

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.019

异侧竖缝式鱼道水力特性试验研究

曹庆磊¹,杨文俊¹,陈 辉²

(1. 长江科学院水利部江湖治理与防洪重点实验室,湖北 武汉 430010; 2. 长江科学院水力学研究所,湖北 武汉 430010)

摘要:对异侧竖缝式鱼道的水力特性进行了试验研究.在试验室的水槽中,通过三维超声波流速仪(ADV)测得鱼道池室中的流速数据,对流量为 5.61 L/s 和 9.31 L/s 池室中不同水深时的流速场、紊动能和雷诺剪切应力等水力参数进行了初步分析研究.结果表明,鱼道池室中流速沿垂向的分量很小,几乎为零.同等流量下随着水深的增加,流速有减小的趋势,而紊动能和雷诺剪切应力有增大的趋势.而随着流量的增加,池室中相同部位的流速、紊动能和雷诺剪切应力也会相应的增大.

关键词:鱼道;竖缝式;流速场;紊动能;剪切应力

中图分类号: S956.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)06-0698-06

水利水电工程等截断河流,导致这个开放、连续的系统在能量流动、物质循环及信息传递等方面产生一系列的改变,使生活其中的鱼类生存所需的生境条件、水文情势发生变化,最终对鱼类资源产生影响.如洄游或鱼类其他活动可能被延迟或终止,鱼类下行通过坝体建筑物或水轮机时受到的伤害等,将导致鱼类种群遗传多样性丧失和经济鱼类品质退化等.因此,为了保护鱼类资源,恢复河流生物多样性,鱼道的建设是十分必要的^[1].

竖缝式鱼道能适应较大水位变幅,在各类体型鱼道中应用最为广泛.竖缝式鱼道最早应用于加拿大弗雷塞(Fraser)河鬼门(Hell's Gate)峡鱼道中^[2],我国早期兴修的江苏斗龙港鱼道、安徽裕溪闸鱼道、浙江七里垄鱼道^[3]以及近年来建设的西藏狮泉河鱼道^[4]、北京上庄新闸鱼道^[5]等都采用该体型.对于同侧竖缝式鱼道的流速和紊动特性,国内外学者做了一些初步的研究,例如,文献^[6]的研究表明,随着池长/池宽的变化和坡度的不同,鱼道中的水流出现两种不同的流态.文献^[7]通过研究发现,鱼道中相对流量和相对水深之间存在线性关系.而作为鱼道一个重要体型的异侧竖缝式鱼道,除文献^[8]对其在平坡工况下的主流轨迹及速度沿程变化规律进行过初步研究外,关于其水力特性,迄今很少有文献报道.本文对不同工况下异侧竖缝式鱼道池室中的流速场、紊动能、雷诺剪切应力等水力参数进行试验研究.

1 试验设计

模型试验是在长 7.25 m、宽 0.60 m、高 0.60 m 的矩形玻璃水槽中进行的.如图 1 所示,鱼道模型分入流段、鱼道池室段和出流段 3 部分,末端设有尾门.其中鱼道池室段共有 5 个工作水池(详细尺寸见图 2),底坡为 2.5%,挡板材料为聚乙烯有机玻璃.

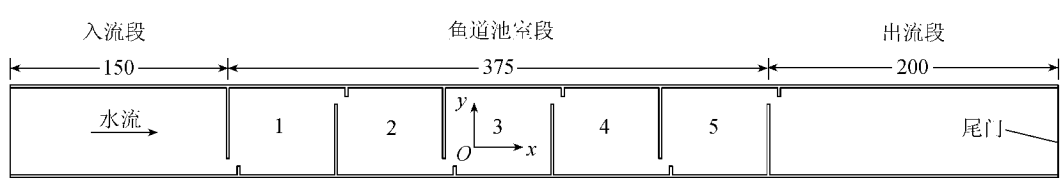


图 1 鱼道整体模型布置(单位:cm)

Fig. 1 Layout of vertical slot fishway from side to side (unit: cm)

流速的测量采用三维超声波多普勒流速仪(ADV),数据采集频率为 25 Hz,时间为 20 s.为了减小上下游

水流的影响,保证测量的准确性,测量主要在第 3 个池室内进行,调节尾门使每个池室中间断面的平均水深相等,使水流和底坡大致平行^[9].测量平面与池室底面平行,沿水槽纵向设为 x 轴,横向为 y 轴,垂直于底面方向为 z 轴,竖缝附近区域每隔 2.5 cm 布置一个测点,其他区域每隔 5.0 cm 布置一个测点(图 3).

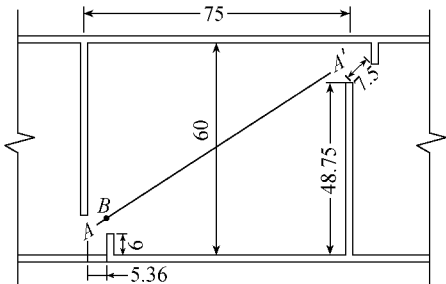


图 2 鱼道池室详细尺寸(单位 :cm)

Fig. 2 Dimension of a laboratory model pool (unit :cm)

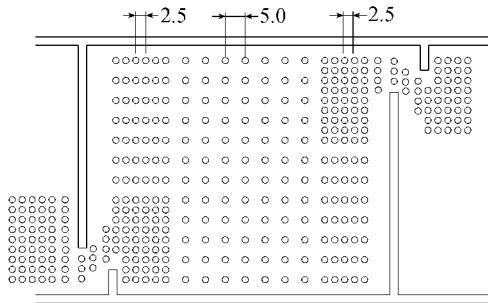


图 3 试验测点布置(单位 :cm)

Fig. 3 Layout of measuring points (unit :cm)

2 试验结果分析

对流量 Q 为 5.61 L/s,7.50 L/s,9.31 L/s 和 12.23 L/s 的工况进行了试验研究,每组流量又分别对距离底床 5.0 cm,10.0 cm,15.0 cm,20.0 cm 4 个平面和 A—A' 截面(图 2 中,A 点坐标(4.0,7.0),B 点坐标(5.5,8.5),A' 点坐标(70.0,51.5),其中 A 点为图 5~7 的坐标原点.)进行了测量.因篇幅所限,仅给出部分试验工况的结果.

2.1 流速场

池室中流速场的形状是决定水流特性的主要因素,也是对鱼类上溯产生重要影响的因素.水流在 xOy 平面(平行于底坡方向)的流速场如图 4 所示,由图 4 可知:(a)池室中形成了 3 个不同的区域:一个是主流区,该区水流以较大的速度从上游竖缝流向下游竖缝,流线轨迹呈半抛物线形状;另外在主流区的两侧分别形成了 2 个大小不等的回流区,其中较大的回流区位于上游较短挡板和下游较长挡板之间,较小的回流区位于上游较长挡板附近,回流区内水流流速较小,流动方向与主流方向相反;(b)同等流量下,池室中 xOy 平面流场的形状沿水深方向上变化不大,而随着流量的增加,相同点的流速有增大的趋势.所以同等流量下,池室中上下层水流流场的形状对鱼类的影响基本一致,而随着流量的增加,鱼类上溯时所需同一 xOy 平面上的克流速度也在增大.

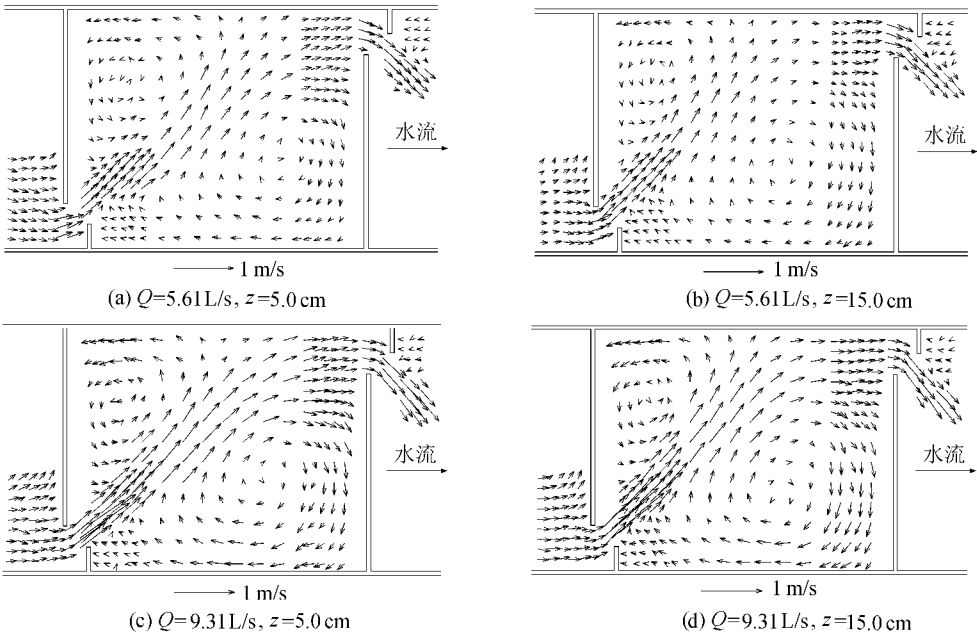


图 4 鱼道池室水流在 xOy 平面流场

Fig. 4 Velocity fields of pool in xOy plane

试验同时研究了 $A-A'$ 截面的流速场. 由前文可知 $A-A'$ 截面所在区域是池室的主流区, 主流区的速度对鱼类的上溯有着重要的影响, 各种不同鱼类都有其感应流速, 即鱼类开始有感应并游向水流时的水流速度. 例如体长 10~20 cm 的鲫鱼的感应流速为 0.2 m/s, 体长 30~60 cm 的鲢鱼的感应流速为 0.3 m/s^[10], 如果主流区的流速过小, 小于鱼类的感应流速, 鱼类将会感应不到主流方向, 在池室内打转或者徘徊. $A-A'$ 截面的流速场如图 5 所示, 该截面相对流速 v/v_b 沿程变化过程如图 6 所示, 其中, v_b 是对应流量下上游竖缝处最大流速. 由图 5 和图 6 可知: (a) 从上游竖缝出口到下游竖缝入口处, 其流速在前半池室逐渐减小, 进入后半池室变化不大, 大致沿某一值上下小范围内波动; (b) 水流沿程上下波动很小, 方向基本和底坡平行, 垂向分量几乎为零; (c) 同等流量下, 该截面的流速随着水深的增大略有减小, 而随着流量的增加, 相同点的流速有增大的趋势. 所以, 主流区水流流速沿垂向分量对鱼类产生的影响较小, 同等流量下, 鱼类在主流区受到水流流速的影响上层稍大, 下层稍小, 而随着流量的增加, 鱼类上溯所需该区同一位置上的克流速度也会相应的增大.

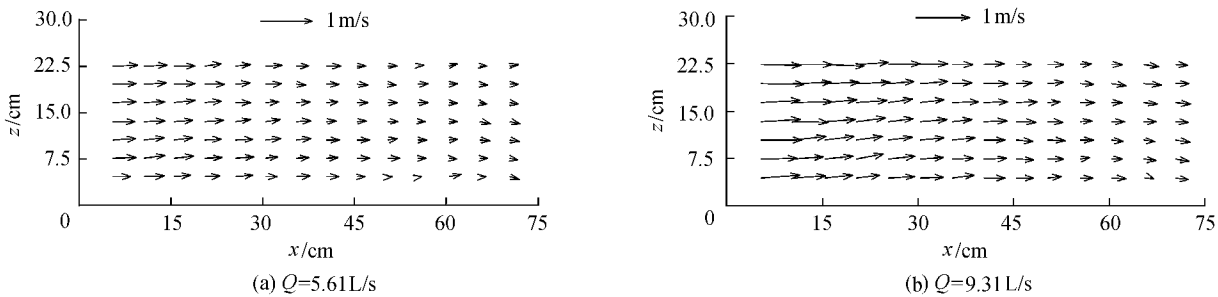


图 5 $A-A'$ 截面流场
Fig. 5 Velocity fields of section $A-A'$

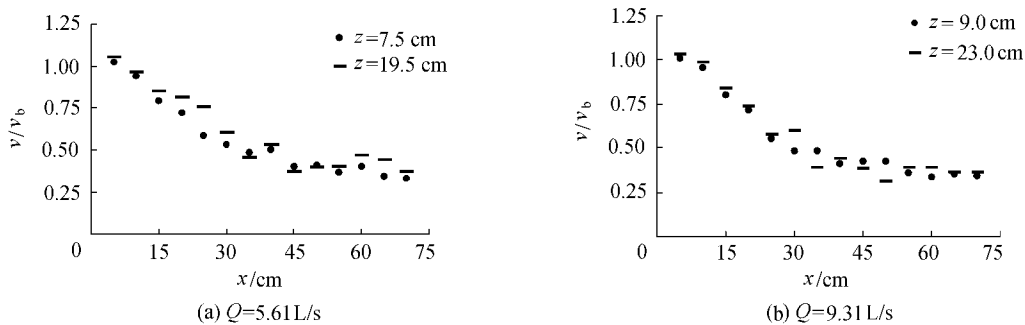


图 6 $A-A'$ 截面相对流速沿程分布
Fig. 6 Distribution of dimensionless velocity of section $A-A'$

竖缝处(上游较长挡板和较短挡板连线之间)是鱼道池室中最为关键的部位, 是鱼类洄游上溯的必经之地. 各种不同鱼类都有其极限流速, 即鱼类所克服的最大流速. 例如体长 20~25 cm 的鲤鱼的极限流速为 1.0 m/s, 体长 18~20 cm 的草鱼的极限流速为 0.8 m/s^[10], 如果竖缝处流速超过了鱼类的极限流速, 鱼类将无法前进, 鱼道的建设也将失去意义. 竖缝处相对流速、紊动能和雷诺剪切应力沿垂向分布如图 7 所示, 其中, k_b 和 τ_b 分别为对应流量下的紊动能和雷诺剪切应力. 由图 4 和图 7(a)可知: (a) 水流在竖缝入口附近流态较为平稳, 而在竖缝出口附近流速急剧增加, 流态较为混乱; (b) 竖缝处流速随着水深的增加有减小的趋势, 上下层水流流速差别在 0.1 v_b 之内. 另外, 试验时发现, 池室内流速最大的地方不在竖缝处, 大致在距离竖缝中心下游 2.0 cm 处, 见图 2 中 B 点所示. 流量为 5.61 L/s 时, $v_b = 45.05$ cm/s, 池室内最大流速 $v_{\max} = 46.38$ cm/s, $v_{\max}/v_b = 1.03$; 流量为 9.31 L/s 时, $v_b = 47.12$ cm/s, $v_{\max} = 48.55$ cm/s, $v_{\max}/v_b = 1.05$, 因为池室内流速最大的地方距离竖缝下游只有约 2.0 cm 的距离, 所以该处也是鱼类上溯过程中无法避免的地方, 故在鱼道设计时所考虑的鱼类的极限流速的标准应比竖缝处的流速要大一些.

2.2 紊动能

紊动能反应脉动流速振幅的特性. 如果池室中鱼类所经过的水流紊动过大, 将会使鱼类迷失方向, 体能消耗过快, 无法顺利上溯. 测量中采用不连续的流速采样, 采样数 $n = 500$. 前述的流速值均为采样流速的时

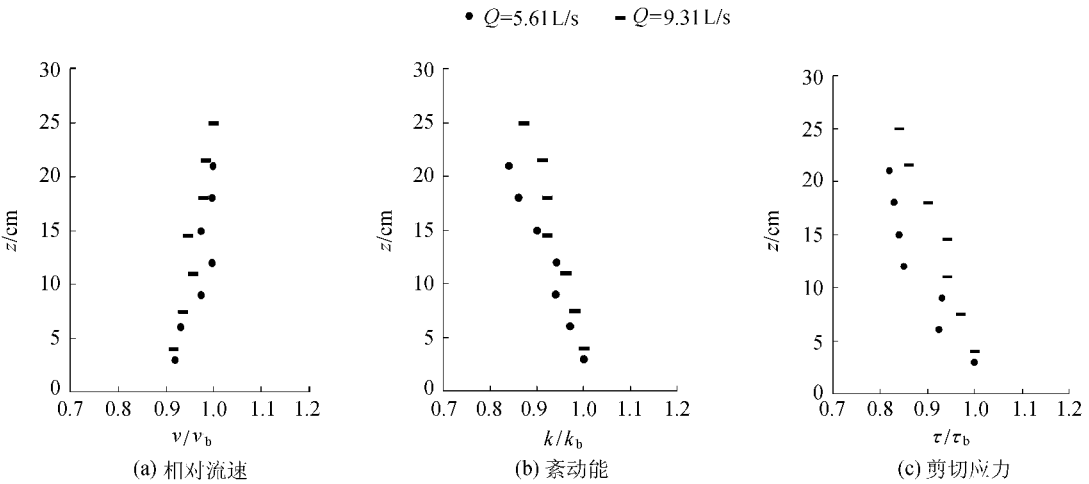


图 7 竖缝处相对流速、紊动能、剪切应力沿垂向分布

Fig. 7 Vertical distribution of dimensionless velocity, turbulent kinetic energy and Reynolds stress of slot
均值,测点的瞬时流速减去时均流速,就得到瞬时的脉动流速 $v'_i(i=x,y,z)$,其均方根 $v'_{i_{ms}}$ 计算公式为

$$v'_{i_{ms}} = \sqrt{\overline{(v'_i)^2}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2 - (\sum v_i)^2/n}{n - 1}}$$

单位质量流线的紊动能 k 为

$$k = \frac{1}{2}(v_{x_{ms}}'^2 + v_{y_{ms}}'^2 + v_{z_{ms}}'^2)$$

式中 v'_x, v'_y, v'_z 分别为 x, y, z 方向的脉动流速。

流量为 9.31 L/s,距离底床 10.0 cm 和 20.0 cm 时的等紊动能云图如图 8 所示.由图 7(b)和图 8 可知:(a)竖缝处紊动能随着水深的增加有增大的趋势,上下层水流紊动能差别在 $0.2k_b$ 之内;(b)竖缝入口处紊动能均值比竖缝出口处紊动能均值小,而在竖缝出口附近紊动能达到了最大值;(c)紊动能沿着主流方向有逐渐减小的趋势,两侧回流区的紊动能较小,其中较大回流区的平均紊动能比较小回流区的平均紊动能要小;(d)随着水深的增加,池室中紊动能的分布规律大致相同,但相同部位的紊动能有所增大.另外在试验时发现,随着流量的增加,池室中相同部位的紊动能有增大的趋势.所以,池室中的紊动能在竖缝出口附近对鱼类的影响最大,而较大的回流区是鱼类上溯中良好的休息空间.同等流量下,鱼类受到池室上层水流紊动能的影响比下层要小一些,而随着流量的增加,鱼类在池室相同部位所受到的紊动能的影响也会增大.

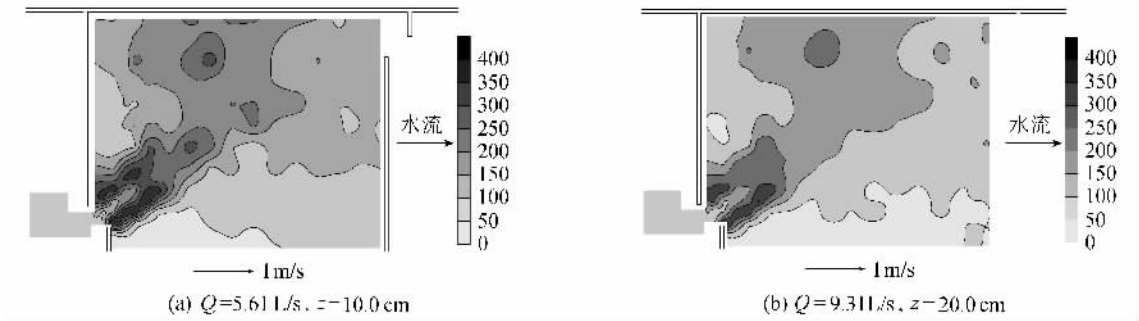


图 8 不同水深等紊动能云图(单位: cm^2/s^2)

Fig. 8 Contour lines of turbulent kinetic energy at different depths (unit: cm^2/s^2)

2.3 雷诺剪切应力

雷诺剪切应力是因紊动水团的交换在流层之间产生的附加应力^[11].根据文献^[12]的研究,雷诺剪切应力是衡量紊流对浮游鱼类影响的一个较好的紊流指标^[12].试验可以得到 3 个平面的雷诺剪切应力,因在 xOy 平面上是最大的,其剪切应力 τ_{xOy} 为

$$\tau_{xOy} = -\rho \text{Cov}(v_x, v_y)$$

其中

$$\text{Cov}(v_x, v_y) = \frac{\sum v_x v_y}{n - 1} - \frac{\sum v_x \sum v_y}{n(n - 1)}$$

式中： ρ ——水的密度； $\text{Cov}(v_x, v_y)$ —— v_x 和 v_y 的协方差。

流量为 5.611 L/s, 距离底板 5.0 cm 和 15.0 cm 时的等雷诺剪切应力(τ/ρ)云图如图 9 所示. 由图 7(c) 和图 9 可知:(a) 竖缝处雷诺剪切应力随着水深的增加有增大的趋势, 上下层水流雷诺剪切应力的大小差别在 $0.2\tau_b$ 之内;(b) 竖缝入口处雷诺剪切应力均值比竖缝出口处雷诺剪切应力均值小, 而在竖缝出口下游附近雷诺剪切应力达到了最大值;(c) 雷诺剪切应力沿着主流方向有逐渐减小的趋势, 两侧回流区的雷诺剪切应力较小, 尤其在较大回流区靠近侧墙的地方几乎为零;(d) 同等流量下, 随着水深的增加, 池中剪切应力的分布趋势大致相同, 但相同部位的剪切应力有所增大. 另外在试验中发现, 随着流量的增加, 池中相同部位的剪切应力有增大的趋势.



图 9 不同水深等雷诺剪切应力云图(单位: cm^2/s^2)

Fig. 9 Contour lines of Reynolds stress at different depths (unit: cm^2/s^2)

3 结 论

- a. 池室中的流速、紊动能和雷诺剪切应力在竖缝出口附近最大, 在两侧的回流区比较小, 其中大回流区的这 3 个指标要小于小回流区, 所以鱼类上溯时在竖缝出口附近受到水流的影响最大, 而较大的回流区是鱼类休息的良好场所.
- b. 流速在垂向的分量很小, 几乎为零, 所以鱼类受到垂向流速的影响很小.
- c. 随着水深的增加, 流速有减小的趋势, 而紊动能和雷诺剪切应力有增大的趋势, 所以鱼类洄游时在池室上层受到流速的影响要稍大于下层, 而在下层受到紊动能和雷诺剪切应力的影响要稍大于上层.
- d. 随着流量的增加, 相同部位的流速、紊动能和雷诺剪切应力也会相应的增大, 所以流量越大, 鱼类受到水流的影响也会越大.

参考文献:

[1] 长江小南海水电站建设项目对长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区影响及其减免对策专题研究报告[R]. 武汉:长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2008.

[2] KATOPODIS C, RAJARATNAM N, WU S, et al. Denil fishways of varying geometry[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(7): 624-631.

[4] 严莉, 陈大庆, 张信, 等. 西藏狮泉河鱼道设计初探[J]. 淡水渔业, 2005, 35(4): 31-33. (YAN Li, CHEN Da-qing, ZHANG Xin, et al. Preliminary study on design of fishway on Tibet Shiquan River[J]. Freshwater Fisheries, 2005, 35(4): 31-33. (in Chinese))

[5] 孙双科, 邓明玉. 北京市上庄新闸竖缝式鱼道的水力设计研究[C]//水电 2006 国际研讨会文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 951-957.

[6] TARRADE L, TEXIER A, DAVID L, et al. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways[J]. Hydrobiologia, 2008, 609: 177-188.

[7] PUERTAS J, PENA L, TELJEIRO T. Experimental approach to the hydraulic of vertical slot fishways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(1): 10-23.

[8] 董志勇, 冯玉平, ERVINE A. 异侧竖缝式鱼道水力特性及放鱼试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 126-130. (DONG Zhi-yong, FENG Yu-ping, ERVINE A. An experimental study of hydraulic characteristics and fish test in vertical slot fishway from side to

side[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 126-130. (in Chinese))

[9] WU S, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(4): 351-360.

[10] 董志勇. 环境水力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 169-172.

[11] 卢金友, 徐海涛, 姚仕明. 天然河道水流紊动特性分析[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1029-1034. (LU Jin-you, XU Hai-tao, YAO Shi-ming. Turbulent characteristics of flow in river[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1029-1034.

[12] SANAGIOTTO D G, COLETTI J Z, MARQUES M G. 竖缝式鱼道流速和水力紊动特性研究[C]//水电 2006 国际研讨会文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 855-957.

Experimental study on hydraulic characteristics of vertical slot fishway from side to side

CAO Qing-lei¹, YANG Wen-jun¹, CHEN Hui²

(1. Key Laboratory of Management of Rivers and Lakes & Flood Control of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China ;

2. Department of Hydraulics, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract : The hydraulic characteristics of vertical slot fishway from side to side were studied. In the flume the 3-D acoustic Doppler velocimeter (ADV) was employed to measure the velocity data in the fishway pool. Some hydraulic parameters such as flow velocity field, turbulent kinetic energy and Reynolds stress in the fishway pool with the flow discharges of 5.61 L/s and 9.31 L/s at different depths were preliminarily analyzed. The results show that the vertical velocity component in the fishway pool is very small and almost zero. Under the same flow discharge, the flow velocity has a decreasing tendency with the increase of the water depth, while the turbulent kinetic energy and the Reynolds stress have an increasing tendency. With the increase of the flow discharge, the flow velocity, the turbulent kinetic energy and the Reynolds stress at the same parts of the fishway pool correspondingly increase.

Key words : fishway ; vertical slot ; velocity field ; turbulent kinetic energy ; shear stress

+++++

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32-1521/C, ISSN1671-4970, 季刊, 自办发行)

《河海大学学报(哲学社会科学版)》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和‘三个代表’重要思想为指导,认真贯彻落实科学发展观,坚持实事求是的思想路线,贯彻‘双百’方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、法学、社会学、文学、语言学、经济学、管理学等社会科学方面的学术性文章,可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。《河海大学学报(哲学社会科学版)》为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行。2011 年每本定价 10 元,每本邮费 1 元,全年订费 44 元,欢迎广大读者直接向编辑部订阅。

联系地址 南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786376

E-mail :sxb@hhu.edu.cn

网址 :kbb.hhu.edu.cn/sxb/index_sxb.htm