

# 明渠泄洪闸底流辅助消能工水工模型试验研究

潘 露<sup>1</sup>, 王 川<sup>2</sup>, 叶 茂<sup>2</sup>

(1. 四川水利职业技术学院, 四川 成都 611231;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘 要:**结合 1:70 水工模型试验,对四川省某水电站明渠泄洪闸底流辅助消能工进行研究。研究成果表明:消力墩、“T 型墩+差动坎”比连续坎更能显著提高水流消能率,而连续坎体型简单,结构受力小,当护坦流速超过 16 m/s 且有排沙需求时,其适用性更好;连续坎位置、坎高和迎水面坡比与护坦内水流消能率呈正比关系,体型参数选择应关注护坦内水流流态和坎后水面跌落,并应考虑工程量和是否有排沙需求;模型试验具有一定缩尺效应,原型中的水流紊动作用更强。

**关键词:**模型试验;原型观测;辅助消能工;水流消能率

中图分类号:TV131

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)06-0138-07

## Hydraulic Model Test on Underflow Auxiliary Energy Dissipater of Sluice in Open Channel

PAN Lu<sup>1</sup>, WANG Chuan<sup>2</sup>, YE Mao<sup>2</sup>

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational Collage, Chengdu Sichuan 611231;

2. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** Combined with 1:70 hydraulic model test, the auxiliary underflow energy dissipater effects of sluice in an open channel were studied. The results show that baffle pier and differential bucket with T-shaped are more efficiently of energy dissipation than continuous bucket, the shape of continuous bucket is simple and the structural stress on continuous bucket is small, and the applicability is better than other shapes when the flow rate is more than 16m/s on apron and desilting. The flow pattern, velocity, dropping height are in direct proportion to efficiency of energy dissipation on apron. The flow pattern, dropping height, project quantity and desilting are crucial for selecting the parameters. For the scale effect of model test, the turbulent of flow of prototype is more strong.

**Key words:** Model test; Prototype observation; Auxiliary energy dissipater; Efficiency of energy dissipation

## 0 前 言

底流消能是利用在消力池内产生水跃进行消能的一种传统消能方式,其优点是适应性强、流态稳定、冲刷轻微,与挑流消能相比,底流消能引起的泄洪雾化很小,对周边环境的影响很小,在目前人们对高坝泄洪雾化等环境问题日益重视的现状下,底流消能方式具有独特优势<sup>[1-2]</sup>。前人对底流消能的研究成果较多,张功育、王海军等<sup>[3]</sup>研究了跌坎式底流消能的消能机理,验证了其消能效果;王均星、朱祖国等<sup>[4]</sup>通过模型试验探讨了消力池内布设辅助消能工后对水跃消能效率的影响,以及消能工的合理布置对于优化消力池结构的作用;

奉紫岑、杨庆等<sup>[5]</sup>对弯曲河道上的底流消能工布置进行试验研究,提出了主、辅两级消力池与导流消力墩这一消导结合的消能工结构。然而这些研究成果多针对工程设计阶段,对于已建成的工程,因受限于泄洪通道宽度、底板高程难以调整、泄洪消能工布设及体型选择难度较大,相关的研究成果也较少。笔者结合已建成的某水电站明渠泄洪闸泄洪消能技术改造项目的模型试验,对护坦内不同类型辅助消能工及辅助消能工不同体型的消能效果和适用性进行了对比试验研究,提出的底流辅助消能工推荐方案已被应用于现场施工,并得到了原型观测试验的验证。

## 1 工程概况及模型设计

收稿日期:2024-11-27

水电站位于四川省攀枝花市盐边县境内的雅砻江干流上,是雅砻江干流下游最末一级梯级电站,其上游梯级为二滩水电站。枢纽建筑物由左、右岸重力式挡水坝段、河床式电站厂房坝段、河床4孔泄洪闸坝和右岸明渠3孔泄洪闸坝组成。

右岸明渠3孔泄洪闸由导流明渠改建而成,泄洪闸孔口尺寸为16.0 m×21.0 m(宽×高),闸

室顺水流方向长度60.0 m,最大闸高58.0 m。泄洪闸堰顶高程994.0 m,堰面曲线上游采用 $R=4.0$  m的圆弧线,堰顶接7.0 m的水平段,下游采用 $R=30.0$  m的圆弧线,通过坡度1:2.08的直线与半径 $R=40.0$  m反弧段相连。下游消力池护坦接导流明渠底板高程982.00 m,护坦长度65 m,明渠3孔泄洪闸剖面见图1。

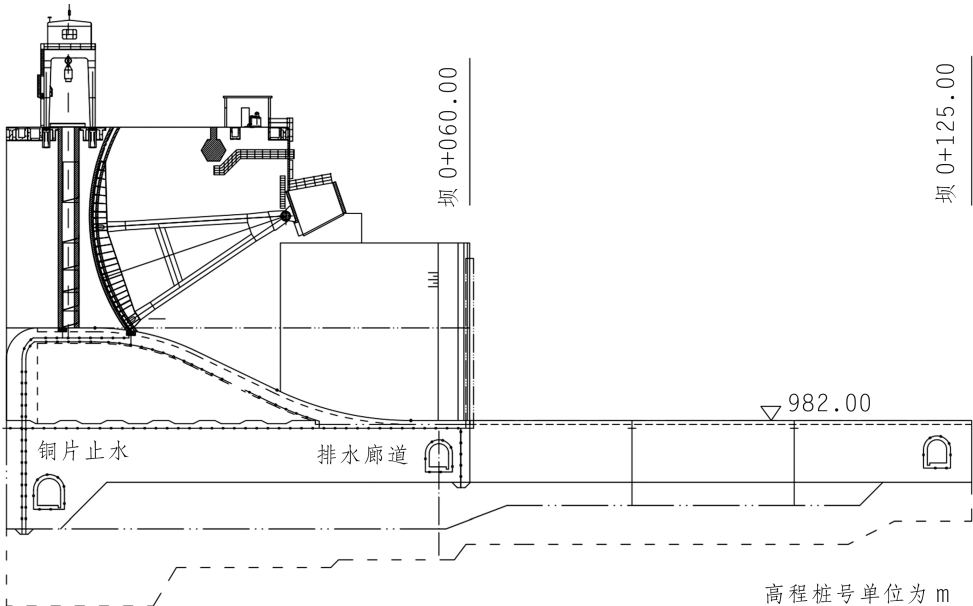


图1 明渠3孔泄洪闸剖面图

水工模型按重力相似准则设计,采用比尺为1:70的正态模型。原设计方案常遇洪水工况(明渠单独下泄流量3 000 m<sup>3</sup>/s)下,明渠护坦内无法形成水跃消能,原设计方案常遇洪水工况下明渠护坦内水流流态见图2。护坦临底流速较大,电站建成运行初期明渠护坦发生冲刷破坏,明渠过流后护坦内的冲刷坑情况见图3。因此,需

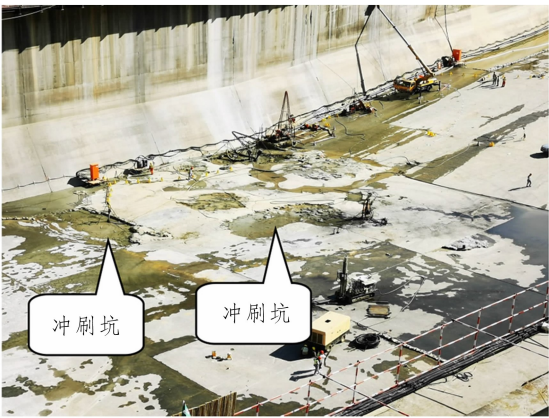


图3 明渠过流后护坦内的冲刷坑情况

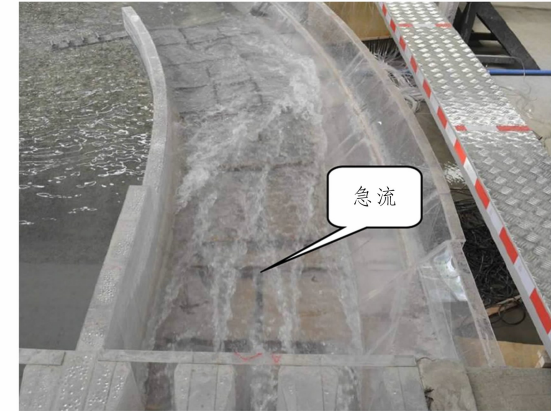


图2 原设计方案常遇洪水工况下明渠护坦内水流流态图

要对明渠泄洪消能工的体型进行优化,提高水流消能率,减轻水流对明渠护坦及下游河床的冲刷。

2 不同类型辅助消能工对比试验

为了使明渠内形成底流水跃消能,拟在护坦内布设辅助消能工,模型试验对消力墩、尾坎及“T型墩+差动坎”三种类型的辅助消能工方案进行对比研究。各辅助消能工体型布置见图4~6。

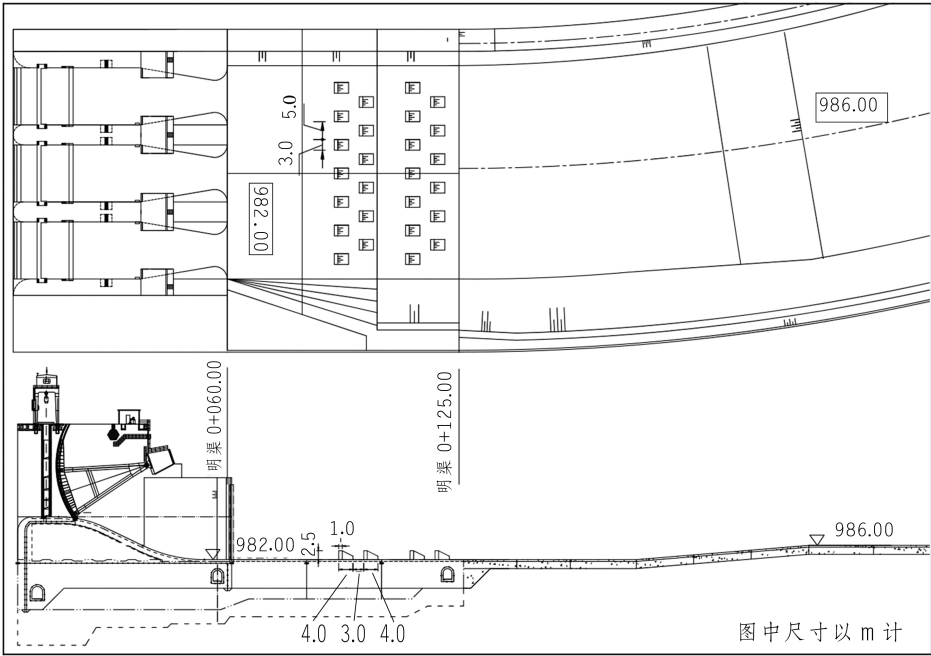


图 4 消力墩方案体型布置图

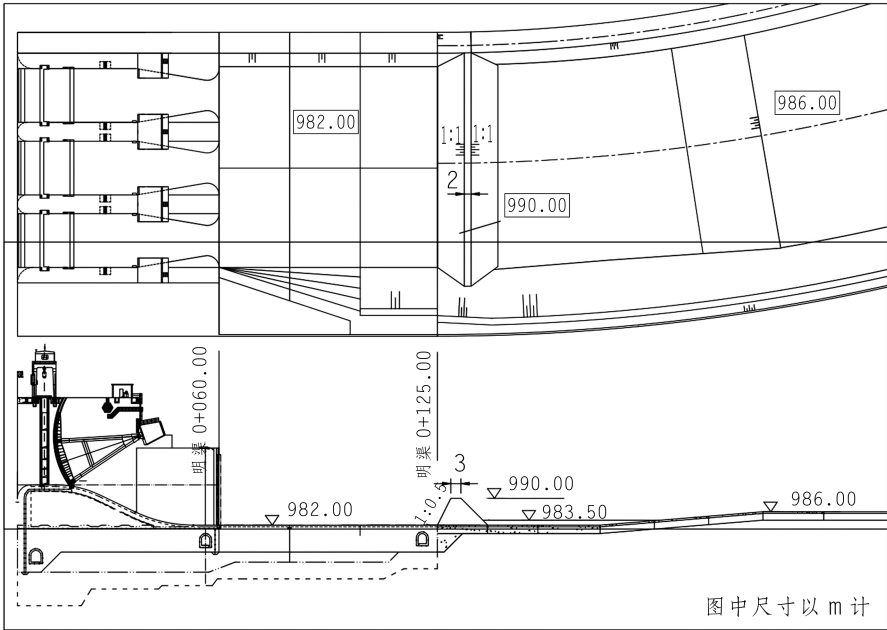


图 5 连续坎方案体型布置图

- (1)消力墩方案:在明渠 0+090.0、0+097.0、0+110.0、0+117.0 桩号位置增设 4 排尺寸为 4.0 m×3.0 m×2.5 m(长×宽×高)的消力墩。

(2)连续坎方案:在明渠桩号 0+125.0 处增设 8.0 m 高连续坎,连续坎迎水面和背水面坡比均为 1:1。

(3)“T 型墩+差动坎”方案:在明渠桩号 0+125.0 处设置“6 m 高 T 型墩+8 m 高差动坎”,T 型墩及差动尾坎体型参照前人的经验公式,墩厚:前墩高:前墩宽(与净间距相等):尾坎高:支腿长=2:3:4:5:6。
- 明渠泄洪闸常遇洪水工况(明渠单独下泄流量 3 000 m<sup>3</sup>/s)下,明渠内水流特性试验成果见表 1。

各辅助消能工方案均能起到水流消能大幅降低护坦临底流速的作用,然而消力墩是通过阻挡

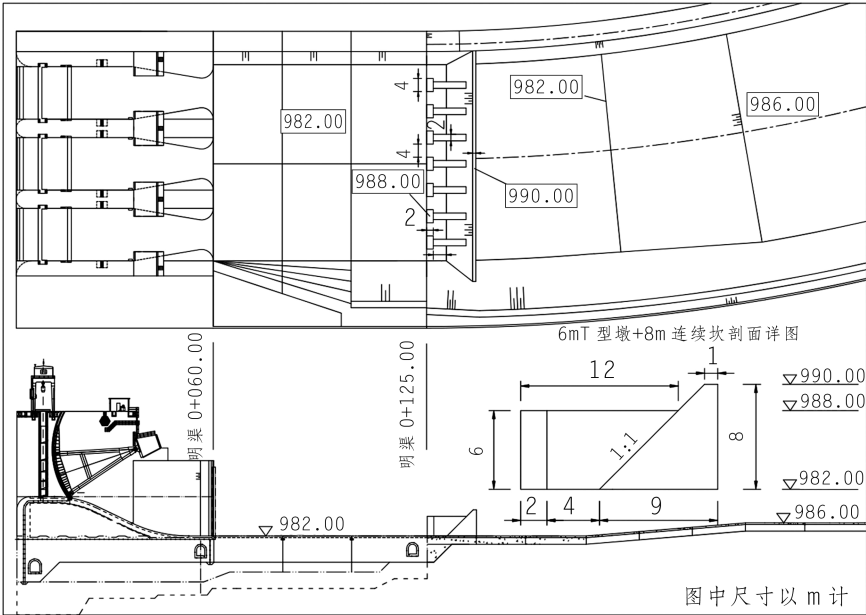


图6 “T型墩+差动坎”方案体型布置图

表1 明渠内水流特性试验成果

| 流量<br>/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 方案            | 明渠护坦内<br>流态 | 最大临底流速 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |         |       |          | 最大脉动压力<br>均方根<br>( $\times 9.81 \text{ kPa}$ ) | 最大脉动<br>压力均方根<br>出现位置 |
|---------------------------------------------|---------------|-------------|--------------------------------------------|---------|-------|----------|------------------------------------------------|-----------------------|
|                                             |               |             | 0+060.0                                    | 0+090.0 | T型墩前  | 坎顶/消力墩下游 |                                                |                       |
| 3 000                                       | 连续坎方案         | 淹没水跃        | 21.09                                      | 12.60   | —     | 11.45    | 2.31                                           | 护坦前部<br>水流触底区         |
|                                             | 消力墩方案         | —           | 21.09                                      | 20.40   | —     | 7.60     | 3.54                                           | 消力墩迎水面                |
|                                             | T型墩+<br>差动坎方案 | 淹没水跃        | 21.09                                      | 12.26   | 10.29 | 10.32    | 3.72                                           | T型墩迎水面                |

水流方式形成的强迫消能,当消力墩迎水面冲击流速较大时,可能会对消力墩自身结构稳定性造成不利影响;明渠下泄流量 3 000  $\text{m}^3/\text{s}$  时,第一排消力墩迎水面冲击流速达 20.40  $\text{m/s}$ ,超出规范对设置消力墩迎水面冲击流速不超过 16.00  $\text{m/s}$  的要求,因此,该工程明渠护坦内不宜设置消力墩进行消能。

连续坎和“T型墩+差动坎”方案明渠护坦内均形成了淹没水跃,充分发挥了底流水跃消能的

作用,水流消能后出池流速不大,实测连续坎方案入池流速为 21.09  $\text{m/s}$ ,出池流速为 11.45  $\text{m/s}$ ,水流消能率为 45.7%，“T型墩+差动坎”方案入池流速为 21.09  $\text{m/s}$ ,出池流速为 10.32  $\text{m/s}$ ,水流消能率为 51.1%。但本闸坝工程明渠泄洪闸为电站枢纽的主要排沙通道,“T型墩+差动坎”体型复杂,推移质及高含沙水流将对护坦、T型墩和差动坎造成严重的冲磨破坏;连续坎体型简单,有利于排沙,同时相比于T型墩,其迎水面水流



(a)消力墩方案



(b)连续坎方案





(c)“T 型墩+差动坎”方案

图 7 常遇洪水工况下各辅助消能工方案明渠内水流流态图

脉动压力较小,更利于保持自身结构稳定性。综

上所述,虽然“T 型墩+差动坎”方案明渠内的水流消能效果更好,但因连续坎方案能够满足明渠泄洪闸排沙需求,并且其结构受力较小,故该工程明渠辅助消能工推荐采用连续坎方案。

3 连续坎辅助消能工体型优化试验

为了进一步提高明渠护坦内水流的消能率,对连续坎位置、坎高及迎水面坡比进行对比研究。连续坎位置对比了桩号 0+125.0、0+135.0,坎高对比了 5 m 和 8 m,迎水面坡比对比了 1:1 和 1:0.5。常遇洪水工况下各辅助消能工方案明渠内水流流态见图 7,明渠内水流特性试验成果见表 2。

表 2 各对比体型方案明渠内水流特性试验成果

| 下泄流量<br>/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 方案                            | 是否形成<br>淹没水跃 | 池内流态                        | 坎顶最大流速<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | 坎后水面跌落<br>高度 /m |
|---------------------------------------------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------|
| 3 000                                       | 桩号 0+125.0、坎高 5 m、迎水面坡比 1:1   | 否            | 池内前半部为急流,后部形成远驱式水跃          | 13.52                           | 2.25            |
|                                             | 桩号 0+125.0、坎高 8 m、迎水面坡比 1:1   | 是            | 水跃跃首位于闸墩下游,池内水流流态不稳定,水面波动较大 | 11.45                           | 3.63            |
|                                             | 桩号 0+135.0、坎高 8 m、迎水面坡比 1:1   | 是            | 水跃跃首位于闸墩下游,池内左侧出现较大范围平面回流   | 10.65                           | 3.50            |
|                                             | 桩号 0+125.0、坎高 8 m、迎水面坡比 1:0.5 | 是            | 水跃跃首位于闸墩之间,池内水流紊动翻滚剧烈,流态较稳定 | 10.08                           | 3.71            |



(a)连续坎桩号 0+125.0、坎高 5 m、迎水面坡比 1:1



(c)连续坎桩号 0+135.0、坎高 8 m、迎水面坡比 1:1



(b)连续坎桩号 0+125.0、坎高 8 m、迎水面坡比 1:1



(d)连续坎桩号 0+125.0、坎高 8 m、迎水面坡比 1:0.5

图 8 常遇洪水工况下连续坎各对比体型方案明渠内水流流态图

从图表中可知:(1)连续坎位置下移(消力池长度增加)、坎高加高、迎水面坡比增大均有助于

护坦内形成淹没水跃,提高水流消能率。实测连续坎坎高为 8 m,布设位置由桩号 0+125.0 下移

至桩号 0+135.0 时,坎顶流速由 11.45 m/s 减小至 10.65 m/s;连续坎设在护坦桩号 0+125.0 处,坎高由 5 m 加高至 8 m 时,坎顶流速由 13.52 m/s 减小至 11.45 m/s;连续坎设在护坦桩号 0+125.0 处、坎高 8 m,迎水面坡比由 1:1 增大至 1:0.5 时,坎顶流速由 11.45 m/s 减小至 10.08 m/s。(2)连续坎布设位置、坎高和迎水面坡比应适中,否则将会带来其他问题。以该工程为例,连续坎坎高持续增高,将加大坎后水面跌落,造成坎后二次冲刷,实测连续坎设在护坦桩号 0+125.0 处,坎高由 5 m 增高至 8 m 时,坎后水面跌落高度由 2.25 m 加大至 3.63 m。连续坎布设位置由桩号 0+125.0 下移至桩号 0+135.0 m 时,由于明渠左右不对称,泄洪时护坦内形成大范围平面回流;同时,当连续坎下移,坎前消力池达到一定长度时,继续下移连续坎位置,池内水流消能率提高不明显,实测连续坎位置下移 10 m(由桩号 0+125.0 下移至桩号 0+135.0),坎顶流速仅降低 7%;而将连续坎迎水面坡比由 1:1 增大至 1:0.5 时,坎顶流速可降低 12%,然而连续坎迎水面坡比持续增大不利于池内泥沙排出,将加剧

消力池磨损。常遇洪水工况下连续坎各对比体型方案明渠内水流流态见图 8。

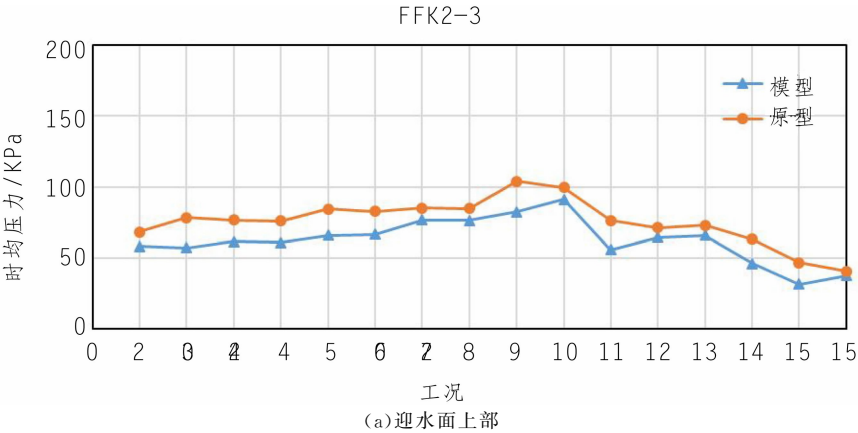
综合对比分析各体型方案明渠护坦内水流流态、流速、坎后水面跌落高度等参数,从节省工程量和满足排沙需求角度考虑,明渠内辅助消能工推荐采用连续坎方案,连续坎设在桩号 0+125.0 处,坎高 8 m,迎水面坡比 1:0.5。

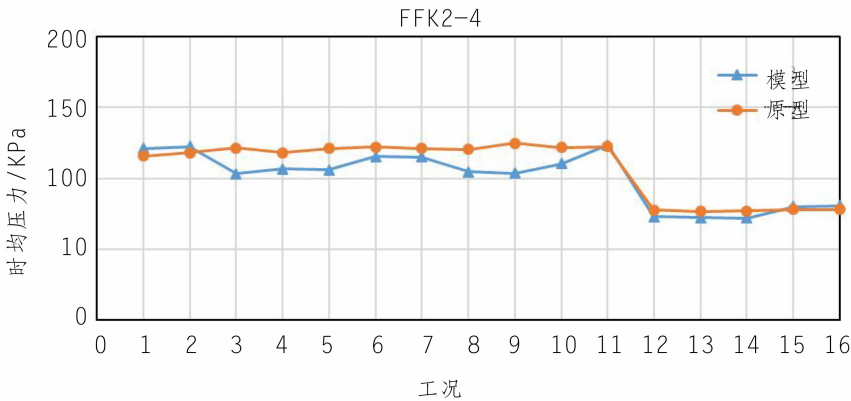
4 原型观测试验

明渠泄洪闸泄洪消能技术改造按照模型试验推荐方案实施后,开展了现场原型观测试验。常遇洪水工况下明渠内水流流态见图 9,各工况下连续坎迎水面动水压力对比情况见图 10。从图中可知,消力池原型流态与模型流态相似,明渠护坦内能形成较稳定的淹没水跃,消能效果总体较好,各工况下,连续坎迎水面动水压力值不大,原型值和模型值相近,说明模型试验结论正确,推荐的连续坎位置及体型设计是合理的。各工况下,连续坎迎水面动水压力原型观测值均略大于模型值,这是因为模型试验存在一定缩尺效应,原型中明渠内水流紊动作用更强。



图 9 常遇洪水工况下明渠内水流流态图





(b)迎水面下部

图 10 各工况下连续坎迎水面动水压力对比情况

5 结 语

(1)底流消能式泄水建筑物下游护坦内设置消力墩、连续坎和“T 型墩+差动坎”等辅助消能工均有助于护坦内形成底流淹没水跃,提高水流消能率,减小下泄水流流速。

(2)相较于护坦内设置连续坎,消力墩或“T 型墩+差动坎”方案更能显著提高水流消能率,但消力墩不能布设在护坦流速超过 16 m/s 处,对于有排沙功能的泄水建筑物护坦内也不宜设置消力墩和“T 型墩+差动坎”等结构复杂的消能工;另外,消力墩和“T 型墩+差动坎”结构复杂,消力墩和 T 型墩迎水面脉动压力较大,在技术改造工程项目中,应充分考虑其影响。

(3)位置、坎高及迎水面坡比是连续坎辅助消能工的三个重要体型参数。连续坎位置、坎高和应水面坡比与坎前消力池水流消能率呈正比关系,连续坎位置越靠近下游(消力池池长越长)、坎高越高(消力池池深越深)和迎水面坡比越大(壅水作用越强),坎前消力池内水流的消能率越高。然而,连续坎位置下移,消力池工程量增加明显,坎高增高可能导致坎后水面跌落加剧造成二次冲刷,迎水面坡比增大不利于消力池排沙;连续坎最终推荐体型选择应综合对比护坦内水流流态、流

速、动水压力、坎后水面跌落高度,并考虑工程量和是否有排沙需求等因素。

(4)模型试验具有一定缩尺效应,原型中的水流紊动作用更强,使用模型试验成果时应充分考虑。

参考文献:

[1] 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.  
[2] 孙永娟,孙双科. 高水头大单宽流量底流消能技术研究成果综述[J]. 水力发电,2005,31(8):70-72.  
[3] 张功育,汤 健,王海军,等. 跌坎式底流消能工的消能机理分析与研究[J]. 南水北调与水利科技,2005,3(6):43-45.  
[4] 王均星,朱祖国,等. 消力池内辅助消能工对水跃消能效率的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2011,44(3):40-43.  
[5] 奉紫岑,杨庆,等. 弯曲河道上底流消能工布置试验研究[J]. 中国农村水利水电,2019 (7):166-169.

作者简介:

潘 露(1984-),女,重庆人,副教授,高级工程师,硕士,从事水工水力学研究工作;  
王 川(1986-),男,河南新乡人,高级工程师,硕士,从事水工水力学研究工作;  
叶 茂(1979-),男,浙江慈溪人,正高级工程师,博士,从事水工水力学模型试验及数值模拟研究.

(编辑:吴永红)