

基于竖缝隔板的大底坡鱼道水力优化数值模拟

邓 斌^{1,2,3}, 黄姣凤¹, 徐 拓¹, 尹龙斌¹, 张家强¹, 蒋昌波^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了优化大底坡竖缝式鱼道池室水力特性,在验证物理模型的基础上,构建三维水动力数学模型,考虑5种大底坡坡度对竖缝有无隔板及竖缝隔板不同安装高度的池室水力分布进行了数值模拟分析。结果表明,竖缝设置隔板能有效减小池室最大流速和平均湍动能;当底坡为1/20时,池室最大流速下降率为10.16%~14.84%,平均湍动能下降率为21.88%~42.19%,主流最大流速衰减率为61.24%~61.82%,池室内形成了小流速、低湍动的Ω形连续性水流;改变竖缝隔板安装高度会影响隔板上下水深处的竖缝流速大小,但对隔板上下水深处的流速、湍动能、应变率的分布规律无显著影响。

关键词: 竖缝式鱼道;竖缝隔板;大底坡;水力特性;数值模拟

中图分类号: TV131.4;S956.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)06-0017-07

Numerical simulation of a large-slope fishway based on vertical slot sills for hydraulic optimization//DENG Bin^{1,2,3}, HUANG Jiaofeng¹, XU Tuo¹, YIN Longbin¹, ZHANG Jiaqiang¹, JIANG Changbo^{1,2,3}(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to optimize the hydraulic characteristics of a large-slope vertical slot fishway pool, a three-dimensional hydrodynamic numerical model was constructed on the basis of physical model validation. Numerical simulation was carried out to analyze the hydraulic distributions of the pool with or without the vertical slot sill and with different installation heights of the vertical slot sill, considering five types of large slope gradients. The results demonstrate that the pool's maximum flow velocity and average turbulent kinetic energy are successfully reduced by setting the sill at the vertical slot. For a 1/20 slope, the maximum flow velocity of the pool is reduced by 10.16% to 14.84%, the average turbulent kinetic energy is dropped by 21.88% to 42.19%, and the mainstream flow velocity decays at a rate of 61.24% to 61.82%. A Ω-shape continuous flow with small flow velocity and low turbulence is formed in the pool. The installation heights of the vertical slot sill can affect the velocity distribution in the water depth above and below the sill, but has no significant effect on the distribution regimes of velocity, turbulence kinetic energy and strain rate in the water depth above and below the sill.

Key words: vertical slot fishway; vertical slot sill; large-slope; hydraulic characteristics; numerical simulation

闸、坝等水利设施的兴建在给防洪、灌溉、缓解缺水、开发清洁能源等方面带来巨大效益^[1]的同时会截断河流,导致完整的河流碎片化^[2],阻断鱼类洄游通道并影响其种群繁殖^[3]。鱼道作为一种生态型水利工程,能够重建河流连通性,帮助鱼类克服障碍恢复自然洄游^[4],对保护鱼类资源及水生生物多样性具有一定的积极作用。鱼道主要有仿自然型鱼道(仿自然鱼梯、鱼坡和过鱼旁路等)和技术型鱼

道(竖缝式鱼道、池堰式鱼道和丹尼尔鱼道等)两种类型^[5],其中竖缝式鱼道因结构简单、能适应多变的上下游水位、消能效果显著等特点,成为应用最广泛和最有效的鱼道型式之一^[6]。

研究发现,我国已建的竖缝式鱼道大多底坡较缓,为1/100~1/50^[7]。而底坡坡度决定了鱼道的总长度,是影响鱼类上溯时间、工程建设成本及规划布置的主要因素。一般来说,鱼道底坡越陡,总长度

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2020RC3037,20hnkj019);犬木塘水库工程科技创新项目(2022430119001440);湖南省研究生科研创新项目(QL20210198)

作者简介: 邓斌(1985—),男,副教授,博士,主要从事计算水动力学与智慧水利研究。E-mail: dengbin07@csust.edu.cn

通信作者: 蒋昌波(1970—),男,教授,博士,主要从事河流、湖泊、海岸数值模拟技术研究。E-mail: jcb36@163.com

越短,占地面积就越小,建设成本也越低。但是大底坡结构所形成的髙速度、髙湍动水流流场不利于游泳能力较弱的鱼类洄游上溯^[8]。因此,考虑河流生态修复及工程经济性,国内外学者针对大底坡下竖缝式鱼道的水力优化开展了相关研究,如部分学者基于物理模型试验^[9-10]和数值模拟^[11-14]方法,分别研究了在各种大底坡(1/20~1/7)结构下,竖缝式鱼道竖缝下游处设置不同直径、个数及排列方式的圆柱体障碍物对池室水力特性的影响,并通过比较池室流速和池室湍动特性等相关参数来评估不同圆柱体配置方式的阻流效果。此外,也有部分学者研究了在竖缝处增设隔板对池室水流分布的影响,如Pena等^[15]认为在底坡为1/10的竖缝式鱼道竖缝底部设置不同长度的隔板可以减小池室最大流速,但同时会产生比较复杂的流场结构并增加池室湍动能;Mallen-Cooper等^[16]基于原型观测研究了底坡为1/20时在竖缝式鱼道竖缝中间位置设置隔板对鱼道过鱼效率的影响,发现与未经改造的竖缝式鱼道相比,其小鱼通过效率提升了6~13倍,这种通过在竖缝式鱼道结构水流最集中的部位设置消能措施以减少池室流速和湍流的方法比较有效、简单和经济,但是鲜见其相关的池室水力特性研究报道,而水力特征分布是探讨鱼类上溯行为机理的依据,也亟须对其进行相关研究。

综上所述,通过在竖缝式鱼道结构内增设局部消能措施(如圆柱体、竖缝隔板等)可改变池室流场分布,并且关于不同配置方式的圆柱体对池室水力特性的影响已进行了一定的研究,然而对于竖缝隔板所产生的影响,目前相关研究尚不够全面、系统,还有待进一步探索与分析。因此,本文从水力、工程经济等角度出发,在Mallen-Cooper等^[16]的研究基础上,通过建立鱼道池室三维水动力数值模型,深入分析了5种大底坡 J (1/40、1/30、1/20、1/15、1/10)条件下,竖缝隔板及其不同安装高度 h (0、0.04、0.08 m,为竖缝隔板底部到池室底板的距离)对池室水力特性的影响,并阐明了竖缝隔板影响和优化大底坡鱼道池室流场分布的内在原因。通过对池室水力特性的数值模拟研究,以期获取关于这类鱼道结构运行的基本知识,可为改进更有效、经济的大底坡鱼道结构提供相关技术依据。

1 数学模型

1.1 控制方程

本研究采用计算流体力学商业软件 FLOW-3D 对竖缝式鱼道内的水动力进行模拟,采用有限体积

法求解三维雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)方程。湍流模型选用重整化群(RNG) $k-\epsilon$ 模型,该模型能够较准确地模拟复杂水工结构内的流场分布^[17]。

采用流体体积(VOF)方法模拟自由液面,即气相和液相之间的界面。VOF 方法通过求解整个计算域内各网格单元的体积分数,并进行持续记录,构建出自由液面。其表达式为

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

式中: a_w 为水的体积分数; t 为时间; u_i 为流体速度; x_i 为坐标。当 $a_w=0$ 时,计算域内全部充满空气;当 $a_w=1$ 时,计算域内全部充满水;当 $0<a_w<1$ 时,计算域内既有空气又有水。

1.2 计算域及网格划分

数学模型计算域包括鱼道入流段、出流段及5级池室,如图1所示。竖缝宽度 b 为0.05 m,单个池室净长 $L=10b=0.5$ m,净宽 $B=8b=0.4$ m,池室长宽比为10/8,底坡 J 分别取1/40、1/30、1/20、1/15、1/10。竖缝隔板尺寸为0.05 m×0.01 m×0.05 m(长×宽×髙),其中髙度与竖缝宽度相等,布置方式如图2所示。为减少进出口边界对池室流场的影响,取第三级池室作为主要研究对象,采用六面体结构化网格对模型进行网格划分,网格单元边长设为0.006 m。

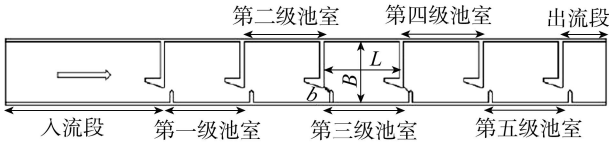


图1 鱼道数学模型平面示意图

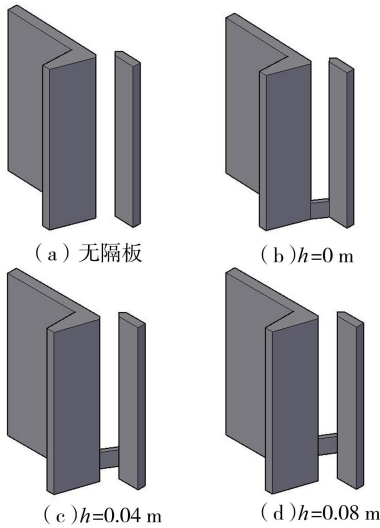


图2 竖缝隔板布置三维示意图

1.3 边界条件及初始条件

考虑到水流流动的物理特性及工程模拟的相似

性,鱼道上游进口及下游出口边界条件均采用压力边界,并设置相应的水深,鱼道进口水深为0.195 m,出口水深为0.245 m;模型顶部设置为压力进口边界,其相对压强大小为0,水体体积分数设置为0,以便空气可自由进入;鱼道左右边墙及底部设置为固壁无滑移边界。模型初始水深 H 设置为0.2 m,以使计算更快收敛并更加符合实际情况。模型采用广义最小残量 (GMRES) 隐式求解器计算,初始时间步长设置为0.001 s,最小时间步长设置为 10^{-7} s。

1.4 数值模拟与物理模型试验结果对比分析

为了评估数学模型模拟鱼道池室水动力特性的能力,通过调整数学模型中鱼道边墙及底部的表面粗糙度 r_s (0.010、0.012、0.015、0.018),采用与数学模型尺寸相一致的物理模型对各表面粗糙度下的流速进行了对比验证。物理模型试验在长沙理工大学水利实验中心的变坡水槽中进行,水槽尺寸为16 m×0.4 m×0.5 m (长×宽×高),水槽底面及两侧均为透明的钢化玻璃。为得到充分发展的水流,将模型布置在水槽中后段部分,并通过多普勒声学流速仪测量了第三级池室 $z=0.5H$ 水深平面处的速度场分布,池室流速测点布置如图3所示。对比分析了底坡为1/20且无竖缝隔板情况下,距上游长挡板背水面距离0.22 m断面线处的物理模型与数学模型流速分布(图4(a))及不同水深竖缝断面中心点连线处的流速分布(图4(b)),并通过决定系数 R^2 对数学模型计算精度进行评价。验证结果表明,当 $r_s=0.015$ 时,数学模型结果与物理模型结果吻合较好, R^2 都在0.9以上,数学模型能够较准确地模拟鱼道池室内的水力特性。

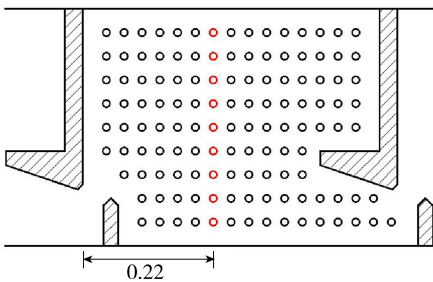
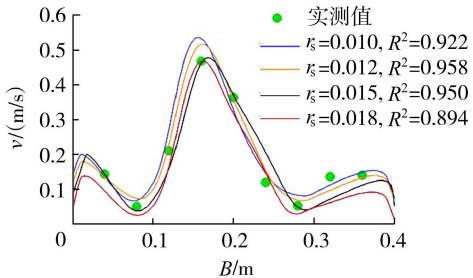


图3 第三级池室测点布置(单位:m)



(a) 0.22 m 横断面处各测点流速对比

2 结果与分析

根据上述数学模型,分别对各工况进行了模拟计算,为减少鱼道进出口边界条件对计算结果的影响,以中间第三级池室作为主要研究对象进行水力分析与讨论。

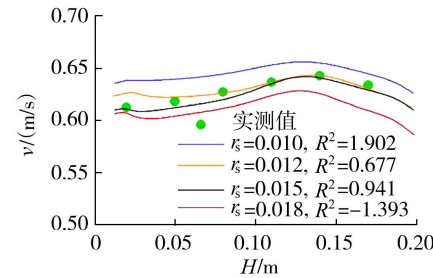
2.1 不同底坡池室水力参数对比

在竖缝式鱼道的水力设计中,池室最大流速 $v_{\max}$ 和池室湍动能 k 是影响过鱼效果最主要的水力参数^[18]。由于竖缝式鱼道在相邻池室间会产生水位落差, $v_{\max}$ 一般出现在竖缝位置附近,而竖缝是鱼类进行洄游的必经之地,因此,为使鱼类能够顺利通行, $v_{\max}$ 必须小于鱼的爆发速度^[19]。 k 表示脉动流速的动能,是衡量水流湍动程度的重要指标^[20];若鱼类上溯路径中的水流 k 过大,会导致鱼类特别是游泳能力较弱的鱼类在上溯过程中难以保持方向,同时增加鱼类游泳耗能甚至对鱼类造成不同程度的伤害^[21],这表明池室中适当的 k 分布也是鱼类成功上溯的关键。因此,优化大底坡鱼道池室水力分布的主要目标是减小池室最大流速和池室湍流。

表1为5种大底坡情况下,有无竖缝隔板及其不同安装高度对鱼道第三级池室 $z=0.5H$ 处的最大流速 $v_{\max}$ 及平均湍动能 $\bar{k}$ 的影响。由表1可知,对于不同的底坡,竖缝隔板使池室 $v_{\max}$ 及 $\bar{k}$ 都表现为下降的趋势, $v_{\max}$ 下降率为2.01%~21.49%, $\bar{k}$ 下降率为3.77%~42.19%,这表明竖缝隔板通过降低池室 $v_{\max}$ 及 $\bar{k}$ 的大小可以实现优化大底坡鱼道池室水流分布的目的,并对 $\bar{k}$ 的影响较大; $v_{\max}$ 在底坡为1/30和1/20时的优化效果最佳, $\bar{k}$ 在底坡为1/20和

表1 不同底坡最大流速和平均湍动能下降率

水力参数	h/m	下降率/%				
		$J=1/40$	$J=1/30$	$J=1/20$	$J=1/15$	$J=1/10$
$v_{\max}$	0	12.57	19.46	12.90	9.07	8.70
	0.04	16.27	15.06	10.16	8.51	3.21
	0.08	17.93	21.49	14.84	11.72	2.01
$\bar{k}$	0	37.82	13.21	42.19	34.67	36.63
	0.04	11.36	20.75	39.06	21.33	30.69
	0.08	25.00	3.77	21.88	12.00	20.79



(b) 竖缝中心点连线处流速对比

图4 数值计算结果与实测值对比

1/10 时的优化效果最佳。在实际的鱼道工程设计中,可综合考虑工程布置地理位置、过鱼对象游泳能力及工程造价等情况,合理选用大底坡坡度及竖缝隔板安装高度。

2.2 竖缝隔板对池室水力特性的影响

为了进一步阐明竖缝隔板对鱼道池室流场分布的影响机理,选取第三级池室距底板 0.03m(竖缝隔板下方水深处,除 $h=0$ m 时)及 0.15 m(竖缝隔板上水深处)的水平面作为主要研究对象,具体分析了底坡为 1/20 时,不同竖缝隔板配置方式在 $Q=19.36\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $Q=10.23\text{ m}^3/\text{h}$ (Q 为鱼道入口流量)下的池室水力特性分布。

2.2.1 流态

图 5 为不同流量条件下竖缝隔板不同配置方式的三维流线分布:当竖缝处无隔板时(图 5(a)(e)),水流通过上游竖缝后,以射流的形式进入池室,并沿池室隔板导角方向向前流动,射流到达池室中心后受下游挡板墩头影响,其断面逐渐收缩并同时折向下游竖缝进入下一级池室,呈现出反 S 形的主流,并在主流两侧产生了两个尺度相当的回流区;而对于大底坡和流量较大的情况,这种流型的主流流速($0.5\sim0.6\text{ m/s}$)过大,会导致鱼类上溯耗能的

增加并不利于游泳能力较弱的鱼类通行。竖缝处设置隔板后(图 6(b)(c)(d)(f)(g)(h)),水流也以射流形式流入池室,但整体流动模式发生了显著变化:竖缝隔板的存在改变了射流流向,形成了利用池室整体容积进行低湍流能量转换、自身回转的主流,使得主流路径更加弯曲并呈 Ω 形,该流型通过射流混合消能的方式,可有效延长大底坡、大流量条件下的水流能量耗散距离,在池室内形成面积较大的低流速区($0.25\sim0.35\text{ m/s}$),使鱼类能以持续游泳速度和耐久游泳速度相交替的游泳方式^[22]游过各级鱼道池室,有利于减小鱼类上溯耗能;同时,在池室的上游角和主流的凸出部分产生了两个尺度不一的回流区,给鱼类洄游提供休息区域。而改变竖缝隔板安装高度,流态呈现相似分布规律。

图 6 为 $Q=19.36\text{ m}^3/\text{h}$ 时竖缝隔板不同安装情况下不同水深处的池室流速分布。与无隔板相比,3 种隔板安装高度下的池室流速都显著下降,且具有相似的分布情况;当 h 为 0 时,在 0.03 m 水深处(图 6(b)),由于竖缝隔板的阻挡,其竖缝下游处的流速分布较缓;而竖缝隔板上下水深处的流速分布(图 6(c)(d)(f)(g)(h))大体保持一致,这表明改变竖缝隔板安装高度,对其上下水深处的流速分布

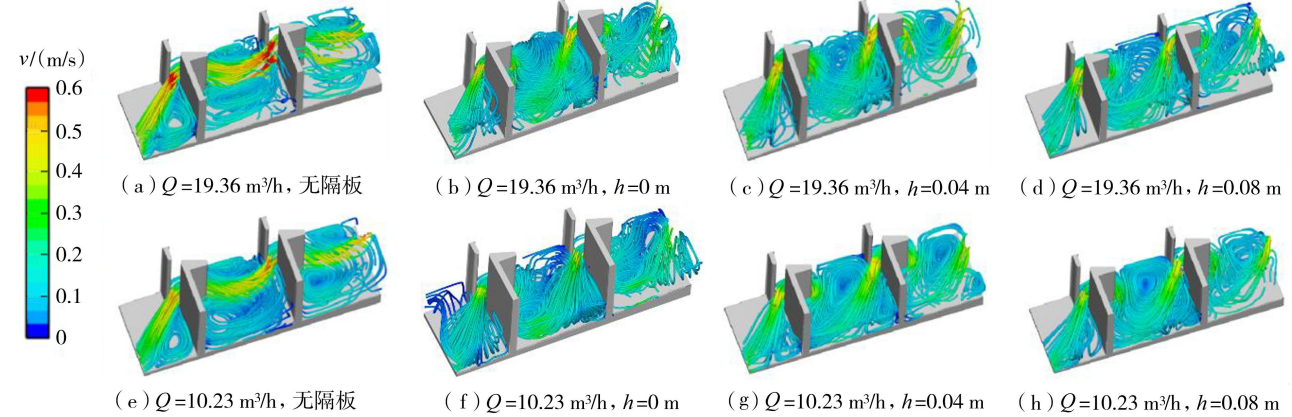


图 5 不同隔板配置方式三维流线分布

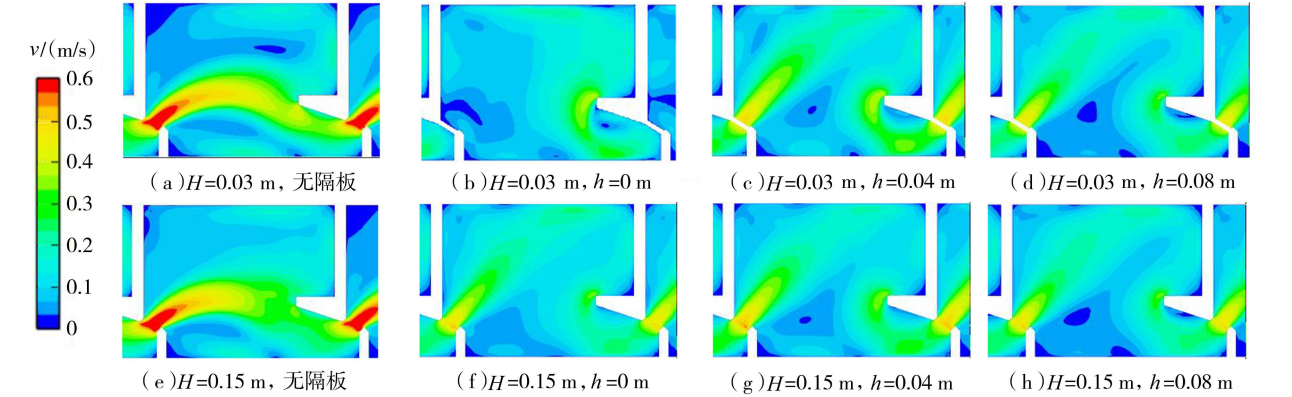


图 6 不同水深处池室流速分布

无显著影响。

2.2.2 主流区水力特性

为了更好地评估池室流态,对第三级池室 $H=0.15\text{ m}$ 水平面的主流最大流速沿程分布及其衰减情况进行了定量分析。从距离第三级池室上游长挡板背水面 0.01 m 位置起,到下游长挡板迎水面为止,每隔 0.03 m 选取一条横断线并取每条横断线上最大流速的位置 (x,y) 和数值 $(v_{\max})$,并进行无量纲化处理,绘制池室主流区最大流速轨迹线(图7)和最大流速沿程分布曲线(图8),其中 $\bar{v}$ 为各工况的竖缝断面平均流速。最大流速轨迹线及其沿程分布曲线可以反映池室内水流消能情况,若主流流速沿程衰减越大,则消能效果越好,就越有利于鱼类上

溯^[23]。由图7可知,由于竖缝隔板的影响,主流最大流速轨迹线从竖缝下游位置向左侧边墙冲击,直到 x/L 为 $0.6\sim 0.7$ 时才发生转向,这使得主流偏转程度显著加大,主流流速随之大幅度降低,并在池室中间断面($x/L=0.5$)出现最小值;同时主流流速也呈现较大的衰减率:流量为 $19.36\text{ m}^3/\text{h}$ 时流速衰减率为 61.24% ,流量为 $10.23\text{ m}^3/\text{h}$ 时流速衰减率为 61.82% 。而不同的竖缝隔板安装高度,主流最大速度轨迹线及其沿程分布曲线分别表现出相似的分布规律:主流大部分分布在 $y/B=0.4\sim 0.8$ 处,即池室中间靠左侧边墙位置,并在 $x/L=0.4\sim 0.6$ 处,即池室中间部位达到主流最大流速的最小值。

2.2.3 竖缝断面流速

分析发现,不同流量条件下竖缝断面流速分布规律具有较好的相似性。因此,图9仅给出了 $Q=19.36\text{ m}^3/\text{h}$ 时 $H=0.03\text{ m}$ 和 $H=0.15\text{ m}$ 处竖缝断面流速沿竖缝宽度 b 方向的分布规律。在竖缝处设置隔板使竖缝中间位置($b'/b=0.3\sim 0.9$,其中 b' 为竖缝上的点到隔板的距离)的流速显著下降,而对靠近两侧挡板处的流速影响较小;同时,当 $h=0\text{ m}$ 时,鱼道底部由于竖缝隔板的阻挡,使得鱼道底部($H=0.03\text{ m}$)竖缝流速为0,因此图9(a)未给出其流速分布,当 $h=0.04\text{ m}$ 时,对竖缝隔板上方水深处($H=0.15\text{ m}$)的流速影响较小,当 $h=0.08\text{ m}$ 时,竖缝隔板上下水深处($H=0.03\text{ m}$ 、 0.15 m)的流速都有明显降低,这表明竖缝隔板能显著减小其安装位置附近水深处的竖缝断面流速,且 h 越大,这种影响范围也越大。基于此,初步认为可将隔板安装在竖缝的中上方水深处,以保障鱼类能够更加顺利地通过竖缝完成洄游。

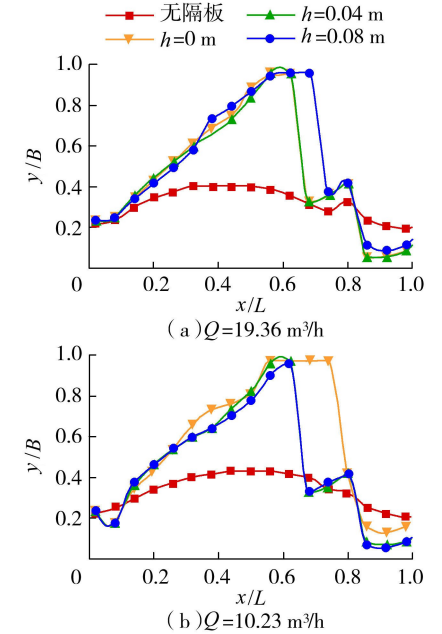


图7 最大流速轨迹线

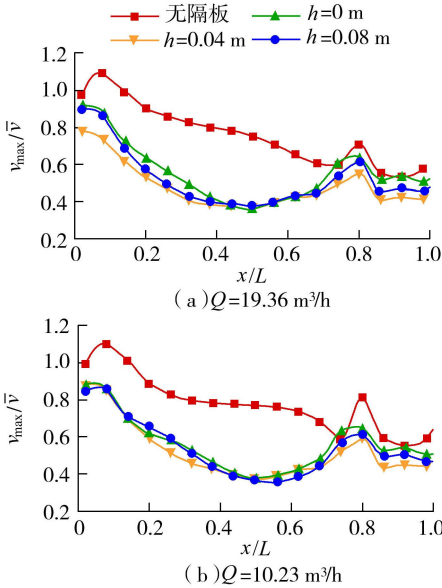


图8 最大流速沿程分布曲线

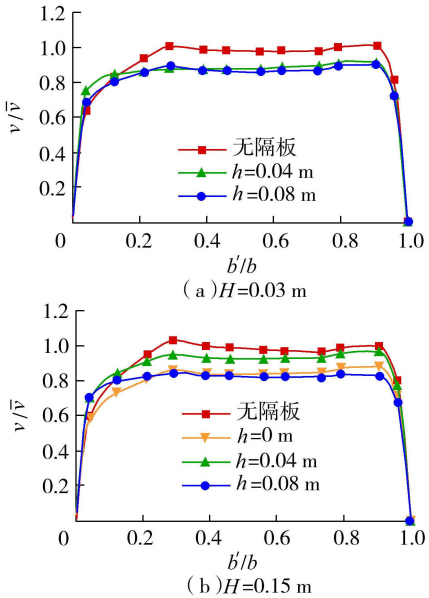


图9 不同水深处竖缝断面流速分布

2.2.4 湍动能

图 10 为 $Q = 19.36 \text{ m}^3/\text{h}$ 时竖缝隔板不同安装情况在不同水深处的池室湍动能分布:不同工况池室湍动能的分布与其所对应的池室流型分布具有较好的一致性;在不同水深处(除竖缝隔板阻挡水深处),湍动能最大值均出现在竖缝附近,同时水流通过竖缝后由于主流区流速较大,两侧回流区流速较小,造成主流边界流速梯度较大,因此在主流及其左右边界的剪切区域亦表现出较大的湍动能,并随着水深的增加,池室中湍动能的分布规律大致相同,但相同位置的湍动能有所增大;与无隔板相比,竖缝处设置隔板可降低池室湍动能的大小,并使其在竖缝下游位置区域内迅速衰减,产生连续的低湍动区域($0.007 \sim 0.01 \text{ J/kg}$),这给鱼类特别是游泳能力较弱的鱼类提供了一个较好的上溯条件;同流速分布一样,改变竖缝隔板安装高度,对竖缝隔板上下水深处池室湍动能的分布规律无显著影响。

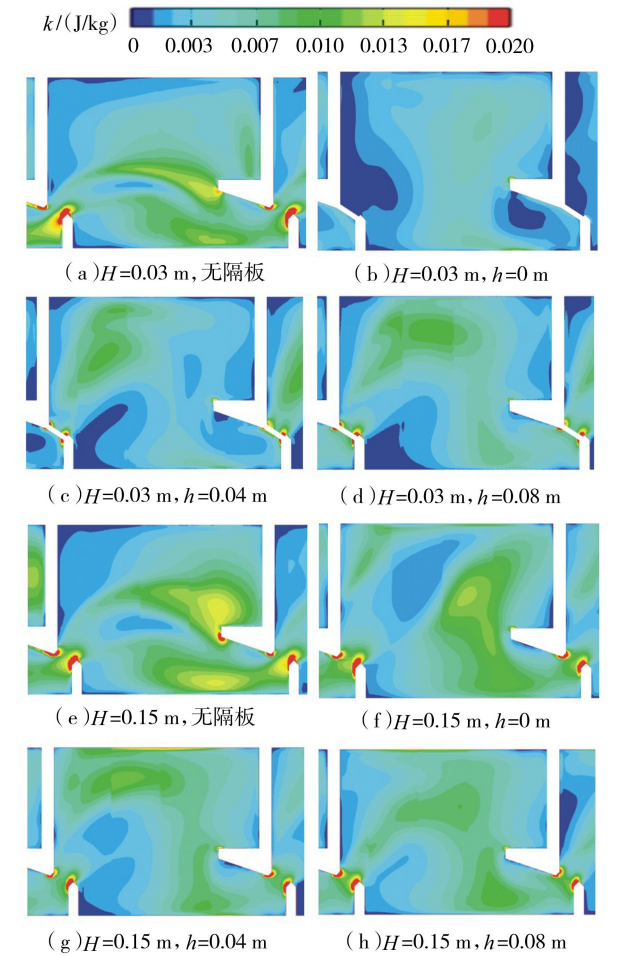


图 10 不同水深处池室湍动能分布

2.2.5 应变率

应变率(s_r)为水流各方向速度梯度的绝对值之和。相关研究^[24-25]认为水流速度梯度的大小是影响鱼类侧线系统感知水流刺激并产生运动的重要因素

因此,应变率也是研究鱼道水力特性的重要参数之一。图 11 为 $Q = 19.36 \text{ m}^3/\text{h}$ 时不同隔板安装情况下不同水深处的池室应变率分布。与池室湍动能分布一样,应变率分布也取决于池室流型的分布,并沿主流两侧边界有逐渐减小的趋势;同时在竖缝位置内侧以及靠近竖缝处下游位置的两侧呈现相对较大的数值,即在这些区域水流速度变化显著、流速梯度大(竖缝隔板阻挡水深处除外);设置竖缝隔板会使应变率的分布在竖缝下游处发生偏转,但对应变率的大小没有显著影响,这表明鱼类能在小流速和低湍动的水流条件下感知到相同的水流刺激向前运动,可促进鱼类的洄游上溯;而改变竖缝隔板的安装高度,对竖缝隔板上下水深处应变率的分布规律无明显影响。

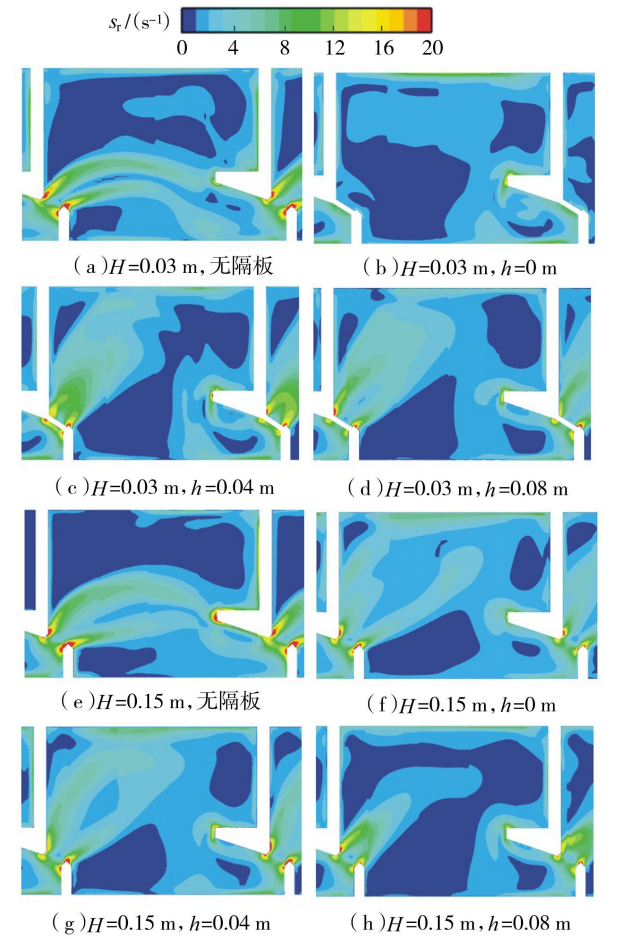


图 11 不同水深处池室水力应变率分布

3 结 论

- a. 对于不同的大底坡坡度,竖缝处设置隔板可有效减小池室最大流速及池室平均湍动能:池室最大流速下降率分布范围为 $2.01\% \sim 21.49\%$,池室平均湍动能下降率分布范围为 $3.77\% \sim 42.19\%$ 。
- b. 底坡为 $1/20$ 时,池室主流从反 S 形转变为利用池室整体容积进行低湍流能量转换并自身回转

的 Ω 形,并且其主流最大流速衰减率达到61.24% ~ 61.82%。

c. 改变竖缝隔板安装高度对隔板上下水深处的竖缝流速分布存在一定的影响,而对流速、湍动能、水力应变率的分布规律无显著影响,因此为了使鱼类能够更加顺利地通过竖缝,可将竖缝隔板安装在竖缝的中上方水深位置。

d. 在竖缝处设置隔板以优化大底坡鱼道形成的高流速、高湍动的水流流场具有一定的可行性,但是还需进一步结合过鱼试验研究来评估鱼类对这些水力条件的上溯行为反应,以论证研究结果的工程应用价值。

参考文献:

[1] 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报,2012,43(2):182-188. (CHEN Kaiqi, CHANG Zhongnong, CAO Xiaohong, et al. Recent progress in studies of overland flow resistance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (2): 182-188. (in Chinese))

[2] VERHELST P, REUBENS J, BUYSSE D, et al. Toward a roadmap for diadromous fish conservation: the Big Five considerations [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2021, 19(7):396-403.

[3] 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))

[4] KATOPODIS C, CAI L, JOHNSON D. Sturgeon survival: the role of swimming performance and fish passage research[J]. Fisheries Research, 2019, 212:162-171.

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

[6] 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. (LYU Qiang, SUN Shuangke, BIAN Yonghuan. Hydraulic characteristics and flow structure in a double vertical slot fishway [J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37 (4): 55-62. (in Chinese))

[7] 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.

[8] AN Ruidong, LI Jia, LIANG Ruifeng, et al. Three-dimensional simulation and experimental study for optimising a vertical slot fishway [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 12:119-129.

[9] TARRADE L, TEXIER A, DAVID L, et al. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways

[J]. Hydrobiologia, 2008, 609(1):177-188.

[10] CALLUAUD D, PINEAU G, TEXIER A, et al. Modification of vertical slot fishway flow with a supplementary cylinder [J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52 (5): 614-629.

[11] 王猛,史德亮,陈辉,等. 竖缝式鱼道池室结构变化对水力特性的影响分析[J]. 长江科学院院报,2015,32(1):79-83. (WANG Meng, SHI Deliang, CHEN Hui, et al. Effect of pool structure variation on hydraulic characteristics of vertical-slot fishway [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(1): 79-83. (in Chinese))

[12] SANAGIOTTO D G, ROSSI J B, BRAVO J M, et al. Applications of computational fluid dynamics in the design and rehabilitation of nonstandard vertical slot fishways [J]. Water, 2019, 11(2):199.

[13] AHMADI M, GHADERI A, NEZHAD H M, et al. Numerical investigation of hydraulics in a vertical slot fishway with upgraded configurations [J]. Water, 2021, 13 (19): 2711.

[14] ZHAO Hanqing, XU Yun, LU Yang, et al. Numerical study of vertical slot fishway flow with supplementary cylinders [J]. Water, 2022, 14(11):1772.

[15] PENA L, PUERTAS J, BERMÚDEZ M, et al. Conversion of vertical slot fishways to deep slot fishways to maintain operation during low flows: implications for hydrodynamics [J]. Sustainability, 2018, 10(7):2406.

[16] MALLEN-COOPER M, ZAMPATTI B, STUART I G, et al. Innovative fishways: manipulating turbulence in the vertical slot design to improve performance and reduce cost [R]. Sydney: Murray-Darling Basin Commission, 2008.

[17] QUARESMA A L, ROMÃO F, BRANCO P, et al. Multi slot versus single slot pool-type fishways: a modelling approach to compare hydrodynamics [J]. Ecological Engineering, 2018, 122:197-206.

[18] LACEY R W J, NEARY V S, LIAO J C, et al. The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers [J]. River Research and Applications, 2012, 28(4):429-443.

[19] 赵彬如,戴会超,戎贵文,等. 竖缝位置对竖缝式鱼道水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):69-73. (ZHAO Binru, DAI Huichao, RONG Guiwen, et al. Effect of slot position on hydraulic characteristics of vertical slot fishway [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5):69-73. (in Chinese))

(下转第 37 页)

- processes [R]. Washington D. C. : US Army Corps of Engineers, 2005.
- [27] 贾荣畅,刘颖,朱燕,等. 微孔曝气器孔径与运行气量对微孔曝气氧传质的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37 (8) : 75-79. (JIA Rongchang, LIU Ying, ZHU Yan, et al. Effects of pore diameter and air flow rate on oxygen mass transfer in fine pore aeration [J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37 (8) : 75-79. (in Chinese))
- [28] 杜开开,李云峰,柳凌,等. 紊动对水体过饱和溶氧释放的影响初探[J]. 淡水渔业, 2017, 47 (5) : 21-25. (DU Kaikai, LI Yunfeng, LIU Ling, et al. The effect of turbulence on the release of supersaturated dissolved oxygen in the water [J]. Freshwater Fisheries, 2017, 47 (5) : 21-25. (in Chinese))
- [29] 蒋亮,李然,李嘉,等. 高坝下游水体中溶解气体过饱和问题研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40 (5) : 69-73. (JIANG Liang, LI Ran, LI Jia, et al. The supersaturation of dissolved gas in downstream of high dam [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40 (5) : 69-73. (in Chinese))
- [30] WITT A, GULLIVER J S, SHEN L. Numerical investigation of vorticity and bubble clustering in an air entraining hydraulic jump[J]. Computers & Fluids, 2018, 172:162-180.
- [31] AL-AHMADY K. Mathematical model for calculating oxygen mass transfer coefficient in diffused air systems [J]. Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ), 2011, 19 (4) : 43-54.
- [32] PITTOORS E, GUO Y, VAN HULLE S W H. Oxygen transfer model development based on activated sludge and clean water in diffused aerated cylindrical tanks [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 243 : 51-59.
- [33] SCHIERHOLZ E L, GULLIVER J S, WILHELMS S C, et al. Gas transfer from air diffusers [J]. Water Research, 2006, 40 (5) : 1018-1026.
- [34] GILLOT S, CAPELA-MARSAL S, ROUSTAN M, et al. Predicting oxygen transfer of fine bubble diffused aeration systems: model issued from dimensional analysis [J]. Water Research, 2005, 39 (7) : 1379-1387.
- [35] LI R, GUALTIERI P, FENG J, et al. A dimensional analysis of supersaturated total dissolved gas dissipation [C] // The 36th IAHR World Congress. The Hague: IAHR, 2015: 1-8.
- [36] FENG J J, LI R, MA Q, et al. Experimental and field study on dissipation coefficient of supersaturated total dissolved gas [J]. Journal of Central South University, 2014, 21 (5) : 1995-2003.
- [37] 王燕,尹侠,薛胜伟. 表观气速对气升式环流反应器性能的影响[J]. 化学反应工程与工艺, 2007, 23 (2) : 104-108. (WANG Yan, YIN Xia, XUE Shengwei. Effects of superficial gas velocity on performance of the airlift loop reactor [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2007, 23 (2) : 104-108. (in Chinese))
- [38] 程香菊,曾映雪,谢宇宁. 池塘底部微孔曝气增氧试验及分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13 (5) : 339-343. (CHENG Xiangju, ZENG Yingxue, XIE Yuning. Experiments and analysis on re-oxygenation of fine bubble aeration systems at the bottom of pond [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13 (5) : 339-343. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022 - 11 - 20 编辑: 雷燕)
- +++++
- (上接第 23 页)
- [20] SILVA A T, KATOPODIS C, SANTOS J M, et al. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow [J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 314-328.
- [21] TAN Junjun, GAO Zhu, DAI Huichao, et al. Effects of turbulence and velocity on the movement behaviour of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) in an experimental vertical slot fishway [J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 363-374.
- [22] 郑金秀,韩德举,胡望斌,等. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 31 (5) : 104-110. (ZHENG Jinxiu, HAN Deju, HU Wangbin, et al. Fish swimming performance related to fishway design [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31 (5) : 104-110. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] BRAUN C B, COOMBS S. The overlapping roles of the inner ear and lateral line: the active space of dipole source detection [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2000, 355 (1401) : 1115-1119.
- [25] MOGDANS J, BLECKMANN H. Coping with flow: behavior, neurophysiology and modeling of the fish lateral line system [J]. Biological Cybernetics, 2012, 106 (11) : 627-642.
- (收稿日期: 2022 - 11 - 22 编辑: 俞云利)