

收缩比对非对称窄缝挑坎水力特性的影响

谢鑫, 刁明军, 杨思远

(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)

摘要:窄缝挑坎消能工因其良好的消能效果和易施工的特点被广泛应用于工程中。笔者通过模型试验,对 3 种收缩比($\eta=0.2, 0.25, 0.3$)情况下的单侧偏转的非对称窄缝挑坎的边墙水面线、底板中线时均压强和脉动压强特性展开了研究。试验结果表明:非对称窄缝挑坎的左右边墙水面线形态不同但均呈现上升趋势,窄缝底板中线上的时均压强和脉动压强均方根沿程增大,在接近窄缝出口处达到峰值,后减小。窄缝底板中线上的脉动压强基本符合标准正态分布。

关键词:窄缝挑坎;非对称;脉动压强;消能工

中图分类号:TV13

文献标志码:A

文章编号:1001-2184(2024)01-0001-05

Effect of Shrinkage Ratio on Hydraulic Characteristics of Asymmetric Narrow Slit Ridge

XIE Xin, DIAO Mingjun, YANG Siyuan

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain Rivers Engineering,
Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065)

Abstract: Narrow slit ridges are widely used in engineering due to their excellent energy dissipation effect and easy construction characteristics. This article conducted a study on the characteristics of the water surface profile of the side wall and the pressure and pulsating pressure at the centerline of the bottom plate of an asymmetric slit-type bucket through model tests on three shrinkage ratios ($\eta=0.2, 0.25$, and 0.3). The results showed that the water surface profiles of the left and right side walls of the asymmetric narrow slit ridges are different but show an upward trend. The time-averaged pressure and the root mean square of the pulsating pressure on the centerline of the narrow slit bottom plate increase along the path, reaching a peak near the exit of the narrow slot, and then decrease. The pulsating pressure on the centerline of the narrow slot bottom plate basically conforms to the standard normal distribution with no obvious.

Keywords: Narrow slit ridges; Asymmetric; Fluctuating pressure; Energy dissipator

0 引言

窄缝消能工具有构造简单、经济适用的优点,通过侧墙偏转强迫水流横向收缩纵向拉伸形成水舌向下游挑射,扩大了下泄水流的入水面积,减小了下泄水流的单位入水能量,从而减轻了下泄水流对下游河床的冲刷,适用于修建在深山峡谷的水利设施的泄洪消能^[1-5]。

在实际工程中,为了适应下游地形,常常将窄缝挑坎设计成不对称的形式,控制水舌入水位置,避免水舌对岸坡的冲击,实现下游消能防冲的目的,比如西班牙阿尔门德拉大坝和国内的阿塔萨尔、龙羊峡、天生桥一级、东风等水电站^[6]。

倪汉根和刘韩生通过试验,比较了 6 种非对称的窄缝体型在 8 种工况下对泄槽底板的冲击压强,实测结果表明:非对称性越强,冲击压强越小^[7]。在高升桥三表孔窄缝挑流消能的水工模型试验中,因为边墩绕流效应,在边表孔对称窄缝内形成了两股强度不同的的冲击波。宋昉和马飞通过将窄缝设计成不对称的形式,平衡了两侧冲击波强度,避免了冲击波水股击砸岸坡^[8]。曾红和余玉亮在双河口水电站右槽末端窄缝采取不对称收缩,减轻了下泄水流对右岸坡的冲刷下切^[9]。彭引和田忠等通过模型试验,对偏转角为 $0\sim 10^\circ$ 的非对称窄缝挑坎的水面线、底板时均压强、壁面压强、挑距及水舌入水范围展开研究,试验结果表

收稿日期:2023-10-30

基金项目:四川省学术和技术带头人培养基金(2012DTY020)

明:弗劳德数 Fr 对水面线、壁面压强和挑距有较大影响^[10]。刘韩生和倪汉根基于水流的辐射特性,结合冲击波简化式,提出了计算非对称窄缝挑坎边墙水面线的公式,进而建立了非对称窄缝挑坎的体型设计的理论计算方式。

关于非对称窄缝挑坎的体型设计,目前虽然有一些理论推导,但都是建立在理想情况下的,且适用范围有限。因此在实际工程中,往往先根据以往成功的工程经验给出初始设计方案,然后通过模型试验的效果对体型进行修改,最终得到满足要求的非对称窄缝挑坎体型的设计方案,可见模型试验对于非对称窄缝挑坎设计运用的重要性。通过模型试验,研究了不同收缩比对非对称窄缝挑坎的边墙水面线和底板中线上的压强的影响。

1 实验装置及方案

试验模型示意图见图 1。试验模型主要由有机玻璃制成,依次由水箱、压坡段、明渠段和窄缝段组成。上游水箱内最高水位可达 1.7 m,压坡段长 1.0 m,宽 0.3 m,水平明渠段长 1.5 m,宽 0.3 m。窄缝段左侧边墙保持不变,右侧边墙向左偏转形成单侧偏转的非对称窄缝形式。窄缝段长度为 0.9 m,出口宽度有 6.0 cm,7.5 cm,9.0 cm 三个梯度,对应收缩比 $\eta=0.20,0.25,0.30$ 。试验过程中,通过改变压坡段开度控制窄缝挑坎的来流水深 h ,试验工况见表 1。

2 收缩比对边墙水面线影响的分析

将测点位置距窄缝起始断面的距离设为 X ,研究中均使用 X 为横坐标作图。

图 2、图 3 和图 4 分别为弗劳德数 $Fr=7.8$, $Fr=6.6$, $Fr=5.4$ 情况下对应的挑流段左右边墙的水面线。右边墙向左偏转,急流具有很大的惯性,遇到边墙转向的阻碍便形成了急流冲

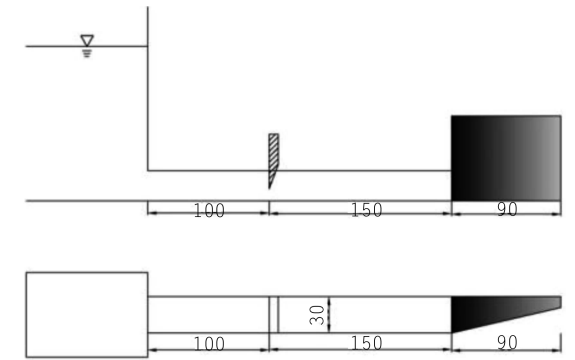
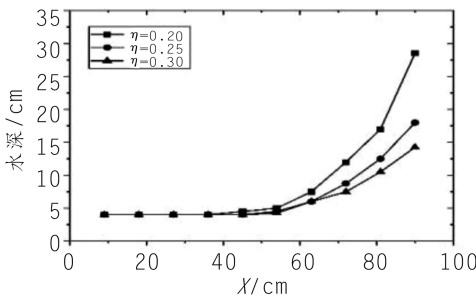


图 1 试验模型示意图(单位:cm)

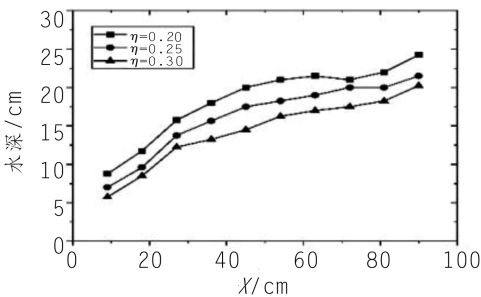
表 1 试验工况表

流量 Q / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	坎前水深 h /cm	弗劳德数 Fr	收缩比 η
0.059 0	4	7.8	0.20
			0.25
			0.30
0.069 0	5	6.6	0.20
			0.25
			0.30
0.074 5	6	5.4	0.20
			0.25
			0.30

击波现象^[11],冲击波波峰以下的区域出现水面壅高。对于右边墙,水面线在收缩段开始部分沿墙上升较快,从 $X=27$ cm 处开始水面线上升速率减小,在接近收缩段出口处,水面线上升率又增大。右边墙的出口水深随着收缩比 η 增大而减小。左边墙入口水深为来流水深 h ,其入口水深不受收缩比变化的影响。在收缩段起始部分,左边墙沿程水深就等于来流水深 h ,水面线几乎与窄缝底板平行,这是因为该区域位于冲击波波峰上游,右边墙的偏转对这部分水流的影响较小。进入收缩段中部,从 $X=63$ cm 处开始左边墙水面线陡然上升,这是因为此时该区域处于冲击波波峰下游,水面出现明显壅高。随着收缩比 η 增大,左边墙的出口水深减小。



(a)左边墙



(b)右边墙

图 2 $Fr=7.8$ 水面线

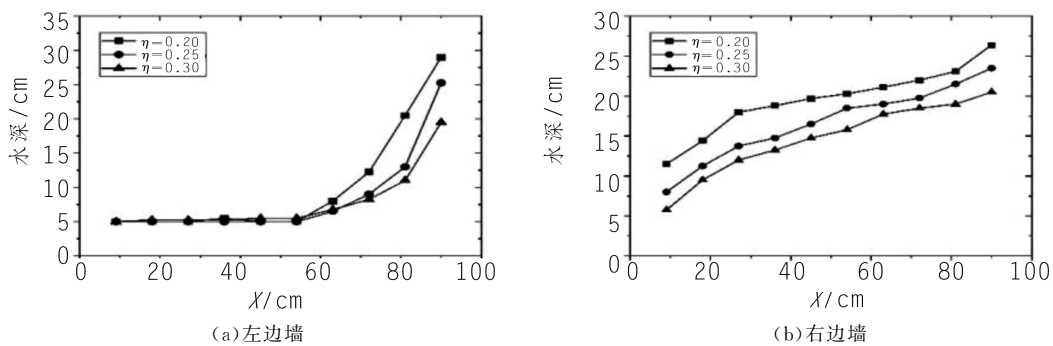


图 3 $Fr = 6.6$ 水面线

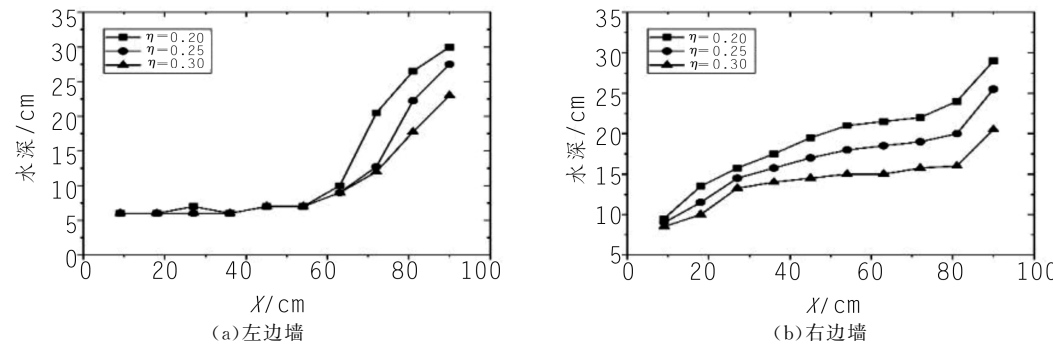


图 4 $Fr = 5.4$ 水面线

3 压强特性分析

试验对窄缝底板中线上的时均压强和脉动压强展开了测量和分析,窄缝底板的压强测点布置见图 5。

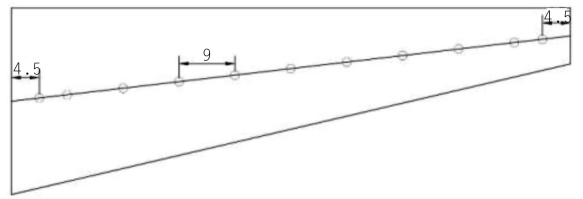


图 5 测点布置(单位:cm)

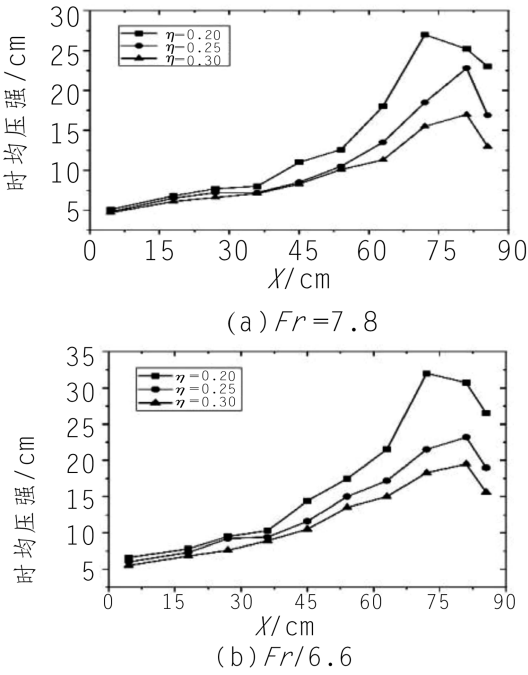
3.1 底板时均压强特性分析

窄缝底板时均压强沿程分布见图 6。时均压强沿程先增加后减小。收缩段前部,压强增大速率较小,进入收缩段中部后,压强增大速率提高,压强沿程增大并在窄缝出口附近取得最大值,之后时均压强迅速降低。这是因为边墙束窄,过流断面减小,水面壅高,窄缝底板受到的重力和动能作用增强,于是底板中线上的时均压强沿程增大。在窄缝出口附近,主流由边墙挤压转为竖向扩散,垂向流速增大,主流形成向斜上方飞射的水舌,流体对窄缝底板的冲击减弱,底板的时均压强迅速下降^[12]。随着收缩

比 η 增大,底板中线上时均压强的最大值减小,出口处的时均压强也减小。

3.2 底板脉动压强特性分析

窄缝底板典型测点脉动压强时程图见图 7,测点的瞬时压力围绕时均值振荡。笔者对 3 种不同收缩比情况下,窄缝底板中线上的脉动压强



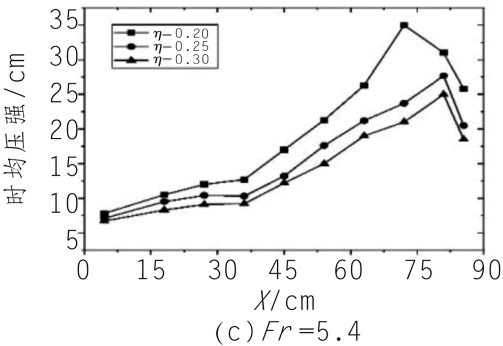


图6 窄缝底板时均压强沿程分布

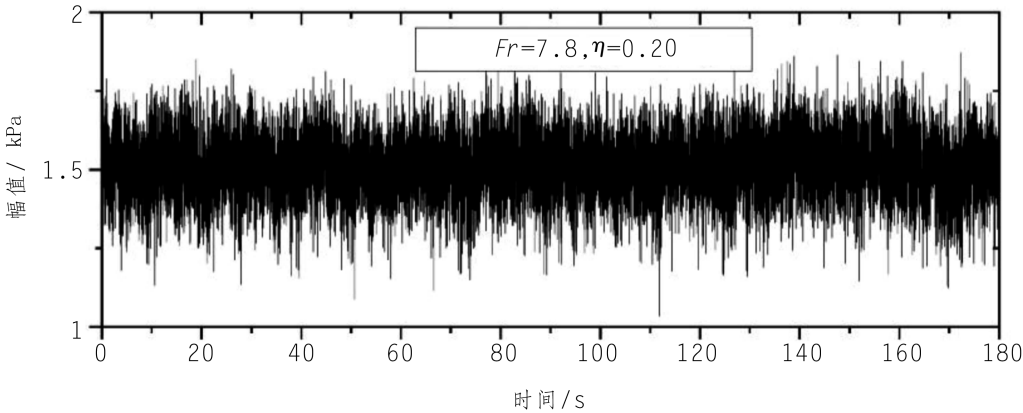
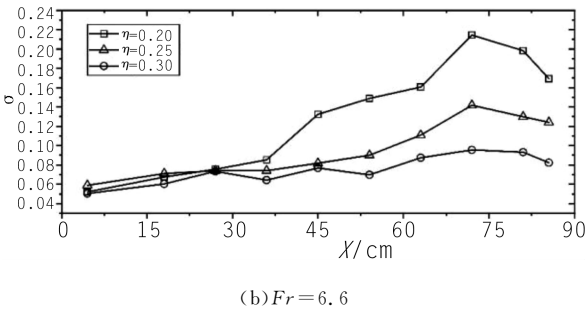
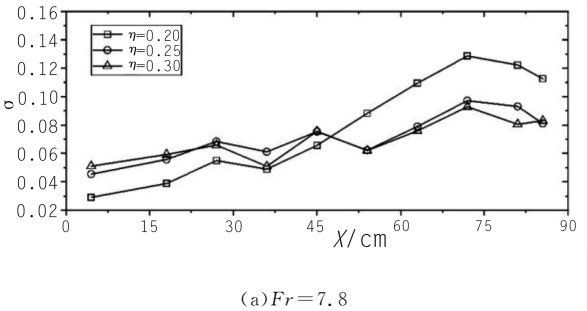


图7 测点脉动压强时程图(X=9 cm)

动加剧,故脉动压强均方根沿程增大。在收缩段出口附近,冲击波波峰到达左边墙,主流具有强烈的向上方运动的特性,窄缝底板流体的紊动减弱,脉动压强均方根减小。脉动压强均方根的最大值随着收缩比 η 的增大而减小。



的幅值、概率密度函数和频率特性展开研究。

3.2.1 脉动压强幅值特性

对于脉动压力,可以用其均方根值 σ 来衡量脉动的剧烈程度^[13]。不同收缩比对应的窄缝底板中线上测点脉动压强均方根沿程分布见图8。

窄缝底板脉动压强均方根整体呈现先上升后下降的趋势,在收缩段出口附近达到峰值,然后迅速下降。分析其原因,是右边墙形成的冲击波波峰向下游移动,使沿程流体内部动量变化频繁,紊

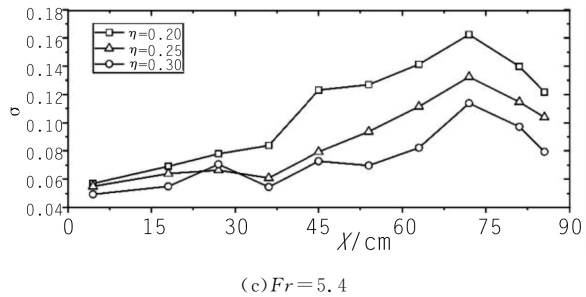


图8 脉动压强均方根沿程分布

3.2.2 脉动压强概率密度函数

脉动压强是一种信号,信号的参数一般用幅值和频率来表示。而脉动压强幅值的一个重要特性就是其概率密度分布。笔者将脉动压强幅值的偏度系数 S_k 和峰度系数 K_u 与标准正态分布的对应系数进行比较,从而对其概率密度分布进行描述。

$$S_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^3 / \sigma^3 \tag{1}$$

$$K_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^4 / \sigma^4 - 3 \tag{2}$$

式中: p_i 为样本均值; $\bar{p}$ 为瞬态值。

偏度系数 S_k 描述分布的对称性, $S_k = 0$ 时,

对称分布; $S_k>0$ 时,分布右偏; $S_k<0$ 时,分布左偏,偏态系数越接近于 0,分布的偏斜程度越小,对称性越高。峰度系数 K_u 描述分布的尖峰和扁平程度, $K_u=0$ 时,正态分布; $K_u>0$ 时,分布曲线形态高瘦,数据分布较集中; $K_u<0$ 时,分布曲线形态矮胖,数据分布较分散。一般来说,偏度系数 S_k 越接近 0,峰度系数 K_u 越接近 0,则数据的分布越接近标准正态分布。

图 9 和图 10 分别为窄缝底板各测点的偏度系数分布和峰度系数分布,可以看出,偏度系数 S_k 和峰度系数 K_u 大多数在 0 左右波动,说明窄缝底板脉动压强的波动整体上与标准正态分布比较接近。

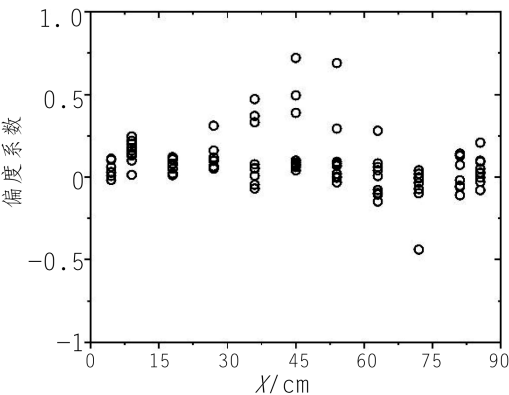


图 9 偏度系数分布

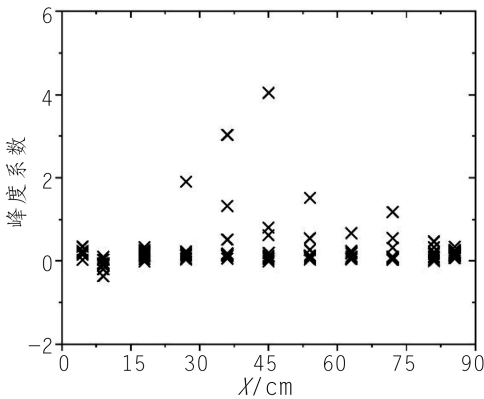


图 10 峰度系数分布

4 结 语

笔者通过水工模型对单侧偏转的非对称窄缝挑坎进行试验研究,分析了收缩比 η 对其水力特性的影响。通过研究,主要得到结论如下:

(1)非对称窄缝挑坎左右边墙的水面线总体都呈上升趋势,且出口水深都随着收缩比 η 的增

大而减小。在实际工程中,非对称窄缝挑坎往往因为冲击波现象导致边墙水面线急剧升高,为此需要将边墙建造得比较高。

(2)非对称窄缝挑坎底板中线的时均压强和脉动压强均方根沿程分布趋势相似,都呈现先增加后减小的趋势,在窄缝出口附近取得最大值然后下降,且最大值随着收缩比 η 的增大而减小。

(3)非对称窄缝挑坎底板中线的脉动压强的波动与标准正态分布比较接近。

参考文献:

[1] 郝中堂.关于挑流扩散消能机理探讨[J].大坝与安全,1988(2):13-17.

[2] 侯冬梅,占桂泉,王才欢,等.挑坎水舌运动轨迹控导措施研究[J].长江科学院院报,2013(3):16-20.

[3] 王才欢,侯冬梅,王思莹,等.高水头大能量岸边溢洪道窄缝消能工研究与实践[J].水力发电学报,2012,31(1):123-128+139.

[4] 马琳,夏鹏飞,胡江,等.溢洪道出口窄缝挑坎特性研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(4):149-155.

[5] 柳杨,马飞,吴建华.窄缝坎的冲击波及水舌入水宽度的计算[J].水利水电科技进展,2014,34(3):20-23+29.

[6] 刘韩生,倪汉根.非对称窄缝挑坎的边墙曲线计算方法[J].水力发电学报,2001(3):59-67.

[7] 倪汉根,刘韩生,梁川.兼使水流转向的非对称窄缝挑坎[J].水利学报,2001(8):85-89.

[8] 宋昉,马飞.大流量表孔窄缝坎挑流控制试验研究[J].水动力学研究与进展 A 辑,2014,29(6):670-674.

[9] 曾红,余玉亮.双河口水电站窄缝式挑流消能鼻坎体型设计[J].人民长江,2013,44(20):4-6.

[10] 彭引,田忠,肖鸿,等.非对称窄缝挑坎水力特性研究[J].人民黄河,2018,40(6):116-120+132.

[11] 王康柱,张彦法.窄缝挑坎急流冲击波的分析计算[J].陕西水力发电,1991(3):46-55+28.

[12] 聂艳华,况曼曼,王才欢,等.窄缝挑坎消能工几个水力参数试验研究[J].水电与新能源,2016(4):16-20.

[13] 苟小武,刁明军,王川隘,等.消力池尾坎坡度对底板脉动压强特性的影响试验研究[J].西南民族大学学报(自然科学版),2022,48(6):701-708.

作者简介:

谢 鑫(1996-),女,四川达州人,硕士,从事工程水力学方面工作;

刁明军(1968-),男,四川简阳人,研究员,博士生导师,从事工程水力学方面工作;

杨思远(1999-),男,湖南岳阳人,硕士,从事工程水力学方面工作.

(编辑:吴永红)