

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.021

# 跌坎型底流消能工冲击区时均动水压强分布 与抗冲磨强度确定

吴智源<sup>1</sup>, 张建蓉<sup>2</sup>, 崔召<sup>1</sup>, 徐庶伟<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650500)

**摘要:** 在跌坎型底流消能工消力池内水流流态分区的基础上, 根据自由紊动射流理论, 得出不同入射角度下冲击区时均动水压强半经验公式。利用冲击区底板时均动水压强分布图, 在角度和流量不变的工况下, 跌坎的变化对底板时均动水压强的影响, 以及角度跌坎不变的工况下, 流量的变化对底板时均动水压强的影响, 显示出冲击区最易遭受冲磨与破坏的区域。以某水库工程为例, 由实测数据推求经验公式相关参数, 验证经验公式的可行性, 进一步结合临界流速求出消力池底板混凝土抗冲磨强度分布图, 对底板分区, 为合理确定消力池底板混凝土强度等级提供参考。

**关键词:** 时均动水压强; 跌坎型底流消能工; 抗冲磨强度; 水力学试验

**中图分类号:** TV 653    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1118-06

## Distribution of time-averaged dynamic water pressure and abrasion resistance in the impact zone of bottom flow dissipation with step-down floor

WU Zhiyuan<sup>1</sup>, ZHANG Jianrong<sup>2</sup>, CUI Zhao<sup>1</sup>, XU Shurwei<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** On the basis of creating water flow regime partitions in the impact zone of bottom flow dissipation with step-down floor and the theory of free turbulent jet flow, an empirical formula of time-averaged dynamic water pressure in the impact zone was obtained under different incident angles. The distribution diagram of dynamic water pressure in the impact zone was analyzed using matlab. The effects of step-down floor on the dynamic water pressure under the same incident angle and flow rate, and the effects of incident flow rate on the dynamic water pressure under the same incident angle and step-down floor were investigated, and the most vulnerable area to damage and abrasion in the impact zone was determined. A reservoir project was selected as the case study. The relevant parameters of the empirical formula were deduced based on the measured data to verify the feasibility of the empirical formula. With the knowledge of the bottom velocity, the abrasion resistance strength of concrete floor in the impact zone of bottom flow dissipation was obtained. The research can provide reference for the strength classification of concrete floor of bottom flow dissipation.

**Key words:** time-averaged dynamic water pressure; bottom flow dissipation with step-down floor; abrasion resistance strength; hydraulic test

跌坎型底流消能工建立在常规底流消能工基础上, 在消力池进口处将消力池底板向下开挖形成跌坎, 构成跌坎型消力池。跌坎的存在使水流以淹没射流形式进入消力池水体, 在主流上下形成漩涡和强剪切紊动进行消能, 水流沿程有一

定扩散, 降低水力学指标。在高水头大流量条件下, 在泄水建筑物泄流的混凝土表面上的破坏形式主要有空蚀、冲磨和水力冲刷。在一定条件下冲磨破坏又会诱发空蚀破坏, 因此抗冲磨研究具有非常重要的意义。

收稿日期: 2014-12-05    修回日期: 2015-03-01    网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2000.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目“跌坎型底流消能工水流流动结构水力特性研究”(51169088)

作者简介: 吴智源(1989-), 男, 黑龙江佳木斯人, 主要从事工程水力学方面的研究。E-mail: zhiyuan.wu@foxmail.com.

通讯作者: 张建蓉(1963-), 女, 云南昆明人, 副教授, 主要从事非恒定流数值仿真与分析, 水利工程经济与评价方面的研究。E-mail: 1186482688@qq.com.

本文通过水力学模型试验研究了 15°、30° 和 45° 入射角度下不同跌坎深度、不同水头冲击区时均动水压强分布规律,分析时均动水压强分布图。通过对数据的处理和曲线拟合,得出以入射角度为控制变量的经验公式参数曲线。由某水库工程实测数据,对经验公式进行验证及评价,分析该工程消力池底板时均动水压强分布及混凝土抗冲磨强度分布,对底板分区后,给出底板材料选择方案。

### 1 试验条件

试验装置采用有机玻璃制作而成。试验段尺寸为 1.2 m × 0.2 m (长 × 宽),试验中跌坎深度取 0.06 m、0.08 m、0.10 m,入射角度取 45°,试验流量为 0.006 315 m³/s, 0.008 027 m³/s, 0.010 32 m³/s。

通过对跌坎型底流消能工水流流态的分析进行分区,沿主流方向可分为旋滚区、淹没射流区、冲击区、附壁射流区,见图 1。

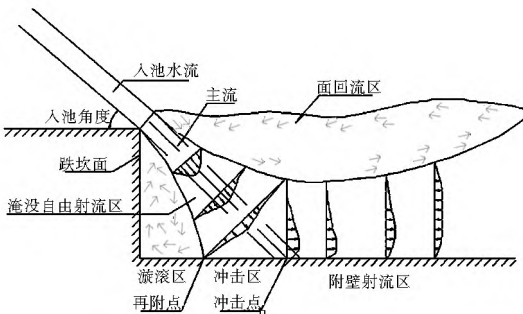


图 1 跌坎型底流消能消力池中水流流态分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flow velocity distribution in the stilling basin of bottom flow dissipation with step-down floor

淹没射流主流到达消力池底板并与底板相互作用的区域称为冲击区。在冲击区,淹没射流主流冲击消力池底板,并受到底板的约束,主流方向偏转并且流线弯曲,淹没射流主流流速迅速降低,主流的动能一部分转化为消力池底板上的压能,因此在冲击区,对消力池底板产生冲击压力,使作用于消力池底板上的时均动水压强急剧增大。射流水体中携带的泥沙直接冲击底板,冲击区是消力池内主要的消能区域,所受到的时均动水压强最大,因此,也是空蚀破坏与冲刷破坏最为严重的区域,现不考虑脉动压强,这就要求消力池底板混凝土的抗压强度能大于消力池底板承受最大时均动水压强。

### 2 冲击区时均动水压强分布

#### 2.1 射流扩散角 $\theta_2$ 和射流扩散系数 $\sigma$

根据紊动射流理论中平面射流的研究成果<sup>[3]</sup>,跌坎型底流消能工淹没自由射流区与自由紊动射流相似,符合直线扩散规律。故可引用平面紊动射流理论的射流扩散方程,根据图 2 得到跌坎型底流消能工平面扩散方程<sup>[2]</sup>为

$$x = \frac{3K_0\sigma}{4u_{max}^2} \quad (1)$$

$$b(x) = \frac{0.293K_0\sigma}{u_{max}^2} = x \tan\theta_2 + \frac{h_0}{2} \quad (2)$$

式中:  $K_0$  为单位时间内水流泄流动量,  $K_0 = u_0^2 h_0$ ,  $u_{max}$  为消力池内底板上的临底最大流速;  $\theta_2$  为射流扩散角。

由图 2 知

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta - \theta_1 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{L}{d}\right), \text{ 根据勾股定理,}$$

$$x = \frac{d}{\sin\theta} - \frac{b - h_0/2}{\tan\theta} \quad (3)$$

将式(1)、式(2)带入式(3)整理得

$$\sigma = \frac{d}{\cos\theta \{ \tan\theta + \tan[\frac{\pi}{2} - \theta - \arctan(\frac{L}{d})] \}} / \left[ \frac{3K_0}{4u_{max}^2} \right] \quad (4)$$

由试验数据计算得,  $K_0 = 0.1$ ; 射流扩散角平均值为  $\theta_2 = 9^\circ$ , 小于 15° 试验统计得到的射流扩散角 19.5°, 小于 Reichardt. H 提出的 21.3<sup>[3]</sup>; 射流扩散系数平均值为  $\sigma = 2.86$ , 比 15° 时所得的射流扩散系数值大 0.56, 小于 Reichardt. H 提出的  $\sigma = 7.67$ ; 射流扩散系数没有通用的公式,在求解方程时一般将其与常值或与流速场联系起来,受试验条件及资料处理方法影响,本试验以动水环境为研究前提将其与入池角度、跌坎深度、入池能量、临底最大流速及再附长度等因素结合得出的结果而非 Reichardt. H 以静止的半无限宽慰前提得出的试验结果,射流扩散角随入射角度增大而减小,射流扩散系数随入射角度增大而增大。

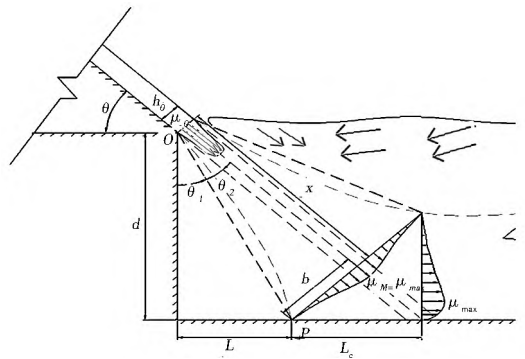


图 2 跌坎型底流消能工淹没射流区水流扩散示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water diffusion in submerged jet area of bottom flow dissipation with step-down floor

#### 2.2 再附长度试验与计算

由图 1 可知跌坎型底流消能工水流结构沿流动方向可分为淹没射流区、冲击区、附壁射流区及稳定区。本文需要推求底板上压强分布经验公式,着重分析再附长度  $L$  与冲击长度  $L_c$  的计算值与实测值的对比,以此求得合理的参数。

再附长度即从跌坎面到再附点的水平距离。由图 2 中的几何关系可求得再附长度:

$$L = d \tan\theta_1 = d \cot(\theta + \theta_2) = \frac{d(1 - \tan\theta \tan\theta_2)}{\tan\theta + \tan\theta_2} \quad (5)$$

其中:  $d$  为跌坎深度;  $\theta$  为入池角度;  $\theta_2 = 9^\circ$ ; 对比实测与计算值见图 3。

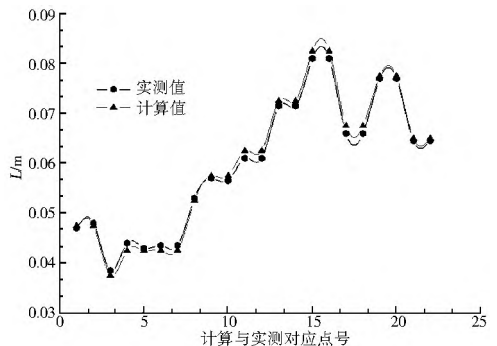


图 3 再附长度试验与理论计算结果对比

Fig. 3 Comparison of the reattached length experiment and theoretical calculation results

从图 3 可以看出,模型试验结果与计算值实测值基本一致,其中测量值测取的为一个范围,对比所用实测数据为最大最小的平均值。因此,数据的使用直接选择计算值更为精准。

### 2.3 冲击长度试验与计算

冲击长度为再附点到冲击点的水平距离。同样由图 2 中几何关系推导,再附长度  $L_c$  如下:

$$L_c = \frac{b}{\sin\left[\frac{\pi}{2} - (\theta_1 + \theta_2)\right]} \quad (6)$$

将式(2)代入式(6),经三角变换得

$$L_c = \frac{x \tan\theta_2 + h_0/2}{\sin\theta} \quad (7)$$

式中: $\theta$  为入池角度; $\theta_2 = 9^\circ$ ;  $h_0$  为水流入射的厚度;对比计算值与实测值见图 4。

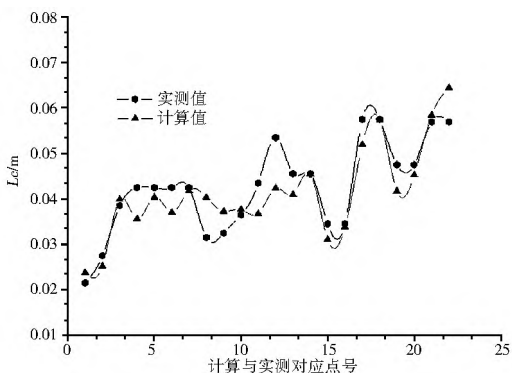


图 4 冲击长度试验与理论计算结果对比

Fig. 4 Comparison of the impact length experiment and theoretical calculation results

从上图同样看出,结果存在一定的偏差,大体趋势一致,对数据的使用采用计算值。

### 2.4 冲击区压强分布

在图 2 中,把射流方向取  $x$  轴,垂直射流方向取  $y$  轴,设跌坎型底流消能工中心轴线处的最大流速为

$$\frac{u_0}{u_{max}} = K \frac{x}{h_0} + A \quad (8)$$

式中: $u_{max}$  为射流中心轴处的最大流速; $h_0$  为水流入射的厚度; $u_0$  为水流入池流速。

经实测数据处理可得到  $K = 0.096, A = 0.99$ , 通过模拟得到  $K = 0.197, A = 1.1$ 。因为两者差距较大,提取出模拟数据结合实测数据做成散点图见图 5。

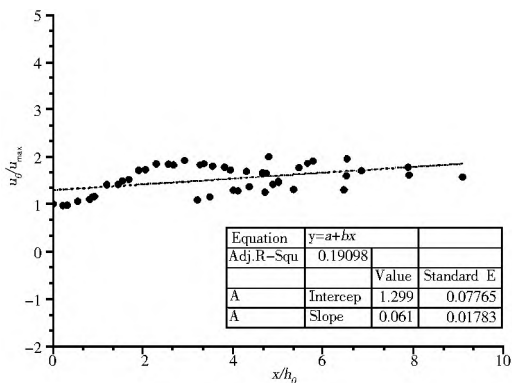


图 5  $\lambda$  射角度  $45^\circ$  时淹没射流轴线最大流速分布

Fig. 5 Maximum flow velocity distribution along the flow axis in the submerged jet area with the incident angle of  $45^\circ$

由图 5 得到  $K = 0.06, A = 0.13$ , 则公式 (1) 可写为

$$\frac{u_0}{u_{max}} = 0.06 \frac{x}{h_0} + 1.3 \quad (9)$$

根据能量守恒定律得

$$\sin\theta u_{max} = \sqrt{\frac{2P_{max}}{\rho}} \quad (10)$$

公式(10)联合式(9),整理得

$$P_{max} = \frac{\rho \sin^2\theta u_0^2}{2(0.06 \frac{x}{h_0} + 1.3)^2} \quad (11)$$

根据紊动射流理论<sup>[13-16]</sup>,对于二维紊动淹没射流作用在消力池底板上的时均压强进行无量纲处理,试验点在正态分布曲线附近有良好相似性,即

$$\frac{P}{P_{max}} = \exp(-k\eta^2), \eta = \frac{y}{b_{0.5P}} \quad (12)$$

式中: $k$  表示冲击压强集中程度的参数;其中  $y$  为消力池底板上垂直于  $x$  轴的  $y$  轴上任意测点与最大时均动压强点之间的距离; $b_{0.5P}$  为压强分布半扩散宽度,对应于  $P = 0.5P_{max}$  时的  $y$  值; $P$  为  $y$  轴上对应  $y$  距离测点的时均压强; $P_{max}$  为  $x$  轴与  $y$  轴交点处最大时均动压。根据紊动射流相关资料,Gortler 利用 Forthmann 和 Reichardt 等的实验资料,其中建议在 Gortler 解<sup>[11]</sup>中的自由常数  $\sigma = 7.67$ ,但本文依据跌坎型底流消能工试验数据,在跌坎深度与消能水体的影响下,得到  $\sigma = 2.86$ ,由此可得淹没射流特征半扩散宽度为

$$b_{0.5P} = 0.881 \frac{x}{\sigma} = 0.308x \quad (13)$$

联合式(11)和式(12)得

$$P = \frac{\rho(u_0 \sin 45^\circ)^2}{2(0.06 \frac{x}{h_0} + 1.3)^2} \times \exp\left[-k\left(\frac{y}{b_{0.5P}}\right)^2\right] \quad (14)$$

当  $y = 0$  时,  $P$  取最大值  $P_{max}$ ; 当  $y$  取  $y|_{P=0.5P_{max}}$  时,  $P$  的取值为  $0.5P_{max}$ , 分别把  $y = 0$  和  $y|_{P=0.5P_{max}}$  代入式(9)中,当  $y = 0$  时,  $\eta = 0$ ; 当  $y|_{P=0.5P_{max}}$  时,  $\eta = 1$ 。则有:  $k = -0.693$ , 带入式(11)中得到,跌坎型底流消能工冲击区消力池底板内任一点的压强改进公式如下:

$$P = \frac{\rho(u_0 \sin 45^\circ)^2}{2(0.06 \frac{x}{h_0} + 1.3)^2} \times \exp\left[-0.693\left(\frac{y}{b_{0.5P}}\right)^2\right] \quad (15)$$

通过坐标转换,把原坐标系  $x', y', z'$  转化以跌坎面为  $z$  轴、底板中轴线为  $x$  轴的  $x, y, z$  坐标系<sup>[4]</sup>, 得到  $x, y, z$  变换坐标为

$$x = \frac{x' + (z - d) \sin\theta}{\cos\theta}; y = y'; z = \frac{z' + d \cos\theta - x \sin\theta}{\cos\theta} \quad (16)$$

因为是研究底板二维下所受压强,所以公式中  $z = 0$ 。将公式(16)中原坐标  $x', y', z'$  带入公式(15)得

$$P = \frac{\rho(u_0 \sin 45^\circ)^2}{2\left[0.06 \frac{(d \sin 45^\circ + x \cos 45^\circ)}{h_0} + 1.3\right]^2} \times \exp\left[-0.693\left(\frac{y}{b_{0.5P}}\right)^2\right] \quad (17)$$

式中:设  $B$  为消力池底板的宽度,  $x$  和  $y$  的取值区间为

$$x \in \left[ \frac{\sqrt{d^2 + L^2} - d \sin 45^\circ}{d \sin 45^\circ}, \frac{\sqrt{d^2 + (L + L_c)^2} - d \sin 45^\circ}{\sin 45^\circ} \right]$$

$$y \in \left[ -\frac{B}{2}, \frac{B}{2} \right]$$

利用 matlab 得到跌坎  $d=0.06\text{ m}, 0.08\text{ m}, 0.1\text{ m}$  时, 流量为  $0.006315\text{ m}^3/\text{s}$  时的冲击区底板压强分布, 见图 6、图 7、图 8, 其中  $Z$  轴压强单位为  $\text{kPa}$ 。

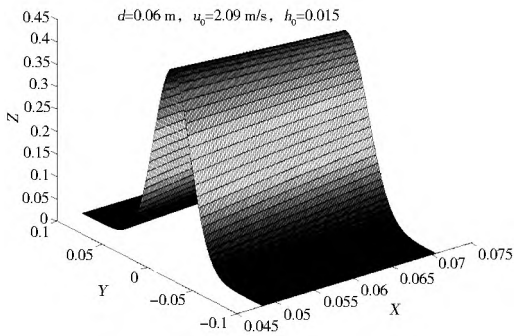


图 6  $d=6\text{ cm}$  时冲击区时均动水压强分布

Fig. 6 Distribution of time averaged dynamic water pressure in the impact zone when  $d=6\text{ cm}$

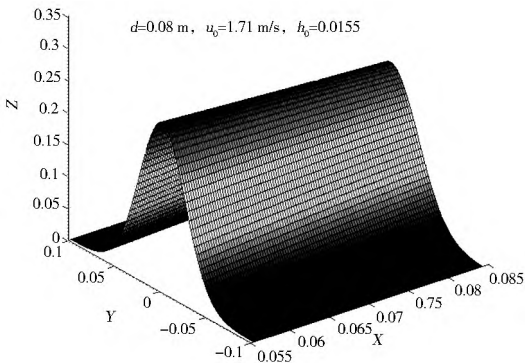


图 7  $d=8\text{ cm}$  时冲击区时均动水压强分布

Fig. 7 Distribution of time averaged dynamic water pressure in the impact zone when  $d=8\text{ cm}$

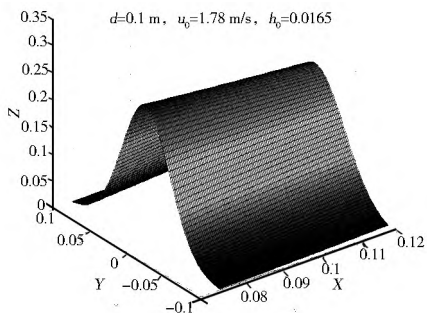


图 8  $d=10\text{ cm}$  时冲击区时均动水压强分布

Fig. 8 Distribution of time averaged dynamic water pressure in the impact zone when  $d=10\text{ cm}$

经分析可知, 跌坎  $d=6\text{ cm}$  时, 时均动水压强分布相对集中, 各色系所显示的区域值域更大, 较其他工况容易发生破坏。而随跌坎高度的增加, 相对的冲击区发生后移, 同时时均动水压强的峰值变小, 分布区域也更为宽泛, 过渡性较好。因此, 着重研究在  $6\text{ cm}$  跌坎下, 不同流量的时均动水压强分布与流速分布对底板的冲磨破坏的影响。

流量为  $0.008027\text{ m}^3/\text{s}, 0.01032\text{ m}^3/\text{s}$  时时均动水压强与流速分布见图 9、图 10。可见当跌坎为定值时, 随着流量增大, 压强越集中峰值越大。

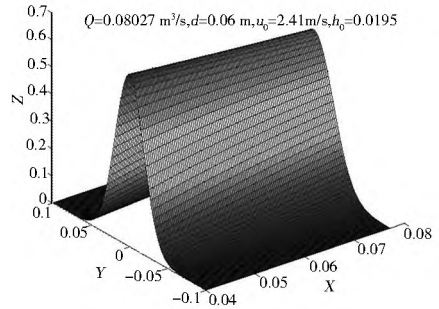


图 9  $Q=0.008027\text{ m}^3/\text{s}$  时冲击区时均动水压强分布

Fig. 9 Distribution of time averaged dynamic water pressure in the impact zone when  $Q=0.008027\text{ m}^3/\text{s}$

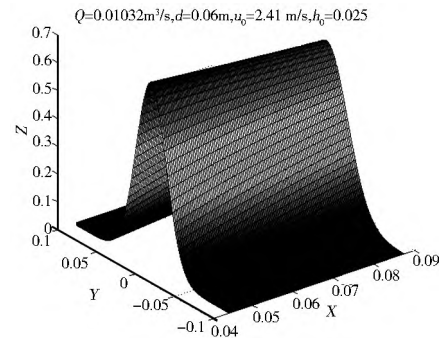


图 10  $Q=0.01032\text{ m}^3/\text{s}$  时冲击区时均动水压强分布

Fig. 10 Distribution of time averaged dynamic water pressure in the impact zone when  $Q=0.01032\text{ m}^3/\text{s}$

根据上述研究方法, 利用实验数据, 以入射角度为控制变量, 计算当入射角度为  $15^\circ$  和  $30^\circ$  时, 跌坎型底流消能工淹没射流区轴线最大流速衰减半经验公式及其参数  $K, A$ , 射流扩散角度  $\theta_2$  和射流扩散系数  $\sigma$  (如表 1)。

表 1 入射角度与公式系数对应关系表

表 1 入射角度与公式系数对应关系

Tab. 1 Relationship between incident angle and formula coefficients

系数	入射角度		
	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
$K$	0.08	0.03	0.06
$A$	0.96	1.6	1.3
$\theta_2$	$19.5^\circ$	$11.8^\circ$	$9^\circ$
$\sigma$	2.3	5.9	2.86

### 3 冲击区底板时均动水压强与混凝土抗冲磨强度关系

#### 3.1 工程概况

某水库总库容为  $1228.81\text{ 万 m}^3$ , 正常库容  $1052.71\text{ 万 m}^3$ , 死水位为  $2137.50\text{ m}$ , 工程规模属中型, 工程等别为  $\text{II}$  等。主要建筑物坝高  $85.3\text{ m}$ , 按 2 级建筑物设计。水库按 50 年一遇洪水设计, 1000 年一遇洪水校核, 消能防冲建筑物按 30 年一遇洪水设计。消力池段长  $28\text{ m}$ , 为等宽矩形下挖式消力池。池深为  $3\text{ m}$ , 池宽  $10\text{ m}$ , 边墙净高  $7\text{ m}$ , 消力池首、末端齿槽深  $1.5\text{ m}$ 。

#### 3.2 底板冲击区分区

实测某工程水库消能防冲设计标准(20%)水位为

2 181.63 m 时,下泄流量为 38.73 m<sup>3</sup>/s,入池流速为 12.9 m/s,入射水流厚度为 0.3 m,消力池最大临底流速为 3.5 m/s;设计标准(33%)水位为 2 182.66 m 时,下泄流量为 80.74 m<sup>3</sup>/s,入池流速为 19.4 m/s,入射水流厚度为 0.41 m,消力池最大临底流速为 9.65 m/s。水库消力池入射角度为 20°,跌坎为 3 m。消力池由于地基应力的影响,缺少相应的动水压力作为抵消,在流量较小时,也可能冲磨明显严重,所以需研究对比以上两个流量条件下抗冲磨强度的分布。

利用以上两种模型试验工况数据计算出经验公式所需的参数分别为  $K$ 、 $A$ 、射流扩散角度  $\theta_2$  和射流扩散系数  $\sigma$ 。绘入表 1 对应点拟出的曲线图(图 11)中,吻合较好,参数  $K$  与  $A$  偏差微小。将参数带入式(17),计算两种工况下冲击区压强值与试验实测值基本一致。因此,上述经验公式可以用于该工程。

成都勘测设计院科研所进行的混凝土抗冲磨强度与抗压强度关系的研究成果显示<sup>[7]</sup>,当混凝土骨料相同时,混凝土抗冲磨强度随着抗压强度增加而提高,二者之间的相关关系使其可以建立一定的相关方程式。

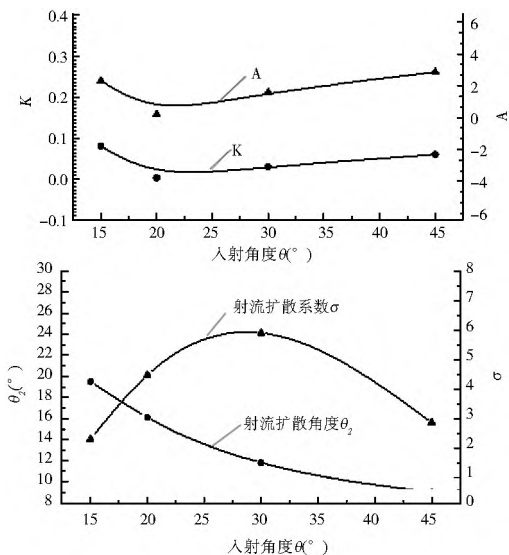


图 11 参数拟合曲线

Fig. 11 Parameter fitting curves

当骨料级配和品种不同时,混凝土抗压强度相同,其抗冲磨强度与抗压强度之间不存在相关关系。在《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》(DL/T 5207-2005)中,水流对泄水建筑物边壁的磨蚀作用由流速、含沙量、泥沙颗粒特性等因素决定,其中流速与混凝土的抗压强度是主要因素。消力池底板混凝土抗冲磨能力可由混凝土抗冲磨强度表示,当确定一定的试验方法和范围,混凝土表面的抗磨强度与抗压强度呈线性相关,而混凝土的耐磨强度而非混凝土表面抗磨强度,与抗压强度是马鞍形曲线关系。

当混凝土标号低于 C35 时,表面水泥砂浆先被磨去,在里层,因砂浆的硬度比骨料低,致使砂浆磨蚀发展较快,形成深坑,外露的骨料起遮盖作用。长江院提出的混凝土抗冲磨强度经验公式为

$$R = \frac{R_0^{1.05}}{P^{0.396} \cdot v^{1.38}} \quad (18)$$

式中:  $R_0$  为混凝土抗压强度(MPa);  $P$  为水流挟沙量(%);  $v$  为水流流速(m/s);  $R$  为抗冲磨强度(单位面积上磨去 1 cm 深所需的小时数,单位为  $h/(cm \cdot m^2)$ )。

由于水流的挟沙量在一次泄洪中可视为已知量,所以公式中  $P$  设为一个定值,以百分数记,参考《水工抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》,取一个试验相对常用的临界值为 2%。其中用时均动水压强替代,指在研究时均动水压强对抗冲磨强度的影响。

因为所测时均动水压强与混凝土抗压强度相差三个数量级,所以时均动水压强单位取 kPa,取普通混凝土干表观密度为 2 400 kg/m<sup>3</sup>,将抗冲磨强度单位转化为  $h/(kg \cdot m^2)$ ,该工程的底板抗冲磨强度分布见图 12。由图分析可知,小流量的抗冲磨强度各阶段都高于大流量时,且更为集中,即单位面积上被磨损单位质量所需要的时间更多,即范围内需要的抗冲磨强度大。因此,流量小的时候更容易发生冲磨破坏,需要更高的混凝土抗冲磨强度。

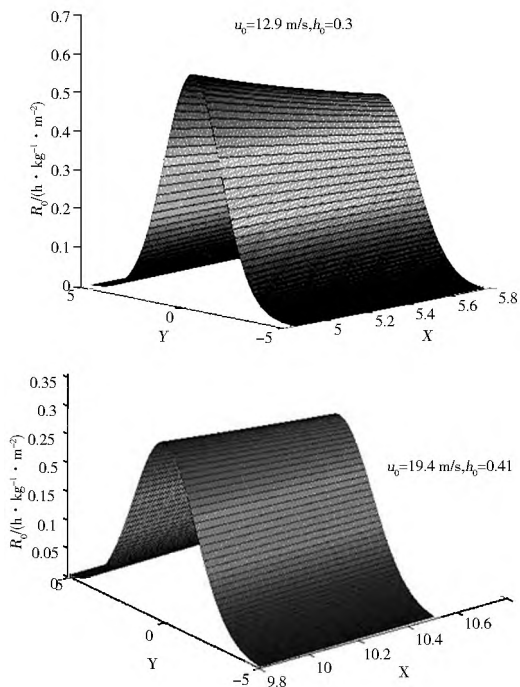


图 12  $R_0$  在冲击区上的分布

Fig. 12 Distribution of  $R_0$  in the impact zone

图 13 为  $Q=38.73$  m<sup>3</sup>/s 时的  $xy$  平面时抗冲磨强度分布图,即两种工况中压强更集中分布且相同区域抗冲磨强度值高的工况,设计的消力池底板抗冲磨强度大于发生冲磨破坏时最大混凝土抗冲磨强度时,则其他工况消力池底板均能满足抗冲磨要求。

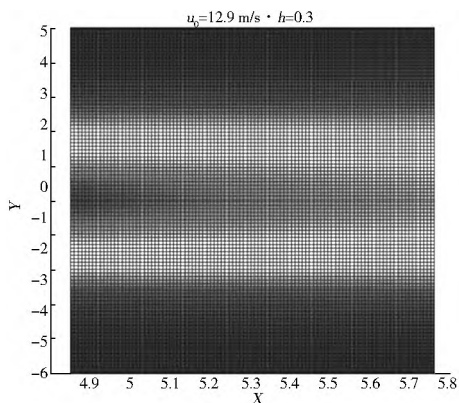


图 13  $xy$  平面区域图

Fig. 13 Distribution of  $R_0$  in the  $xy$  plane

## 4 结论

目前混凝土抗冲磨强度与抗压强度的关系式,不同的试验方法和条件,即使是相同的材料,得到的混凝土抗冲磨能力也存在差异,因此试验中应尽量模拟工程实际环境来评价混凝土抗冲磨能力。

(1) 利用量纲分析、理论计算和推导以及试验数据处理,设定了公式系数、射流扩散系数以及射流扩散角,进而求出更符合该工况的冲击区任意点压强的计算公式,得到时均动水压强分布图。

(2) 在试验中,角度和流量不变时,随着跌坎深度的降低,时均动水压强越集中,整体动水压强更大;角度和跌坎不变时,随着流量的增大,底板时均动水压强越集中。利用推求的半经验公式绘出 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 拟合曲线,利用某实际工程水库模型实测数据,计算出对应参数,结果与理论曲线有较好的一致性。因此,以此为理论基础,以临底流速和时均动水压强这两个控制因素,分别对该实际工程消能防洪设计标准(20%)和设计标准(33%)求解出混凝土抗冲磨强度的分布。

(3) 消能防洪设计标准所需的抗冲磨强度更高,在消能防洪设计标准工况下,将消力池底板混凝土抗冲磨强度图分为两个区域。区域Ⅰ选取整体抗冲磨强度小于 $0.65 \text{ h}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 大于 $0.4 \text{ h}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ ,选择C40混凝土;区域Ⅱ为其他区域,选择C35即可满足要求。

本文公式的计算结果与实测结果有较好的一致性,本文对公式的推求、试验数据以及相关参数的选择相对合理,可为今后的实际工程材料选择或抗冲磨设计提供一定的借鉴和参考。

### 参考文献(References):

- [1] 王红强,张光碧.水工建筑物冲磨和空蚀破坏机理及其防治对策[J].云南水力发电,2008,24(2):89-92.(WANG Hong qiang, ZHANG Guang bi, The controlling countermeasures and mechanism of abrasive damage and cavitation erosion for hydraulic structures[J]. Yunnan Water Power, 2008, 24(2): 89-92. (in Chinese))
- [2] 刘沛清.自由紊动射流理论[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.(LIU Pei qing. The free turbulent jet theory[M]. Beijing: Beihang University Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 张长高.水动力学[M].高等教育出版社,1993.(ZHANG Chang gao. Hydrodynamics [M]. Higher Education Press, 1993. (in Chinese))
- [4] 田野.跌坎型底流消能工冲击区底板荷载计算[D].昆明:昆明理工大学,2014.(TIAN Ye. The load calculation about floor of

- bottom flow dissipation with step down floor on impact zoon [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [5] 郭子中.消能防冲原理与水力设计[M].北京:科学出版社,1982.(GUO Zi zhong. Energy dissipation principle and hydraulic design impingement [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese))
- [6] 黄国强.泄水建筑物抗冲磨防空蚀设计[J].人民珠江,1999(4):32-35.(HUANG Guo qiang. The design of the drainage buildings about wear resisting and anti cavitation [J]. Pearl River, 1999(4): 32-35. (in Chinese))
- [7] 杨春光.水工混凝土抗冲磨机理及特性研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2006.(YANG Chun guang. The study about wear-resisting mechanism and properties of hydraulic concrete [D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2006. (in Chinese))
- [8] 支拴喜.高速含沙水流建筑物抗磨蚀混凝土护面技术研究及应用[D].西安:西安理工大学,2011.(ZHI Shuan xi. The study and application about protective technology of wear-resisting concrete under high speed sediment flow condition [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [9] 秦艳.基于冲击压强的挑流冲坑预测方法研究[D].天津:天津大学,2007.(QIN Yan. Study on Prediction Method of Free Jet Scour Hole Based on Impact Pressure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [10] 刘沛清,冬俊瑞,余常昭.基岩的抗冲能力及其分类[J].长江科学院院报,1996,13(1):21-24.(LIU Pei qing, DONG Jun rui, YU Chang zhao. The Scour resistant property and classification of bedrock [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1996, 13(1): 21-24. (in Chinese))
- [11] Abramovich G N. The theory of turbulent jets [M]. Translated by Scripta Technical. Massachusetts. The MIT press, 1963.
- [12] 蒋霖波.底流消能工不同水流结构分区对底板作用力的研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.(JIANG Lin bo. Study on effect of bottom flow dissipation's floor reaction with different flow structure partition [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [13] Rajaratnam N. The Hydraulic Jump [J]. Advances in Hydrosciences. 1967, 4: 97-280.
- [14] Rajaratnam N. Turbulent jets [M]. Amsterdam: Elsevier Sc Publ Co, 1976.
- [15] Frost W, Moulden T H. Handbook of turbulence [M]. New York: Plenum Press, 1977.
- [16] Stanisic M. The mathematical theory of turbulence [M]. New York: Springer Verlag, 1984.