

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.023

阿克塞供水工程渠首枢纽消力池体型优化试验研究

方有彦¹, 张学政², 李奇龙², 王天凡², 赵一方², 白翠萍³, 曹伟康¹

(1. 酒泉市百川水务发展有限公司, 甘肃 酒泉 735000;

2. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

3. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对阿克塞供水工程渠首枢纽坝址区河床覆盖层为14.9~28.7 m厚度的沙卵砾石层, 其抗冲条件差, 泄洪时单宽流量大且下游河道宽阔, 水深条件不足, 消能防冲问题极其突出的问题, 为确保工程泄洪安全, 采用物理模型试验方法, 在传统单级消力池基础上, 增设二级消力池以延长消能路径, 同步降低消力池底板高程以提升消能空间, 并设置差动尾坎以减小消力池后水面二次跌落。结果表明: 两级消能方案使消力池内流速降低到5~7 m/s, 降幅超50%, 下游最大冲深减小到10.9 m, 降幅达28.3%。采用优化后的二级消力池方案有效解决了单宽流量大, 下游水深过浅, 抗冲流速小的消能问题。

关键词: 阿克塞供水工程; 闸坝结合式渠首枢纽; 二级消力池; 大单宽流量; 厚覆盖层; 消能防冲

中图分类号: TU653.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0158-07

Experimental Study on Energy Dissipation Pool Shape Optimization of the Diversion Hub for the Akesai Water Supply Project

FANG Youyan¹, ZHANG Xuezheng², LI Qilong², WANG Tianfan²,
ZHAO Yifang², BAI Cuiping³, CAO Weikang¹

(1. Jiuquan City Baichuan Water Resources Development Co., Ltd., Jiuquan, Gansu 735000, China;

2. State Key Laboratory of Ecological Water Resources in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Gansu Provincial Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The water supply project of Aksai adopts a combined arrangement of sluice and dam at the headworks. The riverbed in the dam site area is covered with a layer of sand, pebbles and gravel with a thickness of 14.9 to 28.7 meters, which has poor anti-scouring conditions. During flood discharge, the unit width flow rate is large and the downstream river channel is wide, with insufficient water depth conditions, which makes energy dissipation and anti-scouring issues extremely prominent. To ensure the safety of flood discharge for the project, a physical model test method was adopted. Based on the traditional single-stage energy dissipation basin, a secondary energy dissipation basin was added to extend the energy dissipation path, and the bottom elevation of the energy dissipation basin was simultaneously lowered to increase the energy dissipation space. A differential tail sill was also set to reduce the secondary drop of the water surface behind the energy dissipation basin. The results show that the two-stage energy dissipation scheme reduces the velocity in the stilling basin to 5~7 m/s, a decrease of over 50%, and the maximum scour depth downstream to 10.9 m, a reduction of 28.3%. The optimized two-stage energy dissipation basin scheme effectively solves the energy dissipation problems of large unit width flow rate, insufficient downstream water depth and small anti-scouring flow velocity.

Keywords: Aksai water supply project; gate-dam combined intake structure; two-stage energy dissipation basin; large unit width flow; thick overburden layer; energy dissipation and anti-scouring

收稿日期: 2025-11-27

修稿日期: 2026-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279075)

作者简介: 方有彦(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程建设管理工作。E-mail: 53160112@qq.com

通讯作者: 李奇龙(1985—), 男, 讲师, 主要从事旋流泄洪消能与水工水力学的工作。E-mail: lql1237@163.com

阿克塞供水工程渠首枢纽采用闸坝结合布置方式^[1],由挡水建筑物、泄水建筑物和引水建筑物组成。由于工程泄洪时单宽流量大,工程区河床覆盖层为厚度14.9~28.7 m的沙卵砾石层,抗冲能力极低(允许不冲流速仅0.55~0.56 m/s),且下游河道宽阔,泄洪时下游水深很小,消能防冲问题十分突出。对于此类地质条件差、下游水深小的闸坝工程,消能防冲设计成为枢纽设计的关键技术难题。

相关学者已经对类似条件消能问题进行过不少研究,谢泽等^[2]针对某水电站消力池原设计方案出现的大单宽流量、低佛汝德数水流消能问题通过采用下挖式消力池与消能墩的联合消能方案改善消力池内水流流态;崔晓玉等^[3]通过设置平角跌坎消力池+池内消力坎从根本上解决了某大单宽、低弗劳德数闸坝工程底流消能时易存在不稳定流态且消能率低等问题;俞晓伟等^[4]通过在消力池池首0.35L(L为消力池池长)处布置双排交错形式梯形墩,并增设单排等间距、高度与尾坎同高的悬栅有效降低了消力池出口流速;对于低水头、大单宽流量且尾水位较深的工程,出流湍动高,消力池外出现二次水跃,Zhou等^[5]采用物理模型和数值模拟相结合的方法,提出用局部宽尾墩方案降低出流流速,消除消力池外二次水跃。前人的研究成果多聚焦于大单宽流量水流的消能问题,但其研究场景存在局限性。对于大单宽流量下,覆盖层厚易被冲刷且下游水深极小的复杂工况,目前相关研究仍较为匮乏,尚未形成系统结论。

为此,本文通过物理模型试验,针对阿克塞供水工程渠首枢纽的特殊水文地质条件,分析比较本工程采用单级与二级消力池的水力特性差异,提出适合本工程水文地质特点的消能防冲措施形式,并对消力池体型进行优化,确保本工程泄洪安全,研究成果可为类似工程泄洪建筑物设计提供参考。

1 工程概况

阿克塞供水工程渠首枢纽位于甘肃省酒泉市阿克塞县大哈尔腾河中游下段骆驼脖子以上3.2 km处。坝址区河床主体为第四系冲洪积砂砾石层,颗粒松散、胶结性差,抗冲刷能力弱,地层无连续硬岩底板,松散堆积层厚度较大,冲刷易向深层发展,覆盖层限制粒径 $d_{60} = 7.91$ mm,中值粒径 $d_{50} = 4.3$ mm,有效粒径 $d_{10} = 0.204$ mm,中间粒径 $d_{30} = 0.76$ mm,不均匀系数 $C_u = 38.77$,曲率系数 $C_c = 0.358$,颗粒不均匀且不连续,属级配不良土。

渠首枢纽由挡水建筑物、泄水建筑物和引水建筑物三部分组成,平面布置图见图1。挡水建筑物为碾压式黏土心墙砂砾石坝,坝顶高程3 533.80 m,最大坝高16.3 m。泄水建筑物包括开敞式溢流坝、3孔泄洪闸和1孔冲砂闸。溢流坝设2孔,堰顶高程3 530.70 m,单孔过水宽度10 m;泄洪闸和冲砂闸分别设3孔和1孔,均为胸墙式进口,进口底板高程3 521.00 m,孔口尺寸分别为4.0 m×4.8 m和2.5 m×3.0 m(宽×高)。引水建筑物为1孔进水闸,布置于右岸副坝段,闸进口底板高程3 526.00 m。

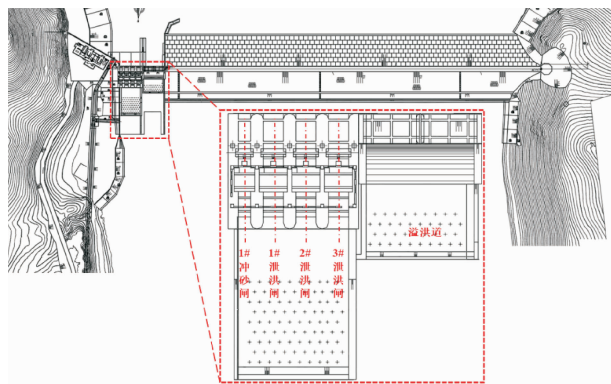


图1 工程布置图

枢纽防洪标准采用50年一遇设计,相应入库洪水洪峰流量 $344 \text{ m}^3/\text{s}$,设计洪水位3 530.70 m;300年一遇校核,相应入库洪水洪峰流量 $608 \text{ m}^3/\text{s}$,最大出库流量 $408 \text{ m}^3/\text{s}$,校核洪水位3 531.00 m。

2 模型设计与试验方法

2.1 模型设计与制作

本试验依据重力相似准则^[6](弗劳德相似准则)设计,模型几何比尺为1:35,相应的其它水力要素比尺可依据重力相似准则得到。

试验模型系统主要由供水系统、上游量水堰、稳水池、库区段、黏土心墙砂砾石坝、泄水建筑物模型、下游河道段(包括动床)及退水渠等部分组成。

泄水建筑物采用有机玻璃制作,其糙率约为0.008,按比尺换算至原型为0.014,与原型泄水建筑物表面糙率基本一致。上游库区模拟至坝轴线上游250 m,库区河道模拟宽度250 m。下游河道模拟至坝轴线下游475 m,模拟宽度按整个河道宽度模拟。

针对下游冲刷问题,对溢流坝和泄洪冲砂闸出口的下流局部河道做了动床模拟^[7]。动床冲刷坑

从溢流坝和泄洪冲砂闸消力池末端断面开始,至泄洪冲砂闸消力池末端往下游 170 m,动床模拟深度约为 15 m。动床区覆盖层按原型允许流速(抗冲流速)为 0.55~0.56 m/s 时保证模型抗冲流速相似来模拟,下游河道动床的冲刷料用散粒体充当冲刷料,其直径根据伊兹巴什公式 $V_{抗冲} = (5 \sim 7) d^{1/2}$,由下游河道抗冲流速相似来确定模拟下游河道覆盖层冲刷料的颗粒粒径。由地址条件,原型抗冲流速取值 0.55~0.56 m/s,依据 $V_{抗冲} = (5 \sim 7) d^{1/2}$,计算动床试验模型冲刷料颗粒粒径为 0.18~0.36 mm,中值粒径为 0.27 mm。试验对备选动床冲刷料进行严格筛分,合格后填入下游河道。

2.2 测量内容与与方法

试验对水流流态、壁面压强、水面线、流速等水力特性进行了量测。其中,流量采用矩形薄壁堰量测;上下游水位、水面线用精度为 0.1 mm 的水位测针量测;流速用毕托管量测;壁面压强用布置在泄水建筑物表面的 76 个测压孔量测。

2.3 试验工况

试验考虑了 6 种典型工况,包括校核洪水、设计洪水、消能防冲设计洪水以及常遇洪水等各运行工况。试验具体工况参数见表 1。

表 1 试验工况

工况序号	洪水标准	泄洪方式	最高库水位/m	设计下泄流量 / (m ³ · s ⁻¹)
1	300 年一遇校核洪水标准	冲砂闸 + 3 孔泄洪闸 + 溢流坝	3531.0	408
2	50 年一遇设计洪水标准	冲砂闸 + 2 孔泄洪闸	3530.7	344
3	30 年一遇消能防冲洪水标准	冲砂闸 + 2 孔泄洪闸	3530.7	276
4	20 年一遇	冲砂闸 + 2 孔泄洪闸	3530.7	224
5	5 年一遇常遇洪水标准	冲砂闸 + 1 孔泄洪闸	3530.7	79.7
6	2 年一遇常遇洪水标准	冲砂闸	3530.7	32.9

3 原设计方案试验分析

3.1 原设计方案

原设计方案中,冲砂泄洪闸消力池为单级消力池,池长 30.0 m,池宽 22.0 m,池深 1.5 m,底板高程 3 519.50 m,尾部采用连续式尾坎,坎高 1.5 m,剖面图见图 2。

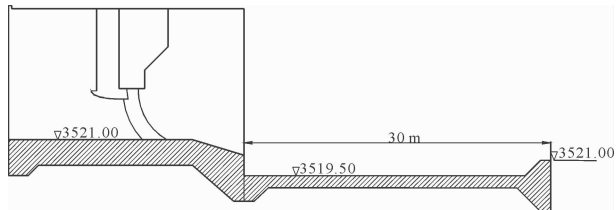


图 2 原设计方案泄水建筑物纵剖面图

3.2 水流流态观测

试验对工况 2 开启方式以及工况 2 洪水标准下其余具有代表性的闸门开启方式进行了水流流态观测,见图 3(其中(a)泄洪闸单孔全开、(b)冲砂闸 + 中孔泄洪闸全开、(c)冲砂闸 + 两边孔泄洪闸全开以及(d)冲砂闸 + 3 孔泄洪闸全开),原设计方案在不同运行工况下的水流流态观测结果表明,闸室内水流在有压进口处收缩呈有压流,流态良好;出闸室后水流向左侧或两侧扩散,呈急流状态冲出消力池,水流流态差,在消力池尾坎处形成挑射水流后进入下游河道,消力池内未形成淹没水跃,高速水流直接冲击下游河道,造成严重冲刷。

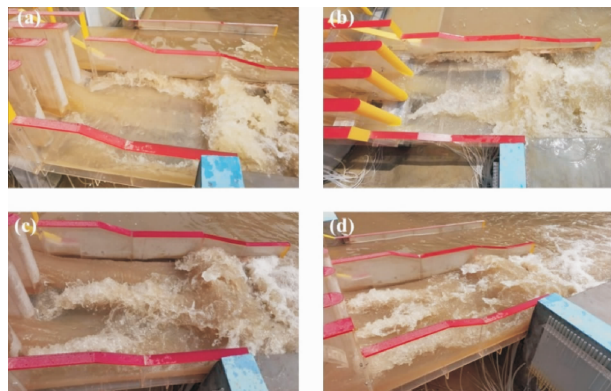


图 3 工况 2 各种开启方式下水流流态

3.3 水面线

试验针对具有代表性的设计洪水位冲砂闸 + 中孔泄洪闸全开运行进行了水面线观测。测量结果显示,池内水流未形成淹没水跃,水流呈急流,水深较浅。出消力池尾坎水流形成挑射,尾坎处最大挑射高度 4.7 m(以消力池尾坎顶高程为参考),挑射最高点与下游河道水面高程差约 4.6 m。出池后水流跌落处水面有较大波动起伏。

3.4 壁面压强分布及流速

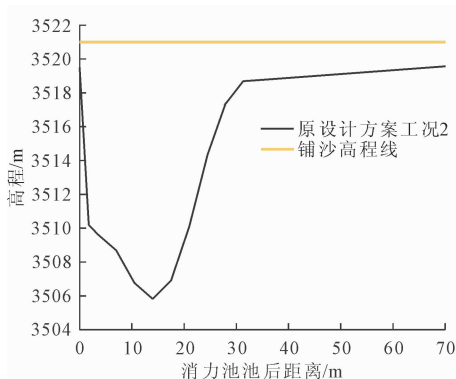
试验针对具有代表性的设计洪水位冲砂闸 + 中孔泄洪闸全开运行进行了壁面压强及流速观测。测量结果显示,闸室内有压段呈正压且沿程减小,出压坡后转为明流,斜坡起始断面附近压强最小,泄洪闸、冲砂闸此处出现了较小负压,泄洪闸最大负压

-0.75 m, 冲砂闸最大负压 -0.47 m, 因未达空化流速, 无空化空蚀风险; 设计洪水位下, 闸室出压坡出口、消力池内流速均维持在约 13 m/s, 水流经尾坎挑射跌落进入下游河道, 出池 12 m 处表面流速仍约 12 m/s, 整体流速较高。

3.5 冲刷状况

冲刷试验结果表明, 下游河道形成了较为严重

的冲刷, 设计洪水位下游河道冲刷纵剖面及形态见图 4。设计洪水位冲砂闸 + 中孔泄洪闸全开运行时, 下游最大冲深 15.2 m, 冲刷范围沿纵向约 50 m, 横向约 40 m。此外, 靠消力池和右岸坡处冲坑坡度陡, 对消力池和出消力池约 50 m 范围的右岸坡稳定十分不利。



(a) 下游河道冲刷纵剖面



(b) 下游河道冲刷形态

图4 原方案设计洪水位下游河道冲刷纵剖面及形态

4 消力池体型优化试验

针对原设计方案存在冲砂泄洪闸消力池内难以形成淹没水跃, 消力池消能严重不足, 流态差, 导致下游河道产生较为严重的冲刷的问题, 确定了对冲砂泄洪闸消力池进行体型优化的基本思路: 降低消力池底板高程, 保证入池水流形成淹没水跃的下游水深条件, 发挥消力池的消能作用, 并改善消力池内水流流态。研究过程中, 先后提出了三种优化方案进行比选:

4.1 优化方案一: 小挑坎 + 挖深式消力池方案

消力池消能不足的主要原因在于, 池内水深浅, 无法满足水流消能要求^[8], 因此消力池底板高程降低 1 m, 至 3 518.5 m; 消力池池首设置小挑坎^[9], 使水流小幅挑射后入池消能, 以期通过挑流 + 底流复合消能方式增加消能率并改善水流流态; 消力池池长、池宽及尾坎高度均不变。

该方案设计洪水位冲砂闸 + 两边孔泄洪闸全开工况下水流流态见图 5, 相较原设计方案水流流态有所改善, 设置小挑坎后, 由于出闸水流水深大, 池首位置未能形成充分的挑射水流, 出闸水流在消力池的中上部进入消力池, 在池中上部形成不完全水跃。消力池尾坎后产生较大水面跌落, 并在池后下游河道形成表面水跃, 下游河道水面波动较大。



图5 设计洪水位冲砂闸 + 两边孔泄洪闸全开泄洪消力池及池后水流流态

4.2 优化方案二: 挖深式消力池方案

消力池加深后, 有利于形成水跃, 池内流态会得到明显改善, 可见增加消力池深度对改善水流流态、提高消能率是有利的。但是池首位置设置小挑坎, 水流入池时位于消力池中上部, 不利于形成良好的淹没水跃。因此优化方案二取消消力池前小挑坎, 消力池底板高程降低 1 m, 至 3 518.5 m, 其他参数同方案一。

该方案设计洪水位冲砂闸 + 两边孔泄洪闸全开工况下水流流态见图 6, 取消池首小挑坎后, 消力池内水流流态有明显改善, 水流入池时位于池中下部, 相同水位相同运行方式下, 取消小挑坎后池内水跃更充分。但试验发现, 在消力池内要形成较为完整的淹没水跃, 池深条件仍不够^[10], 消力池消能明

显不足,流态不佳;同时池后二次水面跌落严重,对下游河道防冲十分不利。



图 6 设计洪水位冲砂闸 + 两边孔泄洪闸全开泄洪消力池及池后水流流态

4.3 优化方案三:二级消力池方案

从优化方案一、方案二可知,消力池内要形成良好的淹没水跃,保证池内良好水流流态和充足的消能率,增加池深以保障跃后水深条件是必要的,建议进一步降低消力池底板高程^[11]。此外,为满足中大流量的池内消能,目前消力池长度明显不足,且池后二次水面跌落问题严重。因此采用二级消力池布置^[12-13];第一级和第二级消力池底板高程在原设计方案基础上降低 2 m,至 3 517.50 m;一级消力池长度同原设计方案,池长 30 m,尾坎顶高程 3 521.00 m;二级消力池池长 20 m,尾坎按差动坎设计^[14],以减小消力池与下游河道水面衔接时产生过大的二次跌落。高坎坎顶高程 3 521.00 m,低坎顶高程 3 519.25 m;高坎和低坎沿横向宽度均为 2 m。

该方案设计洪水位冲砂闸 + 两边孔泄洪闸全开工况下水流流态见图 7,各运行方式下消力池内流态明显改善,流态良好。冲砂闸单孔泄洪时,第一级消力池内虽然未能形成充分的淹没水跃,但相较原设计方案和优化方案明显改善;由第一级消力池尾坎水流跌落后进入二级消力池,水历经第二级消力池充分消能后,由二级消力池尾坎流出时水流流速大大降低;由于差动坎的设置,与下游河道水流衔接时基本无水面落差,水流衔接良好。



图 7 设计洪水位冲砂闸 + 两边孔泄洪闸全开泄洪消力池及池后水流流态

二级消力池结构因具备消能效果佳、适应能力强等显著特点,近年来在水利工程建设中的应用逐步推广^[15]。理论分析表明,二级消力池通过两级能量转换,可以更有效地消耗水流能量。第一级消力池初步稳定水跃并消耗部分能量,第二级消力池进一步消耗剩余能量,并通过差动尾坎调整流速分布,使水流更平顺地进入下游河道。特别是对于像阿克塞工程这样下游水深小、覆盖层抗冲能力差的情况,二级消力池能够有效减轻下游冲刷。综合考虑消能效果、下游冲刷和工程投资等因素,推荐优化方案三(二级消力池方案)为最终优化方案,推荐方案泄水建筑物纵剖面见图 8。

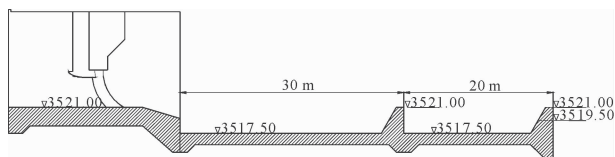


图 8 推荐方案泄水建筑物纵剖面图

5 推荐方案试验结果与分析

试验对推荐方案流态及水力特性进行了观测,并与原设计方案进行了对比,主要水力参数对比见表 2。

表 2 优化前后水力特性对比(设计洪水工况)

参数	原方案	推荐方案	改善效果
池内流态	急流,无水跃	淹没水跃	明显改善
消力池内流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	约 13	约 5~7	降低约 50%
二级池尾坎流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	—	≤ 6.0	有效控制
下游最大冲深/m	15.2	10.9	减少 28.3%
冲刷范围/m	约 50	约 65	部分扩大但冲深减小
水面跌落/m	4.6	1.37~2.15	显著减小

5.1 水流流态

各工况冲砂泄洪闸各位置水流流态良好。二级消力池内形成了较良好的淹没水跃,流态良好。相较原设计方案,经两级消力池充分消能后,出池流速降低、与下游水面衔接时落差减小,流态大大改善。

5.2 壁面压强

在冲砂闸与泄洪闸闸室,有压进口顶曲线上游端会出现最大 -3.05 m 负压,闸室中局部斜坡段起始断面附近会出现最大 -1.52 m 负压,但这些位置水流流速远未达到发生空化的水流条件,不会引发空化。一级消力池尾坎顶会出现最大 -0.60 m 的

负压,二级消力池尾坎的高坎顶会出现最大负压 -1.26 m ,低坎顶会出现最大负压 -0.19 m ,尾坎负压不大,不影响结构安全。

5.3 水面线

校核洪水时一级消力池尾坎最高水面为 $3\ 526.36\text{ m}$,距消力池边墙顶部高程 $3\ 527.0\text{ m}$ 有 0.64 m 余幅,消力池边墙高度可满足泄洪消能要求。二级消力池出池水流与下游河道衔接时出现不同程度水面跌落,校核洪水、设计洪水和消能防冲洪水工况最大水面跌落分别为 2.01 、 2.15 、 1.37 m 。相较于原设计方案设计洪水位工况跌落 4.6 m ,显著减小。

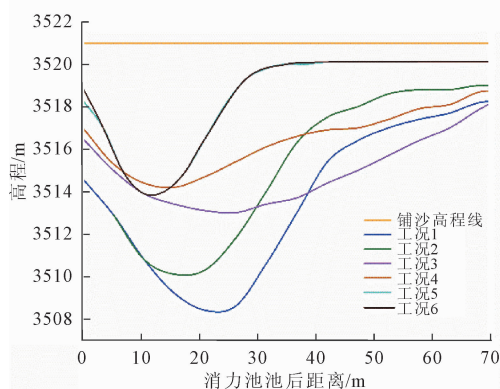
5.4 流速分布

冲砂闸与泄洪闸闸室出压坡出口后流速约 $11\sim 13\text{ m/s}$,进入消力池流速也基本在这一量值;消力池内形成了良好的淹没水跃,消力池中前部表面处多呈负流速(流速方向朝上游)。池内流速沿程逐渐下降,20年一遇及以上洪水时在一级消力池尾部

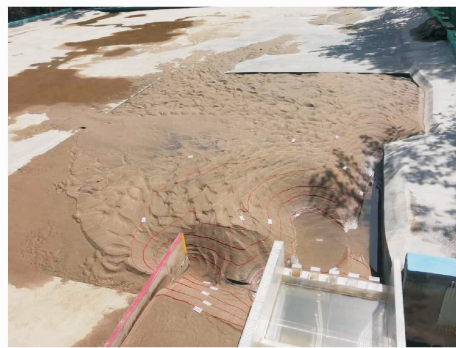
池底流速可降至约 $5\sim 7\text{ m/s}$,相较于原方案约 13 m/s 降低约 50% ;经两级消能后,设计洪水与消能防冲洪水工况二级消力池尾坎出流最大流速降至 6.0 m/s ,5年一遇及以下洪水时最大流速不超过 3.1 m/s 。在出池后局部因水面跌落流速略大,跌落后的实测最大流速 12.5 m/s ,但向下游随着水流扩散流速迅速降低。

5.5 下游冲刷

推荐方案下游河道冲刷较原设计方案大大改观,各工况下游河道冲刷纵剖面及设计洪水工况冲刷形态见图9,设计洪水工况下游河道最大冲深 10.9 m ,较原设计方案冲深 15.2 m ,减少 4.3 m ,冲刷范围约 65 m ,较原设计方案部分扩大;近右岸最大冲深 8.1 m ,冲刷范围约 75 m 。冲砂泄洪闸消力池左边墙末端和溢洪道下游左导墙末在20年一遇及以上洪水工况会出现局部淘刷,设计洪水工况这两位置最大冲刷分别为 11.2 、 9.0 m ,消能防冲洪水工况这两位置最大冲刷分别为 8.5 、 4.8 m 。



(a) 推荐方案各工况下游河道冲刷纵剖面



(b) 下游河道冲刷形态(设计洪水工况)

图9 推荐方案各工况下游河道冲刷纵剖面及设计洪水工况冲刷形态

6 结论

(1) 阿克塞供水工程渠首枢纽原单级消力池方案因消能不足无法形成淹没水跃,水流急流冲出导致下游河道严重冲刷,设计洪水工况最大冲深达 15.2 m ,威胁工程安全;而二级消力池优化方案能在各类洪水工况下形成稳定淹没水跃;通过两级消能使池内流速降低至约 $5\sim 7\text{ m/s}$ (降幅超 50%),尾坎出流最大流速降至 6.0 m/s ;池后水面跌落大幅减小,有效改善水流衔接;设计洪水工况下,下游最大冲深减至 10.9 m (降幅 28.3%),大幅减轻冲刷;适配从2年一遇到300年一遇的各类洪水,保障工程安全。

(2) 阿克塞供水工程渠首枢纽二级消力池优化后,虽然在工程造价上可能会略高于传统单级消力池,但其优异的消能防冲效果能够显著降低下游防护成本,从全生命周期成本考虑,具有显著的经济技术优势,可为类似下游河道宽阔、泄洪时下游水深小,河床为深厚沙卵砾石层、抗冲能力差的水利工程消能设计提供重要参考。

参考文献:

- [1] 毛昶熙,周名德,柴恭纯,等. 闸坝工程水力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2019:479.
- [2] 谢泽,辜晋德,赵建钧,等. 大单宽流量、低佛汝德数消力池优化设计研究[J]. 中国农村水利水电,2024(8):175-179.

- [3] 崔晓玉,李奇龙,李大贵,等.某闸坝工程跌坎底流消力池体形优化试验研究[J].水力发电,2020,46(10):127-131.
- [4] 俞晓伟,牧振伟,高尚.低弗劳德数梯形墩-悬栅消力池水力特性[J].长江科学院院报,2023,40(1):107-115.
- [5] Zhou Zhao, Wang Junxing, Zhu Zavid D. Energy dissipation in a deep tailwater stilling basin with partial flaring gate piers [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2020,47(5):523-533.
- [6] 高海鹰,马金霞,李贺,等.水力学[M].南京:东南大学出版社:2022:242.
- [7] 周世良,王智,王云莉,等.新三江船闸曹娥江侧局部动床物理模型试验研究[J].水运工程,2025(9):114-122.
- [8] 徐莉平,葛旭峰,李琳.某水电站表孔溢洪道消力池段结构优化的试验研究[J].地下水,2022,44(5):261-263.
- [9] 郭川靖,蒋雷,刁明军.消力坎对跌坎消力池坎控水跃影响的试验研究[J].四川水力发电,2024,43(2):120-127.
- [10] 许有为,何铁炎.坎式消力池在水闸除险加固工程中的应用及水力计算[J].湖南水利水电,2023(3):1-3.
- [11] 王宇,石维,严媛,等.下游极低水位溢洪道消力池布置及优化研究[J].云南水力发电,2023,39(11):87-90.
- [12] Lin Wei, Cai Fulin, Han Changhai, et al. Experimental study on energy dissipation and tailwater wave in two-stage stilling basin with supercritical inflow of low Froude number [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2023,51:25-31.
- [13] 谭高文,韩昌海,韩康,等.低弗劳德数水流二级消力池水力特性试验研究[J].水科学进展,2020,31(1):71-80.
- [14] 黄智敏,陆汉柱,付波,等.溢洪道梯形差动式挑流鼻坎研究和应用[C]//中国水力发电工程学会水工水力学专委会,国际水利与环境工程学会(IAHR)中国分会,中国水利学会水力学专委会.水力学与水利信息学进展 2024——工程水力学.广东省水利水电科学研究院广东省水动力学应用研究重点实验室,2024:2-7.
- [15] 刘欢.某水闸消能加固设计优化研究[J].水利技术监督,2022(12):213-215,236.

(上接第 145 页)

- [10] 张晨,周峰,王旭东,等.扩底抗浮锚杆的抗拔承载特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(6):1888-1893.
- [11] Wang Fengjiao, Bai Xiaoyu, Wu Zekun, et al. Field pullout test and anchorage length calculation for external anchorage of GFRP anti-floating anchors [J]. Structures, 2024,70:107636.
- [12] Liu Yuguo, Xia Kai, Wang Botong, et al. Experimental investigation on the anchorage performance of a tension-compression-dispersed composite anti-floating anchor [J]. Applied Sciences, 2023,13(21):12016.
- [13] Zhu Yi, Li Yi, Tang Zhenxing, et al. Experimental study on and finite element analysis of the axial compression bearing capacity of a UHPC transfer device for prestressed anti-floating anchor rods [J]. Buildings, 2024,14(4):1075.
- [14] 靖洪文,苏海健,孟波,等.巷道锚杆锚固力学特性现场试验研究[J].中国矿业大学学报,2022,51(1):16-23.
- [15] 尤春安,战元宝.预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):1976-1985.
- [16] 王宇鑫,汪海波,马守龙,等.巷道锚杆索支护参数敏感性正交数值模拟研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(4):108-113.
- [17] 陶文斌,吴平平,陈铁林,等.基于锚杆拉拔试验优化锚固承载特性研究[J].煤炭科学技术,2022,50(9):10-19.
- [18] Hao Zengming, Liu Honghua, Yan Nan, et al. In-situ test and numerical simulation of anchoring performance of embedded rock GFRP anchor [J]. Buildings, 2023,13(11):2799.
- [19] Bai Xiaoyu, Zhao Xiangmei, Yan Nan, et al. Field test of GFRP bar anti-floating anchor slurry-rock interface bonding performance [J]. Composite Structures, 2024,331:117893.