.07,此时宽深比大于2。即将其作为宽顶堰处理是合理的。堰流公式见式(6):

$$Q = \mu b (h_1 - Z_c) (h_1 - h_2)^{0.5} \quad (6)$$

式中: $Q$ 为过流流量; $b$ 为堰顶宽度; $\mu$ 为流量系数; $h_1$ 、 $h_2$ 为上、下游水位; $Z_c$ 为堰顶高程。

### 2.2.2 过水涵洞

因过水路面实际包含一单孔涵管,故对其进行涵模块概化。涵主要影响因素包括上下游底高程、涵长以及涵壁糙率等,涵管上下游水深直接影响涵管出流状态,在模型中采用能量方程对涵洞进行计算,具体见式(7):

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{\zeta}{2g} \left( \frac{Q_s}{A_s} \right)^2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

式中: $h_1$ 、 $h_2$ 分别为上下游水深; $V_1$ 、 $V_2$ 分别为上下

游流速; $\zeta$ 为过流断面突然收缩或扩大时的能量损失系数; $Q_s$ 为涵洞流量; $A_s$ 为涵洞截面积。

### 2.2.3 商贸城

义乌商贸城概化计算主要考虑桥墩作用,因桥墩占据部分河道行洪空间,产生壅水现象,具有淹没出流可能。故模型选择适用于计算淹没和溢流的FHWA方法对其进行计算。在计算过程中,模型需要在桥墩上下游断面以外,即在流线收缩之前或扩张之后,附加两个横断面,见图2。该方法采用能量方程进行流量和水面线的推求。具体见式8、式9。

$$h_{v1} + h_{v1} = h_4 + h_{v4} + h_f + h_e \quad (8)$$

$$\begin{cases} h_{f(i,i-1)} = L_{i,i-1} \frac{Q^2}{k_i k_{i-1}} \\ h_e = \frac{Q^2}{2gA_4^2} \left[ 2\beta_4 - \alpha_4 - 2\beta_3 \left( \frac{A_4}{A_5} \right) + \alpha_3 \left( \frac{A_4}{A_3} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $h_1$ 、 $h_4$ 为断面1、4的水位; $h_{v1}$ 、 $h_{v4}$ 为断面1、4的流速水头; $h_f$ 为断面1到4之间的沿程摩阻损失; $h_e$ 为断面3至4之间的扩张损失; $\beta$ 、 $\alpha$ 为桥梁几何形状和水流特性影响因数。

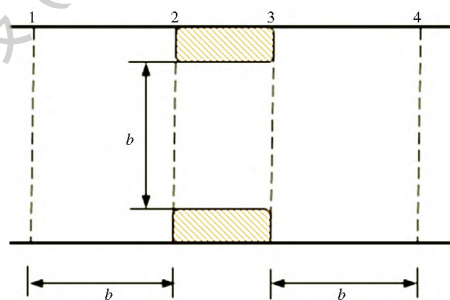


图2 桥梁上下游断面

Fig. 2 Upper and lower cross sections of the bridge

## 2.3 边界条件的确定

为确保模型计算的准确度,在挡水建筑物上下游断面添加水位-流量过程曲线。因模型构建断面较多,以模型下断面为例介绍计算过程。由于下断面无实测洪水资料,采用曼宁公式:

$$V_i = \frac{1}{n_i} R_i^{\frac{1}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$Q_i = \frac{1}{n_i} B_i R_i^{\frac{1}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中: $i$ 表示河槽不同部位; $V$ 为断面平均流速(m/s); $Q$ 为流量(m<sup>3</sup>/s); $J$ 为水面比降(‰); $R$ 为水力半径(m); $n$ 为糙率; $B$ 为断面面积(m<sup>2</sup>)。

根据实测断面数据及曼宁公式可计算出该断面河底比降 $J = 0.0067$ ,进而计算断面水位流量关系查算表,见表1。

(1) 上边界。

表 1 断面水位-流量关系查算表

Tab. 1 Cross sectional water level and the corresponding flow

序号	水位/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	序号	水位/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	序号	水位/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	1 647.58	0.00	8	1 650.19	3 386.93	15	1 652.78	12 052.14
2	1 647.97	52.70	9	1 650.56	4 347.52	16	1 653.15	13 619.72
3	1 648.34	268.47	10	1 650.93	5 403.54	17	1 653.52	15 239.12
4	1 648.71	645.72	11	1 651.30	6 554.74	18	1 653.89	16 965.38
5	1 649.08	1 148.80	12	1 651.67	7 795.98	19	1 654.26	18 803.03
6	1 649.45	1 770.86	13	1 652.04	9 124.98	20	1 654.63	20 728.86
7	1 649.82	2 526.28	14	1 652.41	10 547.07	21	1 655.00	22 731.06

模型上边界条件为二十里铺桥设计流量过程,将固原水文站实测资料系列延长至 2014 年,采用实测洪水资料进行 Pó 型频率计算,具体计算过程详见文献[20]。20 年一遇设计流量过程曲线见图 3。

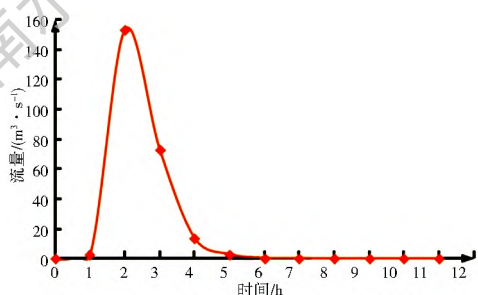


图 3 设计流量过程

Fig. 3 Design flow process

#### (2) 下边界。

清水河固原城区段一维水动力模型下边界为沈家河水库库尾断面水位-流量关系。由于下断面无实测洪水资料,根据实测断面由曼宁公式计算断面水位-流量关系,见表 1。

#### (3) 入流边界。

模型考虑的入流条件包括:区间洪水沿线均匀汇入(即上游汇流)、二十里铺桥至沈家河水库库尾段区间汇流(即下游汇流)及饮马河支流汇入。因区域内多为超渗产流,历时短洪峰高,依据相关文献,采用设计暴雨资料由纳希瞬时单位线法推求设计洪水<sup>[21-22]</sup>。区间汇流过程见图 4。

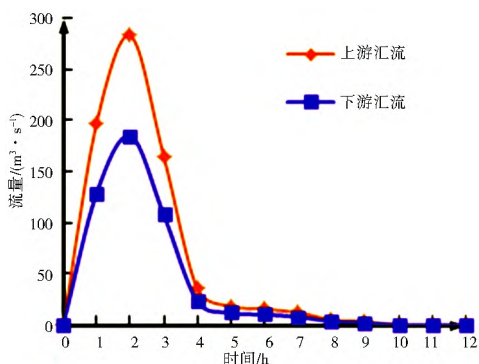


图 4 上下游水文区间汇流过程

Fig. 4 Convergence processes of the upper and lower hydrological sections

## 2.4 模型的建立

### (1) 河道一维模型参数设置。

为准确模拟河道真实情况确保计算结果的可靠度,利用河道实测断面、遥感影像与河道地形图,在挡水建筑物及河道形态变化显著区域进行等间距线性内插加密。加密之后模型共有河道断面 64 个,其中 46 个为实测断面。河道糙率值是对河道一维水动力模型分析精度影响较大的参数。因该河段前后进行多次整治,河道糙率值变化较大,故可查阅最近河道整治相关文献[23],设定清水河(固原城区段)河道综合糙率为 0.03。考虑模型稳定及运算效率等多种因素,时间步长过大导致模型在差分格式上数据不稳定<sup>[24]</sup>。由此设定清水河(固原城区段)河道一维水动力模型计算迭代步长为 1 s。

### (2) 过水路面处理。

根据固原工业园区内 1 号-4 号过水路面、橡胶坝的防汛运行方案和义乌商贸城概况的描述<sup>[23,25]</sup>,考虑其对河道行洪能力的壅水可能对两岸造成淹没风险,在此将过水路面概化为单孔涵洞堰进行处理计算。由遥感影像及实测数据显示,计算区内的 4 条过水路面,宽度均为 6 m,长度约为 82~98 m,均布设有直径 1 m 的涵管。模型内断面设置见图 5。

### (3) 橡胶坝参数设置。

由于橡胶坝的设立致使坝前水流速度减缓,水中悬浮物沉积河底,1 号橡胶坝坝前已淤积 2.2 m,2 号-6 号橡胶坝坝前淤积深度为 0.6 m。考虑汛期橡胶坝运行调度方式及各坝坝顶高程,设置橡胶坝坝体特征参数<sup>[25]</sup>,具体见表 2,模型内橡胶坝设置见图 6。

### (4) 义乌商贸城参数设置。

义乌商贸城处河道原始宽度 110 m,为拓宽商贸城室内建筑面积,在河道上设立支撑柱占用河道过水宽度达 30 m 左右,阻水效果明显<sup>[25]</sup>。结合支撑柱分布情况,模型采用直径为 1.5 m 间距为 3.8 m 的桥墩进行处理。首排断面设置见图 7,后面每排支撑柱均对应于前排柱桩的过水空间。



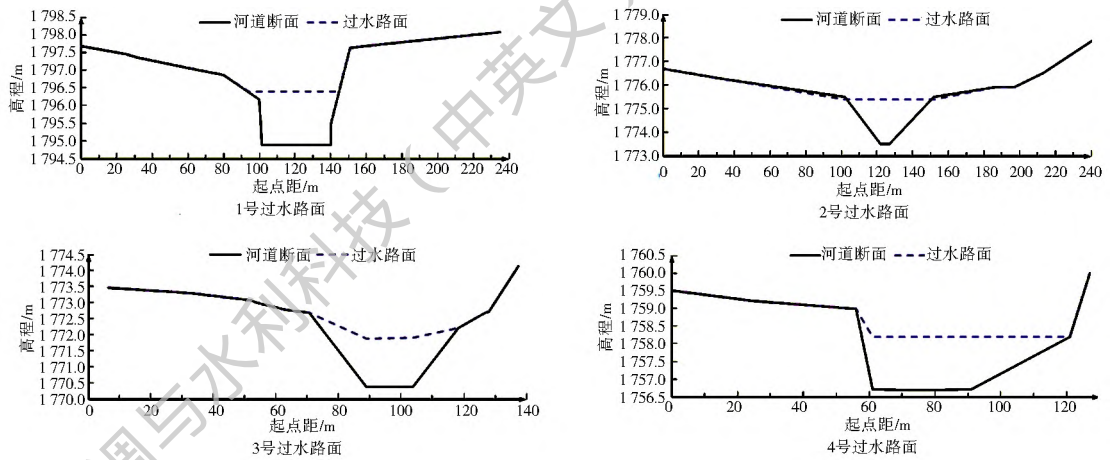


图5 过水路面概化图

Fig. 5 Generalization of the water crossing roads

表2 橡胶坝建筑物设定参数

Tab. 2 Parameters for the rubber dam structures

名称	设计蓄水深度	坝宽	已淤深度	坝顶坝顶高程	立坝坝顶高程	坝坝坝高	立坝坝高
1号橡胶坝	3.5	130	2.2	1 720.06	1 721.36	2.2	3.5
2号橡胶坝	3.5	60	0.6	1 715.62	1 718.52	0.6	3.5
3号橡胶坝	3.5	80	0.6	1 712.01	1 714.91	0.6	3.5
4号橡胶坝	3.5	80	0.6	1 706.28	1 709.18	0.6	3.5
5号橡胶坝	3.5	110	0.6	1 698.41	1 701.31	0.6	3.5
6号橡胶坝	3.5	120	0.6	1 692.49	1 695.39	0.6	3.5

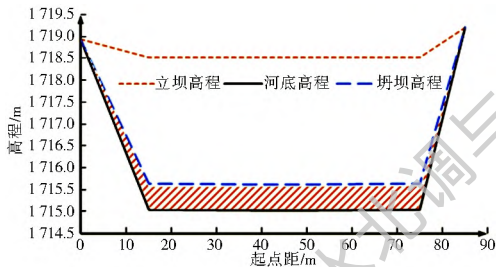


图6 模型内橡胶坝示意图(2号橡胶坝)

Fig. 6 Schematic diagram of the rubber dam in the model (2 # rubber dam)

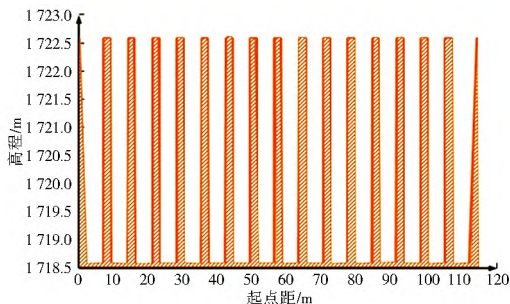


图7 义乌商贸城设定示意图

Fig. 7 Settings of Yiwu shopping mall

城区段) 遭遇 20 年一遇洪水时, 由模拟结果提取壅水水位及坝前水深值, 将其与设计蓄水深度对比确定坝体在设计工况下的运行状况。结果显示, 坝立坝时均有漫溢现象产生。由此可见挡水建筑物对洪水演进产生较大影响, 使得河道水位抬升, 行洪能力减弱, 漫溢风险加大。

### (2) 义乌商贸城风险分析。

图 8 为义乌商贸城在坝立坝工况时的上下游断面水位曲线图。由坝坝或立坝上下游水位曲线可知, 商贸城上下游水深相差较大, 对河道行洪能力影响显著。由实测数据可知商贸城所处河段平均底高程为 1 718.56 m, 一楼地面平均高程为 1 722.58 m; 坝立坝时该处模型最高壅水水位分别为 1 722.626 m 与 1 722.589 m。两种运行情况下, 水位均已超出一楼地面高程。模拟结果表明, 清水河干流义乌商贸城段已不满足 20 年一遇洪水过水能力, 存在淹没风险。

### (3) 过水路面风险分析。

表 4 为过水路面壅水计算成果表。由表可得 1 号、2 号过水路面上游最高壅水水位虽未超过两岸高程, 但数值较为接近, 漫堤风险较大。3 号、4 号过水路面上游最高水位均超过左岸高程, 洪水在此发

## 3 计算结果分析

### (1) 橡胶坝风险分析。

表 3 为壅水风险信息统计表。当清水河(固原

表 3 橡胶坝壅水计算成果

Tab.3 Calculation results of the damming of rubber dams

工况	编号	左岸高程/m	右岸高程/m	坝顶高程/m	壅水水位/m	设计蓄水深/m	坝前水深/m	是否漫溢
坍塌	1号	1 721. 74	1 722. 80	1 720. 06	1 722. 65	3. 5	4. 79	是
	2号	1 718. 95	1 719. 20	1 715. 62	1 717. 63	3. 5	2. 61	否
	3号	1 715. 83	1 718. 00	1 712. 01	1 713. 77	3. 5	2. 36	否
	4号	1 710. 69	1 710. 69	1 706. 28	1 708. 14	3. 5	2. 46	否
	5号	1 702. 00	1 701. 90	1 698. 41	1 699. 99	3. 5	2. 18	否
	6号	1 697. 00	1 696. 20	1 692. 49	1 694. 02	3. 5	2. 13	否
立坝	1号	1 721. 74	1 722. 8	1 721. 36	1 722. 74	3. 5	4. 88	是
	2号	1 718. 95	1 719. 20	1 718. 52	1 720. 67	3. 5	5. 65	是
	3号	1 715. 83	1 718. 00	1 714. 91	1 716. 49	3. 5	5. 08	是
	4号	1 710. 69	1 710. 69	1 709. 18	1 710. 98	3. 5	5. 30	是
	5号	1 702. 00	1 701. 90	1 701. 31	1 702. 76	3. 5	4. 95	是
	6号	1 697. 00	1 696. 20	1 695. 39	1 696. 89	3. 5	5. 00	是

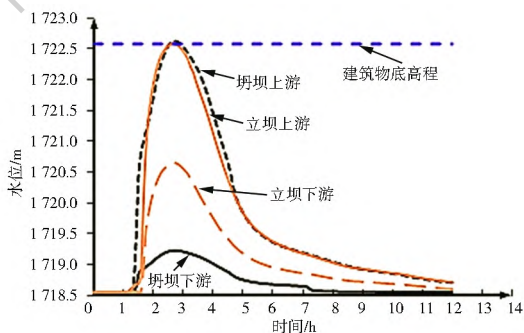


图 8 义乌商贸城上下游断面水位曲线

Fig. 8 Upper and lower cross sectional water level curves of Yiwu shopping mall

生漫溢现象。结果表明, 过水路面严重影响河道行洪能力, 致使河道防洪标准低于设计值, 对两岸居民影响较大。

表 4 过水路面壅水计算成果

Tab.4 Calculation results of the damming of water crossing roads

名称	左岸高程/m	右岸高程/m	路顶高程/m	壅水水位/m	路面水头/m	是否漫溢
1号过水路面	1797. 78	1798. 09	1796. 4	1797. 74	1. 34	否
2号过水路面	1776. 70	1778. 50	1775. 4	1776. 66	1. 26	否
3号过水路面	1773. 46	1774. 14	1771. 9	1773. 97	2. 07	是
4号过水路面	1759. 50	1760. 00	1758. 2	1759. 94	1. 74	是

## 4 结语

本文依据 Saint-Venant 方程基本原理, 采用 Abbott 六点隐格式有限差分法离散求解方程组, 建立了河道一维数值仿真模型, 分别以桥涵、堰模块对挡水建筑物进行概化处理。文中主要对清水河固原城区段跨河建筑物在不同运行情况下对河道行洪能力的影响作了比较分析。结果表明, 跨河建筑物在

不同运行工况下, 对河道行洪能力影响较大, 防洪标准降低。研究结果在校核河道防洪设计标准的同时, 也可为有关部门防洪决策或河道整治设计提供参考。

### 参考文献(References):

[1] ANDERSON J D. Computational fluid dynamics[M]. New York: McGraw-Hill, 1995.

[2] PLETCHER R H, TANNEHILL J C, ANDERSON D. Computational fluid mechanics and heat transfer[M]. CRC Press, 2012.

[3] HARTEN A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws[J]. Journal of Computational Physics, 1983, 49(3): 357-393.

[4] ABBOTT M B, ABBOTT M B. Computational hydraulics: Elements of the theory of free surface flows[M]. London: Pitman, 1979.

[5] CUNGE J A, HOLLY F M, VERWEY A. Practical aspects of computational river hydraulics[J]. 1980.

[6] 蒋艳, 雷正雄. Preissmann 隐式格式在弯曲河道中的应用[J]. 水资源保护, 2001(3): 39-41, 61. (JIANG Y, LEI Z X. Preissmann implicit format in the curved channel[J]. Water Resources Protection, 2001(3): 39-41, 61. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2001.03.012.

[7] 梁国亭, 高懿堂, 梁跃平, 等. 非恒定流泥沙数学模型原理及其应用[J]. 泥沙研究, 1999(4): 44-48. (LIANG G T, GAO Y T, LIANG Y P, et al. Principles and application for mathematical model for one dimension unsteady sediment flow[J]. Journal of Sediment Research, 1999(4): 44-48. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1999.04.008.

[8] 董耀华, 黄煌龄. 天然河道长河段一维非恒定流数模研究[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(2): 10-17. (DONG Y H, HUANG H L. A mathematical model of one dimensional unsteady flow in long distance natural channel[J]. Journal of Yangtze River

- Scientific Research Institute, 1994, 11(2): 10-17. (in Chinese)
- [9] WU W, VIEIRA D A, WANG S S Y. One dimensional numerical model for nonuniform sediment transport under unsteady flows in channel networks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(9): 914-923.
- [10] ABBOTT M B, IONESCU F. On the numerical computation of nearly horizontal flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 1967, 5(2): 97-117.
- [11] SCHMIDT A R. Analysis of stage discharge relations for open channel flows and their associated uncertainties[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- [12] YEN B C, GONZÁLEZ CASTRO J A. Open channel capacity determination using hydraulic performance graph[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(2): 112-122.
- [13] 王健, 夏春晨, 王建刚, 等. 自然河道一维水流数学模型[J]. 山西水利科技, 2015(3): 74-77, 81. (WANG J, XIA C C, WANG J G, et al. A 1D numerical model for natural river flows[J]. Shanxi Hydraulics, 2015(3): 74-77, 81. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-8139.2015.03.025.
- [14] 胡四一, 谭维炎. 溃坝涌波的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展A辑, 1990(2): 009. (HU S Y, TAN W Y. Numerical modelling of bores due to dam break[J]. Journal of Hydrodynamics, 1990(2): 009. (in Chinese)) DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.1990.02.010.
- [15] 郝红升, 李克锋, 庄春义. 关于河道一维非恒定流水温预测模型的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2005(6): 1189-1193. (HAO H S, LI K F, ZHUANG C Y. Study on 1D water temperature forecast model of river unsteady flow[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2005(6): 1189-1193. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2005.06.027.
- [16] 苑希民, 薛文字, 冯国娜, 等. 溃堤洪水分析的一二维水动力耦合模型及应用[J]. 水利水电科技进展, 2016(4): 53-58. (YUAN X M, XUE W Y, FENG G N, et al. A coupled one and two dimensional hydrodynamic model for analysis of levee breach flood and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016(4): 53-58. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2016.04.010.
- [17] ABBOTT M B, ABBOTT M B. Computational hydraulics: Elements of the theory of free surface flows[M]. London: Pitman, 1979.
- [18] ABBOTT M B, IONESCU F. On the numerical computation of nearly horizontal flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 1967, 5(2): 97-117.
- [19] 衣秀勇, 关春曼. 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (YI X Y, GUAN C M. Application and research of flood simulation technology[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese))
- [20] 宁夏清水河防洪治理工程水文计算与分析专题报告[R]. 宁夏: 宁夏回族自治区水文水资源勘测局, 2013. (Report on hydrological calculation and analysis of Qingshui River flood control project in Ningxia[R]. Ningxia: Ningxia Hydrology and Water Resources Survey Bureau, 2013. (in Chinese))
- [21] 宁夏回族自治区暴雨洪水图集[R]. 宁夏: 宁夏回族自治区水文总站, 1986. (Storm and flood portfolio of Ningxia Hui autonomous region[R]. Ningxia: Ningxia Hydrological Station, 1986. (in Chinese))
- [22] 罗义贤, 毕廷和. 宁夏干旱半干旱区小流域暴雨洪水泥沙研究[R]. 宁夏: 宁夏水文水资源勘测局, 2000. (LUO Y X, BI T H. Study on storm and flood sediment in the arid and semi arid sub basins of Ningxia[R]. Ningxia: Ningxia Hydrology and Water Resources Survey Bureau, 2000. (in Chinese))
- [23] 宁夏清水河防洪治理工程可行性研究报告[R]. 宁夏: 宁夏水利厅, 2013. (Feasibility study report on flood control project of Qingshui River in Ningxia[R]. Ningxia: Ningxia Water Resources Department, 2013. (in Chinese))
- [24] 幸韵. 山区河流一维非恒定流数学模型精度改进方法[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015. (XING Y. Study on accuracy improvement of 1D numerical model in mountain stream[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [25] 宁夏固原市城市防洪规划[R]. 宁夏: 固原市水务局, 2015. (Urban flood control plan of Guyuan City, Ningxia[R]. Ningxia: Guyuan Water Affairs Bureau, 2015. (in Chinese))