

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222143

小挑坎对某拟建大型水电站导流洞出口区消能与冲刷改善机理研究

赵昱东¹, 刘 进², 李东杰³, 马旭东¹

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 山区河道导流隧洞出口区具有单宽流量大、流速高、河床覆盖层深且抗冲流速小等特点, 多数隧洞出口区河床冲刷剧烈, 而布置大型消能措施较困难, 故提出在隧洞出口布置小挑坎的措施。在物理模型试验观测隧洞出口区水流流态和河床冲刷的基础上, 采用数值模拟方法计算导流隧洞出口区水流流场, 研究河床冲刷改善的内在机理。结果表明, 导流洞出口增设小挑坎后, 可增大出洞高速水流的横向扩散和减小单宽流量, 增加局部消能率, 从而降低河道岸边流速; 高流速出洞水体占比明显减少, 使高速水流无法直冲右岸滑坡体, 减小滑坡体范围流速; 出洞水流宽度增加, 出洞水流方向变为斜向上出流, 减弱对右岸滑坡体的冲击, 并且使导流洞出口区及下游河道受到的冲刷明显减弱。研究成果可为工程实践提供参考。

关键词: 模型试验; 导流隧洞; 挑流坎; 数值模拟

中图分类号: TV653+.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0101-04

1 概况

某拟建大型水电站位于雅砻江干流, 由混凝土重力坝、右岸引水式地下厂房等建筑物组成, 总装机容量 1 020 MW。该工程平面布置及地质剖面见图 1。工程设计过程中采用模型试验分别研究了全年围堰和过水围堰两种施工导流方案, 最终选定过水围堰作为实际应用方案。导流隧洞

进、出口高程分别为 1 912、1 910 m, 断面尺寸为 12 m×15 m(宽×高)。该工程施工导流主要工程水力学问题为隧洞出口区河床狭窄、覆盖层深厚(厚约 30 m, 由卵石混合土层等组成, 中值粒径约 10 mm, 抗冲流速约 1~2 m/s), 且河道右岸出流对冲区存在宽度约 460 m 的大型滑坡体。导流隧洞出流流速高、单宽流量大, 且对冲右岸滑坡体, 可能存在安全隐患, 因此采用导流洞出口增设小挑坎的方案, 使隧洞出流横向扩散加强、改善流态, 减小水流对河床及岸边的冲刷。本文采用数值模拟方法并结合模型试验成果, 通过分析导流洞出口设小挑坎前后的局部流场, 深入探究设小挑坎改善流场特性和河床冲刷的原因, 以期工程实践提供指导。

2 模型试验

首先采用物理模型试验研究小挑坎的应用效果, 试验模型按弗劳德数相似设计为几何比尺 $\lambda_L = 60$ 的正态模型。模型模拟范围为导流隧洞进口上游 500 m 至导流隧洞出口下游 800 m, 全长约 2.3 km 的河段。导流隧洞采用有机玻璃制

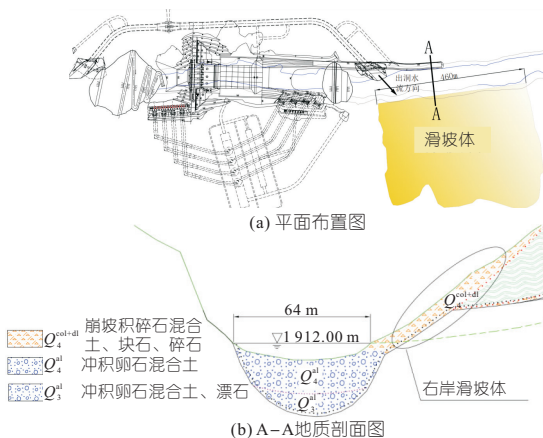


图 1 某水利枢纽平面布置与地质剖面图

Fig. 1 Plane layout and geological profile of a hydro junction

收稿日期: 2022-10-15, 修回日期: 2022-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809187)

作者简介: 赵昱东(1997-)男, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: 1158319682@qq.com

通讯作者: 马旭东(1985-)男, 博士、副教授, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: maxd@scu.edu.cn

作,覆盖层采用天然沙模拟,其中粒径 ≤ 1 mm 的沙占 90%,粒径 1~3 mm 的沙占 10%,基岩层采用碎石按抗冲流速模拟。小挑坎布置于导流隧洞出口 10.0 m 处,长 6.5 m,与出口引渠等宽,首部坎高 2.0 m,经 2.0 m 长平段后与半径 5.0 m 的圆弧衔接,出口挑角 53° ,出口坎高 4.0 m,见图 2。

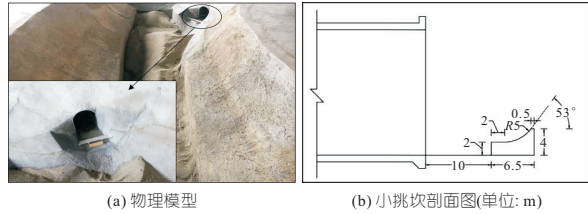


图 2 物理模型及小挑坎设计方案

Fig. 2 Physical model and design scheme of small flip bucket

模型试验重点对比加设小挑坎前后的水流流态、岸边流速和河床冲刷情况(尤其是右岸滑坡体范围)。流量较大时,出洞水流会严重冲刷出口区,对滑坡体造成较大冲击威胁,因此选取常遇洪水($3\ 000\text{ m}^3/\text{s}$)、设计洪水($5\ 830\text{ m}^3/\text{s}$)作为研究工况,结果表明,流量 $3\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,设计体型下导流洞出流形成起伏不平的波浪,沿隧洞轴线冲至对岸后消失。隧洞出流被上游水流挤压后呈束状直冲河道右岸,滑坡体坡脚部位形成高流速区,并在主流上、下游形成平面回流。加设小挑坎后,对出洞水流产生冲击消能及上挑作用,出洞水流与上层水体发生碰撞和挤压后产生旋滚,横向扩散更均匀且减弱水体下潜,利于减小冲刷。出洞主流到达右岸滑坡体的对冲面积增加但对岸坡的冲击作用减小,右岸涌浪高度也相对减小。流量 $5\ 830\text{ m}^3/\text{s}$ 时,设计体型出洞流量增大,在右岸产生的冲击与涌浪更剧烈,而小挑坎体型能显著改善出洞水流流态,并减少回流区面积与岸边流速。测算物理模型右岸流速可得,实际工程中流量为 $3\ 000$ 、 $5\ 830\text{ m}^3/\text{s}$ 时,增设挑坎后最大流速分别为 5.00、10.10 m/s,均小于设计体型所对应的 8.44、14.60 m/s。

由于出洞水流流速与单宽流量均较大,且导流洞出口高程低、与河道交角较大,周围覆盖层深厚且抗冲能力弱,导致设计方案下游河道受到冲刷较大。增设小挑坎后,出洞水体不再呈束状直冲河道,河床底部流速有所降低,对覆盖层泥沙的淘刷作用减弱,使得出口区与右岸坡脚处受到冲刷深度减小,大量床沙流失现象得到改善,经水流冲刷后导流洞出口轴线断面地形见图 3。

3 数值模拟

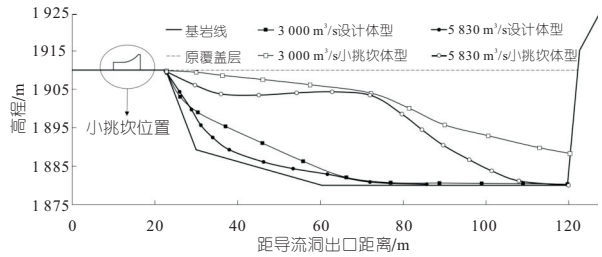


图 3 导流隧洞出口轴线断面地形对比

Fig. 3 Topographic comparison of diversion tunnel outlet axis section

3.1 数值模型建立

由物理模型试验可知,小挑坎方案能明显改善导流洞出口区水流流态,减小冲刷,但仅观测物理模型无法阐明水流特性的变化机理,故采用数值模拟方法,重点计算导流洞出口区及周围流场,得到详细的水力学特征参数。鉴于导流洞出口水流紊动强烈,紊流模型采用 RNG κ - ϵ 模型^[1],水气交界面处理采用 VOF 方法^[2]追踪;模拟范围包括导流洞及其上下游河道,河道总长 1 300 m,按物理模型试验冲刷稳定后的地形建模;河道顶面设为压力进口,导流洞入口设为速度进口,河道下游出水口设为压力出口;采用非结构化网格对导流洞及上下游河道三维模型进行网格划分,并在导流洞与河道交汇区域进行局部加密,如图 4 所示,网格最小体积为 0.01 m^3 ,总数量约 1×10^6 个。以流量 $3\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 的工况为例进行模拟分析。

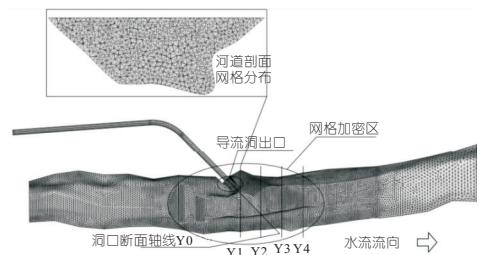


图 4 三维模型计算区域网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 3D model calculation area grid

3.2 三维流场变化规律

设计体型下,出洞水流对冲至河道右岸,到达岸边时受岸坡挤压,下潜至河床。由于受两侧回流的挤压作用,隧洞主流较为集中,高流速水体在出口区呈束状,且 $v = 8 \sim 10\text{ m/s}$ 的高流速水体能发展至对岸,低流速水体在洞口分布较少(图 5(a))。

小挑坎体型下,不同流速水体在出口区呈扁平状,且高速水体主要分布在河道中部,向河床底部发展较少。 $v = 4\text{ m/s}$ 的水体在出口区分布较设计体型更多, $v = 6 \sim 10\text{ m/s}$ 的水体分布明显减少,说明出洞水流在小挑坎作用下产生横向扩散,部分高速水体转化为低速水体,消能更加充分(图

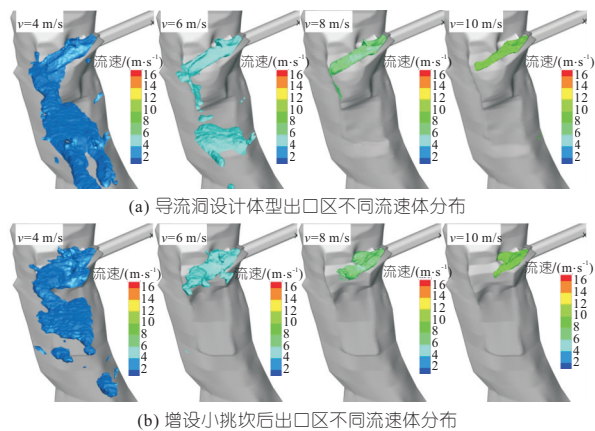


图 5 不同流速水体三维分布图(流量 3 000 m³/s)

Fig. 5 3D distribution map of water bodies with different flow velocities(discharge 3 000 m³/s)

5(b))。

3.3 平面流场变化规律

设计体型下,不同高程平面出洞主流流速较大,右岸最大岸边流速达 9.65 m/s,各平面高、低流速区均存在明显分界线。各高程平面出洞主流断面宽度明显小于隧洞出口宽度,呈束状直冲右岸,说明主流出洞后受到挤压未产生有效扩散,且下游侧回流作用较上游侧更强,使主流相对洞轴线稍向上游偏移;小挑坎体型下,不同高程剖面出洞主流流速明显减小,且高流速水体多分布在洞口处,几乎未发展至右岸,右岸最大流速为 6.2 m/s。各高程平面出洞主流宽度增加,整体流速减小,且高流速区分布较分散,未出现明显高低流速区分界线,见图 6。这些变化说明小挑坎体型使得出洞水流在出口区产生横向扩散,降低高流速水体比例,增大出流消能率,并减弱主流对右岸的冲击。

3.4 断面流场及紊动能变化规律

在数值模型上截取洞口轴线断面 Y0,在下游距洞口 20、70、120、170 m 处截取断面 Y1~Y4(图 4)。从计算结果中绘出各断面流速分布等值线图,得出 Y0 断面水流紊动能分布,并在断面上每隔 10 m 取一条垂线,探究各断面垂线平均流速与 Y0 断面紊动能变化规律(图 7~10)。

由图 7 可知,设计体型下隧洞出流受重力和惯性作用后直接冲击右岸岸坡,且主流与回流区水流混掺沿右岸向下游流动,流速较大;小挑坎体型下,上半部分隧洞出流由直冲右岸变成向上挑起,右岸区域流速大大减小,大部分处于 0~4 m/s 区间内。

由图 8 可知,设计体型下除 Y1 断面高流速区靠近导流洞出口区外,Y2~Y4 断面高流速区均靠近右岸,而小挑坎体型 Y2~Y4 断面流速分

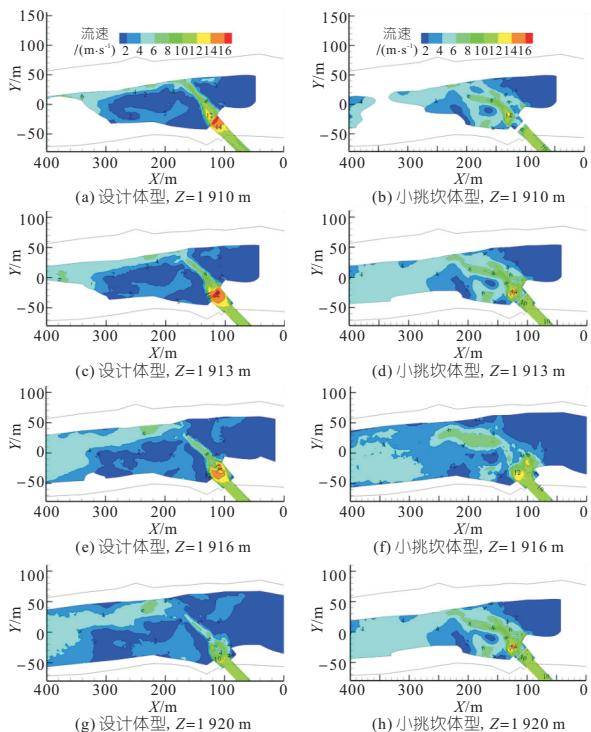


图 6 出口区各高程流场等值线图

Fig. 6 Contour map of flow field at each elevation in the outlet area

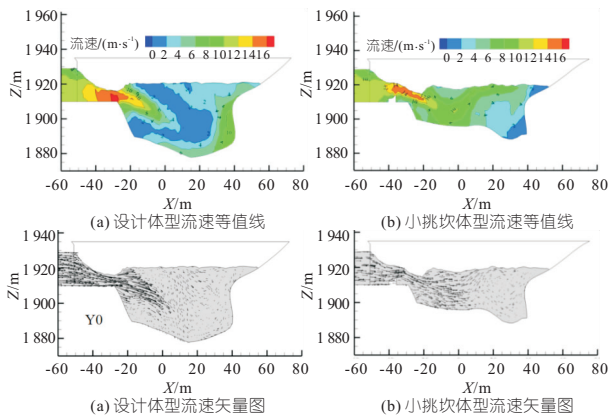


图 7 导流洞出口轴线断面 Y0 流速等值线图与矢量图

Fig. 7 Velocity contour map and vector map of diversion tunnel outlet axis section Y0

布较均匀,且各断面靠近右岸滑坡体范围的水流流速均有不同程度减小;观察各断面形状发现,小挑坎体型底高程数值均大于设计体型,说明前者对于减小河床受到水流冲刷作用显著。

由图 9 可知,设计体型下 Y1 断面垂线平均流速在河道中轴线处达到最大值,Y2~Y4 断面流速从左岸到右岸呈增大趋势,并在右岸达到最大值。小挑坎体型下,Y1 断面流速在左岸达到最大值,Y2 断面流速分布呈波浪形,在中轴线位置达到最大值,Y3、Y4 断面流速分布较均匀,基本不变。相同断面下,小挑坎体型靠近右岸的垂线平均流速均小于设计体型。

紊动能 T 大小能够反映水流由紊动而引起

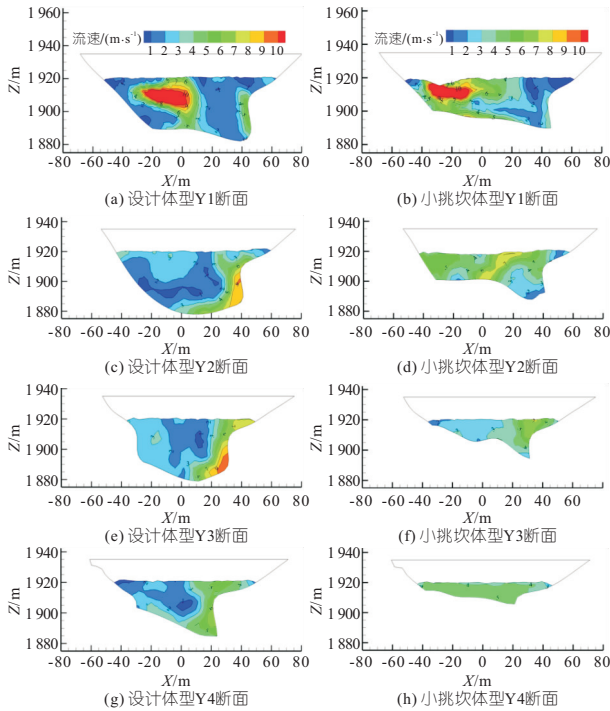


图8 导流洞下游不同断面流速等值线图

Fig. 8 Velocity contour map of different sections at downstream of diversion tunnel

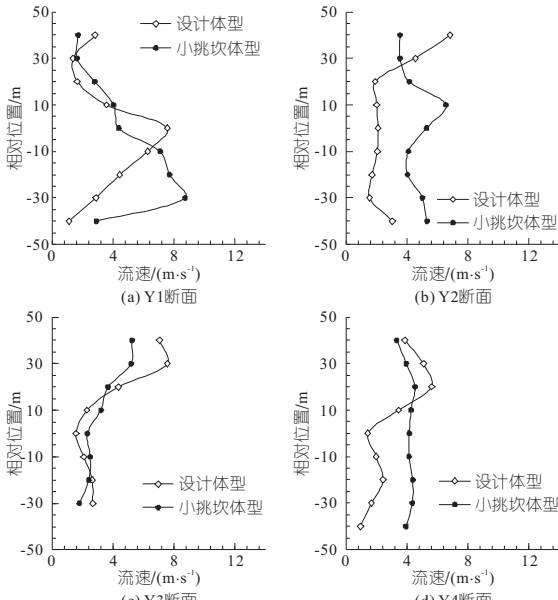


图9 出口区不同断面垂线平均流速变化规律

Fig. 9 Velocity contour map of different sections at downstream of diversion tunnel

的能量损失,其表达式为:

$$T = (\mu'^2 + \nu'^2 + \omega'^2) / 2 \quad (1)$$

式中, μ' 为纵向脉动流速; ν' 为横向脉动流速; ω' 为垂向脉动流速。

沿导流洞出口轴线 Y0 断面 -30~40 m 范围(大致包括导流洞出口区与靠近右岸滑坡体断面的水体)内每隔 10 m 作一条垂线并得到各垂线平均紊动能(图 10)。由图 10 可知,设计体型断面水流紊动能呈波浪形分布,洞出口区紊动能

较小,而靠近右岸滑坡体范围紊动能较大,说明该体型下水流出洞后紊动扩散速率较慢,消能不充分,故紊动能并未明显减小,因此在右岸形成较大的岸边流速;小挑坎体型下水流在洞出口区移动和混掺过程中能量得到充分耗散,此时紊动能最大,水流出洞后紊动能呈递减趋势,且右岸滑坡体范围紊动能最小,此时 $T = 0.232 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 小于设计体型的 $T = 0.420 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

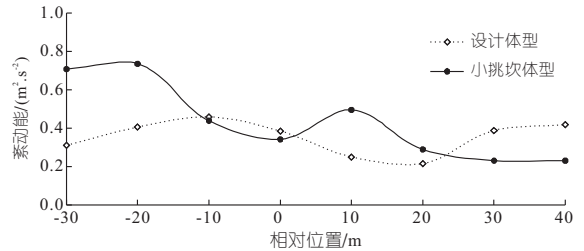


图10 导流洞出口轴线断面 Y0 水流紊动能变化规律

Fig. 10 Turbulent kinetic energy variation law of flow in axial section Y0 of diversion tunnel outlet

4 结论

a. 导流隧洞出口设小挑坎可增大出洞高速水流的横向扩散并减小单宽流量,减少高速区域且增加局部消能率,从而有效降低河道流速(尤其是对冲区流速)。

b. 分析三维流场可知,小挑坎体型下高速出洞水体占比明显减少,使高速水流无法呈束状直冲右岸滑坡体,有效减小沿右岸滑坡体坡脚范围流动的水流流速。

c. 分析平面及断面流场可知,小挑坎体型增大了出洞水流宽度,缩小回流区范围,改善出洞水流与河道水体的衔接状态,使洞口水平出流变为斜向上出流,并发生旋滚,有效加快水流紊动速率,使其充分消能。小挑坎体型使水流对右岸滑坡体的冲击减小,减少岸坡受到的冲刷,降低滑坡体潜在的危险性,并使导流洞出口区及下游河道受到的冲刷明显减弱。通过分析物理模型试验与数值模拟结果后得出的结论,能够为实际工程中相关建筑物的设计及可行性提供建议与参考。

参考文献:

[1] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. basic theory[J]. Journal of scientific computing, 1986, 1(1):3-51.
 [2] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of computational physics, 1981, 39 (1):201-225.

