

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221483

竖缝式鱼道 180°转弯段水力特性与结构优化研究

杨超^{a,b}, 谭均军^{a,b}, 刘振彪^{a,b}, 王渊洋^{a,b}, 石小涛^{a,b}

(三峡大学 a. 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地; b. 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对目前鱼道 180°转弯段存在水流条件差、影响鱼类上溯的问题,通过延长转弯段上下游长度并增设整流导板来改善水流条件。结合国内某竖缝式鱼道工程设计,采用数值模拟的方法研究了四种转弯段结构水流流态、流速、紊动能和紊动耗散率分布问题。结果表明,延长转弯段上下游长度的同时增设整流导板可有效引导主流居中,维持主流稳定,避免转弯段内产生大尺度回流区,具有良好的上溯条件。研究结果可为鱼道工程改造和设计提供参考。

关键词: 竖缝式鱼道; 180°转弯段; 数值模拟; 水力特性; 结构优化

中图分类号: TV135

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0141-05

1 引言

鱼道工程是帮助鱼类本能过坝上溯的重要工程措施^[1],其中竖缝式鱼道因其结构简单、过鱼效果较好,广受欢迎^[2]。实际工程中受到进出口位置和地形地质条件的限制,鱼道需设置转弯段,其中 180°转弯段最具代表性;转弯段可通过偏转水流来消能,为鱼类提供休息空间,但易造成主流贴壁和大尺度回流区,影响鱼类上溯^[3,4]。目前,关于鱼道转弯段水力特性的研究成果较丰富,其中增设整流导板对于改善转弯段水流条件亦有显著成效,但是当前国内结合实际鱼道工程对 180°转弯段进行结构优化的研究仍较少,且少有考虑 180°转弯段上下游长度的影响。本文将结合国内某电站鱼道工程设计,采用数值模拟方法对四种 180°转弯段结构水流流态、紊动能、紊动耗散率和回流区分布及尺度问题进行对比研究,提出延长转弯段上下游长度并增设整流导板的优化方案。旨在改善该鱼道转弯段水流条件,提高过鱼效率,并为鱼道工程优化和设计提供参考。

2 模型建立和验证

2.1 模型建立

采用三维数值模拟的方法对四种 180°转弯段结构型式进行计算,鱼道作为典型的自由液面模型,基于 FLOW-3D 特有的 TurVOF 计算技术,能够更精确捕捉自由液面,可不求解气体控制方程^[5],因此数值模拟计算采用 FLOW-3D 软件进行,采用 RNG κ - ϵ 湍流模型进行计算^[5],模型参数为常规设置^[5]。

2.2 模型验证

在正式计算前,首先验证采用 BOMBAË M 等^[6]的试验成果验证数值模型参数的设置,对比计算流速分布和试验流速分布,结果表明两者变化趋势基本相同,说明数值模型参数设置合理。

3 四种转弯段结构型式

构建 180°转弯段结构包括转弯段上游段、转弯段和转弯段下游段,为保证转弯段池室内水流均匀,不受进、出口边界条件影响,在其上、下游段各设置 3 个常规池室^[7],进口段长 0.5L,出口段长 3.0L^[6]。鱼道采用单竖缝式结构,每个常规池室长度 $L = 3.2$ m,宽度 $B = 2.5$ m,坡降 $J_1 = 1.5\%$,竖缝宽度 $b = 0.4$ m,导向角度为 45°,隔板长 1.681 m,导板长 0.625 m。转弯段池室外轮

收稿日期: 2022-07-18, 修回日期: 2022-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179070);国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51922065);湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地开放基金课题(HIBF-2020007)

作者简介: 杨超(1998-),男,硕士研究生,研究方向为生态水力学,E-mail: yangchao19981120@163.com

通讯作者: 谭均军(1985-),女,博士、副教授、硕导,研究方向为生态水力学,E-mail: tanjunjun52@163.com

廓为圆弧形,圆弧半径 $R = 2.75 \text{ m}$,平坡布置 ($J_2 = 0$)。鱼道计算模型结构见图 1,常规池室细部结构见图 2。

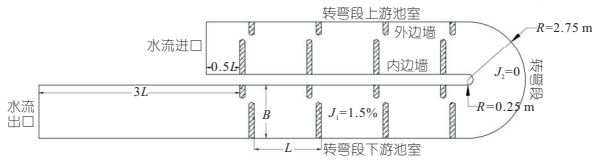


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Sketch map of calculation model

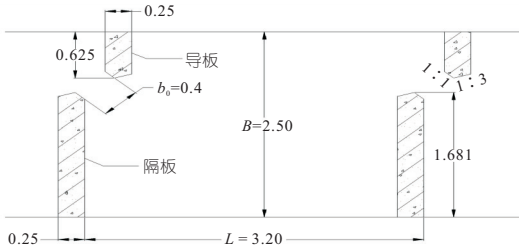


图 2 常规池室细部结构(单位:m)

Fig. 2 Detail structure of regular pool

为改善原鱼道转弯段池室存在的不良流态,设计了三种延长转弯段上下游长度并增设整流导板的方案。结构 1 为原鱼道转弯段池室细部结构图。结构 2 中拆掉转弯段上游隔板和导板,并在原有隔板处设置整流导板 P_1 ($P_1 = 0.4B$)。结构 3 中拆掉转弯段上游隔板和导板,并在原有隔板处设置整流导板 P_2 ($P_2 = 0.4B$),在弯段外边墙 1/4、3/4 处设置整流导板 P_3 、 P_4 ($P_3 = P_4 = 0.3B$)。结构 4 中拆掉转弯段上、下游隔板和导板,在上游隔板处设置整流导板 P_5 ($P_5 = 0.4B$),在弯段外边墙 1/4、3/4 处设置整流导板 P_6 和 P_8 ($P_6 = P_8 = 0.3B$),在下游导板处设置整流导板 P_7 ($P_7 = 0.25B$),在弯段与上下游段交界处设置整流导板 P_9 ($P_9 = 0.3B$)。整流导板的墩头均采用圆弧形,具体布置情况见图 3。

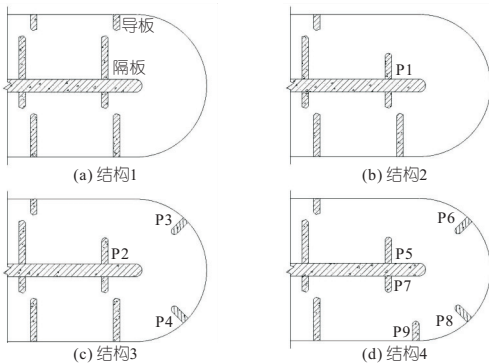


图 3 四种转弯段结构布置(单位:m)

Fig. 3 Four kinds of structural layout of turning pool

4 计算结果与分析

4.1 流态分布

坡度较小 ($j < 5\%$) 的竖缝式鱼道内流场呈二维分布,不同水深断面水流结构具有相似性^[4],同时该鱼道主要过鱼对象为底栖和中底层生活的鱼类,因此选取距池室底部 $h = 0.5 \text{ m}$ 的平面作为典型断面,四种转弯段结构型式流态分布见图 4。

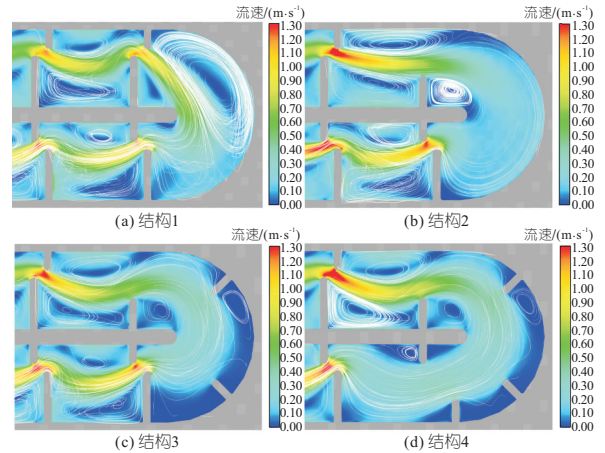


图 4 四种转弯段结构流态分布

Fig. 4 Flow distributions of four turning pools

如图 4 所示,结构 1 中水流在进入转弯段后向内侧偏转,沿竖缝形成主流,由于转弯段池室未设置整流导板,主流在转弯段内充分扩散,并产生尺度过大的回流区。结构 2 中弯段上游主流居中,主流经导板 P_1 流向弯段外边墙,由于外边墙未设置整流导板,主流出现贴壁情况,弯段内侧回流区较小。结构 3 中水流通过上游竖缝后向内侧偏转,在导板 P_1 、 P_2 作用下,主流转向弯段中央,再经导板 P_3 引流至下游竖缝处,主流基本居中,回流区位于主流区两侧。结构 4 中水流经过导板 P_4 、 P_5 ,主流转向弯段中央,在导板 P_6 、 P_7 的约束下,主流向外边墙偏转,再经导板 P_8 的引流,主流转向弯段下游中央,主流区基本位于整个转弯段中部,回流区数量较结构 3 更多,回流区水流条件良好。同时结构 2、3、4 中弯段上游水流流态与常规池室相当,鱼类容易感知主流方向并上溯。

流场模拟结果表明,通过延长转弯段上下游长度并增设整流导板,主流基本居中,主流两侧回流区水流条件良好,避免了大尺度回流区的产生,有助于水流在 180° 转弯段中平顺过渡,同时提供良好的鱼类休憩空间。

4.2 流速分布

4.2.1 主流区流速分布

明显的主流区有助于洄游鱼类上溯时充分感知主流方向,且主流流速不宜过大。为研究主流区流速沿程分布及变化情况,在典型断面上,转弯段上游从转弯段圆心处向水流进口方向每间隔

0.3 m 选取测线,分别计为测线 1~15。转弯段自测线 15 起,由转弯段圆心沿着水流方向每隔 15°选取测线,分别记为测线 15~27。转弯段下游从测线 27 沿水流方向每隔 15°选取测线,分别记为测线 27~41。从数值计算结果中提取每条测线上主流位置最大流速值。转弯段主流区测线分布见图 5。

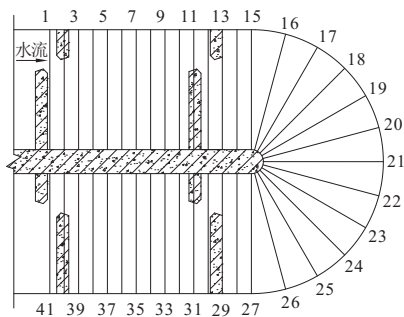


图 5 转弯段主流区测线分布(单位:m/s)

Fig. 5 Distribution of lines in the mainstream of four turning pools

为方便四种转弯段结构的主流流速的对比分析,将流速测线按照 1~41 编号,每条测线对应一个测点,以编号作为横坐标,以主流区最大流速值作为纵坐标,绘制四种转弯段结构从转弯段上游到转弯段下游的主流区最大流速沿程变化曲线,见图 6。

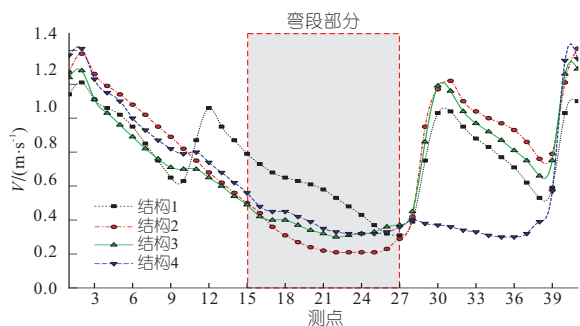


图 6 四种转弯段结构主流流速沿程变化曲线

Fig. 6 Variation curve of flow velocity along the mainstream of four turning pools

如图 6 所示,结构 1 中从转弯段上游至转弯段下游(测点 12~30)流速沿程分布呈现先减小后增大的趋势,在转弯段位置主流流速沿程衰减明显,最大流速衰减为 67.4%,但转弯段内水流充分扩散,主流末端(测线 27 处)最大流速与大尺度回流区流速相近,可能导致鱼类误入其中迷失方向。结构 2 中主流流速衰减明显,最大流速衰减达到 84.8%,但弯段内(测点 15~27)部分主流区流速甚低,小于部分过鱼对象的感应流速(0.06~0.26 m/s),不利于鱼类上溯。结构 3 中主流流速沿程衰减明显,最大流速衰减为 76.6%,从

测点 2~15,流速衰减达半数以上,弯段内主流最大流速整体较低,流速值为 0.3~0.5 m/s,满足过鱼对象的感应流速,在接近下游竖缝处流速增大。结构 4 中主流流速沿程变化整体呈现先减小后增大的趋势,流速沿程衰减明显,最大流速衰减可达 78.7%,弯段及弯段下游内主流流速值为 0.3~0.6 m/s,有利于鱼类感应主流方向并完成上溯。竖缝处最大流速较结构 3 中有所增大,最大增大至 1.41 m/s,该鱼道竖缝处流速主要参考过鱼对象的突进游泳速度(0.92~1.64 m/s),可见竖缝处流速亦符合过鱼要求。

主流区流速分布统计结果表明,通过延长转弯段上下游长度并增设整流导板,主流区基本居中,沿程变化平缓,主流区大范围内流速值有所降低,主流流速衰减变化较明显,有利于鱼类感知流速梯度变化,找到上溯方向^[8],并完成上溯。

4.2.2 回流区流速分布

由于该鱼道坡度较缓且未设置休息池,转弯段内须有合适的回流区以供上溯鱼类休憩。研究表明,鱼类在上溯过程中多利用低流速区域(0.20~0.40 m/s)^[9],因此回流区的流速和面积大小直接关系到鱼类是否可以在鱼道得到足够休息空间,但大尺度回流区会造成鱼类迷失方向,所以回流区需满足较低的流速、合适的尺度和足够的面积。

由于回流区体型的不规则性,测量回流区的长度和宽度,并选用长宽之积来表示回流区的面积,选用长宽比来衡量回流区形状的差异^[4]。回流区的长度记为 C ,宽度记为 K ,并将回流区的长度和宽度无量纲化以方便四种鱼道转弯段结构对比分析,即 C/B 和 K/B 。四种转弯段结构回流区分布及统计情况见表 1、图 7。

表 1 四种转弯段结构流场分布情况
Tab. 1 Comparison of flow distributions

转弯段结构	主流位置	回流区	
		数量	位置
1	中部靠内侧	2	弯段内侧 弯段外侧
2	弯段内主流贴壁	3	弯段上游内侧 弯段上游外侧 弯段内侧
3	基本居中	4	弯段上游内侧 弯段上游外侧 弯段内侧 弯段外侧
4	基本居中	5	弯段上游内侧 弯段上游外侧 弯段内侧 弯段外侧 弯段下游内侧

回流区数量上,结构 2、3、4 中回流区数量由

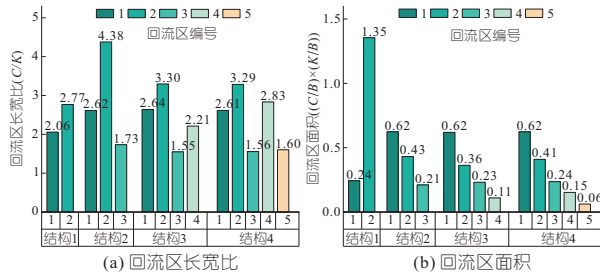


图 7 回流区长宽比(C/K)与面积((C/B)×(K/B))统计
Fig. 7 Length-width ratio (C/K) and area ((C/B)×(K/B)) statistics of recirculation zone

原来的 2 个分别增加至 3、4、5 个；回流区尺度上，结构 1 中最大的回流区面积((C/B)×(K/B))约为 1.35，长宽比(C/K)为 2.06、2.77，结构 2 回流区面积均小于 0.7，长宽比为 1.73~4.38；结构 3 中回流区面积均小于 0.7，长宽比为 1.55~3.30；结构 4 中回流区面积均小于 0.7，长宽比为 1.56~3.29，大尺度回流区面积由原来的 1.35 减小至 0.62，长宽比增大至 4.38、3.30、3.29，其中弯段上游回流区尺度与常规池室((C/B)×(K/B))=0.60，C/K=2.20 和 (C/B)×(K/B)=0.18，C/K=3.50 相当，结构 3、4 中弯段内回流区面积明显减小，长宽比合适，低流速区范围明显增大；回流区流速上，结构 2、3、4 中弯段上游回流区的回流速度与常规池室相当，弯段内侧回流区流速较结构 1 中明显减小，结构 3、4 中弯段外侧回流区流速甚小，结构 4 中弯段下游回流区流速较小，处于低流速区。

回流区统计结果表明，通过延长转弯段上下游长度并增设整流导板，回流区的数量增多，弯段下游回流区流速较低，弯段内回流区面积和流速明显减小，低流速区范围明显增大，回流区形状较扁平，适合鱼类休憩，同时减小鱼类被困的风险，弯段上游流态与常规池室相当，鱼类容易感知主流流向，并沿主流上溯。

4.3 紊动能、紊动耗散率分布

鱼类顺利通过鱼道上溯除了需要良好的水流流态，紊动能也要符合鱼类运动特性^[10]。高紊动能水流可能会对鱼体造成伤害，鱼类更倾向于在低紊动区和低紊动耗散率区域游动^[11]。因此，结合紊动能和紊动耗散率大小及空间分布进行分析是必要的。紊动能和紊动耗散率模拟结果见图 8。

由图 8 可知，较高紊动能和较大紊动耗散率多产生在竖缝处、主流区前段处及导板与水的接触面处，最大紊动能和最大紊动耗散率均产生于竖缝处。

从紊动能角度来看，结构 1 中转弯段内主流

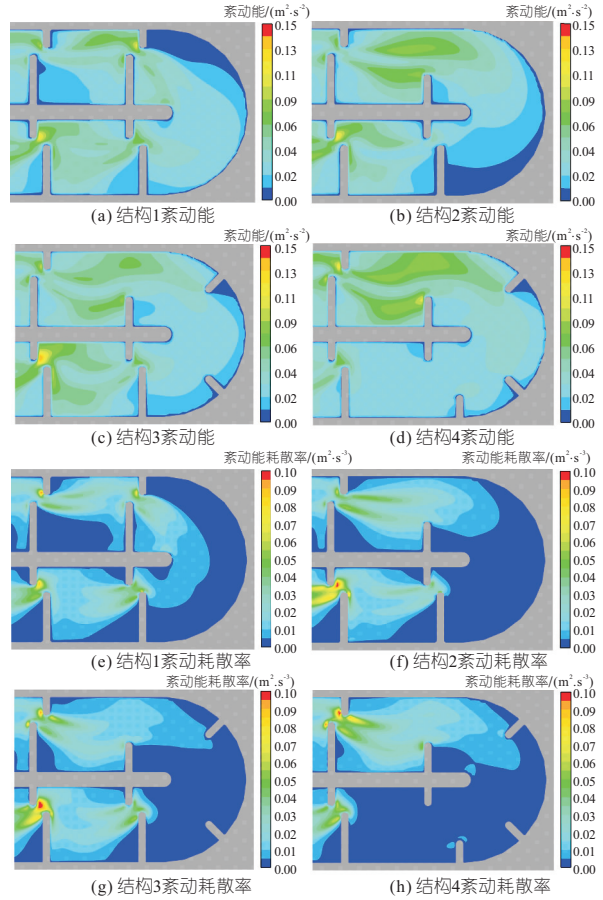


图 8 四种转弯段结构紊动能及紊动耗散率分布
Fig. 8 Turbulent kinetic energy and turbulence dissipation rate distributions of four turning pools

区前段及内侧回流区紊动能变化剧烈，内侧回流区紊动能值在 0.05 m²/s² 左右，主流外侧回流区紊动能值小于 0.05 m²/s²，符合低紊区的要求^[9]。结构 2 中弯段上游回流区紊动能值较结构 1 中有所增大，弯段内紊动能值普遍低于 0.05 m²/s²。结构 3 中弯段上游主流区和外侧回流区紊动能值与常规池室相当，弯段上游内侧回流区紊动能值稍有增大，弯段内紊动能值均低于 0.05 m²/s²。结构 4 中弯段上游内紊动能值较结构 3 中有所增大，但普遍低于 0.1 m²/s²，考虑到弯段上游流态与常规池室相当，故对鱼类上溯影响有限，弯段与弯段下游回流区均处于低紊动区。

从紊动耗散率角度来看，结构 1 中弯段上下游竖缝处紊动耗散率变化比较剧烈，主流区紊动耗散率比回流区紊动耗散率稍大，但远低于常规池室的一般要求(<0.15 m²/s³)，回流区紊动耗散率基本处于 0.02 m²/s³ 以下，满足休息池的要求(<0.02~0.05 m²/s³)^[12]。结构 2 中弯段上游内紊动耗散率稍有增大，弯段内紊动耗散率基本低于 0.02 m²/s³。结构 3 中弯段上下游竖缝处及主流区紊动耗散率较结构 1 中有所增大，主流区紊动耗散率依然满足低紊动耗散率要求，回流

区普遍处于低紊动耗散率区域。结构 2、3 中转弯段下游池室竖缝处紊动耗散率较结构 1 中明显增大。结构 4 中弯段上游内紊动耗散率及其影响区域面积较结构 3 中有所增大,但仍然满足低紊动耗散率要求,弯段与弯段下游区域均属于低紊动耗散率区域。

紊动能和紊动耗散率模拟结果表明,延长转弯段上下游长度并增设整流导板一定程度上会造成弯段上游紊动能和紊动耗散率的增大,但并不会对鱼类的上溯构成威胁,弯段与弯段下游区域紊动能和紊动耗散率空间分布合理,有利于鱼类上溯和休憩。

5 结论

a. 通过延长转弯段上下游长度并增设整流导板,水流流态得到较大改善,主流区基本居中,主流整体稳定,沿程流速衰减较明显,回流区数量增多,回流区尺度合理,弯段上游回流流速与常规池室相当,弯段与弯段下游回流区流速甚小,低流速范围明显增大,有利于鱼类上溯和休憩。

b. 延长转弯段上下游长度并增设整流导板在一定程度上会增大转弯段上游及竖缝处紊动能和紊动耗散率,但主流区紊动能多小于 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$,紊动耗散率远小于 $0.15 \text{ m}^2/\text{s}^3$,弯段上游回流区紊动能有所增大,但对鱼类上溯影响有限,其他回流区均处于低紊区和低紊动耗散率区域,紊动能和紊动耗散率空间分布较合理。

参考文献:

[1] 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等.我国鱼道的建设现状与展望[J].水利学报,2012,43(2):182-188,197.
[2] 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.

[3] MARRINER B A, BAKI A, ZHUD Z, et al. Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway[J]. Ecological engineering, 2014,63:88-101.
[4] 边永欢,孙双科,郑铁刚,等.竖缝式鱼道 180°转弯段的水力特性与改进研究[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(1):90-96.
[5] 杨培思,蔡德所,莫崇勋.基于 FLOW-3 D 的竖缝式鱼道水力特性研究[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(4):1675-1683.
[6] BOMBAĚ M, NOVAK G, MLAĚNIK J, et al. Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations[J]. Ecological engineering, 2015,84:476-484.
[7] 李明泉,蔡德所,杨培思,等.竖缝式鱼道 180°转弯段水力特性研究[J].广西大学学报(自然科学版),2021,46(6):1488-1495.
[8] LI GUANGNING, SUN SHUANGKE, ZHANG CHAO, et al. Evaluation of flow patterns in vertical slot fishways with different slot positions based on a comparison passage experiment for juvenile grass carp[J]. Ecological engineering, 2019, 133: 148-159.
[9] SANTOS J M, SILVA A, KATOPODIS C, et al. Ecohydraulics of pool-type fishways: Getting past the barriers[J]. Ecological engineering, 2012, 48: 38-50.
[10] 谭均军,高柱,戴会超,等.竖缝式鱼道水力特性与鱼类运动特性相关性分析[J].水利学报,2017,48(8):924-932,944.
[11] 王晓刚,李云,何飞飞,等.竖缝式鱼道休息池水动力特性研究[J].水利水运工程学报,2020(1):40-50.
[12] FAO, FISHERY RESOURCES DIV. GERMAN ASSOCIATION FOR WATER RESOURCES AND LAND IMPROVEMENT. Fish passes: design, dimensions, and monitoring[Z]. FAO, 2002.

Study on Hydraulic Characteristic and Structural Optimization of Flow in 180° Turning Pools for Vertical Slot Fishways

YANG Chao^{a,b}, TAN Jun-jun^{a,b}, LIU Zhen-biao^{a,b}, WANG Yuan-yang^{a,b}, SHI Xiao-tao^{a,b}

(a. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage;

b. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In view of the problem that the current 180° turning pool of the fishway has poor flow condition and affects the fish's upward tracing, the water flow condition was improved by extending the length of the upstream and downstream of the turning section and adding the staggered guide plate. Based on the study of a certain vertical slot fishway, numerical simulation was used to research on the distribution of flow regime, velocity, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate of four turning pool structures. The results indicate that extending the length of the upstream and downstream of the turning section and adding the staggered guide plate can effectively guide the mainstream to center, maintain the stability of the mainstream and avoid the formation of a large-scale recirculation zone, and it is beneficial to migratory fish. The results of this study can provide reference for the reconstruction and design of fishway.

Key words: vertical slot fishway; 180° turning pool; numerical simulation; hydraulic characteristic; structural optimization