

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230066

丹江口大坝加高工程泄洪水力学原型观测综合分析

周 荣¹, 刘圣凡², 杨海从³

(1. 南水北调中线水源有限责任公司, 湖北 丹江口 442700; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010;
3. 汉江水利水电(集团)有限责任公司, 湖北 武汉 430048)

摘要: 丹江口大坝是汉江流域治理开发保护的工程, 同时亦是南水北调中线工程的水源工程, 大坝运行安全是关乎国家战略的支撑保障。大坝加高后运行水头增加, 泄洪过程中可能存在空化空蚀、下游冲坑上移等问题。为了掌握大坝加高后泄洪水力学特性, 对加高后泄洪建筑物安全进行评价, 通过水力学原型观测的手段重点观测了临底流速、动水压强、水流空化噪声、坝下冲刷等参数, 并结合以往研究成果进行了分析。结果表明, 设计水位下各观测参数在安全范围内; 针对表孔水舌冲击中隔墙问题优化了泄洪孔口开启次序; 对水道及边坡汛后出现的冲坑分析了原因并提出处理建议。研究发现的问题及处理措施可为类似工程提供参照。

关键词: 丹江口大坝; 水力学; 原型观测; 优化调度

中图分类号: TV135.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0058-04

1 概况

丹江口大坝加高是世界上最大规模的大坝加高续建工程^[1], 大坝加高后枢纽正常蓄水位 170.0 m, 设计洪水位 172.2 m, 校核洪水位 174.35 m, 总库容 $339.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[2], 大坝平面布置见图 1。泄洪建筑物布置与初期工程基本相同, 对已有深孔和表孔进行改建。深孔坝段布置在河床坝段右侧, 共 6 个坝段 12 孔(其中[#]8 坝段右侧深孔已改建为自备防汛电厂的进水口, 现存 11 孔), 孔口尺寸为 5 m × 6 m(宽 × 高), 深孔体型及位置未发生变化。表孔坝段布置在河床坝段中间, 共 11 个坝段 20 孔(其中[#]18 坝段为非溢流坝), 孔宽 8.5 m, 表孔堰顶高程 152 m, 设计堰上水头与初期相同, 堰面曲线整体抬升, 体型与初期基本相同。表孔检修门和工作门矩形门槽延用到大坝加高工程中。丹江口大坝是汉江流域治理开发保护的关键

性工程, 同时作为南水北调中线控制性工程之一, 运行安全至关重要。大坝加高表孔堰面高程相应增加, 泄流水舌挑距增加; 深孔最高运行水头比初期增加 30% 以上, 可能存在高速水流带来的空化空蚀等问题。为了掌握大坝加高后不同水位条件下深、表孔泄洪水流态及有关特性, 在 2019~2021 年观测了 162~170 m 水位条件下泄洪水力学特点。通过枢纽上下游水流形态、坝面动水压力、临底流速、水流空化特性及坝下冲刷深度等观测结果, 对丹江口大坝加高工程泄洪安全提供了科学支撑。将观测结果与以往研究成果对比, 分析了工程泄洪过程中可能存在的问题并提出了建议, 旨在为类似工程提供参照。

2 观测方法及测点布置

观测参数主要有水流流态、动水压力、临底流速、水流空化特性、坝下冲刷深度, 观测方法及测点布置见表 1。

3 观测结果

3.1 泄洪深孔

(1) 水流流态。深孔采用闸门全开方式泄洪, 进口前水面没有漩涡等不良流态, 仅有少量漂浮

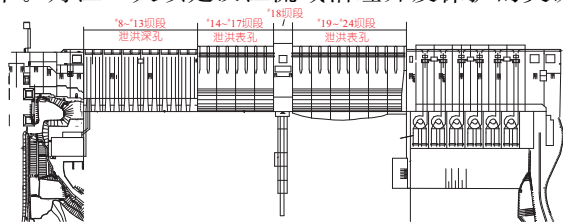


图 1 丹江口大坝混凝土坝段平面布置图

Fig. 1 Layout plan of concrete dam of Danjiangkou Dam

收稿日期: 2023-01-13, 修回日期: 2023-02-14

作者简介: 周荣(1991-), 男, 工程师, 研究方向为水利工程建设管理, E-mail: 825042596@qq.com

表 1 参数观测方法及测点布置

Tab. 1 Parameter observation method and measurement point layout

观测参数	观测方法	测点位置
水流流态	无人机、照相机、摄像机	大坝上、下游
动水压力	压力传感器+dasp 数据采集分析系统	堰面进口、直线段、反弧段等部位,表孔门槽后靠近堰面边缘边墙
临底流速	翼型探头+差压传感器+dasp 数据采集分析系统	表孔反弧段起始部位及反弧段最底部
水流空化噪声	水听器+尼高力高频采集分析系统	表孔堰顶靠近边墙处及出流挑坎处
坝下冲刷深度	陆上部分采用无人机航测技术,水下部分采用高精度 GNSS+测深仪一体化测量技术	坝下不同桩号地形测量

物聚集。明流段水流沿泄槽下泄,水流表面与边墙碰撞摩擦,侧墙边水流开始有白色水花出现^[3]。高速水流通过泄槽经挑流鼻坎挑向下游河道,挑流水舌纵向扩散较充分,相邻深孔水舌在空中横向连成一片;由于水舌表面紊动剧烈、掺气充分,总体呈乳白色絮状;水舌落入下游河道时与河道内水体发生碰撞,部分水体被激起数十米高,形成大量水雾升腾现象,现场雾化降雨主要影响右岸边坡,对左岸无影响。

(2)动水压力特性。深孔堰面各测点时均压力见图 2,各测点时均压力均为正值,最大压力值出现在反弧段底部,压力值为 $20.71 \times 9.81 \sim 23.18 \times 9.81$ kPa,与库水位成正比。泄槽斜坡段时均压力相对较小,为 $1.81 \times 9.81 \sim 2.64 \times 9.81$ kPa,与库水位成反比,若该部位流速较大可能会有空化空蚀问题。堰面各测点脉动压力均方根为 $0.54 \times 9.81 \sim 0.76 \times 9.81$ kPa,均较正常。各部位脉动压力测点的能量主要集中在 $0 \sim 1$ Hz 的低频段内。

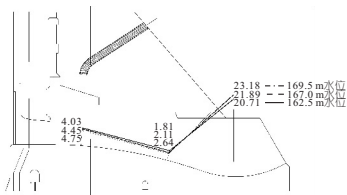


图 2 深孔堰面时均压力曲线(单位:9.81 kPa)

Fig. 2 Time-average pressure curve of deep-hole weir

(3)汛后检查。2021 年 10 月 10 日 14:00 时丹江口水库首次蓄水至正常蓄水位 170 m ^[4],汛后对深孔闸门后的泄槽流道进行检查,发现 #5~#12 深孔泄槽均存在不同程度的冲坑缺陷,泄槽底板表面骨料外露,大部分冲坑位于工作门后底板及侧墙根部。其中 #9 深孔闸门下游附近混凝土蚀损缺陷较为明显,冲蚀坑面积最大为 3.45 m^2 ,冲坑最深达 0.13 m 。

3.2 泄洪表孔

(1)水流流态。表孔泄洪流态见图 3,泄洪运行行为闸门全开方式,进口水流总体平顺,泄流时有明显的闸墩头部绕流现象。水流出闸室后沿溢流

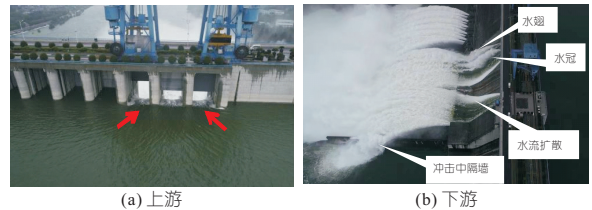


图 3 表孔上下游流态

Fig. 3 Upstream and downstream flow pattern of surface hole

坝面下泄时横向扩散明显,水流在闸下坝面交汇碰撞产生激溅水冠。挑流水舌在空中基本呈乳白色絮状,表孔水舌外缘轨迹线最高达 $130 \sim 135 \text{ m}$ 高程,水舌外缘挑距约 90 m 。当 #7 表孔开启而 #8 表孔关闭时,由于表孔溢流坝面上水流横向扩散,导致 #7 表孔向左扩散的部分水舌直接冲击坝下中隔墙,并有部分水舌翻过中隔墙顶部,持续水舌冲击可能会损毁中隔墙。#1 表孔泄洪过程中在其下游右侧导墙边激起了较高的水翅,激起水翅部位可能存在冲蚀破坏。

(2)动水压力特性。表孔堰面各测点时均压力见图 4,从表孔溢流坝面的时均压力分布来看,沿程压力变化总体平缓,压力值范围为 $0.53 \times 9.81 \sim 15.0 \times 9.81$ kPa。坝面最大压力出现在反弧段底部;堰顶以下 $8 \sim 17 \text{ m}$ 范围内的坝面测点压力较低。堰面测点脉动压力均方根为 $0.2 \times 9.81 \sim 0.32 \times 9.81$ kPa,均较正常。各部位脉动压力测点的能量主要集中在 $0 \sim 1$ Hz 的低频段内。

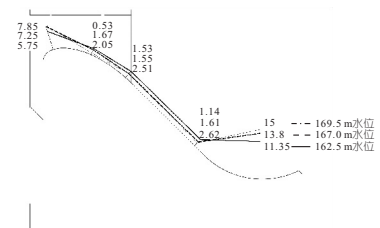


图 4 表孔堰面时均压力曲线(单位:9.81 kPa)

Fig. 4 Time average pressure curve of surface weir

(3)流速及水流空化特性。溢流面挑流鼻坎、反弧段起点测点平均流速为 $23 \sim 27 \text{ m/s}$,瞬时最大流速达 31 m/s ,平均流速值与相同库水位泄流条件的模型试验结果基本一致。结合以往研究经

验,原型观测中以背景噪声与观测工况噪声谱级差 ≥ 10 dB作为初生空化的判断标准,表孔堰顶下游附近测点、溢流面挑流鼻坎附近测点未检测到水流空化信息。

(4)汛后检查。2021年汛后对表孔流道进行检查,发现坝面局部冲蚀坑大部分为缝面混凝土破损,主要分布于大坝的施工横缝和纵缝处。各冲蚀坑的面积都不大,均未超过 0.3 m^2 ,而冲蚀坑深度也未超过 6 cm 。在 $\#1$ 表孔右侧导墙面,有约 1 m^2 的冲蚀坑。

3.3 坝下河床冲刷

目前坝下分布有3个冲坑,见图5。对比2005、2017、2021年测量结果发现,丹江口大坝下游冲坑变化较大的主要为1号冲坑, 75 m 高程下向下游淘刷幅度达 22 m ,等高线包围面积增大 $2\,050\text{ m}^2$,主要冲刷区域为 $\#12\sim\#15$ 坝段下游,最深点位置向右移动了 9 m ,向下冲深了 3 m ,且在冲坑尾部已冲出新的深槽;2、3号冲坑也有向下游延伸趋势,但幅度相对较小。

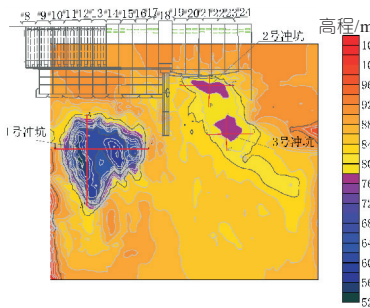


图5 下游冲坑现状

Fig. 5 Current situation of downstream pits

4 综合分析 with 优化建议

(1)由于深孔体型未改变,加高后运行水头增加,泄洪水舌挑距、挑高较加高前有所增加,导致1号冲坑向下游发展,冲坑深度增加。表孔堰面整体抬升,相较于加高前曲线堰面体型泄流流态差异不大,主要是水舌挑距、挑高增加带来的下游2、3号冲坑向下游发展的变化。

(2)深孔明流泄槽斜坡段的时均压力较低,在 $2.0\times 9.81\text{ kPa}$ 左右,而该部位的流速通过计算在 30 m/s 左右,库水位 170 m 时的水流空化数低至 0.26 ,存在空化空蚀的可能。另外,在深孔弧形闸门启闭过程中通过中小开度区间时,临近闸门的下游泄槽底板局部区域会出现水流反弹低压区,其水流空化数更低,也易发生空蚀破坏。2021年汛后泄槽的蚀损检查表明,多个深孔闸门

后泄槽存在明显的冲蚀破坏,系工程运行以来破坏最严重的一次。而且该部位没有设置掺气减蚀设施,发生空化空蚀是大概率事件。因此,建议对该部位采取更高强度的材料进行改造或修补、平衡使用各泄洪孔道、加强泄洪中的流态监控。

(3)针对 $\#7$ 表孔水舌横向扩散冲击下游中隔墙问题,初步分析是表孔调度运行不当产生的。以往水工模型试验研究明确提出了泄洪调度运行方式要求^[5],即先开启每区的两侧边表孔,之后再按照总体均匀、对称的原则开启本区的其他表孔;表孔坝段闸孔的关闭程序则是开启程序的逆过程。因此,在原型现场开启 $\#8$ 表孔泄洪后,其下泄水流阻断了右侧 $\#7$ 表孔水舌向左侧的横向扩散,挑流水舌不再冲击中隔墙,且与中隔墙保持一定距离,保障了中隔墙的安全。

(4)针对 $\#1$ 表孔右侧导墙面有约 1 m^2 的冲蚀坑,对比发现右侧导墙发生破坏的部位位于侧墙产生水翅的下游部位。分析认为,导墙冲蚀坑部位处于水流侧扩冲击区下游压力反弹区,压力低、水流掺气浓度小,可能会发生空蚀破坏。建议采用高强混凝土修补,并注意施工质量。或通过调度优化措施,减轻 $\#1$ 表孔水流对侧墙的侧扩冲击力。

(5)以往的原型观测和水力学模型试验结果^[6]表明,因表孔工作门槽为矩形门槽,门槽下游墩墙处是泄洪运行安全的最薄弱处,风险最大。根据模型试验资料分析,库水位 170 m 时紧邻工作门槽下游墩墙区的最低压力可达 $-2.0\times 9.81\text{ kPa}$,在更高水头运行条件下,水流经过两道闸门后工作门槽下游墩墙下部的压力会进一步降低,空化噪声谱级差会进一步增加,空化特性可能会进一步恶化。本次原型观测由于现场测点位置不在最低压力区域,表孔工作门槽下游侧墙的时均压力在 $0.8\times 9.81\sim 2.0\times 9.81\text{ kPa}$ 范围,汛后检查未发现空蚀痕迹。泄洪后需加强表孔门槽后部检查工作。

5 结论

a. 观测结果显示泄洪过程中各参数均较正常,表孔坝段门槽处虽有先天设计不足,但过流面未见明显空蚀和泥沙磨损破坏,深孔坝段已出现部分冲蚀破坏,但不严重。坝下挑流消能区冲坑最深约 36 m ,折算其上游坡比 $1:4.9$,缓于临界坡,表明丹江口大坝加高工程泄水建筑物布置总体是成功的。

b. 自 2013 年丹江口水库蓄水以来,经过 9 个汛期,特别是 2021 年最大入库洪峰流量 24 900 m³/s 的考验,泄水建筑物运行调度正常。深孔虽然泄洪历时较长,但大多在中低库水位 165 m 以下运行,170 m 库水位以上泄洪较少,表孔泄洪历时较短,还需进一步加强高水位运行工况水力学原型观测。

参考文献:

[1] 付建军,王梦凉,王保红,等.丹江口大坝加高施工和枢纽运行管理[J].人民长江,2015,46(6):14-16,34.

[2] 陈志康,谢波,郑光俊.南水北调中线一期水源工程丹江口大坝加高设计[C]//大坝加高与新技术应用,2013.

[3] 肖兴斌.丹江口水利枢纽泄水建筑物水工试验[J].湖北水力发电,1991(2):30-37.

[4] 陈桂亚,郑静,张潇.2021 年丹江口水库防洪与蓄水[J].中国水利,2022(5):24-27.

[5] 段文刚,张晖,侯冬梅.丹江口工程大坝加高后的几个水力学问题[J].水电与新能源,2007(3):52-57.

[6] 曾祥,王才欢,肖兴斌.丹江口枢纽加高续建溢流表孔水力学问题研究[J].长江科学院院报,1998,15(4):13-17.

Comprehensive Analysis of Flood Discharge Hydraulics Prototype Observation of Danjiangkou Dam Heightening Project

ZHOU Rong¹, LIU Sheng-fan², YANG Hai-cong³

(1. South-to-North Water Diversion Middle Route Water Source Co., Ltd., Danjiangkou 442700, China;
2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Hanjiang Water Resources and Hydropower (Group) Co., Ltd., Wuhan 430048, China)

Abstract: Danjiangkou Dam is a control project for the development and protection of the Hanjiang River basin, and is also a water source project for the Middle Route Project of the South-to-North Water Transfer Project. The dam operation safety is the support and guarantee of the national strategy. After the dam heightening, the operating water head will increase, and there may be cavitation, and the downstream scour pit will move upward during the flood discharge process. In order to master the mechanical characteristics of flood discharge after heightening the dam and evaluate the safety of flood discharge structures, the parameters such as bottom flow velocity, dynamic water pressure, flow cavitation noise, and scouring under the dam are mainly observed by means of field hydraulic prototype observation, and the results of previous studies are analyzed. The observation parameters under the design water level are within the safe range. Aiming at the problem that the water tongue of the surface hole impacts the middle wall, the opening order of the flood discharge orifice is optimized. The causes of the scour holes in the flow channel and side wall after the flood season are analyzed and the treatment suggestions are put forward. The problems found and treatment measures can provide reference for similar projects.

Key words: Danjiangkou Dam; hydraulics; prototype observation; optimal scheduling

(上接第 103 页)

Research on Dam Displacement Prediction Based on Improved Combined Deep Learning Model

REN Chuan-dong¹, WANG Zhi-zhen², LIU Shu-ping³, LIU Hong-wei¹, HOU Long-tan¹

(1. Shandong Provincial Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;
2. Shandong Agricultural Exchange and Cooperation Center, Jinan 250013, China;
3. Shandong Hydraulic Engineering Construction Quality and Safety Center, Jinan 250013, China)

Abstract: Dam displacement can directly affect the quality and operation safety of the dam. To find out the prediction model of the dam displacement, the temporal convolutional neural network model was used to predict the dam displacement. Three bionic algorithms of the sparrow search algorithm (SSA), the gray wolf algorithm (GWO) and the bat algorithm (BA) were improved by genetic algorithm, and three optimization algorithms including MSSA, MGWO and MBA were obtained. Taking root mean square error, determination coefficient, mean absolute error, efficiency coefficient and GPI index as precision index system, three combined weighted models including D-MSSA-TCN, D-MGWO-TCN and D-MBA-TCN were constructed based on the deep belief network model (DBN). The results show that the MSSA algorithm had the highest operating efficiency and accuracy among all the algorithms. The accuracy of the three combined models was significantly higher than the rest of the models. The D-MSSA-TCN model had the highest accuracy among all models and can be recommended for estimating dam displacement.

Key words: dam displacement; temporal convolutional neural network; sparrow search algorithm; genetic algorithm; deep belief network model