

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221381

# 竖缝式鱼道在实际工程中的设计与试验分析

韩 雷<sup>1</sup>, 刘发智<sup>2</sup>, 赵兴龙<sup>3</sup>, 叶昆河<sup>3</sup>, 李树航<sup>1</sup>, 李 洋<sup>1</sup>

(1. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250000;  
3. 黑龙江大学水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 鉴于竖缝式鱼道能够较好地适应上下游水位变化、水流条件好等特点,以某实际工程鱼道为例,以隔板和导板的不同尺寸和型式为变化参数,设计出3种池室体型进行数学模型试验,采用1:5比尺的物理模型对数学模型进行验证后,通过数值模拟的计算,分析了不同隔板、导板尺寸和型式下池室结构对鱼道池室内的水流流态、池室最大流速、主流区水力特性的影响,并利用比尺为1:5物理模型对优化后的体型进行局部物理模型试验,通过比尺为1:20整体物理模型对沿程水深及竖缝处最大流速进行分析,并提出不同水深条件下,鱼道的引水流量,为相似工程提供了参考和借鉴的作用。

**关键词:** 水力学; 鱼道设计; 数值模拟; 物理模型; 试验分析

**中图分类号:** S956.3; TV222

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)07-0146-04

## 1 引言

根据设计结构型式不同,鱼道可分为隔板式、槽式、仿生态和特殊结构四种型式。槽式鱼道以丹尼尔鱼道为主,缺少休息区,需间隔布置休息池,仅适用于泳速高、耐力强的中大体型鱼类。隔板式又可分为竖缝式、溢流堰式和组合式三种型式。其中竖缝式鱼道结构简单、过鱼效率高,具有适用上下游水位变化较大同时流速、紊动能变化不大、池室不容易淤积等优点,因此应用较广。目前,关于竖缝式鱼道设计及水力特性方面的研究已较多,并取得了大量的研究成果,如张国强等<sup>[1]</sup>研究发现鱼道各级池室长宽比( $L/B$ )一般在1.25左右;赵彬如等<sup>[2]</sup>通过对同侧竖缝式鱼道的大量模型试验研究,发现要想获得较为理想的水流流态,竖缝中心距池室边壁的位置应为池室宽度的0.25~0.35;张超等<sup>[3]</sup>改进鱼道细部结构。目前鱼道研究方法大多以数学模型为主,通过数值模拟的方法探究了参数变化对池室水流结构的影响,少有依托具体工程针对特定鱼类池室结构进行设计。为此,本文以某实际工程为例,通过数

学模型试验优化体型设计,通过物理模型试验方法进行局部物理模型试验和整体物理模型试验,并对鱼道沿程水深进行测量,计算不同水深下的过流能力,为相关工程鱼道的设计及应用提供参考。

## 2 鱼道尺寸设计

水库工程附近珍贵冷水性洄游鱼主要以哲罗鱼、细鳞鱼、江鳕、雷氏七鳃鳗等为主,温水性洄游鱼主要以鲢、鳙、鲤、银鲫等为主。鱼道总长713 m,底坡坡比初设为1:50,共设有140个池室和12个休息池、鱼道进出口各1个。时常运行工况为上游水位550 m,下游水位548 m,进出口水深为2 m。鱼道上下游水深变化采用等水深。根据文献<sup>[4]</sup>,池室长宽比 $L/B$ 在1~1.31范围内,可获得较好的流态,该池室长度 $L=3.7$  m,宽度 $B=3$  m,池室长宽比 $L/B$ 为1.23。根据文献<sup>[1]</sup>,由大量模型试验发现,竖缝宽度 $b$ 为池室宽度 $B$ 的0.10~0.25时,竖缝处断面流速分布梯度大,主流流速沿程衰减非常显著,鱼道池室内消能效果好。在隔板及导板型式和尺寸变化后引起了竖缝宽度的变化,因而本文3种方案竖缝宽度

**收稿日期:** 2022-07-06, **修回日期:** 2022-08-24

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019E125; LH2020E117)

**作者简介:** 韩雷(1974-),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为生态水工学、水力学及河流动力学, E-mail: hanleity@126.com

**通讯作者:** 李洋(1990-),男,硕士、工程师,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: 1562269294@qq.com

$b$  分别为 0.600、0.514、0.500 m,  $b/B$  分别为 0.200、0.171、0.166。根据文献[2], 鱼道池室内的水流流态较合理, 过鱼效率高时, 竖缝中心距池室边壁应为池室宽度的 0.25~0.35, 该鱼道竖缝中心距池室边壁的距离分别为 0.76、1.04、0.80 m, 竖缝中心位置、竖缝中心与池室边壁的距离分别为池室宽度的 0.253、0.346、0.267。鱼道底坡坡比  $i=1:50$ 。横向导板和纵向导板的增设对水流流态的分布均起良好作用, 但纵向导板的增设会增加池室内的最大流速。3 种方案均增设横向导板, 方案 1 横向隔板在竖缝处采用平行水流的直线型式布置, 方案 2、3 横向隔板在竖缝处设置斜面型式。方案 2 不增设纵向导板, 方案 1、3 增设纵向导板。3 种方案具体尺寸见图 1。

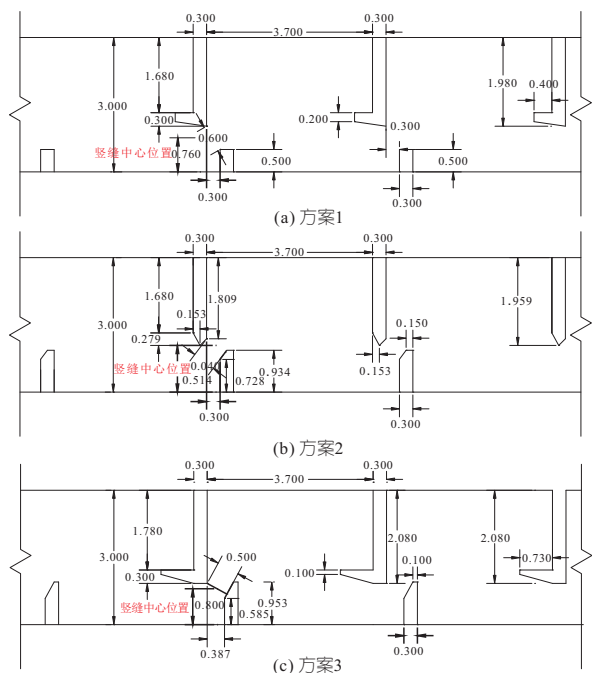


图 1 3 种方案设计体型(单位:cm)

Fig. 1 Design body shape of three schemes

## 3 试验方法

### 3.1 数学模型试验方法

采用专业软件 Fluent 标准模型并耦合 VOF 模块捕捉鱼道池室水流自由表面<sup>[1,2,4]</sup>; 利用数学模型试验方法计算和分析不同池室结构的水流流态、池室最大流速、主流区水力特性, 确定优化方案。为验证数学模型参数设定的合理性及网格剖分的正确性, 对第一种方案进行物理模型验证试验。试验采用有机玻璃以 1:5 的比尺制作鱼道模型, 坡比为 1:70, 池室模型长度为 0.74 m, 内设 10 组隔板。有机玻璃糙率为 0.009, 对应原型的糙率为 0.012, 与实际工程中鱼道混凝土糙率

略有差别, 但在竖缝式鱼道中, 局部水头损失占据主导地位, 因而可忽略糙率不同对试验结果的影响。验证内容为 4-5 池室中心横断面的流速分布, 池室中心断面布置 15 个流速测点, 物理模型流速通过无线旋浆流速仪测定, 测量模型水深为 6 cm, 模型流速经比尺转换为原型流速, 以水流方向为  $x$  轴, 以垂直水流方向为  $y$  轴, 测点布置见图 2(a), 拟合结果见图 2(b)。

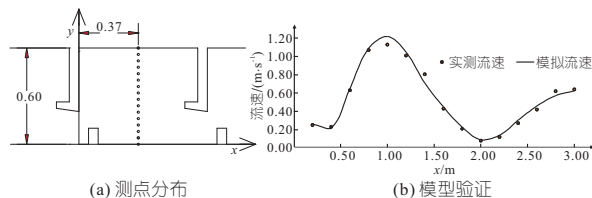


图 2 测点分布与模型验证

Fig. 2 Measuring points distribution and model verification

由图 2(b)可看出, 物理模型测量的池室中心横断面上最大流速位置距离原点 1.0 m, 最大流速值为 1.13 m/s; 数值模拟最大流速距离原点 1.0 m, 与物理模型测量的结果一致, 最大流速为 1.22 m/s。数值模拟主流区沿程最大流速曲线分布规律与物理模型实测流速分布规律基本吻合, 拟合误差仅为 1.0%~9.5%, 说明数值模拟参数设置正确, 网格剖分合理。

### 3.2 物理模型试验方法

优化方案确定后, 采用比尺为 1:5 局部物理模型进行物理模型试验, 控制条件为水深, 原型上下游水深均为 2 m, 对应模型水深为 0.4 m, 测量模型水深为水下 6 cm, 对应原型水深为 0.3 m, 对 10 个隔板, 每个隔板采 5 个水深点利用无线旋浆流速仪进行流速测量, 流速测量后均转换为原型流速。根据墨水的流动性并辅以数学模型试验方法分析水流流态的合理性。对于整体物理模型试验, 通过旋浆流速仪测量鱼道每一个竖缝处的流速分布和每一个池室的水深, 测量后的物理模型流速和水深均转换为原型流速和水深。

## 4 数学模型试验分析

### 4.1 池室流态分析

通常同侧竖缝式鱼道相邻两隔板间水流流态呈现 S 型<sup>[5]</sup>, 较好的水流流态有利于鱼类的上溯和洄游。竖缝附近最大流速小于设计流速, 且池室间具有一定的回流区大大增加鱼类的过鱼效果, 图 3 为 3 种方案下的水流流态、流速分布。

由图 3 可看出, 3 种方案均出现了一个主流区和两个回流区, 主流区两侧为回流区, 回流区水

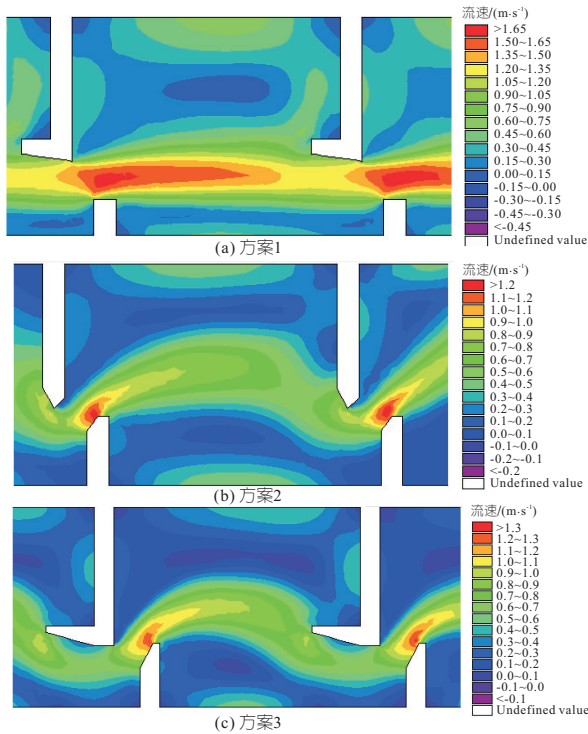


图 3 各方案下水流流态和表层流速分布

Fig. 3 Flow pattern and surface velocity distribution under each scheme

流方向与主流方向相反。方案 1 主流流向基本呈直线贯穿相邻两池室,水流在鱼室内未发生明显扩散,主流区左侧形成明显回流区。方案 2 水池内主流区主流不够集中,鱼室内流态不佳,主流区右侧形成明显回流区。方案 3 水池内主流在鱼室内大致呈“S”向弯曲,主流区基本处于鱼室中间且流态很好。

#### 4.2 竖缝断面的流速分布

竖缝式鱼道竖缝附近的最大流速为鱼道池室出现的流速最大值,该值不能超过具有洄游习性鱼类上溯的极限流速,否则鱼类难以上溯成功<sup>[6]</sup>,本文流速值为 1.2 m/s。为研究竖缝附近流速,对 8 个隔板竖缝处附近进行流速整理,结果见表 1。

表 1 各方案的竖缝流速

Tab. 1 Velocities of vertical slot for different schemes

方 案	竖缝位置							平均 流速
	2	3	4	5	6	7	8	
1	1.682	1.654	1.597	1.778	1.634	1.736	1.669	1.679
2	1.254	1.276	1.287	1.297	1.256	1.249	1.273	1.270
3	1.324	1.297	1.342	1.322	1.287	1.296	1.312	1.311

由表 1 可知,方案 1、2、3 在竖缝断面的流速大体上分别处于 1.679、1.270、1.311 m/s 左右。从 3 种方案结果来看,方案 1 流速最大,主要是因为竖缝宽度最大,相同工况下流量增大,同时设置横向隔板的上方与池室边壁平行,过竖缝的水体并未形成向对面池室边壁射流的现象,主流区水

体与回流区水体并未充分混合,使得消能作用减弱。由于方案 2 在 3 个方案中竖缝宽度居中,单考虑竖缝宽度的影响,竖缝处流速应处在 3 种方案下居中,但未设置纵向隔板,竖缝处流速略有降低,同时隔板下方与横向隔板的上方设置有一定的倾斜度,过竖缝的水体会出现向对面池室边壁的射流现象,主流区曲率过大,主流区水体与回流区水体充分混合,消能效果较好,使得竖缝处流速降低,使得方案 2 竖缝处流速在 3 个方案中最低。方案 3 主流区曲率半径与方案 2 相比较大,主流区居中,虽竖缝宽度最小,本应竖缝处附近最大流速最小,但与方案 2 相比设置了纵向隔板,纵向隔板的设置有利于更好的水流流态形成,但增加了竖缝处流速,使得缝处附近最大流速比方案 2 稍大。综合分析方案 3 流态最好,但略大于设计流速,需对其体型进一步优化。

#### 4.3 紊动能分析

图 4 为 3 种方案紊动能分布情况。由图 4 可看出,3 种方案中,紊动能最大处均在竖缝附近,水体过竖缝后,紊动能呈现减小趋势,紊动能区域扩大;主流区的紊动能均大于回流区的紊动能。方案 1、2、3 的紊动能最大值分别为 0.24、0.12、0.11  $m^2/s^2$ ,方案 1、2、3 主流区大部分紊动能分别大于 0.12、0.072、0.066  $m^2/s^2$ 。紊动能越大,越不利于鱼类通过,单从紊动能看,方案 3 更有利于鱼类通过鱼道上行。

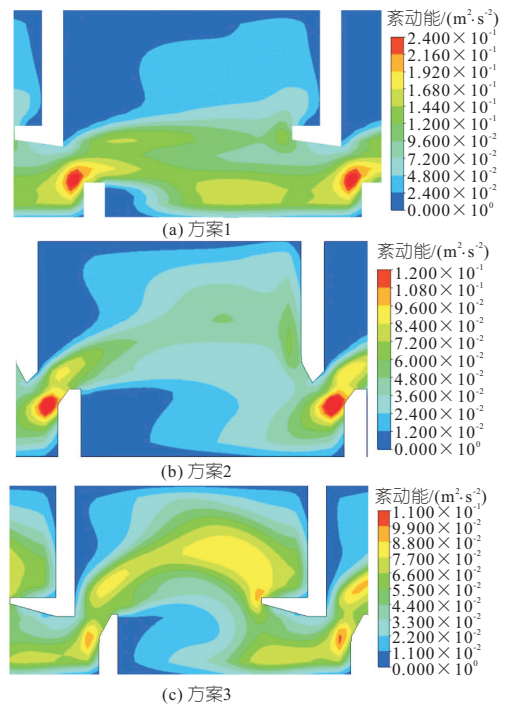


图 4 各方案下紊动能分布

Fig. 4 Distribution of turbulent kinetic energy under various schemes

## 5 物理模型试验分析

### 5.1 局部物理模型优化

根据数学模型试验方法,通过分析池室内的水力学特性,可得到方案 3 水流流态最好,两侧回流区大小相当,有利于过鱼,但竖缝附近流速较大,需采取减小坡比的方法降低竖缝处流速。初步将坡比由原来的 1 : 50 改为 1 : 70,原有鱼道长度增加到 1 000 m,池室增加到 188 个,休息室增加到 20 个。对局部优化的方案进行物理模型试验,对 10 组竖缝处的流速进行测量,最大流速为 1.06 m/s,小于设计流速 1.2 m/s。由于物理模型试验方法难以得道清晰的水流流态,辅以数值模拟的方法分析水流流态,图 5(a)为通过数值模拟方法得到的水流流态,图 5(b)为实测的流速场。

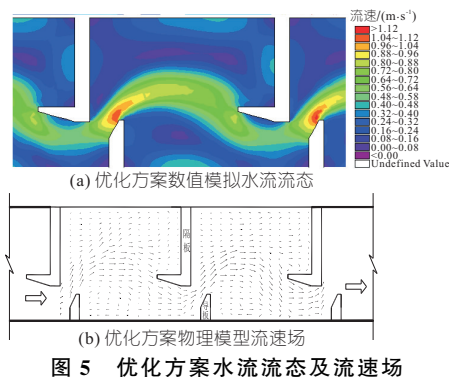


Fig. 5 Flow pattern and velocity field of optimized scheme

由图 5 可看出,优化后的方案,主流区水流流态很好,两侧回流区面积适中,适宜研究区域内的鱼类上溯洄游。

### 5.2 整体物理模型试验

根据规范要求<sup>[7]</sup>,确定的优化方案的整体物理模型试验比尺为 1 : 20,对局部物理模型进行竖缝处流速验证及测量不同池室的水深。模型试验进出口通过控制水位进行调节,上下游水深均为 2 m。由于坡度变缓,因而鱼道长度增加。对调整后的池室和隔板进行编号, $n$  为池室编号, $n+1$  为隔板编号。由于测量数据较多,仅列出 10 个竖缝附近流速和 11 个池室水深分布,测量结果见表 2。由表 2 可知,池室最大、最小水深分

表 2 各隔板竖缝附近流速分布及各池室水深分布

Tab. 2 Velocity distribution near the vertical joint of each diaphragm and water depth distribution of each chamber

池室编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
水深/m	2.07	2.06	2.03	2.04	2.03	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06
流速	1.07	0.97	0.93	0.85	0.97	0.73	1.02	0.85	0.9	0.97

注:流速单位为 m/s。

别为 2.03、1.94 m,水深最大变化为 0.09 m。误差为 4.5%,水位变化基本平顺。隔板流速最大、最小分别为 1.10、0.73 m/s,最大流速比局部物理模型流速增大 0.04 m/s,误差较小为 3.7%,达到试验要求。

### 5.3 整体方案鱼道过流能力计算

竖缝宽度、相邻水池之间的落差、各级水池内的水深决定了竖缝式鱼道的过流能力<sup>[1]</sup>,其计算公式为:

$$Q = \varphi b h \sqrt{2gJL} \quad (1)$$

式中, $Q$  为鱼道过流流量; $\varphi$  为流量系数; $b$  为竖缝宽度, $b=0.50$  m; $h$  为水池内的水深; $J$  为鱼道底坡坡度, $J=1/70$ ; $L$  为鱼道池室长度。

由式(1)可计算得到鱼道的流量系数,其结果见表 3。由表 3 可知,鱼道优化方案(1 : 70)的流量系数大体稳定在 0.91~1.02 之间,其均值约为 0.95;对于工程鱼道推荐方案,对应于 0.50~2.0 m 的工作水深,其过流能力为 0.241~1.009 m<sup>3</sup>/s。

表 3 优化方案鱼道过流能力

Tab. 3 Fishway overflow capacity of recommended scheme

水池水深/m	流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	流量系数 (1 : 70)	水池水深/m	流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	流量系数 (1 : 70)
0.500	0.241	0.910	1.500	0.741	0.933
0.700	0.377	1.018	1.665	0.836	0.949
0.925	0.468	0.955	1.840	0.906	0.930
1.115	0.576	0.975	2.000	1.009	0.953
1.350	0.681	0.952			

## 6 结论

a. 本文以实际工程鱼道为例,以隔板和导板的不同尺寸和型式为变化参数,参考相关规范及文献,设计出 3 种池室体型进行数学模型试验,分析了不同隔板和导板的不同尺寸和型式的池室水流流态、主流区水力特性。

b. 水流流态最好的方案 3 池室最大流速大于设计流速,将底坡坡比由 1 : 50 放缓为 1 : 70,通过局部物理模型试验得到池室最大流速为 1.06 m/s,小于设计流速 1.2 m/s。通过整体物理模型试验对流速进行验证,试验得出池室竖缝附近最大流速为 1.10 m/s,与局部物理模型误差为 3.7%,达到设计要求。

c. 通过整体物理模型试验,确定工程中鱼道的最小水深 0.5 m 对应的流量为 0.241 m<sup>3</sup>/s,最大水深 2 m 时对应的流量为 1.009 m<sup>3</sup>/s。

### 参考文献:

[1] 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.

b. 流量监测数据的质量对基于数据驱动的管网漏损检测与定位方法有重要影响。在实际工程中,改善传感器测量效果和布局的同时,需有效利用监测数据并不断优化预测模型,提高基于数据驱动检测管网漏损等突发状况的能力。

#### 参考文献:

- [1] 宋杰,吕谋,郝晨西,等. 基于 PSO-SVM 模型的供水管网漏损诊断[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7): 122-125.
- [2] 吴以文,杜坤,吴汉清,等. 基于 LSSVM 交互预测的供水管网爆管检测[J]. 中国给水排水, 2022, 38(9):

58-63.

- [3] 陈磊,王培永. 基于遗传最小二乘支持向量机的初次给水管漏损时间预测模型[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(5): 546-549.
- [4] 吴杰. 基于流量和压力数据分析的城市供水管网漏损定位研究[D]. 太原:太原理工大学, 2020.
- [5] 王彤,金赵归,杨瑞虎,等. 基于 PSO-LSSVM 时序预测模型的管网漏失信号识别[J]. 水电能源科学, 2022, 40(2): 132-135, 181.
- [6] 郭呈冠,刘书明,李俊禹. 基于双向长短时记忆神经网络的水量预测方法研究[J]. 给水排水, 2018, 44(3): 123-126.

## Research on Leakage Detection Based on Flow Data of Pipeline Network

WANG Tong<sup>a,b</sup>, LI Zhong-yu<sup>a,b</sup>, KANG Bing-qing<sup>a,b</sup>, ZHU Duo-lin<sup>a,b</sup>,

WANG Qing-yi<sup>a,b</sup>, ZHAO Hong-bin<sup>a,b</sup>, XU De-lun<sup>a,b</sup>, HONG Lei<sup>a,b</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Water Supply and Sewerage, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to alleviate the waste of resources caused by the leakage of urban water supply networks, taking predictive classification as the basic idea, the monitoring data after wavelet noise reduction processing was used in the prediction model of PSO seeking least squares support vector machine algorithm, and the prediction model was trained and evaluated, then combined with the model prediction error distribution law, the estimation method of threshold value and leakage volume was introduced for leakage detection. The results show that the average error between the model prediction and the actual water volume is low, the stability is high, and the combination of the prediction-threshold classification method can detect sudden leakage in a timely manner and estimate the leakage volume relatively accurately.

**Key words:** water supply network; flow data; leakage detection; prediction classification; error analysis

(上接第 149 页)

- [2] 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.
- [3] 张超,孙双科,李广宁. 竖缝式鱼道细部结构改进研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(5): 389-396.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 国家能源局. 水电工程过鱼设施设计规范(NB/T35054-2015)[S]. 北京:中国电力出版社, 2015.

## Design and Experimental Study of Vertical Slit Fishway in Actual Project

HAN Lei<sup>1</sup>, LIU Fa-zhi<sup>2</sup>, ZHAO Xing-long<sup>3</sup>, YE Kun-he<sup>3</sup>, LI Shu-hang<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>

(1. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China;

2. Shuifa Planning and Design Co., Ltd., Jinan 250000, China;

3. School of Hydraulic and Electric-power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The vertical slit fishway has the capacity to better cope with the fluctuation of water level in both upper and lower sections and favorable water flow conditions. Three schemes were designed for the shape of the fishway tank chamber of a certain project fishway. The physical models verified with a 1 : 5 scales were used to investigate the impact of the tank chamber's structure on the flow pattern, maximum flow velocity, and hydraulic properties of mainstream region under different size and type of baffle and guide plates. This was done through numerical simulation calculation. They performed a test of the physical model on the optimal shape with scale of 1 : 5. The physical model of the overall with scale 1 : 20 was used to analyze the maximum velocity along the water depth and the vertical slit, and the diversion flow of the fishway under different water depth conditions was proposed, providing reference and reference for similar projects.

**Key words:** hydraulics; fishway design; numerical simulation; physical model; test analysis