

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221603

大扩散角二级消力池对三元水流的调整影响

马腾飞^{a,b}, 葛文生^b, 杨明杰^b

(皖江工学院 a. 港口建设优化与航道治理升级工程研究中心; b. 水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031)

摘要: 针对闸下翼墙每侧扩散角为 12° 时, 中低水位期单级消力池出池流速横向分布不均匀的问题, 基于物理模型试验, 研究了二级消力池布置时出池流速横向分布变化规律。结果表明, 随着下游水位降低, 二级消力池尾坎左右岸处的出池流速呈减小—增大—减小—增大四个阶段变化, 各阶段的起始水位高低和水位区间大小与来流弗劳德数 Fr 密切相关, 来流 Fr 越小, 二级消力池内水跃横向扩散主流的能力越强, 受到第一级消力池两侧回流的干扰越小, 阶段二的水位区间范围越大, 且更适应中低水位; 下游水位越接近阶段二的终止水位, 二级消力池尾坎两端流速越大, 出池流速横向分布越均匀; Fr 相同时, 二级消力池调整水流作用在低水位时更显著, 消能率更大。该成果可供闸下消能设计和闸门运行管理参考。

关键词: 二级消力池; 12° 扩散角; 三元水流; 调整; 横向分布

中图分类号: TV135

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0137-04

1 引言

低水头水闸是平原地区和滨海地区常见的水工建筑物, 现行水闸设计规范规定^[1], 水闸下游翼墙的平均扩散角每侧宜采用 $7^\circ\sim 12^\circ$, 但对于某些下游翼墙扩散角稍大并布置单级消力池的水闸, 中低水位期消力池两侧易产生回流, 挤压主流居中, 出池流速横向分布不均匀不利于防冲。为改善闸下不良流态, 修建二级消力池是一种有效手段^[2,3]。目前关于二级消力池的研究成果较多, 但多集中于工程应用和现象描述, 对出池流速横向分布变化规律的研究则相对较少。对此, 本文通过试验研究不利工况下大扩散角二级消力池对下泄水流的调整作用及左右岸出池流速随来流 Fr 或下游水位改变而产生的变化特点, 并分析了其内在原因, 对完善二级消力池的应用理论具有一定促进意义。

2 模型试验

2.1 模型概况及前期试验简述

本文试验模型通过改造某水闸物理模型得到, 原水闸模型按重力相似准则设计(几何比尺为

40), 水闸共5孔, 每孔宽10.0 m(原型参数, 下同), 堰顶高程为-1.5 m, 闸墩宽1.7 m; 采用单级消力池, 池长20.0 m, 尾坎顶高程-1.5 m, 池深1.5 m; 水闸下游为八字翼墙(每侧扩散角均为 5°) + 圆弧翼墙($R=27.1$ m), 海漫段宽64.0 m; 闸室上下游河床底高程均为-2.0 m; 消力池与闸室顺接, 衔接斜坡坡比为1:4, 消力池起点处桩号0+000, 尾坎处桩号0+020。

为探究下游翼墙扩散角较大时二级消力池(将其第一、二级消力池分别简称为一、二级池)对下泄水流的调整影响作用, 采用泡沫板将原水闸模型的#1、#5闸孔宽度均减小5.0 m, 并将下游八字翼墙每侧扩散角均增大为 12° 。

前期试验针对改造后模型设置二级池的必要性开展了研究, 试验发现, 由于下游翼墙扩散角增大, 在中低水位时, 改造后模型单级消力池两侧出现大范围回流(其影响范围最远可达桩号0+031处), 致使主流居中, 出池流速横向分布较不均匀, 在不考虑改用其他底流消能方式的情况下, 设置二级池是必要的。因此, 前期试验对设置二级消力池进行了体型研究, 确定了与下游水位相适宜的消力池尺寸, 并针对下游河床可能下切造成尾水位降低等问题, 适度增大了二级池长度, 最终确

收稿日期: 2022-08-04, 修回日期: 2022-10-03

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A1279); 安徽省2021年高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2021242); 皖江工学院港口建设优化与航道治理升级工程研究中心开放基金项目(GKHD202001)

作者简介: 马腾飞(1989-), 男, 硕士、讲师, 研究方向为水力学及流体力学, E-mail: 82326242@qq.com

定一级池尾坎横河向宽 55.5 m,其他体型尺寸不变;二级池长 20.0 m,池深 1.0 m,尾坎顶高程为-2.0 m,横河向宽 64.0 m。设置二级池后,出池流速横向分布均匀度提高,在改造后模型内开展试验研究,模型平面布置见图 1。

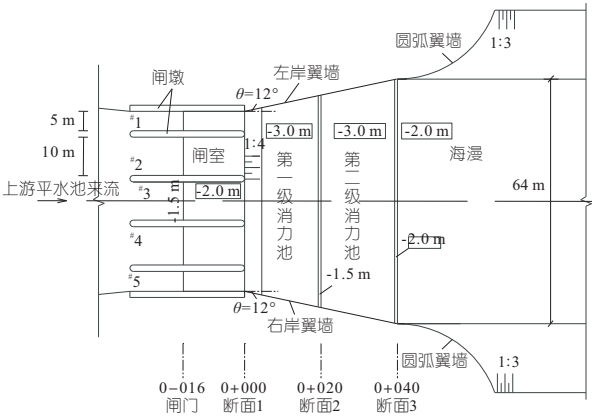


图 1 本试验模型平面布置示意图
(闸室和消力池段,原型参数)

Fig. 1 The plane layout diagram of sluice chamber and stilling basin of the test mode(parameters of prototype)

2.2 量测方法

量测内容主要为流量、水位、流速等,模型流量由实验室供水系统控制监测,该系统由上下游平水池、电磁流量计、调节阀和计算机组成,系统误差经率定可控制在 2% 以内;下游水位采用水位测针量测,精度为 0.1 mm;流速采用光电流速仪量测,由计算机进行数据采集,采样时间为 10 s,采集方向为顺水流方向。

选取一级池上游端断面(桩号 0+000)为断面 1、一级池尾坎处断面(桩号 0+020)为断面 2、二级池尾坎处断面(桩号 0+040)为断面 3。为探究断面 1~3 流速横向分布均匀度变化规律,了解经二级消力池调整后各断面表层和底层流速横向分布离散系数的变化特点,本试验各断面以模型中线为中心对称均匀设置流速测杆,其中断面 1 布设 5 根测杆,断面 2、3 均布设 7 根测杆,每条测线根据水深垂直布置 3~5 个测点。

2.3 试验方案

为研究不利工况下大扩散角二级消力池调整水流作用,选取上游大流量+下游中低水位组合进行试验,对应原型参数,选取 $Q = 408 \text{ m}^3/\text{s}$ (断面 1 单宽流量 $q = 8.68 \text{ m}^2/\text{s}$),并通过改变闸孔开度(各孔开度相同)调节闸孔 Fr_0 ,设计不同试验方案(见表 1)。通过预备试验发现,当下游水位为 1.0 m 时,各方案下一级池内跃首均位于断面 1 下游的斜坡上,断面 1 处的水流较为均匀、稳定,故将该断面的 Fr_1 视为来流 Fr 。试验中还发

表 1 试验方案

Tab. 1 Test plan

| 方 案 | 闸孔 Fr_0 | 断面 1 处 Fr_1 | 上游流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 下游水位/m | 备注 |
|-----|-----------|---------------|---|--------|------------|
| 1 | 2.48 | | 408 | 由高水位 | 为研究二级池出池底 |
| 2 | 1.97 | | 408 | 等速下降 | 层流速变化规律,各 |
| 3 | 1.61 | | 408 | | 测点高程均设置在 |
| 4 | 1.35 | | 408 | | -1.0 m 处不变 |
| 5 | 2.48 | 3.24 | 408 | 1.0 | |
| 6 | 1.97 | 2.82 | 408 | | |
| 7 | 1.61 | 2.62 | 408 | | |
| 8 | 1.35 | 2.37 | 408 | | |
| 9 | 2.48 | 3.24 | 408 | 0.2 | 该水位为外河多年平 |
| 10 | 1.97 | 2.82 | 408 | | 均低水位 |
| 11 | 1.61 | 2.62 | 408 | | |
| 12 | 1.35 | 2.37 | 408 | | |

现,出闸水流的 Fr 越大,相同下游水位时闸室内跃首的位置距消力池越近,越易使池内水流结构发生变化。为研究二级消力池调整水流的完整过程,统一跃首位置,方案 1~4 当闸室内跃首到达距闸门 8 m 位置时开始试验,并等速降低下游水位,当下游水位降至 0 m 时停止试验。

3 试验结果与分析

3.1 下游水位下降过程断面 3 两端出池流速变化规律

由于受两侧回流影响,主流居中,大扩散角二级消力池的出池流速呈中部大两侧小,断面 3(即二级池尾坎处断面)左右岸处的流速大小基本决定了二级池出池流速横向分布的均匀程度,故需探究其变化规律。整理方案 1~4 下游水位下降时断面 3 左岸处底层流速相对流速比 α (测点流速/沿程平均流速)变化过程发现,断面 3 两端出池流速随下游水位的降低呈类“W”形变化(图 2),该过程共分为四个阶段:一级池回流影响阶段(流速减小)、二级池调整影响阶段(流速增大)、主流居中影响阶段(流速减小)、水面跌落影响阶段(流速增大)。

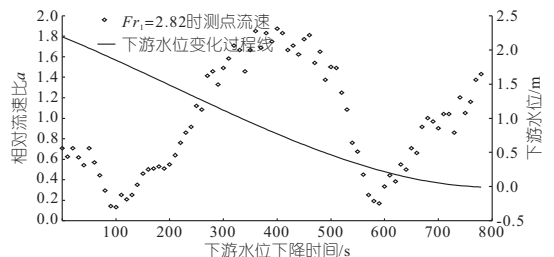


图 2 下游水位下降时断面 3 左岸处底层流速相对流速比变化过程

Fig. 2 Change process of bottom layer relative velocity ratio at left bank of section 3 when downstream water level drops

试验开始后随着水位降低闸室内跃首下移,一级池两侧逐渐产生回流,主流受到挤压渐渐向

中部集中,此时二级池内无明显水跃,断面 3 左右岸处出池流速受到上游回流阻滞影响开始减小(阶段 1);二级池内产生波状水跃后,水流进入二级池逐渐向两侧扩散,此时由于一级池内的回流范围相对较小,未越过一级池尾坎,对二级池扩散水流的干扰程度较小,断面 3 两端流速开始增大(阶段 2);当水位下降到一定程度时,一级池两侧的回流范围及强度较大,已进入二级池内,致使主流过于集中,水流进入二级池后虽能产生弱水跃扩散水流,但受主流惯性增大和两侧大强度回流的影响,二级池内水流扩散受到抑制,断面 3 两端流速再次进入减小趋势(阶段 3);当下游水位已相对较低时,一级池尾坎中部及两侧下游均出现水面跌落,致使二级池内水跃强度和宽度增大,水流横向扩散能力增强,断面 3 两端流速增大(阶段 4),此时由于水位较低,出二级池水流亦产生跌落,主流在平面上呈扇形分布,已不利于下游防冲,实际中应尽可能避免。

通过统计方案 1~4 断面 3 两端出池流速各

表 2 方案 1~4 断面 3 两端出池流速各变化阶段的下游水位区间

Tab. 2 Downstream water level range of each stage of outlet flow velocity on both sides of section 3 in scheme 1-4

| 方案 | 断面 1 处 Fr_1 | 各阶段水位区间/m | | | | 各阶段(起始水位-终止水位)/m | | | |
|----|---------------|-----------|-----------|-----------|--------|------------------|------|------|------|
| | | 阶段 1 | 阶段 2 | 阶段 3 | 阶段 4 | 阶段 1 | 阶段 2 | 阶段 3 | 阶段 4 |
| 1 | 3.24 | 2.59~2.12 | 2.12~1.05 | 1.05~0.48 | 0.48~0 | 0.47 | 1.07 | 0.57 | 0.48 |
| 2 | 2.82 | 2.23~1.93 | 1.93~0.78 | 0.78~0.34 | 0.34~0 | 0.30 | 1.15 | 0.44 | 0.34 |
| 3 | 2.62 | 1.90~1.62 | 1.62~0.46 | 0.46~0.14 | 0.14~0 | 0.28 | 1.16 | 0.32 | 0.14 |
| 4 | 2.37 | 1.67~1.44 | 1.44~0.18 | 0.18~0.10 | 0.10~0 | 0.23 | 1.26 | 0.08 | 0.10 |

3.2 各断面流速横向分布变化

下游为中低水位时是水闸消能防冲的关注重点,方案 5~12 测量了下游水位分别为中水位 1.0 m 和低水位 0.2 m 时断面 1~3 的表层和底层流速横向分布(图 3)。中低水位时,一级池两侧回流范围已相对较大,各方案下泄水流的流速横向分布在断面 1 时较均匀,但进入一级池内受到回流影响,断面 2 的流速横向分布已明显不均,经过二级池调整后,在断面 3 处再次趋于均匀,有利于下游防冲。

为定量分析不同来流 Fr 下断面 1~3 流速横向分布均匀度,统计各断面表层和底层流速数据的离散系数(标准差/平均数,见表 3,离散系数越小,均匀度越大)表明,相同水位下,由于下泄水流的底层流速相对较大,两侧受到回流影响后横向分布更易不均,因此一、二级池尾坎处底层流速的离散系数基本略大于表层流速;来流 Fr 越大,一级池两侧的回流强度越大,主流更为集中,故此时断面 2、3 的表层与底层流速的离散系数越大;但当来流 Fr 较大时,断面 3 在中水位的离散系

变化阶段的下游水位区间发现(表 2),来流 Fr 越大,阶段 1、3 的起始水位越大,水位区间范围越大;来流 Fr 越小,阶段 2 的水位区间范围越大,且更适应中低水位,如 $Fr_1=2.37$ 时,阶段 2 的终止水位为 0.18 m,此时断面 3 两端出池流速已增至相对较大值,二级池出池流速横向分布更加均匀,有利于下游防冲,此外来流 Fr 越小阶段 4 的起始水位越小,出二级池水流产生跌落的几率越小。

断面 3 两端出池流速的增大或减小,与二级池内水跃横向扩散水流能力密切相关,而该能力受一级池两侧回流影响较大。来流 Fr 越大,下泄水流动量越大,进入一级池后越难沿两侧翼墙充分扩散,越易在高水位时即产生回流减弱二级池调整水流的能力,且此不利影响持续的过程越长。来流 Fr 越小,下泄水流对消力池内水垫的冲击力越小,一级池两侧越不易形成大强度回流,对二级池扩散水流的干扰程度越小,因而阶段 2 持续的水位区间越大,进而影响阶段 4 的起始水位越小。

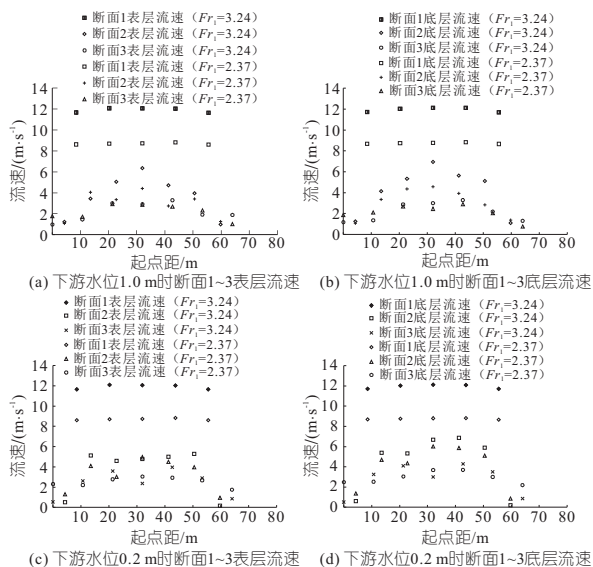


图 3 下游水位 1.0、0.2 m 时断面 1~3 表层和底层流速横向分布

Fig. 3 Horizontal velocity distribution of surface and bottom layers of section 1-3 when the downstream water level is 1.0 m and 0.2 m

数比低水位时小(如 $Fr_1=3.24$ 时,断面 3 表层流速的离散系数由 0.37 增大为 0.50),而当 Fr 较小时则正好相反(如 $Fr_1=2.37$ 时,断面 3 底层流

表 3 各断面流速横向分布离散系数

Tab. 3 Dispersion coefficient of horizontal velocity distribution at each section

| 位置 | 断面 1 下游水 | | 离散系数 | | | 下游水 | | 离散系数 | | |
|----------|----------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|--|
| | 处 Fr_1 | 位/m | 断面 1 | 断面 2 | 断面 3 | 位/m | 断面 1 | 断面 2 | 断面 3 | |
| 表层 流速 | 3.24 | 1.0 | 0.02 | 0.50 | 0.37 | 0.2 | 0.02 | 0.58 | 0.50 | |
| | 2.82 | 1.0 | 0.03 | 0.50 | 0.32 | 0.2 | 0.02 | 0.49 | 0.45 | |
| | 2.62 | 1.0 | 0.01 | 0.46 | 0.29 | 0.2 | 0.01 | 0.48 | 0.18 | |
| | 2.37 | 1.0 | 0.01 | 0.42 | 0.30 | 0.2 | 0.01 | 0.45 | 0.17 | |
| 底层 流速 | 3.24 | 1.0 | 0.02 | 0.49 | 0.38 | 0.2 | 0.02 | 0.59 | 0.50 | |
| | 2.82 | 1.0 | 0.03 | 0.51 | 0.37 | 0.2 | 0.02 | 0.51 | 0.47 | |
| | 2.62 | 1.0 | 0.01 | 0.48 | 0.30 | 0.2 | 0.01 | 0.48 | 0.23 | |
| | 2.37 | 1.0 | 0.01 | 0.42 | 0.31 | 0.2 | 0.01 | 0.48 | 0.18 | |

速的离散系数由 0.31 减小为 0.18)。

当 $Fr_1=3.24$ 、下游水位为 1.0 m 时,断面 3 左右岸处流速虽处于阶段 3(水位区间为 1.05~0.48 m)为减小趋势,但该水位距阶段 2 的终止水位较近,断面 3 两端的出池流速仍相对较大;当水位为 0.2 m 时,断面 3 左右岸处流速虽处于阶段 4 为增大趋势,二级池将主流向两侧扩散,但此水位距阶段 3 的终止水位较近,断面 3 两端的出池流速相对较小,故此时出池流速横向分布更不均匀,离散系数更大。当 $Fr_1=2.37$ 时,水位 1.0、0.2 m 均位于阶段 2 的水位区间(1.44~0.18 m),断面 3 两端的流速为增大趋势,低水位时断面 3 两端的流速更大,出池流速横向分布更为均匀,故离散系数更小。

3.3 一、二级池消能率变化

通过计算断面 1~3 的单位机械能,可知一、二级池在不同水位下的消能率(表 4)。水位相同时,来流 Fr 越大,一级池内水质点相互摩擦碰撞的程度越大,因此消能率越大,传递给下游的能量则越少,所以二级池内的消能率相对较小,此时二级池则起到了十分重要的横向扩散水流作用,使出池水流横向分布更为均匀; Fr 相同时,中低水

表 4 中低水位时一级池和二级池消能率统计

Tab. 4 Statistics of energy dissipation rate of the first and second stage stilling basins at medium and low water levels

| 断面 1 | 下游 | 消能率/% | | | 断面 1 | 下游 | 消能率/% | | |
|------|-----|----------|------|-------|------|-----|----------|-------|-------|
| | | 处 Fr_1 | 水位/m | 合计 | | | 处 Fr_1 | 水位/m | 合计 |
| 3.24 | 1.0 | 54.06 | 5.50 | 59.56 | 3.24 | 0.2 | 52.31 | 10.11 | 62.42 |
| 2.82 | 1.0 | 43.12 | 5.93 | 49.05 | 2.82 | 0.2 | 41.73 | 12.52 | 54.25 |
| 2.62 | 1.0 | 36.46 | 6.02 | 42.48 | 2.62 | 0.2 | 36.66 | 14.15 | 50.81 |
| 2.37 | 1.0 | 27.67 | 7.41 | 35.08 | 2.37 | 0.2 | 28.39 | 16.94 | 45.33 |

位期间下消能过程主要发生在一级池内,一级池的消能率变化较小,而二级池低水位 0.2 m 时的消能率平均为中水位 1.0 m 时的 2.15 倍。低水位时一级池尾坎中部及两侧下游易出现水面跌落,水流进入二级池后产生的水跃强度和宽度更大,二级池在横向和纵向上调整水流的能力更强,因此消能率比中水位时大。

4 结论

大扩散角二级消力池出池流速横向分布均匀度的增减趋势与下游水位所在区间相关,而各区间范围则受来流 Fr 影响。中低水位期,闸下两侧易产生回流,下游防冲压力增大。工程中可根据实际情况,调整闸门开度,适度减小来流 Fr ,增大二级池调整水流作用,在保证消力池一定消能率的基础上,尽可能使出池流速横向分布更均匀。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 水闸设计规范:SL 265-2016[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
 [2] 吴子荣,包中进. 多级消力池水力特性的研究及其应用[J]. 水利水电技术,1998,29(12):17-19.
 [3] 王斌,韩晓维,刘云,等. 滨海水闸闸下冲刷成因及布置优化分析——以欧飞东 2 号闸为例[J]. 中国农村水利水电,2018(4):98-103.

Adjustment of Two-stage Stilling Basin with Large Diffusion Angle on Three-dimensional Flow

MA Teng-fei^{a,b}, GE Wen-sheng^b, YANG Ming-jie^b

(a. Engineering Technology Research Center for Port Construction Optimization and Waterway Regulation Upgrading; b. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Ma'anshan 243031, China)

Abstract: When the diffusion angle of each side of the wing wall in the gate is 12°, the horizontal distribution of outlet velocity of single-stage stilling basin is easy to be uneven in the medium and low water level period. To solve this problem, based on the physical model test, the law of horizontal distribution of outlet velocity of two-stage stilling basin was studied. The results show that with the decrease of downstream water level, the outlet velocity at the left and right banks of the second stage stilling basin changes in four stages: decrease-increase-decrease-increase, and the initial water level and water level range of each stage were closely related to the Fr . The smaller the incoming flow Fr is, the stronger the horizontal diffusion ability of hydraulic jump in the second stage stilling basin is, and it will be less disturbed by the back-flow on both sides of the first stage stilling basin. The range of water level in the second stage will be larger, and it is more suitable for the medium and low water levels. The closer the downstream water level is to the end water level of the second stage, the greater the outlet velocity at both sides of the second stage stilling basin is, and the horizontal distribution of outlet velocity is more uniform. When the incoming flow Fr is the same, the regulating effect of the second stage stilling basin is more significant at low water level, and the energy dissipation rate is greater. The results can be used as a reference for the design of energy dissipation facilities under the gate and the operation management of the gate.

Key words: two-stage stilling basin; twelve degree diffusion angle; three-dimensional flow; adjustment; horizontal distribution