

消力池尾坎坡度对池内波浪特性影响的试验研究

郭川靖, 黄桂兵, 刁明军

(四川大学水力学山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 本文基于波浪理论, 通过水工模型不同尾坎坡度条件下常规式消力池和跌坎式消力池的波浪特性的研究, 结果表明: 消力池平均波高随尾坎坡度的增大而减小, 尾坎坡度对跌坎式消力池波高的影响更大, 但平均周期与尾坎坡度没有呈现出明显的规律; 通过对试验数据的分析, 得到了不同特征波高间的换算关系, 得出了常规式消力池和跌坎式消力池的相对特征波高 $H_{1/100}/h_2$ 的经验计算式; 同时还发现出池波浪特性 σ_w/h_2 与尾坎坡度 i 存在较好的线性关系。

关键词: 消力池; 尾坎坡度; 模型试验; 波浪特性

中图分类号: TV653+.1; TV139.2+5

文献标识码: A

文章编号: 1001-2184(2023)02-0092-06

Experimental Study on Wave Characteristics of Stilling Basin with Different End Slopes

GUO Chuanjing, HUANG Guibing, DIAO Mingjun

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

Abstract: Based on the wave theory, the wave characteristics of the conventional stilling basin and the stilling basin with drop sill under different end slopes are studied in this paper through hydraulic model tests. The results show that the average wave height of stilling basin decreases with the increase of the end slope, and the end slope has a greater impact on the wave height of the stilling basin with drop sill, but there is no obvious rule between the average period and the end slope. The conversion relationship among the different characteristic wave heights and empirical formulas of the relative characteristic wave height $H_{1/100}/h_2$ of the conventional stilling basin and stilling basin with drop sill are obtained by the analysis of test data. In addition, there is a linear relationship between the wave characteristic σ_w/h_2 and the end slope i .

Key words: stilling basin; end slope; model test; wave characteristics

0 引言

底流消能的消力池包括常规式消力池、跌坎式消力池等类型。其中, 跌坎式消力池是在常规式消力池的基础上提出来的, 具有消能率高、临底流速和脉动压强较小等优点。

常规式消力池在应用于山区水电工程时, 常因尾坎坡度过陡导致消力池内泥沙淤积严重, 张春妮^[1]通过模型试验观察发现, 适当减小消力池尾坎坡度有利于砂石等推移质的排出, 但消能率会减小。尾坎坡度的减小虽然解决了消力池泥沙淤积的问题, 但降低了水流的消能率, 加大了池内水面的波动程度。消力池内的波浪特性直接决定了实际工程中边墙高度的设计, 然而, 目前对常规

底流消力池内的波浪特性研究较少, 不能准确地指导实际工程的设计。

跌坎式消力池因跌坎的存在, 池内水体紊动、掺混增强, 其消能率相较于常规式消力池有所提高。王启艳^[2]在模型试验中发现跌坎式消力池在各种运行工况下均能获得较高的消能率。但是, 王海军^[3]在对跌坎式消力池进行系统研究时指出: 当跌坎的深度取较大值时, 消力池内为淹没混合流流态, 主流上方形成上部旋滚, 造成水面波动较大, 边墙设计时应予以考虑, 但是, 目前跌坎式消力池内的波浪特性还没人进行系统研究。

大流量、高坝工程采用以上两种消力池时, 池内都容易出现剧烈的涌浪现象, 如果不对这种现象加以重视, 可能会对整个工程带来难以

收稿日期: 2022-10-17

估量的破坏。例如西津水电站自建成投产以来,下游两岸经常受到波浪冲刷的威胁。学者吴桢祥^[4]在陆浑西村泄水工程的模型试验中发现,跃后波浪的高度可达数米,其长距离的传播必然导致河岸被冲刷破坏,为此,其对跃后波浪的衰减过程、波高、周期以及波谱进行了研究。此外,冬俊瑞^[5]等人通过试验研究了面流消能水面波动的时域和频域特性,并分析了面流消能水面波动形成的原因。吴佩峰^[6]等人结合某实际工程并通过水工模型试验研究了岸流消能在不同流态下平均波高、波长、波速等沿程水面波动特性。

综上所述,当前对于底流消力池的研究忽略了消力池内波浪的特性,本文对不同尾坎坡度下

常规式消力池和跌坎式消力池内波浪的基本特性进行对比分析,并讨论尾坎坡度对出池波浪特性的影响以及特征波高的计算,为实际工程消力池设计提供参考依据。

1 试验设置与数据处理

1.1 试验装置及试验工况

本次模型试验装置是基于某水利工程的泄洪闸进行设计,模型比例为1:70。模型依次由上游库区、闸室、闸墩以及泄洪槽组成,其中闸室单孔宽度为0.10 m,闸墩宽度为0.07 m,堰高 $p=0.12$ m,泄槽以及消力池宽度为0.44 m,消力池长度 $L=0.98$ m,泄洪闸为弧形闸门。模型上游水库边界采用砖混结构,泄洪闸模型整体采用有机玻璃制作。模型实验布置见图1。

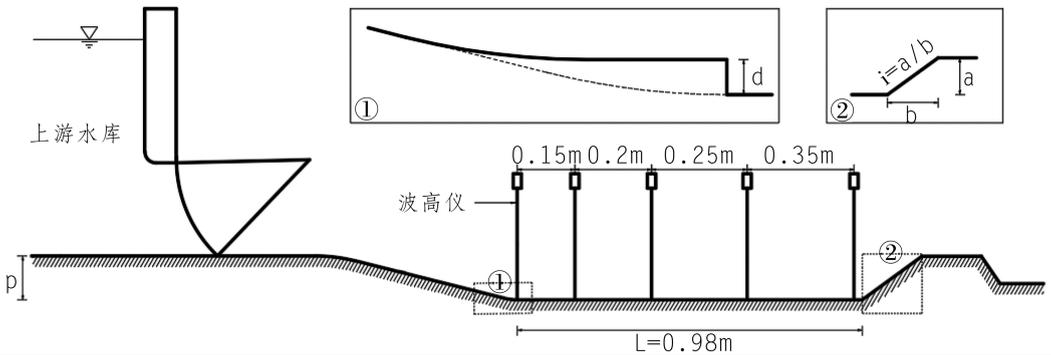


图1 模型实验布置图

为了研究尾坎坡度对常规式消力池以及跌坎式消力池内波浪特性,试验设置了4个尾坎坡度以及两个跌坎高度,本次试验体型详细信息见表1,每个体型分别在48.79 L/s、90.25 L/s、140.

99 L/s三个特征流量条件下进行,本次试验研究共计8个体型,24个工况。消力池内波浪测量采用SDA1000数字波高仪采集系统,试验的采样频率为100 Hz,采样时长为3 min。

表1 试验体型详细信息表

体型	跌坎高度 d / m	尾坎坡度 i	体型	跌坎高度 d / m	尾坎坡度 i
TX ₁	0	1:0.5	TX ₅	0.03	1:0.5
TX ₂	0	1:0.75	TX ₆	0.03	1:0.75
TX ₃	0	1:1	TX ₇	0.03	1:1
TX ₄	0	1:1.2	TX ₈	0.03	1:1.2

1.2 数据处理

本研究中波浪信号进行如下处理:采用五点三次平滑算法进行去噪、多项式最小二乘法消除趋势项,并采用相关函数法对波浪信号进行功率谱分析。

根据波浪理论^[7],特征波高,周期等波浪的基本要素(图2),本文采用下跨零点法来定义波高,

代表波高来计算波高。 H_i 为从大到小排列的波高序列, T_i 为波高 H_i 对应的周期, $H_{1/100}$ 为前 $H_{1/100}$ 波高的平均值, T 为平均周期。同样地, $H_{1/100}$ 为前 $H_{1/3}$ $H_{100/100}$ 波高的平均值, $H_{1/10}$ 为前1/3波高的平均值, $H_{100/100}$ 为平均波高。

2 结果与分析

2.1 尾坎坡度对池内波浪平均波高的影响

波高是消力池边墙设计中需要考虑的重要因

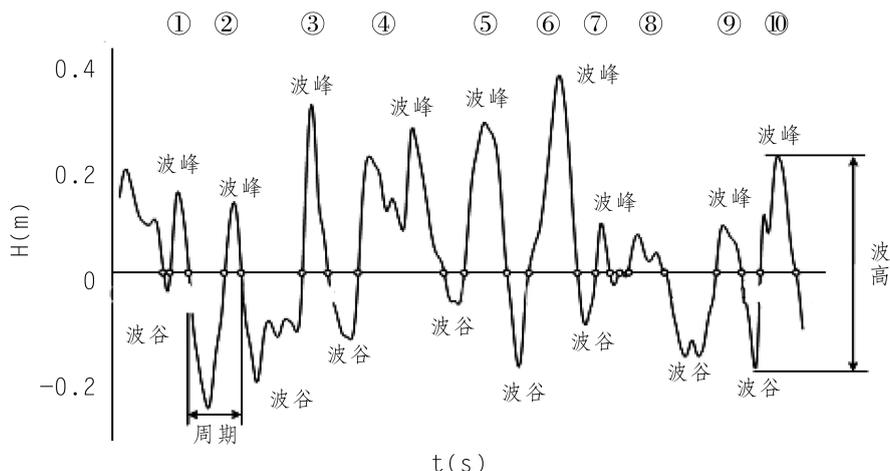


图 2 波浪的基本要素示意图

素。图 3 消力池内平均波高的沿程分布图给出了不同尾坎坡度下相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$ 沿程的变化规律,图中横坐标为相对位置 X/L , x 为波高仪距离消力池起点的距离, L 为消力池长度, h_2 为跃后水深。图 3(a)和图 3(b)给出了消力池内平均波高的沿程分布情况。

从图 3(a)中可以看出,对于常规式消力池 ($d/p = 0$)而言,随着流量的增大,相对平均波高

$H_{100/100}/h_2$ 从沿程减小逐渐变成先增大后减小的趋势,图 3(b)中数据则表明,跌坎式消力池中相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$ 的沿程变化规律不受流量的影响。在不同流量下,相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$ 均表现为沿程减小的变化趋势。这说明常规式消力池 ($d/p = 0$)内 $H_{100/100}/h_2$ 的变化规律相较于跌坎式消力池 ($d/p = 0.25$)而言,其对于流量变化更加敏感。

- $i-1:0.5 \quad q=48.79L/s$
- $i-1:0.75 \quad q=48.79L/s$
- $i-1:1.1 \quad q=48.79L/s$
- $i-1:1.2 \quad q=48.79L/s$
- $i-1:0.5 \quad q=90.25L/s$
- $i-1:0.75 \quad q=90.25L/s$
- $i-1:1.1 \quad q=90.25L/s$
- $i-1:1.2 \quad q=90.25L/s$
- $i-1:0.5 \quad q=140.99L/s$
- $i-1:0.75 \quad q=140.99L/s$
- $i-1:1.1 \quad q=140.99L/s$
- $i-1:1.2 \quad q=140.99L/s$

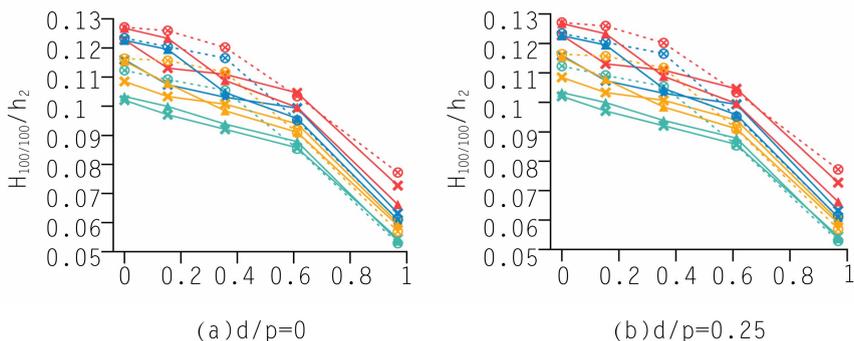


图 3 消力池内平均波高的沿程分布图

图中数据表明流量相同时,随着尾坎坡度 i 的增大,相同断面位置的 $H_{100/100}/h_2$ 呈现出减小的趋势。表 2 计算并统计了不同流量下相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$ 相对于尾坎坡度为 1 : 1.2 的沿程最大降低幅度,表中数据还表明,无论是常规式消力池,还是跌坎式消力池,尾坎坡度对于降低相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$ 的效果都比较显著。同时通过数据对比还可以发现,尾坎坡度对于降

低跌坎式消力池相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$ 的效果比常规式消力池更加明显。

2.2 尾坎坡度对池内波浪平均周期的影响

波浪的平均周期 T 是测量时间与测量时间内波浪数量的比值,通常被用来反映波动的平均快慢程度。图 4(a)和图 4(b)为常规式消力池和跌坎式消力池波浪平均周期的沿程分布规律。从图中可以得出:

表2 不同流量下相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$ 相对于尾坎坡度为 1:1.2 的沿程最大降幅

d/p = 0				d/p = 0.25			
流量 /L·s ⁻¹	i = 1:0.5 /%	i = 1:0.75 /%	i = 1:1 /%	流量 /L·s ⁻¹	i = 1:0.5 /%	i = 1:0.75 /%	i = 1:1 /%
48.79	17.27	11.93	6.28	48.79	18.99	12.59	7.90
90.25	18.97	13.23	5.81	90.25	31.43	26.16	20.91
140.99	18.78	13.16	5.51	140.99	25.08	17.74	13.06

(1)在不同的尾坎坡度,波浪的平均周期均呈现出沿程先增大后减小的变化趋势。

(2)随着流量的增大,波浪的平均周期也逐渐增大,分析其原因,主要是因为流量增大后,尾坎对于消能效果的影响越来越低。

(3)波浪的平均周期与尾坎坡度之间虽未呈现出明显的规律,但尾坎坡度对平均周期存在一定影响,跌坎式消力池(d/p = 0.25)内平均周期

的变化规律相较于常规式消力池(d/p = 0)更加敏感。

(4)常规式消力池(d/p = 0)的波浪平均周期最大的位置在 $x/L = 0.36 \sim 0.61$,平均周期在 $0.42 \sim 0.60$ s 范围内;由于跌坎的存在,跌坎式消力池(d/p = 0.25)的波浪平均周期最大的位置后移,出现在 $x/L = 0.61$,平均周期在 $0.41 \sim 0.64$ s 范围内。

— i-1:0.5 $Q=48.79$ L/s — i-1:0.75 $Q=48.79$ L/s — i-1:1.1 $Q=48.79$ L/s — i-1:1.2 $Q=48.79$ L/s
 — i-1:0.5 $Q=90.25$ L/s — i-1:0.75 $Q=90.25$ L/s — i-1:1.1 $Q=90.25$ L/s — i-1:1.2 $Q=90.25$ L/s
 — i-1:0.5 $Q=140.99$ L/s — i-1:0.75 $Q=140.99$ L/s — i-1:1.1 $Q=140.99$ L/s — i-1:1.2 $Q=140.99$ L/s

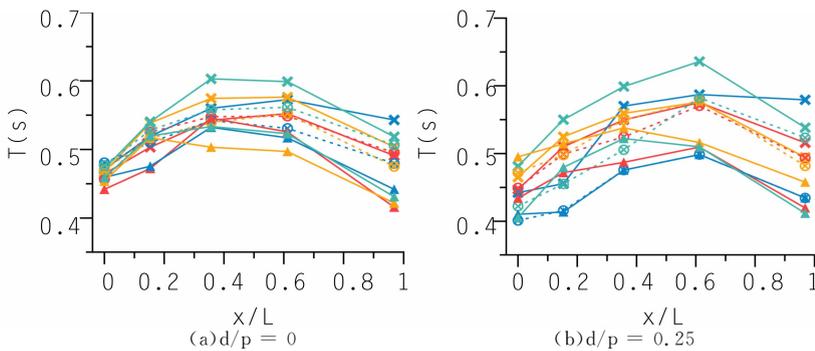


图4 为常规式消力池和跌坎式消力池波浪平均周期的沿程分布

2.3 尾坎坡度对出池波浪特性的影响

实际工程中,出池未知的波浪特性也是关注的重点,这直接关系到出池水流是否能与下游河道水流衔接良好,造成下游河道冲刷等问题。波浪的标准差可以作为衡量波浪离散程度的指标,在本次研究中,将 $x/L = 0.97$ 位置处的波浪数据作为出池波浪数据,并且对其标准差进行无量纲化。用 σ_w/h_2 (h_2 为跃后水深)来表示出池波浪特性 σ_w/h_2 。图5为尾坎坡度对出池波浪特性 σ_w/h_2 的影响,从图中可以看出,无论是常规消力池(d/p = 0)还是跌坎式消力池(d/p = 0.25),出池波浪特性 σ_w/h_2 均随着尾坎坡度的增加而减小,这主要是尾坎坡度的增大使消力池内水体的紊动加剧而导致消能效果增强。从图中还可以看出,常规消力池(d/p = 0)中,随着流量的增

大,相同尾坎坡度下的出池波浪特性 σ_w/h_2 在减小,但在跌坎式消力池(d/p = 0.25)中,相同尾坎坡度下的出池波浪特性 σ_w/h_2 随着流量的增大却出现了不一致的现象,分析原因,这主要是跌坎的设置使消力池内入池主流与周围水体的相互掺混作用增强,水体消能效果更好。同时,对数据进行回归分析后发现,在不同流量情况下,出池波浪特性 σ_w/h_2 与尾坎坡度之间存在较好的线性关系,相关系数均大于 0.90。

2.4 不同尾坎坡度特征波高的计算

在实际工程设计中,常常需要根据工程等级,将各种特征波高的值作为设计标准。通过对常规消力池和跌坎式消力池 24 组试验数据进行统计和用最小二乘法拟合,得到两种消力池的特征波高 $H_{1/100}$ 、 $H_{1/10}$ 、 $H_{1/3}$ 与 $H_{100/100}$ 之间存在以下换

算关系:

$$H_{1/100} = 2.3677 H_{100/100} \quad (1)$$

$$H_{1/10} = 2.2759 H_{100/100} \quad (2)$$

$$H_{1/3} = 2.2203 H_{100/100} \quad (3)$$

图 6 为各特征波高间的换算关系, 3 条拟合曲线的相关系数 R^2 分别为 0.9109、0.9405、0.9539, 拟合精度较高。

常规消力池和跌坎式消力池内的特征波高与

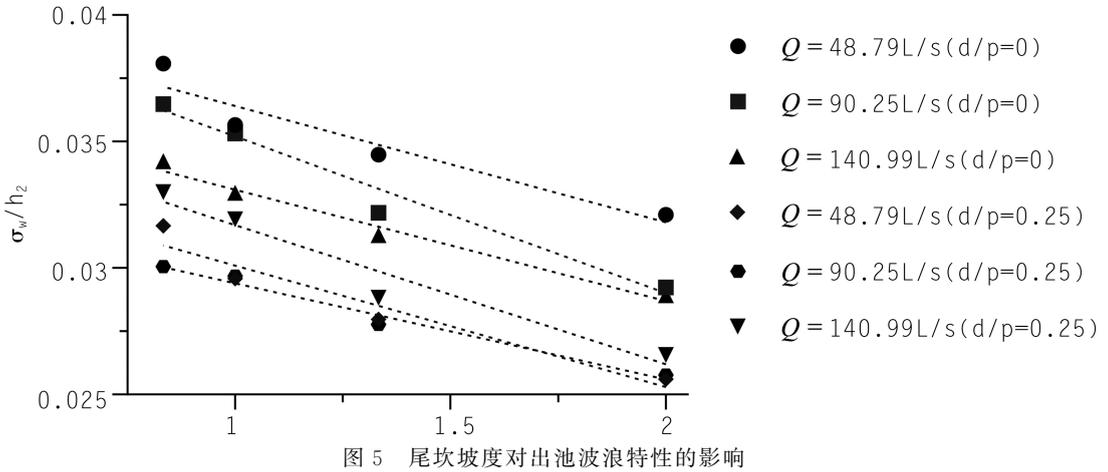


图 5 尾坎坡度对出池波浪特性的影响

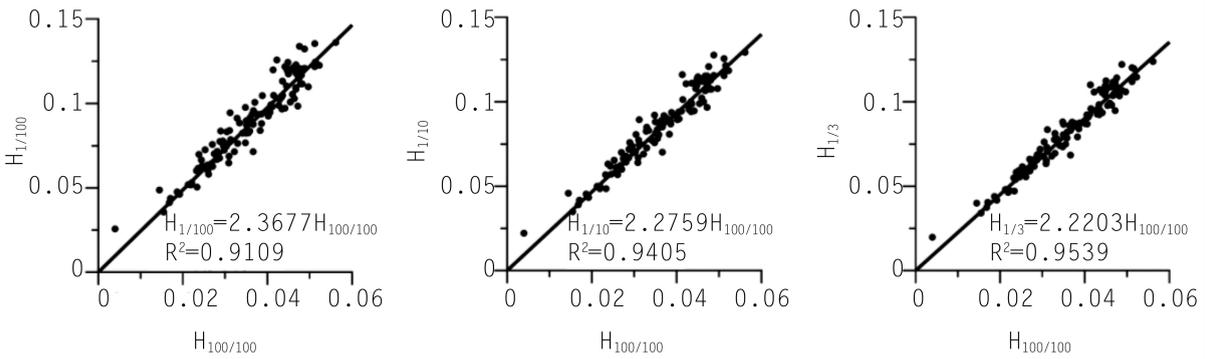


图 6 特征波高间的换算关系

消力池跃前弗劳德数 Fr_1 、跌坎高度 d 、跃前水深 h_1 、跃后水深 h_2 、尾坎坡度 i 、重力加速度 g 和水的密度 ρ 有关。这里以计算波高为例, $H_{1/100}$ 波高可写成一般函数表达式:

$$H_{1/100} = f(Fr_1, h_1, h_2, i, \rho, g, d) \quad (4)$$

对常规式消力池 ($d/p = 0$) 和跌坎式消力池 ($d/p = 0.25$) 分别进行讨论, 选择 h_2 、 g 和 ρ 三个物理量作为基本物理量, 根据 π 定理得到:

$$\frac{H_{1/100}}{h_2} = f\left(i, \frac{h_1}{h_2}, Fr_1\right) \quad (5)$$

式中 $Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}$ 。对数据进行回归分析后, 得到

常规式消力池和跌坎式消力池相对波高 $\left(\frac{H_{1/100}}{h_2}\right)$

的经验计算式为:

常规消力池 ($d/p = 0$)

$$\frac{H_{1/100}}{h_2} = -0.583 1i^{0.8} (Fr_1) - 1.1 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^2 + 0.353 \quad (6)$$

st. $\begin{cases} 1.96 \leq Fr_1 \leq 3.72 \\ 0.83 \leq i \leq 2.00 \end{cases}$

跌坎式消力池 ($d/p = 0.25$)

$$\frac{H_{1/100}}{h_2} = 0.308 5i^{-0.336} (Fr_1) - 0.306 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{-0.230} \quad (7)$$

st. $\begin{cases} 1.96 \leq Fr_1 \leq 4.26 \\ 0.83 \leq i \leq 2.00 \end{cases}$

图 7(a) 为常规式消力池 ($d/p = 0$) 试验数据拟合曲线, 根据统计学误差分析指标的计算结果, 该经验计算式的预测值与试验值得相关系数为 $R^2 = 0.870$, 平均绝对百分比误差 $MAPE = 2.02\%$, 图 7(b) 为跌坎式消力池 ($d/p = 0.25$) 试验数据拟合曲线, 相关系数为 $R^2 = 0.904$, $MAPE = 2.73\%$, 精度较高。

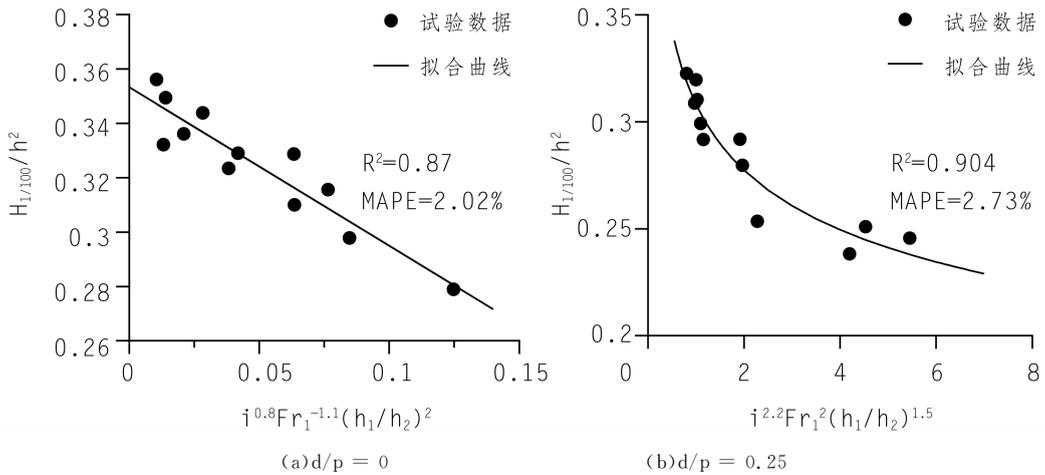


图7 试验数据拟合曲线

3 结论

本文通过模型试验对不同尾坎坡度下常规式消力池和跌坎式消力池内波浪的基本特性进行研究,并讨论了消力池尾坎坡度对波浪特性的影响以及特征波高的计算,得出如下结论:

(1)无论是常规式消力池,还是跌坎式消力池,增大尾坎坡度均可降低相对平均波高 $H_{100/100}/h_2$,但对于跌坎式消力池的效果更加明显;波浪的平均周期与尾坎坡度之间未呈现出明显的规律,但跌坎式消力池($d/p = 0.25$)内平均周期的变化规律相较于常规式消力池($d/p = 0$)更加敏感。

(2)通过对试验数据的统计计算得到了不同特征波高之间的换算关系,并根据 π 定理以及回归分析,得出了常规式消力池和跌坎式消力池的相对特征波高 $H_{1/100}/h_2$ 的经验计算式。

(3)常规式消力池和跌坎式消力池出池波浪特性 σ_w/h_2 与尾坎坡度 i 存在较好的线性关系。

参考文献:

- [1] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 高等教育出版社,2008.
- [2] 张春妮,田忠,王韦. 消力池尾坎坡度对水跃及排砂效果影响的试验研究[J]. 水力发电,2016,42(1): 107-110.
- [3] 王启艳,田忠. 跌坎底流消力池在某高水头闸坝工程中的应用[J]. 水电能源科学,2017,35(4): 145-148.
- [4] 王海军,梅伟,张强. 跌坎式底流消能工坎后横轴漩涡水力特性研究[J]. 水利水电技术,2008,(5): 23-25.
- [5] 吴桢祥. 水跃后波浪特性的试验研究[J]. 郑州工学院学报,1991,(4): 1-8.
- [6] 冬俊瑞,赖翼峰. 面流消能水面波动特性的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),1994,(2): 63-69.
- [7] 吴佩峰,韩晓维,徐岗,等. 厚流消能沿程水面波动特性研究[J]. 人民长江,2018,49(16): 112-117.
- [8] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连理工大学出版社,1999.

作者简介:

郭川靖(1999-),女,山西忻州人,硕士,主要从事水力学及河流动力学研究;

黄桂兵(1995-),男,贵州遵义人,硕士,主要从事工程水力学方面的研究;

刁明军(1968-),男,四川简阳人,博士生导师,主要从事水力学及河流动力学研究. (责任编辑:卓政昌)

白鹤滩水电站全部机组获得发电业务许可

日前,云南能源监管办审查通过白鹤滩水电站9号机组发电业务许可申请事项。至此,白鹤滩水电站16台机组全部取得发电业务许可。

2021年以来,云南能源监管办主动靠前做好电力业务许可服务工作,促进能源绿色低碳转型,助力实现碳达峰、碳中和目标。

一是结合“我为群众办实事”活动,深入一线开展许可服务专题调研,为电站办理许可开辟“绿色通道”,实时指导白鹤滩水电站完善申报材料,辅导相关人员提交许可申请材料。二是认真落实“证照分离”和“放管服”改革要求,全面推行告知承诺制,按规定为白鹤滩水电站等“大国重器”办理许可简化流程、压减时限。三是紧盯投产关键时间节点,靠前对接电厂分批次办理电力业务许可,确保相关发电机组及时持证运营。

(摘自《国家能源局资质和信用工作微平台》)