



## L形隔墩鱼道水力特性数值模拟研究\*

孙靖康<sup>1,2</sup>, 郭超<sup>1,2</sup>, 祝龙<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏南京 210029;

2. 南京水利科学研究院通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:** 针对鱼道中因不良流态导致的鱼类上溯效率低下的问题, 提出L形隔墩鱼道这一新型鱼道形式, 通过数值模拟的方法, 对鱼道内的水流条件展开研究。结果表明: L形隔墩鱼道中主流位置居中, 水流流态平顺, 主流两侧存在大小相近且稳定的回流区, 回流区中部流速最小。主流宽度0.45 m, 与L形隔墩竖缝相当, 并且各水层的水力特性基本一致。鱼道最大平均流速随底坡的降低而降低, 当底坡从1/70降至1/90时, 鱼道最大流速从1.06 m/s降低至0.91 m/s, 降幅达到16.5%。当底坡低于1/80时, 主流区紊动能保持在 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 池室内部的紊动能基本均小于 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 低紊动能区域面积占比超过70%。该研究可为鱼道工程提供量化的设计参数, 结合设计规范的要求, 鱼道底坡坡度采用1/80及以下时能够满足鱼类上溯需求。

**关键词:** L形隔墩鱼道; 水流流态; 底坡; 紊动能; 数值模拟

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0138-08

### Numerical simulation study on hydraulic characteristics of L-shaped baffle fishway

SUN Jingkang<sup>1,2</sup>, GUO Chao<sup>1,2</sup>, ZHU Long<sup>1,2</sup>

(1. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structures Technology, MOT, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** To address the low efficiency of fish passage caused by poor flow conditions, this study proposes a new kind of fishway design, named as the L-shaped baffle fishway. The water flow conditions inside the fishway are investigated by numerical simulation. The results show that the flow is stable and maintained in the center of L-shaped baffle fishway. There are similar and stable recirculation zones on both sides of the main stream, with the lowest velocity occurring in the center of recirculation zone. The main flow width of 0.45 m, which is comparable to the vertical slots of the L-shaped baffle fishway, and the hydraulic properties of the individual water layers are essentially the same. The maximum mean flow velocity of the fishway decreases with the decrease of bottom slope. When the bottom slope decreases from 1/70 to 1/90, the maximum flow velocity of the fishway decreases from 1.06 m/s to 0.91 m/s, which is a decrease of 16.5%. When the bottom slope is lower than 1/80, the turbulent kinetic energy in the main flow region keeps at  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , the turbulent kinetic energy in the pool is less than  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , and the low turbulent kinetic energy area is more than 70%. This study can provide quantifiable design parameters for the fishway project. In combination with the requirements of design specifications, when the bottom slope of the fishway is 1/80 or less, it can meet the upstream requirements of fish.

**Keywords:** L-shaped baffle fishway; flow regime of water flow; bottom slope; turbulent kinetic energy; numerical simulation

收稿日期: 2025-04-06 录用日期: 2025-04-30

\*基金项目: 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA23023034); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y124016)

作者简介: 孙靖康(1992—), 男, 博士, 工程师, 从事通航水力学研究。

在水利工程建设发展中,大量拦河建筑物阻断了河流的连续性,对鱼类的回溯产生不利影响。为保障河流生态的可持续发展,需要设置鱼道这种人工通道,以帮助鱼类越过障碍物,保障鱼类的生存和迁徙<sup>[1]</sup>。鱼道通常由一系列的池室、隔墩、休息池等组成,通过隔墩调整水流条件,从而使鱼类可以顺利回溯。为此,鱼道需要满足 3 点要求<sup>[2]</sup>: 1) 鱼道最大流速不应超过鱼类极限流速; 2) 通道内需存在供鱼类休息的休息池; 3) 鱼道内流态应尽量平稳。

在传统工程鱼道研究中,竖缝式鱼道研究居多,因其结构规则、水流流态良好、可适应不同的水位变幅、便于施工等特点而被广泛应用<sup>[3]</sup>。吕春玮等<sup>[4]</sup>对于双侧竖缝式鱼道进行研究,发现竖缝沿池室宽度方向的位置变化对竖缝处流速分布影响较小,只有池室两侧的回流区变化会逐渐增大,并且当竖缝距离边墙达到宽度的 0.18~0.23 倍时,两侧主流流态清晰,同时主流流速衰减速率较好。周成海等<sup>[5]</sup>针对梯形过流断面下中侧竖缝式鱼道水力特性开展研究,发现底坡为 1/250 时竖缝最大流速为 0.90 m/s,休息池内存在较大范围的低流速区,并且范围会随着休息池长度的增大而增大。陈莹颖等<sup>[6]</sup>对垂直竖缝式鱼道结构形式开展研究,发现池室内主流基本呈 S 形弯曲,最大流速出现在竖缝附近,池室左右存在大范围流速低于 0.20 m/s 的回流区,当鱼道坡度为 1/120 时,鱼道竖缝平均最大流速为 0.65 m/s,能够为鱼类上溯提供良好条件。祝龙等<sup>[7]</sup>通过对仿自然鱼道水流条件的优化研究发现,通过增大竖缝偏心距,延长主流绕流路径,减小竖缝宽度,增大局部阻力等措施可降低池室流速。除此之外,前人还对新型鱼道结构形式进行了研究和探索。Keizer<sup>[8]</sup>对 Tesla 阀在鱼道中的可行性进行了探讨,发现大尺度特斯拉

阀(Tesla valve)在适宜的入流条件和结构组合工况下可用作过鱼设施。王元玖等<sup>[9]</sup>提出一种消能通道与过鱼通道相对独立的新式 Tesla valve 鱼道,有效改善了过鱼通道内流速和流态,显著提升了休息区占比,增加了鱼类上溯成功的可能性。

目前对于竖缝式鱼道的研究多集中在竖缝的结构上,对于竖缝两端隔墩的体型研究较少,且常规的隔墩体型均为直线型,结构较为单一,对水流的调整作用有限。本文提出 L 形隔墩鱼道这一新型鱼道结构形式,可以进一步优化鱼道内的水流流态,对鱼道的建设和发展提供了参考。针对 L 形隔墩鱼道,本文通过三维数值模拟的方法,对鱼道流态特性、底坡影响、紊动能分布等水力特性展开研究,旨在为优化鱼道结构设计提供理论支撑。

## 1 数值模拟

### 1.1 几何模型

本文以袁河航道开发工程枢纽上建设的鱼道为对象展开研究,过鱼对象以四大家鱼为主,根据主要对象的过流能力,鱼道的设计流速指标为 0.20~1.00 m/s。根据枢纽总体布置、过鱼对象生物学特性及鱼道设计规范,鱼道采用矩形断面,沿流向设置若干级隔墩用以调整水流条件,相邻隔墩之间构成池室,普通池室宽 3 m、长 3.6 m,直段休息池长 9 m,上下游设计水深均为 2 m。隔墩采用 L 形布置形式,隔墩厚度 0.3 m,每个隔墩处的竖缝宽度 0.45 m,L 形隔墩鱼道布置见图 1。本文建立的袁河鱼道三维数值模型包括 11 个普通池室,1 个直段休息池,13 个隔墩(编号 1#~13#),底坡选取 1/70、1/80、1/90 三种形式,分别对不同坡度条件下的鱼道内池室流速和流态等水流条件进行计算分析,L 形隔墩鱼道数学模型见图 2。

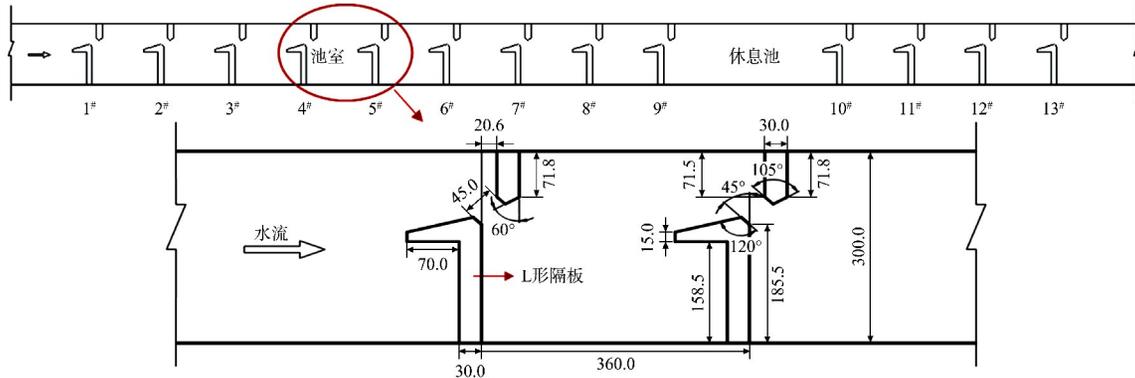


图 1 L 形隔墩鱼道布置(单位:cm)

Fig. 1 Layout of L-shaped baffle fishway( unit :cm)



图 2 L 形隔墩鱼道数学模型

Fig. 2 Numerical model of L-shaped baffle fishway

### 1.2 计算方法

受鱼道结构影响,池室中存在大范围的漩涡发生,为了更好地模拟池室中的旋流,湍流模型采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型模拟鱼道内复杂的紊流结构,其控制方程如下所示<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中:  $k$  为湍动能;  $\varepsilon$  为耗散率;  $G_k$  为平均流速梯度产生的湍动能;  $G_b$  为浮力产生的湍动能;  $Y_M$  为不可压缩湍流对耗散率的影响;  $S_k$  和  $S_\varepsilon$  分别为  $k$  和  $\varepsilon$  的源项;  $R_\varepsilon$  为平均应变率对  $\varepsilon$  影响的附加项;  $\alpha_k$  和  $\alpha_\varepsilon$  分别为  $k$  和  $\varepsilon$  的反向有效普朗特数;  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ,  $C_{3\varepsilon} = 0.0845$ ;  $\mu_{eff}$  和  $C_\mu$  为经验系数;  $\rho$  和  $\mu$  分别为密度和黏度;  $u$  为流速;  $t$  为时间;  $x$  和  $y$  为方向。

对于水气交界面的捕捉采用 VOF 方法,对于水气两相流而言,每个网格单元中的水和气体的体积分之和始终等于 1,其控制方程如下所示:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (6)$$

式中:  $\alpha_w$ 、 $\alpha_a$  分别为水和气体的体积分。

### 1.3 边界条件和网格划分

本次数值模拟采用明渠入流方式,上游入流断面设置为压力入口,自由水深 2 m;下游出流断面设置为压力出口,自由水深 2 m;鱼道顶部设置为压力入口,压力等于大气压;隔墩、边墙和底部均设置为无滑移壁面。

整个计算流域采用六面体结构化网格处理,鱼道竖缝位置进行局部加密,模型约 139 万个网格单元, L 形隔墩鱼道数学模型网格见图 3。通过 GCI(网格收敛指数, grid convergence index)方法<sup>[11]</sup>对网格无关性进行验证,通过与 60 万和 100 万个两组粗糙网格对比,以闸室竖缝处平均流速为计算变量,发现 GCI 计算值随着网格加密方案的变化呈减小趋势,说明数值计算结果随网格总数的增加而单调收敛,139 万个网格的 GCI 小于 5%,证明网格数量符合要求。

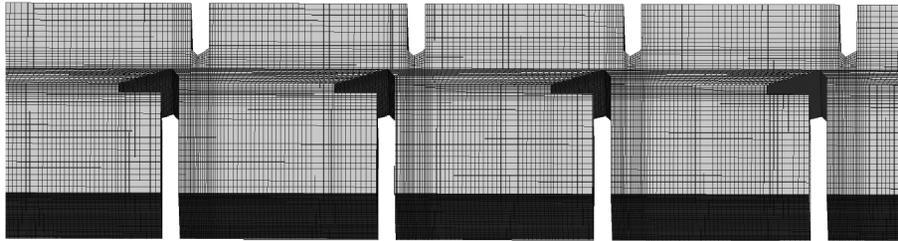


图 3 L 形隔墩鱼道数学模型网格  
Fig. 3 Numerical model grid of L-shaped baffle fishway

1.4 模型验证

数值模拟通过与袁河鱼道物理模型试验测得原型数据<sup>[12]</sup>对进行对比验证, 选取各隔墩竖缝断面距离底部 1.0 和 1.8 m 处的流速作为对比变量, 物理试验和数值模拟对比见图 4。通过对比发现, 在鱼道底坡均为 1/80 的条件下, 数值模拟计算所得隔墩竖缝处的流速与物理试验结果较为一致, 距离底部 1.0 和 1.8 m 处最大流速相对误差分别为 4.6% 和 4.7%, 说明本次数值模拟方法较为合适。

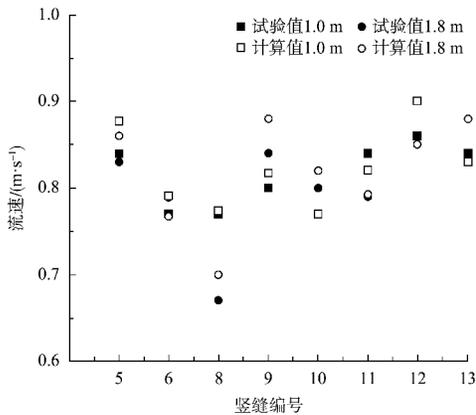


图 4 鱼道竖缝流速物理试验和数值模拟对比  
Fig. 4 Comparison of flow velocity in vertical baffle between physical experiment and numerical simulation

2 结果与分析

2.1 池室流态

底坡 1/80 下 L 形隔墩鱼道中池室水流条件见图 5, 池室上、中、下层对应的水深分别为 0.2、1.0 和 1.8 m。从图中可以看出, L 形隔墩鱼道池室内水流流向明确, 各池室中的水流条件基本保持一致, 主流位置居中并呈现 S 形弯曲, 左右两侧的回流区大小相近且较为稳定, 整体过流较为

平顺, 主流宽度与竖缝相当, 约 0.45 m。对比不同水层的水流流速可以发现, 各个水层水流水力特性基本一致, 但下层水流最大流速指标略大于池室上层。鱼道池室最大流速出现在隔墩竖缝断面后缘, 最大水流流速 1.00 m/s, 主流左右两侧均存在一定范围的低流速区, 便于上溯鱼类调整休息。

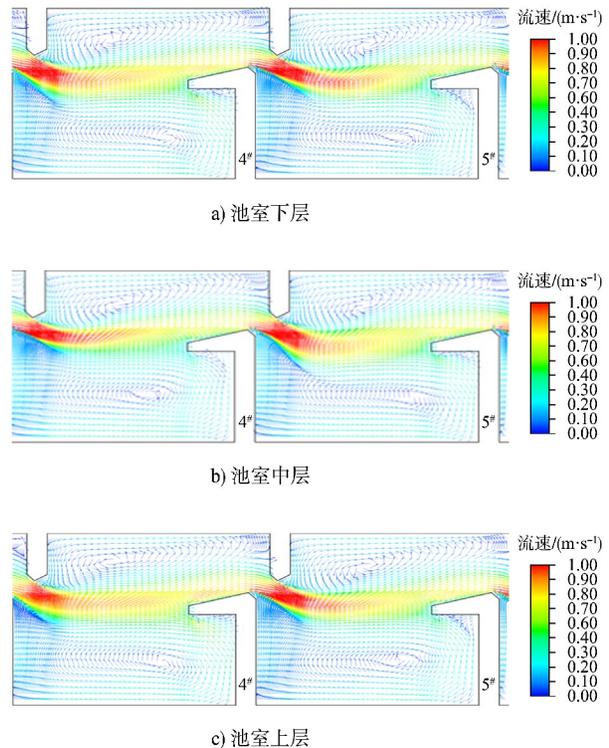


图 5 L 形隔墩鱼道中池室水流条件  
Fig. 5 Water flow conditions in the pool of L-shaped baffle fishway

为探究池室中的流速变化, 对池室内不同断面和水深条件下的流场展开分析。针对底坡 1/80 的鱼道, 在池室布设置 8 个监测断面(断面间距 0.5 m), 断面编号见图 6, 各断面不同水深处的最大流速分

布见图7。从图7中可以看出，池室最大流速发生在竖缝断面处(断面1和8)，下层流速可达1.00 m/s，略大于中、上层；池室中间流速较低，下层流速低于中、上层，断面中部上层的最大流速仅有0.60 m/s，发生在断面5和7的位置。池室各断面不同水深的最大流速相差较低，均保持在0.16 m/s以下，即L形鱼道各水层水流流速指标基本一致，整体均能较好地满足目标鱼类上溯需求。

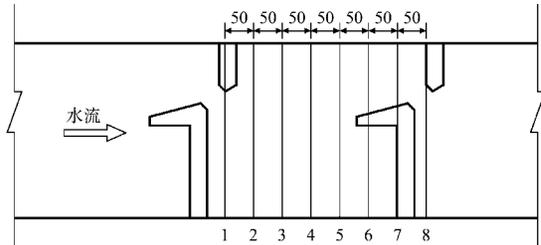


图6 池室监测断面(单位:cm)  
Fig. 6 Monitoring sections in the pool( unit:cm)

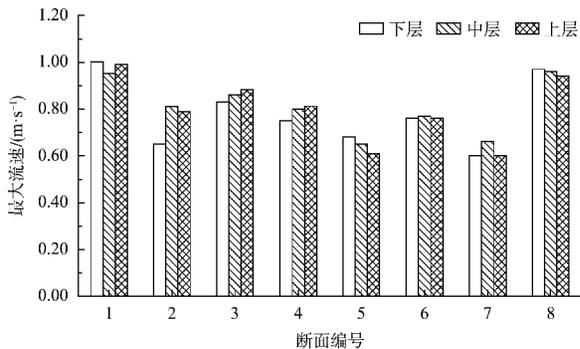


图7 池室各断面不同水深最大流速分布  
Fig. 7 Distribution of maximum flow velocity at different water depths in each monitoring section in the pool

L形鱼道各竖缝处平均流速分布见图8，其中X、Y、Z方向分别代表水流沿流向、沿宽度方向、沿垂向的流速分量。从图中可以发现，各竖缝处平均流速基本保持约0.90 m/s，隔墩竖缝附近的平均流速达到最大值为1.00 m/s；受直段休息池底坡影响，10#隔墩竖缝平均流速达到最低，为0.83 m/s；受L形隔墩引导，各竖缝处沿宽度方向的平均流速基本保持在0.40 m/s左右；各竖缝处水流沿垂向流速基本为0 m/s，说明各深度水流基本保持在同一水层运动，不存在水流上挑或下潜的情况。

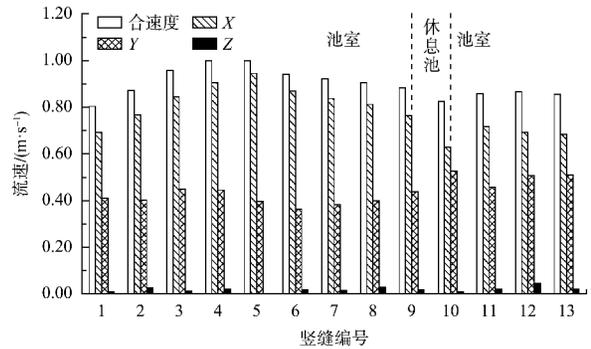


图8 各竖缝平均流速分布  
Fig. 8 Distribution of mean flow velocity in each vertical slot

休息池的主要作用是通过大范围低速漩涡为鱼类提供休息场所，L形隔墩鱼道休息池水流流速见图9。从图中可以看出，休息池各水深处的流速分布基本一致，垂向流速差异较小。在竖缝隔墩后侧，池室左侧区域存在一处范围较大的低速回流区，右侧区域存在一小范围低流速回流区，回流区流速绝对值均较小，基本保持在0.20 m/s以下，适合上溯鱼类调整和休息，表明休息池内总体流态较好。

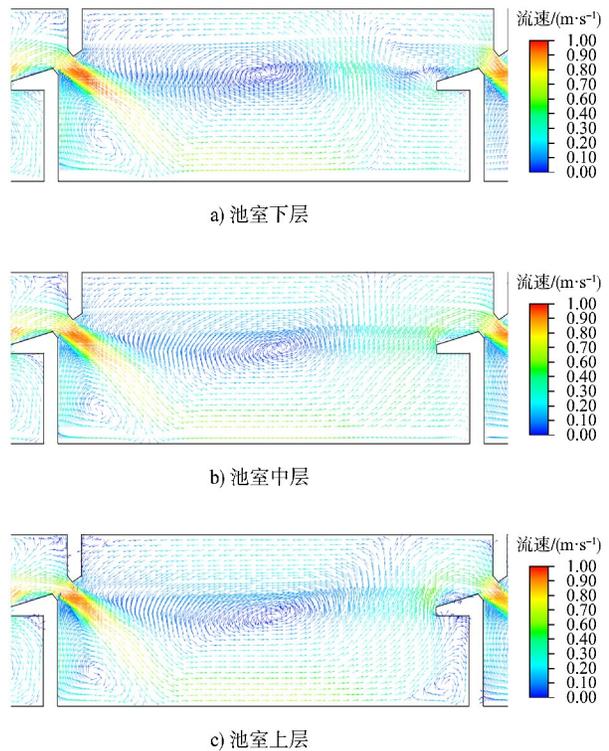


图9 休息池水流流速矢量图  
Fig. 9 Vector diagram of water flow velocity in the resting pool

### 2.2 底坡影响分析

池室内的水流流速变化与鱼道底坡大小相关, 选取底坡为 1/70、1/80、1/90 的不同鱼道对比研究, 3 种不同底坡下池室内各断面流速变化见图 10。从图 10a) 中看出, 3 种底坡下的池室各断面最大流速从上游向下游先降低后上升, 最大值发生在竖缝隔墩附近(断面 1 和 8), 最小值出现在池室中部(断面 7), 底坡 1/70、1/80、1/90 的最大流速分别为 1.07, 1.00, 0.96 m/s, 最大流速随鱼道底坡的降低明显减小。从图 10b) 中看出, 3 种底坡下的池室内最大平均流速分别为 1.06, 0.96, 0.91 m/s, 最大平均流速也会随鱼道底坡的降低而逐渐降低, 并且当底坡斜率处于 1/80 时, 池室内最大流速已经达到规范设计要求<sup>[13]</sup>。

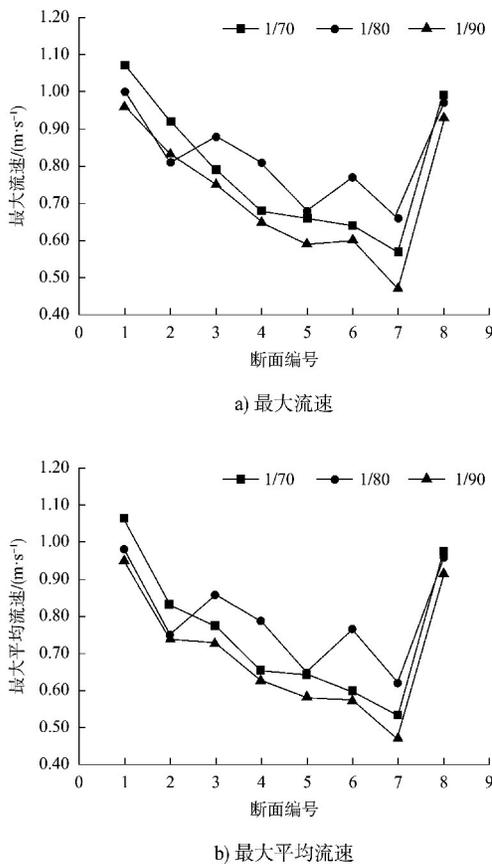


图 10 第 5 池室各断面流速  
Fig. 10 Flow velocity in each section of the fifth pool

3 种不同底坡的鱼道各竖缝断面的流速分布见图 11。从图中可以看出, 1/70、1/80、1/90 不同底坡竖缝最大流速分别为 1.26、1.00、1.04 m/s, 最大流速整体上会随底坡的降低而逐渐减小, 降幅达到 16.5%。受入流条件的影响, 入流端附近的池室竖缝最大流速较大, 进入到鱼道中部流速逐渐降低, 而流过水平休息池后, 在斜坡的影响下流速又会逐渐增大, 3 种不同底坡中部池室最大流速的最低值分别为 0.90、0.88、0.82 m/s。可以发现, 当底坡斜率越小, 竖缝最大流速降低的速度越快, 当底坡斜率为 1/90 时, 最大流速在 3#竖缝处就已经降低到 0.85 m/s。可见, 鱼道底坡的降低对减小鱼道池室内的水流流速作用重大, 适当降低鱼道底坡能够为鱼类洄游提供便利。

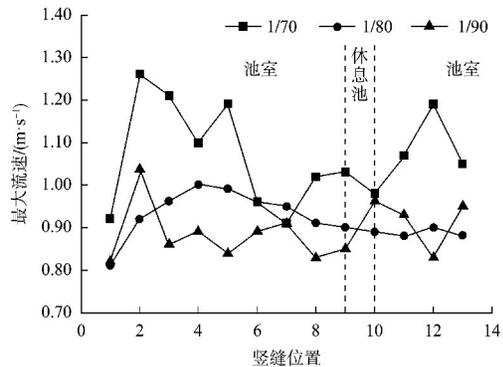


图 11 L 形隔墩鱼道各竖缝水流最大流速  
Fig. 11 Maximum flow velocity of water in each vertical slot of L-shaped baffle fishway

### 2.3 紊动能分析

在鱼道中, 由于隔墩结构的影响, 水流在流经竖缝过程中会存在紊动耗散。当水流紊动能过高时, 鱼类为克服紊流障碍会消耗更多能量, 并且会降低鱼类的游泳能力和平衡能力, 使其无法顺利完成上溯。由于高紊动能会对鱼类自身产生负面影响, 因此鱼类上溯一般要求鱼道池室内紊动能低于  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 而  $0.10 \text{ m}^2/\text{s}^2$  通常被认为鱼道内紊动能的最大可接受值<sup>[14]</sup>。底坡 1/80 的 L 形隔墩鱼道池室紊动能分布见图 12。

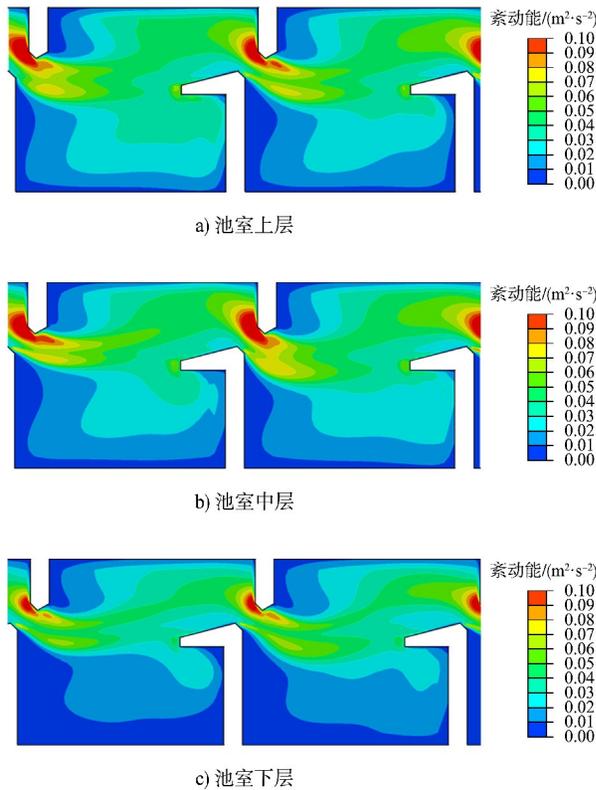


图 12 L 形隔墩鱼道紊动能分布  
 Fig. 12 Turbulent kinetic energy distribution of L-shaped baffle fishway

池室上、中、低层的紊动能最大值均位于竖缝附近，最大值基本约为  $0.10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。主流区紊动能基本保持在  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$  附近，池室内部的紊动能基本均小于  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，低紊动能区域面积占比超过 70%。可见 L 形隔墩鱼道池室两侧主流流态清晰，回流区基本位于主流外侧，主流流速衰减率较为合适。

### 3 结论

1) L 形隔墩鱼道中水流流态平稳，主流位置保持居中，主流左右两侧存在大小相近并且稳定的回流区，回流区中部流速最小，水流整体过流较为平顺。

2) L 形鱼道中各池室内水流条件基本一致，各水层水力特性基本一致，下层水流最大流速略大于上层，鱼道池室最大流速出现在隔墩竖缝断面后缘。鱼道休息池内流速基本保持在  $0.20 \text{ m/s}$

以下，休息池漩涡流态平稳。

3) 通过不同底坡的鱼道流态对比发现，池室内最大流速会随着鱼道底坡的降低而逐渐降低，当底坡从  $1/70$  降低至  $1/90$  时，池室内最大流速从  $1.07$  降至  $0.96 \text{ m/s}$ ，降幅可达 16.5%。

4)  $1/80$  底坡鱼道内的紊动能最大值基本约为  $0.10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，主流区紊动能基本保持在  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$  附近，主流流速衰减率较为合适。

5) 结合设计规范的要求，鱼道底坡坡度处于  $1/80$  及以下较为合适，能够满足鱼道上溯需求。

### 参考文献:

[1] 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.  
 CAI L, ZHANG P, HOU Y Q, et al. Demand, achievement and issues of fish passage facilities in China[J]. Chinese journal of ecology, 2020, 39(1): 292-299.

[2] 何雨朦, 安瑞冬, 李嘉, 等. 蛮石斜坡型仿自然鱼道水力学特性研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 40-47.  
 HE Y M, AN R D, LI J, et al. Hydraulic characteristics of nature-like fishways of rock-ramp type [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2016, 35(10): 40-47.

[3] 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, 83.  
 ZHAO B R, DAI H C, RONG G W, 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, 83.

[4] 吕春玮, 韩雷, 王正君, 等. 竖缝位置对双侧竖缝式鱼道水力特性的影响[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(4): 14-18.  
 LYU C W, HAN L, WANG Z J, et al. Effect of vertical seam position on hydraulic characteristics of two-side vertical seam fishway[J]. Hydro science and cold zone engineering, 2023, 6(4): 14-18.

[5] 周成海, 祝龙, 谢玉堂, 等. 貂皮岭仿生态鱼道底坡和休

- 息池水力数值模拟[J]. 水运工程, 2021(8): 87-92.
- ZHOU C H, ZHU L, XIE Y T, et al. Hydrodynamic numerical simulation on bottom slope and rest pools of Mopiling nature-like fishway [J]. Port & waterway engineering, 2021(8): 87-92.
- [6] 陈莹颖, 祝龙, 乔鑫位, 等. 蚌埠闸鱼道池室水力特性数值模拟[J]. 水运工程, 2022(5): 78-83, 90.
- CHEN Y Y, ZHU L, QIAO X W, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of fishway pools in Bengbu Sluice[J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 78-83, 90.
- [7] 祝龙, 胡乔一, 王程, 等. 枞阳仿自然鱼道水流条件优化数值模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2022 (6): 1-7, 15.
- ZHU L, HU Q Y, WANG C, et al. Numerical simulation and optimization of flow conditions in Zongyang nature-like fishway [J]. China rural water and hydropower, 2022(6): 1-7, 15.
- [8] KEIZER K. Determination whether a large scale Tesla valve could be applicable as a fish passage [R]. Delft: Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, 2016.
- [9] 王元玖, 薛智博, 张春泽, 等. 一种消能通道与过鱼通道独立的新式 Tesla 阀鱼道及其水力特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(9): 171-176.
- WANG Y J, XUE Z B, ZHANG C Z, et al. Research on the hydraulic characteristics of a novel Tesla valve fishway with independent energy dissipation channel and fish passage channel [J]. China rural water and hydropower, 2023(9): 171-176.
- [10] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [11] STERN F, WILSON R V, COLEMAN H W, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations: part 1: methodology and procedures[J]. Journal of fluids engineering, 2001, 123(4): 793-802.
- [12] 南京水利科学研究所. 袁河航道开发工程可行性研究枢纽过鱼设施模型试验研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2024.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. Experimental study on fishway facilities at the hub for the feasibility research of Yuan River waterway development project [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2024.
- [13] 水利水电工程鱼道设计导则: SL 609—2013 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- Guideline for fishway in water conservancy and hydropower project: SL 609-2013[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [14] 谭均军, 高柱, 戴会超, 等. 竖缝式鱼道水力特性与鱼类运动特性相关性分析[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 924-932, 944.
- TAN J J, GAO Z, DAI H C, et al. The correlation analysis between hydraulic characteristics of vertical slot fishway and fish movement characteristics [J]. Journal of hydraulic engineering, 2017, 48(8): 924-932, 944.

(本文编辑 赵娟)

## 声 明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: [www.sygk.com.cn](http://www.sygk.com.cn), 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部