

双侧竖缝式鱼道水力特性研究

吕强, 孙双科, 边永欢

(中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 研究分析不同水池长宽比条件下双侧竖缝式鱼道的水池流场结构及其水力学指标, 为双侧竖缝式鱼道布置参数的优化选择提供技术依据。基于单侧竖缝式鱼道体型参数的研究成果, 选取导板长度与水池宽度之比为0.25、竖缝宽度与水池宽度之比为0.15、导向角度为 45° 作为研究的基本体型; 鱼道来流边界设置为压力进口, 上游水深设置为2 m, 出流边界设置为压力出口, 下游水深设置为2 m; 模型顶部设置为压力进口, 进口压强为 1.01×10^5 Pa, 边墙设置为固壁边界。采用三维数值模拟的方法研究分析了水池长宽比分别为4:8、5:8、5.5:8、5.75:8、6:8、6.5:8、7:8、8:8、9:8的条件下双侧竖缝式鱼道的水池流场结构及其水力学指标。在不同水池长宽比条件下, 鱼道常规水池内存在3种典型流场结构, 其主流轨迹线、主流流速沿程衰减规律以及回流区分布等水力学指标均有不同, 典型长宽比取值区间分别为4:8~5.5:8、5.75:8~6.5:8及7:8~9:8; 对比发现, 长宽比在5.75:8~6.5:8区间范围时, 主流区宽度相对较大, 水池空间利用较为充分, 沿程流速衰减情况也较好, 回流区主要分布于主流两侧且大小适中。初步认为长宽比5.75:8~6.5:8的水池流场结构较为合理。

关键词: 双侧竖缝式鱼道; 水力特性; 数值模拟; 水池长宽比; 流场

中图分类号: TV131.4, S956.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2016)04-0055-08

鱼道是在闸、坝或天然障碍处为沟通鱼类洄游通道而设置的一种过鱼建筑物(华东水利学院, 1986)。竖缝式鱼道是鱼道的基本布置形式之一, 具有主流明确、流场结构稳定、适应上下游水位变化能力强等特点(徐体兵和孙双科, 2009), 在国内外工程中得到广泛应用。

竖缝式鱼道具有多种结构型式, 大体上分为3类: 单侧竖缝式鱼道、双侧竖缝式鱼道和其他类型。单侧竖缝式鱼道结构简洁, 流态稳定, 耗水量较小, 是国内外广泛采用的一种竖缝式鱼道布置形式。相比之下, 双侧竖缝式鱼道耗水量大, 占用场地也相对较大, 但可为鱼类提供双侧洄游空间, 有利于提高过鱼量, 国内外有若干鱼道工程采用了这种布置形式, 如加拿大的鬼门峡鱼道(Katopodis C et al, 1997)、法国贝尔杰拉克堰鱼道(联合国粮农组织, 2009)。文献检索表明, 目前国内外开展的研究工作主要针对单侧竖缝式鱼道, 对于双侧竖缝式鱼道的研究鲜见报导, 在国内尚属空白。随着我国鱼道工程建设的深入开展, 双侧竖缝式鱼道的水力学特性研究也亟

需进行。

从几何形态看, 双侧竖缝式鱼道相当于2个单侧竖缝式鱼道的几何叠加, 因而其体型布置参数可依据单侧竖缝式鱼道初步确定。国内外学者对单侧竖缝式鱼道细部体型进行了较为细致的研究, 徐体兵和孙双科(2009)在总结Rajaratnam、Larinier、Fujihara等的研究成果(Nallamuthu Rajaratnam et al, 1986; Rajaratnam N et al, 1992; Liu Minnan et al, 2006; Wu S et al, 1999; Larinier M et al, 2002; Fujihara Masayuki et al, 2003)基础上提出了单侧竖缝式鱼道水池体型的合理取值区间: 常规水池的长宽比为9:8~10.5:8、导板长度与水池宽度之比为0.25~0.34、导向角度为 45° 等。张国强和孙双科(2012)基于徐体兵的研究成果, 提出了竖缝宽度与水池宽度之比为0.15~0.20。本文基于单侧竖缝式鱼道体型参数的上述研究成果, 选取导板长度与水池宽度之比为 $P:B=0.25$ 、竖缝宽度与水池宽度之比为 $b:B=0.15$ 、导向角度为 45° , 作为双侧竖缝式鱼道研究的基本体型。在此基础上, 采用三维数值模拟的方法研究分析了水池长宽比分别为4:8、5:8、5.5:8、5.75:8、6:8、6.5:8、7:8、8:8、9:8的条件下双侧竖缝式鱼道的水池流场结构及其水力学指标, 为双侧竖缝式鱼道布置参数的优化选择提供技术依据。

收稿日期: 2015-09-25

作者简介: 吕强, 1991年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: lv_qiang_@126.com

通信作者: 孙双科, 1966年生, 男, 教授, 主要研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: sunsk@iwhr.com

1 数学模型的建立及验证

三维数值模拟计算采用流体力学软件 Fluent 进行,选用 κ - ε (RNG) 湍流模型并采用 VOF 方法捕捉自由水面,该模型能较好地模拟鱼道流场,满足研究需求。

κ - ε (RNG) 模型的控制方程(金忠南,1989;倪浩清和沈永明,1996;王远成和吴文权,2004;李玲和李玉梁,2009)如下:

连续性方程:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i \tag{2}$$

k 方程:
$$\frac{\partial (\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \kappa)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + G_\kappa - \rho \varepsilon \tag{3}$$

ε 方程:
$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \tag{4}$$

式中: u_i 为各向速度分量; ρ 为流体的时均压强; μ 为分子粘性系数; μ_t 为紊动粘性系数; κ 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; $\mu_t = C_\mu (\kappa^2/\varepsilon)$; $G_\kappa = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; $C_{2\varepsilon} = 1.68 + \frac{C_u \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$, $C_u = 0.0845$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $\alpha_\kappa = 1.39$, $\sigma_\kappa = 0.72$, $\sigma_\varepsilon = 0.72$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ 。

VOF 模型控制方程:
$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \tag{5}$$

式中: u_i 为各向速度分量; F 为水或空气所占体积百分比,若 $F = 1$ 表示水充满了整个计算区域,若 $F = 0$ 表示计算区域内是空气,水与空气各自所占百分比的总和为 1。

计算区域和边界条件:图 1 给出了鱼道三维数学模型计算域的平面示意图,模拟计算了 5 级鱼道水池。其中,水池宽度 B 取 4.0 m,鱼道水池长度 L 分别取 2、2.5、2.75、2.875、3、3.25、3.5、4、4.5 m,对应的水池长宽比分别为 4 : 8、5 : 8、5.5 : 8、5.75 : 8、6 : 8、6.5 : 8、7 : 8、8 : 8、9 : 8,导板长度与水池宽度之比为 $P : B = 0.25$,竖缝宽度与水池宽度之比为 $b : B = 0.15$,导向角度 θ 为 45° ,坡度为 2%。鱼道来流边界设置为压力进口,上游水深设置为 2 m,出流边界设置为压力出口,下游水深设置为 2 m;模型顶部设置为压力进口,进口压强为 1.01×10^5 Pa,边墙设置为固壁边界。为了避免边界对计算结果的影响,取第 3 级水池为主要研究对象。

为了验证数学模型参数设置的合理性,进行了大比尺模型试验验证。试验模型几何比尺为 1 : 3,模拟了 7 级常规水池,流速测量采用 P-EMS 二维流速仪。对比分析了水池长宽比 $L : B = 6 : 8$ 的情况下,物理模型与数学模型竖缝断面中心点处垂向流速分布以及水池中间横截线 MN 处的横向流速分布,典型验证结果见图 2。验证结果表明本研究中数值计算结果与实测结果吻合性较好,数值计算参数设置合理。

2 不同水池长宽比下水池内的流场结构

研究(董志勇等,2008;Laurent Tarrade et al,2008)表明,竖缝式鱼道常规水池内不同水深处的横切面上水流结构具有较强的相似性,本研究中关于流场结构的分析选取第 3 级水池水深 $z = H/2$ 处的横切面为主要研究对象。

2.1 水池长宽比对流场结构分区的影响

水流从两侧竖缝进入下一级水池后形成两股主流,由于隔板与导板的阻隔作用,两股主流的方向发生偏转,不同水池长宽比条件下,主流偏转、掺混等情况差别较大,回流区的分布也有较大差别,流速等值线见图 3。

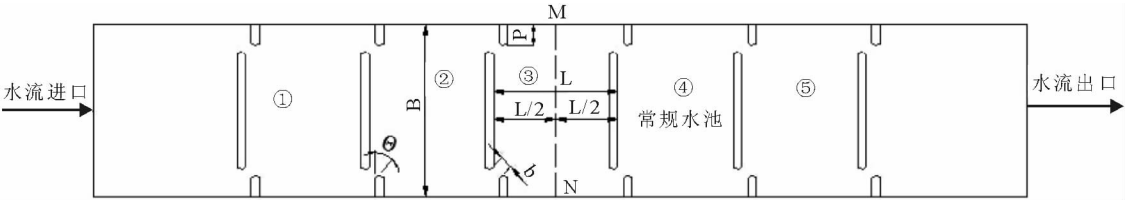
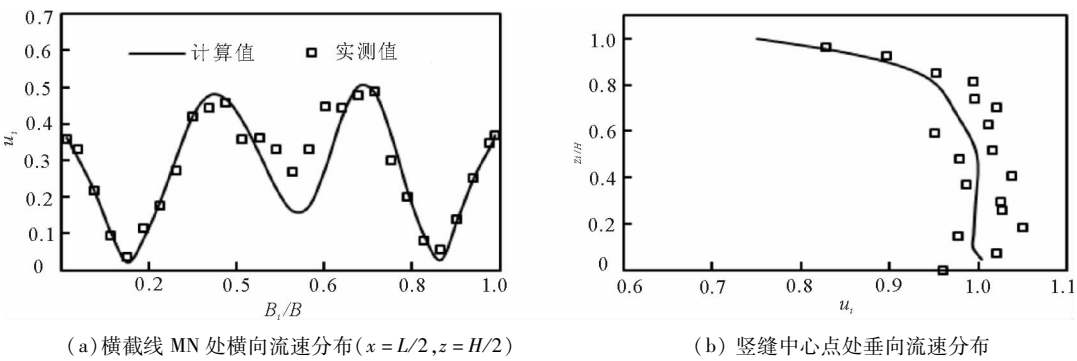


图 1 鱼道数学模型平面示意

Fig.1 Diagram of the general pools for the double vertical slot fishway



(a) 横截面 MN 处横向流速分布 ($x=L/2, z=H/2$)

(b) 竖缝中心点处垂向流速分布

图 2 数值计算结果与实测值对比

Fig. 2 Comparison of numerical simulation and experimental results

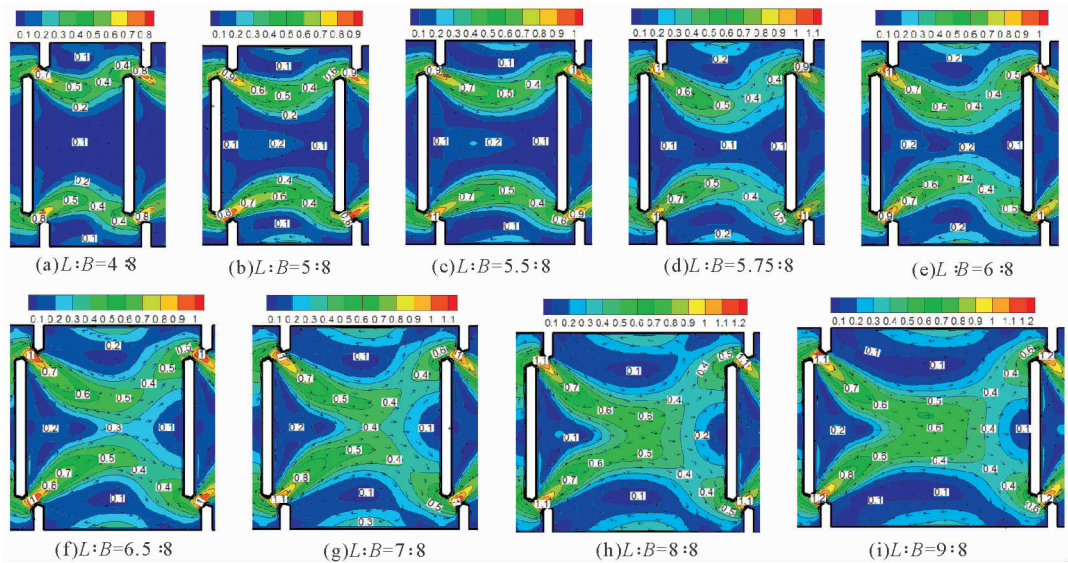


图 3 不同水池长宽比下鱼道水池内的流速等值线

Fig. 3 Flow structures in pools of different length-to-width ratios

由图 3 可见,当水池长宽比较小时,两股主流分布在水池两侧,彼此间隔较远,互不干扰;随着水池长宽比增大,两股主流逐渐靠近,直至相互掺混。为了清晰判别两股主流相互影响程度,图 4 给出了 4 种典型长宽比条件下第 3 级水池中间横截面 MN 处的流速矢量,图 5 给出了不同长宽比条件下第 3 级水池中间横截面 MN 处的流速大小分布,其中 U 为横截面 MN 上横向各点的流速, U_0 为竖缝断面的平均流速。

图 4 表明,水池中间处流速矢量呈对称分布(右侧箭头表示正向流动,左侧箭头表示反向流动),主流流速大小呈近似抛物线分布。随着水池长宽比增大,主流边界逐渐向水池中间靠近。当长宽比 $L:B \leq 5:8$ 时,主流边界存在一定间隔,回流区分布于主流中间以及两侧;当长宽比 $L:B=5.75:8$ 时,两股主流彼此靠近,主流边界互

相接触,回流区分布于水池两侧;当 $L:B \geq 6.5:8$ 时,随着长宽比增大,两股主流边界更加靠近,主流掺混更加强烈,回流区分布于水池两侧。

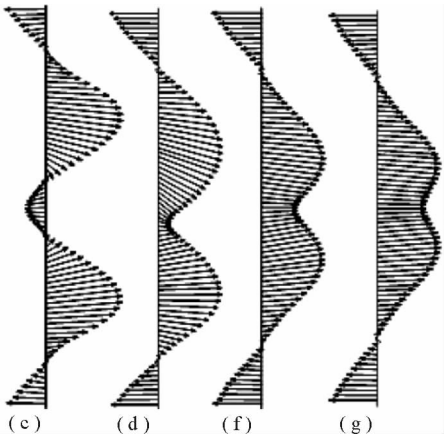


图 4 横截面 MN 处流速分布矢量

Fig. 4 Vector diagram at section MN

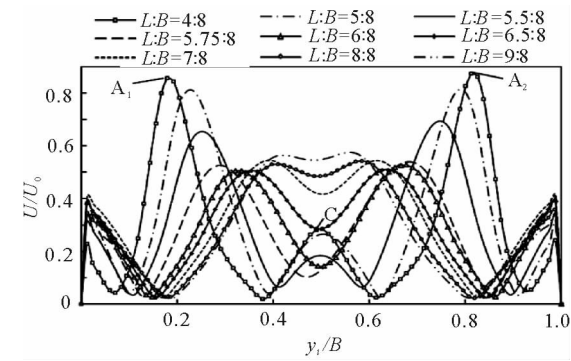


图5 不同长宽比下横截面 MN 处的流速大小分布
Fig.5 Velocity distribution at line MN of different length-to-width ratios

图5表明,随着长宽比增大,主流流速最大点 A_1 、 A_2 向水池中间 $y = B/2$ 处移动,说明随着长宽比

表1 不同长宽比下水池中间点流速与主流最大流速比值

Tab.1 Ratio of velocity at center of pool to maximum flow with different length to width ratios									
L : B	4 : 8	5 : 8	5.5 : 8	5.75 : 8	6 : 8	6.5 : 8	7 : 8	8 : 8	9 : 8
U_c/U_A	-0.323	-0.326	-0.265	0.191	0.283	0.561	0.765	0.893	0.948

注:表中负号表示该点流速方向朝向上游。
Note: Minus sign indicates the water flows to the upstream.

依据上述分析,根据主流是否互相干扰、主流掺混强烈程度情况以及回流区位置分布情况,可以将不同水池长宽比下水池内的流场结构大致分为3类:

第1类:当 $L : B \leq 5.5 : 8$ 时,水流通过水池两侧的竖缝断面形成两股主流,进入下级水池后两股主流发生微小偏转、之间间隔较远、互不掺混。两股主流中间形成两个较大的回流区,主流两侧形成两个较小的回流区,典型水流结构见图2(a)、(b)、(c)。

第2类:当 $5.75 : 8 \leq L : B \leq 6.5 : 8$ 时,随着水池长宽比增大,两股主流的偏转程度逐渐增大、发生一定程度的掺混。在水池中间段两股主流间的回流区受到挤压,收缩成较小的回流区分布在隔板背侧的三角区内,主流两侧的回流区增大,典型水流结构见图2(d)、(e)、(f)。

第3类:当 $7 : 8 \leq L : B \leq 9 : 8$ 时,两股主流彼此靠近,相互影响,掺混较为强烈。回流区分布于隔板背侧三角区内以及主流两侧,典型水流结构见图2(g)、(h)、(i)。

2.2 主流区最大流速轨迹线

为了进一步量化水池内主流分布情况,图6给出了主流区最大流速轨迹线,该轨迹线是水池内不

同横截面处流速最大值的连线。增大,两股主流呈互相靠近的趋势。C点为 $y = B/2$ 附近波峰值(C点为反向流动)或者波谷值(C点为正向流动),分别计算 U_c/U_A 用以表示主流边界流速与主流最大流速的比值,从而判定两股主流的掺混强度,其中 U_A 取 A_1 、 A_2 两点流速的平均值。

不同长宽比下水池中间点流速与主流最大流速比值见表1。

当 $L : B \geq 5.75 : 8$ 时,随着水池长宽比增大, U_c/U_A 逐渐增大;当 $L : B = 6.5 : 8$ 时, $(U_c/U_A) \times 100\% = 56.1\%$,也就是边界流速约为主流最大流速的一半。初步认为56.1%为判别主流掺混强烈程度的边界值: U_c/U_A 超过该值,认为两股主流掺混较为强烈;小于该值,认为两股主流发生掺混,但仍保持了一定的独立性,掺混不强烈。

同横截面处流速最大值的连线。

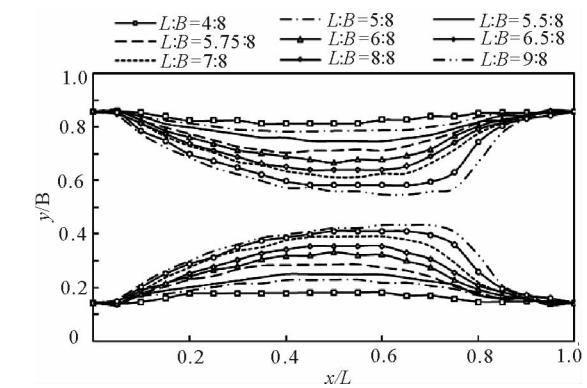


图6 主流区最大流速轨迹线
Fig.6 Flow track of the maximum velocity along the pools

2条主流最大流速轨迹基本呈对称分布,主流在水池前半段偏转较为均匀,在水池后半段偏转较为剧烈。当水池长宽比较小时,主流轨迹线几乎呈一条直线;随着长宽比逐渐增大,主流偏转程度越大,主流流程长度增加。根据图6的数据,可以总结出判定主流轨迹偏转程度的指标:主流最大流速轨迹线最小间距 K 及主流流程长度无量纲指标 I ,不同水池长宽比下的 K 与 I 值见图7、图8。

$$K = \min \left\{ \frac{\Delta y_i}{B} \right\} \quad (0 \leq x_i \leq L, i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

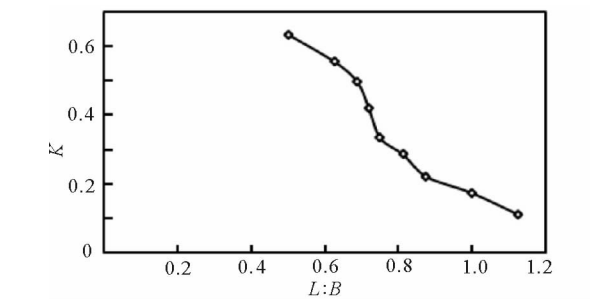


图 7 最大主流轨迹线最小间距

Fig. 7 Minimum distance of the maximum velocity track

$$I = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{\Delta x_i}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y_i}{B}\right)^2} \quad (i = 1, 2, \cdots n) \quad (7)$$

K 值与 $L:B$ 值呈负相关, I 值与 $L:B$ 值呈正相关。 K 值越小表明最大主流间隔越小, 此时主流偏转程度也越大, 最大主流流程长度无量纲值 I 越大。在 3 类不同流场结构下, K 值与 I 值的分布区间均保持独立性, 因此可以将 K 值与 I 值作为双侧竖缝式鱼道常规水池内区分 3 类不同流场结构的判别标准。

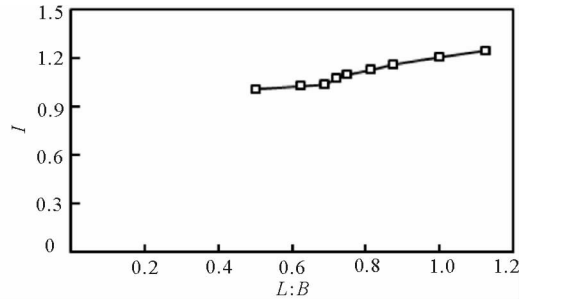


图 8 最大主流流程长度无量纲值

Fig. 8 Dimensionless parameter I of the length of the maximum velocity track

2.3 最大主流流速沿程变化规律

主流区最大主流流速沿程变化反映了特定鱼道体型消能效果, 一般认为主流流速沿程衰减效果越好越有利于鱼类洄游。图 9 给出了最大主流轨迹线沿程流速变化规律 (U 为最大主流轨迹线上各点流速, U_0 为竖缝断面平均流速), 由于水池左右两侧的主流基本呈对称分布, 且对应点的流速基本相同, 因此图 9 给出的主流轨迹线上各点的流速取左右两侧主流轨迹线上对应点流速的平均值, 表 2 给出了不同长宽比下主流流速最大衰减率。

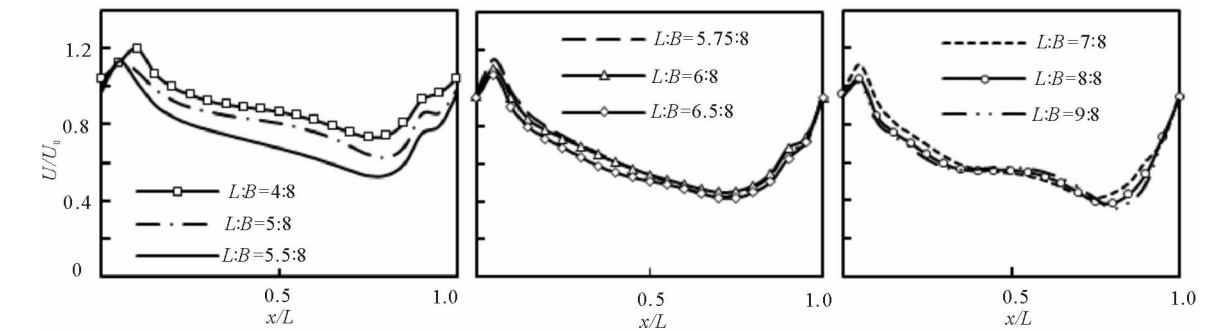


图 9 最大主流轨迹线沿程流速变化规律

Fig. 9 Maximum velocity distribution along the pools

表 2 最大主流流速最大衰减率

Tab. 2 Decay rate of maximum velocity

$L:B$	4:8	5:8	5.5:8	5.75:8	6:8	6.5:8	7:8	8:8	9:8
$I-\min(U/U_0)/\%$	26.6	37.2	47.0	58.3	55.5	58.2	58.5	61.9	64.7

当 $L:B \leq 5.5:8$ 时, 主流流速沿程均匀减小, 在 $x/L = 0.8$ 附近达到最小值, 随后受下级竖缝影响流速均匀增大, 随着长宽比增大主流沿程衰减效果更显著, 主流流速最大衰减率变化区间为 26.6% ~ 47%; 当 $5.75:8 \leq L:B \leq 6.5:8$ 时, 长宽比对主流流速沿程变化规律影响较小, 最大主流流速最大衰减率为 55.5% ~ 58.3%; 当 $L:B \geq 7:8$ 时, 在水池的前半段主流流速均匀减小, 在 $x/L = 0.35 \sim 0.5$ 范围内, 主流流速保持匀速, 随后流速再次均匀减小,

在 $x/L = 0.8$ 附近达到最小值, 最大主流流速最大衰减率为 58.5% ~ 64.7%。分析表明, 在第 1 类流场结构中, 长宽比的改变对主流流速最大衰减影响最大; 在第 2、3 类流场结构中, 长宽比的改变对主流流速衰减影响较小。

2.4 竖缝断面流速分布及平均流速

除了常规水池的水流结构外, 竖缝断面处的流速大小及分布是十分关键的水力学指标。研究发现, 不同水池长宽比下, 竖缝断面流速大小分布规律

具有较好的相似性,因此仅给出典型水池长宽比下竖缝断面的流速大小分布规律,见图10。

不同水池长宽比下,在 $0.2 \leq b_i/b \leq 0.93$ 区间内,竖缝断面流速变幅较小, U_i/U_0 分布在 $0.79 \sim 1.10$ 区间内;在 $b_i/b \leq 0.17$ 或 $0.93 \leq b_i/b$ 区间内, U_i/U_0 由中间向两侧急剧减小。总体上,靠近导板一侧流速较大,且变化较为剧烈,靠近隔板一侧流速略小,流速变化也略平缓。在同一鱼道底坡条件下,水池长宽比 $L:B$ 的改变对竖缝断面流速分布规律 U_i/U_0 影响较小。

鱼道流量的计算公式: $Q = \varphi b H_s \sqrt{2gJL}$ (8)
式中, Q 为流量, φ 为流量系数, b 为竖缝宽度, H_s 为竖缝断面水深, J 为鱼道坡度, L 为单级水池长度。

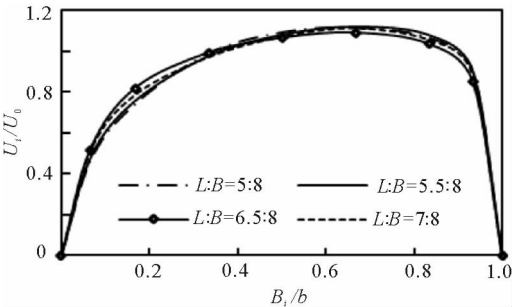


图10 典型长宽比下竖缝断面流速大小分布
Fig. 10 Velocity distribution in vertical slot with different length-to-width ratios

本研究发现,不同水池长宽比条件下,流量系数 φ 取值均约为 0.785,见图11。该值与实测结果吻合较好,说明在其他各项设计参数保持不变的情况

下,水池长宽比的改变对双侧竖缝式鱼道流量系数影响甚微。

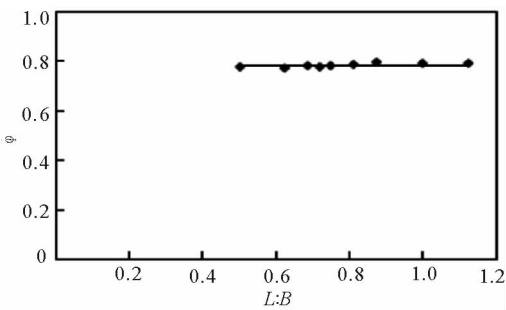


图11 不同水池长宽比下鱼道流量系数
Fig. 11 Discharge coefficient of fishway with different length-to-width ratios

2.5 单位水体消能率

法国的 Larinier 曾对竖缝式鱼道的消能效率进行过深入研究,给出了各级水池内的单位水体消能率 E 不宜大于 $150 \sim 200 \text{ W/m}^3$ 的建议 (Larinier M et al, 2002),因此需对本研究参数下的单位水体消能率进行复核,结果见表3。单位水体消能率计算公式为:

$$E = \frac{\rho b U_0^3}{2B(L-d)\varphi^2} \tag{9}$$

式中, $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$, b 为竖缝总宽度, U_0 为竖缝断面平均流速, L 为单级水池长度, d 为隔板厚度取 0.2 m , φ 为流速系数取 0.785 。

复核结果表明,在本研究采用的各项体型参数条件下,均满足单位水体消能率的要求,其不构成本研究中不同鱼道体型选择的限制因素。

表3 不同水池长宽比下单位水体消能率

Tab.3 Energy dissipation ratio of per unit weight of water in pools with different length to width ratio									
$L:B$	4:8	5:8	5.5:8	5.75:8	6:8	6.5:8	7:8	8:8	9:8
$E/W \cdot m^{-3}$	24	31	31.5	32	33	33	32	38	40

3 结论

通过对双侧竖缝式鱼道水力特性研究,得出以下结论:

- (1)水池长宽比对鱼道水池内的流场结构分布有显著影响。在不同水池长宽比条件下,鱼道水池内存在3种典型流场结构,其主流轨迹线、主流流速沿程衰减规律以及回流区分布等水力学指标均有不同,3种类型流场对应水池长宽比分别为 $4:8 \sim 5.5:8$ 、 $5.75:8 \sim 6.5:8$ 、 $7:8 \sim 9:8$;
- (2)在 $5.75:8 \leq L:B \leq 6.5:8$ 情况下,双侧竖缝式鱼道主流区宽度相对较大,水池空间利用较

为充分,沿程流速衰减情况也较好,回流区主要分布于主流两侧且大小适中。初步认为是较为合理的长宽比取值区间,但是否属于适合鱼类洄游的合理流场结构,还有待进一步的过鱼试验验证。

参考文献

董志勇,冯玉平,Alan Ewine,2008. 异侧竖缝式鱼道水力特性及放鱼试验研究[J]. 水利发电学报,27(6):126-130.
华东水利学院,1982. 水工设计手册:6:泄水与过坝建筑物[M]. 北京:水利电力出版社.
金忠青,1989. N-S方程的数值解和紊流模型[M]. 南京:河海大学出版社;50-57.
李玲,李玉梁,2009. 应用基于RNG方法的湍流模型数值模

- 拟钝体绕流的湍流流动[J]. 水利学报, 40(11): 1386 – 1391.
- 联合国粮农组织, 德国水资源与陆地改良学会, 2009. 鱼道——设计、尺寸及监测[M]. 北京: 中国农业出版社: 75 – 76.
- 倪浩清, 沈永明, 1996. 工程湍流流动、传热及传质的数值模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社: 6 – 12.
- 王远成, 吴文权, 2004. 方柱绕流流场的 RNG 方法模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 19(增刊): 916 – 920.
- 徐体兵, 孙双科, 2009. 竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J]. 水利学报, 40(11): 1386 – 1391.
- 张国强, 孙双科, 2012. 竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J]. 水力发电学报, 31(1): 152 – 156.
- Fuijihara Masayuki, Fukushima Tadao, Tachibana Kazuko, 2003. Numerical investigation of flow in vertical single-and double-slot fishways[J]. Trans of JSIDRE, (223): 79 – 88.
- Katopodis C, Rajaratnam N, Wu S, et al, 1997. Denil fishways of varying geometry[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 123(7): 624 – 631.
- Laurent Tarrade, Alain Texier, Laurent David, et al, 2008. Topologies and measurements of turbulence flow in vertical slot fishways[J]. Hydrobiologia, 609: 177 – 188.
- Larinier M, Travade F, Porcher J P, 2002. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring[C]. Bull. Fr. Peche Piscic, 364 (SI): 208.
- Liu Minnan, Nallamuthu R, David Z Zhu, 2006. Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulics Engineering, 132(8): 765 – 777.
- Nallamuthu Rajaratnam, Gary Van der Vinne, Christos Katopodis, 1986. Hydraulics of vertical slot fishways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 112(10): 909 – 927.
- Rajaratnam N, Katopodis C, Solanki S, 1992. New designs for vertical slot fishways [J]. Journal of Civil Engineering, 19: 402 – 414.
- Wu S, Rajaratnam N, Katopodis C, 1999. Structure of flow in vertical slot fishway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 125(4): 351 – 360.

(责任编辑 张俊友)

Hydraulic Characteristics and Flow Structure in A Double Vertical Slot Fishway

LV Qiang, SUN Shuang-ke, BIAN Yong-huan

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China)

Abstract: The double vertical slot fishway, one of the basic types of vertical slot fishways, provides for double sided migration and is appropriate for large numbers of migrating fish. However, research on double vertical slot fishways has rarely been reported in China. In this study, a three dimensional numerical simulation model was used to investigate the flow structure and hydraulic parameters of the double vertical slot fishway with various pool-aspect ratios (the ratio of fishway length to width). The results provide a technical reference for the design of double vertical slot fishways. Based on previous research on single vertical slot fishways, several basic parameters for the double vertical slot fishway model were selected: upstream lateral baffle slope, 45°; lateral baffle length, 0.25B and slot width, 0.15B; where B is pool width. In the numerical model, the inflow and outflow boundaries were both set at a hydrostatic pressure of 2 meters, the top boundary was set at atmospheric pressure ($1.01 \times 10^5 \text{Pa}$) and all other boundaries were set as walls. The flow structure and hydraulic parameters of the general pools were then calculated using different length-to-width ratios (4 : 8, 5 : 8, 5.5 : 8, 5.75 : 8, 6 : 8, 6.5 : 8, 7 : 8, 8 : 8, 9 : 8). Results show that there are three typical flow structures in the pool, with different mainstream curves, velocity attenuation curves and recirculation area sizes. The three typical flow structures correspond to three ranges of length-to-width ratio (4 : 8 – 5.5 : 8, 5.75 : 8 – 6.5 : 8, 7 : 8 – 9 : 8). With increasing length-to-width ratio, the length and attenuation rate of the mainstream increased, while the distance between the two mainstreams decreased. The recirculation zones between mainstreams decreased correspondingly and the size of the recirculation region outside the mainstreams increased. The flow structure most appropriate in the pools occurs at a length-to-width ratio in the range 5.75 – 6.5 : 8. When the width of the mainstreams is relatively wide, the pools can be more fully utilized because mainstream velocity drops off rapidly and recirculation zones form that help fish pass successfully.

Key words: double vertical slot fishway; hydraulic characteristics; numerical simulation; length-to-width ratio of general pools; flow structure