

鱼道水力特性研究进展

闫滨,王铁良,刘桐渤

(沈阳农业大学水利学院,沈阳 110866)

摘要:综述竖缝式、池堰式和涵洞式、丹尼尔式及组合式鱼道水力特性的国内外研究进展;对比分析水流流态、流速场特征、流量与水深关系、紊流特性及消能率等方面对不同鱼道的水力特性的影响;得出了竖缝式鱼道中无量纲流量与相对水深之间呈线性关系的结论,列出了池堰式鱼道中流量与水深的关系式;指出鱼道中紊流的紊动能、紊流强度及紊流结构均会对鱼道水力特性、鱼类对栖息地的选择以及鱼类通行造成较大影响;展望鱼道未来研究重心会逐渐集中于鱼道内紊流特性及其数值模拟的研究,尤其是紊流结构的研究。此外,不同结构形式鱼道内水力条件对鱼类通行的影响及改善措施亦将成为未来研究热点之一。

关键词:鱼道;水力特性;竖缝式;池堰式;涵洞式

中图分类号:TV135;X171.4

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)06-0035-08

为满足人们对水资源日益增长的需求,广大水利工作者在河流上修建了大坝和水闸等水工建筑物。这些工程在为人类带来巨大经济和社会效益的同时,也破坏了河流原有的面貌,人为阻隔了鱼类的洄游通道,对鱼类资源、河流生物多样性和生态系统产生了不利影响。在此背景下,鱼道作为帮助鱼类洄游的生态友好型水利措施应运而生。鱼道适宜的水流流态、流速、水深和紊流等水力特性是帮助鱼类顺利通过鱼道完成洄游的必要条件。本文着重对竖缝式鱼道、池堰式鱼道和涵洞式鱼道水力特性的国内外研究进展加以阐述。

1 竖缝式鱼道水力特性研究进展

最早的竖缝式鱼道是1943年在加拿大英属哥伦比亚菲沙河的赫尔斯门鱼道中首先应用的^[1]。对竖缝式鱼道水力特性的研究主要集中于水流流态、流速场、流量与水深关系、紊流场及消能率等方面。

1.1 水流流态

Rajaratnam等(1986)首先对竖缝式鱼道的水力特性进行了系统的模型试验研究,对4种不同比尺(1.5、3.3、8和16)的竖缝式鱼道模型在7种不同结构形式的池室进行了水流流态分析。研究发现,竖缝式鱼道竖缝处形成的射流沿水流方向能量逐渐衰减,并在池内形成回流区^[2];Rajaratnam等(1992)和Puertas等(2004)提出,均匀流状态下,竖缝式鱼道

内的水流流态主要取决于特定的水池设计,例如水池的几何尺寸^[3-4]。Bermudez等(2010)对不同水池尺寸(竖缝宽度 b 分别为0.038,0.075,0.113和0.150 m,单个水池长度分别为 $2.5b, 5b, 10b$ 和 $15b$,宽度分别为 $2b, 2.67b, 4b$ 和 $8b$,鱼道坡度为5%)的同侧竖缝式鱼道进行试验,得到2种不同水流流态。当水池长宽比小于1.25时,水池中射流从上一级竖缝直接导入下一级竖缝,射流两侧存在大小不等的漩涡;当水池长宽比大于1.88时,射流离开上一级竖缝后,直接碰撞水池边墙,射流两侧仍然存在漩涡;当水池长宽比介于1.25和1.88之间时,水池中出现上述2种流态之间的过渡性水流流态^[5]。

董志勇等(2008)对同侧竖缝式鱼道的一维流动特性进行试验研究,得出竖缝宽度较大(30 cm)、池室相对较小(池室宽度80 cm)情形鱼道的水力特性和放鱼试验的结果^[6]。研究表明,同侧竖缝式鱼道适用于中等流量情形(流量为8~41 L/s);若流量较大,水池内射流、漩涡的作用均较强,不利于鱼类上溯,此时宜采用异侧竖缝式鱼道。水利水电科学研究院的徐体兵和孙双科(2009)研究了鱼池的长宽比及墩头长度对鱼道内流态的影响。研究表明:水池长宽比是影响竖缝式鱼道水流结构的主要控制因素,长宽比在8:8~10.5:8倍竖缝宽度范围内可以获得较好的流态;此外,隔板是否设置墩头对水流结构的影响有限,从避免漂浮物滞留与防止泥沙淤积角度看,在实际鱼道工程中可考虑不设隔板

墩头^[7]。罗小凤等(2010)通过对同侧竖缝式鱼道进行物模和数模试验得出:在鱼道流量及水池长宽比一定的情况下,若不考虑边壁的阻碍作用,导角越大,竖缝射流的衰减速度就越快,主流轨迹的弯曲程度越大,也越容易冲撞到右侧(沿水流方向)边墙^[8]。刘东等(2010)通过试验得出,异侧竖缝式鱼道的整体主流轨迹呈“S”形曲线,在单一池室(单个水池宽度均为0.8 m,长度分别为1.0,1.5,2.0 m,对应竖缝宽度分别为0.16,0.24,0.32 m,下泄流量分别为40,50,60 L/s,池室水深分别为0.4,0.5,0.6 m,鱼道的坡度为3%)中呈现“L”形^[9]。

1.2 流速场

Rajaratnam (1986, 1992)、Puertas 等(2004)和 Pena 等(2004)通过试验对几种竖缝式鱼道的流速场进行了研究。研究表明,当鱼道坡度小于5%时,水池中的平均流速场在水平面呈二维分布,垂直方向流速比水平方向流速低得多;其研究还表明,在均匀流条件下,池室流速场几乎与流量无关^[2-4,10]。Rajaratnam 等(1986)通过试验观察,总结出竖缝处最大流速 V_{sm} 的计算公式^[2]:

$$V_{sm} \approx \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

式中: Δh 表示相邻两水池间的水位差(m); g 为重力加速度(m/s^2); V_{sm} 取决于通过鱼类的爆发流速。Bermudez 等(2010)通过试验并利用连续性方程得到竖缝式鱼道竖缝处的平均流速公式^[5]:

$$v_s = \frac{Q}{h_s b'} \quad (2)$$

式中: Q 表示流量(m^3/s); h_s 为竖缝处平均水深(m); b' 表示竖缝宽度(m)。在数值模拟计算中,竖缝处的水深与水池中心处的水深呈线性关系;当坡度为5%时, $h_s = 0.97h_c$,其中, h_c 表示水池中心处的水深(m)。因而,在试验过程中,通过量测水池中心处的水深即可知道竖缝处的水深。

Bermudez 等(2010)通过试验分析指出,水池长度是影响竖缝式鱼道水力特性的主要因素,竖缝宽度和水池宽度对水流特性也存在一定影响。随着水池长度增加,相邻水池间的水头差变大,回流流速也随之增大^[5]。

董志勇等(2008)利用大比尺鱼道模型对同侧竖缝式鱼道的水力特性进行了系统的试验研究,并进行放鱼试验^[6]。由典型流速分布图可知,靠近竖缝处断面流速呈正态分布,距竖缝较远处才逼近壁面射流的流速分布。此外,由于在同侧竖缝式鱼道中射流的卷吸作用较强,并且在水池内形成较大的漩涡,所以水池内纵向流速的衰减比自由壁面射流

快得多。而且,通过竖缝的射流不存在自由射流中的势能核。

毛熹等(2012)研究了底孔和坡度对鱼道流速的影响,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型对如下不同工况的鱼道进行了数值模拟计算。工况 I:坡度为5.2%,无底孔;工况 II:坡度仍为5.2%,长隔板近壁端有一个0.3 m × 0.3 m 底孔;工况 III:坡度为2.6%,无底孔。3种工况下池室长度均为1.2 m,宽度为1 m,高度为1 m,竖缝宽度为0.3 m。数值模拟研究成果表明:竖缝式鱼道的最大流速一般出现在竖缝附近,并且对于竖缝处的测点,一般是底层流速更大;增加底孔会降低竖缝处的流速,但底孔处流速偏大;放缓坡度会降低鱼道中的流速,坡度放缓一半时,竖缝处平均流速会降低约20%以上,对鱼类洄游有利^[11]。

包莉等(2012)对竖缝式鱼道弯道处流速进行数值模拟研究,对比2种不同结构形式(圆弧形和矩形)的弯道,并进行物理模型试验验证。竖缝宽度0.3 m,竖缝隔板倒角45°;鱼道宽度2.0 m,单个池室长度2.4 m,池室正常运行水深1.2 m;每隔10级鱼池设置一休息池,休息池长度4.8 m。结果表明,矩形结构的弯道设置有效降低了主流区和竖缝处流速,利于鱼类洄游时的暂时休息。物理模型试验结果也验证了矩形弯道休息池布置的优势,表明矩形弯道布置与“L”形鱼池挡板结构形成的流场更符合鱼类洄游需求^[12]。

1.3 无量纲流量与相对水深的关系

相对水深表示从水面算起的垂线上任一测点的深度与实际水深的比值。Rajaratnam 等(1986)研究发现,均匀流条件下,无量纲流量和相对水深之间呈线性关系^[2]。Rajaratnam 等(1992)推求出无量纲流量与水池中心相对水深、坡度及竖缝宽度之间的关系表达式^[3]为

$$\frac{Q}{\sqrt{gS}b^5} = C_d \frac{h_c}{b} \quad (3)$$

式中: Q 为流量(m^3/s); C_d 为流量系数; h_c 为水池中心水深(m); S 表示坡度(%); b 表示竖缝宽度(m);等式左边整体表示无量纲流量, $\frac{h_c}{b}$ 表示水池中心相对水深。Puertas 等(2004)通过对2种竖缝式鱼道水流流态的观察与研究,提出了无量纲流量与水池中心水深之间的关系式^[4]:

$$Q_A = \frac{Q}{\sqrt{g}b^5} = \alpha \frac{h_0}{b} \quad (4)$$

式中: Q 为总流量(m^3/s); α 为运移系数; h_0 为水池

中心水深(m); Q_A 为无量纲流量; $\frac{h_0}{b}$ 表示相对水深。该表达式进一步证实了无量纲流量与相对水深之间的线性关系。

1.4 紊流场

Liu等(2006)对2种坡度(5.06%,10.52%)的竖缝式鱼道的紊流结构进行了试验研究,发现水池中射流主流区域内的雷诺剪切应力沿水流流向逐渐减小,且在回流区域内雷诺剪切应力较小;随着射流沿水池下行,纵向和横向紊流强度逐渐降低,但在回流区纵向和横向紊流强度基本保持不变;平行于水槽底板的平面内,垂向紊流强度分布接近于均匀分布^[13]。Bermudez等(2010)指出,竖缝式鱼道中,紊动能随水池长度的增加而增大,其空间分布取决于水流流态^[5]。当水池较短时(长宽比 $L/B=0.63$),射流直接从上一级竖缝进入下一级竖缝,在长挡板之间产生较大的回流漩涡区,在主流右侧,短挡板之间产生顺时针方向的小漩涡区,主流左侧区域紊动能非常低;当水池较长时(长宽比 $L/B=3.75$),射流通过竖缝后,直接冲撞对岸边墙,主流左侧回流漩涡区减小并向上游偏移,主流右侧漩涡区面积扩大并占据射流曲线凸侧区域,紊动能影响波及至对岸边墙,在主流右侧紊动能衰减较为明显。

曹庆磊等(2010)通过对异侧竖缝式鱼道的水力特性试验研究发现,池中水流的紊动能和雷诺剪切应力在竖缝出口附近最大,在两侧回流区较小,其中较大的回流区是鱼类休息的良好场所;随着水深或流量的增加,紊动能和雷诺剪切应力有增大的趋势^[14]。

1.5 消能率

Rajaratnam等(1992)为研发出简单、有效的竖缝式鱼道,对18种鱼道设计形式进行了试验研究,并分析了鱼道的水力特性与水池长度和宽度的相关性。研究发现,竖缝式鱼道的水池长度是竖缝宽度的10倍,水池宽度是竖缝宽度的8倍时,水池的消能效果较为理想,且存在足够的低流速回流区供鱼类休息^[3]。Wu等(1999)提出,相比池堰式鱼道,竖缝式鱼道的消能效果较好^[15]。

Bermudez等(2010)提出,竖缝式鱼道消能率 ε 计算公式^[5]为

$$\varepsilon = \frac{\rho g Q \Delta H}{h_c B L} \quad (5)$$

均匀流条件下,竖缝式鱼道消能率 ε 可以表示为

$$\varepsilon = C_q \sqrt{S^3 g^3 L} \frac{b}{B} \quad (6)$$

式中: C_q 为流量系数,其数值与挡板形状有关;其他

符号含义同上。可见,竖缝式鱼道的消能率取决于鱼道的坡度和挡板形状,与流量无关。此外,竖缝式鱼道的消能率随水池长度的增加而增大,其空间分布取决于水流流态。当水池较短时(长宽比 $L/B=0.63$),主流左侧区域消能率非常低;当水池较长时(长宽比 $L/B=3.75$),消能率影响波及至对岸边墙,在主流右侧消能率衰减较明显。

刘东等(2010)通过对异侧竖缝式鱼道进行物模和数模试验得出:当流量和水深相同时,竖缝宽度越小,上下池室水头损失越大,消能越充分;相同竖缝形式、相同下泄流量时,水深越小,沿程水头损失越大,消能越充分^[9]。

2 池堰式鱼道水力特性研究进展

池堰式鱼道是人类建造的最早的鱼道形式,出现在17世纪的欧洲。该种鱼道水池内水位稳定,在堰墙底板附近开凿的底孔对于保持水位稳定也有所帮助^[16]。池堰式鱼道适用于游泳能力较强的鱼类,如鲑鱼、虹鳟鱼和香鱼等。本文从水流流态、流速场、流量与水深关系、紊流场和消能率等方面对池堰式鱼道的水力特性研究进展进行综述。

2.1 水流流态

随着流量的增加,池堰式鱼道的水流流态从跃动流转变为溪流。Rajaratnam等(1988)提出了预测水流从跃动流过渡到溪流的判别标准^[17]。此后, Kim(2001)对3种不同池堰式鱼道进行了试验研究,指出同时具有槽口和底孔的矩形堰,是鱼类上溯洄游的最理想形式^[18]。Ead等(2004)发现过渡性水流流态中还包括几个子流态^[19],其中包括跃动过渡流态(plunging-transitional flows)、过渡性流态(transitional flow regime)、过渡性挡板流态(transitional baffle flow)、挡板流态(baffle flow)和过渡性溪流流态(transitional streaming flow)。

2.2 流速场

O. Yagci(2009)在试验过程中,保持池堰式鱼道的底孔尺寸不变,改变槽口尺寸,并利用声学多普勒测速仪对整个鱼道内的流速进行测定,推导出池堰式鱼道水平面的合成流速公式^[20]

$$U_v = \sqrt{U_m^2 + v_m^2} \quad (7)$$

式中: U_v 是水平面内的合成流速(m/s); U_m 和 v_m 分别是纵向和横向的时均平均流速(m/s)。

2.3 流量与水深关系

Clay(1995)通过试验研究了池堰式鱼道内流量与水深的相对关系,发现通过底孔的流量与水头的平

方成比例,而堰顶流量与水头的1.5次方成比例^[1]。

O. Yagci(2009)通过试验得到池堰式鱼道内流量与水池中平均水深的关系函数^[20]

$$Q_t = \frac{\sqrt{gS_0 b_m^5} (\gamma_0/b_m - 0.731)}{0.25} \quad (8)$$

可见,给定一个水池中的平均水深,即可计算出总流量,反之亦然。式中: Q_t 是水槽中的总流量(m^3/s); γ_0 表示水池中的平均水深(m); g 表示重力加速度(m/s^2); S_0 是坡度(%); $b_m = \frac{b_0 + b_n}{2}$ 。其中:

b_0 是底孔宽度(m); b_n 是槽口的宽度(m)。此外,该研究还推导出池堰式鱼道中无量纲流量 Q_* 的表达式:

$$Q_* = \frac{Q_t}{\sqrt{gS_0 b_m^5}}, \text{其中符号含义同上。}$$

2.4 紊流场

2.4.1 紊动能

O. Yagci(2009)给出单位质量紊动能 k 的计算公式^[20]

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (9)$$

式中: u' 、 v' 和 w' 分别表示纵向、横向和垂向脉动流速(m/s)。因为鱼类在巡游时通常会避开高紊流区域,所以单位质量紊动能 k 较小时有助于鱼类通行^[21]。

2.4.2 紊流强度

O. Yagci(2009)把紊流强度 u' 定义^[20]为

$$u' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_s} (u_i - U_m)^2}{N_s - 1}} \quad (10)$$

式中: u_i 表示瞬时纵向流速; N_s 为流速采集点的数目,其他符号含义同前。研究表明,池堰式鱼道中存在的小范围高紊流强度区域对于鱼类通行很有帮助。

Silva等(2010)研究发现,在测试的各项水力学参数中,雷诺剪应力的水平分量对鱼的运动影响最大,尤其是体型较小的鱼类物种,通常会选择避开高紊流区域^[22]。

2.5 消能率

单位体积平均消能率 ε 的表达式(O. Yagci, 2009)^[20]为

$$\varepsilon = \frac{\rho g Q_t \Delta h}{L B \gamma_0} = \frac{\rho g Q_t S_0}{B \gamma_0} \quad (11)$$

式中: ρ 表示水的密度(kg/m^3); Δh 表示连续水池间的水头差(m); L 和 B 分别为水池的长度和宽度(m);其他符号含义同前。该研究还给出了单位体积平均消能率 ε 与总流量 Q_t 的线性关系, $\varepsilon = 1.833 Q_t -$

1.838。可见,在池堰式鱼道中,单位体积平均消能率 ε 与总流量成正比。

3 涵洞式鱼道水力特性研究进展

涵洞式鱼道一般适用于小溪或小河流。自上世纪80年代至今,国外已将涵洞式鱼道广泛应用于道路、铁路、堤坝中输水。本文着重对涵洞式鱼道内的水流流态、流速场及紊流场等研究进展进行阐述。

3.1 水流流态

Abbs等(2007)和Magura等(2007)对环形波纹钢管涵洞的研究表明,涵洞内水流结构关于中心线是高度对称的^[23-24]。Richmond等(2007)利用超声多普勒测速仪对螺旋形波纹钢管涵洞内的三维平均流速和紊流特性进行了测量和观察。研究发现,螺旋流模式贯通涵洞始终^[25];流量较大时,在螺旋波纹涵洞内出现近似均匀流区域,并且均匀流发展长度与Ead等^[26](2000)有关环形波纹涵洞的试验结果相吻合。在均匀流区域,涵洞中心线流速分布曲线与紊流充分发展区保持一致;摩擦系数与雷诺数无关,摩擦系数接近于Schlichting(1979)的理论分析结果^[27]。

3.2 流速场

在加拿大,涵洞式鱼道设计准则通常是基于获得设计条件下涵洞内特定的平均流速,且该流速不得超过当地鱼类物种的游泳能力^[28]。Barber和Downs(1996)研究指出,波纹涵洞过水断面的大部分区域水流流速低于平均流速,可能适合鱼类通行^[29]。Ead等(2000)等进行了环形波纹涵洞开敞式紊流流速场的试验研究。研究发现,波纹涵洞中波纹的粗糙度可以在边界附近产生足够的流速,即使涵洞内的平均流速超出了鱼类的游泳能力,鱼类仍然可以由此游向上游^[26]。嵌入式涵洞(将涵洞进口内底置于正常河床高程以下)和淹没式涵洞(涵洞在回水条件下运行)可以大大降低涵洞内的水流流速,显著增加涵洞内低于平均流速的过水断面面积,改善过鱼条件(Abbs等,2007)^[23]。Richmond等(2007)对螺旋形波纹涵洞进行了试验研究,发现从涵洞下游向上游观察时,涵洞左侧及中线的平均流速和均方根流速要高于涵洞右侧。在各种流量下,涵洞最右侧水流流速值约为涵洞中心区域流速值的36%。这是由于螺旋波纹倾向于主流轴线,在涵洞内形成的二次环流造成的。涵洞右上角区域流速较小,紊流强度较低,为鱼类通行提供了便利条件^[25]。Feurich等(2012)

采用计算流体动力学模型模拟环形涵洞,使诸如星系斑鱼这些小型鱼类的上溯通过率达到最大。研究证实,在涵洞中放置扰流板可以减小水流流速。扰流板的几何形状和排列方式取决于所通行鱼类的尺寸、游泳能力及对休息区的要求等。对于小型鱼类(体长小于 100 mm 的),标准扰流板尺寸(长度 0.25 m,宽度 0.12 m,高度 0.12 m)和分布(横向距离 0.12 m,纵向距离 0.2 m)适用于不同直径的涵洞。因而,不必随涵洞直径的增大而增加扰流板的尺寸^[30]。此外,通过数值分析得出无量纲流量 Q_* 与涵洞直径 D 和坡度 S_0 的关系式(12)以及无量纲流量与相对水深 y_0/D 的关系式(13)^[31]:

$$Q_* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0D^5}}; \quad (12)$$

$$Q_* = \alpha \left(\frac{y_0}{D} \right)^2 + \beta \left(\frac{y_0}{D} \right)。 \quad (13)$$

式中: α, β 为系数,随 h/D 的变化而调整; h 为挡板高度; y_0 为平均水深; Q 为流量。该结果与 Ead 等(2002)的试验结论完全吻合,从而为量化涵管粗糙度对流量的影响提供了有效途径。利用上述关系式可得到不同直径和坡度的涵洞,但当涵管粗糙度变化时($h/D < 0.1$ 时),修正系数 α 和 β 很必要的。

3.3 紊流场

鱼类经过池室时,如果水流紊动过大,将会使其迷失方向,体能消耗过快,从而无法顺利上溯^[32]。通常利用紊动能、紊流强度和紊流结构来描述紊流。

3.3.1 紊动能

紊动能反映了脉动流速振幅的特性。水流的紊动能(Turbulent Kinetic Energy,简称 TKE)可采用式(14)^[33]进行计算

$$TKE = \frac{\overline{u_i'^2}}{2}。 \quad (14)$$

式中: u_i' 表示沿水流横向和垂向的脉动流速(m/s),上横线代表时均值(Mathieu 和 Scott,2000)。

Smith 等(2006)指出,紊动能可用来预测某一栖息地鱼的密度,而基于平均流速进行预测是不可能的^[34]。Morrison 等(2009)通过试验发现:受相对粗糙度和包括弗汝德数在内的其它水力特性影响,紊动能值变化范围较大;放置斜堰式挡板和槽堰式挡板的 2 种涵洞中,中线垂向平均紊动能值非常接近;2 种涵洞内紊动能侧向分布形式差别不大^[35]。Hunt 等(2010)分析了环形波纹钢管涵洞内的二次环流及紊动能分布。研究发现,沿涵洞出现了各种不同强度和构造的二次环流模式。横断面内最大紊动能位置与顺水流向低流速区域的位置关系紧密;

涵洞进口附近紊动能显著大于流场充分发展区域的紊动能^[36]。

3.3.2 紊流强度

紊流强度表示某一方向流速平均脉动情况,紊流强度越大,表示紊流越激烈。Morrison(2009)提出涵洞内水流各向紊流强度 TI_i 可由式(15)^[35]计算

$$TI_i = \left(\overline{u_i'^2} \right)^{\frac{1}{2}}。 \quad (15)$$

Enders 等(2003)发现紊流强度会影响鱼类游泳的消耗^[37]。Enders 等^[38](2005)为研究紊流环境中脉动流速对太平洋幼鲑的影响,建立了太平洋幼鲑游泳消耗模型。试验表明,紊流强度的影响约占幼鲑游泳总消耗的 14%;随着水温、鱼体质量、平均流速和流速标准差的增加,幼鲑游泳总消耗量也在增加。

Smith 等(2005)利用幼年的虹鳟鱼进行试验研究,以查明紊流对鱼类栖息地选择的影响。研究发现,在一定平均流速范围内,鱼类乐于聚集在低紊流区域;鱼类常避开紊流强度较高的低流速区域;只有出现过大的平均流速时,鱼类才会占据高紊流区^[39]。

Abbs 等(2007)通过试验发现,涵洞边界附近紊流强度较高,而水流中心区域紊流强度较低^[23]。Richmond 等(2007)对螺旋形波纹钢管涵洞的试验研究表明,涵洞一侧有一区域流速低、紊流强度也低,可能适合鱼类通行^[25]。Morrison 等(2009)通过试验发现,放置斜堰式挡板和槽堰式挡板的 2 种涵洞中,紊流强度横向分布基本相同^[35]。Garner 等(2009)研究发现,最大紊流强度出现在涵洞进口过水断面的上角偏下游处;尽管这些区域的局部紊流强度值很高,当水流加速流入涵洞时,仍有一个很大的低紊流强度的中央核心区域;涵洞内底嵌入河床不会降低涵洞进口处的紊流强度峰值,但是在距离进口约一倍洞径以外,紊流强度有所减小^[40]。

3.3.3 紊流结构

涵洞内断面平均流速通常被看作是鱼类通行的限定条件,但是最新研究表明,水流的紊流结构对于鱼类通行的影响要大于流速的影响^[34]。紊流不仅会影响鱼类对栖息地的选择,还会影响鱼类的运动和游泳能力。

Yan 等(2011)对波纹钢管涵洞内水流的紊流结构进行了初步研究,指出随着水流沿涵洞长度方向推进,紊流强度及漩涡尺寸不断增大;较大的漩涡在涵洞进口处分散在过水断面的左上角和右上角区域,到流场充分发展区域(涵洞中部),漩涡逐渐集中于断面中心偏低区域。从流场充分发展区(涵洞中部)到涵

洞出口,漩涡尺寸和位置逐渐趋于稳定^[41]。

3.4 涵洞式鱼道辅助设计

FishXing 是一款用来帮助工程师、水文学家和鱼类生物学家评价和设计涵洞式鱼道的交互式软件。该软件能适应涵洞复杂的水力特性和鱼类行为的多样性。通过渐变流方程计算出各种涵洞的水面线形状、速度和相应于目标鱼种游泳能力的跳跃条件。2001 年,加利福尼亚交通和渔政部门利用 FishXing 设计,改建了 Little French Creek 鱼道,其过鱼效果良好^[42]。

4 其它形式鱼道水力特性研究进展

4.1 丹尼尔式鱼道

丹尼尔在 1908 年建成世界上第一座鱼道,取名为丹尼尔式鱼道。自 20 世纪 80 年代,广大学者通过物理模型试验对丹尼尔式鱼道的流量、水深、流速分布和紊流等进行了全面的研究。研究表明,丹尼尔式鱼道的垂向流速分布在鱼道底板附近较低,可供游泳能力较弱的鱼类使用;接近表面的流速较大,可供游泳能力较强的鱼类洄游。但是,鱼道内垂向流速随着水深的增加而增大,因而限制了丹尼尔式鱼道的高度^[43]。

4.2 组合式鱼道

黄明海等(2009)应用标准 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型对竖缝和潜孔组合式鱼道进口渠段紊动水流进行了三维数值模拟。计算分析了鱼道池室、竖缝和潜孔等部位的流量、自由水面、流速、涡量以及紊动能等水力学参数。计算结果表明:各池室内水面较为平缓,相邻池室经过导墙后水面变化较为明显,竖缝处产生明显跌水,各池室内最低水位均出现在竖缝下游附近;组合鱼道渠底平面流速分布较为均匀,接近水面水流弯曲较大;竖缝和潜孔流速较大,底部流速大于表面流速;竖缝和潜孔进口转角及两侧边壁涡量较大;竖缝、潜孔断面中部及其下游局部区域紊动能较大^[44]。

5 结 语

纵观国内外鱼道水力特性的研究现状,学者们主要关注鱼道内流速、水深、流量、消能率、紊流强度及紊动能等水力要素的研究。今后一段时间内,鱼道研究重心会逐渐转移到鱼道内紊流特性及数值模拟研究,尤其是紊流结构的研究。此外,不同形式鱼道内水力条件对鱼类通行的影响及改善措施亦将成为未来研究热点之一。

参考文献:

- [1] CLAY C H. Design of Fishways and Other Fish Facilities [M]. Ottawa: Department of Fisheries of Canada, 1995.
- [2] RAJARATNAM N, VAN DER VINNE G, KATOPODIS C. Hydraulics of Vertical Slot Fishways [J]. Hydraulic Engineering, 1986, 112(10): 909 - 927.
- [3] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, SOLANSKI S. New Designs for Vertical Slot Fishways [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19(3): 402 - 414.
- [4] PUERTAS J, PENA L, TEIJEIRO T. An Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways [J]. Hydraulic Engineering, 2004, 130(1): 10 - 23.
- [5] BERMUDEZ M, PUERTAS J, CEA L, *et al.* Influence of Pool Geometry on the Biological Efficiency of Vertical Slot Fishways [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1355 - 1364.
- [6] 董志勇,冯玉平,ERVINE A. 同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): 121 - 125. (DONG Zhi-yong, FENG Yu-ping, ERVINE A. An Experimental Study of Hydraulic Characteristics and Fish Test in Vertical Slot Fishway to One Side [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 121 - 125. (in Chinese))
- [7] 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. (XU Ti-bing, SUN Shuang-ke. Numerical Simulation of the Flow Structure in Vertical Slot Fishway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1386 - 1391. (in Chinese))
- [8] 罗小凤,李 嘉. 竖缝式鱼道结构及水力特性研究 [J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 50 - 54. (LUO Xiao-feng, LI Jia. Study on Structure and Hydraulic Characteristics of Vertical-Slot Fishway [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10): 50 - 54. (in Chinese))
- [9] 刘 东. 竖缝式鱼道水力特性研究 [D]. 武汉:长江科学院, 2010. (LIU Dong. Study of Hydraulic Characteristics of Vertical-Slot Fishway [D]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [10] PENA L, CEA L, PUERTAS J. Turbulent Flow: An Experimental Analysis in Vertical Slot Fishways [C] // IAHR. Proceedings of the 5th International Symposium on Ecohydraulics, Madrid, Spain, 12 - 17 September, 2004: 881 - 888.
- [11] 毛 熹,脱友才,安瑞冬,等. 结构变化对鱼道水力学特性的影响 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(3): 13 - 18. (MAO Xi, TUO You-cai, AN Rui-dong, *et al.* Influence of Structure on Hydraulic Characteristics of Fishway [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(3): 13 - 18. (in Chinese))
- [12] 包 莉,安瑞冬. 竖缝式鱼道的弯道布置与结构形式研究 [J]. 水电站设计, 2012, 28(3): 80 - 82. (BAO Li, AN Rui-dong. Research on the Layout and Structure of the Corners in the Vertical Slot Fishways [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2012, 28(3): 80 - 82. (in Chinese))
- [13] LIU M N, RAJARATNAM N, ZHU D Z. Mean Flow and Turbulent Structure in Vertical Fishways [J]. Hydraulic

- Engineering, ASCE, 2006, 132(8): 765–777.
- [14] 曹庆磊, 杨文俊, 陈辉. 异侧竖缝式鱼道水力特性试验研究[J]. 河海大学学报, 2010, 38(6): 698–703. (CAO Qing-lei, YANG Wen-jun, CHEN Hui. Experimental Study on Hydraulic Characteristics of Vertical Slot Fishway from Side to Side[J]. Journal of Hohai University, 2010, 38(6): 698–703. (in Chinese))
- [15] WU S, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Structure of Flow in Vertical Slot Fishway[J]. Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(4): 351–360.
- [16] ALVAREZ-VÁZQUEZ L J, MARTÍNEZ A, VÁZQUEZ-MÉNDEZ M E, *et al.* An Optimal Shape Problem Related to the Realistic Design of River Fishways[J]. Ecological Engineering, 2008, 32(4): 293–300.
- [17] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, MAINAL A. Plunging and Streaming Flows in Pool and Weir Fishway[J]. Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 939–944.
- [18] KIM J H. Hydraulic Characteristics by Weir Type in a Pool-Weir Fishway[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(3): 425–433.
- [19] EAD S A, KATOPODIS C, SIKORA G J, *et al.* Flow Regimes and Structure in Pool and Weir Fishways[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, 3(5): 379–390.
- [20] YAGCI O. Hydraulic Aspects of Pool-Weir Fishways as Ecologically Friendly Water Structure[J]. Ecological Engineering, 2009, 36(1): 36–46.
- [21] BELL M C. Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria[M]. Portland, Oregon: U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, 1973.
- [22] SILVA A T, SANTOS J M, FERREIRA M T, *et al.* Effects of Water Velocity and Turbulence on the Behavior of Iberian Barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an Experimental Pool-Type Fishway. River Research and Applications[J]. River Research and Applications, 2011, 27(3): 269–401.
- [23] ABBS T J. A Model Study of the Hydraulics Related to Fish Passage Through Backwatered Culverts[C]//Proceedings of the 18th CSCE Canadian Hydrotechnical Conference. Winnipeg, Manitoba, Canada, August 22–24, 2007.
- [24] MAGURA C R. Hydraulic Characteristics of Embedded Circular Culverts[D]. Winnipeg, Manitoba, Canada: Department of Civil Engineering, University of Manitoba, 2007.
- [25] RICHMOND M C, DENG Z Q, GUENSCH G R, *et al.* Mean Flow and Turbulence Characteristics of a Full-scale Spiral Corrugated Culvert with Implications for Fish Passage[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(4): 333–340.
- [26] EAD S A, RAJARATNAM N, KATOPODIS C, *et al.* Turbulent Open-Channel Flow in Circular Corrugated Culverts[J]. Hydraulic Engineering, 2000, 126(10): 750–757.
- [27] SCHLICHTING H. Boundary-Layer Theory (Seventh Edition)[M]. New York: McGraw-Hill, 1979.
- [28] BATES K. Design of Road Culverts for Fish Passage[M]. Olympia, Washington: Washington Department of Fisheries and Wildlife, 2003.
- [29] BARBER M E, DOWNS R C. Investigation of Culvert Hydraulics Related to Juvenile Fish Passage (Technical Report WA-RD 388.1)[M]. Olympia, Washington: Washington State Department of Transportation, 1996.
- [30] FEURICH R, BOUBÉE J, OLSEN N R B. Improvement of Fish Passage in Culverts Using CFD[J]. Ecological Engineering, 2012, 47: 1–8.
- [31] EAD S A, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Generalized Study of Hydraulics of Culvert Fishways[J]. Hydraulic Engineering, ASCE, 2002, 128(11): 1018–1023.
- [32] 曹庆磊, 杨文俊, 陈辉. 同侧竖缝式鱼道水力特性的数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(7): 26–30. (CAO Qing-lei, YANG Wen-jun, CHEN Hui. Numerical Simulation of Characteristics of Vertical Slot Fishway on Same One Side [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(7): 26–30. (in Chinese))
- [33] MATHIEU J, SCOTT J. An Introduction to Turbulent Flow [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2000.
- [34] SMITH D L, BRANNON E L, SHAFII B, *et al.* Use of the Average and Fluctuating Velocity Components for Estimation of Volitional Rainbow Trout Density[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2006, 135(2): 431–441.
- [35] MORRISON R R, HOTCHKISS R H, STONE M, *et al.* Turbulence Characteristics of Flow in a Spiral Corrugated Culvert Fitted with Baffles and Implications for Fish Passage[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 381–392.
- [36] HUNT M, CLARK S, KEHLER N. A Model Study of the Hydraulics Related to Fish Passage in a CSP Culvert with a Vertical Headwall[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Ecohydraulics, Seoul, Korea, September 12–16, 2010.
- [37] ENDERS E C, BOISCLAIR D, ROY A G. The Effect of Turbulence on the Cost of Swimming for Juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar*) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, 60(9): 1149–1160.
- [38] ENDERS E C, BOISCLAIR D, ROY A G. A Model of Total Swimming Costs in Turbulent Flow for Juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar*) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005, 62(5): 1079–1089.
- [39] SMITH D L, BRANNON E L, ODEH M. Response of Juvenile Rainbow Trout to Turbulence Produced by Prismatic Shapes[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2005, 134: 741–753.
- [40] GARNER M E, KELLS J A, KATOPODIS C. A Model Study of the Hydraulics Related to Fish Passage Through Embedded Culverts[C]//Proceedings of the Joint Conference of IAHR, ASCE and CSCE, Vancouver, August 9–14, 2009.
- [41] YAN B, KELLS J A, SPARLING B F, *et al.* Turbulence Characteristics of the Flow in a Corrugated Steel Pipe Culvert in the Context of Fish Passage[C]//Proceedings of the 20th Canadian Hydrotechnical Conference, Ottawa, Canada, June 14–17, 2011.
- [42] 许晓蓉, 刘德富, 汪红波, 等. 涵洞式鱼道设计现状与展

望[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(4):44-63. (XU Xi-ao-rong, LIU De-fu, WANG Hong-bo, et al. Culvert Fishway Design: Status and Prospects[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 44-63. (in Chinese))

[43] KATOPODIS C, WILLIAMS J G. The Development of Fish Passage Research in a Historical Context[J]. Ecological Engineering, 2012, 48:8-18.

[44] 黄明海,周 赤,张亚利,等. 竖缝-潜孔组合式鱼道进鱼口渠段三维紊流数值模拟研究[C]//水力学与水利

信息学大会,中国西安,2009年10月10-12日,2009:212-218. (HUANG Ming-hai, ZHOU Chi, ZHANG Ya-li, et al. Three-dimensional Turbulent Numerical Simulation of the Entrance Segment in the Vertical Slot-DTH Joint Fishway[C]//Proceedings of the Conference of Hydraulics and Water Information Advances, Xi'an, October 10-12, 2009: 212-218. (in Chinese))

(编辑:刘运飞)

Research Progress of Fishway's Hydraulic Characteristics in China and Abroad

YAN Bin, WANG Tie-liang, LIU Tong-bo

(School of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The research progress of the hydraulic characteristics of vertical slot fishway, pool-weir fishway, culvert fishway, Denil fishway and combination fishway in China and abroad were reviewed. The flow pattern, characteristics of velocity field, relationship between discharge and water depth, turbulence characteristics, and energy dissipation rate of various fishways were compared and analyzed respectively. The linear relationship between dimensionless discharge and relative water depth in vertical slot fishway was summarized, and the formula expressing the relationship between discharge and water depth in pool-weir fishway was listed. It was pointed out that turbulent kinetic energy, turbulent intensity and turbulence structure would have great impact on the hydraulic characteristics of fishways, the habitat selection and the passage of fish. The research hotspot of fishways is expected to be focused on turbulence characteristics and numerical simulations, especially on the study of turbulence structure. In addition, the influence of hydraulic condition within the fishways on fish passage and its improvements will also be one of the research hotspots in the near future.

Key words: fishway; hydraulic characteristics; vertical slot type; pool-weir type; culvert type

~~~~~  
(上接第 30 页)

## Investigation and Application of Risk Pre-warning Assessment System for 2-D Urban Flood and Drainage Area Flood

XIE Fang

(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** Prediction and pre-warning of urban flood is of great importance to secure the normal operation of a city. In order to efficiently improve the ability of risk pre-warning assessment for urban flood, it is necessary to utilize the advanced method and technique from overseas. The risk pre-warning assessment ability system for 2-D urban flood and flood situation of drainage area (FRMFS) which was introduced into Zhejiang province was at advanced international level. In line with the actual situation of China, this technique was absorbed, assimilated and redeveloped. It's applicability for towns, mid-sized and small cities are verified from the aspects of data acquisition, prediction model, and results display. The achievement of some real cases indicates that this system can efficiently improve the ability of risk pre-warning assessment for urban flood.

**Key words:** urban flood; risk pre-warning; forecast assessment; introduction and development