

跌坎对消力池水力特性影响的试验研究

张慧, 杨敏, 李会平

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为研究跌坎在底流消能中的作用, 依托某工程水力学模型, 研究了跌坎对消力池内水流流态、临底流速及脉动压强的影响。结果表明: 在来流量一定的情况下, 随着跌坎高度的增加, 消力池内流态会由底流依次演变为淹没混合流及淹没面流流态。加设跌坎可显著降低消力池前半段的临底流速, 且跌坎越高, 最大临底流速降幅越大, 跌坎对消力池后半段的临底流速基本无影响; 跌坎对脉动压强影响较大, 随跌坎高度的增加, 最大脉动压强先增大后减小; 加设跌坎后, 脉动压强和临底流速沿程先增大后减小, 且脉动压力和临底流速的最大值位置基本在同一区域。

关键词: 底流消能; 跌坎高度; 流态; 临底流速; 脉动压强; 模型试验

中图分类号: TV653.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0147-04

Experiment on influence of falling – still on hydraulic characteristics in dissipation basin

ZHANG Hui, YANG Min, LI Huiping

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the effect of falling – still in dissipation of bottom flow, the paper studied the influence of falling – still on flow pattern, underflow velocity and fluctuating pressure based on a hydraulic model test from a project. Results show that when the flow is constant, the flow pattern in the dissipation basin would evolve from bottom flow to submerged admixture flow as well as surface flow with the increase of falling – still height. The falling – still can reduce the underflow velocity in first half of the stilling basin, and the higher the height of falling – still, the more the decrease of maximum underflow velocity; and in the second half of the stilling basin, the falling – still has hardly effect on underflow velocity. The falling – still also has a crucial influence on fluctuating pressure, with the increase of falling – still height, the maximum fluctuating pressure increases first and then decreases. Along the flow direction of stilling basin, the fluctuating pressure and the underflow velocity increase first and then decrease and the position of their maximum values is in the same region.

Key words: hydraulic jump dissipation; height of falling – still; flow pattern; underflow velocity; fluctuating pressure; model test

底流消能是一种传统的消能方式, 具有流态稳定、尾水波动小、消能效率高、泄洪雾化小等特点, 但由于传统底流消力池临底流速及脉动压强大, 对底板的抗冲保护要求高, 多被应用于中低水头的泄洪消能工程^[1-4]。为降低消力池临底流速和脉动压强等水力学指标, 使其可以安全地应用于大型水利工程, 兴起了一种新型的消能工——跌坎消力池。跌坎消力池是在消力池入口处向下开挖适当的深度形成跌坎, 入池水流在池首呈射流状态进入池内, 水舌

下方一定范围内形成反向旋滚, 依靠主流下后方的反向旋滚和前上方的正向旋滚消能, 主流与底板间存在一定厚度的“水垫”, 因而可以降低消力池底的水力学指标, 在水利工程中具有广阔的应用前景^[5-6]。如前苏联的萨扬·舒申斯克水电站、印度的特里水电站, 国内的向家坝、梨园、官地、亭子口、金安桥及观音岩等水电站采用的均是跌坎型底流消能工^[7-10]。

国内外的学者对跌坎式底流消力池进行了大量

收稿日期: 2015-05-07; 修回日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179119); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004)

作者简介: 张慧(1990-), 女, 湖北随州人, 硕士研究生, 主要从事水力学相关研究。

的研究工作,主要对消力池的流态、临底流速、脉动压强、上举力等特性进行了研究,取得了一定的成果。已有的研究成果表明,跌坎消力池在一定程度上可以降低消力池的临底流速和脉动压强,增强消力池底板的稳定性^[11],其中跌坎高度是影响跌坎消力池消能效果的关键因素。跌坎过低,可能起不到降低消力池水力学指标的目的,跌坎过高,可能会在消力池内产生面流流态,大大降低消能效率,还会使水面产生大的波动,冲刷边坡。本文依托某实际工程的消力池模型,研究改变跌坎高度消力池内水流流态、临底流速及脉动压强的变化情况,以期为类似的工程设计提供参考。

1 试验模型及条件

试验依托某水电站工程放空排沙洞水力学模型展开,洞出口通过泄槽与消力池衔接,采用底流消能。消力池底宽 18 m,池长 $L = 90.5$ m,池深 12 m (尾坎至池底板的高差),模型比尺 $L_r = 40$ 。本文在此模型的基础上,分别研究跌坎高度 $D = 0, 2, 4$ m (见图 1)消力池内水流流态、临底流速及脉动压力特性。脉动压力用中国水利水电科学研究院的 64 通道 DJ800 采集系统进行数据采集与分析,临底流速用南京水利科学研究院研制的 LGY - III 型多功能智能流速仪测量。试验工况如表 1。消力池体型及脉动压力测点布置如图 1,脉动压力及临底流速均沿消力池中线测量。

2 流态及临底流速分析

2.1 流态

表 2 给出了不同工况消力池内水流流态。从试验结果来看,来流量较小时,跌坎高度对消力池内的

水流流态影响不大,此时水跃基本发生在陡槽上,消力池内水流平顺,水面平稳。

表 1 试验各工况

上游水位/m	下游水位/m	入池单宽流量 $q / (m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
1725.50	1664.78	14.72
1750.81	1663.51	32.34
1771.41	1665.56	39.03
1820.00	1665.29	51.59

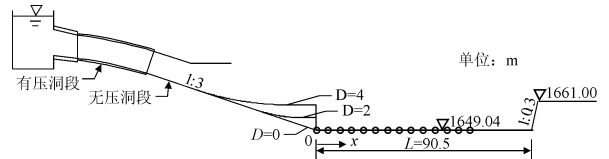


图 1 消力池体型及测点布置示意图

当来流量相对较大时,随着跌坎高度的增加,消力池内流态由底流依次过渡到淹没混合流、淹没面流。无跌坎时,水流经陡槽直接进入消力池底,形成底流流态。加跌坎后,水流经跌坎产生射流进入消力池,跌坎高度较小时 ($D = 2$ m),冲击射流在消力池内可再次潜底,在跌坎下游局部范围内形成顺时针的二元旋滚,消力池内常呈底流及淹没混合流流态,水面比较平顺;跌坎高度较大时,由跌坎挑射的水流在跌坎下游“水垫”的浮托作用下,难以潜底,主流主要分布在消力池水体的中上层,易形成淹没面流流态,水面波动加大,且在来流量较大时,挑射水流落入消力池冲击消力池内的水体,在作用范围内,会对消力池两侧边墙产生较大的冲击压力,特别是对池宽相对消力池水深较小的工况,容易造成边墙破坏,在实际工程中应当注意。

表 2 各工况下消力池内水流流态

坎高 D/m	$q / (m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$	水流流态	水面状态
0	14.72	水跃在泄槽上,消力池内无水跃	稳定
	32.34	底流流态	稳定
	39.03	底流流态	稳定
	51.59	底流流态	较稳定,稍有波动
2	14.72	水跃在泄槽上,消力池内无水跃	稳定
	39.03	淹没混合流态	稍有波动
	51.59	混合流态	水面波动大
4	14.72	水跃在泄槽上,消力池内无水跃	稳定
	32.34	淹没面流	较稳定,稍有波动
	39.03	淹没面流	水面波动大

2.2 临底流速

图2列出了不同跌坎高度下单宽流量与最大临底流速的关系。结果表明,加设跌坎可以显著降低消力池的最大临底流速。在来流量较小时,跌坎高度对临底流速的影响不大,随着来流量增大,跌坎对降低临底流速有着显著的作用, $D=2\text{ m}$ 时,最大临底流速降幅可达44.6%, $D=4\text{ m}$ 时最大临底流速降幅可达55%。

图3列出了两种不同来流条件下不同跌坎高度消力池内临底流速的沿程变化。跌坎的作用使来流产生射流冲击消力池底,会造成消力池底部局部范围内临底流速突增,在射流区以外,消力池内的临底流速逐渐减小。无跌坎时,消力池内临底流速沿程衰减较跌坎消力池临底流速沿程衰减快,这是由于无跌坎时,水跃产生的主流旋滚主要集中在消力池底部,在消力池底板的摩擦作用下,旋滚快速消逝,临底流速迅速衰减;跌坎消力池,由于跌坎的作用,主流以射流的形式进入消力池,旋滚水流多在离池底一定距离的中上部,在射流局部范围流速达到最大,在周围水体的挤压混掺作用下,流速沿程衰减缓慢,这也是易造成消能率低、消能不彻底的主要原因。

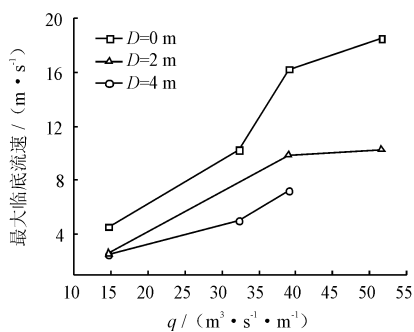


图2 单宽流量与最大临底流速关系

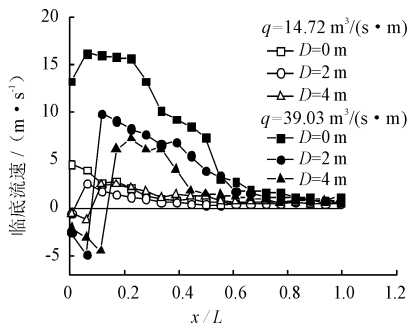


图3 临底流速沿程分布

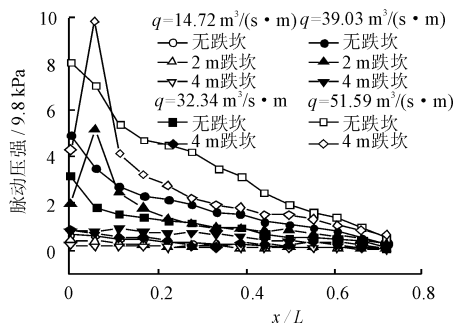


图4 脉动压强沿程分布

由图4可以看出, $D=0$ 时,消力池内脉动压强沿程降低,在入池处脉动压强最大,这是高速水流直接冲击消力池底板的结果,随着来流量不同,脉动压强沿程变化趋势基本一致,都是沿程减小。 $D=2\text{ m}$ 时,脉动压强在跌坎下游某处突然增大后迅速减小,这是经跌坎产生的高速射流冲击消力池底板造成的,在此区域消力池底板流速也迅速增加后迅速减小,且脉动压强的最大值点($x/L=0.06$)与临底流速最大值点($x/L=0.06\sim 0.11$)基本在同一区域;脉动压强迅速衰减,是因为在冲击区域,入射水流与底板及周围水体碰撞摩擦已耗散大量能量,在冲击区下游又与周围水体混掺摩擦,使能量迅速衰减。

尤其是在跌坎高度和来流量均较大的情况下,还容易产生淹没面流流态,在跌坎消力池的设计中应该注意。

从消力池内流速的沿程变化可以看出,来流量较小($q\leq 14.72\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$)时,坎高对消力池临底流速影响不大。来流量较大($q\geq 39.03\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$)时,在相对位置 $x/L=0\sim 0.55$ (x 为测点坐标)范围内跌坎消力池临底流速明显降低;在 $x/L=0.55\sim 0.99$ 区域,各工况消力池临底流速相差不大,且均小于 5 m/s ,表明跌坎对消力池后半段,即 $x/L=0.55\sim 0.99$ 区域的临底流速影响不大,这一方面是由于消力池末端尾坎的作用,使得靠近尾坎水流变缓,消力池临底流速降低,另一方面是水跃产生的大量旋滚在消力池前半段已基本消散。

3 脉动压强特性

3.1 脉动压强分布

高速水流冲击消力池底板产生的脉动压强及其引起的破坏往往是惊人的。脉动压强均方根值 σ 是脉动压强的重要幅值特征,它代表压力脉动的剧烈程度,用 σ 表征脉动压强的大小。

当 $D=4\text{ m}$ 时,由于水流难以潜底,大量的掺气水流在消力池水体的中上层,所以消力池底板的脉动压强均较小,但消力池内呈淹没面流流态,大量的旋滚水流在消力池的中上层,对消力池两侧边墙造成较大压力,且能量难以消散,造成水面波动较大,容易对下游河岸造成冲刷。

图5表明, $D=2\text{ m}$,当单宽流量 $q\leq 39.03\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,消力池底的最大脉动压强与不设跌坎的最大脉动压强基本相当;当 $q=51.59\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,较不设跌坎消力池底的脉动压强反而增加了21.9%。 $D=4\text{ m}$ 虽对降低消力池底的最大脉动压力非常有效,最大降幅可达81.7%,但流

态不好,容易导致效率低,水面波动大等不利影响。理论上, D 值在区间(2,4)范围内有一个最优值,使得消力池内脉动压力较小且流态较好。

3.2 脉动压强空间积分尺度及概率密度

脉动压力空间积分尺度反映了涡旋尺度的大小,决定了两个测点脉动相关的最大距离,对消力池底板板尺寸的选择具有重要意义^[13]。顺水流方向的脉动压力空间积分尺度定义如下: $L_x = \int_0^{l_0} \rho(x, l) dl$,其中 $\rho(x, l)$ 为瞬时空间相关系数, l_0 为第一个使 $\rho(x, l) = 0$ 的 l 值。

图6给出了某典型工况消力池纵向空间积分尺度的沿程分布。结果表明,无跌坎情况下,高速水流由泄槽直接冲击消力池底,大量的掺气旋滚水流潜底,涡旋快速分解,故积分尺度较小;跌坎2 m时,空间积分尺度与无跌坎时消力池底板空间积分尺度相

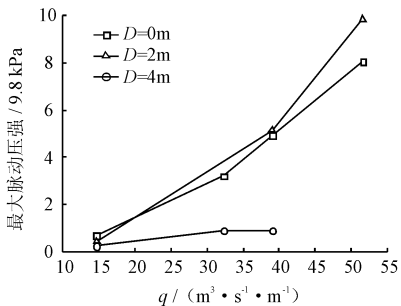


图5 单宽流量与最大脉动压强关系

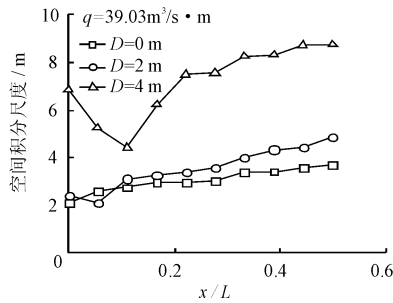


图6 消力池纵向空间积分尺度沿程分布

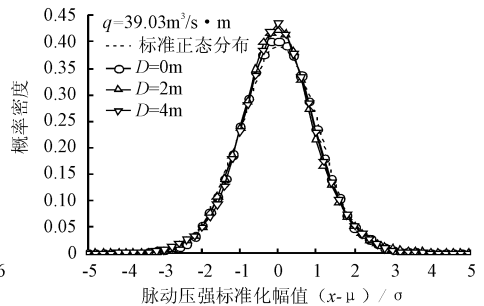


图7 脉动压力概率密度分布

4 结 语

(1)在来流量一定时,随着跌坎高度的增加,消力池内流态会由底流依次过渡到淹没混合流、淹没面流。

(2)加设跌坎可显著降低消力的最大临底流速,跌坎越高,降幅越大,在试验条件下,跌坎消力池可使最大临底流速降幅达55%。加设跌坎,可降低消力池 $x/L = 0 \sim 0.55$ 区域的临底流速,对 $x/L = 0.55 \sim 0.99$ 范围的影响不大,从临底流速的沿程衰减来看,跌坎消力池临底流速衰减较非跌坎消力池慢。

(3)无跌坎时消力池底板脉动压强沿程降低。加设跌坎后,跌坎高度在适当范围内,脉动压力呈先增大后减小的趋势,且脉动压力最大值点与临底流速的最大值点基本在同一区域。跌坎对脉动压强的影响与跌坎高度和来流条件有关,来流量一定时,随跌坎高度的增加,最大脉动压强呈先增大后减小的趋势。来流量一定的情况下,随跌坎高度的增加,脉

差不大,表明2 m跌坎时,水流冲击消力池底板,旋滚水流主要集中在中下层,大量涡旋迅速分解,涡旋尺小,消能效果好;跌坎高度增加到4 m时,空间积分尺度明显增大,这是由于剧烈的旋滚水流在水体的中上层,涡旋不易分解,表现出来的涡旋尺度较大。文献[13]指出防护结构的板块尺寸在允许的条件下相对于脉动压力空间积分尺度应尽可能大或者小,对该工程, $D = 0$ m及2 m板块尺寸可选范围较 $D = 4$ m大。

脉动压力幅值的一个重要特征就是其概率密度分布的正态性。图7给出了某典型工况不同坎高脉动压力最大值点的概率密度分布。由图可知,脉动压力概率密度基本服从正态分布,且随跌坎高度的增加,其概率密度分布有更显瘦高的趋势,这对脉动压力最大振幅估计 K ^[14]的取值有重要意义。

动压力空间积分尺度增大。

在底流消能中,加设跌坎对消能设计并不一定总是有效的。加设跌坎虽然可以降低消力池临底流速,但可能会加大消力池底板的脉动压强,跌坎过高,还容易造成消能不彻底,水面波动大,冲击边墙和下游边坡等不利影响,实际工程中,是否加设跌坎及跌坎高度需要根据消力池的尺寸(宽深高)及上下游水位等确定。

参考文献:

- [1] 孙双科. 我国高坝泄洪消能研究的最新进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 249-255.
- [2] 王丽杰, 杨文俊, 陈辉, 等. 跌坎型底流消能工研究综述[J]. 人民长江, 2013, 44(3): 59-62.
- [3] 陈朝, 王立辉, 王海军. 跌扩型底流消能工消能的试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 145-149.
- [4] 王海军, 张强, 唐涛. 跌坎式底流消能工的消能机理与水力计算[J]. 水利水电技术, 2008, 39(4): 46-48+52.

(2)在实验条件下,对不同的固相粒径,随着底流口直径的变大,底流分流比都呈先减小后增大的趋势,底流产率都呈先增大后减小的趋势,即存在一个既能节水又能有效除沙的最佳底流口直径,其值在 2 mm 附近;

(3)在所选最佳底流口直径下,循环 30 min,能将 90% 以上的符合沙尘样本特征的混合沙粒清除,且所耗水量仅占池中总水量的 1.75%,折算到一个 100 m³/h 的冷却塔,耗水流量仅占冷却塔循环水流量的 0.073%。

本文的实验结果对蒸发冷却设备的节水除沙具有指导意义。但是底流阻塞效应对于底流分流比和底流产率影响的成因很复杂,因此底流口直径和底流分流比及底流产率之间的关联仍需要做更多的理论研究。

参考文献:

[1] 张仁健,王明星,浦一芬,等. 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究, 2000,5(3):259-266.
[2] 王涛,陈广庭,钱正安,等. 中国北方沙尘暴现状及对

策[J]. 中国科学院院刊, 2001(5):343-348.
[3] 万的军,穆桂金,雷加强. 基于绿洲尺度沙尘暴天气降尘的变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2009,23(1):26-30.
[4] 王元文,张少明,方莹. 水力旋流器分离性能实验研究[J]. IM&P 化工矿物与加工, 2005(11):25-28.
[5] 刘培坤,王书礼,王静. 水力旋流器用于污泥脱水的实验研究[J]. 过滤与分离, 2001,11(2):14-15+21.
[6] Oliveira D C, Almeida C A K, Vieira L G M, et al. Influence of Geometric Dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: An experimental and CFD study [J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2009,26(3):575-582.
[7] 林高平,邹宽,章立新,等. 水力旋流器内固液两相分离理论: II 数学模型[C]//. 中国工程热物理学会 2002 多相流学术会议论文集,北京:中国工程热物理学会, 2002,536-542.
[8] 辛舟,龚俊,黄建龙. 旋流分离技术在黄河泥沙分离中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(4):67-69.
[9] 许妍霞. 水力旋流分离过程数值模拟与分析[D]. 上海:华东理工大学, 2012:81.
[10] 梁政,王进全,任连城,等. 固液分离水力旋流器流场理论研究[M]. 石油工业出版社, 2011:75-99.

(上接第 150 页)

- [5] 王立辉. 突扩跌坎型底流消能工水力特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2008.
[6] 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.
[7] 叶菲,缅甸 A II, 等. 萨彦舒申斯克水电站消力池运行经验[J]. 郑文才,译. 水利水电快报, 1995(20):10-15.
[8] 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.
[9] 李双宝,马俊,邓良军. 金安桥水电站表孔泄流及底流消能研究[J]. 水力发电, 2011,37(1):38-41.
[10] 彭文明,胡小红,陈强等. 官地水电站 RCC 大坝泄洪底流消能技术研究与应用[J]. 水力发电, 2013,39(9):23-25+96.
[11] 李树宁,杨敏,董天松等. 跌坎消力池水动力荷载特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2014,33(3):138-142.
[12] 秦翠翠. 跌坎消力池水力特性研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
[13] 练继建,杨敏. 高坝泄流工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
[14] 辜晋德,练继建. 水跃区底部压力脉动的沿程变化规律研究[J]. 水利学报, 2008,38(2):196-200.