

X型宽尾墩联合跌坎消力池消能工的水力特性研究

杨思远,田中耀,金靖林,刁明军,杨克君

(四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室,四川成都610065)

摘要: X型宽尾墩和跌坎消力池的联合消能工是一种优势体型组合,其消力池水力特性比起单种消能工更为复杂,研究该种联合消能工下的水力特性及其空间分布对于实际大坝工程设计和体型优选具有参考意义。模型试验对从小到大六种工况下,溢洪道反弧段末端及消力池内的临底流速、水面线和时均压强进行观测,在消能工中轴线和消力池边墙中间观测四列测点以探究其水力特性的空间分布特点。试验发现纵向上:水面线总体变化趋势是逐渐升高,临底流速在溢流堰反弧段流速大,在消力池流速逐渐减小,大流量工况下溢流堰反弧段末端时压强较大。反弧段冲击压强大,流速大,应当做好防护补强措施。而在横向上:反弧段和消力池前端处溢流堰边孔和边墙水力特性参数较大,中轴线处较小。

关键词: X型宽尾墩;跌坎;消力池;水面线;临底流速;时均压强

中图分类号:TV135.2

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2025)03-0332-06

Study on the hydraulic characteristics of the energy dissipator of the X-wide flaring gate pier combined with the drop stilling basin

YANG Siyuan, TIAN Zhongyao, JIN Jinglin, DIAO Mingjun, YANG Kejun

(National Key Laboratory of Mountain River Protection and Governance, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The combined energy dissipation of X-type wide flaring gate pier and stilling basin is a combination of dominant body types, and the hydraulic characteristics of the stilling basin are more complex than that of single energy dissipation work. The study of the hydraulic characteristics and spatial distribution of this combined energy dissipation work has reference significance for the actual dam engineering design and body type optimization. The model test was based on the observation of the bottom velocity, water surface line and time average pressure at the end of the spillway bucket and the stilling basin under six working conditions from small to large. The four series of measuring points were observed in the middle of the stilling basin axis and the side wall of the stilling pool to explore the spatial distribution characteristics of the hydraulic characteristics. The test showed that the general change trend of the water surface line was gradually increased; the bottom flow velocity was large in the reverse arc section of the overflow weir, and the flow velocity gradually decreased in the stilling basin; the pressure was large at the end of the overflow weir under large flow conditions. If the reverse arc section had a large impact pressure and the flow rate was large, the protective and reinforcement measures should be taken. On the lateral side, the hydraulic characteristics of the hole and side wall of the overflow weir in the reverse arc section and the front end of the stilling pool were larger, but the hydraulic characteristics of the central axis were smaller.

Keywords: X wide flaring gate pier; falling-sill; stilling basin; water surface line; bottom velocity; time average pressure

宽尾墩能够影响水流在闸室当中的三维流态分布,于横向上水流被宽尾墩挤压收束,于纵向上水流被拉伸张开,进而形成了分别从空中跌入和贴合坝面流入的两股水流^[1],在消力池入口处水流分别以底流、纵向拉伸水流、挑射水流三种形式进入消力池当中^[2],消力池中水流呈一横、两纵、两立的三轴三元水跃漩滚形式,这极大地提高了消能效率,能够在保证消能效果不变的情况下减短消力池长度,对下游是山区急转弯河道的大坝建筑物有十分重要意义^[1]。林秉南和龚振瀛^[3]讨论认为应当研究水流受到横向收缩、纵向扩散时的效果,1974年宽尾墩的布置形式由龚振瀛^[4]首先提出,此后在我国发展迅速,到目前常见的宽尾墩类型有:基本型、V型、Y型、X型、异形等五种,而其中与底流消能形式联合的消能效果又以Y型和X型更为良好。X型宽尾墩作为从Y型宽尾墩上优化修改而来的宽尾墩体型,相较于Y型宽尾墩更具有优势^[5]。宽尾墩能使水流消能集中在坝基段,有效减小消力池长度,但也会面临着底板冲击压强和脉动压强过大,导致底板冲刷的问题。而X型宽尾墩在Y型宽尾墩基础上,其下部开口,不拦束水流,一能增大过流能力,二能为上层挑起水流提供水垫,有效减小底板冲击压强,解决消力池底板压强过大而产生破坏的问题^[6]。尹进步等^[7]在将X型宽尾墩应用于乌江索风营水电站时发现底板压力在相当程度上被降低,最高甚至能够到30%,可见X型宽尾墩相比于Y型宽尾墩具有显著优势。

跌坎型消能工是指在消力池进口处将底板向下开挖,而形成有一定高差的跌坎,跌坎高度为其下挖深度^[8]。跌坎消力池相比于传统消力池能够使得高速

主流上升,不再临底,降低临底流速^[9],从而解决传统消力池临底流速过高,消力池底板容易产生冲刷甚至空蚀破坏的问题^[10]。

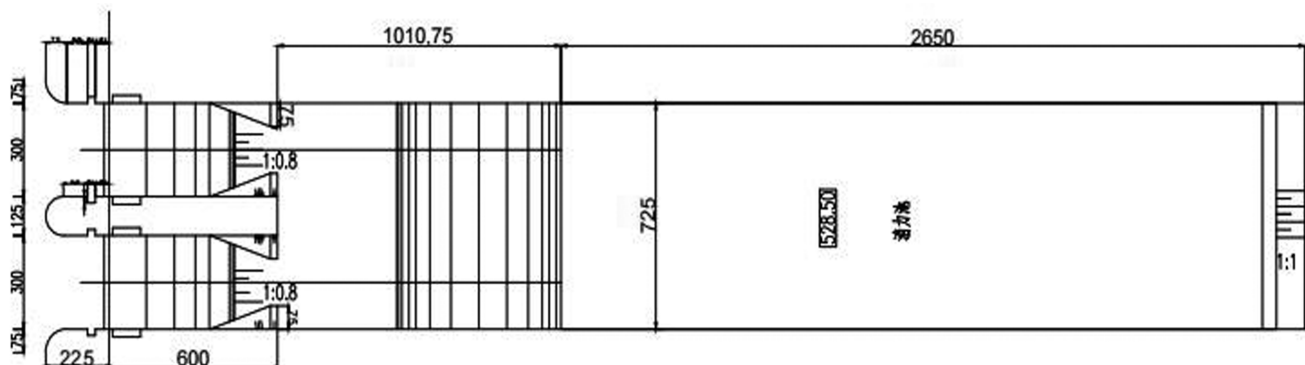
在过去,宽尾墩和消力池联合消能的研究并不少见,官地水电站采用了宽尾墩+跌坎+底流消力池的联合消能工^[11],金靖林等^[12]对不同收缩比的Y型宽尾墩和跌坎消力池的脉动压强进行了相关研究,但X型宽尾墩和跌坎消力池的优势体型组合却还未见。因此,本文就X型宽尾墩和跌坎消力池联合消能工消力池横向和纵向上水力特性空间分布展开研究,为该种体型的应用和设计施工提供参考依据。

1 模型布置与实验方案

本试验依托于乐山某设计阶段水库泄洪系统,水库正常蓄水位598.00 m,相应库容2 690万 m^3 ,校核洪水位599.07 m,总库容2 807万 m^3 。水库枢纽工程主要由拦河大坝、泄洪、放水等建筑物组成。拦河大坝为碾压砼重力坝,自左向右分别为左岸挡水坝段、溢流坝段、放水孔坝段和右岸挡水坝段。坝身下游衔接跌坎消力池,消力池底板高度528.5 m,尾坎高度7.5 m、坡度1:1,模型实验根据重力相似准则,模型比尺为1:40,模型总体平面布置如图1。

X型宽尾墩模型尺寸设计示意图如图2,该尺寸宽尾墩收缩比为0.44。

试验分别对六种模型试验工况频率来流情况进行了测验,依据来流量从大到小分别为:500年一遇工况、50年一遇工况、30年一遇工况、20年一遇洪水工况、10年一遇洪水工况、5年一遇洪水工况,具体工况设置见下表1。



(单位:mm)

图1 模型平面布置

Fig. 1 Model plane layout

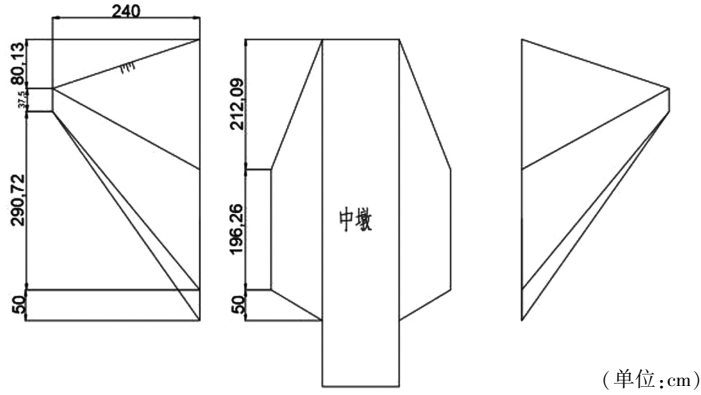


图 2 X 型宽尾墩尺寸

Fig. 2 X-shaped flaring gate pier size

表 1 模型试验工况

Table 1 Model test conditions

工况	重现期(年)	洪水频率(%)	流量(m ³ /s)	上游控制水位(m)	下游吊桥断面水位(m)	运行方式
1(校核工况)	500	0.2	2 840	599.39	551.48	敞泄
2(设计工况)	50	2	2 390	598.00	550.05	敞泄
3(消能防冲)	30	3.3	2 070	598.00	548.98	均匀局开
4	20	5	1 830	598.00	548.19	均匀局开
5	10	10	1 400	598.00	546.67	均匀局开
6	5	20	986	598.00	545.01	均匀局开

宽尾墩横向收束水流,在宽尾墩和中墩下游形成局部无水区,而溢流堰末端纵向被挑起的水流和沿溢流堰下泄的水流交汇碰撞.因此本试验不对无水区进行观测,重点关注区域在于溢流堰末端(反弧段)和消力池紊动剧烈的前端.试验测点布置以模型上下游方向为 x 方向,堰顶 584 m 高程点对应桩号为 0 桩号,向下游为正,向上游为负,因为泄洪消能设施主体为对称结构,故仅在一侧布置测点,以中轴线为横向 y=0 轴线,向边墙方向 y 值递增,中轴线测点为 A 列,边孔轴线测点为 C 列,中轴线和边孔轴线中间布置加

密测点 B 列,边孔和边墙中间布置加密测点 D 列,D 列可以近似代替边墙处水力特性状况.测点布置如下表 2 和图 3 所示.

表 2 各列测点位置

Table 2 The positions of measurement points in each column

纵列编号	位置	y 坐标(m)
A 列	中轴线	0
B 列	宽尾墩下游轴线	4.25
C 列	边孔轴线	8.5
D 列	边墙	11.5

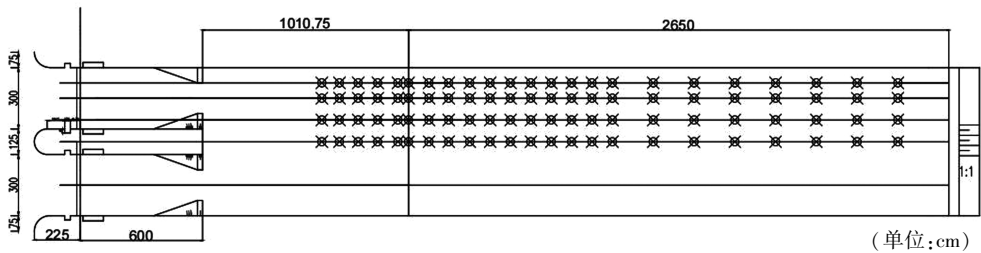


图 3 测点布置

Fig. 3 Measurement point layout

2 流速分布分析

试验获得溢流堰反弧段及消力池流速分布如图

4 所示,试验顺水流方向为纵向,垂直水流方向为横向.纵向分布上流速总体趋势为迅速减小后增大,而后再缓慢减小并趋于平缓.水流在反弧段势能转化为

动能,流速极大,最大流速基本出现在反弧段末端.进入消力池后,跌坎处水流漩滚紊动剧烈,水流流速在跌坎处急剧减小,且因为消力池前端,跌坎底部主流脱离,临底流速相比其他部位要小得多.消力池前中部主流回复,流速增大.水流在消力池中受到水垫缓冲和翻滚消能,流速不断减小,在消力池尾端流速趋于平稳,充分说明该种联合消能工的消能效果良好.

横向分布上,A列位于中墩后部,水流自中墩后无水区散流回中轴线上,在反弧段A列流速最低,其

他三列主流自边孔后直接冲击,在反弧段流速较大,各工况下C列流速均较大.消力池前端水流各列测点流速差异较大,因漩滚紊动剧烈,各列测点在各工况中轮流出现流速最大最小值,无明确规律,但总体仍以靠近边墙的D列出现高流速的概率较大,正对边孔的C列小流量时在四列当中流速偏小,而在大流量时流速相对较大.在实际工程当中应当注意边墙的防冲刷和防空蚀破坏措施.

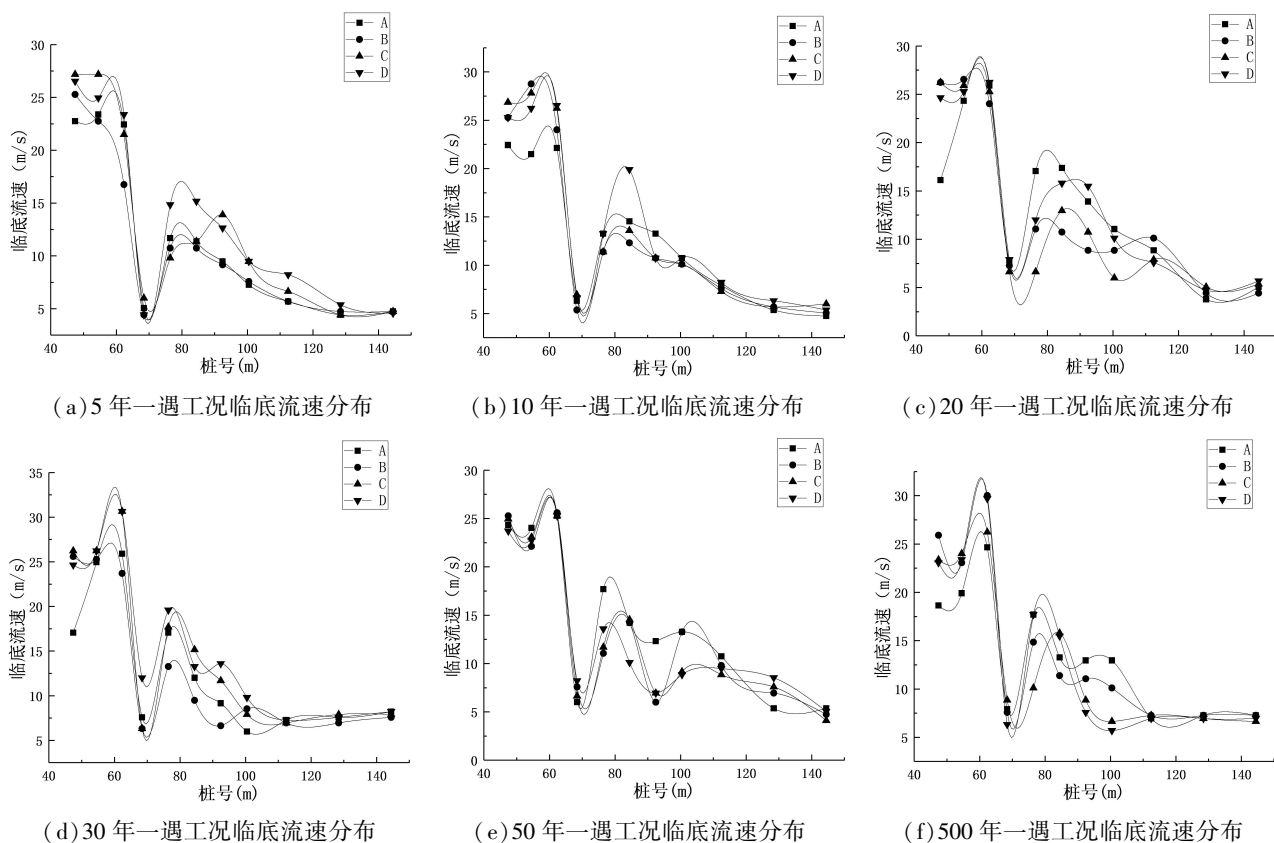


图4 各工况临底流速分布

Fig. 4 Distribution of the bottom velocity in each working condition

3 水面线和时均压强分布分析

由图5可见水面线在反弧段波动较剧烈,在消力池段趋于平稳,水面线总体呈现出升高趋势,水跃开始发生在反弧末端和消力池前段,在消力池中段结束,最高水深出现在消力池中段,该处水流流态较差,水面波动剧烈,在进行相应联合消能工消力池边墙高度设计时应尤其注意消力池中段高度,避免水流翻出.

而时均压强如图6所示,纵向在消力池中和水面线一样呈现出总体增大的趋势,但在溢流堰反弧段

和消力池前端波动剧烈,变化较大.由于被宽尾墩挑起的主流在反弧段末端跌落,冲击压强大,因此反弧段时均压强总体较大,尤其是在大流量工况.在5年一遇、10年一遇、20年一遇这三个小流量工况当中,反弧段水流动能大而压能相对较小,时均压强相对其他几个工况较小;而在30年一遇、50年一遇和500年一遇三个大流量工况中,因为下游水位高、水垫厚,淹没式水跃充分,时均压强相对其他工况较大.在小流量工况中时均压强最大值出现在消力池尾端,在消力池中后段水流消能充分,水流趋于平稳,水流动能转

化为势能,时均压强增大.而在大流量工况时均压强最大值则出现在反弧段、消力池前端,此处淹没水跃翻滚剧烈,是水流紊动最剧烈的区域,也是消能效率最高的区域,在大流量二维漩滚下,时均压强值会比消力池尾端压强更大.各工况最小值均出现在跌坎下(桩号 64.43 m),时均压强出现突降,并在突降后回升.该处压强突降的原因同流速分布相同,也是因为主流在从反弧段进入消力池时,由于跌坎的作用,高速主流脱离消力池底部,使得紧靠跌坎后的流速和时

均压强都相当小,而在经过消力池前端的充分紊动消能后,主流再回复,此时流速降低,已经不会再对消力池底板产生较大的破坏威胁,这也是跌坎消力池的优势所在.在跌坎下游一定距离(桩号 80.43 m),高速主流在此临底,形成漩滚,时均压强出现二次突变,压强值相比紧靠跌坎处大幅度增大,由于漩滚消能充分,在该点下游时均压强回复正常,相比该点处有明显减小,并在此后平缓增大.

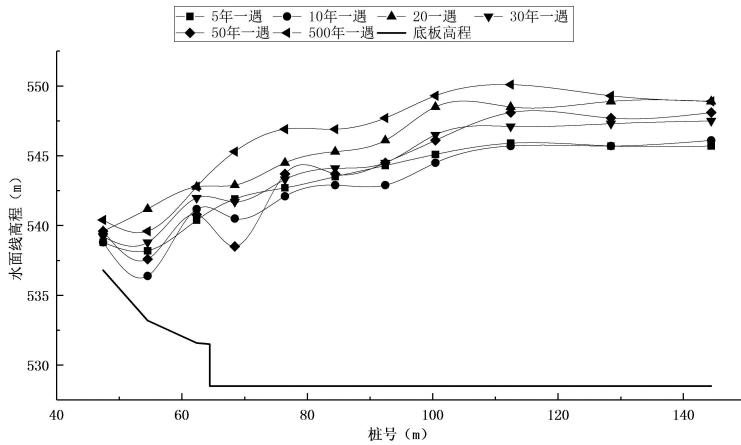
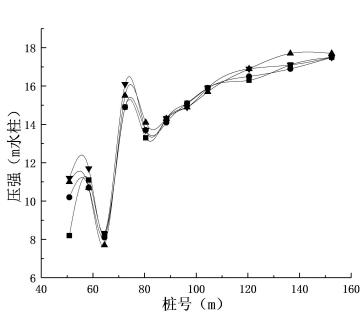
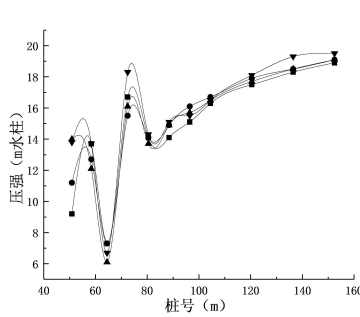


图 5 各工况水面线

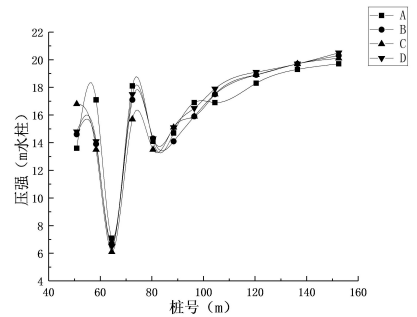
Fig. 5 Surface line of each working condition



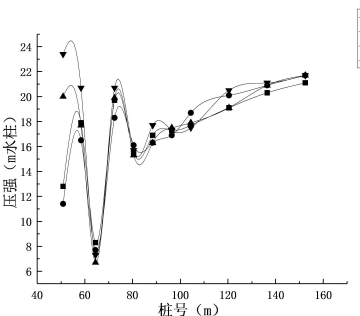
(a) 5 年一遇工况时均压强分布



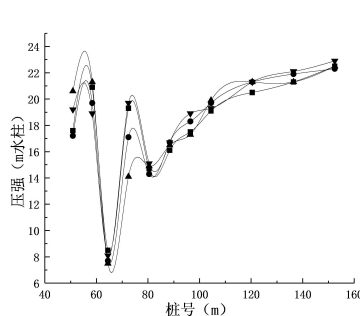
(b) 10 年一遇工况时均压强分布



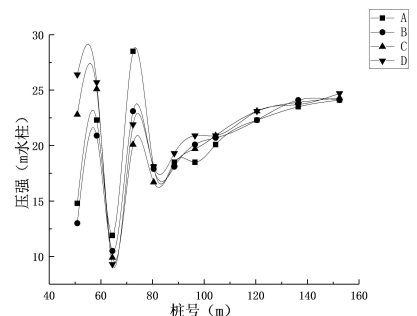
(c) 20 年一遇工况时均压强分布



(d) 30 年一遇工况时均压强分布



(e) 50 年一遇工况时均压强分布



(f) 500 年一遇工况时均压强分布

图 6 各工况时均压强分布

Fig. 6 Pressure distribution under each operating condition

在横向上,反弧段上C、D列水流主流冲击,且被X型宽尾墩束窄收缩后挑起的水流在此砸落,冲击底板,其时均压强比起没有挑流跌落的A、B列要大,在大流量工况尤为明显,而D列除部分主流砸落外,还有一部分消力池水垫回水,因此总体压强在各列当中最大。消力池中后段水流消能充分,水流流态平缓,横向上各列压强接近趋于一致。

4 总结

临底流速纵向上整体沿程减小,仅在跌坎底部出现突降后回升。临底流速在溢流堰反弧段最大,在消力池前端波动变化剧烈,在消力池尾端趋于平静;横向上,在溢流堰反弧段和消力池前端处,靠近边墙流速大,靠近中轴线流速较小,边孔处流速仅在大流量时居于较大值,而在消力池尾端各部位流速趋于一致。应当注意对边墙的抗冲蚀保护。

水跃发生在溢流堰反弧段和消力池前中部,水面线沿程上升。水面线最高点出现在消力池中段,该处应在消力池边墙高度设计时适当加高,防止翻水。

时均压强在纵向分布上:反弧段在小流量时时均压强在同列各测点偏小,大流量时时均压强较大。而消力池则前端波动剧烈,中后段时时均压强沿程增大。时均压强最大值在反弧段末端、消力池前端和消力池尾端都有出现,最小值均出现在消力池跌坎底部。压强在消力池跌坎底部存在突降,并在之后由于主流临底立即回复至较大值;横向上,在反弧段靠近边墙和

边孔轴线处压强较中轴线大,尤其是大流量工况更为明显,消力池中后段则各部位时时均压强趋于一致。

参考文献

- [1]尹进步,梁宗祥,郑治,等.与宽尾墩联合使用的消力池底板压强特性试验研究[J].水力发电学报,2011,30(4):103-108.
- [2]范强,田忠,史润泽.“X”型宽尾墩在底流消能中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(5):66-70.
- [3]林秉南.我国高速水流消能技术的发展[J].水利学报,1985,16(5):23-26.
- [4]龚振瀛,刘树坤,高季章.宽尾墩和窄缝挑坎—收缩式消能工的应用[J].水力发电学报,1983,2(3):48-57.
- [5]付海波.Y型宽尾墩与消力池联合消能水力特性研究[D].武汉:武汉大学,2017.
- [6]代述兵.与X型宽尾墩联合消能的消力池水力特性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [7]尹进步,刘韩生,梁宗祥.用于大单宽泄洪台阶坝面上的一种新型宽尾墩[J].西北水电,2002(1):44-46.
- [8]王海军,杨红宣,王立辉.跌坎型底流消能工控制临底流速的跌坎最小深度[J].水利水电工程学报,2008(1):78-81.
- [9]孙双科,柳海涛,夏庆福,等.跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J].水利学报,2005,36(10):1188-1193.
- [10]刁奕,杨思远,杨敏.导流洞改建泄洪洞出口跌坎消力池水平入流水力特性数值模拟研究[J].四川水利,2020,41(4):69-71.
- [11]闫勇,陈强,石太军.官地水电站消力池底板抗浮稳定研究[J].水电站设计,2013,29(4):19-24.
- [12]金靖林,刁明军,田中耀,等.宽尾墩—跌坎消力池脉动压强试验研究[J].西南民族大学学报(自然科学版),2023,49(6):699-708.

(责任编辑:张阳,殷锋,付强,和力新,肖丽;英文编辑:周序林,郑玉才)