

Numerical Simulation on Flow Field of Vertical Slot Fishway with Plancon

Mengqi Tian, Huiling Wu, Wenjie Ren, Junyu Zhou, Sifang Feng, Xi Mao*

College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an Sichuan
Email: 610350391@qq.com, *maowhiteknight@163.com

Received: Aug. 14th, 2017; accepted: Aug. 29th, 2017; published: Sep. 6th, 2017

Abstract

This thesis is to make two dimensions numerical simulation on flow field of vertical slot fishway by standard k- ϵ turbulence model. The study is divided into three kinds of condition, that is, without plancon, with plancon, changing plancon's position. The numerical simulation of flow field in these three cases is carried out, and the results of physical model test are compared and verified. The results indicate: adding the plancon to the mainstream path of vertical slot fishway can slow down the velocity in pool of fishway to a certain degree.

Keywords

Vertical Slot Fishway, Numerical Simulation, Flow Field

竖缝式鱼道内部流场受加墩影响的数值模拟研究

田梦琦, 武慧铃, 任文杰, 周俊宇, 冯思芳, 毛 熹*

四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安
Email: 610350391@qq.com, *maowhiteknight@163.com

收稿日期: 2017年8月14日; 录用日期: 2017年8月29日; 发布日期: 2017年9月6日

摘 要

采用标准k- ϵ 湍流模型对竖缝式鱼道内部受加墩影响的流场进行二维数值模拟研究。研究的情况分为三种, 即不加墩、加墩、改变墩位置, 对这三种情况的流场进行数值模拟计算, 并应用物理模型试验成果进行

*通讯作者。

文章引用: 田梦琦, 武慧铃, 任文杰, 周俊宇, 冯思芳, 毛熹. 竖缝式鱼道内部流场受加墩影响的数值模拟研究[J]. 土木工程, 2017, 6(5): 459-466. DOI: 10.12677/hjce.2017.65055

对比验证。结果表明：在竖缝式鱼道的主流路径处加墩，可以在一定程度上降低鱼池的流速。

关键词

竖缝式鱼道，数值模拟，流场

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

竖缝式鱼道是指水槽大部分被挡板拦截仅留一条竖缝过鱼的鱼道，其消能效果较充分且能适应水位较大幅度变化。目前，竖缝式鱼道应用广泛，如，北京上庄新闸鱼道[1]，老龙口水利枢纽工程鱼道[2]，西藏狮泉河鱼道等。虽然竖缝式鱼道应用广泛，但存在竖缝附近流速相对较大，不适合我国鱼类游泳能力的问题。

目前国内对竖缝式鱼道的研究日益增多，曹庆磊等分别采用标准 k-ε 湍流模型和 RSM 湍流模型对同侧竖缝式鱼道池室内的水流进行数值模拟研究[3]，郭维东等人对不同的相对竖缝宽度在同侧竖缝式鱼道水流流态产生的影响进行数值模拟研究[4]，诸韬等人对双侧竖缝式鱼道的水力特性进行三维数值模拟研究[5]，罗小凤等人对竖缝式鱼道导板的长度及导角大小在鱼道内流场产生的影响进行数值模拟研究[6]，毛熹等人通过模型实验提出了一种鱼道优化的新结构[7]，毛熹等人采用标准 k-ε 湍流模型对竖缝式鱼道的底孔、坡度在鱼道内流速、流态产生的影响进行数值模拟研究[8]。

本文以竖缝式鱼道为研究对象，采用标准 k-ε 湍流模型进行数值模拟，研究加墩对水流流态的影响，并利用物理模型试验成果对数值模拟的结果进行验证。

2. 数学模型

数值模拟主要通过 ANSYS 软件进行，并简化为二维模型计算。

2.1. 控制方程

采用标准 k-ε 湍流模型进行数值模拟，该模型的主要控制方程由连续方程、动量方程和 k-ε 方程组成。

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k-ε 方程：

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中:

$$\mu_t = \rho C_{2\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: ρ 为水体密度, 视为常数, 1000 kg/m^3 ; p 为时均压强, Pa; μ 和 μ_t 分别表示水的分子粘性系数和紊动涡粘系数, m^2/s ; k 为紊动能, m^2/s^2 ; ε 为紊动耗散率, m^2/s^3 ; G 为紊动能产生项。 σ_k 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 均为经验常数常数项, 该模型中取 $\sigma_k = 1.0$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。

2.2. 求解方法、边界条件和划分网格

采用控制体积法对偏微分方程组进行离散, 压力和速度的耦合采用 SIMPEL 法。计算模拟的进口条件采用速度进口, 以试验资料的平均流速作为进口流速, 出流采用自由出流, 其它为固壁边界, 初始流场静止。

网格划分采用以四边形为主的结构化网格(见图 1)。时间步长取决于网格的尺寸和流速大小, 本文中时间步长取 0.002 s 。

3. 数值模拟

根据上述方法建立数学模型, 对流量为 0.263 L/s 的相同工况下, 三种不同结构型式的竖缝式鱼道进行了数值计算(见表 1)。

鱼道共有 4 级池室, 如图 2 所示, 为便于和物理模型试验结果比较, 都选取第 3 级鱼道池室的结果进行比较。

3.1. 结构型式 1 的数值计算

鱼道池室长 2.4 m , 宽 2.0 m , 高 3.2 m 。鱼道池室的具体结构尺寸, 如图 3 所示, 以下结构型式 2 和结构型式 3 的尺寸与 1 相同。

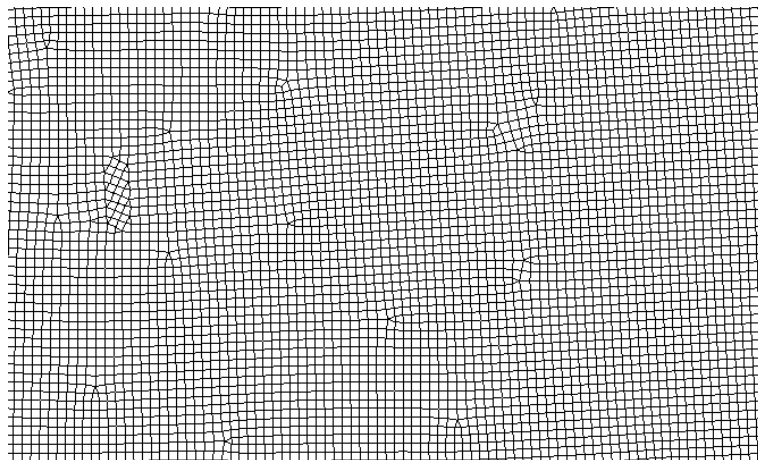


Figure 1. Sketch of local meshes

图 1. 局部网格示意图

Table 1. Numerical simulation of three different kinds of structure
表 1. 数值模拟的三种结构型式

| 工况 | 结构型式 |
|--------------|--------------------------------------|
| 流量 0.263 L/s | 1 原始竖缝式鱼道, 结构型式不做改变 |
| | 2 在距离竖缝处 0.3 m 处加一个 0.3 m × 0.3 m 的墩 |
| | 3 在距离竖缝处 0.6 m 处加一个 0.3 m × 0.3 m 的墩 |

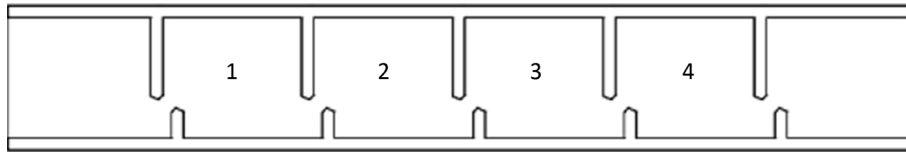


Figure 2. The planar graph of fishway model
图 2. 鱼道模型整体平面图

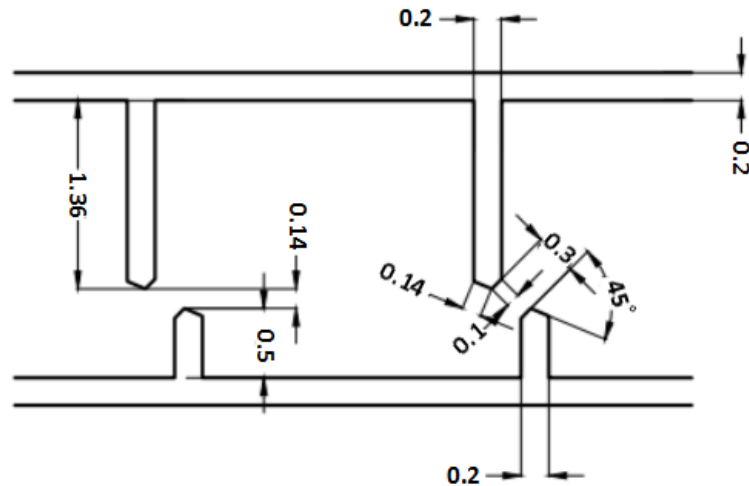


Figure 3. The pool diagram of structure 1 (unit: m)
图 3. 结构型式 1 的鱼道池室图(单位: 米)

对 $Z = 0.072$ m 高度的流场进行数值模拟, 可以从图 4 中看出, 主流流经竖缝后形成射流, 并在主流两侧形成两个比较明显的回流区, 回流区的流速很小。鱼道池室内的最大流速为 $V_1 = 1.05$ m/s, 平均流速为 $V_{1,av} = 0.80$ m/s, 可以看出最大流速在竖缝处。

3.2. 结构型式 2 的数值计算

结构型式 2、3 是在结构型式 1 的基础上添加墩, 结构型式 2 和结构型式 3 的区别在于墩的位置不同。添加墩后的平面图如图 5 所示。

在结构型式 2 中, 墩与竖缝处的距离为 0.3 m, 具体结构如图 6 所示。

对 $Z = 0.072$ m 高度的流场进行数值模拟, 可以从图 7 中看出, 在墩的分流消能作用下, 竖缝处及鱼池内的流速减小, 竖缝处的最大流速为 $V_2 = 0.90$ m/s, 平均流速为 $V_{2,av} = 0.46$ m/s。主流也被墩分为两条, 上面一条路径较长, 下面一条路径较短。

3.3. 结构型式 3 的数值计算

结构型式 3 的平面图如图 8 所示, 墩与竖缝处的距离为 0.6 m。

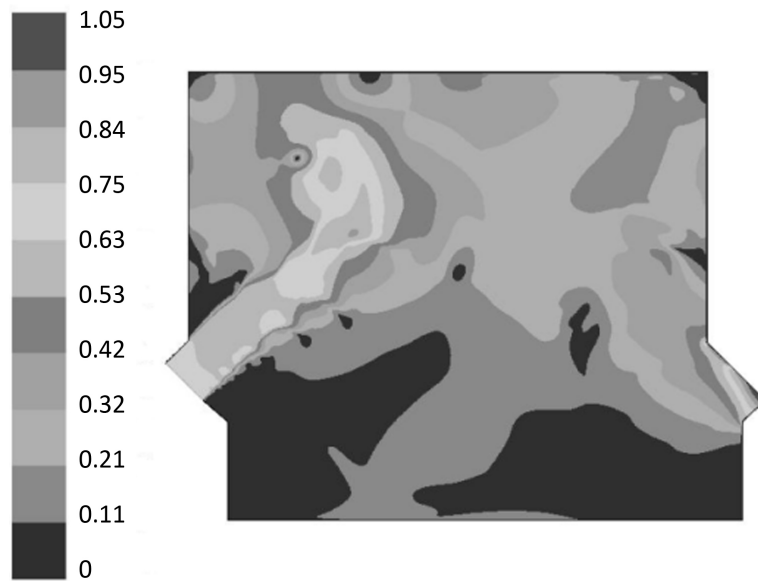


Figure 4. The numerical simulation result of structure 1
图 4. 结构型式 1 的数值模拟结果

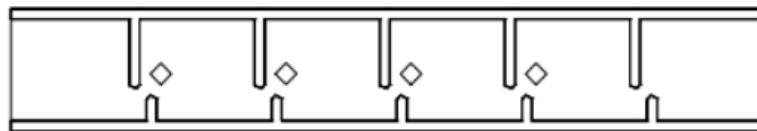


Figure 5. The planar graph of fishway model with plancon
图 5. 添加墩后的鱼道模型平面图

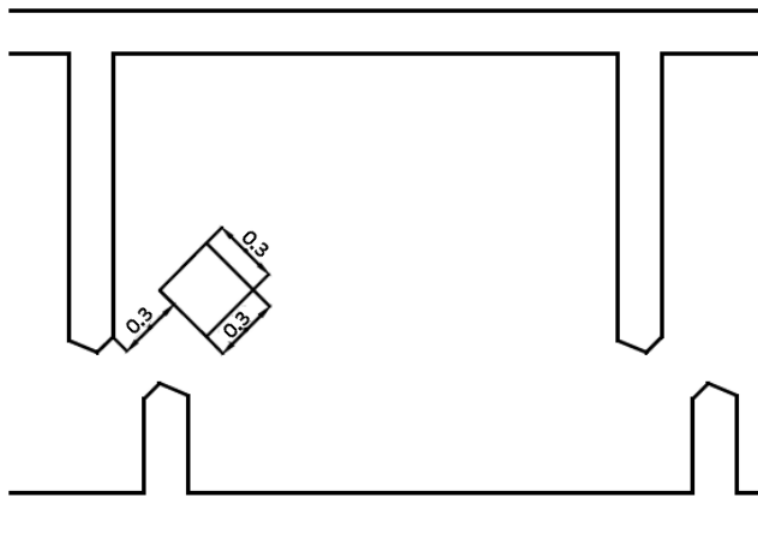


Figure 6. The diagram of structure 2 (unit: m)
图 6. 结构型式 2 的示意图(单位: 米)

对 $Z = 0.072\text{m}$ 高度的流场进行数值模拟, 可以从图 9 中看出, 主流被墩分为两条, 在墩的分流消能作用下, 流速得到一定程度的减小, 最大流速为 $V_3 = 0.86\text{ m/s}$, 最大流速同样出现在竖缝处, 竖缝处平均流速为 $V_{3,\text{av}} = 0.48\text{ m/s}$ 。

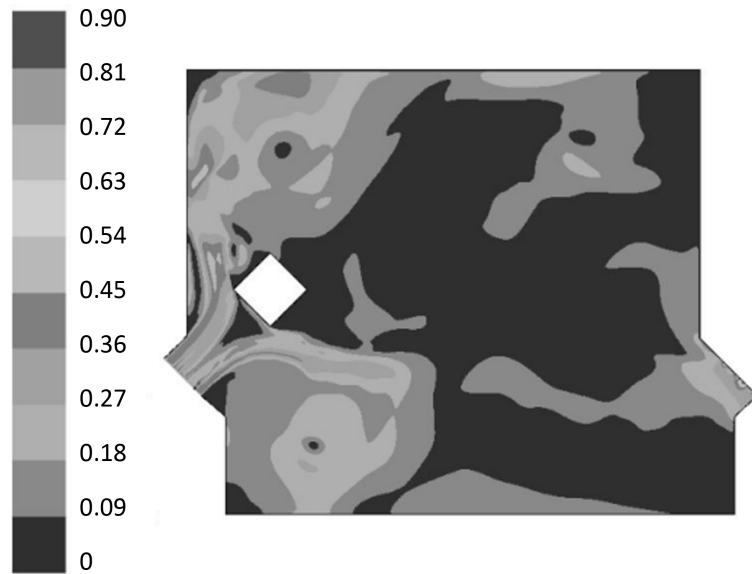


Figure 7. The numerical simulation result of structure 2
图 7. 结构型式 2 的数值模拟结果

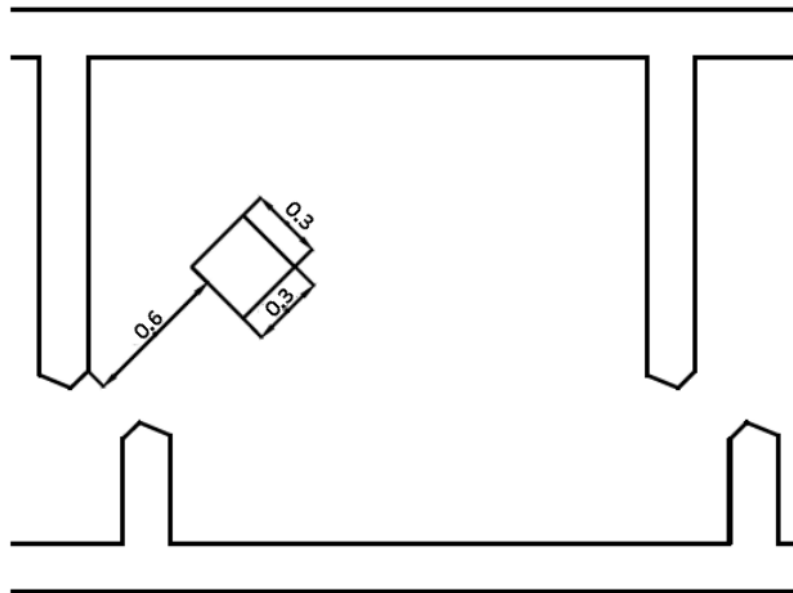


Figure 8. The diagram of structure 3 (unit: m)
图 8. 结构型式 3 的示意图(单位: 米)

3.4. 数值计算结果分析

结构型式 1、2、3 的最大流速均出现在竖缝处, 最大流速值分别为: $V_1 = 1.05 \text{ m/s}$ 、 $V_2 = 0.90 \text{ m/s}$ 、 $V_3 = 0.86 \text{ m/s}$, 平均流速值分别为: $V_{1,\text{av}} = 0.80 \text{ m/s}$ 、 $V_{2,\text{av}} = 0.46 \text{ m/s}$ 、 $V_{3,\text{av}} = 0.48 \text{ m/s}$ 。简单计算后可知: 结构型式 2 比结构型式 1 竖缝处流速减小 0.34 m/s , 减小幅度约为 42.5%; 结构型式 3 比结构型式 1 竖缝处流速减小 0.32 m/s , 减小幅度约为 40%。由此可以得出: 结构型式 2 和结构型式 3 都可以较大幅度降低竖缝处流速值。结构型式 2 (即将墩结构安放在距离竖缝 0.3 m 处), 减小竖缝处流速值的能力比结构型式 3 (即将墩结构安放在距离竖缝 0.6 m 处) 的能力较强。

4. 模型试验

鱼道模型主体为亚克力板，模型尺寸是在结构型式 1、2、3 的基础上进行相似原理计算得到的，同样将流量为 0.263 L/s 的工况进行相似原理计算，得到模型试验的工况。在相同工况下，分别进行结构型式 1、2、3 的试验，利用旋桨流速仪测量流速，将模型试验测得的数据通过相似原理计算还原为原始模型中的数据，与上节的数值计算结果进行对比。

4.1. 模型实验结果与分析

图 10 分别为结构型式 1、2、3 在 $Z = 0.072\text{ m}$ 时池室内的流速分布。

结构型式 1 的竖缝处平均流速为 $V'_{1,av} = 0.64\text{ m/s}$ ，结构型式 2 的竖缝处平均流速为 $V'_{2,av} = 0.45\text{ m/s}$ ，结构型式 3 的竖缝处平均流速为 $V'_{3,av} = 0.50\text{ m/s}$ ，模型实验中的最大流速也是出现在竖缝处。

4.2. 数值模拟计算结果与模型试验结果对比分析

将数值模拟结果与模型试验结果对比：在相同结构型式下，前者的竖缝处平均流速与后者比较接近，

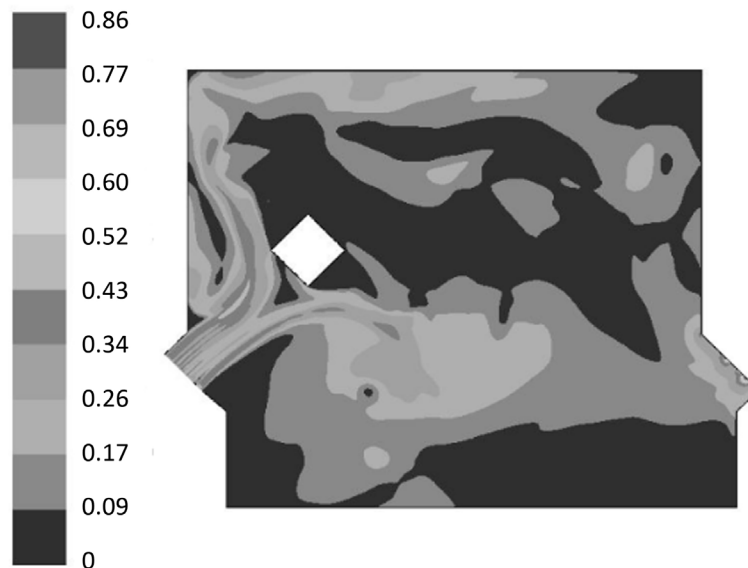


Figure 9. The numerical simulation result of structure 3

图 9. 结构型式 3 的数值模拟结果

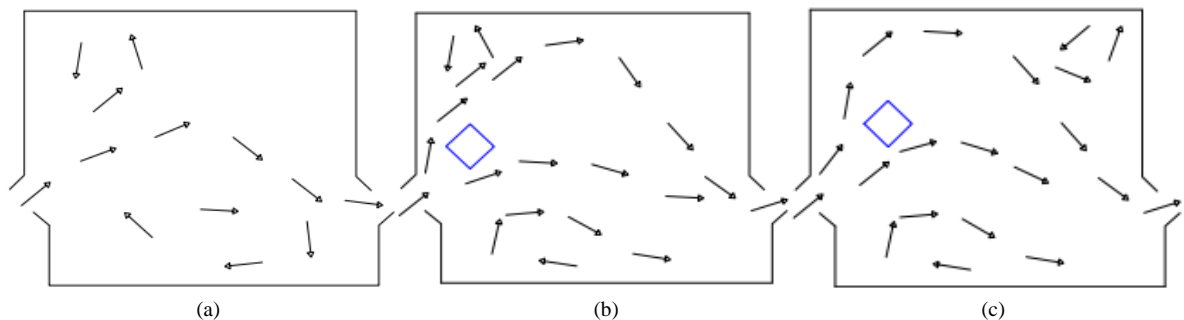


Figure 10. Velocity diagram of structure 1, 2, 3; (a) Velocity diagram of structure 1; (b) Velocity diagram of structure 2; (c) Velocity diagram of structure 3

图 10. 结构型式 1、2、3 的流速示意图；(a) 结构型式 1 的流速示意图；(b) 结构型式 2 的流速示意图；(c) 结构型式 3 的流速示意图

对于结构型式 1, 数值模拟结果 $V_{1,av} = 0.80$ m/s, 模型试验结果 $V'_{1,av} = 0.64$ m/s, 两者相差不大; 对于结构型式 2, 数值模拟结果 $V_{2,av} = 0.46$ m/s, 模型试验结果 $V'_{2,av} = 0.45$ m/s, 两者十分接近; 对于结构型式 3, 数值模拟结果 $V_{3,av} = 0.48$ m/s, 模型试验结果 $V'_{3,av} = 0.50$ m/s, 两者十分接近。数值模拟的流场与模型试验测得的流场在相同结构型式下也比较接近。试验结果较好地验证了数值模拟计算的结果。

5. 结论

应用标准 k- ϵ 湍流模型对鱼道内部受加墩影响的流场进行数值模拟计算, 并利用模型试验的结果对数值模拟计算的结果进行了验证, 得出如下结论:

- 1) 竖缝式鱼道池室内的最大流速一般出现在竖缝处。
- 2) 加墩对竖缝式鱼道内部流场有较大的影响。
- 3) 加墩可以减小竖缝式鱼道竖缝处和池室内的流速值。
- 4) 墩的位置会影响其消能、减小流速值的能力。

基金项目

四川省教育厅自然科学基金项目(035Z1994); 大学生创新训练计划四川省级重点项目(04054693, 04070066)。

参考文献 (References)

- [1] 孙双科, 邓明玉, 李英勇. 北京市上庄新闻竖缝式鱼道的水利设计研究[C]//全国水力学与水利信息学大会. 2007.
- [2] 宋德敬, 姜辉, 关长涛, 等. 老龙口水利枢纽工程中鱼道的设计研究[J]. 渔业科学进展, 2008, 29(1): 92-97.
- [3] 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.
- [4] 郭维东, 孟文, 熊守纯, 等. 同侧竖缝式鱼道结构优化数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 48-52.
- [5] 诸韬, 傅宗甫, 崔贞, 等. 双侧竖缝式鱼道水力特性三维数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2016(11): 93-96.
- [6] 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.
- [7] 毛熹, 李嘉, 易文敏, 等. 鱼道结构优化研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011(S1): 57-62.
- [8] 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.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org