

兴隆水利枢纽工程鱼道水力学数值模拟

汪红波^{1,2},王从锋¹,刘德富¹,赵 萍¹,向经文¹,童 迪³

(1. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 2. 广西电力工业勘察设计研究院,广西 南宁 530023;
3. 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院,湖北 武汉 430010)

摘要:应用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和有限差分法对兴隆水利枢纽工程鱼道的设计模型和另外 2 种对比模拟模型进行了数值模拟计算,分析了过鱼池的流态、紊动能和紊动能耗散率等指标,并对比分析了不同孔口布置的淹没孔口式横隔板鱼道的水力特性。结果表明:兴隆水利枢纽鱼道具有良好的消能效果,相邻隔板孔口异侧布置比同侧布置消能效果好;可以通过改变淹没孔口式鱼道隔板的孔口位置、数目及尺寸进行体型优化。

关键词:鱼道;横隔板;流态;消能;数值模拟;兴隆水利枢纽工程

中图分类号:S956.3;TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0047-05

Numerical simulation of hydraulic characteristics of fishway in Xinglong Hydro-Junction Project//WANG Hongbo^{1,2}, WANG Congfeng¹, LIU Defu¹, ZHAO Ping¹, XIANG Jingwen¹, TONG Di³ (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023, China; 3. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The design model and other two reference models of the fishway in Xinglong Hydro-Junction Project were numerically simulated by the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and the finite difference method. The flow pattern and parameters, such as turbulent kinetic energy and energy dissipation rate, were analyzed. The hydraulic characteristics of the submerged orifice transverse diaphragm plate fishway with different orifice layouts were compared and analyzed. The results show that energy dissipation effect of the fishway in Xinglong Hydro-Junction Project is good. The energy dissipation effect with the opposite arrangement of adjacent baffles' orifice is better than that with the ipsilateral arrangement. The submerged orifice transverse diaphragm plate fishway can be optimized by changing the position, amount and size of the orifices. It has a strong plasticity and good application prospect.

Key words: fishway; baffle; flow pattern; energy dissipation; numerical simulation; Xinglong Hydro-Junction Project

水利水电工程的建设改变了河流的连续性,使河流的连通性遭到破坏,生境片段化,阻隔了鱼类的洄游通道,使洄游及半洄游性鱼类的生存、繁衍受到严重威胁^[1]。鱼道是一种通过特殊结构形式消能,能创造良好的水流条件的过鱼通道,是一种保护鱼类资源的重要工程设施^[2]。

鱼道按其隔板形式可以分为横隔板式鱼道、丹尼尔式鱼道、涵洞式鱼道和仿自然式鱼道 4 种。横隔板式鱼道是一种国内应用最广泛的鱼道,它又可以分为堰流式鱼道、淹没孔口式鱼道、竖缝式鱼道和组合式鱼道 4 种。堰流式鱼道在水槽内间隔一定距离布置溢流堰式的挡墙,堰顶可以采取不同的形式,如倾斜式、三角堰等,通过堰流水垫消能,它是针对拥有较强游泳能力的鱼类设计的,适用于水位变幅很小,有足够布置场地的条件;淹没孔口式鱼道在横隔板上开孔,通过孔口水流的对流扩散消能,可以开表孔和底孔,适用于喜欢在中、底层洄游的中、大型鱼类;竖缝式鱼道水流通过隔板的竖缝下泄,类似射流,可利用池内水流的对冲作用消能,一般适用于能适应较复杂流态的大、中型鱼类,且常用于施工期及天然障碍处过鱼,其结构简单,能适应较大变幅的水位,过鱼效率较高,加拿大、美国等众多国家较多采用了这种形式^[3-4];组合式鱼道是堰流式、淹没孔口式和竖缝式 3 者组合的鱼道,能够较好地发挥这 3 类鱼道

的优点,具有较好的水流条件,过鱼效果良好。

鱼道内水流条件的好坏是鱼道设计成功与否的关键,加拿大阿尔伯特大学的 Puertas 等^[5]对竖缝式鱼道的流场结构进行了试验研究,发现当鱼道各级水池的长宽比为 10 : 8 时可以获得较稳定的流态。Ead 等^[6]和 Yagci^[7]分别对堰流式和淹没孔口式鱼道的水力特性进行了研究,发现当流量和堰上水头较小时,鱼道内水流为暴跌流,水流经过堰顶跌向池底,在水池中部垂直面上形成逆时针漩涡;当流量和堰上水头较大时,鱼道内水流为连续流,堰上水流大部分在表面流动,水池中部水流在垂直面上形成顺时针漩涡。我国对鱼道水力特性的研究起步较晚,徐体兵等^[8-9]对竖缝式鱼道的水力特性进行了研究,认为隔板导角对竖缝式鱼道的流态有较明显的影响,导角越大主流衰减越快,弯曲程度越大。本文在文献[10]的基础上,对兴隆水利枢纽工程淹没孔口式鱼道的水力特性进行初步研究,深入分析 3 种不同孔口布置的淹没孔口式鱼道的水力学特性。

1 物理模型

位于汉江中下游河段湖北省潜江、天门市境内的兴隆水利枢纽工程的开发任务主要是灌溉和航运,兼顾发电。兴隆水利枢纽工程鱼道是一种典型的淹没孔口式鱼道,宽 2 m,隔板厚 0.2 m、高 2.5 m,开有 3 孔,上部布置 1 个大孔,下部布置 2 个小孔,其局部三

维设计模型如图 1(a)所示,由 3 孔 a 型隔板(图 2(a))和 3 孔 b 型隔板(图 2(b))相邻交错布置而成。设计模型过鱼池隔板间距为 2.6 m,休息池隔板间距为 5.2 m。过鱼池底坡为 2%,休息池底坡为 0,间隔 10 级过鱼池布置 1 级休息池。鱼道的设计流速为 0.4 ~ 0.8 m/s,池室设计水深为 0.6 ~ 2.5 m。根据已调查的汉江洄游性鱼类、半洄游性鱼类现状,结合兴隆水利枢纽工程特点,主要过鱼对象的过坝时段为每年的 5—8 月,主要过鱼对象为洄游性鱼类鳊、长颌鲚的亲体和成体,半洄游性鱼类草鱼、青鱼、鲢、鳙、铜鱼、鲮、鳊等的亲体和成体。取 A、B 2 种模型(图 1(b)(c))作为设计模型数值模拟计算的参照模型,池室尺寸与设计模型一致,仅隔板形式不同。A 模型由 3 孔 a 型隔板相邻隔板孔口同侧布置而成,B 模型由 2 孔式隔板(图 2(c))相邻隔板孔口异侧布置而成。图 2 为隔板尺寸详图,3 孔式 a 型隔板和 3 孔式 b 型隔板底部小孔位置相同,大孔位置相反,大孔尺寸为 100 cm×100 cm,小孔尺寸为 30 cm×30 cm;2 孔式隔板上异侧布置 2 个大孔,孔口尺寸均为 80 cm×80 cm。

2 数学模型

2.1 控制方程

本文研究的问题属于不可压缩流体的湍流流动,数值模拟选用 RNG *k-ε* 湍流模型,采用 VOF 模

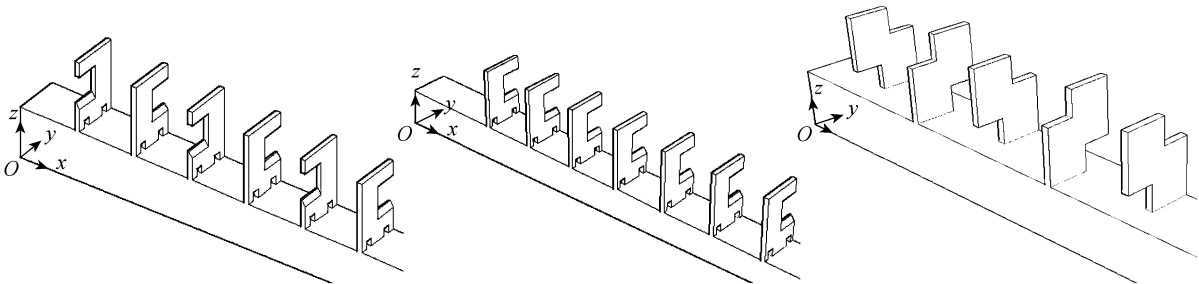


图 1 3 种模型的局部三维示意图

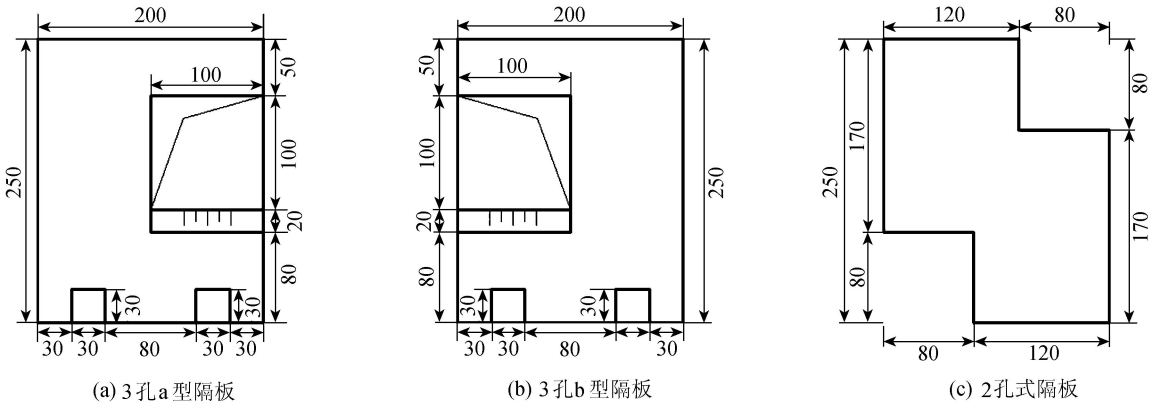


图 2 隔板尺寸(单位:cm)

型追踪自由液面,控制方程如下:

a. RNG k - ε 湍流模型方程:

$$k \text{ 方程} \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon \text{ 方程} \quad \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; k 为湍流动能; u_i 为速度张量; ε 为湍动能耗散率; μ_{eff} 为扩散系数; G_k 为湍动能 k 的产生项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 均为经验常数; α_k 、 α_ε 为常数 1.39; t 为时间; x_i 、 x_j 为坐标张量。

b. VOF 方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) + \xi \frac{F A_x u}{x} \right] = F_{\text{DIF}} + F_{\text{SOR}} \quad (3)$$

$$F_{\text{DIF}} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(U_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(U_F A_y R \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(U_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \frac{U_F A_x F}{x} \right] \quad (4)$$

$$U_F = \frac{C_p \mu}{\rho} \quad (5)$$

式中: F 为流体体积分数; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为对应 x 、 y 、 z 方向的微元面积; u 、 v 、 w 分别为对应 x 、 y 、 z 方向的流体速度; ξ 为坐标系数, 采用直角坐标时, $\xi=0$, 采用圆柱坐标时, $\xi=1$; F_{DIF} 为体积分数扩散项; F_{SOR} 为体积分数密度源项; R 为系数, 采用直角坐标时为常数; U_F 为扩散系数; C_p 为常数, 是紊流施密特数的倒数; μ 是动能消散系数。

2.2 计算区域及网格划分

所有数学模型计算区域均选取鱼道直段的一部分, 全长 88.4 m, 含 30 级过鱼池和 2 级休息池。用有限差分法对模型进行离散求解, 能大量减少网格数量, 用 VOF 方法追踪自由液面。采用六面体结构

化网格, 总网格单元数为 3 821 502 个, 网格单元平均长、宽、高均为 6 cm。对隔板处网格进行加密后, 网格单元 x 、 y 、 z 尺寸最大比例为 $y:z=1$, $x:y=x:z=1.8$, A 模型和 B 模型均采用与兴隆水利枢纽工程鱼道相同的网格尺寸和网格数量。3 种模型的局部网格如图 3 所示。

2.3 边界及初始条件

模型的进口采用流量边界, 取 $1 \text{ m}^3/\text{s}$, 进口水位为 4.26 m (模型内控制净水深为 2.40 m, 以模型底部水平面为基准面, 高程为 0 m, 进口底坡最高点高程为 1.86 m), 紊动能为 $2.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$, 紊动能耗散率为 $7.33 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$; 出口采用流速出口边界, 出口水位为 2.7 m; 出口流速为 0.208 m/s, 边墙和底部设置为固壁边界, 粗糙度为 0.8 mm。3 种模型采用相同的边界条件和初始条件。

3 计算结果分析

每种模型均取位于孔口高度中间位置的 2 个切片进行分析对比, 以顺水流方向为 x 轴正向, 鱼道宽度向左延伸方向为 y 轴正向, 垂直向上为 z 轴正向, 如图 1 所示。面向水流左侧为左侧, 右侧为右侧。主要分析鱼道内的流态、紊动能和紊动能耗散率。

3.1 流态分析

选取设计模型的一个过鱼池进行流态分析, 图 4 为设计模型过鱼池的上、下层孔口切片的流速和流线分布 (图中流线箭头只表示方向, 不表示大小, u_1 为合速度)。此过鱼池上游隔板为 3 孔 a 型隔板, 下游隔板为 3 孔 b 型隔板。由图 4 可知, 在大孔层, 水流由上游隔板大孔流入, 由下游隔板大孔流出, 主流呈“L”形分布, 忽略孔口边界处对鱼类影响不大的流速, 最大流速为 1.2 m/s, 产生在池室主流中间段, 并在此过鱼池的左侧形成回流区, 回流区最大流速为 0.75 m/s, 产生在左侧边墙处。大孔层流速大于 0.8 m/s 的区域面积占整个池室面积的 23.0%。在小孔层, 上游隔板左侧小孔水流向左偏转形成回流漩涡, 回流区最大流速为 0.6 m/s, 右侧小孔水流受上方

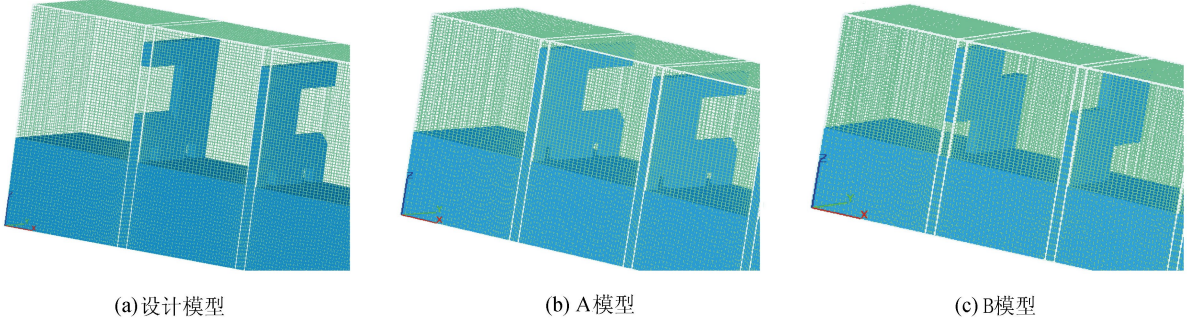


图 3 3 种模型局部网格

大孔水流影响产生分流现象,向左偏转并分为2股,分别流向下游隔板的2小孔,小孔的流速云图呈带状分布,最大流速产生在孔口处。上游隔板左、右2小孔的最大流速分别为1.35 m/s、1.20 m/s;下游隔板2小孔的最大流速均为1.35 m/s。小孔层流大于0.8 m/s的区域面积占整个池室面积的11.5%。

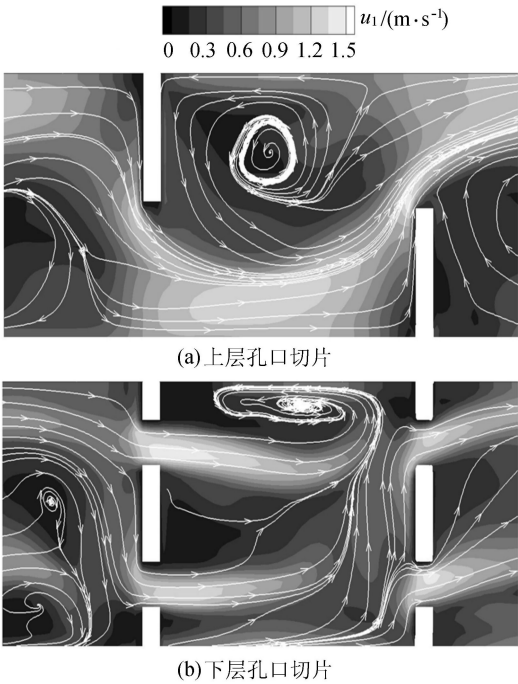


图4 设计模型流速和流线

图5为A模型上、下层孔口切片的流速和流线分布。由图5可知,大孔层可以分成2个流速区,大孔侧为直流区,流速大于0.80 m/s的区域面积为整个池室面积的1/2,流速在0.75~1.20 m/s范围内。

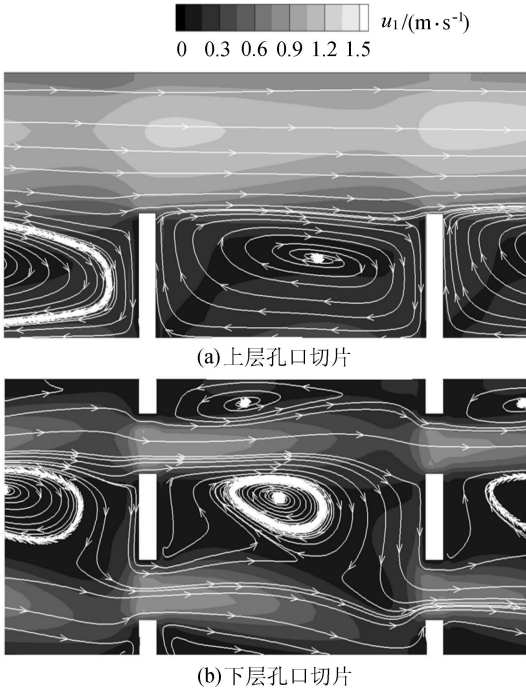


图5 A模型流速和流线

另一侧为顺时针涡流区,流速不大于0.30 m/s。小孔层分成4个流速区,从左至右依次为涡流区、直流区、涡流区、直流区。涡流区流速不大于0.15 m/s,左侧的小孔水流受大孔水流影响存在分流现象,分成2股分别流向下游隔板2小孔,最大流速产生在孔口处,上游隔板2小孔的最大流速均为0.90 m/s,下游隔板2小孔的最大流速均为0.75 m/s。小孔层流速大于0.80 m/s的区域面积占整个池室面积的11.5%。

图6为B模型上、下层孔口切片的流速和流线分布。由图6可知,上孔层主流呈“L”形分布,忽略孔口边界处对鱼类影响不大的流速,最大流速为1.20 m/s,产生在池室右侧中间主流处,并在左侧形成回流区,回流区最大流速为0.30 m/s。上孔层流速大于0.80 m/s的区域面积占整个池室面积的31.0%。下孔层主流亦呈“L”形分布,与上孔层类似,忽略孔口边界处对鱼类影响不大的流速,最大流速为1.05 m/s,回流区最大流速为0.30 m/s。下孔层流速大于0.80 m/s的区域面积占整个池室面积的15.4%。

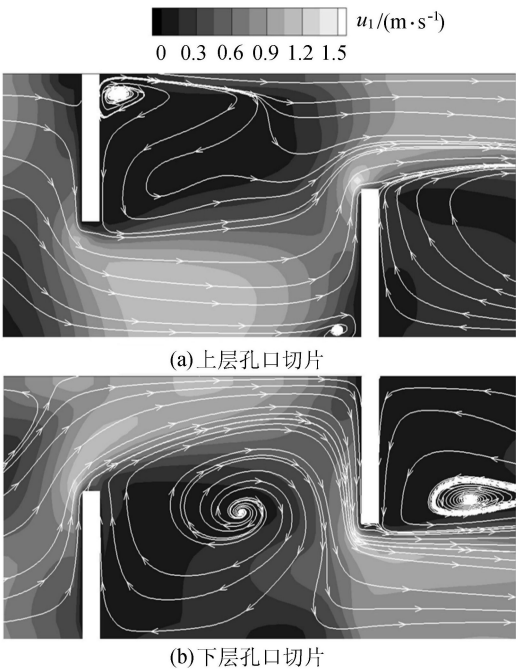


图6 B模型流速和流线

由以上分析可知,设计模型和A模型相比,就大流速区(流速大于0.80 m/s)的面积而言,相邻隔板孔口异侧布置(设计模型)比同侧布置(A模型)小,A模型的大流速区面积为整个池室的1/2,不利于鱼类的上溯;从最大流速方面看,大孔层流速相差不大,小孔层设计模型的最大流速大于A模型的最大流速。B模型上孔层大流速区面积较比A模型小,比设计模型稍大;下孔层大流速区面积与设计模型相差不大,但设计模型下孔层上游隔板左、右2小

孔的最大流速分别为 1.35 m/s、1.20 m/s,下游隔板 2 小孔的最大流速均为 1.35 m/s,不利于鱼类上溯。因此,B 模型流态较好。

3.2 消能效果对比

各种水域中广泛存在不同程度的紊流流态(如各种漩涡、小尺度紊动、回流等),紊流剪切应力会对鱼类造成各种各样的伤害,如击坏眼睛,扭伤身体,使鱼类迷失方向,导致平衡能力下降,不易躲避其他肉食动物的捕食等^[10],因此,紊动能及紊动能耗散率是鱼道水力特性研究的重要指标。紊动能是反映水流因紊动而引起的能量损失的重要指标,紊动能耗散率是紊动能转化成分子热运动动能的速率,紊动能不变,紊动能耗散率越大,消能效果越好。由表 1 可知,兴隆水利枢纽工程鱼道设计模型与 A 模型相比,上层孔口同侧布置(A 模型)紊动能为 0.0940~0.1150 m²/s²,是异侧布置(设计模型)的 9 倍多,但紊动能耗散率比异侧布置小;下层孔 2 种指标相差不大,说明相邻隔板孔口异侧布置比同侧布置消能效果好。A 模型与 B 模型相比,上孔层紊动能大小相近,但紊动能耗散率相差较大,B 模型的紊动能耗散率约是 A 模型的 2 倍,B 模型下层孔口水流受上层孔口水流影响,紊动能比上层孔口大,紊动能耗散率也大。

表 1 3 种模型紊动能及紊动能耗散率最大值

模型	切片位置	紊动能/ (m ² ·s ⁻²)	紊动能耗散率/ (m ² ·s ⁻³)
设计模型	上层孔口	0.0105~0.0125	0.070~0.090
	下层孔口	0.0080~0.0140	0.040~0.080
A 模型	上层孔口	0.0940~0.1150	0.050~0.060
	下层孔口	0.0500~0.0700	0.040~0.100
B 模型	上层孔口	0.0950	0.080~0.141
	下层孔口	0.1150~0.1910	0.111~0.191

4 结 论

- a. 兴隆水利枢纽工程鱼道结构设计较优,选择了较好的孔口尺寸和孔口位置,使紊动能较小,紊动能耗散率比 A 模型大,消能效果良好。
- b. A 模型流态较顺直,但大孔层流速大于 0.8 m/s 的区域面积约占整个过鱼池面积的 1/2,不利于鱼类上溯。小孔层大流速区面积也比兴隆水利枢纽工程鱼道小孔层的大。
- c. 从流速方面看,B 模型下孔层优于设计模型;从消能效果上看,B 模型上孔层优于设计模型。
- d. 相邻隔板孔口异侧布置比同侧布置消能效果好,大流速区(>0.80 m/s)面积小,可以减小鱼类上溯的流速障碍;上、下层孔口水流相互影响,下层

布置大孔比布置小孔流态好;堰流比淹没出流流态稳定。

参考文献:

[1] 刘志雄,周赤,黄明海. 鱼道应用现状和研究进展[J]. 长江科学院院报,2010,27(4):28-31. (LIU Zhixiong, ZHOU Chi, HUANG Minghai. Situation and development of fishway research and application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(4): 28-31. (in Chinese))

[2] KAMULA R, BÄRTHEL J. Effects of modifications on the hydraulics of Denil fishways [J]. Boreal environment research, 2000,5(1): 67-79.

[3] RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Hydraulics of Denil fishways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(9):1219-1233.

[4] 王兴勇,郭军. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 222-228. (WANG Xingyong, GUO Jun. Brief review on research and construction of fishways at home and abroad[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, 3(3): 222-228. (in Chinese))

[5] PUERTAS J, PENA L, TEJEIRO T. Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2004, 130(1): 10-23.

[6] EAD S A, KATOPODIS C. Flow regimes and structure in pool and weir fishways [J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004. 3(5): 379-390.

[7] YAGCI O. Hydraulic aspects of pool-weir fishways as ecologically friendly water structure [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(1): 36-46.

[8] 徐体兵,孙双科. 竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1386-1391. (XU Tibing, SUN Shuangke. Numerical simulation of the flow structure in vertical slot fishway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1386-1391. (in Chinese))

[9] 罗小凤,李嘉. 竖缝式鱼道结构及水力特性研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 50-54. (LUO Xiaofeng, LI Jia. Study on structure and hydraulic characteristics of vertical-slot fishway [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10): 50-54. (in Chinese))

[10] 汪红波,王从铎,刘德富,等. 横隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 65-68. (WANG Hongbo, WANG Congfeng, LIU Defu. et al. Study on numerical simulation of hydraulic characteristics of transverse diaphragm plate fishway [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 65-68. (in Chinese))

(收稿日期:2012-11-20 编辑:熊水斌)