

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222197

T型墩消力池水力特性数值模拟及结构优化

刘增文¹,金 瑾^{1,2},严文博¹,李 强¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 寒旱区生态水利工程兵团重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要:泄水建筑物下游消力池内的水流常因泄流消能不足而引起流态紊乱、震荡,出现浪花溅出边墙等现象,进而影响下游建筑物的安全稳定,因此在消力池尺寸受限无法增加的情况下,工程上经常采用诸如T型墩等辅助消能工来改善消力池内的流态,增加消能效果。采用数值模拟和模型试验相结合的方法,研究了T型墩的布置方式及主要尺寸参数变化对消力池内水流流场的影响规律。结果表明,消力池消能率随T型墩支腿长度增大而增大,设置防冲板的T型墩可增加消力池内的水深,消能效果有所提升,但消能率随防冲板长度的增大而降低;布置双排T型墩后池内流态稳定,且随前后间距增大,消能率先增大后减小。根据模拟结果推荐了合理的方案并进行模型试验验证,结果显示推荐方案消能率达到76.06%,较原方案提升了12.51%,且池内流态稳定,满足工程需求。

关键词:消力池; T型墩; 结构; 数值模拟; 消能效果

中图分类号: TV131.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)09-0103-04

1 概况

大洪纳海水库采用侧槽式溢洪道布置于大坝左岸,溢洪道由控制段、调整段、斜井段、隧洞段、出口消能段等5部分组成。水库正常蓄水位为2 083.00 m,底流消能方式为降低护坦高程后形成的平底式消力池,消力池总长39.25 m,宽7.00 m,边墙高9.00 m,消力池与退水渠衔接,退水渠长10.00 m,宽7.00 m,边墙高5.00 m,原设计方案消力池尺寸见图1。物理模型试验采用比尺为1:50的正态模型,流速比尺 $\lambda_v = \lambda_L^{0.5} = 7.071$;流

量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 17\ 677.67$;糙率比尺 $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.919$ 。消力池内水深、流速及底板压强测点布置见图2。物理模型试验结果表明,设计工况下消力池内产生完整淹没式水跃,但在校核工况下,水流进入消力池后直接冲击消力池底板,在尾坎处上扬后直接跃出消力池边墙,池内水流紊乱,说明消力池长度和边墙高度明显不足。由于工程布置的局限性无法增加消力池长度,因此采用T型墩辅助消能措施。拟采用数值模拟法,研究布置双排T型墩时其前后间距和传统布置情况下支腿长度、防冲板长度对消力池内水力特性及消能率的影响,最后选择出合适的T型墩布置方式以满足工程消能防冲需求。

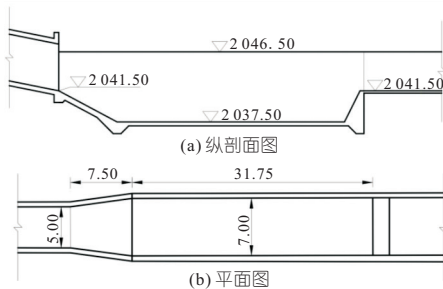


图1 原设计方案消力池布置尺寸(单位:m)

Fig.1 Layout size diagram of the original design of the cooling pool

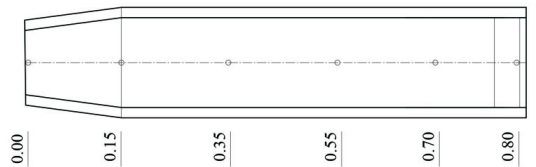


图2 测点布置(单位:m)

Fig.2 Survey point layout

2 数值模型和计算方法

收稿日期: 2022-10-19,修回日期: 2022-11-10

基金项目: 石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZK202025);兵团科技创新人才计划项目(2022CB002-05);国家自然科学基金项目(11562018)

作者简介: 刘增文(1996-),男,硕士研究生,研究方向为工程水力学,E-mail: 1299039765@qq.com

通讯作者: 金瑾(1980-),女,博士、教授,研究方向为工程水力学,E-mail: jinjin@shzu.edu.cn

2.1 T型墩消力池设计方案

实际工程中 T 型墩和消力池尾坎连为一体,标准 T 型墩结构尺寸比例为前墩厚 A :支墩厚 B :墩高 C :前墩宽 D :尾坎高 E :支腿长 $F=2:2:3:4:5:6$ (图 3(a))。图 3(b)为带防冲板的 T 型墩。

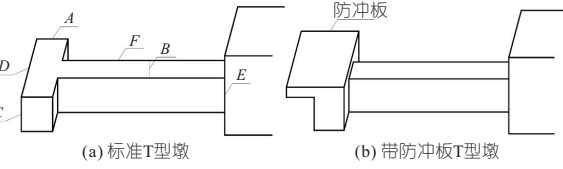


图 3 T 型墩示意图

Fig. 3 Schematic diagram of T-shaped pier

影响 T 型墩消力池水力特性的因素主要包括 T 型墩的结构尺寸和布置形式,因此模拟时主要改变支腿长度、前墩型式及布置方式,其余尺寸按照标准比例设计,其中 T 型墩的阻水面积为消力池的 40%,左右间距均为 2.8 m,双排布置前排墩高 1.05 m,后排墩高 2.00 m,不同 T 型墩组合布置参数见表 1,其中第 8 组与第 3 组前墩位置相同。

表 1 不同组合 T 型墩布置参数

Tab. 1 Layout parameters of different combinations of T-shaped piers

| 组次 | 支腿长 /m | 前墩型式 | 布置型式 | 影响因素 |
|----|--------|-------------|--------------|------|
| 1 | 10 | 正常 | 两个单排 | 支腿长 |
| 2 | 12 | 正常 | 两个单排 | |
| 3 | 14 | 正常 | 两个单排 | |
| 4 | 14 | 加 0.5 m 防冲板 | 两个单排 | 防冲板长 |
| 5 | 14 | 加 0.8 m 防冲板 | 两个单排 | |
| 6 | 14 | 加 1.0 m 防冲板 | 两个单排 | |
| 7 | 2.1 | 正常 | 四个双排前后间距 4 m | 前后间距 |
| 8 | 2.1 | 正常 | 四个双排前后间距 5 m | |
| 9 | 2.1 | 正常 | 四个双排前后间距 6 m | |

2.2 数值模型及网格划分

采用 VOF 模型求解溢洪道流场的自由水面^[1],计算时不考虑热交换,用 RNG κ - ϵ 模型,通过求解动量方程和连续性方程追踪水、气两相流体运动,模型求解采用有限体积法,针对瞬态问题数值计算时采用 PISO 算法^[2]。建立三维模型,为与物理模型数据对比,模拟按照水工模型尺寸进行。由于计算整体溢洪道花费时间较长且溢洪道整体纵横比较大,故本次仅模拟消力池及退水渠段。进口采用速度进口,出口采用自由出流边界;溢洪道固体壁面为无滑移条件,法向速度给定为 0;近壁区域的流动用标准壁面函数求解,模型见图 4(a)。增设 T 型墩后,消力池内水流变得复杂,因此采用结构化网格并加密消力池底部,网格划分情况见图 4(b)。

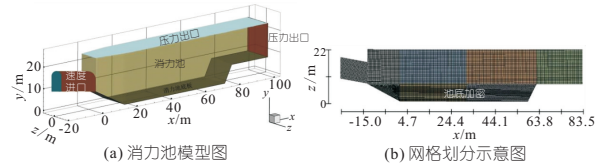


图 4 三维模型及网格划分

Fig. 4 3D model and grid division diagram

2.3 网格无关性分析

针对原设计方案体型,选择 3 组网格精度进行划分模拟计算,网格数量及计算结果见表 2。由表 2 可知,网格数量对结果影响较大,网格数为 31×10^4 个的最大速度值和最高水位值与另外两组差异较大,当网格数大于 41×10^4 个,差值明显缩小。考虑到计算时间与精度,认为网格数约 41×10^4 个的方案能满足网格数量的无关性要求。

表 2 网格计算结果

Tab. 2 Grid calculation results

| 组次 | 网格数量/ 10^4 个 | 最大流速/ $(m \cdot s^{-1})$ | 最高水位/cm |
|----|----------------|--------------------------|---------|
| 1 | 31 | 3.12 | 18.33 |
| 2 | 41 | 3.54 | 21.70 |
| 3 | 52 | 3.55 | 22.01 |

3 计算结果与分析

3.1 数值计算结果的验证

校核工况下原设计方案消力池模拟结果与实测结果对比表明,水深、流速、压强的线性回归计算的决定系数分别为 0.980 3、0.991 6、0.991 1,说明模拟值与试验值吻合,采用 VOF 模型模拟消力池内流场的方法可行,计算精度满足要求。

3.2 流态分析

各组消力池内流态模拟结果见图 5。由图 5 可知,随着 T 型墩支腿长度的增大,消力池内水跃产生位置前移,池末位置水深增大,出水水流趋于稳定;对比图 5(c)、(d)发现,设置防冲板后,在 T 型墩前墩处有明显跃起现象,尾坎处水深增大,随着防冲板加长,池内流态改善不明显;由图 5(c)、(h)可知,布置双排 T 型墩后,消力池内水流波动幅度较小,池内水深降低,随着双排 T 型墩前后间距增大,消力池内最大水深位置向前推移,跃后水位先减小后增大。由此可见双排布置形式对消力池流态改善显著。根据模拟流态分析,第 8 组方案消力池内水跃完整,水位低,跃后水流平稳进入退水渠。

3.3 水力特性分析

3.3.1 流速分布

消力池内流速分布见图 6。由图 6 可知,T 型墩使池内水流速度急速下降,在消力池 3/5~

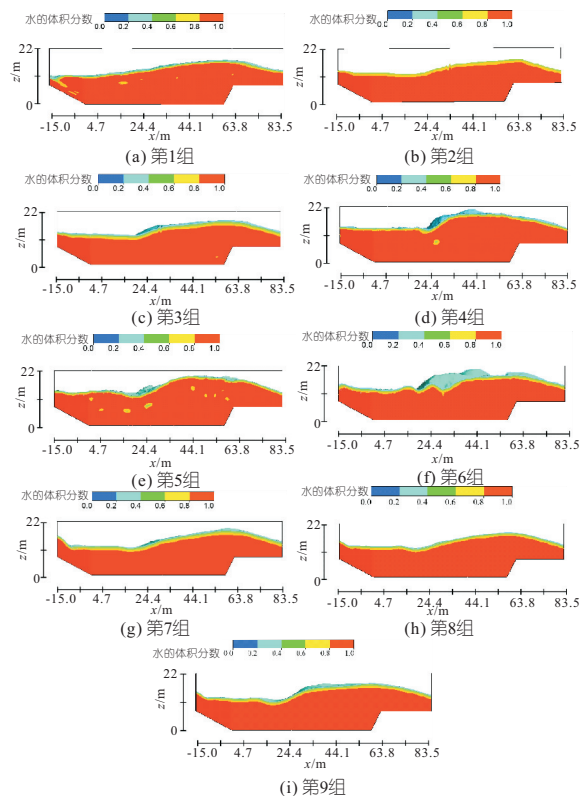


图 5 各组消力池内水流流态

Fig. 5 Flow pattern of water flow in each pool

4/5 位置降幅最大,在尾坎处突然变缓。随着 T 型墩支腿长度增大,流速降幅增大,第 3 组降幅最大为 1.75 m/s;而防冲板长度增大后,消力池进出口流速降幅减小,其中第 4 组降幅最大为 1.79 m/s;双排 T 型墩前后间距变化对消力池整体流速影响不大,对出口流速有影响,水流在两排 T 型墩之间产生旋涡后流速降低,由于后排 T 型墩的位置接近尾坎,当前后间距继续增大时,出池水流还未完全稳定,因此出口流速随着间距增大先减小后增大,第 8 组出口流速最小,其进出口流速降幅为 1.95 m/s,大于其他各组情况。

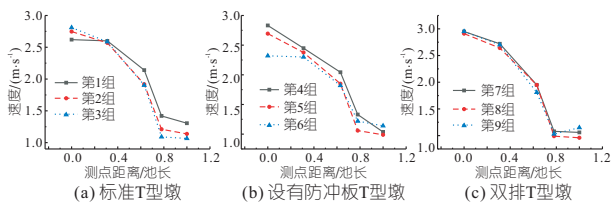


图 6 消力池内流速分布

Fig. 6 The velocity distribution in the silencer

3.3.2 水深分布

消力池内水深分布见图 7。由图 7 可知,标准方案在消力池 4/5 处水深最大,随着 T 型墩的支腿长度增大,池内的跃后水深和池末水深均增大,第 1 组跃后水深最小为 18.65 cm,仍超出原设计边墙 0.65 cm;对比 3、4 组发现设置防冲板使跃后水深增加了 0.89 cm,超出边墙 1.83 cm,

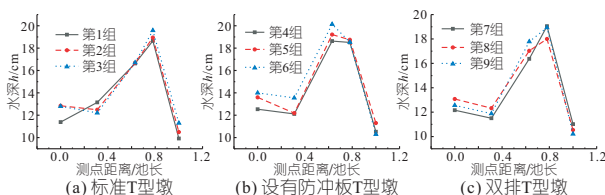


图 7 消力池内水深分布

Fig. 7 Distribution of water depth in stilling pool

水深壅高明显,在消力池 3/5 处水深最大并在 3/5~4/5 位置缓慢下降,且随着防冲板长度增大水深增大;对比 3、8 组发现,布置双排 T 型墩的跃后水深降低了 0.93 cm,最高水位 18.01 cm 接近边墙高度,且随着双排 T 型墩前后间距增大最高水位先降低后升高,第 8 组水位最低。

3.3.3 压强分布

各组消力池底板中线的压强在 T 型墩前墩附近出现突然增大后减小的现象,见图 8,这是因为水流撞击 T 型墩前墩后,向周围分散冲击后导致此处底板压强出现“峰值”,整体分布似“驼峰”状。

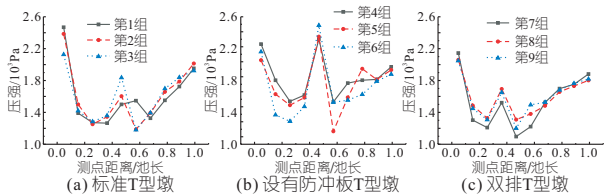


图 8 各组消力池底板压强分布

Fig. 8 Pressure distribution on the floor of each pool

由图 8(a)可知,第 1 组底板压强变化最小,最大值与最小值差为 1 204 Pa,随支腿长度增大“峰值”位置前移并随支腿长度的增大而增大;由图 8(b)可知,设置防冲板后底板压强增大,且变化幅度剧烈,其中第 4 组较为稳定,最大值与最小值差为 837 Pa,“峰值”随着防冲板长度增大而增大;由图 8(c)可知,“峰值”随着双排前后间距增大先增大后减小。对比第 3、4、8 组发现,设置防冲板后“峰值”增加了 467 Pa,采用双排布置后降低了 145 Pa。由此可知,布置双排 T 型墩后底板压强值小且稳定,其中第 8 组最大值与最小值差最小为 750 Pa。

3.4 消能效果分析

通过消力池进出口所减少的能量占总能量之比来计算消力池的消能率,计算公式为:

$$K_j = \Delta E_j / E_1 \quad (1)$$

$$\Delta E_j = E_1 - E_2 \quad (2)$$

$$E = \alpha v^2 / (2g) + h_0 \quad (3)$$

式中, K_j 为消力池消能率; E_1 、 E_2 分别为由压能、势能、动能组成的消能前后断面总水头; α 为流速系数; v 为消能前后断面平均流速; g 为重力

高风险区。

b. 山洪灾害空间分布格局为“东西分散,南北聚集”;2017、2019 年山洪灾害分布范围扩大,分布密度降低,其随机性和偶然性变强。

c. 地形、降雨、人类活动等致灾因子是诱发山洪的关键因素。降水尤其是短时间强降水对山洪时空分布特征影响最显著。地形高程、NDVI 及土地利用类型均是诱发山洪灾害的重要因素。

参考文献:

[1] 叶超凡,张一驰,熊俊楠,等. 湖南省山丘区小流域山洪灾害危险性评价[J]. 地球信息科学学报,2017,19(12):1593-1603.

[2] 陈宫燕,普布桑姆,次仁,等. 西藏林芝降水引发的山洪地质灾害分布特征[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(2):100-103.

Analysis of Spatiotemporal Characteristics and Inducing Factors of Flash Floods in Guangdong Province

YANG Fan¹,KANG Ya-jing²,WANG Qian³, MA Mei-hong⁴, LIU Rong-hua⁵

(1. Guangdong Flood Control Support and Rural Water Conservancy Center, Guangzhou 510635,China; 2. China South to North Water Diversion Group Water Investment Co., Ltd., Beijing 100036, China; 3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. College of Geography and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 5. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Analyzing the spatial and temporal distribution characteristics of flash flood disasters is crucial for flood control and prevention. Taking Guangdong Province as an example, this study first compiled historical data on flash flood disasters in Guangdong Province from 2017 to 2021. Using methods such as standard deviation ellipse and kernel density, the spatial and temporal characteristics were analyzed, and the complex interaction relationships of triggering factors were explored. The results show that there were a total of 79 flash flood disasters, mainly concentrated in May and June, with uneven temporal distribution. The spatial distribution pattern of flash flood disasters exhibited a "dispersed east and west, concentrated north and south" pattern, with the northern cities of Heyuan, Shaoguan, and Meizhou being high-risk areas for flash flood disasters. Short-duration heavy rainfall was the main driving factor for flash flood disasters, with significant influences from topography, vegetation cover, and land use. The findings of this study can provide reference for flash flood disaster prevention and control in Guangdong Province.

Key words: flash flood disaster; spatiotemporal characteristics; influencing factors; Guangdong Province

(上接第 106 页)

参考文献:

[1] 葛新峰,孙洁,吴丹,等. 基于 VOF 模型的排水渠道流动数值模拟及消能措施优化研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 109-112.

[2] 李国杰,黄萌,陈斌. 基于 PISO 算法的非结构化网格 VOF 算法[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(3): 476-479.

[3] 刘文,贺昌海,江维,等. 某工程溢洪道掺气水流场数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021 (12): 181-186, 191.

Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics and Structural Optimization of T-shaped Pier Stilling Pool

LIU Zeng-wen¹,JIN Jin^{1,2},YAN Wen-bo¹,LI Qiang¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Key Laboratory of Cold and Arid Regions Eco-Hydraulic Engineering of Xinjiang Production & Construction Corps, Shihezi 832003, China)

Abstract: The water flow disorder, shock, spray splashing out of the side wall and incomplete water jump are often caused by insufficient discharge energy dissipation in the pool. In order to solve this problem, the influence law of the layout of T-shaped pier and its parameter variation on the hydraulic characteristics in the ballast tank was studied by using the model test method and numerical simulation. The results show that the energy dissipation rate increases with the increase of the length of T-shaped pier legs; The water depth increases with the installation of the impingement baffle, and the efficiency increases, and the energy dissipation rate decreases with the increase of the impingement baffle; The flow state of the water in the stilling pool is stable after the double-row T-shaped piers are arranged, and the energy dissipation increases first and then decreases with the increase of the distance between the front and back. According to the simulation results, a reasonable scheme is recommended and verified by model test. The results show that the energy dissipation rate of the recommended scheme reaches 76.06%, which increases by 12.51%. The flow state is stable and meets the engineering requirements.

Key words: stilling pool; T-shaped pier; structure; numerical simulation; effect of energy dissipation