

c 型折坡水跃特性的试验研究

王 苗¹, 李 琳¹, 雷策鸿¹, 王银龙¹, 葛旭峰²

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710000)

摘 要: 水跃消能是水利工程中经常用到的消能形式, 国内外许多学者对水跃进行了大量的研究。在工程实践中发现, c 型折坡水跃的水力特征值与规范方法计算得到的值有较大差异。文章针对 c 型折坡水跃特性进行了试验研究, 并结合量纲分析和数值分析方法, 得出以斜坡段坡角 θ 为参数的 c 型折坡水跃跃后水深、水跃长度的计算公式, 并利用水槽试验数据和实际工程水工模型试验对公式进行了验证。结果表明: 所得公式的计算误差不超过 $\pm 12\%$, 可供工程设计计算参考。

关键词: c 型折坡水跃; 水跃长度; 跃后水深; 量纲分析

中图分类号: TV131.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)04-0065-04

Experiment on the characteristics of hydraulic jump with c - type fold slope

WANG Miao¹, LI Lin¹, LEI Cehong¹, WANG Yinlong¹, GE Xufeng²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Shaanxi Province Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute, Xi'an 710000, China)

Abstract: Hydraulic jump energy dissipation is a form of energy dissipation frequently used in hydraulic engineering. Many scholars at home and abroad did a lot of research on hydraulic jump. In engineering practice people found that hydraulic characteristic values of c-type fold slope hydraulic jump and the standard method for calculating the value has a bigger difference. Aiming at the characteristics of hydraulic jump with c-type fold slope the experiment was carried out, and combined with the dimensional analysis and numerical analysis method, obtained the calculation formula for the water depth after c-type fold hydraulic jump and hydraulic jump length under the slope angle as the parameter, and using flume test data and practical engineering hydraulic model test was verified. The results showed that the calculation error of the formula less than $\pm 12\%$, therefore. It can provided some reference for engineering design.

Key words: hydraulic jump with c-type fold slope; hydraulic jump length; water depth after jump; dimensional analysis

1 研究背景

中小型闸、坝工程下游常采用上斜下平的底流消力池。如溢洪道下游泄水陡坡段与消力池的衔接组成了上斜下平的底流式消力池(见图1)。Leutheusser 和 Schiller^[1]根据 Rajaratnam^[2]和 Ead^[3]对水跃的归类方式, 按照消力池中水跃发生位置, 将水跃分成三种形式: 水跃首尾均在顺坡段(常见于陡槽)的纯斜坡水跃称为 a 型水跃; 跃首在顺坡段, 跃尾在变坡点垂直断面的水跃称为 b 型临界斜坡水

跃; 水跃位于两段不同底坡, 即跃首发生在顺坡段, 跃尾发生在平坡段, 这一类水跃称为 c 型折坡水跃(见图1)。关于 c 型折坡水跃跃长和共轭水深的计算迄今尚无水力计算公式。普雷德由 100 组试验得出一组经验曲线, 通过查图计算斜坡段水平跃长和第二共轭水深, 但图中无法区分 c 型折坡水跃和 b 型临界斜坡水跃的转捩点; 工程设计人员按照规范^[5-6]提供的计算公式 $L_j = 6.9(h_2 - h_1)$ 计算 c 型折坡水跃跃长, 但试验发现, 按照此式计算出的跃长来设计消力池池长时, 池长明显不足^[8-10]。

收稿日期: 2012-03-28; 修回日期: 2012-05-24

基金项目: 新疆农业大学紧缺人才专业大学生创新项目资助

作者简介: 王 苗(1988-), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 从事水工水力学研究。

通讯作者: 李 琳(1979-), 女, 山东青岛人, 副教授, 博士, 从事水力学及河流动力学研究。

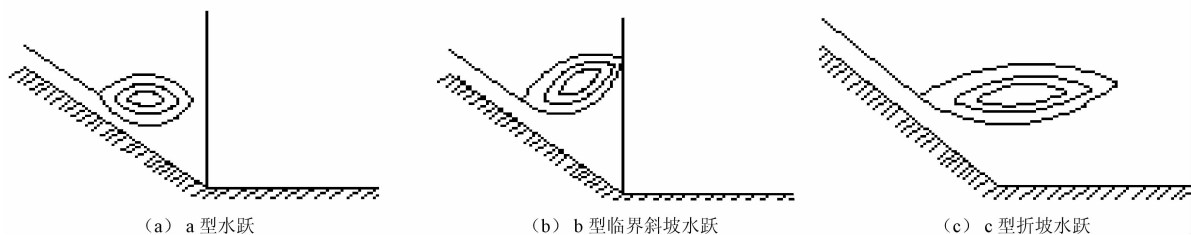


图1 折坡消力池水跃示意图

鉴于目前人们对于c型折坡水跃的研究现状,本文对c型折坡水跃进行了相关的试验研究,并结合量纲分析原理和数值分析方法得出了斜坡段坡角 θ 在 $5.74^\circ \sim 17.46^\circ$ 条件下c型折坡水跃长度和共轭水深的计算公式,为工程设计提供参考。

2 量纲分析

通过对试验现象的研究,提出影响c型折坡水跃长度 L_j 的主要因素为:单宽流量 q 、跃前水深 h_1 、跃后水深 h_2 、重力加速度 g 、陡坡与消力池水平底板的角度 θ 、水跃在陡坡上的斜长 L_1 、跃前的断面总水头 H_1 。用函数关系式(1)来表达各个因素与水跃长度 L_j 之间的关系:

$$L_j = f(q, h_1, h_2, g, \theta, \frac{H_1}{L_1}) \quad (1)$$

式中:共有7个物理量,其中自变量数6个,今选择 h_1, q 为基本物理量,根据量纲和谐原理,式(1)可以用6个无量纲数组成的关系式来表达:

$$\frac{L_j}{h_1} = f\left(\frac{h_2}{h_1}, \frac{g}{q^2 h_1^{-5}}, \theta, \frac{H_1}{L_1}\right) \quad (2)$$

将式(2)改写成:

$$\frac{L_j}{h_1} = f\left(\eta, Fr_1, \theta, \frac{H_1}{L_1}\right) \quad (3)$$

其中影响共轭水深比 η 可由下式表示:

$$\eta = f'(Fr_1, \theta, \frac{L_1}{H_1}) \quad (4)$$

又已知 $\eta_* = 1/2(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$,那么式(4)可写成:

$$\frac{\eta}{\eta_*} = f'(\theta, \frac{L_1}{H_1}) \quad (5)$$

将式(5)代入(3),可得出水跃长度 L_j 的函数关系式:

$$\frac{L_j}{h_1} = f\left(\frac{\eta}{\eta_*}\right) \quad (6)$$

为推求出c型折坡水跃长度计算式,需通过试验研究 η 的表达式,并在此基础上确定式(6)中水

跃长度 L_j 。

3 试验方案及结果分析

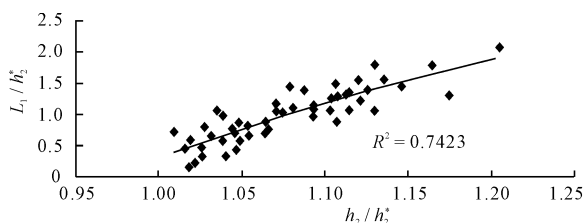
3.1 试验方案

本试验在新疆农业大学水利与土木工程学院水工实验室的玻璃水槽内进行。水槽宽0.4 m、高0.5 m、长20 m,槽首设有进水阀和静水池,静水池中设有消能栅板,用于稳定水流。试验主要对斜坡段坡角 θ 为 5.74° 、 8.63° 、 11.54° 、 14.48° 和 17.46° 5种情况下,通过调节水槽末端尾门开启度,使水槽内形成c型折坡水跃。并以水跃旋滚末端的流速分界点作为跃后位置,量测各斜坡段坡角情况下的水跃长度,跃前位置、跃后水深和断面流速等。

3.2 结果分析

考虑影响因素对c型折坡水跃的影响,针对五种角度下的斜坡段坡角,改变流量大小,选取不同的组合方式对试验数据进行分析,研究出 θ 、 $\frac{L_1}{H_1}$ 与 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 的关系,进而提出c型折坡水跃长度 L_j 与 η/η_* 的关系式。5种坡角条件试验单宽流量范围 $0.033 \sim 0.044 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.2.1 共轭水深比 η 通过试验观测,并对试验数据进行分析建立 η/η_* 和 L_1/H_1 的关系,首先建立了坡角 θ 与 L_1 的关系式。将5种角度的试验数据绘于图2。 h_2^* 为临界水跃的跃后水深, h_2 为陡坡后水跃的跃后水深, L_1 为水跃在陡坡上的斜长。由图2可以看出,在5种角度条件下, L_1/h_2^* 与 h_2/h_2^* 的趋势是一致的,随着 h_2/h_2^* 的增大, L_1/h_2^* 呈递增趋势。

图2 $\frac{h_2}{h_2^*}$ 和 $\frac{L_1}{h_2^*}$ 关系图

对于上述的 5 种不同斜坡段坡角测得的试验数据对 $\frac{h_2}{h_2^*}$ 与 $\frac{L_1}{h_2^*}$ 分别进行曲线拟合,可得如下的经验公式:

$$\frac{L_1}{h_2^*} = 8.6716 \ln \frac{h_1}{h_2^*} + 0.341$$

(7)

下面建立 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 和 $\frac{L_1}{H_1}$ 之间的关系,以 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 为竖向坐标, $\frac{L_1}{H_1}$ 为横向坐标,将 5 种坡角下测得实验数据绘制成图 3。由图可见, $\frac{\eta}{\eta_*}$ 随着 $\frac{L_1}{H_1}$ 的增加而上升。

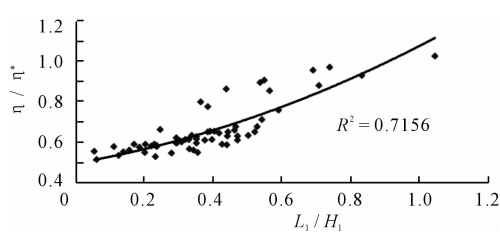


图 3 $\frac{L_1}{H_1}$ 与 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 关系图

将 5 种不同坡角在多种组合下的实测数据对 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 与 $\frac{L_1}{H_1}$ 进行曲线拟合,所得关系如下:

$$\frac{\eta}{\eta_*} = 0.287 \left(\frac{L_1}{H_1} \right)^2 + 0.2922 \frac{L_1}{H_1} + 0.4957$$

(8)

式中: $\eta_* = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$, $H_1 = h_1 +$

$$\frac{q^2}{2gd^2 \cos^2 \theta} + L_1 \sin \theta, L_1 = (8.6716 \ln \frac{h_2}{h_2^*} + 0.341) h_2^*.$$

对式(8) 进行整理后,可得跃后水深 h_2 的计算公式:

$$h_2 = (0.287 \left(\frac{L_1}{H_1} \right)^2 + 0.2922 \frac{L_1}{H_1} + 0.4957) \eta_* h_1$$

(9)

3.2.2 水跃跃长 L_j 式(8) 得出了相对共轭水深比 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 在五种斜坡段坡角条件下与 $\frac{L_1}{H_1}$ 的关系,对式(6) 进行转化,即式(6) 可写成:

$$\frac{L_j}{H_1} = f\left(\frac{\eta}{\eta_*}\right)$$

(10)

进而通过试验数据建立 $\frac{L_j}{H_1}$ 与 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 在不同坡角条件下的关系式。以 $\frac{L_j}{H_1}$ 为竖向坐标, $\frac{\eta}{\eta_*}$ 为横向坐标作如图 4,由

图可看出相对水跃长度 $\frac{L_j}{H_1}$ 随着 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 的增大而增大。

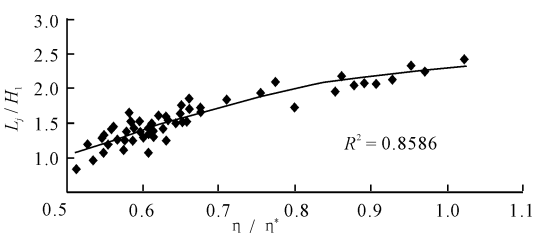


图 4 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 与 $\frac{L_j}{H_1}$ 关系图

对 $\frac{L_j}{H_1}$ 同 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 的关系进行曲线拟合,得到:

$$\frac{L_j}{H_1} = -3.4232 \left(\frac{\eta}{\eta_*} \right)^2 + 7.6402 \frac{\eta}{\eta_*} - 1.9524$$

(11)

式中: $H_1 = h_1 + \frac{q^2}{2gd^2 \cos^2 \theta} + L_1 \sin \theta$ 。

公式(11) 中的相对共轭水深比 $\frac{\eta}{\eta_*}$ 可由式(8) 得出,在式(8) 中 L_1 和 H_1 则随斜坡段坡角 θ 有一定函数关系。

式(8)、(11) 适用于斜坡段坡角 $\theta = 5.74^\circ \sim 17.46^\circ$,弗如德数 $Fr_1 = 1.0 \sim 6.0$ 的 c 型折坡后接消力池。

4 公式检验

将部分实验数据代入公式(11) 计算的水跃长度值与水槽试验值进行比较,通过公式(8) 求共轭水深比 η 的同时,将跃后水深 h_2 即公式(9) 计算值,将其与试验值进行了比较。选取部分水槽试验资料,其试验结果列于表 1 中。

从表 1 中可以看出,跃后水深,水跃长度计算值与实测值整体吻合性较好,从相对误差值可以看出,所得公式的计算误差不超过 $\pm 12\%$ 。

表 1 实验结果与经验公式计算结果对比 m³/s, m, %

角度	流量 q	新公式	跃长	公式	跃后	跃长 误差	跃后
		跃长计 算值	实测 值	跃后 水深	实测 水深		水深 误差
5.74°	0.032	0.36	0.337	0.091	0.088	-6.82	-3.41
	0.04	0.401	0.361	0.1	0.095	-11.08	-5.26
	0.043	0.371	0.365	0.101	0.103	-1.64	1.94
	0.044	0.382	0.351	0.104	0.103	-8.83	-0.97
8.63°	0.031	0.309	0.316	0.076	0.083	2.22	8.32
	0.038	0.297	0.316	0.081	0.090	5.88	10.50
	0.039	0.307	0.345	0.086	0.094	11.04	8.48
	0.041	0.312	0.350	0.081	0.091	10.95	11.06

续表 1

角度	流量 q	新公式 跃长计 算值	跃长 实测 值	公式 跃后 水深	跃后 实测 水深	跃长 误差	跃后 水深 误差
11.54°	0.034	0.362	0.329	0.094	0.086	-10.04	-9.28
	0.035	0.366	0.361	0.096	0.089	-1.36	-7.26
	0.04	0.384	0.358	0.102	0.096	-7.32	-5.79
	0.043	0.391	0.354	0.107	0.097	-10.39	-9.67
14.48°	0.036	0.381	0.388	0.097	0.093	1.76	-4.46
	0.039	0.377	0.365	0.098	0.097	-3.36	-2.04
	0.041	0.376	0.401	0.101	0.101	6.24	-0.17
	0.042	0.381	0.405	0.102	0.098	5.92	-4.12
17.46°	0.033	0.405	0.385	0.094	0.092	-5.20	-2.09
	0.036	0.388	0.400	0.098	0.098	2.92	0.26
	0.039	0.384	0.387	0.099	0.098	0.80	-0.79
	0.044	0.413	0.397	0.108	0.106	-4.00	-2.14

5 结 语

利用量纲分析对影响 c 型折坡水跃长度的因素进行了推导,并结合模型试验推导出坡角 5.74°~17.46° 间水跃的共轭水深比 η 、水跃长度 L_j 计算公式(8)、(11),并利用水槽试验数据和实际工程水工模型试验对其公式进行了验证。验证结果表明公式(8)和公式(11)的计算误差不超过 $\pm 12\%$,可供计算参考。

(上接第 64 页)

要通过自身较强的蒸腾作用影响蒸发和径流,随着阔叶林逐步取代草和灌木,流域蒸发明显增加而径流明显减小。

流域植被从草到灌木最后到森林的演替过程中,蒸腾和冠层截留蒸发增加而土壤蒸发减小。对于长江流域,在海拔高气温低的地区,由于森林蒸腾与草和灌木差异小,当蒸腾和冠层截留蒸发增加之和小于土壤蒸发的减小量,森林增加了径流量。但随着地势下降气温增加,森林增加蒸发的作用增强(蒸腾增加),当蒸腾和冠层截留蒸发增加之和与土壤蒸发的减小量相当,森林对径流量没有明显影响。随着地势进一步下降和气温进一步增加,森林与草和灌木蒸腾差异进一步增大,蒸腾和冠层截留蒸发两者增加之和大于土壤蒸发的减小量,森林减小了径流量。气候是决定森林水文效应最重要的因素,在相同的气候条件下,森林类型是影响森林水文效应的重要因素。对于上游梭磨河流域,影响土壤蒸发的因数如土壤质地、导水能力和土壤反射率等均可能通过影响土壤蒸发影响森林水文效应。

参考文献:

[1] Leutheusser H J, Schiller E J. Hydraulic jump in a rough channel[J]. Water Power & Dam Construction, 1975, (5):25-34.

[2] Rajaratnam N. Hydraulic jumps on rough beds[J]. Trans. Eng. Inst. Canada,1968,11 (A-2):1-8.

[3] Ead S A, Rajaratnam N, Katopodis C. Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,126(10):750-757.

[4] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐:新疆电子出版社,2008:50.

[5] SL253-2000,水闸设计规范[S]. 北京:水利电力出版社,2000.

[6] SL253-2000,溢洪道设计规范[S]. 北京:水利电力出版社,2000.

[7] 新疆库马拉克河小石峡水电站工程水工模型试验研究报告[R]. 新疆农业大学水工实验室,2010:6.

[8] 石教豪,王罗斌,李莉. 亭子口水利枢纽工程泄洪消能试验研究[C]//. 水力学与水利信息学进展,2009:311-318.

[9] 汉江旬阳水电站泄洪闸、冲砂闸水工模型试验报告[R]. 西安理工大学水力学研究所,2007.

[10] 张英克,王继保,陈和春. 芙蓉江鱼塘水电站泄洪消能方案试验研究[J]. 三峡大学学报,2005,2(1):20-23.

参考文献:

[1] 黄秉维. 确切地估计森林的作用[J]. 地理知识,1981(1):1-3.

[2] 李文华,何永涛,杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报,2001,16(5):398-406.

[3] 邓慧平,李秀彬,陈军锋,等. 流域土地覆被变化水文效应的模拟[J]. 地理学报,2003,58(1):53-62.

[4] 邓慧平. 流域植被水文效应的动态模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1404-1409.

[5] 邓慧平,刘惠民,肖燕. 流域植被与土壤导水系数对青弋江流域水文影响的数值试验[J]. 水资源与水工程学报, 2012,23(3):4-9.

[6] Niu G Y, Yang, Z L. A simple TOPMODE-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models[J]. J Geophys Res, 2005,110:1-15.

[7] Beven K J. On subsurface stormflow: An analysis of response times[J]. Hydrological Science Journal, 1982, 27: 505-521.

[8] 邓慧平,孙菽芬. 地形指数模型 TOPMODEL 与陆面模式 SSiB 的耦合及在流域尺度上的数值模拟[J]. 中国科学地球科学(中国科学 D 辑),2012,42(7):1083-1093.