文章编号:1672-3031(2017)05-0389-08

竖缝式鱼道细部结构改进研究

张 超,孙双科,李广宁
(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

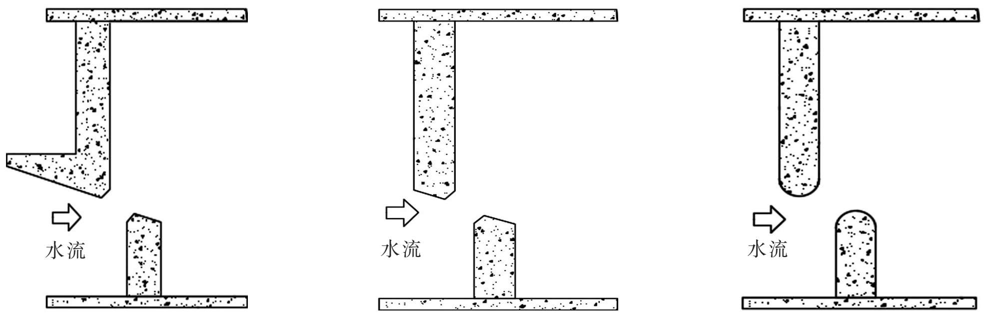
摘要:本文针对鱼道细部结构进行改进研究,提出了流线型墩头的布置型式。采用数值模拟的方法对不同墩头型式的鱼道进行水力特性对比分析,并对流线型墩头的鱼道进行试验研究。结果表明:与折线型墩头相比,流线型墩头不会导致鱼道水池内水流结构的显著改变;主流横向偏转程度有所减缓,横向扩散加大,有利于主流流速的沿程衰减;而竖缝控制断面局部水头损失减少,需采用较小的鱼道底坡以控制竖缝断面流速。鉴于流线型墩头能避免折线型墩头对上溯鱼类可能造成的物理伤害,条件允许时可考虑采用。

关键词:竖缝式鱼道;数值模拟;流线型墩头;水力学特性
中图分类号:TV135 **文献标识码**:A **doi**:10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.05.010

1 研究背景

竖缝式鱼道是鱼道的主要布置类型之一,其具有结构简单,流场稳定、可适应上下游水位大幅变动等优点,在国内外得到了广泛的应用[1],如Arto-Blanca水电站鱼道、北京上庄鱼道、长洲鱼道、枕头坝鱼道[2-5]等工程。

国内外的诸多学者对鱼道的内部结构设计及其水力特性进行了系列研究[1,6-9]。Jeronimo Puertas等[7]指出影响鱼道的水力学特性的因素主要包括池室尺寸、形状、竖缝宽度、墩头型式和底坡等。Rajaratnam等[8-9]对18种不同型式竖缝式鱼道进行了试验研究,其中部分鱼道的隔板墩头采用了钩状结构,如图1(a)。该钩状结构墩头在国内外鱼道工程中应用广泛,如Dordogne河Mauzac电站鱼道、Rhine河Iffezheim电站鱼道[10]、三湾水利工程鱼道[11]等,但是在实际运行中发现该结构易产生漂浮物滞留与泥沙淤积等问题。为此,徐体兵等[1]提出了一种墩头无钩状结构的鱼道隔板体型如图1(b),并系统研究了该体型下鱼道常规水池长宽比、导板长度、导向角度对水流结构的影响,该墩头型式下的鱼道能有效减少泥沙淤积与漂浮物滞留等问题。



(a)隔板含有钩状结构的折线型墩头 (b)隔板无钩状结构的折线型墩头 (c)流线型墩头

图1 竖缝式鱼道的墩头布置型式

收稿日期:2017-02-07
基金项目:国家自然科学基金项目(51679261);国家自然科学青年基金项目(51709278)
作者简介:张超(1993-),男,山东德州人,硕士生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zhangchao2016@126.com
通信作者:孙双科(1966-),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:sunshuangke@126.com

2　流线型墩头布置型式的提出

无论是带钩状结构的和不带钩状结构的墩头均属于折线型墩头，隔板与导板墩头均有棱角存在，室内过鱼试验发现隔板与导板的墩头棱角易刮伤鱼鳞，对鱼类产生一定程度的物理伤害。为避免折线型墩头布置存在的上述问题，本文提出了一种导板及隔板墩头均采用流线型布置的鱼道如图1（c），这种布置方式中鱼道隔板采用无钩状结构且导/隔板均采用1/2圆弧，可以避免折线型墩头对鱼类可能造成刮伤鱼鳞等物理伤害。本文采用数值模拟的方法对比了折线型墩头鱼道与流线型墩头鱼道的水力学特性，并结合某工程鱼道，对流线型墩头鱼道进行了水工模型试验研究。

3　数学模型及验证

3.1　数学模型　鱼道水池的数值模拟采用CFD软件Fluent，选用标准k-ε湍流模型并采用VOF方法捕捉自由水面，该模型能够较准确地模拟鱼道水池内流场分布[6,12]。

数值模拟采用标准 k-ε湍流模型，其控制方程如下[13]：

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

动量方程：

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

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

紊动能耗散率ε方程：

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

式中：t为时间，s；u、v、w为x、y、z方向的时均速度分量的坐标分量，m/s；ρ 为密度；μ、μ_t为黏性系数和紊动涡黏系数，m^2/s；p为时均压强，Pa；k为紊动能，m^2/s^2；ε为紊动能耗散率，m^2/s^3；G_k为紊动能产生项，各项紊流常数取值为C_μ=0.09，σ_ε=1.3，σ_k=1.0，$C_{\varepsilon 1}$=1.44，$C_{\varepsilon 2}$=1.92。

追踪自由液体表面采用VOF方法，通过计算水和气的体积分数来表征物体的形态，a_{a}表示气体的体积分数，a_{w}表示水的体积分数，其控制方程如下：

$$a_{\mathrm{w}}+a_{\mathrm{a}}=1 \tag{5}$$

$$\frac{\partial a_{\mathrm{w}}}{\partial t}+u_i\frac{\partial a_{\mathrm{w}}}{\partial x_i}=0 \tag{6}$$

3.2　鱼道的细部结构及边界条件　图2为竖缝式鱼道平面布置图，鱼道分为进流段、工作段(编号为1—7的常规水池)、出流段。为了避免上下游边界的影响取第4级水池为主要研究对象。图3为单个池室平面布置图，根据隔板墩头型式的不同，分别定义为体型I、II、III。

3种不同型式的鱼道中，在文献[8-9]的基础上，常规水池采用几何布置参数如下：水池长度L=10b，水池宽度B=8b，导板长度P=0.3B，竖缝宽度b=0.3m，鱼道底坡J为2%，竖缝导向角度θ=45°，导板和隔板厚度取值为d=b=0.3 m。对于型式I，隔板有钩状结构，导/隔板墩头迎/背水面坡度取值为1∶1，导/隔板墩头背/迎水面坡度为1∶3，钩状结构长度D分别取值1b、2b，记为体型I-1b、I-2b；对于体型II，在体型I基础上，去除隔板钩状结构，同时导板及隔板坡度保持不变；对于体型III，隔板及导板墩头均采用1/2圆弧形墩头，半径为隔/导板厚度的一半。3种不同的墩头体型鱼道中保证水

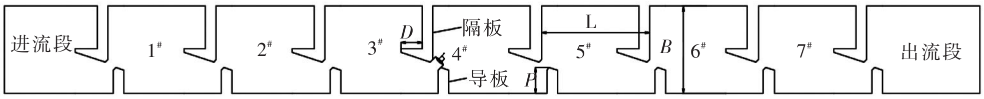
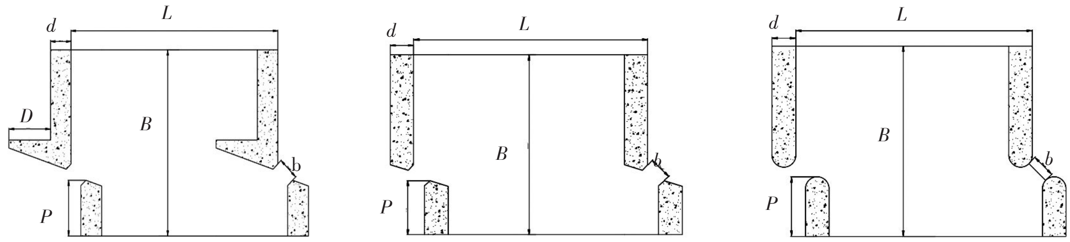


图2　计算域(体型I)



（a）体型I　　（b）体型II　　（c）体型III

图3　不同墩头体型竖缝式鱼道的常规水池

池中央水深为H_0=2 m，进流段水池长度取L=10b，边界设置为压力进口，水深为$H_u=H_0-0.5(L-d)J$；出流段水池长度取L=10b边界设为压力出口，水深为$H_d=H_0+0.5(L-d)J$[14]；边墙及底板均设置为无滑移固壁边界，水面采用VOF法进行处理，紊动能k=10^{-5}m^2/s^2，紊动能耗散率ε=10^{-5} m^2/s^3，其他参数采用默认值。

3.3　数学模型验证　采用Arto-Blanca水电站鱼道实测数据[14]进行数学模型验证。Arto-Blanca水电站鱼道单级常规水池体型如图4所示，与本文的竖缝式鱼道体型*I*相似，隔板为采用钩状结构的折线型墩头。Arto-Blanca水电站鱼道运行水深H_0为1.3m，底坡J=0.0167。

本文针对Arto-Blanca水电站鱼道进行建模，模型进口和模型出口均采用压力边界，按照静水压强设置，对应水深为1.3 m。将计算结果的流速和紊动能分别与文献[14]中的实测结果进行对比，并绘于图5。结果表明数值计算结果与实测结果吻合较好，该数学模型能够较准确的模拟鱼道池室内的流场结构。

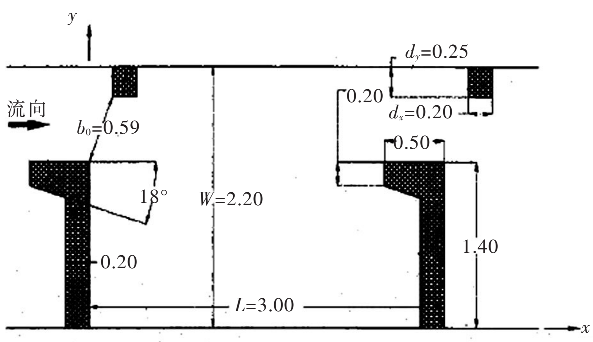
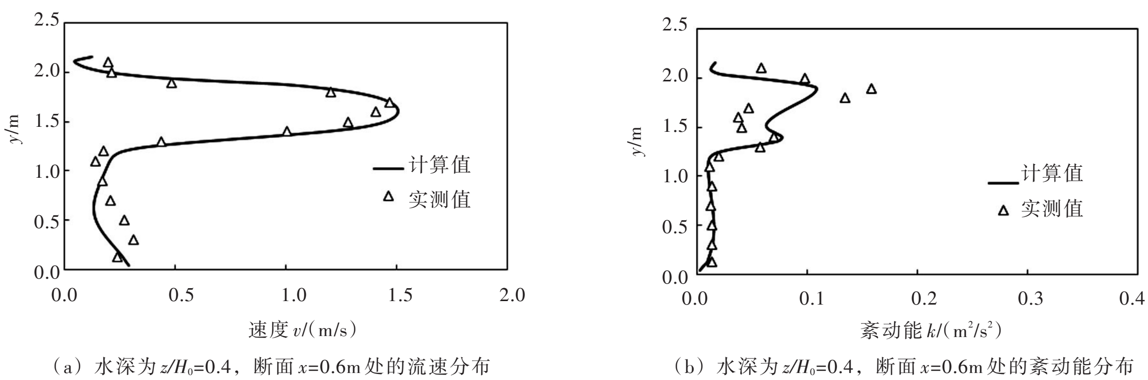


图4　文献[14]鱼道单级常规水池（单位：m）



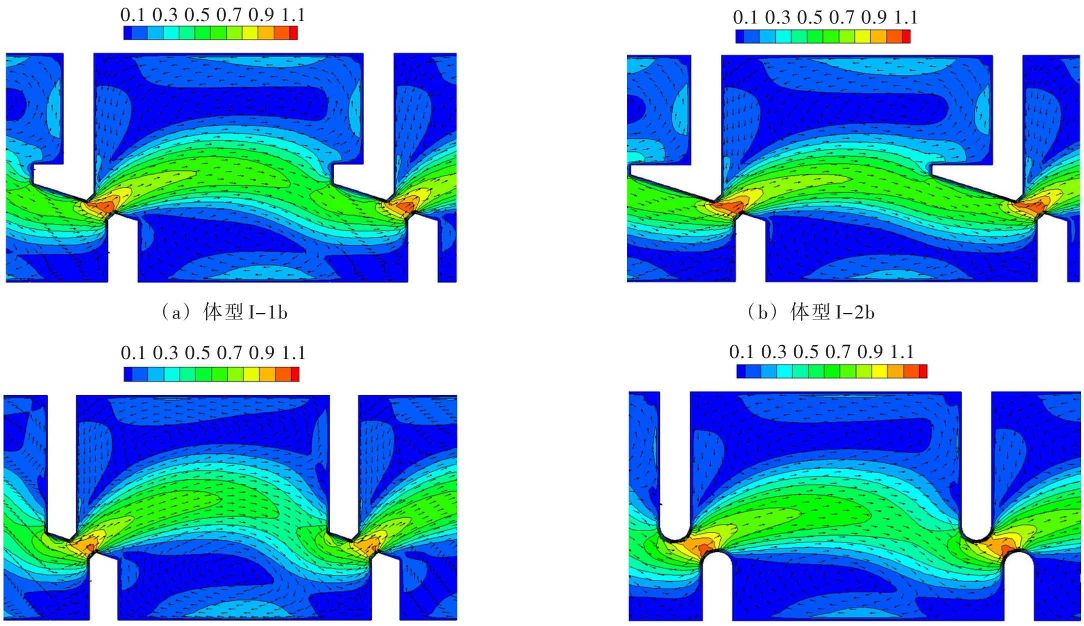
（a）水深为z/H_0=0.4，断面x=0.6m处的流速分布　　（b）水深为z/H_0=0.4，断面x=0.6m处的紊动能分布

图5　数值模拟与实测数据对比

4　不同墩头体型下的竖缝式鱼道流场结构分析

4.1　水池内的流场分布　根据计算结果分析，竖缝式鱼道垂向流速较小，不同水深处的流场分布相似，具有典型二元特性。不失代表性，本文取水深为$z=H_0/2$处的水平剖面作对比分析。

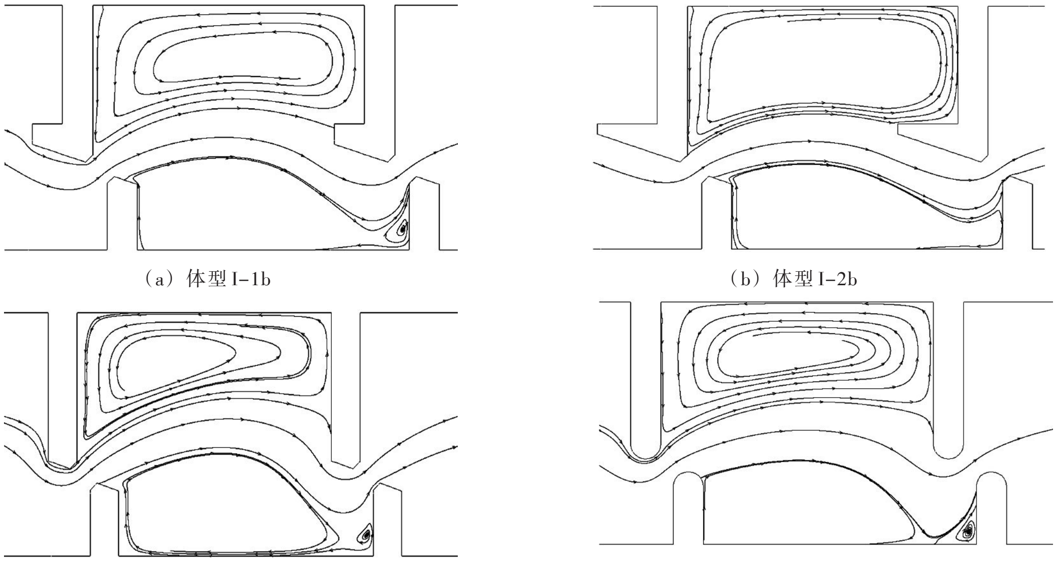
图6—7分别为数值模拟计算得到水深为$z=H_0/2$处的流速云图、流线分布图，可见不同墩头体型的鱼道水池内水流结构有相似之处：水体自上游侧竖缝断面流入，在水池内主流先逐渐扩散并偏向池室的左侧，在导板和隔板的阻隔作用下，当接近下一级竖缝时，主流又逐渐收缩并流入下游侧竖缝；同时在主流两侧存在着两个大小尺度相当的回流区，右侧回流区呈顺时针旋转，左侧回流区呈逆时针旋转。通过对比折线型墩头鱼道及流线型墩头鱼道的流场可以得到以下规律：



（a）体型I-1b　（b）体型I-2b

（c）体型II　（d）体型III

图6　不同墩头体型下常规水池内的流速云图（流速单位：m/s）



（a）体型I-1b　（b）体型I-2b

（c）体型II　（d）体型III

图7　不同墩头体型下常规水池内的流线分布

(1)不同的隔板与导板墩头体型对常规水池内的水流结构不会产生显著性的改变，其影响主要体现在主流横向扩散及其偏转程度的改变方面。

(2)对于折线型墩头鱼道(体型I、II)，如图6(c)、图7(c)所示，体型II在不设置钩状结构时，主流区横向扩散宽度及主流偏转变化比较大，特别是在接近隔板时， 主流流线横向偏转程度相对较大， 横向宽度拉大。如图6(a)(b)、图7(a)(b)所示，体型I隔板钩状结构的设置使得主流横向偏转稍有减缓，同时随着钩状结构长度*D*的增加，主流的横向扩散有减小的趋势，主流更加集中。

(3)如图6(d)、图7(d)所示，流线型墩头鱼道(体型III)与无钩状结构折线型鱼道(体型II)相比，主流的横向扩散拉大，同时主流横向偏转有所减缓。

4.2　最大主流轨迹线及其沿程流速分布　本文在第4级常规水池上游隔板背水面到下游隔板背水面的区域内，选取了21个等间距（Δx=0.15m)的横切面，并提取各个横切面上最大流速点的位置坐标，依次平滑连接得到最大主流轨迹线及其流速沿程变化规律，可以表征主流沿程分布及主流上的流速沿程衰减规律，如图8—9所示。

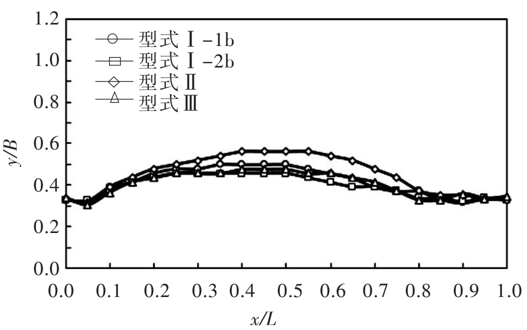


图8　主流区最大主流轨迹线

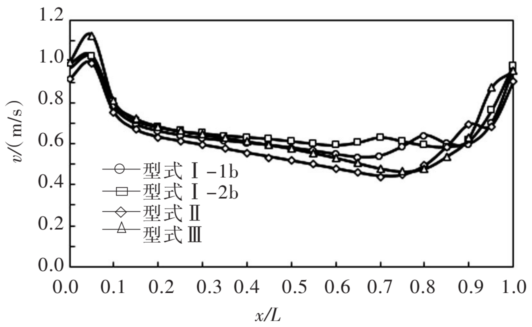


图9　最大主流轨迹线沿程流速变化规律

表1　主流轨迹线流速最大衰减率分布表

墩头体型	型式I-1b	型式I-2b	型式II	型式III
$1-v_{min}/v_{max}$	47.7%	43.3%	55.3%	58.9%

由图8给出的最大主流轨迹线可以看出：不同墩头体型鱼道，主流轨迹线沿程变化规律具有相似性，微显“Ω”形状。折线型墩头鱼道I、II对比，钩状结构的设置减缓了主流的偏转，随着钩状结构的长度的增加，主流偏转程度有减小的趋势；流线型墩头鱼道III与隔板无钩状结构的折线型墩头鱼道II相比，主流偏转程度明显减小。

文献[16]指出，最大主流轨迹线上流速沿程变化能够一定程度上反映出水池内沿程水头损失，一般认为主流流速沿程衰减效果越好，意味着消能效果越好，越有利于鱼类上溯。由图9和表1可以看出，主流流速衰减排序依次为：型式III > 型式II > 型式I-1b>型式I-2b。对于型式I，隔板钩状结构的设置限制了主流的横向偏转和主流的横向扩散，导致消能效果较差。隔板钩状结构长度增加，主流偏转程度减小的趋势，主流横向扩散程度减小，导致消能效果型式I-1b>型式I-2b；对于型式II，主流最大衰减率可达55.3 %，隔板上无钩状结构，主流横向偏转较大，同时主流横向扩散相对较大，利于主流能量的消减。对于型式III流线型墩头鱼道消能效果最好，主流流速最大衰减率可达58.9 %，探其原因，流线型墩头的设置使得主流在池室内横向扩散加大，有利于主流流速的衰减。

4.3　竖缝断面水力特性分析　在竖缝式鱼道中最大流速出现在竖缝处区域，同时竖缝是鱼类通过鱼道上溯的必经之路，因而，竖缝断面处的流速大小及分布情况是较为关键的水力学指标。图10给出了水深$z=H_0/2$处的竖缝中心断面处的流速分布图(图中*l*是竖缝断面各点距离隔板背水面的沿宽度方向上的距离，*b*是竖缝宽度)。由图10中可见：①不同墩头体型下的鱼道，竖缝断面流速呈梯形分布，两侧流速值偏小，中间流速偏大。②设置隔板钩状结构的鱼道(型式I)竖缝流速曲线基本重合，说明钩状结构长度大小对竖缝处流速分布无显著影响。流线型墩头鱼道竖缝流速量值沿宽度方向分

布明显高于其他型式的折线鱼道，初步分析导板及隔板墩头均采用流线型，竖缝处局部水头损失小，造成局部流速较其他型式折线型鱼道偏高，因此需要适当的降低底坡，以减小竖缝处流速，保证鱼类顺利上溯。

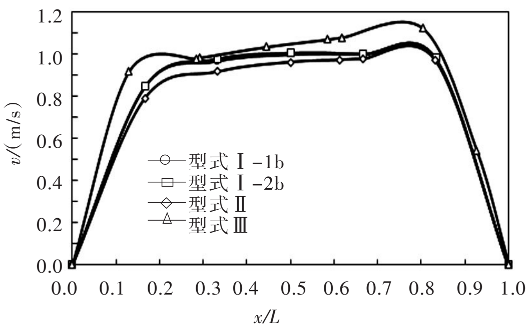


图10　不同墩头型式竖缝中心线处流速分布

4.4　容积耗散功率 E　对于竖缝式鱼道，除了水流结构和流速分布评价指标外，容积耗散功率 E 是一个重要的指标，反映了水池内的湍流度和掺气程度。E 值越大，鱼道水池内湍流度和掺气程度越大，鱼类上溯也越困难[9,16]。容积耗散功率 E 的公式如下：

$$E=\frac{\rho gQ\Delta h}{LBH_0}=\frac{\rho gQJ}{BH_0} \tag{7}$$

式中：L 为鱼道水池的长度；B 为鱼道水池的宽度；H_0 为鱼道水池中央的水深；J 为鱼道水池的坡度；ρ 为水体的密度；Q 为过流流量；Δh 为相邻水池之间的落差。

根据式(7)计算结果表明，在鱼道长宽比 B/L、导板长度 P、导向角度 θ 等参数确定的前提下，容积耗散功率随着墩头的体型发生变化，但远小于Bell提出 E 的上限值191 W/m³[7]，均满足容积耗散功率的要求，其不构成鱼道墩头体型选择的限制因素。

表2　不同墩头体型鱼道的容积耗散功率

墩头体型	型式Ⅰ-1b	型式Ⅰ-2b	型式Ⅱ	型式　Ⅲ
E/(W/m³)	22.19	22.19	21.21	26.16

5　流线型墩头鱼道模型试验研究

针对某工程鱼道进行了水工模型试验，该工程位于汉江上游干流，为促进大坝上下游鱼类基因交流，拟建设鱼道工程，鱼道上下游最大落差约11 m，采用竖缝式鱼道布置形式，过鱼对象重点考虑鲢、草鱼、青鱼、鳙等多种鱼类。根据过鱼对象流速的要求，该工程鱼道设计流速为0.9~1.5 m/s，运行水深为1 ~ 2.5 m。

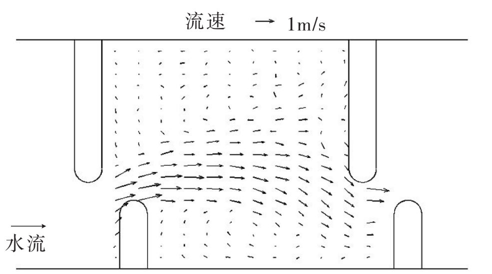
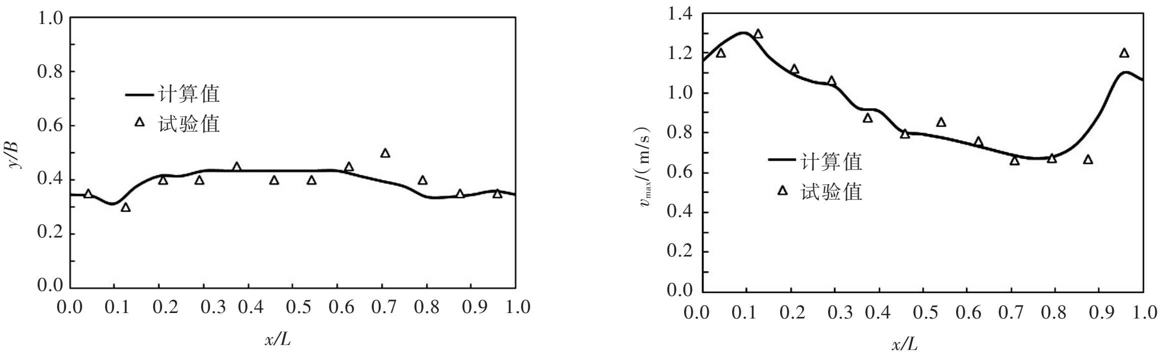


图11　试验水池流态分布

为确定鱼道细部结构尺寸，进行了水工模型试验研究。模型按照重力相似准则设计，几何比尺1∶2.5，模拟8级水池，鱼道模型采用钢化玻璃制成，模型全长16 m，宽为1.0 m，深为1.6 m。鱼道原型常规水池池长 L=3m，宽 B=2.5m，导板 P=0.75 m，导/隔板厚度 d=0.3m，竖缝 b=0.4 m，竖缝导向角度 θ=45°，鱼道底板坡降 J=2 %，隔板与导板墩头均采用本文提出的流线型墩头。在下游出口段布置尾门，通过调节尾门及来流流量，使得每个鱼道池室中央处水深相等，此时在鱼道池室内部形成了“鱼道均匀流”(池室水面的保持水平，水面坡降与底板坡降相等)[8-9,17]。流速由P-EMS二维电磁流速仪测量，流量采用薄壁堰测量。不失代表性的选取运行水深 H_0=2 m的工况进行分析，采取与数值模拟相同的处理方法，得到流态分布、最大主流轨迹线、最大主流轨迹上流速沿程变化规律，及竖缝处流速垂向分布，分别见图11—14，同时将试验数据与模拟计算值相比较，看出两者吻合较好。

图11—12中，流线型墩头鱼道水池内部主流分布明显，基本处于水池中央，横向偏转较小，横向扩散充分，流速沿程衰减明显。主流两侧均出现回流强度不大的回流区，可为鱼类提供休息的空间。最大主流轨迹线沿程流速分布在0.7~1.3 m/s，



（a）最大主流轨迹线　　（b）最大主流轨迹线沿程流速变化规律

图12　最大主流轨迹线与最大主流上流速沿程变化规律

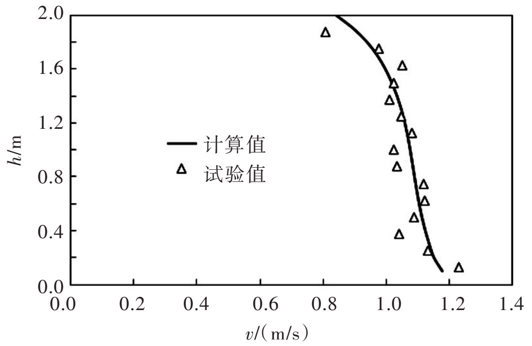


图13　竖缝中心处沿水深处流速变化

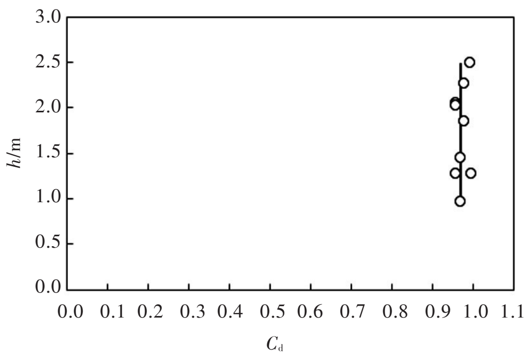


图14　不同水深h下流量系数C_d分布

最大衰减率可达49.6 %；竖缝中心线上的流速分布在0.8 ~ 1.3 m/s，能够满足鱼类的上溯要求。

鱼道流量的计算公式[8]：

$$Q = C_d (bh)\sqrt{2g\Delta h} \approx C_d (bh)\sqrt{2gJL} \tag{8}$$

式中：Q为流量；C_d为流量系数；b为竖缝宽度；J为鱼道坡度；L为单级水池长度；h为竖缝处隔板上游侧处的水深。

经试验得到水深h与流量系数C_d分布图14，流量系数C_d=0.97，可见流线型墩头的流量系数明显高于其他布置体型的C_d=0.65~0.85[10]，其主要原因在于采用流线型布置后，竖缝断面局部水头损失显著减小所致。这意味着在实际应用时，采用流线型墩头鱼道需要减缓鱼道底坡坡度，以控制竖缝断面水流流速不超过过鱼对象的克流流速，因此会导致鱼道总长度与投资的相应增加。

6　结论

通过对不同墩头型式的竖缝式鱼道的数值模拟及流线型墩头鱼道的模型试验得到以下结论：（1）在鱼道常规水池长宽比B/L、竖缝宽度b、导板长度P、导向角度θ等参数保持不变的条件下，采用流线型墩头不会导致鱼道水池内水流结构的显著改变，而主流横向偏转程度有所减缓，横向扩散加大，有利于主流沿程速度衰减；（2）与折线型墩头鱼道相比，流线型墩头鱼道竖缝断面局部水头损失减小，需要采用较小的鱼道底坡坡度以控制竖缝断面流速；（3）鉴于流线型墩头可避免鱼类上溯过程中可能遭受的物理伤害，条件允许时可考虑采用。

参　考　文　献：

[1]　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 .

[2] 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(2): 88- 101 .

[3] 孙双科，邓玉明，李英勇 . 北京市上庄新闸竖缝式鱼道的水力设计研究[R] . 北京：中国水利水电科学研究院 .

[4] 农静 . 长洲水利枢纽工程鱼道设计[J] . 红水河，2008，27(5)：50-54 .

[5] 徐海洋，魏浪，赵再兴，等 . 大渡河枕头坝一级水电站鱼道设计研究[J] . 水力发电，2013，39(10)：5-7 .

[6] 毛熹，脱友才，安瑞冬，等 . 结构变化对鱼道水力学特性的影响[J] . 四川大学学报：工程科学，2012，44(3)：13-18 .

[7] PUERTAS J, CEA L, BERMÚDEZ M, et al . Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirement of the target species [J] . Ecological Engineering, 2012, 48(9): 52-60 .

[8] RAJARATNAM N, van der VINNE G, KATOPODIS C . Hydraulics of vertical slot fishways[J] . Journal of hydraulic Engineering, 1986, 19(3): 909-927 .

[9] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, SOLANKI S . New designs for vertical slot fishways [J] . Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19(3): 402-414 .

[10] LARINIER M, TRAVADE F, PORCHER J P . Fishways: Biological Basis, Design Criteria and Monitoring[M] . Bull: Fr Peche Piscic, 2002 .

[11] 曹刚 . 三湾水利工程鱼道设计[J] . 中国水运，2009，9(4)：122-123 .

[12] SHAMLOO H, AKNOONI S . 3D-Numerical simulation of the flow in pool and weir fishways[C]//Xix International Conference on Water Resources, Cmwr . 2012 .

[13] 王福军 . 计算流体动力学分析—CFD软件原理及应用[M] . 北京：清华大学出版社，2004 .

[14] BERMÚDEZ M, PUERTAS J, CEA L, et al . Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways[J] . Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1355-1364 .

[15] BOMBAČ M, NOVAK G, MLAČNIK J, et al . Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations[J] . Ecological Engineering, 2015, 84: 476-484 .

[16] 吕强，孙双科，边永欢 . 双侧竖缝式鱼道水力特性研究[J] . 水生态学杂志，2016，37(4)：55-62 .

[17] PUERTAS J, PENA L, TEIJEIRO T . Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(1): 10-23 .

Study on the improvement of detailed structure in the vertical slot fishways

ZHANG Chao, SUN Shuangke, LI Guangning

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the improvement of head of baffle in the vertical slot fishways, the layout of a streamlined head of baffle is presented. The hydraulic characteristics in fishways with different baffle types is analyzed using numerical simulation method and the hydraulic experiment is performed for the fishway with streamlined head of baffle. The results indicates that under the premise that the aspect ration, width of vertical slot and other constraints in regular pools are established, the streamlined head baffle has no significant effect on the flow structures in the fishway pools, and the transversal diffusion of the mainstream increases while the deflection of mainstream slows down. Therefore, it is beneficial to the attenuation of the velocity in the mainstream. The research also indicates that the local head loss is reduced, so it is necessary to adopt small bottom slope to control the velocity at the slot. The streamlined head baffle could avoid physical damages to fish effectively, while it is serious when the broken-line head baffle is adopted. The layout of streamlined head baffle has unique technical advantages, so when conditions permit, the layout of streamlined head baffle may be considered to use it in the hydraulic design.

Keywords: vertical slot fishways; numerical simulation; streamlined head baffle; hydraulic characteristics

（责任编辑：韩　昆）