

计算斜切挑坎冲坑深度的方法探讨

曾贝佳

(重庆市水利电力建筑勘测设计研究院,重庆 渝北 401120)

摘要:通过对斜切挑坎的数值模拟计算,将常规水力学参数计算结果与试验结果进行对比分析后发现,数值计算在研究斜切坎的水深、压强等方面可以得到与试验研究相一致的结果,因此可以认为,其挑流水舌入水长度的计算值也同样与实验结果具有良好的吻合度,从而避免了物理模型试验由于测量水平的限制造成的较大的实验误差,进而可以根据该入水长度计算出水舌入水单宽流量并运用各家估算公式,得出冲坑平衡水垫深度。

关键词:斜切挑坎;数学模型;网格划分;结果比较

中图分类号: V211.76; O242.1; C32

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2016)05-0104-04

0 引言

斜切挑坎作为一种相对较为新型的挑坎形式,在工程界得到了广泛的应用。斜切挑坎是将传统等宽挑坎沿某一角度斜切,从而使原来单一挑角的挑流鼻坎演变为一组有不同挑射角的多挑角挑坎。由于高低坎挑角的差异,导致扩散坎内水深明显不同,出坎水深呈现出高坎大,低坎小的分布规律;另外,斜切挑坎不仅是一个简单的挑流结构,更重要的是一种散流结构,尽管立面上斜切坎后的水流仍以一族不同的抛物线抛向下游河床,而平面上水舌却发生了明显的扩散,水舌有效入水长度大幅增加,入水单宽流量得到了极大地减小,从而明显降低对下游河床的冲刷^[1]。

国内许多学者对斜切挑坎进行了物理模型试验^[2,3,4,5]以及数值模拟^[6,7]的工作,得到了许多较好的成果。但是,对于斜切坎下游冲坑的计算,许多学者都提出了不同的估算公式,由于每个公式都包含有挑流水舌入水单宽流量,亦即需要事先得到水舌入水长度,而一般物理模型都是根据试验测量得出,由于试验手段限制的缘故,难以准确获得水舌入水长度,也就造成了相对较大的误差。本文根据数值模拟计算得到水舌入水长度,并据此准确算出水舌入水单宽流量,进而根据各家计算公式计算出冲坑平衡水垫深度,从而使之与物理模型试验进行对比,找出斜切挑坎下游冲坑平衡水垫深度的有效计算公式。

1 数学模型

收稿日期:2016-09-11

本文采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型,该紊流模型对雷诺应力各分量采用各向同性假设。目前双方程模型在实际工程和科研中使用较多,标准的 $k-\varepsilon$ 模型比零方程和单方程模型有了很大的改进,在工程实际中得到了较为广泛的应用和验证,它考虑了紊动速度比尺和紊动长度比尺的输运。对于大多数水流问题,标准双方程模型能得到较为满意的结果。对于不可压非定常流,标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型的连续方程、动量方程和 k, ε 方程分别为:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中 ρ 和 μ 分别为体积分数的密度和分子粘性系数。 P 为修正压力; μ_t 为紊流粘性系数,它可由紊动能 k 和紊动耗散率 ε 求出:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

其中, C_μ 为经验常数, C_μ 取 0.09。

σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 的紊流普朗特数, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。 $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为 ε 方程常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。 G 为由平均流速梯度引起的紊动能产生项, 它可以由下式定义:

$$G = \mu_i \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

引入水气分层两相流的 VOF^[7] 模型后, 在控制体内对第 q 相流体的容积分数规定为: $\alpha_q = 0$ 表示控制体内无 q 相流体; $\alpha_q = 1$ 表示控制体内充满 q 相流体; $0 < \alpha_q < 1$ 表示控制体内部分充满 q 相流体, 对所有流体的容积分数总和为 1, 即: $\sum \alpha_q = 1$ 。在水气分层两相流中, α_w 为水的容积分数, α_a 为气的容积分数, $\alpha_w + \alpha_a = 1$, ρ 和 μ 就是体积分数的函数, 而不是一个常数。它们可由下式表示:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \quad (7)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \quad (8)$$

式中 ρ_w 和 ρ_a 分别是水和气的密度; μ_w 和 μ_a 分别是水和气的分子粘性系数, 通过对水的容积分数 α_w 的迭代求解, ρ 和 μ 都可以由式(7)、(8)求出。

2 计算体型及网格划分

数学模型模拟范围从挑坎起始端上游 20 m 位置开始, 包括 20 m 长具有一定坡度的顺直泄槽, 斜切挑坎, 以及挑流水舌在空中可能运动至的所有空间, 即要求建立的计算域须要将所有空中水体质点包含其内。一般来讲网格越细计算结果精度就越高, 但过细的网格就意味着占用的内存资源就越大, 其所需计算时长也越长, 由于本组计算模型计算区域相对较小, 故而将网格划分得比较细以保证足够的计算精度, 网格尺度的变化范围 0.08 m ~ 0.2 m。

采用控制容积法^[9]对偏微分方程组进行离

散, 压力 - 速度耦合采用 PISO 算法。由于计算的下游出流位置流动已基本发展成稳定状态, 可给定在出流边界上的法向梯度为零, 即: $\partial v / \partial x = 0, \partial k / \partial x = 0, \partial \varepsilon / \partial x = 0$; 在固壁上给定法向的速度为零和无滑移条件, 近壁的黏性底层采用壁函数法^[9]处理。整个计算区域如图 1 所示, 水流入口采用速度入口边界条件, 根据模型试验测得进口位置断面水深 $h = 3.55$ m 以及法向速度 $v_n = 34$ m/s, 出口及所有的气体边界均采用压力边界条件, 压力为大气压值。

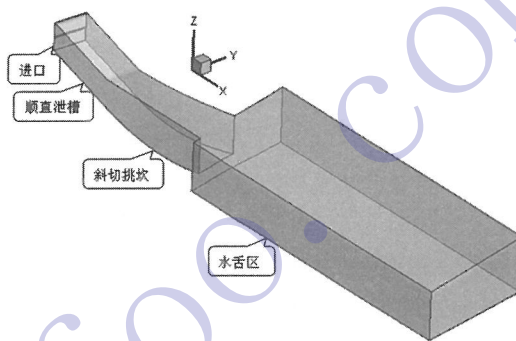


图1 数学模型计算域

3 计算结果与试验结果的比较

3.1 计算结果

图 2 是斜切挑坎水流流态图, 可以看到, 数值计算流态与模型试验流态非常吻合, 出挑水舌空中形态良好, 沿程连续平顺, 无不良形态出现。由于斜切的原因, 水舌有向左侧偏转的趋势, 但是偏转角度相对较小。同时, 由于左侧挑坎扩散的原因, 水舌受到压力梯度的影响, 部分水体向左侧偏转, 这有利于出挑水体的横向扩散。通过后处理软件得到水舌入水长度为 39.66 m, 而泄槽顺直段宽度为 10 m, 这充分体现了斜切挑坎的对于水体的扩散作用, 即由于高低坎的作用使得水流入水长度大幅增加。

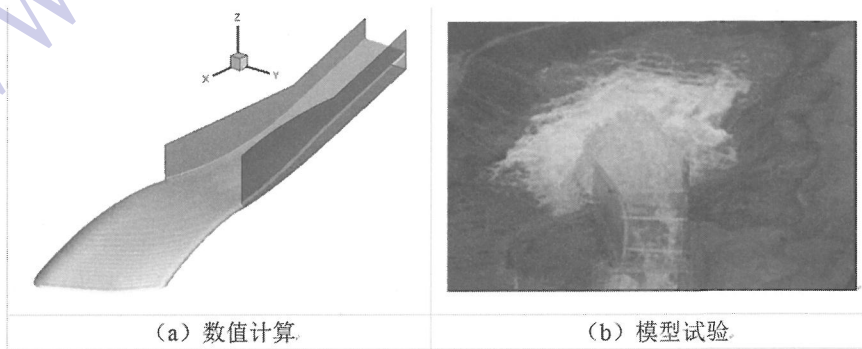


图2 流态图

图 3 为泄槽沿程水深计算值与试验值的对比图,可以看到,二者吻合较好。水流在前部顺直渠道时沿程水深几乎没有变化,在进入反弧挑坎以后沿程水深逐渐减小,在出挑位置达到最小,水流由于斜切坎的存在在横向上得到扩散,导致水体在立向上的水深逐渐减小。同时,沿程水深在进入挑坎前保持一致,进入挑坎以后由于左侧墙逐渐向外侧扩散以及左侧挑角相对于右侧为小的缘故,其左侧水深低于右侧水深。

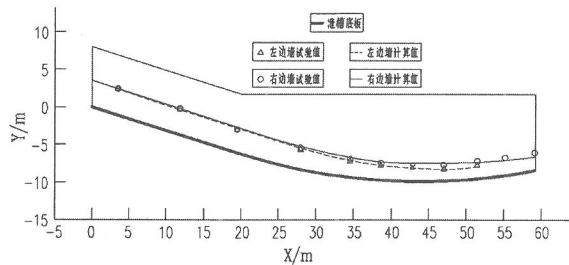


图 3 泄槽沿程水深试验值与计算值对比图

图 4 为泄槽中轴线沿程压强的计算值与试验值对比图,可以看到,二者吻合良好。水流在前部顺直渠道时沿程压强几乎没有变化,在进入反弧挑坎以后呈现先增大后减小的趋势,压强在反弧段最低位置达到最大。水流进入反弧挑坎以后,受到挑坎施加的反向力作用,压强增大,水深减小,直至挑坎最低位置压强变到最大,其后由于挑坎横向扩散的缘故其压强又沿程逐渐减小。

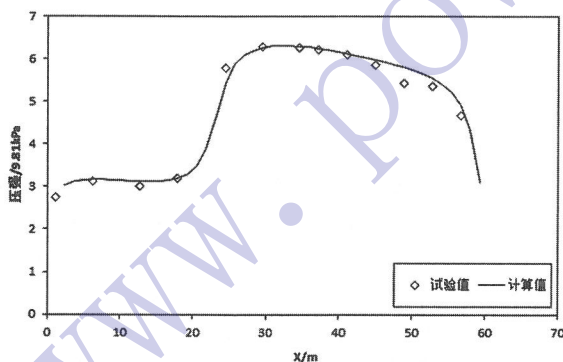


图 4 泄槽底板中轴线沿程压强分布

3.2 冲坑平衡水垫深度

从挑坎挑射出来的水体携带的巨大能量的耗散大体上分为三部分:即空中耗散消能、水垫强剪切与旋滚消能以及冲刷基岩消能。挑射水流在空中充分掺气,实现了水流的扩散,事实上,其消耗能量的比例相对较小,它的最主要功能是为了通过自由扩散增大下游水面有效入水面积,减小入

水单宽流量,为进入下游水体消能“做准备”;跌入下游水垫后,入射水舌沿程扩散,断面流速逐渐减小,主流与下游水垫之间产生强剪切作用并在水舌边缘产生极为强烈的水跃旋滚以实现充分的能量耗散;然而,射流穿过水垫之后,仍然汇聚了相当大的能量,有研究表明,其剩余能量相当于总水头的 50% 左右。若射流主要冲击位置是可以被冲动的,那么河床将被逐渐掏刷以增加消能效率,直到冲刷坑内部的水垫深度达到足以消除全部剩余能量位置,此时,冲刷坑里的最大水深被称为冲刷平衡水垫深度。

众多的原型观测以及理论研究表明,冲坑形成与发展的最大影响因素是挑射水体的单宽流量 q , 上下游水头差 Z 以及基岩综合抗冲系数 K_r 。

根据前文所述,斜切坎沿程水深以及压强均与物理模型试验具有较好的吻合度,故而可以认为其出挑水舌形态以及入水长度也同样具有较高的精度。根据前文得到的水舌入水长度为 39.66 m, 此时泄流总量 $Q = 1\ 205.64\ \text{m}^3/\text{s}$, 从而计算得出水舌入水单宽流量 $q = 30.40\ \text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。表 1 列举了各家公式对于上下游水头差 $Z = 74\ \text{m}$ 时的下游河床冲刷平衡水垫深度计算结果。

表 1 冲坑平衡水垫深度计算结果

公式列表	K_r	H_0
陈椿庭公式 $H_0 = K_r q^{0.50} Z^{0.25}$	1.25	20.21
B. F. Martins 公式 $H_0 = 1.50 q^{0.6} Z^{0.1}$	1.50	17.89
王世夏公式 $H_0 = 1.14 K_r q^{0.59} Z^{0.11}$	1.35	18.52
余常昭公式 $H_0 = \frac{1.17}{K_r} q^{0.75} z^{0.125}$	1.40	18.10
明宗富公式 $H_0 = \bar{K}_r q^{0.64} z^{0.08}$	1.00	12.55
	1.35	16.94
	1.75	21.96

王世夏公式中 $K_r = 0.7 \sim 1.8$, 而余常昭公式中 $K_r = 1.05 \sim 1.90$, 实验过程中先对比了部分实验结果与公式计算结果,以期得到一个固定的 K_r 值,从而实现减少实验工作量的目的。通过对比分析,得出在本文设计挑坎情况下王世夏公式 $K_r = 1.35$ 时二者吻合较好,余常昭公式 $K_r = 1.40$, 而其余公式则具有相对较大的误差。物理模型试验测得 $H_0 = 18.34$, 可以看出,此时用王世夏公式以及余常昭公式均具有较好的吻合度,其余公式则出现相对较大的误差。

4 结 语

通过对斜切挑坎的数值模拟计算,将常规水力学参数计算结果与试验结果进行对比分析后发现,数值计算在研究斜切挑坎的水深、压强等方面可以得到与试验研究相一致的结果,因此可以认为,其挑流水舌入水长度的计算值也同样与实验结果具有良好的吻合度,从而避免了物理模型试验由于测量水平的限制造成的较大的实验误差,进而可以根据该入水长度计算出水舌入水单宽流量并运用各家估算公式,得出冲坑平衡水垫深度。通过对比分析,王世夏公式以及余常昭公式对于斜切挑坎下游冲坑水垫平衡深度有着较高的计算精度。

同时,根据本文所述方法通过数值模拟计算得出斜切挑坎入水长度并进一步算出入水单宽流量,以此数据带入经验公式得到了与试验数据吻合较好的下游冲坑深度,这从反向验证了数值模拟入水长度结果的可靠性,并且表明利用数值模拟的入水长度进行下游冲坑深度计算的方式是可行的。

参考文献:

- [1] 杨首龙. 单圆弧斜切双扩散坎消能工的水力设计[J]. 人民长江. 2004,35(9):20-21.
- [2] 张守磊,陈和春,张坤. 斜切挑流鼻坎水舌挑距水力计算研究[J]. 中国水运. 2008,8(12):160-161.
- [3] 张东明,王媛. 舌形坎与短边墙坎泄流水舌空中扩散规律研究[J]. 中国农村水利水电. 2007,(3):106-109.
- [4] 杜青,王晓燕,刘希成. 斜向挑坎在溢洪道设计中的应用[J]. 山东水利. 2004,(10):34-35.
- [5] 莫海春,陈和春,罗伦,邓伟. 斜切挑坎水舌入水宽度随切角变化规律研究[J]. 2013,31(11):124-126.
- [6] 薛洪程,刁明军,岳书波,徐兰兰. 溢洪道出口斜切型挑坎挑流水舌三维数值模拟[J]. 2013,44(6):703-709.
- [7] 陈大宏,李炜. 自由表面流动数值模拟方法的探讨[J]. 水动力学研究与进展: SerA,2001,16(2):216-224.
- [8] 叶茂,黄武林,伍超,陈开杰. 导流洞挑流水舌的模型试验及数值模拟研究[J]. 2011,30(4):98-102.
- [9] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: Hemisphere Corporation and Mc Graw Hill Book Company,1980.

作者简介:

曾贝佳(1990-),女,苗族,重庆酉阳人,毕业于四川大学水工结构专业,助理工程师,从事水库、大坝、堤防、饮水管道设计工作。

(责任编辑:卓政昌)

四川攀枝花1-8月太阳能发电增长227.8%

攀枝花市的清洁能源主要指水力发电、风力发电和太阳能发电。1-8月,攀枝花市清洁能源发电117.91亿千瓦时,同比增长14.5%,占全市发电量的比重89%,比去年同期提升8.4个百分点。其中,水力发电量115.76亿千瓦时,同比增长12.5%;风力发电1.81亿千瓦时,增长100%;太阳能发电0.34亿千瓦时,增长227.8%。

国电大渡河流域沙坪二级水电智慧工程 鉴定成果达到国际领先水平

8月28日,国电大渡河公司《沙坪智慧工程管理模型研究与管控平台开发应用》项目科技鉴定会议在北京召开。鉴定会议认为,该项目研究成果具备三项开拓性创新科技,整体达到了国际领先水平。一是提出了含有风险(偏差)评价体系、事件预警体系、决策(纠偏)体系及考核评价体系的智慧工程管控理念,形成了覆盖水电工程建设从宏观整体到过程细节全方位、全过程的智慧化管理模型。二是基于集成了数据采集层(智能终端)、数据服务层(云数据中心)、智慧单元层(生产监控)、智慧决策层(项目管控)的智慧工程一体化管控平台总体架构,利用统一通讯技术、BIM、云计算、物联网、大数据等先进技术实现了混凝土生产监控系统、3D数字厂房系统、施工安全监测系统等多个智慧单元的应用。三是提出了适用于水河流域梯级开发建设的智慧工程技术标准体系框架,编制了《智慧工程管控平台技术导则》和《智慧工程三维信息模型技术标准》,推动智慧工程整体解决方案的应用。

四川:5亿补偿火电 委屈了水电

9月19日,四川省发改委公示关于利用2015年水电站超发电量收益清算资金对公用燃煤火电机组欠发电量进行电价补偿情况。据统计,2015年四川电网统调分水电站超发电量约100亿千瓦时,按超发电量的50%、每千瓦时0.10元进行清算,形成收益清算资金近5亿元。近年来,四川水电连年弃水,消纳形势越发严峻,加之电价持续下调,水电利润收缩明显,经营压力陡增。作为缓解四川部分水火矛盾的一项举措,此次5亿元补偿火电机组,对当地水电企业来说已经有些力不从心。