

文章编号: 1006-4710(2014)03-0304-05

# 台阶式溢流坝消力池水跃特性

田嘉宁<sup>1</sup>, 赵庆<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 中国水电顾问集团 西北勘察设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 通过模型试验研究了台阶式溢流坝 3 种坝坡及台阶高度时的压强、水跃长度及特性, 提出了计算水跃长度的经验公式。研究表明: 远驱水跃时部分水股向上跃起, 形成不完全的挑射水流, 在水流跃离消力池底板的区域, 压力趋于零或出现很小的负压, 沿池底板时均压力和瞬时压力变化近似横向放置的“Z”字型; 临界水跃时底板上的压力变化与远驱水跃类似, 但均有所增大, 负压消失; 相对临界跃长  $L_j/y_c$  增加, 相对堰上临界水深  $y_c/h$  增大, 当  $y_c/h < 1$  时相对临界跃长以线性增加,  $y_c/h \geq 1$  时相对临界水跃增长的速度明显减慢, 特别是当  $y_c/h \geq 2.25$  以后, 相对堰上临界水深对相对临界水跃长度影响很弱; 随跃后水深和跃前底板压力增大水跃长度增加, 光面溢流坝的水跃长度与台阶式溢流坝水跃长度的比值为 1.1~2.4, 这种差值在小流量时较大, 随流量增加差值缩小; 另外, 坝面坡度对水跃长度影响较小。

**关键词:** 水跃特性; 模型试验; 消力池; 台阶式溢流坝

**中图分类号:** TV135.2      **文献标志码:** A

## Hydraulic jump characteristics in stilling basin of stepped spillways

TIAN Jianing<sup>1</sup>, ZHAO Qing<sup>2</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Northwest Investigation, Design &amp; Research Institute CHECC, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Through model tests, this paper studies the pressure, the hydraulic jump length and the characteristic of hydraulic jump length, on the stepped spillways under three kinds of dam slope and step height, and suggests an empirical formula for calculation of hydraulic jump length. Results show that at downstream hydraulic jump, part of the water shares jump up and form incomplete jump flow. Pressure tending to zero or appearing negative occur at the flow spring stilling basin soleplate. Mean pressure change and instantaneous pressure change appear to be approximate horizontal placed “Z”, at critical hydraulic jump. The pressure change on soleplate is similar to downstream hydraulic jump, but all increase and negative pressure disappear. Relatively critical hydraulic jump length  $L_j/y_c$  increases with relatively weir crest critical water depth  $y_c/h$ . when  $y_c/h < 1$ , relatively critical hydraulic jump length increases linearly. When  $y_c/h \geq 1$ , relatively critical hydraulic jump increases slowly, especially when  $y_c/h \geq 2.25$ , relatively weir crest critical water depth affects relatively critical hydraulic jump length weakly. Hydraulic jump length increases with rear depth of hydraulic jump and hydraulic jump forepart soleplate pressure. The ratio between slippery spillway hydraulic jump length and stepped spillway hydraulic jump length is 1.1~2.4. This difference is relatively large at small discharge and decreases with increasing discharge. Additionally, dam slope has less influence on hydraulic jump length.

**Key words:** hydraulic jump characteristics; model experiment; stilling basin; stepped spillway

利用混凝土浇筑而成的台阶式溢流坝, 在水利工程中已有 30 多年的应用历史, 并取得了许多研究成果<sup>[1-6]</sup>。目前, 台阶式溢流坝结构一般都是采用底

流消能方式, 台阶段与消力池的连接也由最初的反弧连接改为直接相连, 取消了反弧过渡段。与传统的反弧连接方式不同的是, 这种体会使水流直接

收稿日期: 2013-11-20

作者简介: 田嘉宁, 男, 教授, 研究方向为泄水建筑物体形的水力特性、泄水建筑物消能防冲。

E-mail: jintianxut@sohu.com.

冲击消力池底板,入池水流被分成两股,一部分水流沿池底板流向下游,另一部分水流则出现跃起现象,因此,消力池中的水跃特性亦会发生改变。关于这一问题,文献[7]和文献[8]曾经对淹没水流条件下,光面溢流面和台阶溢流面进行了比较研究,结果表明,在台阶式溢流面中,当溢流面与水平面的夹角 $\theta < 19^\circ$ ,即,出现滑行水流时,其相对跃长 $L_t/y_c$ 与相对下游水头 $y_d/y_c$ 及相对坝高 $H_{dam}/y_c$ 的影响甚微。相对水跃长 $L_t/y_c$ 为一常数( $L_t$ 为淹没水跃长度, $y_d$ 为下游水深, $y_c$ 为堰顶临界水深, $H_{dam}$ 为坝高)。与光面溢流坝比较,相对水跃长缩短约70%,当 $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ ,即,滑行水流时,与光面溢流坝比较,相对水跃长可减少约50%。

另外,Yildiz D<sup>[9]</sup>曾对 $\theta = 30^\circ$ 、 $\theta = 51.3^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ 三种坡度的台阶式和光面两种溢洪道水跃也做了对比试验,结果显示,小流量时水跃长度减少了约50%左右。

台阶式溢流坝与平底消力池直接连接,使其水跃特性发生了改变。虽然前人对此做过一些研究,得出了部分结论,但系统的研究却未曾见到。特别是水跃长度与坝坡、来流量、下游水深等条件之间的依存关系目前仍是工程设计人员事先希望得到的。因此,本研究通过模型试验,对以上的水力条件进行了研究,并做了定量分析,以便进一步了解在采用该体形时,消力池的水跃特性,为研究人员和工程设计人员提供参考。

## 1 试验装置

本研究不针对某一项具体工程,因此,模型设计未涉及原型和模型的几何比尺。其试验系统由供水箱、进水段、WES曲线堰、台阶段、平底消力池、回水渠和量水堰组成。WES曲线采用标准方程设计,即:

$$x^{1.85} = 2.0H_d^{0.85}y \quad (1)$$

其中,进水段、WES曲线、台阶段和平底消力池的模型均采用8 mm厚有机玻璃制作,上下游模型宽均为40 cm,高50 cm,消力池及尾水段总长为430 cm,模型总高度为245~250 cm(见图1)。

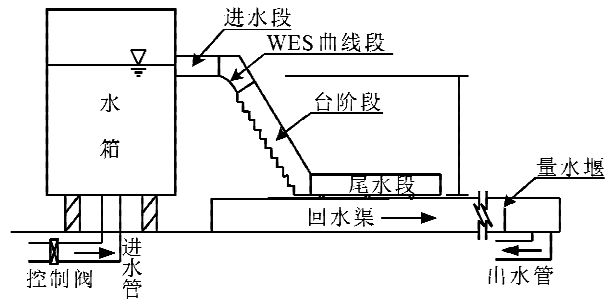


图1 模型试验大样图

Fig. 1 Schematic diagram of test model

台阶式溢流坝面上共设置了三种不同高度的台阶( $h = 40$  mm、 $h = 80$  mm、 $h = 160$  mm),溢流坝面与水平面的夹角分别设为 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 和 $60^\circ$ ,试验的单宽流量范围为 $0.022 \sim 0.22$  m<sup>3</sup>/(s·m),覆盖了滑行水流、过渡水流和跌落水流三种流况。

## 2 水跃特性

### 2.1 远驱水跃特征

水利枢纽工程中往往采用底流水跃消能来消除过坝时水流产生的巨大动能,但底流水跃消能现象复杂,理论分析难度很大,一般都采用模型试验的方法进行研究。

本试验研究使溢流坝的台阶段与平底消力池直接连接,中间部分不设反弧段。在消力池发生远驱水跃时,下泄水股直接冲击消力池底板,并迫使入池水流转向,使部分水股向上跃起,形成不完全的挑射水流,而另一部分水流则沿消力池底板向下游流动,入池水流掺气充分,如图2所示。

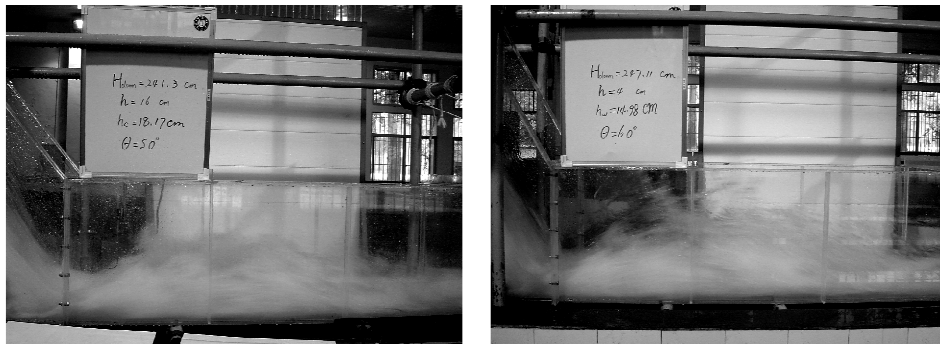


图2 远驱水跃时消力池内水流现象

Fig. 2 The flow pattern of remote hydraulic jump in the stilling basin

同时,在水流跃起的区域,消力池底板上的压力趋于零或出现很小的负压现象,沿消力池底板向下游延伸,其时均压力和瞬时压力均出现近似横向放置的“Z”字型变化。这与传统的光面溢流坝面,并加设反弧连接段的底流消能结构呈现出不同的水流现象。

### 2.2 临界水跃特点

试验中逐渐壅高下游水位,使之形成临界水跃。这时,虽然在跃前断面下游的一段距离内仍存在远驱水跃的部分特征,但是由于下游水位雍高,在消力池底板上形成一定的静水压力的缘故,使水流跃起区域的最小压力有所增大,不再出现零压或负压现象,但是,沿消力池底板上压力的变化趋势仍和远驱水跃类似,仍近似于横向放置的“Z”字型。如图 3 所示,在水跃区域内水流掺气亦非常充分,但当接近跃后断面时,靠近底板部分水体出现清水区,并能明显地观察到水体中气泡上升的现象,过了跃后断面气泡很快溢出水面,水体中不再有明显的掺气现象出现。



图 3 临界水跃时消力池内水流掺气现象  
Fig. 3 The air entrainment of the stilling basin when critical hydraulic jump

### 2.3 临界水跃长度 $L_j$ 与堰上临界水深 $y_c$ 、跃后水深 $y_2$ 及跃前断面压力 $y_p$ 的关系

为使试验所得数据更具一般性,模型试验中调节流量大小,使其分别在滑行水流、过渡水流和跌落水流中都保证有足够的试验点,以显现各流况的情况,并保证其试测数据的真实性。

整理本试验数据,以临界水跃长度  $L_j$  和堰上临界水深  $y_c$  的比值  $L_j/y_c$  为铅直向坐标,堰上临界水深  $y_c$  与台阶高度  $h$  的比值  $y_c/h$  为水平向坐标作图,由图 4 可见,  $L_j/y_c$  随  $y_c/h$  增加而增大,其次,当  $y_c/h < 1$  时相对临界水跃长度呈线性变化,当  $y_c/h \geq 1$  时相对临界水跃长度变化减慢,特别是当  $y_c/h \geq 2.25$  以后相对堰上临界水深对相对临界水跃长度影响很弱。从图 4 还

可以看出,对 3 种不同的溢流坝坡度而言,试验结果相对比较集中,说明溢流坝坡对临界水跃长度影响较小。

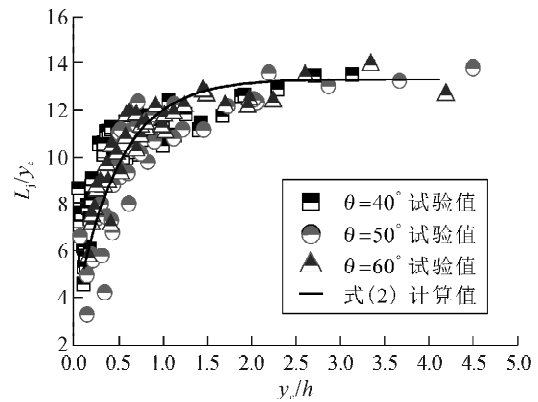


图 4  $L_j/y_c$  与  $y_c/h$  的关系  
Fig. 4 The relation between  $L_j/y_c$  and  $y_c/h$

为建立相对临界水跃长度和相对堰上临界水深之间的关系,本研究采用回归分析的方法对试验数据进行拟合,得出它们之间的经验关系如式(2)所示。由图 4 可见,应用式(2)计算所得结果与试验数据吻合很好,其相关系数为 0.97。

当  $40^\circ \leq \theta \leq 60^\circ, y_c > 0$  时,有:

$$\frac{L_j}{y_c} = 13.33 - 10.264 e^{-\frac{y_c}{0.4917h}} \quad (2)$$

其次,笔者研究了临界水跃长度  $L_j$  与跃后水深  $y_2$  的关系,以临界水跃长度为铅直向坐标,跃后水深为水平向坐标绘其相关数据图,见图 5。

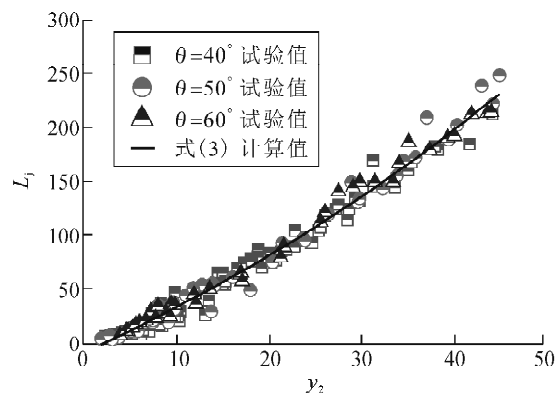


图 5  $L_j$  与  $y_2$  的关系  
Fig. 5 The relation between  $L_j$  and  $y_2$

由图 5 可看出,临界水跃长度与跃后水深之间的相关关系相当密切,在临界水跃条件下,水跃长度与跃后水深呈正比例增长关系,或者说,流量大则水跃长度长。同时,3 种不同溢流坝坡之间的试验点也差别很小。其关系可用式(3)来表达。回归分析表明,试验点与经验公式之间的相关程度更加紧密,

其相关系数为 0.99。

当  $40^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ ,  $y_2 \geq 2.14$  时,有:

$$L_j = 304.144e^{\frac{y_2}{77.582}} - 312.654 \quad (3)$$

在模型试验中,笔者还发现,临界水跃长度  $L_j$  与跃前断面底板上压力关系比较密切,同时为进一步观察坝坡对其的影响,在数据处理时把临界水跃长度与坝坡的乘积  $L_j \tan \theta$  作为铅直向坐标,经换算的跃前底板压力水头  $y_p$  为水平向坐标,点绘其试验数据。由图 6 可见,临界水跃长度与跃前断面底板压力水头以及坝坡之间相关性很好。

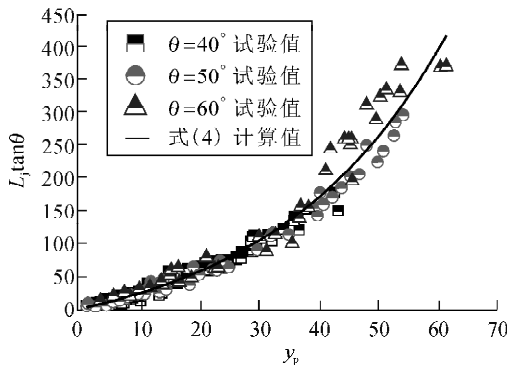


图 6  $L_j \tan \theta$  与  $y_p$  的关系  
Fig. 6 The relation between  $L_j \tan \theta$  and  $y_p$

经回归分析,水跃长度与跃前断面底板压力的关系可用式(4)表示,他们的相关系数为 0.98。

$$L_j \tan \theta = 56.96e^{0.29 \frac{y_p}{0.36}} - 56.26 \quad (4)$$

### 2.4 与光面式溢流坝面水跃长度比较

文献[8]和[9]曾经指出,台阶式溢流坝的临界水跃长度比光面溢流坝的水跃长度小。

为进一步比较这种差别,笔者选用了水力学中常用的两个经验公式  $L_j = 6.1y_2$  和  $L_j = 6.9(y_2 - y_1)^{[10]}$  计算水跃长度,并与作者的试验值进行比较(见图 7、8)。

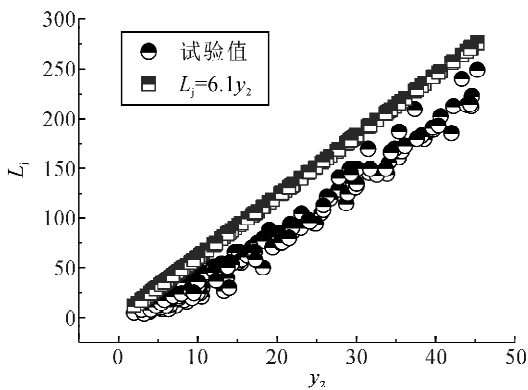


图 7 水跃长度比较 1  
Fig. 7 Comparison of hydraulic jump length 1

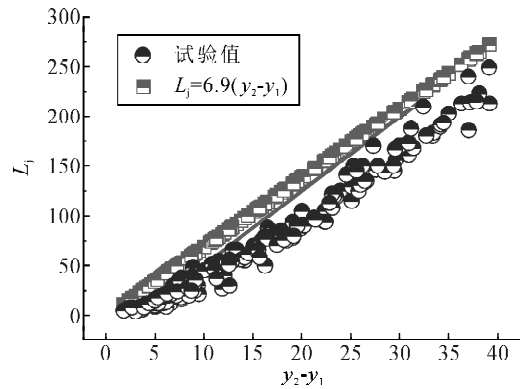


图 8 水跃长度比较 2  
Fig. 8 Comparison of hydraulic jump length 2

由图 7 和图 8 可见,文献[10]中推荐的两种经验公式所的水跃长度都比台阶式溢流坝时的水跃长度长。作者统计比较两者的差别得出,光面溢流坝时的水跃长度可达台阶式溢流坝水跃长度的 1.1~2.4 倍,而且这种差值在小流量时较大,随流量增加差值缩小。

### 3 结论

1) 台阶式流溢坝下设置不带反弧过渡段的平底等宽消力池,当其出现远驱水跃时,部分水股向上跃起,形成不完全的挑射水流,而另一部分水流则沿消力池底板向下游流动,在水流跃起的区域,消力池底板上的压力趋于零或出现很小的负压现象,其时均压力和瞬时压力沿池底板变化出现近似横向放置的“Z”字型,水流掺气充分;

2) 当出现临界水跃时,由于存在一定的静水深,底板上的时均压力和瞬时压力变化虽然与远驱类似,但均有所增大;相对临界水跃长度  $L_j/y_c$  增加相对堰上临界水深  $y_c/h$  增大,当  $y_c/h < 1$  时,相对临界水跃长度以线性增加,  $y_c/h \geq 1$  时,相对临界水跃增长速度显著减弱,特别是当  $y_c/h \geq 2.25$  以后,相对堰上临界水深对相对临界水跃长度影响很弱;

3) 随跃后水深和跃前底板压力增大水跃长度增加,在试验范围内坝面坡度对跃长影响较小;光面溢流坝是台阶式溢流坝水跃长度的 1.1~2.4 倍,这种差值在小流量时较大,随流量增加差值缩小。

#### 参考文献:

[1] Hansen K D. Roller compacted concrete developments in the USA [J]. Water Power and Dam Construction, 1986, (1):9-12.  
[2] Chanson H. The hydraulics of stepped chutes and spillways[M]. The Netherlands: A Balkema Publishers, 2002.

- [3] 田嘉宁, 大津岩夫, 李建中. 台阶式溢洪道各流况的消能特性[J]. 水利学报, 2003, (4): 35-39.  
Tian Jianing, Ohtsu I, Li Jianzhong. The characters of energy dissipation under different flows on the stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (4): 35-39.
- [4] Boes R M. Guidelines on the design and hydraulic characteristics of stepped spillways; twenty-fourth international congress on large dams[C]// International Commission on Large Dams, Kijoto, Japan, 2012: 203-220.
- [5] 李国栋, 哈岸英, 钟小彦, 等. 基于 FLUENT 的渗流场数值模拟分析[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(3): 317-320.  
Li Guodong, Ha Anying, Zhong Xiaoyan, et al. Numerical simulation of seepage field based on FLUENT [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3): 317-320.
- [6] 田嘉宁, 赵庆, 范留明. 台阶式溢流坝后消力池压强特性[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 113-118.  
Tian Jianing, Zhao Qing, Fan Liuming. Pressure characteristics in stilling basin of stepped spillways[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 113-118.
- [7] Yasuda Y, Ohtsu I. The effect of step channels on the reduction of revers-flow region in plunging flows[J]. Journal of River Engineering, JSCE, 1999, (6): 141-146.
- [8] Yasuda Y, Ohtsu I. Characteristics of plunging flow in stepped channel chutes; procession of the international workshop on hydraulics of stepped spillways[C]. Zurich, Switzerland; Balkema Rotterdam, 2000: 147-152.
- [9] Yildiz D, Kas I. Hydraulic performance of stepped chute spillways[J]. Hydropower Dams, 1998, 5(4): 64-70.
- [10] 清华大学. 水力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982.  
(责任编辑 李虹燕)

(上接第 287 页)

- [13] William E R, Lin S. Channel codes: classical and modern[M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [14] Zhang L, Lin S, Abdel-Ghaffar K, et al. Quasi-cyclic LDPC codes on cyclic subgroups of finite fields[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59 (9): 2330-2336.
- [15] 韩立强, 王祁, 信太克归. Gamma-gamma 大气湍流下自由空间光通信的性能[J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (7): 1318-1322.  
Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunor. Performance of free space optical communication over gamma-gamma atmospheric turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (7): 1318-1322.
- [16] Majumdar A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel[J]. Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2005, 2 (4): 345-396.  
(责任编辑 杨小丽)