

竖缝位置对竖缝式鱼道水力特性的影响

赵彬如¹, 戴会超¹, 戎贵文², 袁岳¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 为了分析竖缝位置对竖缝式鱼道池室内水力特性的影响, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和速度-压力耦合 SIMPLE 算法对不同工况的鱼道进行了数值模拟。模拟结果表明: 竖缝位置对主流的形态、主流流速的衰减及竖缝处流速分布影响不大; 竖缝位置改变了主流区在池室内的位置, 进而影响回流区的分布、大小和流场, 竖缝位置距池室侧壁为池室宽度的 25% ~ 35% 时, 池室内水流流态较合理, 能够显著提高过鱼效率。

关键词: 竖缝式鱼道; 竖缝位置; 水力特性; 数值模拟

中图分类号: TV135.1; S956.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)05-0069-05

Effect of slot position on hydraulic characteristics of vertical slot fishway//ZHAO Binru¹, DAI Huichao¹, RONG Guiwen², YUAN Yue¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to investigate the effects of slot position on the hydraulic characteristics of a vertical slot fishway pool, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and velocity-pressure coupling SIMPLE algorithm were used to numerically simulate the fishway under different working conditions. The results indicate that the slot position rarely influence the pattern of mainstream flow, the attenuation of velocity along main stream, and the velocity distribution at the vertical slot section. The slot position affects the distribution, area, and flow field of the recirculation zone by changing the location of the mainstream zone. When the distance between the vertical slot and the sidewall is 25% to 35% of the pool width, the flow pattern in the fishway is reasonable and the efficiency of fish passing is significantly improved.

Key words: vertical slot fishway; vertical slot position; hydraulic characteristics; numerical simulation

修建水库大坝会切断河流的水文循环和生态联系, 使得河流自然生态功能严重退化, 这对需要洄游完成繁殖的鱼类会产生巨大的危害^[1]。鱼道作为典型的过鱼建筑物, 对减缓大坝的阻隔影响、恢复鱼类洄游路径有重要作用, 其中, 竖缝式鱼道因其结构简单、过鱼效率高、对上下游水位变动的自适应性等技术特点, 在实际工程中得到了广泛应用。竖缝式鱼道利用多级首尾相连、坡度较缓的池室连通上下游水体, 上游来水通过竖缝流入下一级池室, 水流流经竖缝时形成射流, 并在池室内经过扩散、对冲作用进行消能, 为鱼类上溯提供合适的水流条件。竖缝式鱼道的过鱼效率与池室内的水流特性有着密切关系, 而鱼道的细部结构对池室的水流特性有重要影响。

国内外学者对不同结构形式竖缝式鱼道的水流特性做了大量研究工作。Rajaratnam 等^[2-4]对不同

结构形式的竖缝式鱼道开展了研究, 发现当池室长宽比为 1.25 时, 鱼道池室内流态稳定, 存在可供鱼类休息的较大回流区; Wu 等^[5]通过试验研究发现, 当竖缝式鱼道的坡度小于 5% 时, 速度场表现出水平二维特征, 当坡度为 10% 和 20% 时, 不同水深断面的流态呈现差异, 表现为三维特征; Thiem 等^[6-7]在研究竖缝式鱼道的过鱼能力时, 指出加拿大的 Vianney-Legendre 鱼道是世界上为数不多的成功通过鲟鱼的竖缝式鱼道之一, 并通过放鱼试验, 对 Vianney-Legendre 鱼道的过鱼效率及通过时间进行了原型观测; Marriner 等^[8-9]采用数值模拟与原型观测相结合的方法研究了加拿大 Vianney-Legendre 竖缝式鱼道的水力特性, 得出鱼道内部 180° 转弯段严重影响了鱼道过鱼效率的结论, 并给出了相应改进措施, 之后又对不同结构形式的鱼道进行了数值模拟, 表明鱼道坡度是影响过鱼效率的关键因素。国

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2016B42014); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1233)

作者简介: 赵彬如(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事环境水力学研究。E-mail: binruzha@163.com

内学者的研究主要有:罗小凤等^[10]分析了竖缝式鱼道导角大小及导板长度对鱼道内流场的影响,发现导角越大,竖缝射流的衰减速度越快,主流轨迹的弯曲程度也越大,但导板长度基本上对主流的扩散及衰减没有影响;边永欢等^[11-12]对竖缝式鱼道 90°、180°转弯段水力特性进行了计算研究,得出增设整流导板可改善转弯段水力特性的结论;徐体兵等^[13]研究了竖缝式鱼道池室的墩头长度对水流流态的影响,结果表明隔板墩头的设置对水流结构的影响有限,基本可以忽略;张国强等^[14]研究了竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响,并给出了 b/B (b 为竖缝宽度, B 为池室宽度) 的合理取值范围为 0.15 ~ 0.20。

已有研究主要关注鱼道池室的长宽比、导角大小、竖缝宽度及鱼道坡度等对水流特性的影响,在竖缝式鱼道水流特性的研究成果中,竖缝位置对鱼道水力特性影响的报道很少。本文采用数值模拟方法系统研究竖缝位置对竖缝式鱼道水力特性的影响,并探讨竖缝位置距鱼道侧壁的合理取值范围。

1 数学模型

已有研究表明,当竖缝式鱼道的坡度小于 5% 时,其流态具有典型的二元特性^[5, 13-15],本文研究的鱼道坡度为 2%,故采用 Fluent 软件建立二维模型来模拟竖缝式鱼道的水流特性。

1.1 控制方程

数值模拟采用能够更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大流动的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型控制方程的连续方程、动量方程、 k 方程和 ε 方程分别为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u_i u_j \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\nu_t S_{ij} S_{ij} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - R + 2c_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S_{ij} S_{ij} - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: u_i 、 u_j 为时均速度, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; p 为时均压强, Pa; ν 为分子黏性系数, N·m/s; k 为

湍动能, m²/s²; ν_t 为涡黏性系数, m²/s²; ε 为湍动能耗散率, m²/s²; S_{ij} 为时均应变率, s⁻¹; R 为 ε 方程的一附加项, 代表时均应变率对 ε 的影响; α_k 、 α_ε 、 c_1 、 c_2 为经验参数, 分别取 1.39、1.39、1.42、1.68。 $\overline{u_i u_j}$ 、 ν_t 、 S_{ij} 、 R 的具体表达式如下:

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\nu_t = C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$R = 2\nu S_{ij} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = \frac{C_u \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^3}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (8)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 函数; u'_i 为脉动速度, m/s; η 为湍流时间尺度与平均流时间尺度之比, $\eta = Sk/\varepsilon$, S 为应变率张量范数, $S = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}}$; η_0 为 η 在均匀剪切流中典型值, 取 4.38; C_u 、 β 为经验参数, 分别取 0.0845 和 0.012。

1.2 网格划分与边界条件

数学模型中布置了 5 级常规水池, 如图 1 所示, 池室长 $L=2.5$ m, 池室宽 $B=2$ m, 竖缝宽度 $b=0.3$ m, 竖缝长度 $a=0.1$ m, 导角 $\theta=45^\circ$, 导板和隔板的宽度均为 0.2 m, l 为竖缝中心到池室右侧侧壁的距离, 并用 $2l/B$ 表示竖缝在池室中的横向位置。

对鱼道计算区域进行网格划分时, 在相对设置的隔板迎水面与导板背水面之间的部分(除竖缝部分外)采用三角形网格, 网格边长为 0.05 m, 其余部分采用四边形网格, 其中池室内部网格边长为 0.05 m, 竖缝部分网格边长为 0.02 m。

鱼道进口断面距第 1 池室 2.2 m, 出口断面距第 5 池室 2.2 m, 进出口边界均为速度进口, 进口断面设定恒定入流速度为 0.15 m/s, 出口断面设定恒定出流速度为 0.15 m/s。鱼道单元的壁面边界法向采用不可入边界条件, 即其法向流速为零, 切向采用壁面函数法来处理。

1.3 计算方法

采用控制体积法对偏微分方程组进行离散, 压力项采用 Body Force Weighted 格式离散, 动量和湍

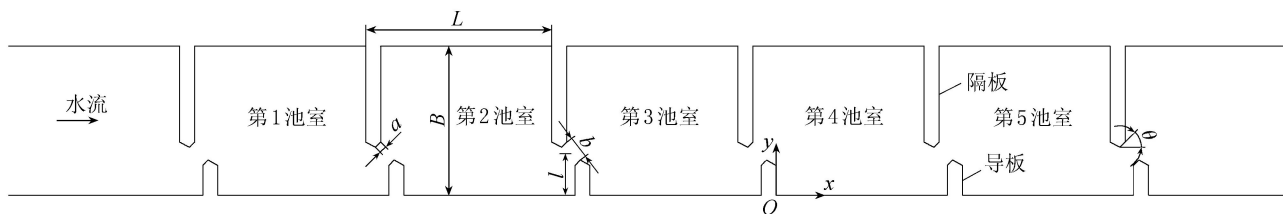


图 1 竖缝式鱼道平面布置

流项采用 QUICK 格式离散;速度-压力耦合计算采用 SIMPLE 算法;为防止迭代过程数值发散和不稳定,对动量方程、标量输运方程采用了欠松弛技术;迭代计算的残差各项数值均为 10^{-5} 以下;时间步长取决于网格的空间尺寸及流速大小,本文采用 0.01 s。

1.4 模型验证

采用文献[16]的物理模型和试验数据对本文建立的上述数学模型(以下简称本文模型)进行验证。为避免进出口边界条件对池室内水流流态的影响,以第3池室作为研究对象,提取池室中间横断面上各节点的流速值,将数值计算结果与试验测量数据进行对比分析,结果如图2所示,可见本文模型数值计算结果与物理模型试验数据吻合良好,说明本文模型能较好地模拟竖缝式鱼道的水力特性,可用于研究不同位置布置相同竖缝时池室内的水流流速、流态等水力特性。

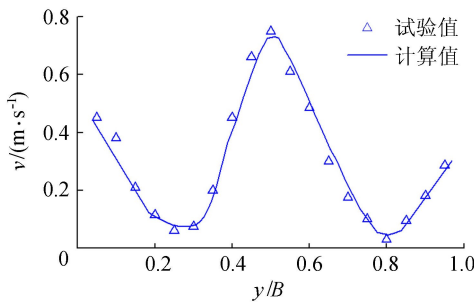


图2 鱼道池室中间横断面上流速试验值与模型计算值

2 竖缝位置对池室内水流流态的影响

2.1 流场结构分区

竖缝式鱼道的常规水池内存在两种水流流态,分别为位于中间位置的主流区和位于两侧的回流区。水流经竖缝以射流形式流入池室,射流断面沿程扩散,在接近下游竖缝时断面收缩,故流速在纵向上先减小后增大,而横向上流速从中心向两侧逐渐减小,将射流区域称为主流区;位于主流区两侧的水流分别以相反方向缓慢流动,将这两部分区域统称为回流区,如图3所示。

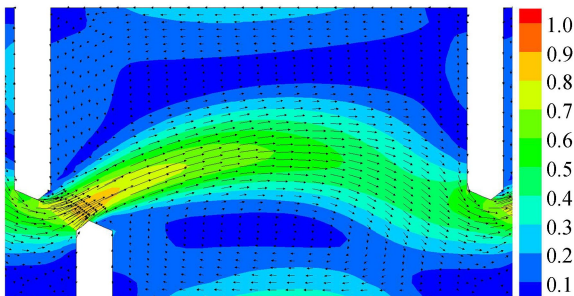


图3 鱼道池室内水流流场分布(单位:m/s)

竖缝位置对主流区的影响表现在主流区的位置

上,主流区在横向上的位置与竖缝位置相关,基本处在竖缝位置附近。竖缝位置对回流区的影响表现在回流区的形态上,具体可以分为以下几类:

a. 当 $0.3 \leq 2l/B < 0.5$ 时,主流区水流较平顺,流线较短;主流区左右两侧回流区范围相差较大,隔板之间的回流区明显大于导板之间的回流区,典型水流流态见图4(a)。

b. 当 $0.5 \leq 2l/B < 0.8$ 时,主流区水流偏转适中,呈现“S”形流线;主流区左右两侧回流区大小相当,典型水流流态见图4(b)。

c. 当 $0.8 \leq 2l/B \leq 0.9$ 时,主流区水流偏转较大,流线较长,在 $2l/B = 0.9$ 时,主流会在池室中间碰触到边壁,沿边壁流动一段距离后向右偏转进入下一级池室;主流区左右两侧回流区范围相差较大,导板之间的回流区明显大于隔板之间的回流区,典型水流流态见图4(c)。

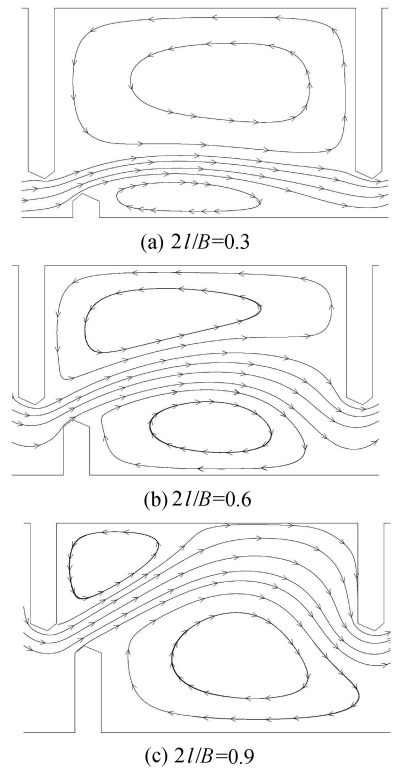


图4 不同竖缝位置时鱼道池室内的典型水流流态

2.2 主流区水流特性

主流区的位置及流速分布是影响鱼类成功上溯的关键因素。根据主流区的位置不同,鱼道池室内的水流特性大致分为3类:主流区偏向、主流区居中和主流区贴壁。考虑到贴壁流的不利流态会影响鱼类上溯,故在鱼道设计中应避免主流区出现贴壁流的不利流态,根据观察发现,最大流速位置分布曲线(最大流速指各横断面上的最大流速)与主流区中心线基本重合,故可通过最大流速位置分布曲线的变化规律来研究竖缝位置对主流区位置的影响;洄

游鱼类在竖缝式鱼道中沿主流区上溯,主流区的流速分布及流速衰减速度与鱼类上溯过程中的体能消耗、上溯时间及是否成功上溯有着密切关系,一般而言,主流区的流速应大于洄游鱼类的感应流速,同时应保证池室内主流区最大流速不超过鱼类运动时的爆发游泳速度,考虑到主流区射流断面中心位置流速始终保持断面最大值,且射流断面中心位置的流速能反映出主流区在该断面处的流速值量级,故用最大流速沿程变化曲线来反映主流区的流速分布。

图5、图6分别给出了不同竖缝位置时的主流区最大流速位置分布曲线及最大流速沿程变化曲线,其中 v_{max} 为各横断面上最大流速, V_{max} 为所有横断面上最大流速的最大值。

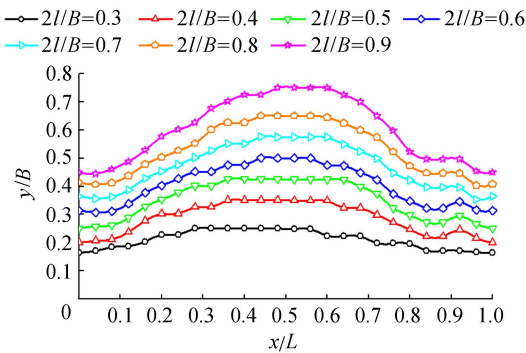


图5 主流区最大流速位置分布曲线

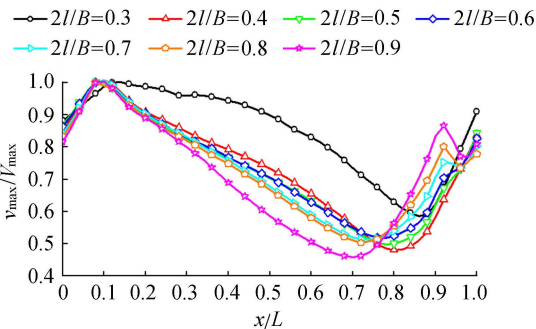


图6 主流区最大流速沿程变化曲线

由图5可知:①横向上,主流区最大流速所在位置在竖缝位置附近。②不同竖缝位置时的主流区最大流速位置分布曲线相似,都是在 $x/L=0.08$ 左右向池室左侧偏转,即主流流经竖缝后顺着导板的墩头向池室左侧偏转,在中间段最大流速位置分布曲线偏转达到最大且较顺直,在 $x/L=0.64$ 左右轨迹线向池室右侧偏转进入下一级池室。③竖缝位置不同,最大流速位置分布曲线进入顺直段的位置不同,当 $2l/B=0.3$ 时,曲线在 $x/L=0.28$ 处进入顺直段;当 $2l/B=0.4、0.5$ 时,曲线在 $x/L=0.36$ 处进入顺直段;当 $2l/B=0.6、0.7、0.8$ 时,曲线在 $x/L=0.44$ 处进入顺直段;当 $2l/B=0.9$ 时,曲线在 $x/L=0.48$ 处进入顺直段,即竖缝位置越靠近中间,最大流速位置

分布曲线进入顺直段的距离越远,顺直段长度越小。④当 $2l/B=0.9$ 时,曲线在 $x/L=0.48 \sim 0.64$ 范围内 y/B 接近0.8,主流区出现贴壁流的不利流态。

由图6可知:①竖缝位置的变化对最大流速沿程变化基本没有影响,这与罗小凤等^[10]得出的结论一致,最大流速沿程呈现先增大后减小再增大的变化规律,流速沿程衰减效果显著,且池室内最大流速出现在 $x/L=0.08$ 处,即竖缝偏下游处。②当 $0.4 \leq 2l/B \leq 0.9$ 时,主流区最大流速沿程变化曲线基本趋于一致,其中当 $0.7 \leq 2l/B \leq 0.9$ 时,最大流速曲线在 $x/L=0.92$ 处出现一个峰值,这是因为当 $0.7 \leq 2l/B \leq 0.9$ 时,主流偏向池室左侧流动,在进入下一级池室前,受隔板的阻挡作用,主流流线发生弯曲并开始密集,进而导致隔板处流速增大;当 $2l/B=0.9$ 时,主流在前半段与周围水体掺混较强,故速度衰减较快,之后主流贴近边壁流动,由于受到束缚流速开始增大,如图4(c)所示。③当 $2l/B=0.3$ 时,最大流速衰减较慢,这是由于当 $2l/B=0.3$ 时,主流平顺,与周围水体掺混较弱,无法充分消能。

结合鱼类对主流区水流流态的需求,考虑到 $2l/B=0.9$ 时的贴壁流流态及 $2l/B=0.3$ 时流速衰减较慢,竖缝位置 $2l/B$ 宜取0.4~0.8。

2.3 回流区水流特性

回流区流速较缓,可在鱼类上溯过程中提供休息空间,为保证鱼类可以在回流区较好地休息且不影响正常上溯,回流区内的流速需小于鱼类的感应流速,否则鱼类会因自身逆流而上的特性而在回流区内游动,不仅不利于休息,还会影响鱼类的正常上溯;同时回流区不宜过大,因为过大的回流区会使鱼类迷失方向而无法游出该区域,影响过鱼效率。以下对不同竖缝位置时回流区水流特性进行定量分析,回流区参数如表1所示。

表1 回流区参数

竖缝位置	回流区位置	L_c/L	B_c/B	L_c/B_c	$L_c B_c/LB$	$v_{cmax}/(m \cdot s^{-1})$
$2l/B=0.3$	左侧	0.83	0.63	1.65	0.52	0.40
	右侧	0.44	0.14	3.96	0.06	0.22
$2l/B=0.4$	左侧	0.83	0.53	1.94	0.44	0.35
	右侧	0.46	0.20	2.83	0.09	0.21
$2l/B=0.5$	左侧	0.82	0.39	2.59	0.32	0.29
	右侧	0.59	0.32	2.29	0.19	0.29
$2l/B=0.6$	左侧	0.80	0.36	2.83	0.29	0.30
	右侧	0.62	0.36	2.15	0.22	0.30
$2l/B=0.7$	左侧	0.66	0.27	3.12	0.18	0.32
	右侧	0.71	0.44	2.02	0.31	0.32
$2l/B=0.8$	左侧	0.37	0.27	1.71	0.10	0.20
	右侧	0.72	0.53	1.71	0.38	0.37
$2l/B=0.9$	左侧	0.28	0.28	1.26	0.08	0.23
	右侧	0.73	0.59	1.55	0.43	0.40

注: $L_c、B_c$ 分别为回流区长度和宽度(分别用回流区的最大长度与宽度表示); v_{cmax} 为回流区最大流速。

由表 1 可见:①竖缝位置越靠近中间,左侧回流区越小、右侧回流区越大,回流区影响域 $L_c B_c / LB$ 的范围为 0.06 ~ 0.52。②当 $0.3 \leq 2l/B \leq 0.4$ 和 $0.8 \leq 2l/B \leq 0.9$ 时,左右两侧回流区范围相差较大,大回流区约是小回流区的 4 ~ 8 倍;当 $0.5 \leq 2l/B \leq 0.7$ 时,左右两侧回流区大小相当,大回流区约是小回流区的 1.5 倍。③当 $0.3 \leq 2l/B \leq 0.7$ 时,竖缝位置越靠近中间,左侧回流区的长宽比 L_c / B_c 越大,即回流区形状越扁平;当 $2l/B \geq 0.8$ 时,左侧回流区受主流影响位于池室前半段, L_c 变小,故 L_c / B_c 开始变小;右侧回流区的 L_c / B_c 随着 $2l/B$ 的增大而减小。④左右两侧回流区的最大流速与回流区大小有关,回流区大小相当,最大流速值也相当;反之,回流区相差较大,最大流速值也相差较大。

由于文本不针对具体鱼类,故只从回流区的流速和范围不宜过大考虑,竖缝位置 $2l/B$ 宜取 0.5 ~ 0.7。

2.4 竖缝断面处流速分布

竖缝断面处水流流动相对急剧,鱼类需以爆发游泳速度穿越竖缝,故竖缝断面的水力特性研究对提高过鱼效率具有重要意义。为分析竖缝位置对竖缝处流速分布的影响,图 7 给出了竖缝中心断面流速分布曲线(图中 v_a 为竖缝中心断面的平均流速, v' 为竖缝中心断面上距断面侧边距离为 b' 位置处的速度)。结果表明:竖缝位置对竖缝处流速分布没有影响,不同竖缝位置时,竖缝中心断面流速分布曲线相似,均呈现中间大、两侧小的特点,低流速区为游泳能力弱的鱼类提供了上溯通道。当 $2l/B = 0.3$ 时,竖缝左侧的 v'/v_a 较其他位置偏大,这是由于 $2l/B = 0.3$ 时,水流经过竖缝时较平顺,流线分布均匀。

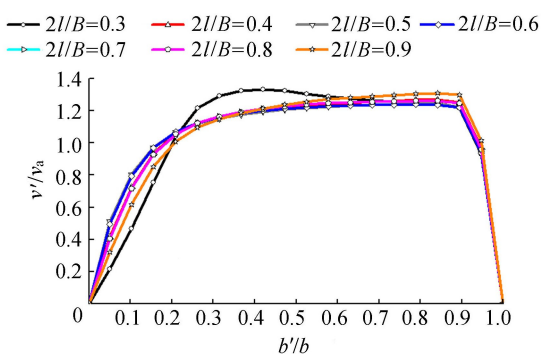


图 7 竖缝中心断面流速分布曲线

3 结论

a. 竖缝位置改变了主流区的位置,当 $0.4 \leq 2l/B \leq 0.8$ 时,竖缝位置对主流区的水流形态基本没有影响,在 $2l/B > 0.8$ 后,主流区会出现贴壁流的不利流态。

b. 竖缝位置对回流区的影响体现在回流区的分布、大小及流速 3 个方面,考虑回流区的流速和范

围不宜过大,竖缝位置 $2l/B$ 宜取 0.5 ~ 0.7。

c. 竖缝位置对竖缝处流速分布影响不明显,不同竖缝位置时,竖缝中心断面流速分布曲线相似,均呈现中间大、两侧小的特点。

d. 竖缝式鱼道竖缝位置的最佳取值范围宜为 $2l/B = 0.5 \sim 0.7$,即竖缝位置距池室侧壁为池室宽度的 25% ~ 35% 时,池室内水流流态更合理,可进一步提高竖缝式鱼道的过鱼效率。

参考文献:

- [1] 龙笛,潘巍. 河流保护与生态修复[J]. 水利水电科技进展,2006,26(2):21-25. (LONG Di, PAN Wei. Stream protection and ecological rehabilitation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(2):21-25. (in Chinese))
- [2] RAJARATNAM N, VAN DER VINNE G, KATOPODIS C. Hydraulics of vertical slot fishways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(10):909-927.
- [3] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, SOLANKI S. New designs for vertical slot fishways [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19(3):402-414.
- [4] LIU M, RAJARATNAM N, ZHU D Z. Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(8):765-777.
- [5] WU S, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Structure of flow in vertical slot fishway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(4):351-360.
- [6] THIEM J D, BINDER T R, DAWSON J W, et al. Behavior and passage success of upriver-migrating lake sturgeon *Acipenser fulvescens* in a vertical slot fishway on the Richelieu River, Quebec, Canada [J]. Endangered Species Research, 2011, 15(1):1-11.
- [7] THIEM J D, BINDER T R, DUMONT P, et al. Multispecies fish passage behaviour in a vertical slot fishway on the Richelieu River, Quebec, Canada [J]. River Research and Applications, 2013, 29(5):582-592.
- [8] MARRINER B A, BAKI A B M, ZHU D Z, et al. Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway [J]. Ecological Engineering, 2014, 63(1):88-101.
- [9] MARRINER B A, BAKI A B M, ZHU D Z, et al. The hydraulics of a vertical slot fishway: a case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada [J]. Ecological Engineering, 2016, 90:190-202.
- [10] 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))

(下转第 83 页)

- (6):27-30. (ZHU Min, DENG Huafeng, XU Xiaoliang. 3D stress-deformation analysis of CFRDs based on sub-model method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(6):27-30. (in Chinese))
- [6] 徐泽平, 邵宇, 胡本雄, 等. 狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 30-33. (XU Zeping, SHAO Yu, HU Benxiong, et al. Study on stress and deformation properties of high concrete face rock-fill dam in narrow valley [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(5): 30-33. (in Chinese))
- [7] 朱晟, 闻世强, 黄亚梅. 一座200m级高面板坝的变形和应力计算研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 631-634. (ZHU Sheng, WEN Shiqiang, HUANG Yamei. Deformation and stress calculation for a 200 m high CFRD [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(6): 631-634. (in Chinese))
- [8] 朱晟, 欧红光, 殷彦高. 狭窄河谷地形对200m级高面板坝变形和应力的影响研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 73-77. (ZHU Sheng, OU Hongguang, YIN Yangao. Influence of narrow-valley formation on the mechanics property of the 200 m high CFRD [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(4): 73-77. (in Chinese))
- [9] 党发宁, 杨超, 薛海滨, 等. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 435-442. (DANG Faning, YANG Chao, XUE Haibin, et al. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 435-442. (in Chinese))
- [10] 狄文龙, 屈楚杰, 蒋宽鹏. 狭窄河谷高面板堆石坝拱效应计算分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(6): 7-12. (DI Wenlong, QU Chujie, JIANG Kuanpeng. Analysis of arch effect of high CFRD built in narrow valley [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(6): 7-12. (in Chinese))
- [11] 程嵩, 张嘎, 张建民, 等. 河谷地形对面板堆石坝应力位移影响的分析[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 53-58. (CHENG Song, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, et al. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5): 53-58. (in Chinese))
- [12] 丁遥, 沈振中, 李琛亮, 等. 复杂地形对面板坝面板应力和变形的影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 33-35. (DING Yao, SHEN Zhenzhong, LI Chenliang, et al. Effect of complex topography on deformation and stress of face slab for a CFRD [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 33-35. (in Chinese))
- [13] 王瑞骏, 刘伟, 卢志男. 河谷宽高比对面板堆石坝应力变形的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 227-234. (WANG Ruijun, LIU Wei, LU Zhinan. Effect of valley width/height ratio on stress deformation of rock-fill dam [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2014, 42(6): 227-234. (in Chinese))
- [14] 周伟, 常晓林, 胡颖, 等. 考虑拱效应的高面板堆石坝流变收敛机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 604-608. (ZHOU Wei, CHANG Xiaolin, HU Ying, et al. Study of creep convergence mechanism of high concrete face rockfill dam with consideration of rockfill arch action [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 604-608. (in Chinese))
- [15] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报, 2001, 32(8): 20-25. (KONG Xianjing, LOU Shulian, ZOU Degao, et al. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of rockfill material for dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(8): 20-25. (in Chinese))
- [16] 周奕琦, 任华春. 某抽水蓄能电站上库面板坝极限抗震能力研究[J]. 水力发电, 2015, 41(11): 59-63. (ZHOU Yiqi, REN Huachun. Study on ultimate seismic capacity of CFRD for the upper reservoir of a pumped storage power station [J]. Water Power, 2015, 41(11): 59-63. (in Chinese))

(收稿日期:2016-09-05 编辑:郑孝宇)

(上接第73页)

- [11] 边永欢, 孙双科, 张国强, 等. 竖缝式鱼道90°转弯段水力特性的数值模拟[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(1): 53-59. (BIAN Yonghuan, SUN Shuangke, ZHANG Guoqiang, et al. Numerical simulation of flow in the 90° turn of a vertical slot fishway [J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(1): 53-59. (in Chinese))
- [12] 边永欢, 孙双科, 郑铁刚, 等. 竖缝式鱼道180°转弯段的水力特性与改进研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(1): 90-96. (BIAN Yonghuan, SUN Shuangke, ZHENG Tiegang, et al. Study on hydraulic characteristic and improvement of flow in 180° turning pools for vertical slot fishways [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(1): 90-96. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 张国强, 孙双科. 竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 151-156. (ZHANG Guoqiang, SUN Shuangke. Effect of slot width on the flow structure of vertical slot fishway [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 151-156. (in Chinese))
- [15] 曹庆磊, 杨文俊, 陈辉. 异侧竖缝式鱼道水力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 698-703. (CAO Qinglei, YANG Wenjun, CHEN Hui. Experimental study on hydraulic characteristics of vertical slot fishway from side to side [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(6): 698-703. (in Chinese))
- [16] 边永欢. 竖缝式鱼道若干水力学问题研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (收稿日期:2016-08-28 编辑:熊水斌)