

直线边墙窄缝挑坎的水力计算

韩守都¹, 刘韩生², 倪汉根³

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 水利部西北水利科学研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 应用辐射水流特性计算窄缝挑坎中线水面线, 提出一级直线窄缝挑坎水力计算方法, 可以比较简单地计算水面线和水舌挑距。水力模型试验验证结果表明, 计算结果与试验值基本吻合, 同样来流宽深比情况下, 水面线与来流弗劳德数基本无关。

关键词: 窄缝挑坎, 水面线, 水舌挑距, 水力计算, 模型试验

中图分类号: TV653 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2012)02-0054-03

Hydraulic calculation of slit-type flip bucket with straight line sidewalls// HAN Shou-du¹, LIU Han-sheng², NI Han-gen³
(1. Xinjiang Water Conservancy and Electricity Survey and Designing Institute, Urumqi 830000, China; 2. Northwest Hyrotechnical Research Institute, MWR, Yangling 712100, China; 3. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the study of radial contraction flow, a theoretical calculation method of calculating hydraulic characteristics for general slit-type flip bucket with straight line sidewalls is established. Applying this new method, the water surface line and horizontal length of jet flow could be calculated easily. The validity of the method is verified by hydraulic model tests, which shows that the calculation results are basically identical with the results of hydraulic model tests. It also can be concluded that the water surface line almost have nothing to do with Froude Number when the width to depth ratio of the flow is same.

Key words: slit-type bucket; water surface line; horizontal length of jet flow; hydraulic calculation; model test

窄缝式消能工是一种收缩式消能工, 它借助侧壁的收缩, 迫使水流变形, 形成竖向和纵向扩散的挑流流态, 减小单位面积的入水能量, 减轻对下游河床的冲刷, 特别适合解决高山峡谷河流的消能泄洪问题。自 1954 年葡萄牙的卡勃利尔(cabril)拱坝^[1]首先采用窄缝挑坎以来, 至少已有 20 多个枢纽采用了窄缝消能技术。

直线窄缝挑坎是典型的窄缝消能工, 一直受到关注, 我国进行了许多研究, 取得了丰硕的成果。总的来看, 这些研究工作可概括为 3 类: ①通过实际工程水力学模型试验决定适合特定条件的窄缝挑坎体型^[2-6]; ②用一元水力学理论分析, 给出理论、经验或半经验的直线窄缝挑坎水力计算方法^[7-11]; ③对窄缝消能工进行水动力特性数值模拟^[12-15]。

辐射水流是基本的水流形式, 有解析解, 且为简单函数^[16]。应用辐射水流可以研究窄缝挑坎体型^[7-9], 鉴于窄缝挑坎尚没有比较公认的水力计算方法, 本文应用经典的辐射水流关系计算窄缝挑坎中

线水面线, 提出一个既有理论依据又简单易行的一级直线窄缝挑坎水力计算方法, 供设计部门参考。

1 一级直线窄缝挑坎水面线

图 1 是一典型的平底一级直线挑坎, 对该挑坎进行了水力模型试验, 来流条件为: 均匀流宽度 $b = 20\text{ cm}$, $1.7 \leq b/h$ (宽深比) ≤ 5.4 , $3.5 \leq Fr \leq 9.7$, $2.9\text{ m/s} \leq v \leq 5.8\text{ m/s}$ 。该范围较大, 模型流量也较大, 达 130 L/s 。

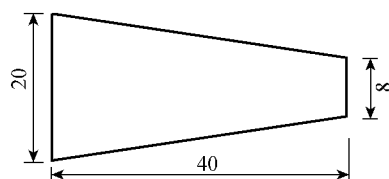


图 1 一级直线窄缝挑坎试验体型(单位: cm)

试验观测的中线水面线及边墙水面线如图 2 和图 3 所示, 两幅图有一个明显的规律, 同样来流宽深比 b/h 情况下, 水面线随来流弗劳德数 Fr 变化很

小,可以认为 b/h 相同时,水面线与 Fr 无关。图 2 中的曲线是用辐射水流计算得到的水面线,可见计算结果与试验值吻合。

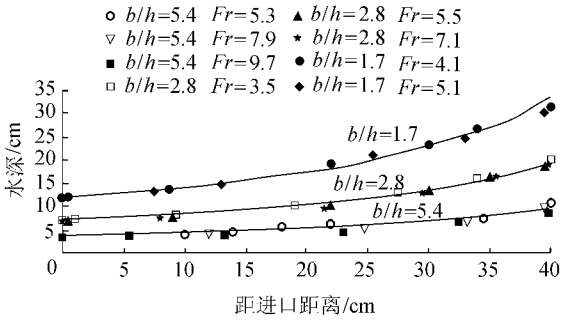


图 2 中线水面线

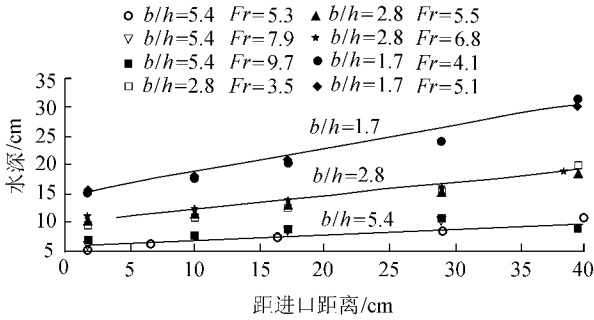


图 3 边墙水面线

现以出口水深为例,说明中线水面线的计算方法。已知平底一级直线挑坎体型,已知来流条件,即 b, h, Fr 值已知,也知直线窄缝挑坎的体型,见图 1,可算出两直线的夹角,即辐射角 2α (单位为 rad),根据辐射水流特点及质量守恒关系得进口断面的辐射半径 R 、出口断面的辐射半径 R_2 分别为

$$R \approx \frac{b}{2\alpha} \quad R_2 \approx \frac{b_2}{2\alpha} \quad (1)$$

式中 b_2 为出口断面宽度。

对于直线窄缝挑坎出口弗劳德数 Fr_2 ,辐射水流还有基本关系^[6]:

$$\frac{R_2}{R} = \frac{P(Fr_2)}{P(Fr)} \quad (2)$$

其中

$$P(Fr) = \sqrt{\frac{(2 + Fr^2)^3}{Fr^2}}$$

$$P(Fr_2) = \sqrt{\frac{(2 + Fr_2^2)^3}{Fr_2^2}}$$

辐射水流中采用比能不变假定,可表示为^[4]

$$\frac{h}{h_2} = \frac{Fr^2 + 2}{Fr_2^2 + 2} \quad (3)$$

将式(1)代入式(2)求解,得到 Fr_2 ,再将该结果代入式(3),就算出直线窄缝挑坎出口水深 h_2 。

工程设计中,为确定挑坎高度、估算水舌情况,特别关注出口水深,表 1 列出了试验体型的 h_2 ,并

与试验值进行比较。表 1 中计算误差为正表示试验值大于计算值,计算误差为负表示试验值小于计算值。由表 1 可见,计算水深的最大误差 8.5%,对窄缝挑坎而言,这个误差可以接受,计算方法可以准确地反映出口水深的变化规律,水深围绕计算值波动,计算结果比较理想。

表 1 出口水深的试验验证

| 来流条件 | | h_2/cm | | 计算误差/% |
|-------|------|----------|-------|--------|
| b/h | Fr | 计算值 | 试验值 | |
| 5.4 | 5.3 | 9.81 | 10.70 | 8.3 |
| 5.4 | 7.9 | 9.46 | 9.47 | 1.0 |
| 5.4 | 9.7 | 9.37 | 8.81 | -6.4 |
| 2.8 | 3.5 | 21.80 | 20.10 | -8.5 |
| 2.8 | 5.5 | 18.80 | 18.80 | 0.0 |
| 2.8 | 7.1 | 18.40 | 18.90 | 2.6 |
| 1.7 | 4.1 | 33.10 | 31.40 | -5.4 |
| 1.7 | 5.1 | 31.30 | 30.20 | -3.6 |

上面给出了中线水面线的计算方法,至于边墙水面线,从试验资料来看,边墙水面线基本成直线,对每个来流宽深比,将进口、出口的实测水深进行平均,再用直线连接,即为边墙水面线,如图 3 所示。

2 水舌外缘挑距的计算

出口水深 h_2 取计算值,该值已得到试验验证,出口流速 v_2 可取

$$v_2 = \frac{Q}{b_2 h_2} \quad (4)$$

式中 Q 为流量,该值已知; b_2 也已知。

参见图 4,取中线辐射水流水面线的平均坡度为水舌外缘抛射角 β_2 ,故

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{h_2 - h}{L}\right) \quad (5)$$

式中 L 为挑坎长度。

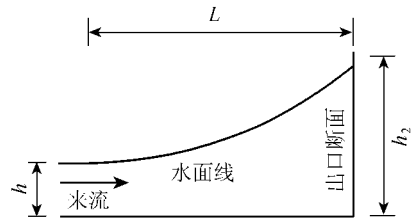


图 4 水舌挑角示意图

忽略空气阻力,水舌外缘为自由抛体轨迹线^[5-11]:

$$x = v_2^2 \sin 2\beta_2 \left(1 + \sqrt{1 + 2g \frac{y + h_2}{v_2^2 \sin^2 \beta_2}}\right) \quad (6)$$

式中 x 为水质点距出口断面的距离; y 为水质点距挑坎底板的距离,水质点在底板之上 y 取负值,在底板之下取正值。

用式(4)、式(5)计算式(6)中的 v_2 和 β_2, h_2 取理论计算值。按图2给出的8个来流条件,用式(6)计算水舌外缘挑距,试验表明该值与试验值的误差小于10%。

3 水舌内缘挑距的计算

水舌内缘轨迹可按平抛公式计算,其迹线仅取决于抛射速度 v_3, v_3 可取为

$$v_3 = \frac{\xi Q}{b_2 h_2} \quad (7)$$

式中 ξ 为试验修正系数,反映出口底流速降低的程度, $\xi = 0.90$ 。试验证实计算值与试验值相差不超过15%。

4 结论

a. 同样来流宽深比情况下,水面线随来流弗劳德数变化很小,基本无关。

b. 应用辐射水流特性,得到了直线窄缝挑坎中线水面线的计算方法,取中线辐射水流水面线的平均坡度为水舌外缘抛射角 β_2 ,出口水深取理论计算值,流速用出口断面平均流速,按自由抛体迹线可计算水舌外缘挑距;取出口底流速,用质点平抛公式可算出水舌内缘挑距。试验结果表明计算结果与试验结果基本一致,满足设计估算要求。

参考文献:

[1] 高季章. 窄缝式消能工的消能特性和体型研究[C]// 水利水电科学论文 第13集. 北京: 水利水电出版社, 1983: 213-236.

[2] 张永良, 马吉明, 郑双凌. 水布垭枢纽泄洪消能试验研究[J]. 水力发电, 2008, 34(11): 48-51.

[3] 张磊, 刘韩生, 纪志强. 拱坝中孔平底与跌坎窄缝消能工对比试验[J]. 人民黄河, 2007, 29(6): 61-63.

[4] 南晓红, 聂源宏. 窄缝式消能工在重力拱坝坝面溢流中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2004(6): 54-57.

[5] 肖兴斌. 窄缝式消能工在高坝消能中的应用与发展综述[J]. 水电站设计, 2004, 20(3): 76-81.

[6] 陈忠儒, 陈义东, 黄国兵. 窄缝式挑坎体型研究及其挑流水舌距离的估算[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(4): 11-14.

[7] 倪汉根, 刘韩生. 窄缝式消能工收缩段的体型设计[J]. 水利学报, 1999, 30(2): 33-38.

[8] 刘韩生, 倪汉根, 梁川. 对称曲线边墙窄缝挑坎的体型设计方法[J]. 水利学报, 2000, 31(5): 70-75.

[9] 刘韩生, 倪汉根, 梁川. 非对称窄缝挑坎的边墙曲线计算方法[J]. 水力发电学报, 2001, 33(3): 59-66.

[10] 吴文平, 张彦法. 窄缝挑流水舌的运动扩散规律及应用[J]. 水力发电学报, 1989, 20(4): 73-78.

[11] 张彦法, 吴文平. 窄缝挑坎水面线及水舌挑距的试验研究[J]. 水利学报, 1989, 20(5): 16-23.

[12] 沙海飞, 周辉, 陈惠玲. 坝身泄水孔窄缝消能工三维水动力特性数值模拟[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 625-629.

[13] 巩兴晖, 刘韩生. Y型窄缝消能工三维水力特性数值模拟[J]. 人民长江, 2011, 42(13): 83-86.

[14] 张海龙. 窄缝收缩段水流特性及数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2007: 13-43.

[15] 陈规划, 王均星. 窄缝消能工水力特性数值模拟[J]. 人民珠江, 2010(5): 31-34.

[16] 斯里斯基 C.M. 高水头水工建筑物的水力计算[M]. 毛世民, 杨立信, 译. 北京: 水利电力出版社, 1984: 113-135.

(收稿日期 2011-07-22 编辑 周红梅)

· 简讯 ·

2011 年度河海大学获 3 项国家科技奖

2011 年度国家科技奖励大会于 2012 年 2 月 14 日在北京召开,河海大学获得 3 项国家科技奖,且均为学校主持完成,获奖数在全国高校名列前茅。其中,刘汉龙教授主持完成的“现浇混凝土大直径管桩及复合地基技术与应用”获国家技术发明二等奖,张长宽教授主持完成的“河口海岸水灾害预警预报关键技术系统集成及应用”、顾冲时教授主持完成的“重大水工程服役风险评定与馈控的关键技术及其应用”均获国家科技进步二等奖。

“现浇混凝土大直径管桩及复合地基技术与应用”是针对软土地基工后沉降控制难题而研发的具有自主知识产权的地基工程新技术,已应用于我国沿海及内地湖泊地区多项高速公路、高速铁路、港口和市政工程软基处理,产生直接经济效益 1.84 亿元,获国家发明专利 5 项、实用新型专利 5 项,并编制出版了国家行业标准《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》;“河口海岸水灾害预警预报关键技术系统集成及应用”通过多项技术创新提高了潮水、洪水的预报精度,成果已在国家防总和江苏等省防办以及 48 个沿海防汛单位获得成功应用,产生经济效益 6.1 亿元,在保护人民生命财产安全、维护社会稳定等方面发挥了重大的社会效益;“重大水工程服役风险评定与馈控的关键技术及其应用”研究项目为水利工程安全服役和管理提供了理论依据和技术支撑,成果在全国 70 个大型水利工程应用后,取得直接经济效益 4 亿元,节支 2.6 亿元,并为在确保工程安全前提下充分发挥工程效益起到了重大作用。

2011 年河海大学共获国家及省、部级科技奖 61 项,再创历史新高。

(本刊编辑部供稿)