



汉江雅口航运枢纽施工纵向围堰 对泄流能力影响研究

杨洪祥¹, 孙保虎¹, 罗海程¹, 李君涛², 梁 砚²

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051;
2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要: 混凝土围堰结构稳定, 占用河床面积小, 抗冲效果好, 广泛运用于枢纽分期导流施工组织设计中, 但面临后期拆除困难, 拆除废料难以清除及对周边建筑物影响大的特点。针对汉江雅口航运枢纽施工纵向围堰对泄流能力影响, 采用CATIA软件进行三维数值模拟, 在不同特征洪水流量下对纵向围堰保留与拆除方案进行流场、泄流能力和水位影响分析, 为纵向围堰保留与拆除方案选取提供科学依据。结果表明: 保留纵向围堰将会降低紧邻区域泄水闸闸孔的水流流速和泄流能力, 一定程度增加河道中心壅水高度, 但仍满足枢纽泄流能力控制标准要求, 纵向围堰经安全稳定复核后可予以保留, 为类似枢纽工程施工组织设计提供经验参考。

关键词: 航运枢纽; 纵向围堰; 泄水闸闸孔; 泄流能力; 施工组织设计

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0204-08

Impact of longitudinal cofferdam on discharge capacity of Yakou Shipping Hub in Han River

YANG Hongxiang¹, SUN Baohu¹, LUO Haicheng¹, LI Juntao², LIANG Yan²

(1. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: The concrete cofferdam structure is stable, occupies a small riverbed area, and has good anti erosion effect. It is widely used in the construction organization and design of hub stage diversion. However, it faces difficulties in later demolition, difficulty in removing demolition waste, and significant impact on surrounding buildings. This article focuses on the impact of longitudinal cofferdams construction on discharge capacity of the Yakou Shipping Hub in the Han River. CATIA software is used for three-dimensional numerical simulation, and flow field, discharge capacity, and water level effects are analyzed on the retention and removal plans of longitudinal cofferdams under different characteristic flood flows. This provides a scientific basis for the selection of retention and removal plans for longitudinal cofferdams. The results show that retaining the longitudinal cofferdam will reduce the water flow velocity and discharge capacity of the adjacent area's discharge gate hole, increase the height of the central blockage of the river to a certain extent, but still meet the requirements of the hub discharge capacity control standard. After safety and stability review, the longitudinal cofferdam can be retained, providing experience reference for the construction organization design of similar hub projects.

Keywords: shipping hub; longitudinal cofferdam; sluice gate hole; discharge capacity; construction organization design

收稿日期: 2023-12-24

作者简介: 杨洪祥 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事枢纽与船闸工程设计研究工作。

施工围堰作为临时建筑物, 在工程建成后一般予以拆除, 但枢纽工程中多数混凝土围堰拆除面临高水位下作业困难, 拆除废料对周边建筑物影响大等问题, 而保留围堰将对枢纽泄流产生一定影响, 围堰保留和拆除方案的选取需科学决策。曾辉等^[1]采用河道二维水动力模型, 研究葛洲坝钢板桩纵向围堰拆除和重建对船闸通航安全影响; 郭红民等^[2]从上游水位变化、截流过程中的水力学参数变化及截流抛投材料变化等方面对黄登水电站进行截流模型试验研究, 分析导流洞进出口围堰残埂对截流的影响。学者先后研究了围堰和截流残埂的拆除与保留对枢纽泄流能力的影响, 结果表明: 围堰保留对于河道水位具有一定影响, 在一定程度上增加了截流难度, 且对过流能力的影响较大^[3-5]。因此, 本文在前期研究成果基础上, 针对雅口航运枢纽施工纵向围堰后期处理方

案选择的问题, 利用三维数值模拟方法, 研究纵向围堰保留和拆除方案对枢纽泄流能力的影响及其延伸出的共性问题, 提出纵向围堰保留的可行性, 旨在为类似枢纽工程施工组织设计提供经验参考。

1 工程概况

汉江雅口航运枢纽工程是交通运输部和湖北省水运“十三五”重点项目, 是汉江干流湖北省内梯级开发的第 6 级。工程位于宜城市, 是一座以航运为主, 结合发电, 兼顾旅游、灌溉等水资源综合开发功能的枢纽工程, 是汉江丹江口—河口段高等级航道达标的关键工程^[6]。

枢纽坝轴线总长 3 179.9 m, 自右至左分别为: 右岸土石坝、船闸、连接段、过鱼设施和电站厂房、泄水闸、左岸土石坝^[7]。雅口枢纽总体布置见图 1。



图 1 雅口枢纽总体布置

枢纽泄水闸建筑物采用平底闸形式, 共布置 44 孔, 单孔净宽 14 m。工程施工采用两期施工导流方案, 见图 2。一期导流围右岸船闸、厂房+右岸 16 孔闸坝, 由左侧疏挖后的河床过流及通航, 采用全年土石围堰。二期导流围左岸剩余闸坝, 采用过水围堰, 利用右岸已建闸坝过流, 已建船闸通航^[8]。

施工采用纵向混凝土围堰, 与泄水闸轴线正交布置, 全长 454 m, 泄水闸上游段长 233 m, 中

间段利用溢流坝闸墩, 下游段长 221 m。泄水闸孔由左至右编号为 1#~44# 闸孔, 纵向围堰位于 29# 和 30# 闸孔之间。施工纵向围堰结构见图 3。

泄水闸泄流与水流参数相关, 混凝土纵向围堰的保留将影响水位和流场的波动变化, 产生影响泄水闸过流能力的共性问题, 特别是影响围堰紧邻区域的泄水闸孔水流流速和泄流能力, 需研究保留方案是否满足枢纽泄流能力控制标准要求。

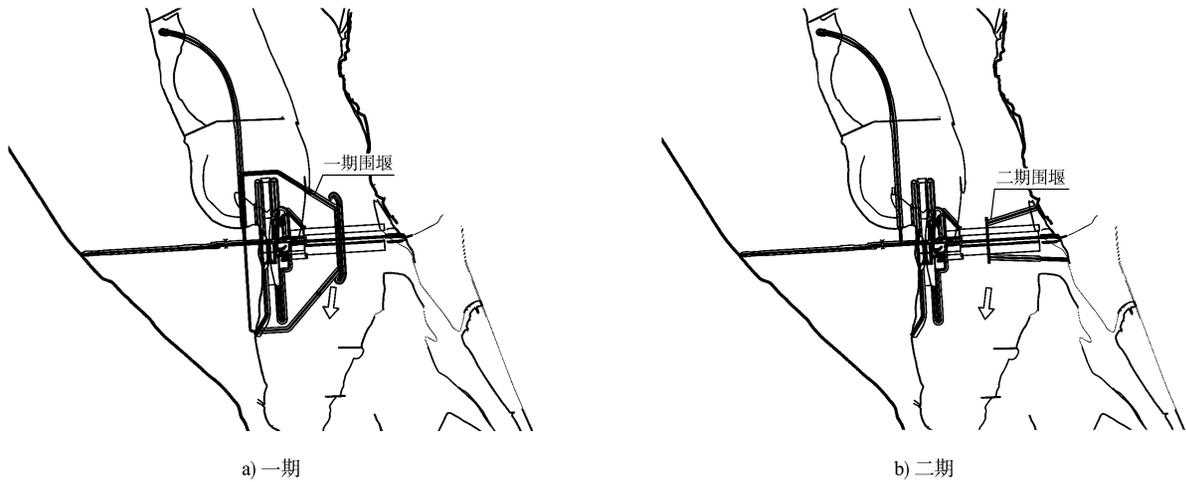


图 2 雅口枢纽围堰布置

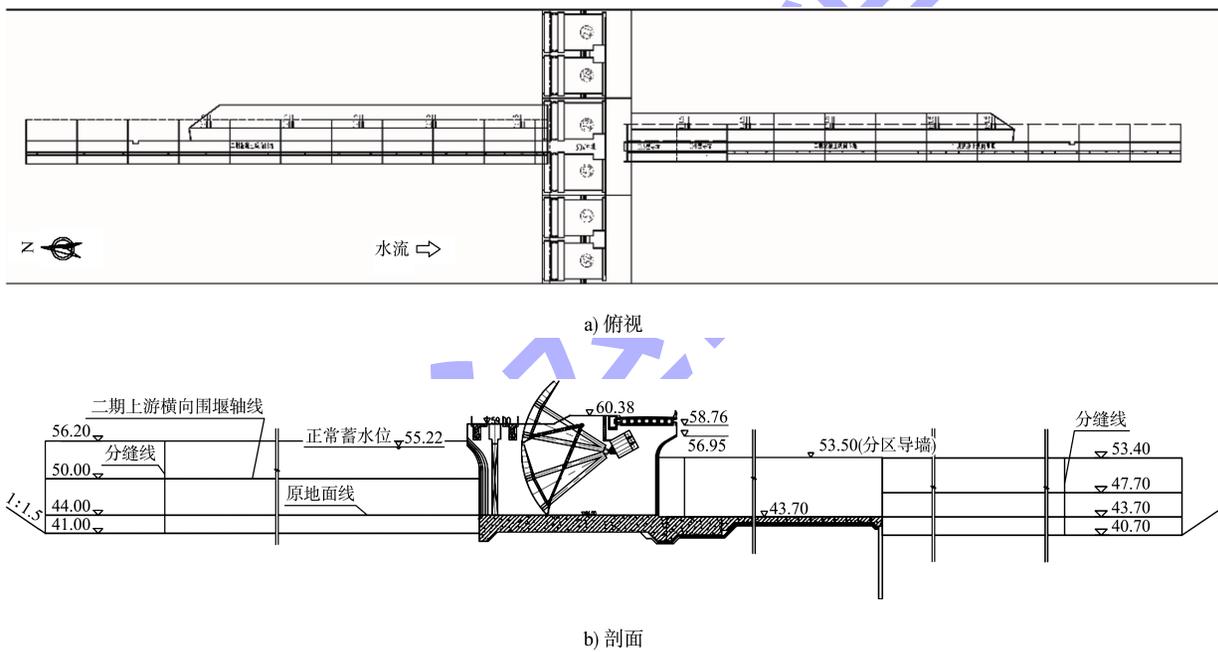


图 3 雅口枢纽施工纵向围堰结构

2 泄洪设计标准

雅口航运枢纽设计洪水标准采用丹江口后期规模 50 a 一遇，相应洪峰流量 2.02 万 m^3/s ；校核洪水标准为丹江口后期规模 300 a 一遇，相应洪峰流量 2.73 万 m^3/s ^[9]。

泄水建筑物泄流壅高值应根据对上游淹无影响，允许过闸单宽流量和工程造价等因素综合比较确定，平原地区泄水建筑物在宣泄设计洪水或校核洪水时，壅高值不宜大于 0.3 m^[10]。考虑坝址河段与枢纽工程布置的实际情况，提出雅口枢

纽整体泄流能力的控制标准^[11]：泄水闸过闸水位差不大于 0.3 m^[12]；枢纽上游水位壅高值（较天然工况）在宣泄设计洪水时不大于 0.3 m，在宣泄校核洪水时不大于 0.5 m。

3 模型建立与验证

3.1 模拟范围

模拟范围包括枢纽坝址以及上下游各 5 km 河道，见图 4，模型整体宽约 5 km、长 10 km，整体三维数值模型见图 5。

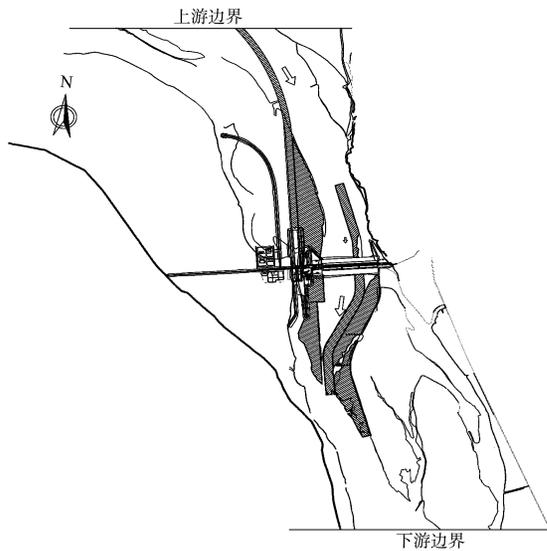


图 4 数学模型计算范围



图 5 三维数值整体模型

3.2 模型建立

三维模型采用 CATIA 软件进行建模, 结合工程特点综合考虑, 选用浅水-三维混合模型, 即对整体宽浅河道采用浅水 (shallow water) 模型, 对泄水闸上下游 550 m 范围进行三维加密。河道整体网格尺寸为 10 m×10 m, 泄水闸部分网格加密至 1.5 m×1.5 m, 以确保模拟精度, 整体网格总数为 611 万个。控制方程组离散使用有限差分法, 压力场和速度场的耦合使用 PISO 算法, 时间步长取 0.002 5 s。模型水面使用 VOF 方法处理。

3.3 模型验证

采用 1:100 整体水工物理模型试验成果进行模型验证, 验证流量分别为 300 a 一遇洪水和 50 a 一遇洪水, 水位验证测点和沿程水位对比结果见图 6、7。可以看出, 在两级特征洪水流量下, 枢纽上下游河道沿程水位与物理模型试验成果基本一致, 最大偏差不超过 0.04 m, 平均偏差为 0.02 m, 满足精度要求。

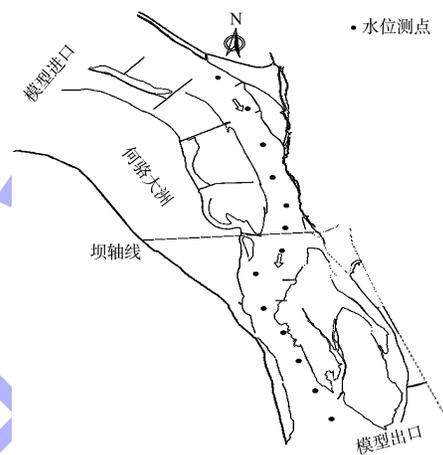


图 6 水位验证测点

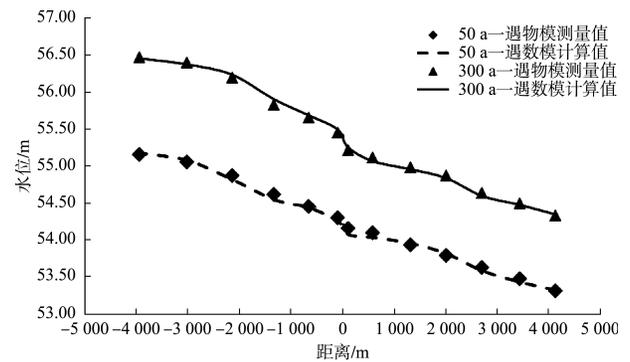


图 7 沿程水位对比

4 研究成果分析

4.1 计算工况

试验选取 4 级典型特征洪水流量进行计算, 分别为 1.35 万 m^3/s (10 a 一遇)、1.70 万 m^3/s (20 a 一遇)、2.02 万 m^3/s (50 a 一遇)、2.73 万 m^3/s (300 a 一遇), 各级流量下分别进行施工纵向围堰拆除与保留两种工况的计算分析。

4.2 流场变化

各工况下河道局部流场分布见图8，其中流速为垂向平均流速。

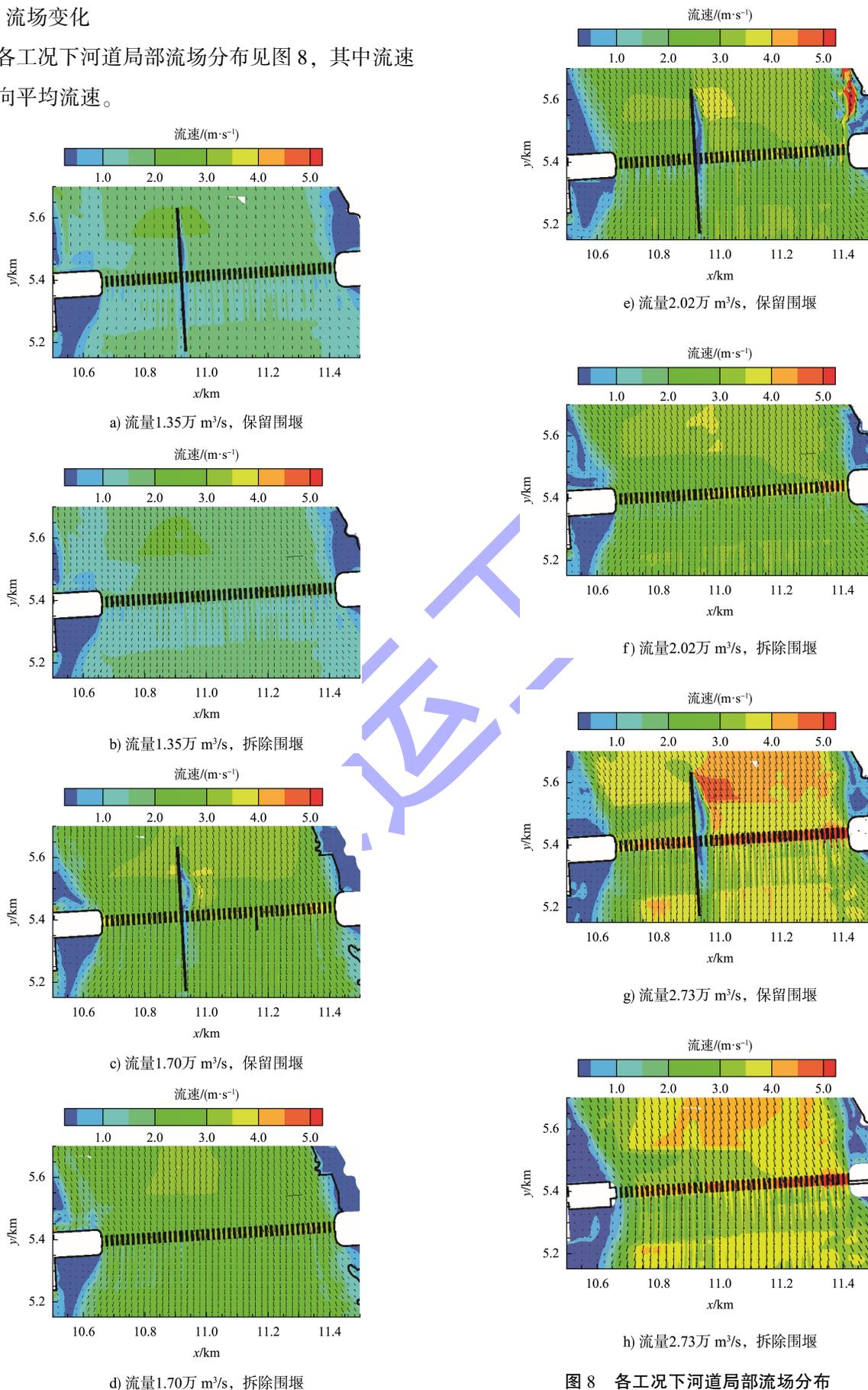


图8 各工况下河道局部流场分布

从流场图来看, 各工况下水流在泄水闸附近存在一定程度弯曲, 河道左侧水流流速略高于右侧, 各特征流量拆除围堰工况下水流较平顺, 流速分布较均匀, 但由于主流弯曲, 河道右侧闸前水流与泄水闸轴线夹角偏大, 右侧闸前水流流速略小。保留围堰工况下水流受纵向围堰掩护挑流影响, 在纵向围堰左侧形成一定范围低流速区, 且

影响范围随流量增大而增大, 进而使得其左侧 3 孔泄水闸(即 27#~29# 闸孔)前水流流速减小。

4.3 泄水闸孔过流能力变化

对比不同泄水闸孔的过流量差异及变化, 分别计算不同工况下各个闸孔的过流量。保留及拆除纵向围堰工况下各泄水闸孔过流量, 见图 9。

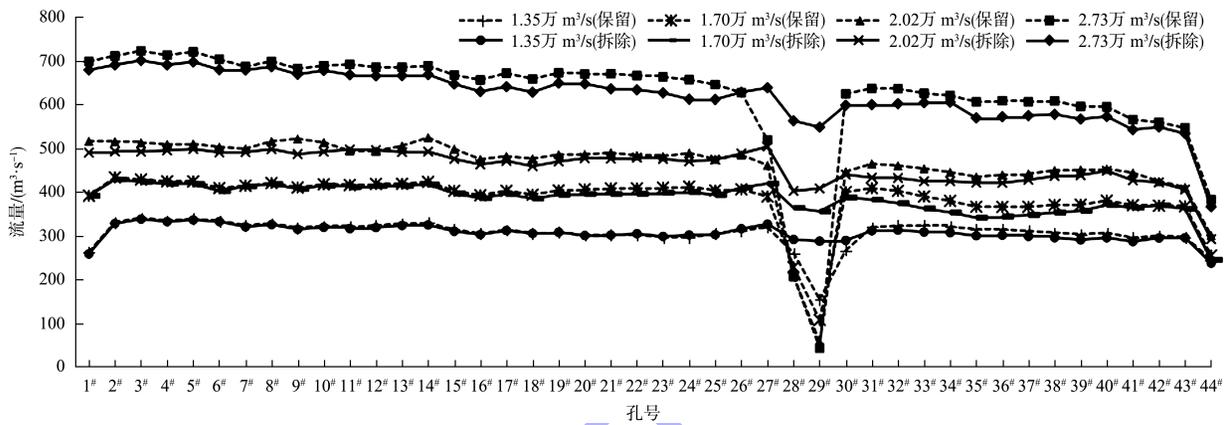


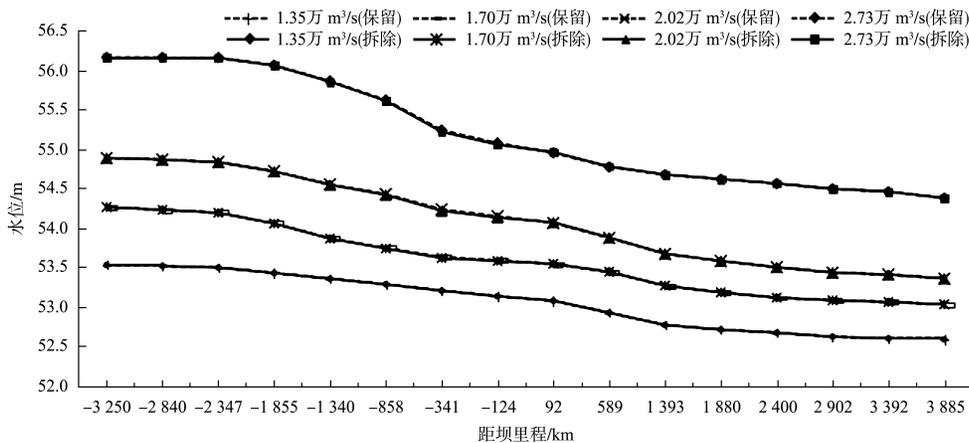
图 9 不同工况下各闸孔过流量

在图 9 的 4 级典型洪水流量下, 受影响泄水闸孔(27#~29# 闸孔)过流减小量分别为 133.00、383.30、546.60、977.39 m³/s。随上游来流量增大, 纵向围堰对其左侧紧邻闸孔水流影响逐渐增大, 纵向围堰左侧相邻泄水闸孔过流量减小, 泄流能力减弱、闸孔过流量分布不均。在保留纵向围堰工况下, 受影响闸孔过流量明显减小, 原因在于各流量下水流在纵向围堰上游端头处形成挑流, 水流方向与围堰轴线形成一定夹角, 在纵向围堰左侧形成一定范围低流速区, 降低了左侧

3 孔过流量, 进而使得局部水位壅高。拆除纵向围堰后, 水流较为平顺, 各闸孔流量趋于均匀, 局部水位壅高有所缓解。研究表明由于影响流量占比不足总量 4%, 影响流量将由其他 41 孔泄水闸共同分摊, 总体泄流能力影响不大。

4.4 沿程水位变化

对各工况下主河道中间及左右岸沿程水位变化进一步分析, 量化各工况下纵向围堰对河道上游 2.9 km 至下游 4.0 km 沿程水位的影响程度及范围见图 10。



a) 左岸

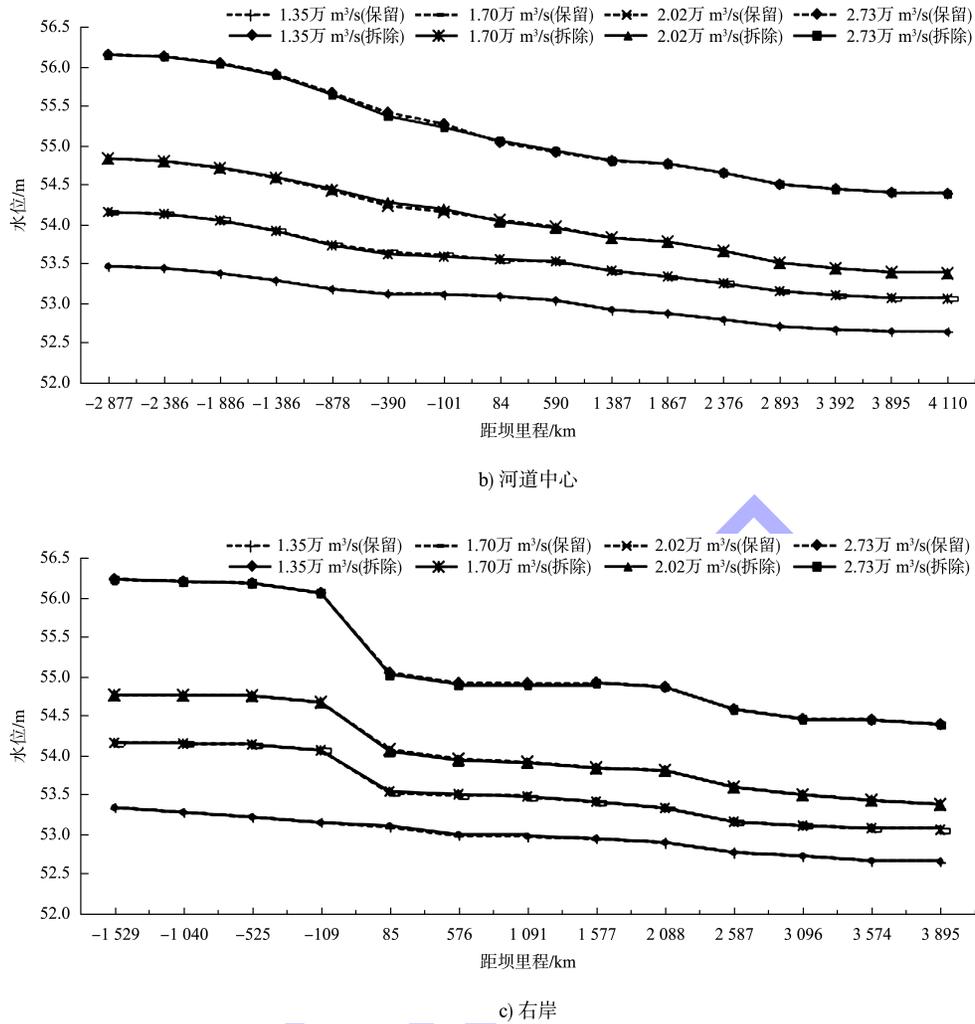


图 10 各流量工况下左岸水位变化

保留纵向围堰与拆除纵向围堰相比，其水位壅高值及影响范围见表 1；保留纵向围堰与枢纽未建之前的天然状况相比，其水位壅高值及泄水闸上下游水位差见表 1。

表 1 保留纵向围堰下水位参数

流量/ ($\text{万 m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	较拆除工 况壅高值/ m	影响 范围	坝上水位较 天然工况最 大壅高值/m	上下游 水位差/ m
1.35	0.01	基本一致	0.04	0.03
1.70	0.02	上游 900 m	0.08	0.06
2.02	0.04	上游 1 400 m	0.19	0.16
2.73	0.05	上游 1 800 m	0.45	0.24

综上，保留纵向围堰对枢纽泄流能力(水位)的影响主要集中在河道中心泄水闸上游约 1 800 m 范围内。泄流量为 1.35 万、1.70 万、2.02 万、2.73 万 m^3/s 时，保留围堰与拆除围堰相比最大壅

水分别为 0.01、0.02、0.04、0.05 m。与天然状况相比，保留纵向围堰各特征洪水工况下，枢纽上游水位在宣泄设计洪水时最大壅高为 0.19 m，在宣泄校核洪水时最大壅高值为 0.45 m，泄水闸上下游最大水位差为 0.24 m，均满足泄洪设计标准要求。

5 结论

1) 由于枢纽所处河段河势弯曲，闸前水流与泄水闸纵轴线存在一定夹角，保留纵向围堰工况下，水流在围堰端头形成挑流，其左侧紧邻的 3 孔泄水闸闸前水流流速降低，闸孔过流量有所减小，局部闸孔过流能力减弱，泄水闸过流不均匀。

2) 各特征洪水工况下，左右岸最高水位在保留与拆除围堰工况下基本保持一致，保留围堰工况河道中心最大壅水为 0.05 m，最大壅水范围约

为泄水闸上游 1 800 m。

3) 与天然状况相比, 保留纵向围堰各特征洪水工况下, 枢纽上游水位在宣泄设计洪水和校核洪水时最大壅高值及泄水闸上下游最大水位差均满足泄流能力控制标准要求, 总体泄流能力影响不大。

4) 保留纵向围堰会降低紧邻区域的泄水闸孔泄流能力, 一定程度增加河道中心壅水高度, 但仍满足泄流能力控制标准要求。纵向围堰由临时工程转换为永久工程, 经复核计算满足安全稳定要求后可予以保留, 并在运行期增加相应观测措施。

5) 雅口航运枢纽采用本研究成果, 并通过 2023 年汉江秋汛验证满足泄洪设计标准。针对不同枢纽的施工组织特点, 研究纵向围堰保留和拆除方案对枢纽泄流能力的影响及其延伸出的共性问题, 需要采用数学模型或物理模型模拟, 并通过实测洪水验证, 可为类似枢纽工程施工组织设计提供经验参考。

参考文献:

- [1] 曾辉, 刘振嘉, 喻峰, 等. 拆除葛洲坝钢板桩纵向围堰对 1 号船闸通航安全影响[J]. 水运工程, 2023(12): 124-131, 189.
- [2] 郭红民, 王静静, 向光明, 等. 黄登水电站导流洞围堰残埂对截流的影响[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 26-28.
- [3] 付文宣, 贺昌海, 费文才, 等. 白鹤滩水电站导流洞进出口围堰残埂对导流洞泄流能力的影响[J]. 水电能源科学. 2014, 32(9): 115-118.
- [4] 肖桃李, 魏文俊. 基于模型试验的导流洞围堰残埂对截流的影响研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(1): 122-125, 283.
- [5] 孟鸣, 容晓, 王志新. 导流洞进口围堰残埂对截流影响的研究[J]. 广东水利水电, 2009(9): 14-15, 25.
- [6] 湖北省交通规划设计院. 汉江雅口航运枢纽工程可行性研究报告[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院, 2016.
- [7] 孙保虎, 张信伟, 胡峰军, 等. 汉江雅口航运枢纽工程总体布置[J]. 水运工程, 2019(1): 126-130.
- [8] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 湖北省交通规划设计院. 汉江雅口航运枢纽工程初步设计报告[R]. 长沙: 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 2016.
- [9] 湖北省交通规划设计院. 汉江雅口航运枢纽工程施工图设计(第三册): 挡、泄水建筑物[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院, 2016.
- [10] 中交水运规划设计院有限公司. 渠化工程枢纽总体设计规范: JTS 182-1—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [11] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 汉江雅口航运枢纽工程整体水工模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2014.
- [12] 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 水闸设计规范: SL 265—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 203 页)

- [4] 王艳妮. 海洋工程锚泊系统的分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [5] 陈晨. 海上打桩船水动力性能及系泊系统研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [6] American Petroleum Institute. Geotechnical and Foundation Design Considerations [S]. Washington: American Petroleum Institute, 2014.
- [7] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 水运工程桩基设计规范: JTS 147-7—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [9] British Standard Institution. Maritime structures. Part I: code of practice for general criteria: BS 6349-1: 2000[S]. London: British Standard Institution, 2000.
- [10] OPTIMOOR USERS GUIDE. Oil Companies International Marine Forum [R]. London: Tention Technology International Ltd., 2012.

(本文编辑 赵娟)