HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

No.6

Dec. 2015

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.06.015

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. (LIU Ben-qin, HUANG Yue, XUAN Guo-xiang. Hydraulic model tests of fishway with small-sized pond[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 101-106.)

# 小长宽比鱼道池室水力学试验研究

# 刘本芹,黄岳,宣国祥

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:鱼道水流条件是影响其过鱼效果的重要因素。在分析鱼道类型及其特点的基础上,针对应用最为广泛的竖缝隔板式鱼道,通过1:4的大比尺局部物理模型试验,研究了各级水池长宽比小于1.0条件下的隔板布置及竖缝宽度,对比了3种布置方案,分析评价了竖缝流速指标以及池室流速分布、流态和消能特性,提出了适合小长宽比池室条件下的鱼道隔板布置型式。通过1:12.5的鱼道整体水力学模型试验,对运行水力指标进行了验证分析,确立了减小隔板前局部水位壅高及提高竖缝流速沿程均匀性的设计原则;为适应鱼道进、出口水深的变化,从生态明渠引水补充鱼道流量,最小补水流量为0.22 m³/s。试验结果表明,这种鱼道布置型式可推广应用到其他类似鱼道工程中。

关键词: 鱼道;隔板布置;水力学;物理模型试验

中图分类号: S956.3;TV135 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2015)06-0101-06

鱼道按结构型式可分为仿生态式、隔板式、槽式和特殊结构型式<sup>[1-2]</sup>。仿生态式鱼道接近天然河道,鱼类休息条件良好,但因适用水头小、占地面积大、对地形要求高等因素,实用性受到一定限制;槽式鱼道在槽壁和槽底设有间距较密的阻板和底坎,一般适用于游泳能力较强的鱼类和上下游水位差不大的工程;特殊结构型式鱼道适用于爬行、能黏附及善于穿越缝隙的鱼类;隔板式鱼道利用横隔板将总水头分成许多梯级,并利用水垫、沿程摩阻及水流对冲、扩散消能,以获取适合鱼类上溯的流态,其水流条件易于控制、适应水头大,结构简单、维修方便,且可通过调整过鱼孔型式、位置、大小来满足多种洄游性鱼类的上溯要求,目前应用最多。

隔板式鱼道根据横隔板过鱼孔的形状、位置及消能机理的不同,又分为溢流堰式、淹没孔口式、竖缝式和组合式等,其中竖缝隔板式鱼道在近代鱼道工程中应用最广<sup>[1-3]</sup>。为满足过鱼对象的上溯要求,隔板式鱼道池室净宽不宜小于主要过鱼对象体长的 2 倍,同时池室长宽比取 1. 25~1. 50<sup>[1]</sup>。而实际工程中,有时受地形地质条件、建设费用及施工难度等因素限制,鱼道水池长宽比偏小,鱼池长度过短,将导致鱼道内主流轨迹线曲率半径偏小,不利鱼类顺主流上溯。为满足此类鱼道水池流态及竖缝流速要求,本文以某竖缝隔板式鱼道为例,通过物理模型对水池长宽比小于 1.0 的鱼道隔板型式、竖缝尺寸及水池水力特性进行研究。

# 1 工程概况

某鱼道工程所在流域内植被良好,河源区有大片草地和森林,人类活动影响甚微,鱼类资源丰富。为了解决该河段洄游鱼类上溯要求,建设水电枢纽同时,在右岸导流明渠内布置生态流量泄放坝段和鱼道。

鱼道采用竖缝隔板式结构,上游运行水位 ▽1 030 m~ ▽1 028 m,下游运行水位 ▽1 016 m~ ▽1 017 m, 鱼道池室水深 1.0~2.0 m;主要过鱼对象为萨氏非洲脂鲤、中间锡伯鯰、阿氏歧须鮠和维多利亚歧须鮠等底 层洄游性鱼类,体长最大 0.62 m;鱼道每隔 10 级水池设一休息池,水池设计底坡 5.5%,休息池设计底坡

收稿日期: 2015-02-02

作者简介: 刘本芹(1977—),女,山东蒙阴人,高级工程师,硕士,主要从事水工水力学研究。E-mail: bqliu@ nhri.cn

2.5%; 鱼道设计最大流速 1.8 m/s; 鱼道总长 320 m, 每级池室净长 2.75 m, 净宽 3.5 m, 长宽比 0.79。

该鱼道池室底坡较大,已超过我国绝大多数鱼道的设计底坡,且根据枢纽总体布置及坝址处的地质条件和设计要求,其布置长度无进一步延长的空间;此外,池室断面形式为矩形,长宽比偏小,对过鱼孔流态和流速要求较高。因此,综合考虑消能、流态和流速问题,需要通过模型试验进行详细研究。

### 2 竖缝布置分析

隔板过鱼竖缝布置需根据最大过鱼对象尺寸和池室尺度确定,对于池室长度小于宽度的非标准池室,应首先依据池室净长推算标准池室的净宽,在此基础上综合考虑鱼道水池净宽、水深、过鱼对象体长等因素来确定过鱼竖缝的宽度。需要说明的是,过鱼竖缝的宽度越大,鱼道中流量也就越大,相应的竖缝水流流速也将增大。根据该鱼道基本设计参数,经计算后选择竖缝宽度为 0.35~0.55 m。

竖缝布置形式主要有同侧竖缝和异侧竖缝两种,同侧竖缝的各级隔板竖缝均布置在水池同侧,异侧竖缝则是各级隔板竖缝左右交替布置。研究表明,池室采用小长宽比布置的鱼道,采用异侧竖缝时因主流横穿整个池室且在隔板竖缝处明显扭曲,相邻池室的主流方向变化剧烈,不利于鱼类上溯,而同侧竖缝形式则可改善池室水流流态[4-5],由此确定该鱼道过鱼采用同侧竖缝布置。

为使竖缝出流充分扩散消能,竖缝位置不宜设置在鱼道水池边墙处,通常需要加设横向导板调整主流方向和出流流态,而设置纵向导板则可进一步改善池室水流流态和竖缝处的水面跌落现象,但同时会使竖缝流速稍有增大。根据研究结果,鱼道水池的长宽比值小于 0.8 时,设置纵向导板对水流流态的改善作用不再明显<sup>[4]</sup>。同时,该鱼道水池净长仅 2.75 m,设置纵向导板将占用池室部分纵向空间,对主流也会产生分散作用,而其过鱼对象主要为中下层鱼类,竖缝附近的局部水面跌落对鱼类影响不大。综合分析各项因素后确定鱼道隔板采用"横隔板+横向导板"的结构型式。

横隔板大多采用垂直于边墙的直线结构形式。近年来虽出现过针对流线型隔板结构的研究,但流线型隔板结构在使主流更为明确的同时,也增加了竖缝流速<sup>[6]</sup>;其鱼道的设计底坡较大,需研究如何减小竖缝流速以满足设计指标,不宜采用流线型隔板。为此,提出直线型横隔板头部、下游侧采用修圆布置,与横向导板的斜面构成过鱼孔,使过鱼孔最小宽度仅存在于一个断面上,有利于鱼类快速通过高流速区。而文献[4]的研究表明,在池室长宽比值小于1.0的条件下,鱼道宽度对主流影响已不明显,故文中针对较为不利的同一种长宽比布置方案,重点从竖缝宽度、横向导板长度及导流角度等方面进行比选,提出了图1中的3种竖缝式隔板布置方案,竖缝宽度分别为0.35,0.40和0.55m,通过隔板局部模型试验进行对比研究。

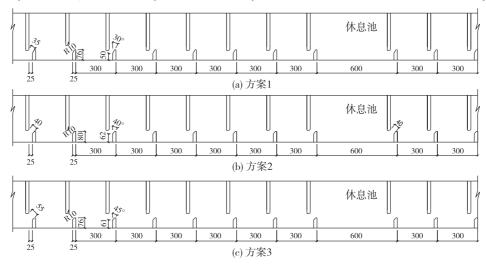


图 1 3 种隔板布置方案(单位: cm)

Fig. 1 Three types of baffle layout for a fishway (unit: cm)

## 3 鱼道隔板局部模型试验

#### 3.1 试验目的及方法

鱼类进入鱼道后,过鱼效果主要取决于隔板过鱼竖缝的流速及相邻两隔板间的水流流态。竖缝流速需小于过鱼对象的极限流速,各级水池内应主流明确,且存在一定回流以达到消能效果,但回流强度及范围不能过大,以免小型鱼类迷失方向,延误上溯时间。局部模型试验的目的是比较分析3种隔板布置方案的水池水力特性,确定小长宽比水池内流速及流态满足要求的竖缝式隔板布置。

局部模型按重力相似准则设计,模型几何比尺 1:4,模拟 10 级鱼道水池,其中包含一级休息池。模型控制边界条件为水深,通过调整上下游水位使各级水池水深为 2.0 m,自下游至上游隔板编号依次为 1~11 号,在沿程典型隔板(3~9 号隔板)竖缝处沿水深布置 5 个流速测点(自底部至顶部编号 1#~5#),采用无线旋浆流速仪测量竖缝流速及其分布特性。

#### 3.2 过鱼竖缝流速及分布特性

由表 1 中的大比尺局部模型试验测得的流速分布可知:在流速指标方面,方案 1 竖缝宽度较小,故沿程各隔板的竖缝最大流速仅为 1.43 m/s,尚有较大富余;方案 2 竖缝最大流速为 1.59 m/s,小于设计流速,竖缝宽度较为适宜;方案 3 竖缝最大流速为 1.74 m/s,已接近设计流速 1.80 m/s,说明竖缝宽度偏大。在流速分布方面,方案 1 和 2 竖缝平均流速沿程分布基本均匀,流速最大差值分别为 2.2%和 2.8%,而方案 3 的流速均匀性略差,竖缝流速均值沿程最大相差 9.3%;除最顶部的测点因距离水面较近受局部水位跌路及波动影响略有差别外,各隔板竖缝平均流速沿水下垂向分布基本均匀,3 种方案的垂向差值分别为 2.94%, 1.37%和 2.56%。

综合考虑竖缝流速指标及流速分布的均匀性,认为方案2的隔板及竖缝布置优于方案1和3。

#### 表 1 各方案的竖缝流速

Tab. 1 Velocities of vertical slot for different schemes

(m/s)

隔板号	方案 1					方案 2					方案 3							
	1#	2#	3#	4#	5#	$\bar{v}$	1#	2#	3#	4#	5#	$\bar{v}$	1#	2#	3#	4#	5#	$\bar{v}$
3	1. 42	1. 36	1.41	1. 39	1. 29	1. 37	1.41	1. 45	1. 47	1. 59	1.4	1.46	1. 53	1. 69	1.66	1. 74	1. 58	1. 64
4	1.40	1.36	1.39	1.38	1.31	1.37	1.53	1.43	1.55	1.45	1.39	1.47	1.72	1.52	1.56	1.57	1.61	1.60
5	1.35	1.33	1. 37	1.39	1.39	1.37	1.49	1.44	1.41	1.55	1.36	1.45	1.51	1.52	1.52	1.62	1.65	1.56
6	1.41	1.38	1.35	1.37	1.36	1.37	1.43	1.5	1.45	1.41	1.41	1.44	1.51	1.65	1.66	1.61	1. 57	1.60
7	1.41	1. 36	1. 37	1.43	1.36	1.39	1.48	1.47	1.44	1.45	1. 39	1.45	1.62	1.74	1.62	1.58	1.62	1.64
8	1. 39	1.40	1.42	1.43	1.36	1.40	1.47	1.46	1.47	1.43	1.35	1.44	1.51	1.61	1.58	1.57	1. 53	1.56
9	1.38	1. 34	1.38	1.41	1. 35	1. 37	1.43	1.41	1.46	1.47	1. 39	1.43	1.5	1. 47	1.5	1.46	1. 57	1.50
$ar{V}$	1. 39	1. 36	1. 38	1. 40	1. 35	1. 38	1. 48	1. 47	1.46	1. 47	1. 37	1. 45	1. 56	1.60	1. 59	1. 59	1. 59	1. 59

注: $\bar{v}$ 表示沿水深的平均流速, $\bar{V}$ 表示沿程平均流速。

#### 3.3 池室流态

观测鱼道池室流态发现,水流通过竖缝进入下级鱼道水池时受横向导板的导向作用,主流先偏向池室左侧,然后在池室长度的1/2处开始偏向池室右侧,进入下一级竖缝。其中,方案1横向导板的导流角为30°,主流在上下级池室内呈典型"S"型流态,相邻两级隔板间主流轨迹的曲率半径为1.85 m,主流右侧回流强度较大;而方案3横向导板的导流角增大为45°后,主流轨迹的曲率半径增大为2.92 m,主流虽较为平顺,但池室消能效果明显下降;方案2横向导板的导流角为40°,竖缝宽度适中,主流轨迹的曲率半径为2.20 m,介于方案1和方案3之间,同时适当增加了横向导板长度以便增大主流右侧回流区体积,兼顾了流速、流态及消能要求,基本达到了预期目的。

进一步对比国内外部分鱼道工程资料及其他鱼道工程运行经验<sup>[7-12]</sup>,考虑到该鱼道设计过鱼对象最大体长仅 0.62 m,在设计底坡较大的条件下,确定隔板布置型式采用方案 2,即:竖缝最小宽度 0.40 m,横隔板长度为 2.62 m,隔板头部下游侧设置半径为 0.10 m 的圆弧倒角,横向导板长度为 0.80 m,导板头部设置向下游侧倾斜的 40°导流角,横隔板与横向导板沿鱼道长度方向的水平间距为 0.25 m。图 2 中的池室流速分布及流态表明,鱼道各级水池内主流明确,主流两侧的低流速区适合鱼类短暂休息。

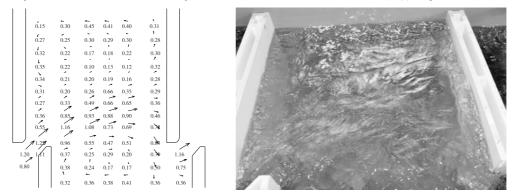


图 2 鱼道池室的流速分布及流态(单位:m/s)

Fig. 2 Flow field and flow pattern of the fishway pool (unit: m/s)

# 4 整体模型试验

通过开展几何比尺为1:12.5 的鱼道整体模型试验,研究了鱼道整体运行特性。在测量竖缝流速的基础上,进一步测定池室隔板前水深,计算鱼道沿程水面线,测量鱼道运行时的流量。该鱼道正常运行水位组合为:上游1030 m~下游1017 m,鱼道池室水深为2.0 m,整体模型中测量了自鱼道人口至出口全程典型隔板竖缝的流速(鱼道全程共79 块隔板,自下而上编号1#~79#),沿竖缝水深方向布置了3个流速测点,具体测量值见表2。

#### 表 2 整体模型试验实测流速

Tab. 2 Measured velocities obtained from an overall model test

(m/s)

隔板号 -		不同位置测点流速		- 最大流速	最小流速	平均流速	
图仪与 —	底部	中部	顶部	- 取入侃丞	取小机坯		
3#	1. 43	1.41	1. 67	1. 67	1. 41	1. 50	
8#	1. 49	1. 47	1. 57	1.57	1. 47	1.51	
15#	1. 47	1. 56	1.68	1.68	1. 47	1.57	
25#	1.44	1. 45	1. 55	1.55	1. 44	1.48	
35#	1. 46	1. 47	1. 57	1.57	1.46	1.50	
42#	1. 45	1.44	1. 51	1.51	1.44	1. 47	
45#	1. 43	1.46	1. 54	1.54	1. 43	1.48	
55#	1. 44	1.51	1. 55	1.55	1.44	1.50	
65#	1.42	1.50	1. 51	1.51	1.42	1.48	
77#	1.44	1.48	1. 53	1. 53	1.44	1.48	
最大	1. 49	1. 56	1.68	1.68	/	/	
最小	1. 42	1.41	1.51	/	1.41	/	
平均	1. 45	1.48	1. 57	/	/	1. 50	

由表 2 可知,整体模型试验测得的竖缝最大流速为 1.68 m/s,最小流速为 1.41 m/s,各测点流速平均值 为 1.50 m/s,流速满足设计指标要求,流速平均值比局部模型试验测量值约大 4.0%,基本吻合;从流速分布

情况来看,顶部流速略大于底部流速,符合一般规律,且沿程无明显能量累积现象,水流消能较好。试验测得的沿程各隔板前水深最大相差 1.0%左右,基本均匀;图 3中的沿程水面线表明,鱼道沿程水面线基本平顺。鱼道正常运行时的流量为1.08 m³/s,槽身整体水力条件良好,满足运行要求。

仍需指出,对于此类池室长宽比明显偏小的鱼道,受 池室长度限制,竖缝主流在水池内的转换空间较小,受下

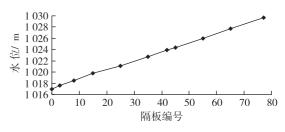


图 3 沿程水面线

Fig. 3 Water surface profile

级横隔板阻挡后容易产生一定程度的局部壅高,建议在设计鱼道底坡时予以考虑这一因素。此外,为了不影响沿程各项水力指标的均匀性,鱼道下游第一块横隔板处的底板高程应与鱼道人口底高程一致。对于该鱼道人口水深大于出口水深的运行工况,经整体模型试验测试及验证,需在鱼道下游端埋设补水管,从生态明渠引水补充人口水槽的流量,当人口水深大于出口水深 0.40 m 时启用补水设施,计算得出最小补水流量为 0.22 m³/s。

### 5 结 语

针对水利水电工程中应用较为广泛的竖缝隔板式鱼道,采用大比尺局部物理模型试验,研究了鱼道池室长宽比小于 1.0 时的隔板布置及水力特性,从竖缝宽度、横向导板长度、导流角大小等方面进行了对比分析,提出了适合该类型鱼道特点的布置型式。横向导板的导流角确定为 40°,导板长度宜略小于鱼道宽度的1/4,横隔板头部下游侧修圆布置可适应较大的鱼道底坡。

通过鱼道整体模型试验对运行水力指标进行了验证分析,针对依托工程特点,提出了减小隔板前局部水位壅高及提高竖缝流速沿程均匀性的设计原则,以及适应鱼道进、出口不同水深的运行措施。研究得到的鱼道隔板布置形式可推广应用到其他类似鱼道工程中。

### 参考文献:

- [1] SL 609—2013 水利水电工程鱼道设计导则[S]. (SL 609—2013 Guideline for fishway in water conservancy and hydropower project [S]. (in Chinese))
- [2] 王亚平, 陈惠欣, 杨臣莹, 等. 鱼道[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982. (WANG Ya-ping, CHEN Hui-xin, YANG Chen-ying, et al. Fishway[M]. Beijing; China Water Power Press, 1982. (in Chinese))
- [3] 边永欢, 孙双科. 竖缝式鱼道的水力特性研究[J]. 水利学报, 2013(12): 1462-1467. (BIAN Yong-huan, SUN Shuang-ke. Study on hydraulic characteristic of flow in the vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(12): 1462-1467. (in Chinese))
- [4] 刘本芹, 李中华, 郭超, 等. 乌干达卡鲁玛(Karuma)水电站鱼道水工水力学模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014. (LIU Ben-qin, LI Zhong-hua, GUO Chao, et al. Hydraulic physical model investigation for fishway of Karuma hydropower project in Uganda[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [5] 郭维东, 孙磊, 高宇, 等. 同侧竖缝式鱼道流速特性研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 155-158. (GUO Wei-dong, SUN Lei, GAO Yu, et al. Experimental study of flow characteristics in one-side vertical slot fishway[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 155-158. (in Chinese))
- [6] 张立仁, 乔娟, 王杰, 等. 一种改进的横隔板竖缝式鱼道研究[J]. 水科学与工程技术, 2014(1): 22-25. (ZHANG Li-ren, QIAO Juan, WANG Jie, et al. Research on an improved diaphragm vertical slot fishway[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2014(1): 22-25. (in Chinese))
- [7] 王兴勇, 郭军. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 222-228. (WANG Xing-yong, Guo Jun. Brief review on research and construction of fish-ways at home and abroad[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, 3(3): 222-228. (in Chinese))

- [8] WANG Ya-ping. Design and application of fish passage and protection facilities in China[C] // Proceedings of the International Symposium on Fishways, Japan, 1990.
- [9] SHUNROKU N. A review of fish passage facilities in East Asia [C] // BATES K. Fish Passage Policy and Technology: Proceedings of a Symposium. American Fisheries Society, 1993;87-94.
- [10] 李中华, 郭超, 杨宇. 丹巴水电站鱼道模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014. (LI Zhong-hua, GUO Chao, YANG Yu. Physical model investigation for fishway of Danba hydropower project [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [11] 宣国祥, 黄岳. 湘江长沙综合枢纽工程鱼道水工水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. (XUAN Guo-xiang, HUANG Yue. Hydraulic physical model investigation for fishway of Changsha navigation and hydropower project on Xiangjiang River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [12] 王亚平,潘赞文,李树东,等. 广西长洲水利枢纽鱼道水工水力学试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005. (WANG Ya-ping, PAN Zan-wen, LI Shu-dong, et al. Physical model investigation for fishway of Changzhou hydropower project in Guangxi Province[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))

# Hydraulic model tests of fishway with small-sized pond

LIU Ben-qin, HUANG Yue, XUAN Guo-xiang

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Fishway flow condition is an important factor affecting the fish passing effect. Based on the analyses of structural types and corresponding characteristics of the fishway, a partial hydraulic physical model with a large scale of 1:4 is established for a vertical slot fishway, which is widely used in the water conservancy projects. The layout of the baffle and the vertical slot are studied under the conditions that a ratio of every pool's length to width is less than 1.0. Three layout schemes are comparied in the experiments. Velocities of the vertical slot and velocity distribution, flow patterns and energy dissipation of the pool are tested and analysed. The baffle type is put forward suitable for the fishway with a small ratio of the pool's length to width. Besides, the hydraulic characteristics are validated by an overall integral hydraulic physical model test which has a scale of 1:12.5 when the fishway operates. The design rules are worked out to reduce local backwater of the baffles and enhance velocity uniformity of the vertical slots along the fishway. In order to suit the changes in water depth at the entrance and exit of the fishway, the studies of water supplement measures from an ecological open channel into the fishway are also carried out, showing that the minimum supplement discharge should be 0.22 m³/s. The test results show that the suggested baffle type can be applied to other similar fishway works.

**Key words:** fishway; baffle layout; hydraulics; physical model tests