

大底坡下“H”型竖缝式鱼道池室水力特性数值研究

邓斌^{1,2,3}, 徐拓¹, 黄皎凤¹, 瞿超雄⁴, 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; 4. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南长沙 410007)

摘要: 竖缝式鱼道作为一种生态补偿工程可有效缓解水利工程对鱼类洄游造成的不利影响, 研究合理参数下竖缝式鱼道水力特性对建设经济有效型鱼道具有重要意义。基于物理模型试验与三维数值模拟相结合的方法, 在大底坡 1:20 情况下, 系统分析了 9 种池室长宽比的“H”型竖缝式鱼道流场分布及水力特性。结果表明: 不同池室长宽比下主流均呈“S”型, 主流流速最大衰减率为 46.4%~61.3%; 池室长宽比 $L:B=10:8$ 为大底坡“H”型竖缝式鱼道最佳池室长宽比, 该方案池室内水流流态较好, 主流向右侧弯曲且曲率最大, 存在较大范围的低紊流区, 且满足鱼道单位体积消能率的要求, 有利于鱼类洄游上溯。研究结果可为大底坡下“H”型竖缝式鱼道参数选取与水力优化设计提供参考依据。

关键词: “H”型竖缝式鱼道; 大底坡; 水力特性; 流场结构; 物理模型; 数值模拟

中图分类号: TV135

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)06-0098-10

Numerical study on hydraulic characteristics of H-typed vertical slot fishway with high slope

DENG Bin^{1,2,3}, XU Tuo¹, HUANG Jiaofeng¹, QU Chaoxiong⁴, 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 410007, China; 4. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: The vertical slot fishway is an ecological compensation structure that can effectively alleviate the adverse impacts of hydraulic engineering on fish migration. It is of great significance to study the hydraulic characteristics of the vertical slot fishway under reasonable parameters for the construction of economical and effective fishways. Based on the combination of physical model experiment and three-dimensional numerical simulation, the flow field distribution and hydraulic characteristics of the H-typed vertical slot fishway of nine different chamber length-to-width ratios are systematically analyzed under the condition of 1:20 high slope. The results show that the mainstream flow presents an “S” shape under all chamber length-to-width ratios, with the maximum velocity attenuation rate ranging from 46.4% to 61.3%. It is found that the optimal chamber length-to-width ratio $L:B$ is 10:8 for the H-typed vertical slot fishway with high slope. Under this ratio, the flow pattern inside the chamber is favorable, with the mainstream bending towards the right and reaching maximum curvature. Meanwhile, low turbulence area reaches the largest, and the fishway meets the requirements of the energy dissipation rate per unit water body, which is beneficial for fish migration and sail upstream. The research results can provide some reference for parameter selection and hydraulic optimization design of H-typed vertical slot fishway with high

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2020RC3037, 20hmkj019); 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, 湖南衡南人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为计算水动力学与智慧水利。

通讯作者: 蒋昌波(1970—), 男, 陕西石泉人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为河流、湖泊、海岸数值模拟技术。

slope.

Key words: H-typed vertical slot fishway; high slope; hydraulic characteristics; flow field structure; physical model; numerical simulation

1 研究背景

水利工程在发挥经济效益的同时,也对生态环境造成了一定影响^[1],尤其会破坏河流连通性和生物多样性^[2],改变鱼类栖息环境^[3],阻碍鱼类洄游上溯,导致某些洄游鱼类种群灭绝^[4]。鱼道作为一种生态水利工程能够维持河流连通性和鱼类种群基因多样性^[5],主要分为技术型鱼道(竖缝式鱼道、槽式鱼道、组合式鱼道等)和仿自然型鱼道(溪流旁通式鱼道、仿自然鱼坡、鱼梯等),其中竖缝式鱼道结构简单、调节方便、适应性强,在鱼道工程中被广泛应用^[6]。竖缝式鱼道根据隔板型式分为含墩头的“H”型和“L”型隔板、无墩头的折线型隔板、矩形隔板等;鱼道设计时,底坡与结构参数决定其总长度和宽度,是影响鱼道建设成本的主要因素。研究发现^[7],我国已建竖缝式鱼道底坡大多较缓,约为1:100~1:50。Ahmadi等^[8]明确指出改进大底坡竖缝式鱼道结构是较经济的解决方案。但由于缺乏对竖缝式鱼道结构参数及水力特性的研究,鱼道建设成本增加,过鱼效果不佳,鱼类洄游成功率不足一半^[9]。因此,大底坡下合理的参数设计对节约鱼道建设成本和改善鱼道池室水流流态、流速等水力特性至关重要。

目前,针对不同底坡竖缝式鱼道结构参数取值,国内外学者进行了大量物理模型试验和数值模拟研究。Rajaratnam等^[10]和Tarrade等^[11]对不同底坡下“L”型隔板、矩形隔板等18种隔板型式的竖缝式鱼道进行了试验研究,发现鱼道内流场结构取决于池室长宽比。Wang等^[12]和Stuart等^[13]研究了底坡为1:20的“L”型竖缝式鱼道宽度变化对水流流态的影响,发现池室宽度变化会导致水流结构不同,增加池室宽度,能够减小池室紊动能,更有利于鱼类上溯。刘本芹等^[14]通过对底坡为1:20的“横隔板+横向导板”结构型式的竖缝式鱼道进行试验,研究了长宽比小于1.0时的隔板布置及水力特性,提出适合小长宽比鱼道特点的布置型式。上述研究表明,竖缝式鱼道池室长宽比是影响鱼道池室水力特性的重要因素,但进行物理模型试验研究需较大空间和人力物力,且受试验条件及仪器等诸多因素制约,结果具有一定的局限性。

近些年,数值模拟逐渐应用于鱼道研究中。Al-

varez-Vázquez等^[15]通过模拟底坡为1:50~1:20的矩形隔板竖缝式鱼道在10种池室长度下的鱼道内流场情况,发现鱼道池室长度是影响流场结构的重要因素。Bermúdez等^[16]研究了1:20底坡下16种长宽比的矩形隔板竖缝式鱼道内水流流态与流场分布,指出影响池室水力特性最主要的因素是池室长宽比。部分学者^[17-18]通过对底坡为1:100~1:20的“L”型竖缝式鱼道不同池室长宽比进行比较发现,相同底坡条件下池室长宽比越大,主流越平缓,紊动能越小。吕强等^[19]对1:50底坡的两侧竖缝式鱼道进行了9种长宽比模拟,认为长宽比 $5.75:8 \leq L:B \leq 6.5:8$ 是两侧竖缝式鱼道合理的长宽比范围。徐体兵等^[20]研究了底坡为1:40的无墩头折线型隔板竖缝式鱼道不同长宽比下的流场分布,认为当长宽比 $L:B=8:8 \sim 10.5:8$ 时,鱼道池室内流场结构较好。

以上研究大多针对底坡为1:100~1:20的“L”型隔板、无墩头的折线型隔板和矩形隔板等竖缝式鱼道,而近年来“H”型竖缝式鱼道已广泛应用于工程实际中,如长沙枢纽鱼道、犬木塘工程鱼道等^[21-23]。Li等^[24]通过对底坡为1:40的“H”型和“L”型隔板发现,“H”型隔板可有效降低水流流速,更有利于鱼类洄游。李程等^[25]对底坡为1:69的“H”型隔板长沙枢纽鱼道进行模拟,得出了鱼道最大流速和最大流量。目前在“H”型竖缝式鱼道研究中所涉及的坡度较缓,且主要从其流态及流速分布方面开展研究,而大底坡下“H”型隔板在结构参数设计方面仍不明确,缺乏对池室长宽比合理取值及水力特性的系统研究。因此,本文从生态环境和工程经济的角度,基于长沙枢纽鱼道结构,通过物理模型试验与三维数值模拟相结合的方法,系统分析了1:20大底坡下池室长宽比分别为6:8、7:8、8:8、9:8、10:8、11:8、12:8、13:8、14:8的“H”型竖缝式鱼道流场结构及水力特性,得出合适的池室长宽比,为大底坡下“H”型竖缝式鱼道的参数选择和水利优化提供参考,对建设低成本、高效率的竖缝式鱼道具有重要指导意义和工程应用价值。

2 研究方法

2.1 物理模型

物理模型基于重力相似准则设计,几何比尺为

1: 10。本试验在多功能试验水槽中进行,多功能试验水槽由蓄水池、潜水泵、电磁流量计、手动阀门、下游尾门等组成,通过潜水泵由蓄水池向上游水箱供水,水流通过各级池室经回水走廊流向蓄水池内形成自循环系统,如图1所示。试验过程中通过调节手动阀门控制来流流量,并利用电磁流量计对流量进行测量,同时控制下游尾门调节池室水深,保证各级池室水深 h 相同。多功能试验水槽分为入流段、工作段和出流段,总长为 16.0 m,单个池室长度 $L = 0.5$ m、宽度 $B = 0.4$ m、高度 $H = 0.5$ m,竖缝宽度 $b = 0.05$ m。入流段长度为 7.0 m,并设置 1: 10 的斜坡和消能网,保证第 1 级鱼道上游来流均匀平顺;工作段长度为 4.0 m,由 5 级大小相同的池室组成,自上游到下游依次进行编号(①~⑤),沿水流纵向从下游水池到上游水池呈阶梯状,并采用 1: 20 的大底坡;出流段长度为 5.0 m,其平面和立面布置图如图 2 所示。大底坡“H”型竖缝式鱼道物理模型的隔板采用有机玻璃材质(见图 3),鱼道模型两侧均为钢化玻璃,能够对鱼道内水流情况进行清晰的观测。

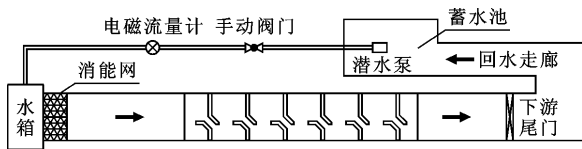


图1 多功能试验水槽系统示意图

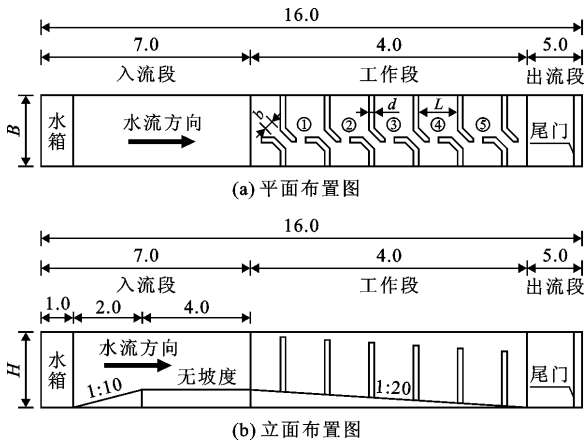


图2 大底坡“H”型竖缝式鱼道物理模型布置图(单位:m)

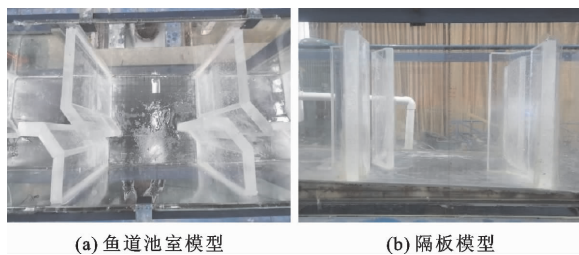


图3 大底坡“H”型竖缝式鱼道池室及隔板物理模型

2.2 数值模型

2.2.1 控制方程和湍流模型 采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD) 计算软件 FLOW-3D 进行三维数值模拟,通过有限差分法对 Navier-Stokes 方程进行离散求解。已有研究表明^[26],重整化群(renormalization group, RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型计算精度高且稳定性好,更适合模拟鱼道池室内的水流流动情况,故采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。其控制方程如下^[27]。

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}] \quad (6)$$

式中: t 为时间,s; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u_i, u_j 为各方向速度分量, m/s ; P 为时均压强, Pa ; k 为紊动能, m^2/s^2 ; μ 为分子黏性系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; μ_t 为涡黏性系数; $C_\mu = 0.0845$; ε 为紊动能耗散率; $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 1.39$; G_k 为平均速度梯度引起的紊动能产生项; $C_{\varepsilon 1}$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 均为经验常数, $C_{\varepsilon 1} = 1.42, C_{\varepsilon 2} = 1.68$ 。

采用优化后的 TruVOF 方法,可精确追踪自由液面,以减少计算空间和缩短模型收敛时间,其控制方程为^[28]:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

式中: α_w 为水的体积分数。当 $\alpha_w = 0$ 时表示空气相; 当 $\alpha_w = 1$ 时表示水相; 当 $0 < \alpha_w < 1$ 时表示水气混合相。

2.2.2 计算区域与网格划分 根据物理模型采用

1:1 比尺建立鱼道数值模型,在保证计算精度的前提下,为了减少数值模拟计算量,设置入流段为1.02 m、工作段为 2.68 m,全长为 4.00 m。鱼道单个池室净长为0.50 m,净宽为0.40 m,即长宽比为10:8,竖缝宽度为0.05 m,隔板厚度为0.03 m,采用1:20的大底坡,鱼道池室详细尺寸如图4所示。数值模型采用收敛性较好的结构化六面体网格,网格与几何形状自动耦合,并利用 FAVOR 功能进行网格处理,使鱼道模型更加精确、更加贴近实际几何外形。

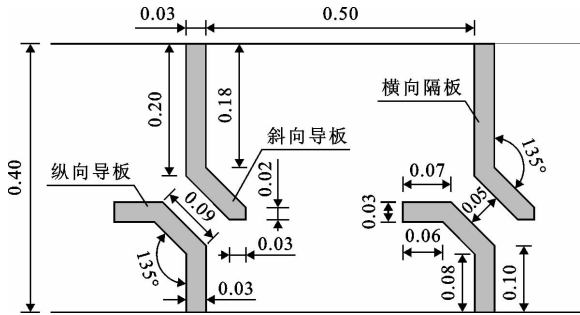


图 4 大底坡“H”型竖缝式鱼道模型池室详细尺寸(单位:m)

2.2.3 边界条件及工况设置 模型进、出口边界条件分别采用压力进口和压力出口,进口水深为0.335 m,出口水深为 0.185 m。模型顶部设置为压力边界,相对压强大小为 0。鱼道边壁及底部均为无滑移固壁边界,模型糙率为 0.015 m。设置 $h = 0.200$ m 的初始水深填充鱼道模型,从而加快收敛,减少计算时间。模型采用广义最小残量 (generalized minimal residual, 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。其工况设置见表 1。

表 1 鱼道数值模型计算工况设置

长宽比 (L:B)	底坡/ %	上游 水位/m	下游 水位/m	竖缝 宽度/m
6:8	5	0.285	0.185	0.050
7:8	5	0.298	0.185	0.050
8:8	5	0.310	0.185	0.050
9:8	5	0.323	0.185	0.050
10:8	5	0.335	0.185	0.050
11:8	5	0.348	0.185	0.050
12:8	5	0.360	0.185	0.050
13:8	5	0.373	0.185	0.050
14:8	5	0.385	0.185	0.050

2.3 数值模型的验证

2.3.1 网格无关性验证 采用 3 种不同分辨率的

网格进行计算,网格尺寸及总数如表 2 所示。由于鱼道各级池室参数与水深均相同,因此各级池室内流场结构也基本相同,考虑到首尾池室的流场在很大程度上会受上下游边界条件的影响,而中间第 3 级池室内水流流态较为稳定,更能真实地反映鱼道内的水力特性,故本试验选取中间第 3 级池室的 I-I 断面线进行流速的对比验证,对比结果如图 5 所示。图 5 表明,3 种不同网格尺寸下的断面线 I-I 流速数据变化趋势基本一致。M1 网格计算精度偏低,与实际测量结果存在一定偏差,而 M2 和 M3 网格的模拟结果更接近于实测数据。综合考虑计算精度和时间成本,最终选取网格大小为 0.008 m 的 M2 网格进行模拟计算。

表 2 3 种不同分辨率的网格参数

网格名称	网格尺寸/m	网格总数
M1	0.010	1232000
M2	0.008	2392500
M3	0.006	5696847

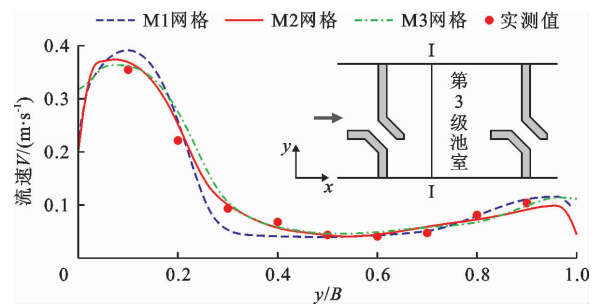


图 5 3 种不同网格尺寸下断面线 I-I 流速分布对比

2.3.2 不同断面线处横向流速分布 为验证数值模型的可靠性,将数值模拟结果与试验结果进行对比。选取大底坡“H”型竖缝式鱼道的中间第 3 级池室进行测点划分,横、纵断面两测点间距均为 0.04 m,横断面取 19 条测线,纵断面取 9 条测线,共 110 个测点,大底坡“H”型竖缝式鱼道池室测点布置如图 6 所示。

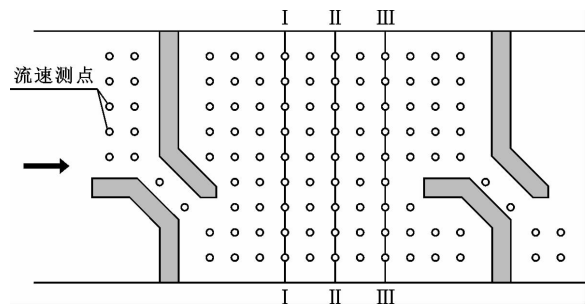


图 6 大底坡“H”型竖缝式鱼道中间第 3 级池室测点平面布置

通过多普勒声学流速仪 (acoustic Doppler velocimeter, ADV) 测量鱼道池室内流速分布, 对比大底坡“H”型竖缝式鱼道池室长宽比 $L:B = 10:8$ 时, $z = 0.5h$ 高度的断面线 I-I、II-II、III-III 和竖缝断面中心点连线处的流速情况, 并计算决定系数 R^2 的值以判断其准确性, 验证结果如图 7 所示。从流速流态及量值方面综合考虑, 将数值模拟与物理模型

池室内流场分布进行对比, 对比结果如图 8 所示。验证对比结果表明, 二者在流场结构和流速度量上符合性较好, 各验证断面线的验证结果吻合度较高, R^2 值均在 0.90 以上。

因此, 该数值模型能够较准确地模拟大底坡下“H”型竖缝式鱼道池室内的流场分布和水力特性, 可用于后续数值计算。

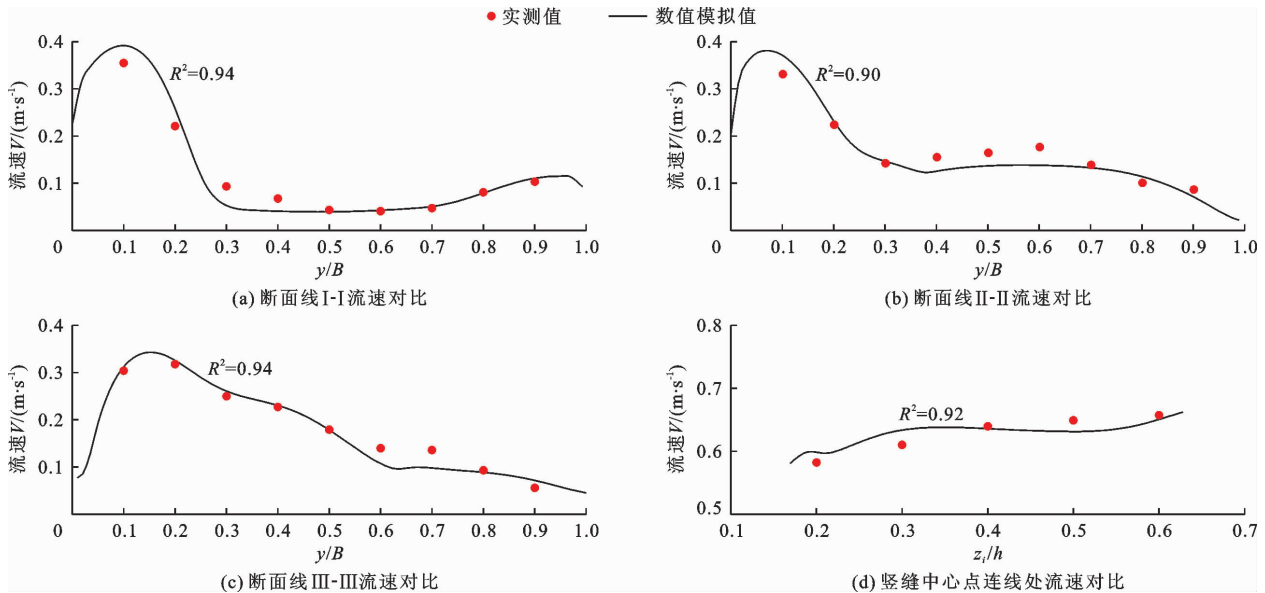


图 7 所选断面线流速数值模拟结果与物理模型实测值对比

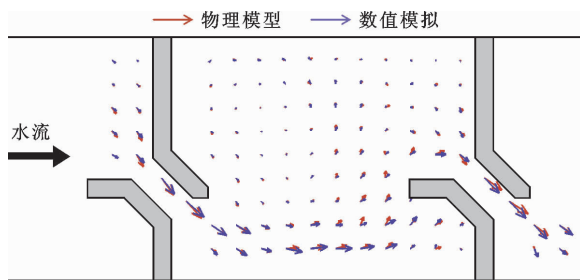


图 8 池室内流场数值模拟结果与物理模型实测结果对比

3 结果分析与讨论

在保证竖缝宽度 ($b = 0.05 \text{ m}$)、底坡 ($J = 1:20$)、导向角度 ($\theta = 45^\circ$) 等条件不变的情况下, 讨论大底坡下“H”型竖缝式鱼道 9 种池室长宽比的流场结构及水力特性。由于竖缝式鱼道池室内不同水深的横断面水流结构具有相似性^[13], 本研究选取中间第 3 级池室水深 $z = 0.5h$ 的横断面作为研究对象, 并对其进行具体的分析。

3.1 不同池室长宽比下的流场分布

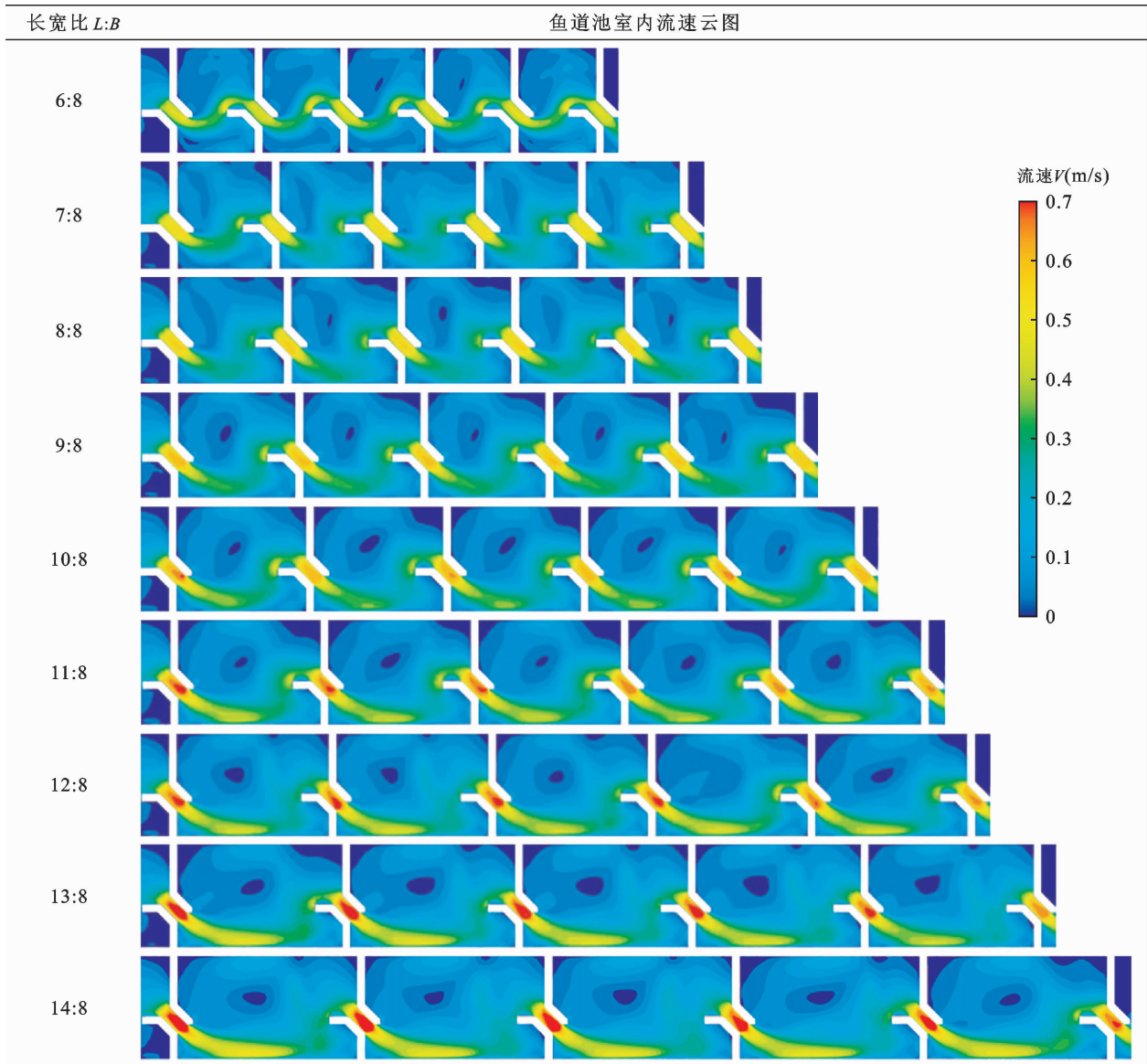
不同长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道池室内流速云图如表 3 所示; 流速矢量图及流场分布见图

9。由表 3 可以看出, 主流以射流的形式进入池室, 偏向池室右侧, 受到下游隔板和导板的作用, 又折向下游竖缝处进入下一级池室, 流线呈“S”型分布, 在主流两侧均存在回流区, 左侧回流区为逆时针方向, 右侧回流区为顺时针方向, 此模拟结果与彭鑫^[29]的模拟结果一致。如图 9 所示, 池室长宽比的增大对左侧回流区尺度的影响明显高于右侧回流区, 当 $L:B = 6:8$ 时 (图 9(a)), 主流区偏向池室中心处位置, 主流右侧的左、右下角区域存在两个较小的回流区, 左侧未形成回流, 这表明池室内的水体未充分参与池室的消能过程。当 $7:8 \leq L:B \leq 8:8$ 时 (图 9(b)、9(c)), 主流左侧开始出现回流区, 但区域面积较小且不明显, 此流场结构不是鱼类上溯的优先选择。当 $9:8 \leq L:B \leq 11:8$ 时 (图 9(d)、9(e)、9(f)), 主流向右侧发生偏转, 且偏转程度逐渐增大, 两侧回流区显著, 表明该流场结构有利于池室内动能的消耗, 可为鱼类提供良好的水流流态和休息场所。当 $12:8 \leq L:B \leq 14:8$ 时 (图 9(g)、9(h)、9(i)), 主流从竖缝处射出, 其偏转程度基本未随长宽比的增大而发生变化, 主流左侧回流区面积大幅增加, 几乎占池室面积的 1/2, 导致右侧回流区受到

挤压,仅在短横隔板墙角处存在小面积回流区,这种流态可能影响鱼类上溯。上述结果与程曦^[30]的模

拟结果相似,但“H”型竖缝式导向角方向不同,主流偏转方向与之相反,因此受压迫的回流区也相反。

表 3 不同长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道池室内速度云图



3.2 不同长宽比下主流最大流速及轨迹

图 10 为不同长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道池室主流最大流速轨迹线及沿程变化情况。以第 3 级池室上游横隔板迎水面为起点,每隔 $0.05(L + d)$ 等间距划分断面至下游横隔板迎水面,提取每个断面上沿程最大流速 V_{max} 和位置点 (x_i, y_i) ,并依次平滑连接绘制最大主流轨迹线,以定量反映主流的偏转程度。由图 10(a) 可知,随着池室长宽比的增大,最大主流轨迹线偏转程度逐渐增加。相关研究表明^[19,31],当底坡坡度不变时,主流流线的曲率随池室长宽比的增大而增大,主流长度相应增加,与本研究结果一致。当 $L:B = 6:8$ 和 $7:8$ 时,主流偏转程度

较小;当 $L:B = 10:8$ 时,主流向右侧弯曲且曲率达到最大;当 $11:8 \leq L:B \leq 14:8$ 时,受右侧池壁的影响,最大主流的偏转程度几乎不发生变化。图 10(b) 和表 4 给出了大底坡下“H”型竖缝式鱼道最大主流沿程流速变化曲线和最大主流流速的最大衰减率,其中, V 为最大主流轨迹线上的各点流速; V_{min} 为最大主流轨迹线上的最小流速; V_0 为鱼道竖缝断面平均流速;最大衰减率的计算式为 $(1 - (V_{min}/V_0)) \times 100\%$ 。由图 10、表 4 可知,主流流速最大衰减范围为 $46.4\% \sim 61.3\%$ 。当 $6:8 \leq L:B \leq 9:8$ 时,由于池室隔板的作用, x/L 约在 $0 \sim 0.50$ 范围内的主流流速大幅度减小,最大主流流速的最大衰减率为

46.4% ~ 50.0% ;当 $L:B = 10:8$ 时,最大主流流速最大衰减率为 52.8% ;当 $11:8 \leq L:B \leq 14:8$ 时,在 $x/L = 0.30 \sim 0.68$ 范围内,主流与右侧池室壁面发生碰撞,导致主流的大小和方向发生改变,最大主流

流速的最大衰减率为 57.9% ~ 61.3% 。不同长宽比的鱼道池室流速变化规律均表现为:在 $x/L \approx 0.72$ 位置处的主流流速达到最小,之后受下游隔板的影响,流速开始增大。

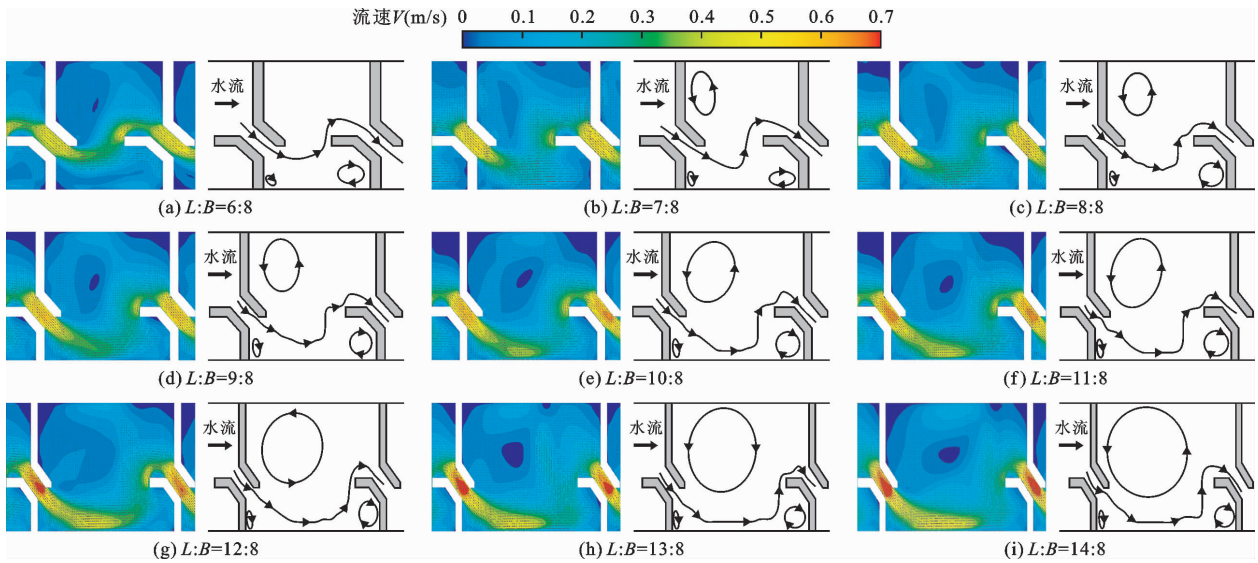


图9 不同长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道流速矢量图及流场分布

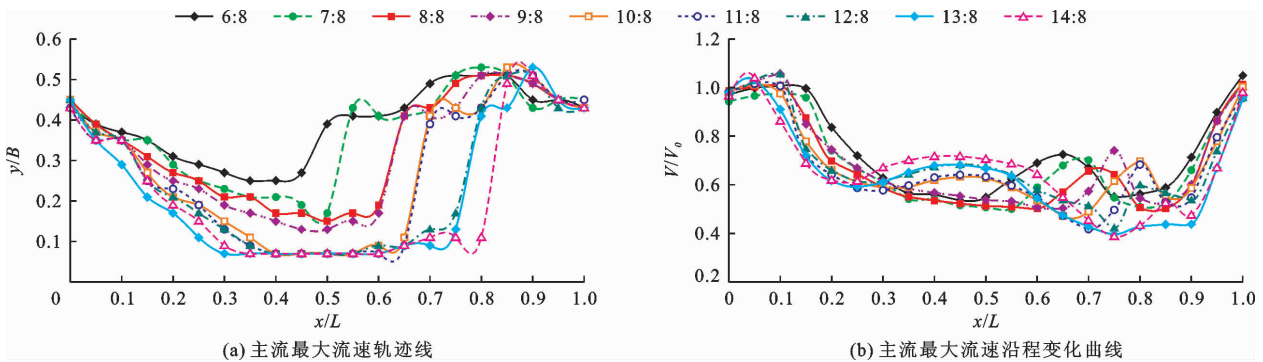


图10 大底坡“H”型竖缝式鱼道主流区最大流速轨迹线及其沿程变化情况

表4 大底坡“H”型竖缝式鱼道最大主流流速的最大衰减率

长宽比 $L:B$	6:8	7:8	8:8	9:8	10:8	11:8	12:8	13:8	14:8
流速最大衰减率/%	46.4	48.7	49.8	50.0	52.8	57.9	58.2	60.4	61.3

图11为大底坡“H”型竖缝式鱼道最大流速轨迹线最小流速与长宽比的关系曲线,其反映了主流扩散程度和能量耗散情况。图11表明,大底坡“H”型竖缝式鱼道最大主流轨迹线的最小流速随池室长宽比的增大而减小,此结果与徐体兵等^[20]的模拟结果也是一致的,其采用的隔板型式为无墩头的折线型隔板。由图11可知,当 $L:B = 6:8$ 时, V_{min}/V_0 达到最大,其值为 0.52,这说明主流区流速纵向衰减较少,主流流速沿程变化不大;当 $L:B = 10:8 \sim 11:8$ 时,主流最小流速有一定幅度的降低,但随后逐渐趋于稳定, V_{min}/V_0 基本维持在 0.38 左右。

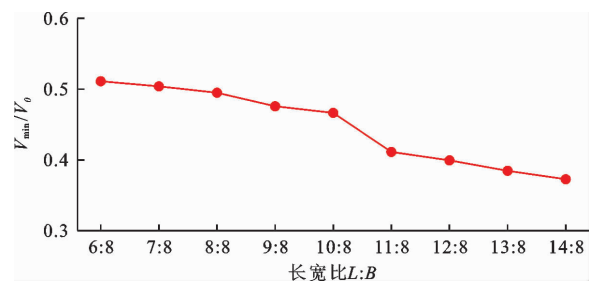


图11 鱼道最大流速轨迹线最小流速与长宽比的关系曲线

3.3 大底坡“H”型竖缝式鱼道竖缝断面流速分布

大底坡鱼道竖缝处的流速分布是决定鱼类是否

成功上溯的重要因素。选择中间第 3 级池室水深 $z = 0.5h$ 处的上游竖缝断面作为研究对象,提取断面上网格节点的流速值 V_i 以及网格节点至竖缝断面右端的距离 b_i ,并进行无量纲化处理,得到的不同长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道竖缝断面流速分布见图 12。图 12 表明,不同池室长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道竖缝断面流速分布具有相似性,均呈梯形分布特点。在 $0 \leq b_i/b \leq 0.1$ 区间内,竖缝断面流速快速递增;当 $0.1 \leq b_i/b \leq 0.9$ 时, $V_i/V_0 \approx 0.88 \sim 1.02$, 竖缝流速变化幅度较小;在 $0.9 \leq b_i/b \leq 1.0$ 区间内,竖缝断面流速急剧减小。综上所述,靠近左、右两侧斜向导板的流速略小,但变化较为剧烈;位于池室竖缝断面中心处位置的流速较大,且变化较为平缓;在保证竖缝宽度和大底坡不变的情况下,鱼道池室长宽比的改变对大底坡“H”型竖缝式鱼道竖缝断面流速分布无显著影响。赵国安等^[32]研究发现,竖缝处流速和水流结构几乎不受池室长宽比的影响,与本研究结果具有一致性。

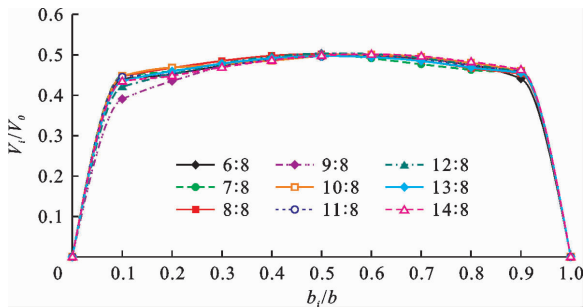


图 12 不同长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道竖缝断面流速分布

3.4 不同池室长宽比对池室紊动能的影响

紊动能反映池室水流的紊动情况,是鱼道重要的水力参数,也是评价鱼道水力特性优劣的关键因素。相关研究表明^[16],紊动能随池室长度的增大而增大。本研究得出的不同池室长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道紊动能分布如图 13 所示。分析图 13 可发现,大底坡“H”型竖缝式鱼道不同长宽比的池室内紊动能在贴近纵向导板和两侧斜向导板处较大,约为 $0.018 \sim 0.020 \text{ J/kg}$,且随着池室长宽比的增大,竖缝处紊动区域也随之增大。当 $6:8 \leq L:B \leq 10:8$ 时,池室内低紊动能区域逐渐增大;当 $L:B = 10:8$ 时,池室内低紊流区域面积达到最大,紊动能最小值接近于 0;而当 $11:8 \leq L:B \leq 14:8$ 时,由于主流以射流形式碰触右侧池壁,水流发生紊乱,引起右侧池壁及池室内部分区域紊动能增大,进而影响鱼类洄游上溯。

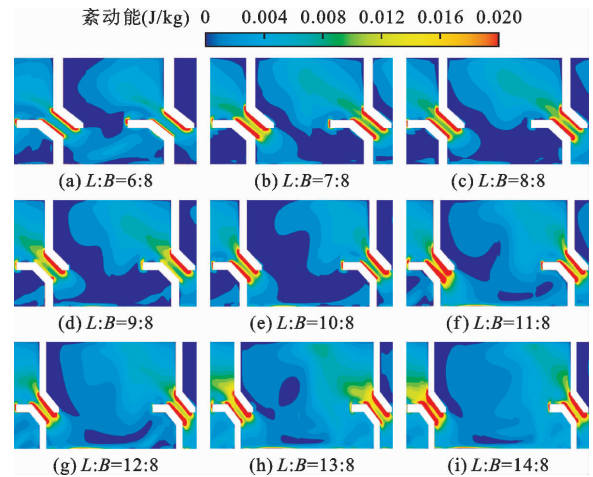


图 13 不同池室长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道池室紊动能分布

3.5 大底坡“H”型竖缝式鱼道池室内单位体积消能率

大底坡“H”型竖缝式鱼道的设计不仅要考虑水流流态和紊动能分布,还应考虑池室内的能量耗散。Lariniere 等^[33]建议池室内单位体积消能率应不超过 $150 \sim 200 \text{ W/m}^3$,对于小型鱼道和游泳能力一般的鱼类,允许的单位体积消能率需低于 150 W/m^3 。因此,需要对不同池室长宽比的大底坡“H”型竖缝式鱼道进行消能率复核算。单位体积消能率 E 的计算公式如下:

$$E = \frac{\rho b V_0^3}{2BL\varphi^2} \quad (8)$$

$$Q = \varphi b H_s \sqrt{2gJ(L+d)} \quad (9)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; b 为竖缝宽度, m ; V_0 为竖缝断面平均流速, m/s ; φ 为流量系数; L 为池室净长, m ; B 为池室净宽, m ; d 为隔板厚度, m ; H_s 为竖缝断面水深, m ; J 为鱼道底坡。

已有研究表明^[19],双侧竖缝式鱼道流量系数几乎不受池室长宽比的影响。由本研究得出的鱼道流量系数与长宽比的关系(图 14)可知:

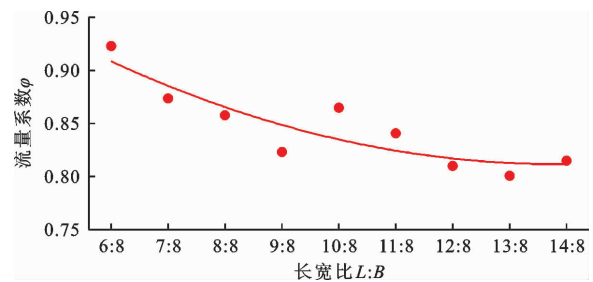


图 14 不同池室长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道流量系数

在保证其他参数不变的情况下,鱼道池室长宽比的改变对大底坡“H”型竖缝式鱼道流量系数 φ 的

影响程度较低, φ 取值约为 0.85。根据公式(8), 分别对 9 种长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道单位体积消能率进行计算, 并按照相关比尺换算成原型值, 计算结果如表 5 所示。结果表明: 当鱼道池室长宽比

为 $6:8 \leq L:B \leq 8:8$ 时, 池室内单位水体消能率均大于 150 W/m^3 , 不符合单位水体消能率的要求; 长宽比为 $9:8 \leq L:B \leq 14:8$ 时, 池室内单位水体消能率均小于 150 W/m^3 , 满足单位水体消能率的要求。

表 5 不同池室长宽比下大底坡“H”型竖缝式鱼道单位水体消能率

长宽比 $L:B$	6:8	7:8	8:8	9:8	10:8	11:8	12:8	13:8	14:8
消能率 $E/(\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	165.7	170.5	152.0	131.2	138.3	138.4	133.6	134.4	126.5

4 结 论

基于物理模型试验和三维数值模拟相结合的方法, 系统分析了 9 种不同长宽比条件下大底坡“H”型竖缝式鱼道池室内的流场结构、主流轨迹线、竖缝断面流速、紊动能等水力特性, 探讨了池室长宽比变化对大底坡“H”型竖缝式鱼道池室水力特性的影响规律, 主要结论如下:

(1) 鱼道流场结构与池室长宽比有着密切联系。不同长宽比条件下, 大底坡“H”型竖缝式鱼道池室主流均呈“S”型; 当长宽比为 $9:8 \leq L:B \leq 11:8$ 时, 主流偏转程度较大, 且两侧均存在流速较小的回流区, 可为鱼类提供良好的水流流态和休息场所。

(2) 主流偏转程度和沿程轨迹随长宽比的改变而发生显著变化。当长宽比 $L:B = 10:8$ 时, 大底坡“H”型竖缝式鱼道池室内的主流向右侧弯曲且曲率达到最大; 而长宽比为 $11:8 \leq L:B \leq 14:8$ 时, 主流与右侧池壁发生碰撞, 导致主流的大小和方向发生改变, 不同池室长宽比的主流流速最大衰减率为 46.4% ~ 61.3%。

(3) 随着大底坡“H”型竖缝式鱼道长宽比的增加, 竖缝断面流速和流量系数无显著变化, 但对紊动能存在一定影响。紊动能的极大值位于竖缝处和纵向导板位置; 当 $L:B = 10:8$ 时, 池室内低紊流区域面积达到最大。而长宽比为 $11:8 \leq L:B \leq 14:8$ 时, 贴近右侧池壁及部分区域的紊动能增加, 可能会影响鱼类洄游上溯。

(4) 当大底坡“H”型竖缝式鱼道池室长宽比为 $6:8 \leq L:B \leq 8:8$ 时, 单位水体消能率 E 大于 150 W/m^3 , 不符合消能率的要求, 因此, 该长宽比范围不是大底坡“H”型竖缝式鱼道设计的优先选择。

综上所述, 通过对大底坡“H”型竖缝式鱼道不同长宽比下池室水力特性的相关研究, 并从节约建设成本的角度考虑, 当长宽比 $L:B = 10:8$ 时, 大底坡“H”型竖缝式鱼道的设计较为合理。然而, 其流

场结构是否适合鱼类洄游, 还需要进一步结合生物流体力学过鱼试验进行验证, 由此论证研究成果的工程应用价值。

参考文献:

- [1] KIM J H, YOON J D, BAEK S H, et al. An efficiency analysis of a nature-like fishway for freshwater fish ascending a large Korean river[J]. *Water*, 2015, 8(3): 1-18.
- [2] 蔡露, 张鹏, 侯轶群, 等. 我国过鱼设施建设需求、成果及存在的问题[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 292-299.
- [3] LI Weiming, CHEN Qiuwen, CAI Desuo, et al. Determination of an appropriate ecological hydrograph for a rare fish species using an improved fish habitat suitability model introducing landscape ecology index[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 311: 31-38.
- [4] 杨宇. 中华鲟葛洲坝栖息地水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [5] KATOPODIS C, LU Cai, JOHNSON D. Sturgeon survival: the role of swimming performance and fish passage research[J]. *Fisheries Research*, 2019, 212: 162-171.
- [6] 高柱, 戴会超, 郭卓敏, 等. 隔板型式对竖缝式鱼道水力特性的影响研究[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(10): 37-41.
- [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] AHMADI M, GHADERI A, MOHAMMADNEZHAD H, et al. Numerical investigation of hydraulics in a vertical slot fishway with upgraded configurations[J]. *Water*, 2021, 13(19): 2711.
- [9] CLAY C H. Design of fishways and other fish facilities[M]. Ottawa: Department of Fisheries of Canada, 1995.
- [10] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, SOLANKI S. New designs for vertical slot fishways[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1992, 19(3): 402-414.
- [11] TARRADE L, TEXIER A, DAVID L, et al. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 609: 177-188.
- [12] WANG R W, DAVID L, LARINIER M. Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes[J]. *Knowledge and Management of Aquatic*

- Ecosystems, 2010, 396: 11276.
- [13] STUART I G, BERGHUIS A P. Upstream passage of fish through a vertical-slot fishway in an Australian subtropical river[J]. Fisheries Management and Ecology, 2002, 9(2): 111 - 122.
- [14] 刘本芹,黄岳,宣国祥. 小长宽比鱼道池室水力学试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 101 - 106.
- [15] ALVAREZ - VÁZQUEZ L J, MARTÍNEZ A, RODRÍGUEZ C, et al. Optimal shape design for fishways in rivers [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2007, 76(1 - 3): 218 - 222.
- [16] 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.
- [17] 毛熹,李嘉,易文敏,等. 鱼道结构优化研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(S1): 54 - 59.
- [18] 郭维东,孙磊,高宇,等. 同侧竖缝式鱼道水力特性研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 81 - 83.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 李强. 长沙综合枢纽工程鱼道布置浅析[J]. 湖南水利水电, 2012(2): 13 - 16.
- [22] 刘新征. 湘江长沙综合枢纽工程鱼道选型设计[J]. 湖南水利水电, 2015(4): 16 - 18.
- [23] 钟泳成. 长沙枢纽鱼道设计及水力特性研究[J]. 低碳世界, 2019, 9(1): 121 - 122.
- [24] LI Yun, WANG Xiaogang, XUAN Guoxiang, et al. Effect of parameters of pool geometry on flow characteristics in low slope vertical slot fishways[J]. Journal of Hydraulic Research, 2019, 58(3): 395 - 407.
- [25] 李程,钟泳成. 枢纽鱼道建筑物数值模拟试验研究[J]. 湖南水利水电, 2016(4): 40 - 42.
- [26] 魏园杰,罗凯强,谭均军,等. 基于三种湍流模型的竖缝式鱼道水力特性研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(10): 71 - 74 + 78.
- [27] 陈磊,谭均军,石小涛,等. 组合隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 86 - 91.
- [28] 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.
- [29] 彭鑫. 湘江长沙综合枢纽隔板型式鱼道三维水流数值分析[J]. 湖南水利水电, 2015(2): 25 - 28.
- [30] 程曦. 单侧竖缝式鱼道的水力特性研究[J]. 红水河, 2021, 40(6): 7 - 12 + 18.
- [31] 郭维东,赖倩,王丽,等. 同侧竖缝式鱼道水力特性数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 77 - 80 + 144.
- [32] 赵国安,沈春颖,苟超. 小长宽比下竖缝式鱼道池室水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 113 - 117.
- [33] LARINIER M, TRAVADE F, PORCHER J P. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring [M]. Bovas: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002.

