

桥梁建设对蓄滞洪区洪水演进影响的模拟与分析

——以濠洼蓄洪区特大桥工程为例

刘丽红, 蒋鹏, 温永帅

(安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: [目的] 分析涉水建筑物修建前后洪水演进过程的影响, 为真实高效计算桥梁工程对蓄滞洪区洪水演进过程以及对蓄洪区防洪工作的有效开展提供科学支持。[方法] 选取安徽省阜阳市濠洼蓄洪区为研究区, 利用区域地形、水文数据、桥梁工程设计等最新资料, 采用 MIKE 21 的非结构化水动力学模型, 将进洪退洪过程作为整体对濠洼蓄洪区洪水演进过程进行实时模拟, 分析桥梁工程建设对蓄滞洪区洪水演进分洪时间、流速分布、水位变化等特性的影响。[结果] 桥梁工程修建后, 桥位附近分洪历时比工程修建前最大滞后 45 s, 主流区流速分布范围为 0.4~0.6 m/s, 局部流速变化率最大 7.409%, 桥墩附近水位最大抬高值为 0.006 m, 水位最大变化率为 -0.22%。[结论] 桥梁的建设延缓了蓄洪区行洪时间, 抬高了桥墩附近水位, 改变了工程附近流速分布, 但对蓄洪区整体的影响较小, 基本不影响濠洼蓄洪区的正常运行。

关键词: 濠洼蓄洪区; 桥梁建设; 实时模拟; 洪水演进

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0150-07

中图分类号: TV122, TV87

文献参数: 刘丽红, 蒋鹏, 温永帅. 桥梁建设对蓄滞洪区洪水演进影响的模拟与分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 150-156. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.021; Liu Lihong, Jiang Peng, Wen Yongshuai. Simulation and analysis on impact of bridge construction on flood evolution in a flood storage and detention area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 150-156.

Simulation and Analysis on Impact of Bridge Construction on Flood Evolution in a Flood Storage and Detention Area —Taking Mengwa Flood Storage Area Bridge Project as an Example

Liu Lihong, Jiang Peng, Wen Yongshuai

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: [Objective] The influence of water-related structures on the flood routing process before and after structure construction was analyzed to provide scientific supports for the real and efficient calculation of bridge engineering in flood storage and detention areas, and for the effective development of flood control in flood storage areas. [Methods] The Mengwa flood storage area in Fuyang City, Anhui Province was selected as the study area. Based on the latest data of regional topography, hydrological data, and bridge engineering design, the unstructured hydrodynamic model of MIKE 21 was used to simulate the flood evolution process of the Mengwa flood storage area in real time. The influence of bridge construction on flood evolution time, velocity distribution, and water level change in the flood storage and detention area was analyzed. [Results] After the construction of the bridge project, the flood-splitting time near the bridge position was 45 s behind the maximum lag before the construction of the project; the flow rate distribution range of the mainstream area was 0.4 to 0.6 m/s; the local velocity change rate was 7.409%; the maximum elevation value of the water level near the bridge was 0.006 m; and the maximum change rate of the water level was -0.22%. [Conclusion] Bridge construction delayed the flooding time in the flood storage area, raised the water level near the pier, and changed the distribution of the flow rate near the project. However, the overall impact on

收稿日期: 2021-10-09

修回日期: 2021-12-13

资助项目: 山东省鲁南地质工程勘察院开放基金项目“基于时间序列多点统计的岩溶水动力特征研究”(LNY2020-Z04); 国家自然科学基金项目(41201017)

第一作者: 刘丽红(1980—), 女(汉族), 山东省潍坊市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源管理与调控研究。Email: liulihongsheng@163.com。

the flood storage area was small, and basically did not affect the normal operation of the flood storage area.

Keywords: Mengwa flood storage area; bridge construction; real-time simulation; flood evolution

自然灾害威胁着人类的生存,同时加剧环境条件的恶化^[1]。洪水灾害作为全球面临的十大自然灾害之一,每年造成的直接经济损失约占全球自然灾害总损失的 20%^[2],其中我国约有 75% 的国土面积存在洪水的隐患。随着强降雨天气引发的一系列洪涝灾害以及因洪涝灾害引起的次生地质灾害,给国家和人民造成了不可估量的人身及财产损失^[3],2019 年全国 15 省(自治区、直辖市)发生了 108 起造成人员伤亡的山洪灾害事件,导致 347 人死亡^[4]。

根据已有的数据资料快速推演、预估洪水灾害带来的影响,获取洪灾发生后洪水淹没范围以及洪水对蓄洪区流域桥梁、堤岸等建筑的影响资料,对防洪减灾具有重要意义。目前,对洪水演进进行模拟的方法主要有物理模型方法、水文模型法和水力学递推法。物理模型法主要通过简化地形、概化建筑物以及流态监测等研究洪水演进过程,董柏良等^[5]建立了具有典型街区构造的洪水演进物理模型,定量分析了建筑物密度、绿化带设置等对洪水演进过程带来的影响,但是物理模型法有灵活性不高,受制于场地、经费等因素以及耗时长等缺点。在水文模型法中马斯京根法^[6]的应用最为广泛,马斯京根法虽然能够模拟洪水在河流中的运动,并且易于稳定,步骤简单,但难以对地形相对复杂的河道进行分析。水力学递推法的核心是求解圣维南方程组,水力学模型目前主要可以分为 3 类,即一维水动力模型、二维水动力模型和三维水动力模型。一维水动力数值模型适用于对河段较长、河网简单的河流,苏飞等^[7]通过建立一维河网水动力模型在洪水水流模型的基础上进行了枯水期水流运动模拟,模型能模拟出不同时期的水流运动,但对于面上水力要素计算精度有所缺乏。随着计算机技术的不断发展,三维水动力数值模拟逐步应用,李大鸣等^[8]应用垂向坐标变换,结合水平有限元、垂向有限差分的分层方法建立了河道三维水流泥沙数学模型,对过流断面变化剧烈的河段提出了错层计算的方法。三维水动力模型相对于一维水动力模型和二维水动力模型有更高的精度,能反映垂向上水力要素的变化,但建模资料需求更为严格、全面且所耗时长会更高。水力递推法中平面二维水流数学模型以垂线平均的水流因素作为研究对象,能够很好地模拟计算平面流场及细部的变化情况,既能反映出水力因素在面上的分布及变化,又相对三维模型更为简便,目前应用广泛。其中,MIKE 21 模型是水力学递推法平面二维水动力学数值模拟软件,具有强大的前、后处

理功能。在前处理方面,能根据地形资料进行网格的划分;在后处理方面具有强大的分析功能。例如流场动态演示,计算特征点水位,实测与计算过程的验证,不同方案的比较等^[9]。同时在蓄洪区水力递推法二维水动力模拟研究较少,本文以安徽省阜阳市阜南县濠洼蓄洪区的真实地形资料及淮河特大桥设计资料构建了基于 MIKE 21 非结构化网格的洪水演进影响模型,结合 Global Mapper 中地形分析模块生成糙率,并通过历史洪水过程对干湿水深等参数进行率定验证,采用纳什效率系数对模型进行控制,考虑桥梁建设后桥墩的阻水,并结合地形数据和数值计算结果对洪水演进过程中分洪历时、流速分布、水位变化等特征进行分析,旨在为濠洼蓄洪区防洪避灾、河道安全行洪及水量分配等提供一定的参考。

1 研究区概况

濠洼蓄洪区是淮河流域于 1953 年设立的第一座行蓄洪区,位于安徽省西北部阜南县境内,处东经 115°16′30″—115°57′18″,北纬 32°24′19″—32°54′40″之间亚热带与暖温带的过渡带,属暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 15℃左右,年均降水量 900 mm 左右。濠洼蓄洪区处于淮河干流洪河口以下至南照集之间,南临淮河,北临濠河分洪道,汛期四面环水^[10]。濠洼蓄洪区内地面高程一般为 26.0~21.0 m,地势由西南向东北倾斜^[11]。淮河特殊的地理条件,使得王家坝闸位于三河交界的扼襟控咽之处,而有了千里淮河“第一闸”的称号。王家坝闸也被誉为淮河防汛的“晴雨表”,是淮河灾情的“风向标”,同时习近平总书记也指出要把防汛抗洪工作作为重大任务,把确保人民群众生命安全放在首位。自 1953 年开始,仅有 13 个年份 16 次开闸蓄洪,最近一次开蓄洪时间是 2020 年 7 月。现状蓄洪区,设计蓄洪水位 27.7 m,设计进洪流量 1 626 m³/s,设计蓄洪库容 7.50×10⁸ m³^[12]。

拟建王家坝特大桥(图 1)作为规划 S238 南延段的一段,是阜南县南北向中轴线的重要组成部分,也是阜阳市与河南固始县、淮滨县省际干线公路通道跨越淮河的控制性工程,拟建王家坝淮河特大桥全长 12 680.5 m,设计主要控制点由北向南分别为濠左堤、濠河、濠洼蓄洪区北圈堤、王家坝保庄圩、濠洼蓄洪区南圈堤、淮河主河道,跨越淮河后进入河南境内。桥梁工程跨越淮河干流、濠洼蓄洪区和濠河分洪道及

相应堤防,大桥桥墩和基础位于河滩地及堤脚附近,工程建设势必会对河势稳定、河道行洪、通航以及河道治理规划等产生一定的影响。

2 濠洼蓄洪区模型构建

2.1 模型介绍

MIKE 21 模型是研究地表水运动的二维数值模拟软件,运用在众多水动力模拟科研和工程实践中,模拟效果较好,对预测评价工作具有较大的指导

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{\partial h^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\bar{\tau}_{sx}}{\rho_0} - \frac{\bar{\tau}_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + hu_s S \quad (2)$$

式中: P_a 为当地大气压强。

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{\partial h^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\bar{\tau}_{sy}}{\rho_0} - \frac{\bar{\tau}_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S \quad (3)$$

式中: u, v 为 x, y 方向的流速分量; $f\bar{u}, f\bar{v}$ 为地球自转加速度; g 为当地重力加速度; t 为时间; ρ_0 为水的密度; P_a 为当地大气压强; $f = 2\omega \sin \varphi$ Coriolis 参量(其中 ω 为地球自转角速率; φ 为地理纬度);

性意义^[13]。

MIKE 21 水动力学基本方程如下^[14]

平面二维水流的连续方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

式中: h 为总水深, $h = \eta + d$, 其中 d 为静水深; η 为河底高程; x, y 为右手笛卡尔坐标系; S 为点源流量; \bar{u}, \bar{v} 分别为沿 x, y 坐标方向的平均流速。

平面二维水流动量方程:

$S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ 为 4 个辐射应力的分量; u_s, v_s 为源汇项水流的流速; τ_{sx}, τ_{sy} 为风场摩擦力在 x, y 上的分量; τ_{bx}, τ_{by} 为河床摩擦力在 x, y 方向上的分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为水平黏滞力。

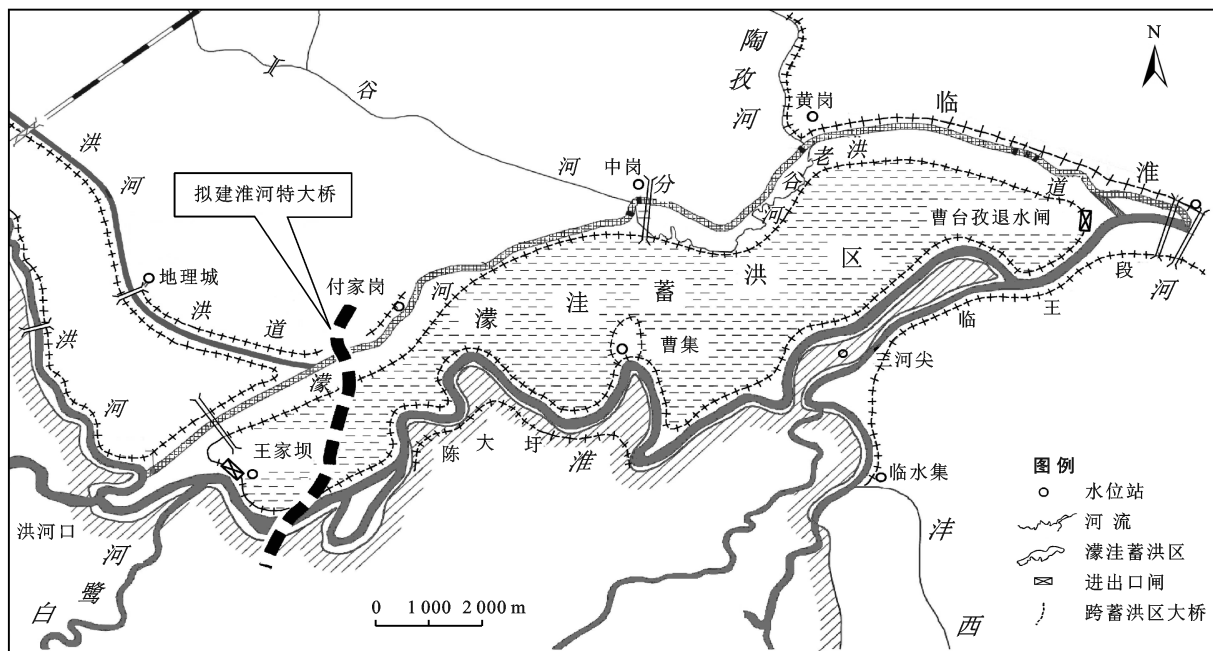


图 1 王家坝特大桥梁濠洼蓄洪区区域、桥梁位置、进出口闸门示意图

2.2 模拟范围

模型计算范围为濠洼蓄洪区,蓄洪区以淮河左堤和濠河分洪道右堤,以及王家坝进洪闸和曹台孜退水闸构成蓄洪圈堤,总面积约为 180.4 km^2 。自 1953 年濠洼蓄洪区建成运用至今,区内平面形态基本无变

化,但王家坝河段中低水大断面处却有变化,主要体现在横向变形伴随着深泓下切,断面趋于窄深,高水两汉冲淤相加,大断面总体呈微冲趋势,进出水两闸门附近地形变化较大,故地形采用实测濠洼蓄洪区资料,计算区域、桥梁位置、进出口闸门如图 1 所示,原

始地形资料处理后得到的模拟范围地形如图2所示。

2.3 网格剖分

濠洼蓄洪区并非类长直河道,形状极不规则,采用非结构化网格进行计算,模型对庄台及王家坝特大桥桥墩等部位网格进行局部加密(图3a),同时扣除王家坝等保庄圩的保护范围。共划分40 000个网格,布置110 278个节点,计算单元201 342个,为了反映桥墩处水力要素情况,扣除桥墩主体并加密桥墩节点个数。其中桥墩在长直桥梁段采用并排式(图3b)设计,在弯道处桥墩交错(图3c)减小水阻,桥墩局部网格如图3所示。

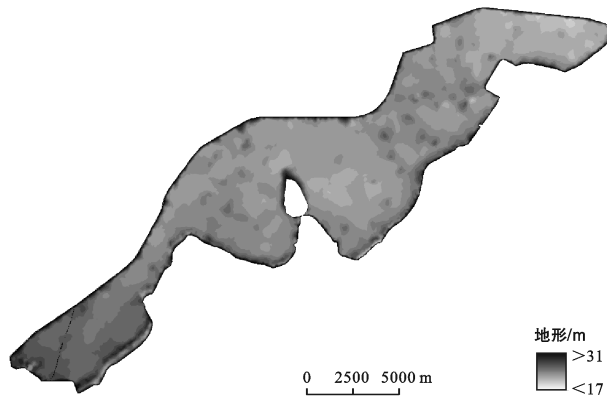


图2 濠洼蓄洪区洪水演进范围地形图

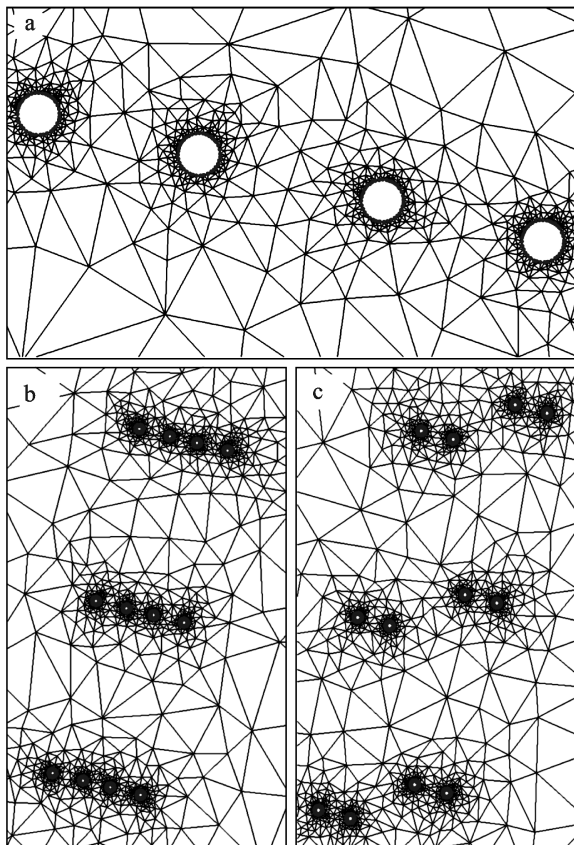


图3 濠洼蓄洪区桥墩局部网格加密计算模型示意图

2.4 参数设置

根据模型网格大小、水深条件动态调整模型计算时间步长,使 CFL(Courant-Friedrich Levy)数小于0.8,达到满足模型稳定的要求,模型计算时间步数10 000,时间步长60 s^[15]。结合 Global mapper 软件生成糙率替代传统手动划分糙率,陆地边界选择垂向零流速边界(滑动边界),上游进口边界采用王家坝闸流量过程,下游出口边界采用曹台孜闸流量过程。

3 洪水演进模型验证

本文采用纳什效率系数进行验证模型数据与最新实测数据的吻合度,且进洪过程与退洪过程衔接模拟避免分布模拟时水体分布变化的影响。选取距今最近一次蓄退洪过程即2020年7月20日08:00至8月28日08:00作为模型验证时段,模拟濠洼蓄洪区2020年一号洪水的进洪过程,上游边界条件采用2020年王家坝闸实测流量过程,下游边界曹台孜闸实测流量过程,2020年一号洪水开闸进洪流量1 310 m³/s,峰值流量达1 850 m³/s,历时约76.5 h,蓄洪总量3.75×10⁸ m³,进、出口闸实测流量过程如图4所示。

王家坝开闸进洪后,洪水到达曹台孜闸附近,大约需要2 d时间。通过曹集水位站对濠洼蓄洪区进洪前、洪水演进24 h时刻以及洪水演进48 h时刻水位验证,计算水位与实测水位吻合,模型纳什效率系数为0.93(图5)。模型的模拟过程与实测成果吻合很好,建立的模型参数选择合理,能够较好地模拟濠洼蓄洪区内的洪水实时演进过程,可用于桥梁建设前后影响对比分析。

4 桥梁建设前后洪水演进特征分析

桥梁工程建设对蓄洪区洪水演进的影响主要体现在桥墩阻水延缓蓄洪区洪水进洪时间;桥梁前后水位变化使得流速分布变化;阻水建筑物直接导致桥前水位抬升。

4.1 蓄洪区进洪时间特征分析

为分析方便,本次主要对濠洼蓄洪区进洪过程进行模拟分析,初始条件为濠洼蓄洪区上边界王家坝闸开闸进洪,设计洪量为1 626 m³/s。选取工程位置附近特征点(t₁, t₂, t₃)及濠洼蓄洪区内各特征点(t₄, t₅, t₆),分析工程前后不同特征点处水位达到设计蓄洪水位所需的时间(图6)。桥梁工程修建后,桥位附近特征点(t₁, t₂, t₃)位置处较其他位置特征点分洪历史变化大,桥位附近 t₂ 特征点分洪历时比工程修建前滞后45 s(表1)。

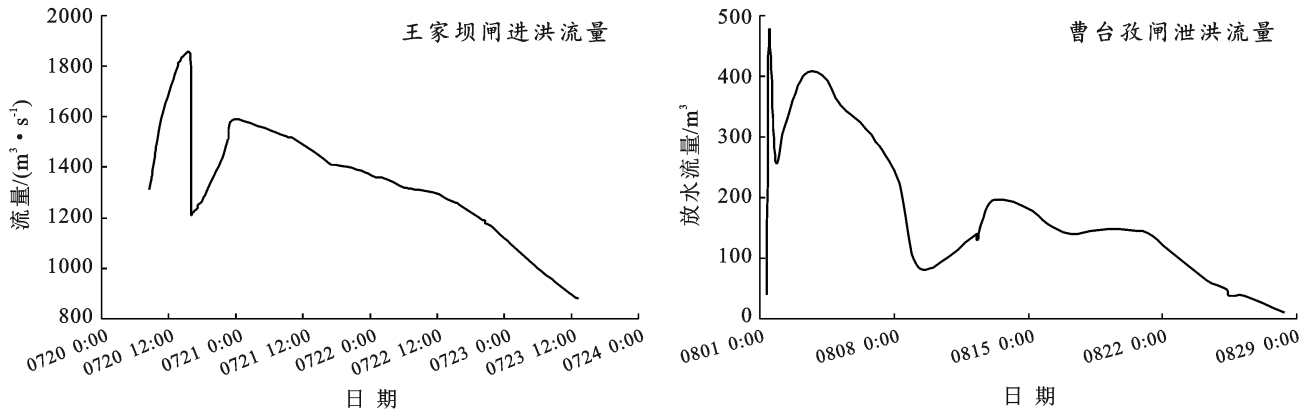


图 4 王家坝、曹台孜闸实测流量过程线

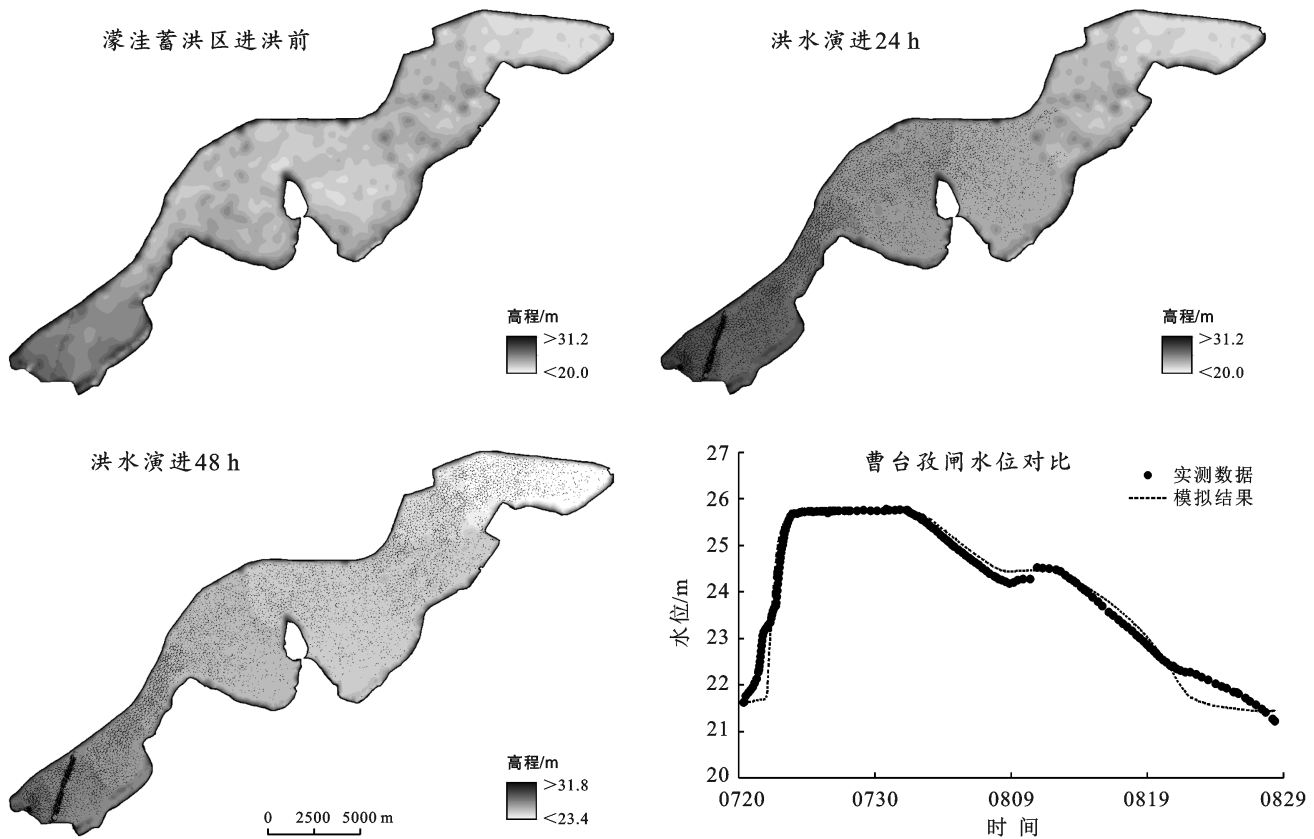


图 5 濠洼蓄洪区 2020 年洪水演进过程模拟结果

表 1 工程前后洪水到濠洼蓄洪区各特征点时间

特征点	工程前(时间)	工程后(时间)	差值/s
t ₁	14:10:42(第 7 d)	14:10:24(第 7 d)	-24
t ₂	14:47:58(第 7 d)	14:47:13(第 7 d)	-45
t ₃	14:26:45(第 7 d)	14:27:18(第 7 d)	33
t ₄	16:43:27(第 7 d)	16:43:49(第 7 d)	22
t ₅	16:48:01(第 7 d)	16:48:19(第 7 d)	18
t ₆	16:48:41(第 7 d)	16:49:02(第 7 d)	21

4.2 蓄洪区流速分布特征分析

工程建设后区内进洪洪水演进计算结果表明,自

王家坝闸开闸进洪开始,洪水到达曹台孜附近,大致需要 2 d 时间。洪水演进过程中,桥址断面的流速整体较小,约 0.2~0.4 m/s;桥区范围的主流区宽度约 200 m,对应线路桩号 K36+000—K36+200 范围,主流区流速值为 0.4~0.6 m/s(图 7)。

濠洼蓄洪区桥梁建成后,洪水的行洪受到桥墩影响,水流场在桥墩附近发生绕流,变化范围主要为桥墩局部,水流场整体流速较小,附近其他网格处的流速和流向并未发生变化。洪水演进 96 h 时,部分桥墩墩周流场分布局部放大情况如图 8 所示。

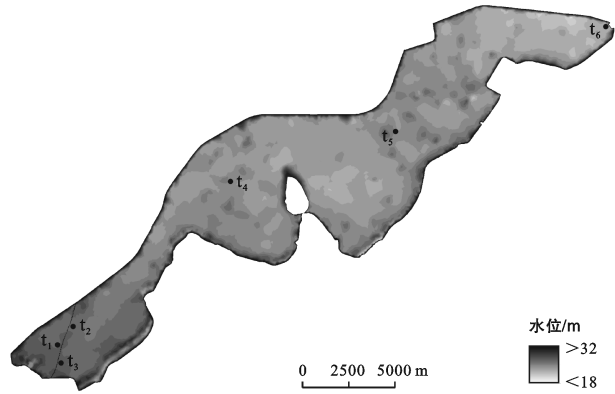


图 6 濠洼蓄洪区洪水演进历时特征点分布

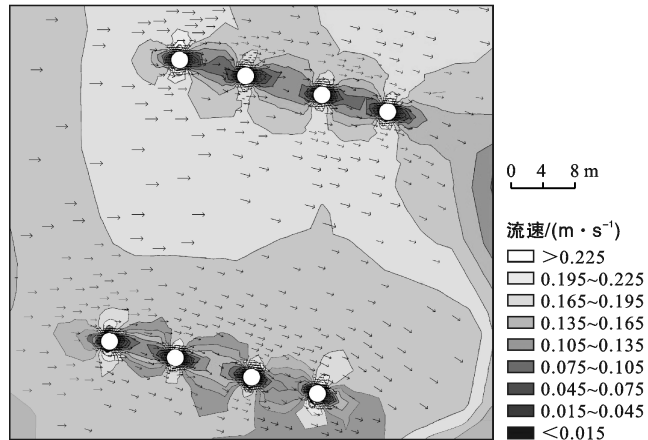


图 8 蓄洪区洪水演进 96 h 墩周流场分布(局部)

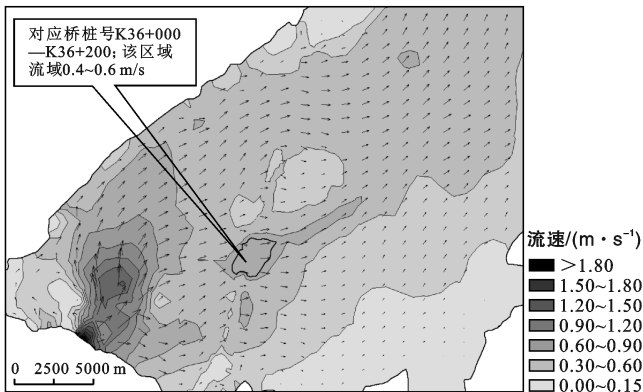


图 7 濠洼蓄洪区洪水演进桥区附近流速分布(48 h)

濠洼蓄洪区内流速会随着桥梁建设产生相应变化,蓄洪区分蓄洪阶段,区内流速整体受建桥影响较小,但对局部流速影响较大,流速峰值最大增幅为 0.044 m/s,流速变化率最大 7.409%。且工程前后各特征点的流速峰值差距很小,濠洼蓄洪区内工程前后特征点相应的流速峰值统计情况详见表 2。

4.3 蓄洪区水位变化特征分析

由于桥墩的阻塞作用,蓄洪区进退洪过程中,位于桥墩区域水流会有抬高或降低,导致蓄洪区内水位变化。

表 2 濠洼蓄洪区各特征点流速峰值及出现时间比较

特征点	工程前		工程后		差值/ ($m \cdot s^{-1}$)	偏差率/%
	流速峰值/ $(m \cdot s^{-1})$	时间	流速峰值/ $(m \cdot s^{-1})$	时间		
1	0.470 3	00:37:00	0.470 5	00:40:00	0.000 2	0.043
2	0.592 5	01:46:00	0.636 4	01:50:00	0.043 9	7.409
3	0.489 9	02:14:00	0.475 3	02:11:00	-0.014 6	-2.980
4	0.380 3	14:13:00	0.406 4	14:15:00	0.026 1	6.863
5	0.198 3	05:52:00	0.201 5	05:50:30	0.003 2	1.614
6	0.318 1	20:53:00	0.310 1	20:57:00	-0.008 0	-2.515

为了反映工程后蓄洪区内蓄水位的变化情况,选取具有代表性的特征点的水位过程进行分析。通过特征点处工程前后濠洼蓄洪区进洪过程的水位差值分析(分别选取蓄洪区洪水演进 48 h,72 h 及 96 h 时间点的工程前后水位差值),结果表明,不同洪水演进时间点,桥墩附近点位受到桥墩影响有所变化,进洪期间桥墩附近最大抬高值为 0.006 m,水位最大变化率为-0.22%。表 3 反映了不同时刻蓄洪区内各点位处水位对比情况。

5 结论

(1) 本文对濠洼蓄洪区建立了二维水动力模型,

将蓄洪退洪过程作为整体统一进行数值模拟,验证结果显示模拟水位与历史水位纳什效率系数为 0.93,模型设计合理,计算结果可靠,可用于桥梁建设工程水流数值模拟。

(2) 蓄洪区进退洪时,大桥附近主流区域分布在线路桩号 K36+000—K36+200 段,主流区流速值为 0.4~0.6 m/s,其余部分流速较小。水流场在桥墩附近出现了明显的绕流,对桥墩附近流速场有影响;工程建成前后,通过特征点流速峰值对比分析,流速变化率最大为 7.409%;进洪期间桥墩附近最大抬高值为 0.006 m,水位变化率最大为-0.22%;工程建成前后,洪水到达蓄洪区内各特征点的最大时间差为 45 s。

表 3 各时刻蓄洪区内各点位处水位对比情况

特征点	进洪影响时间											
	工程前 水位/m	工程后 水位/m	差值/ m	变化率/ ‰	工程前 水位/m	工程后 水位/m	差值/ m	变化率/ ‰	工程前 水位/m	工程后 水位/m	差值/ m	变化率/ ‰
1	27.584	27.588	-0.004	-0.15	27.594	27.599	-0.005	-0.18	27.692	27.698	-0.006	-0.22
2	27.066	27.071	-0.005	-0.18	27.087	27.093	-0.006	-0.22	27.361	27.366	-0.005	-0.18
3	27.227	27.222	0.005	0.18	27.231	27.226	0.005	0.18	27.454	27.450	0.004	0.15
4	25.231	25.229	0.002	0.08	25.813	25.811	0.002	0.08	26.797	26.795	0.002	0.07
5	25.082	25.081	0.001	0.04	25.760	25.759	0.001	0.04	26.770	26.769	0.001	0.04
6	22.909	22.909	0.000	0.00	25.743	25.743	0.000	0.00	26.771	26.771	0.000	0.00

(3) 本文以濛洼蓄洪区特大桥工程为例,模拟分析桥梁建设对蓄滞洪区洪水演进影响,模型能够较好地模拟蓄洪区内水力要素变化情况,且对于开展抗洪防涝工作及蓄洪区内工程建设具有较强的指导意义。然而 MIKE 21 二维水动力数值模拟对地形数据依赖性极强,以垂线平均值处理在深度方向的水力要素,也忽略了对流项的影响,在今后的研究中需要进一步的完善。

[参 考 文 献]

- [1] 任伟义.温州市洪涝台灾害应急管理能力提升研究[D].上海:华东政法大学,2015.
- [2] 薛文宇.城市暴雨积水及街道洪水模拟模型研究[D].天津:天津大学,2016.
- [3] 刘恒洋.基于 DEM 的洪湖分蓄洪区东块洪水淹没模拟研究[D].湖北 武汉:华中科技大学.
- [4] 国家防汛抗旱总指挥部.中国水旱灾害公报(2019)[M].北京:中国水利水电出版社,2021.
- [5] 董柏良,夏军强,陈瑾哈.典型街区洪水演进的概化水槽试验研究[J].水力发电学报,2020,39(7):99-108.
- [6] G Mccarthy. Unit Hydrograph and Flood Routing[C]//

US: Conference of North Atlantic Division, 1939.

- [7] 苏飞,王士武,陈雪,等.平原河网一维水流计算模型在洪水期和枯水期的应用[J].中国农村水利水电,2008(1):34-36,39.
- [8] 李大鸣,林毅,周志华.蓄滞洪区洪水演进一、二维数值仿真及其在洼淀联合调度中的应用[J].中国工程科学,2010,12(3):82-89.
- [9] 许婷.丹麦 MIKE21 模型概述及应用实例[J].水利科技与经济,2010,16(8):867-869.
- [10] 万长宇.河道疏浚断面设计探讨:以濛马河上段为例[J].工程与建设,2019,33(3):373-375.
- [11] 张红萍,胡昌伟,刘舒.濛洼蓄滞洪区洪水淹没数值模拟[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(4):52-57.
- [12] 张鹏,季益柱.桥梁工程跨越蓄洪区对防洪的影响评价[J].治淮,2018(4):18-21.
- [13] 许婷. MIKE21 HD 计算原理及应用实例[J].港工技术,2010,47(5):1-5.
- [14] 班美娜,武永新.基于 MIKE21 FM 的南渡江河口段行洪能力分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):151-157.
- [15] 孙光春.取排水口附近流场模拟及对通航的影响研究[D].辽宁 大连:大连海事大学,2017.