

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.008

# 梯形断面鱼道内水流的三维特性分析

李恒<sup>1</sup>, 王晓刚<sup>2</sup>, 郑飞东<sup>3</sup>

(1. 南京江北新区生态环境和水务局, 江苏 南京 210031;

2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029; 3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 404100)

**摘要:** 运用三维数学模型, 对横断面为梯形的鱼道内水流流态进行数值模拟分析, 结果表明: 梯形断面鱼道内水流具有明显的三维特性; 增大梯形断面鱼道竖缝过水断面面积比会减弱鱼道内水流的三维特性, 在过水断面面积比小于0.375时, 鱼道内水流三维特性较为明显; 鱼道池室长宽比的变化对鱼道内水流三维特性的影响不大。

**关键词:** 梯形断面鱼道; 三维特性; 竖缝; 过水断面面积比; 长宽比

中图分类号: TV135 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)01-0061-05

## Three-dimensional characteristics analysis of flow in trapezoidal fishway

LI Heng<sup>1</sup>, WANG Xiaogang<sup>2</sup>, ZHENG Feidong<sup>3</sup>

(1. Nanjing Jiangbei New Area Ecological Environment and water Bureau, Nanjing 210031, China;

2. Hydraulic Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 404100, China)

**Abstract:** The three-dimensional mathematical model was used in the numerical simulation of the flow pattern in the fishway with trapezoidal cross-section. The results showed that the trapezoidal fishway has obvious three-dimensional characteristics of the water flow. It will weaken the three-dimensional characteristics of the flow within trapezoidal fishway when the water area ratio in the vertical slot increases. When the water area ratio is less than 0.375, the three-dimensional characteristics is more obvious. The aspect ratio of the pool room has little effect on the three-dimensional flow characteristics in the fishway.

**Key words:** trapezoidal fishway; three-dimensional characteristics; vertical slot; water area ratio; aspect ratio

近年来, 随着我国国民经济的快速发展, 水资源的开发和利用程度不断加大。河流上修建的各类水工建筑物在发挥发电、灌溉、航运、防洪、供水等效益的同时, 对河流生态系统产生了一定的负面影响, 对鱼类及其他洄游生物存在深远的负面效应<sup>[1-2]</sup>。为了恢复河流的连通性<sup>[3]</sup>, 帮助鱼类及其他洄游生物正常洄游, 保护河流生态系统, 需在河流上修建过鱼建筑物, 其中鱼道的应用最为广泛<sup>[4-5]</sup>。

国内外有关学者对鱼道的水力特性进行了大量的研究, 其中研究最多的是竖缝式鱼道<sup>[6-9]</sup>。徐体兵等<sup>[10]</sup>通过对竖缝式鱼道进行数值模拟计算, 研究了鱼道水池长宽比和隔板墩头布置体型对水池内水流流态的影响; 边永欢等<sup>[11]</sup>通过数学模型验证, 认为竖缝断面平均流速的大小对于鱼道水池内主流区分布、主流流速的沿程衰减规律以及竖缝断面流速分布并无显著影响; 张国强等<sup>[12]</sup>在已有研究的基础上合理取用竖缝式鱼道的长宽比、导板长度、导向角度等参数, 采用数值模拟方法, 研究了竖缝宽度对水池内水流结构的影响, 并给出了其合理的取值范围; 董志勇等<sup>[13-14]</sup>对同侧和异侧竖缝式鱼道进行了放鱼试验, 研究池室内的水流结构以及竖缝处的流态特性; Wu等<sup>[15]</sup>通过试验发现鱼道的坡降在5%时, 流态有明显的二维特征, 当坡降在10%和20%时, 上下层流态出现差异而表现为三维特征, 因此认为当竖缝式鱼道坡度小于5%时, 鱼道池室内水流具有二元特性; Fujihara等<sup>[16]</sup>应用二维浅水模型进行鱼道水流的水力特性计算, 结果表明: 鱼道池室内最大流速出现在竖缝下游而不是在竖缝处; 汪红波等<sup>[17]</sup>对淹没孔口式横隔板鱼道的流态和紊动能进行了研究, 验证了其水流的固定特性, 认为消能效果较好。

**基金项目:** 重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-bshX0043)

**作者简介:** 李恒(1988—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水力学研究。E-mail: slliheng@126.com

**引用本文:** 李恒, 王晓刚, 郑飞东. 梯形断面鱼道内水流的三维特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 61-65.

LI Heng, WANG Xiaogang, ZHENG Feidong. Three-dimensional characteristics analysis of flow in trapezoidal fishway[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 61-65.

国内外有关学者根据竖缝式鱼道的二元特性,从物理试验和数值模拟等方面对其进行了大量研究<sup>[18-19]</sup>,而针对梯形断面鱼道相关研究却鲜有涉及。本文利用数值模拟方法对梯形断面鱼道内的三维水流结构进行研究,分析其水流特性,为鱼道结构设计提供参考。

## 1 数学模型的建立及验证

### 1.1 数学模型

梯形断面鱼道的过水断面面积自下而上不断增大,因此选用三维数学模型进行模拟计算。模型的连续方程、动量方程、 $k$ 方程和 $\varepsilon$ 方程<sup>[14,18]</sup>分别为

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

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

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

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

其中  $G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$   $\mu_t = \rho c_{2\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon}$   $p = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$   $\sigma_k = 1.0$   $c_{1\varepsilon} = 1.44$   $c_{2\varepsilon} = 1.92$

式中: $u_i$ 为 $x_i$ 方向的时均流速; $\rho$ 为水的密度; $p$ 为时均压强; $u'_i$ 为脉动流速; $\mu$ 为动力黏性系数; $\mu_t$ 为涡黏性系数; $k$ 为紊动能; $\varepsilon$ 为紊动能耗散率; $G$ 为紊动能产生项。

计算区域和边界条件:模型模拟计算5级鱼道水池。为减小进出口边界对池室内流场的影响,设置进口断面距离第1级池室8.0m,出口断面距离第5级池室9m。进口边界采用流量进口,出口边界为压力出口,水面为对称边界,其他为固壁边界。鱼道坡度 $J=1:70$ ,下游水深 $h=2$ m,池室底宽 $B=3$ m,边坡 $i=0.5$ ,见图1。

网格划分:模型计算区域的网格类型采用六面体结构化网格,在底部进行加密处理。鱼道网格划分情况如图1(c)所示。

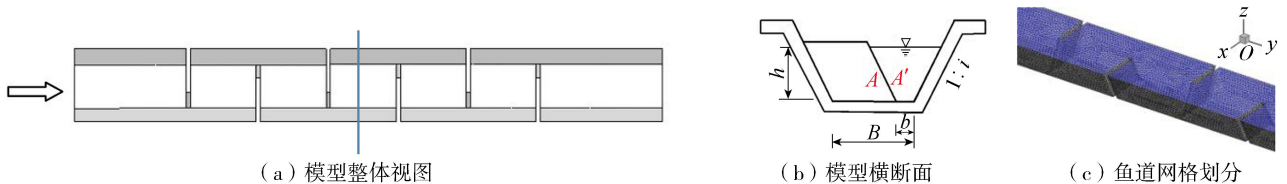


图1 鱼道模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of fishway model

### 1.2 模型验证

将模型试验与数值模拟结果进行对比。采用丹巴鱼道模型,该鱼道型式为竖缝式。试验过程中上游水位利用水库中平水槽进行控制,下游水位采用溢流板控制,隔板竖缝的最大流速采用三维ADV和旋桨流速仪测量,鱼道池室内的流场采用三维ADV测量,鱼道流量采用三角堰进行测量,测量精度为 $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

分别对靠近竖缝处1号断面、鱼道池室中间4号断面、下一竖缝处7号断面在水深1.2m处的流速 $v$ 实测数据和数值模拟数据进行对比。由图2可见,二者的流态基本一致,流速大小也基本吻合。由此可见,所选的数学模型适当,计算方法合理。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 梯形断面鱼道内横断面水流的三维性

图3为竖缝式鱼道1号和4号断面不同水层高度 $z$ 的流速分布。由图3可见,在不同的水层水流速度几乎完全一样,表明竖缝式鱼道具有明显的二元特性,这与Wu等<sup>[15]</sup>研究的竖缝式鱼道在坡度较缓时其池室内的水流呈现出典型的二元特性这一结论吻合。

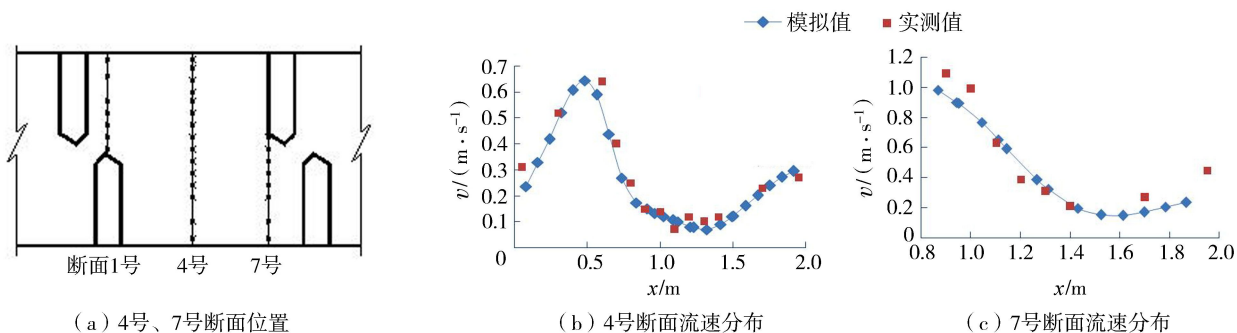


图 2 实测流速与模拟流速对比

Fig. 2 Comparison between simulated flow velocity and measured flow velocity

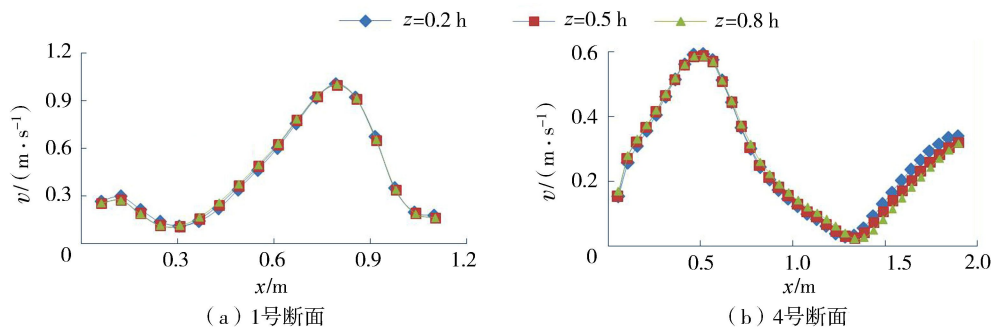


图 3 竖缝式鱼道不同水层的流速分布

Fig. 3 Velocity distribution of different water layer in fishway with vertical slot

图 4 为梯形断面鱼道不同水层横断面流速分布,可见在不同水层水流流速差异性相对明显。

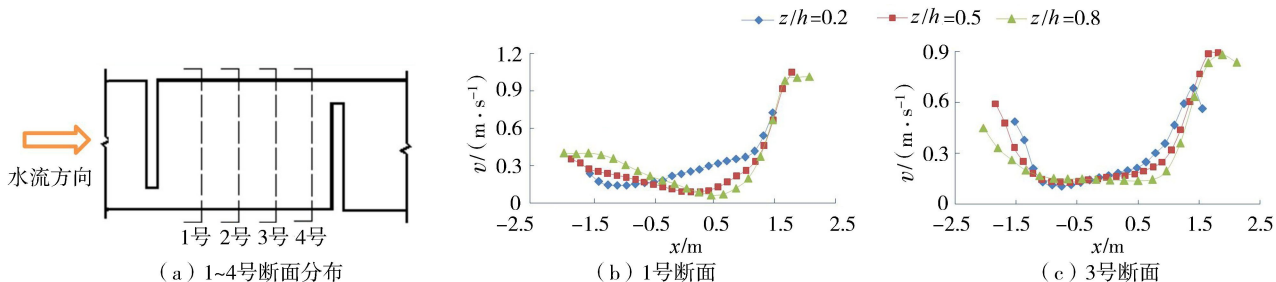


图 4 梯形断面鱼道不同水层的流速分布 ( $A'/A=0.275$ )

Fig. 4 Velocity distribution of different water layer in trapezoidal fishway when  $A'/A = 0.275$

图 4(a)1 号断面靠近上级隔板。由 1 号断面流速分布可知,流速整体分布呈现两边大中间小的趋势,且背向水流方向(以下均以背向水流方向区分左右侧),左侧边墙流速小于右侧边墙流速。在纵向中心轴线左侧  $1/6B$  至左侧边墙的范围,高水层流速值大于低水层的流速值,其水流流速自下而上分布和明渠中流速分布相似;在纵向中心线左侧  $1/6B$  至右侧  $1/2B$  的范围内,低水层的流速值大于高水层的流速值;在纵向中心线右侧  $1/2B$  至右侧边墙范围内,流速呈现增大的趋势,高水层水流在靠近边墙的小段范围内流速不再继续增大。

3 号断面靠近下级隔板。由 3 号断面流速分布可知,在纵向中心线左侧  $1/3B$  至左侧边墙范围内,高水层的水流流速值小于低水层的水流流速值,在这一区域,流速自下而上呈现逐渐减小的趋势;在纵向中心线左右  $1/3B$  范围内,3 号断面水流流速值相对较小,且随着水层变化不大,3 号断面的流速呈现两边大中间小的趋势。

由不同断面、不同水层水流流速分布可以看出,梯形断面鱼道池室内水流具有三维特性,水流的分布不是单纯的上大下小或上小下大,而是不同的流速区域其水流具有多样性。在某些区域高水层水流流速较小,表明高水层水流回流强度变小,对某些浅层鱼类上溯洄游有利。

## 2.2 梯形断面鱼道水流流速的垂线变化

图5(a)为两种鱼道收缩断面及池室中心沿垂线的流速分布。梯形断面鱼道收缩断面最小流速为0.42 m/s,最大流速为0.78 m/s,流速的最大增幅为77%;竖缝式鱼道竖缝最大流速为1.13 m/s,最小流速为1.09 m/s,最大增幅为4.63%。图5(b)为鱼道池室中心位置流速的垂线分布,梯形断面鱼道最小流速为0.06 m/s,最大流速为0.22 m/s,流速最大变幅为73%;竖缝式鱼道最小流速为0.22 m/s,最大流速为0.27 m/s,流速最大变幅为18.5%。由此可见,梯形断面鱼道与竖缝式鱼道相比流速沿垂线变化明显,具有较为明显的三维特性。

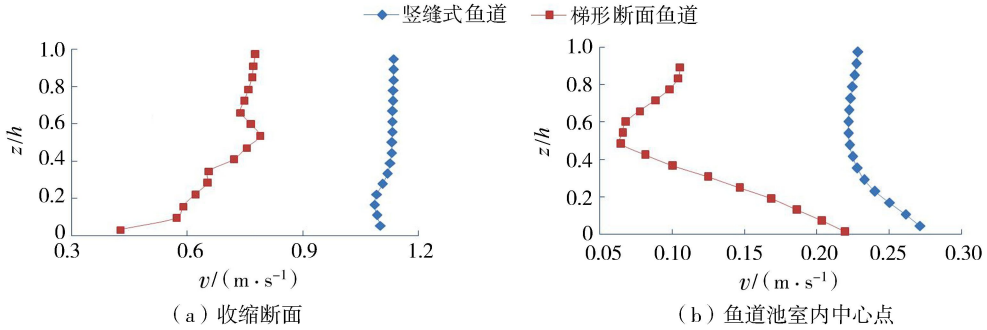


图5 收缩断面和鱼道池室内中心点水流流速沿垂线分布

Fig. 5 Flow velocity distribution along depth in contracted section and indoor center point of fishway pool

## 2.3 收缩断面过水断面面积比对鱼道内水流三维特性的影响

利用不同过水断面面积比  $A'/A$  对鱼道内水流进行数值模拟计算,分析收缩断面  $A'/A$  的变化对梯形断面鱼道内水流的影响。不同流量工况下不同过水断面面积比各水层的最大流速变化见图6。

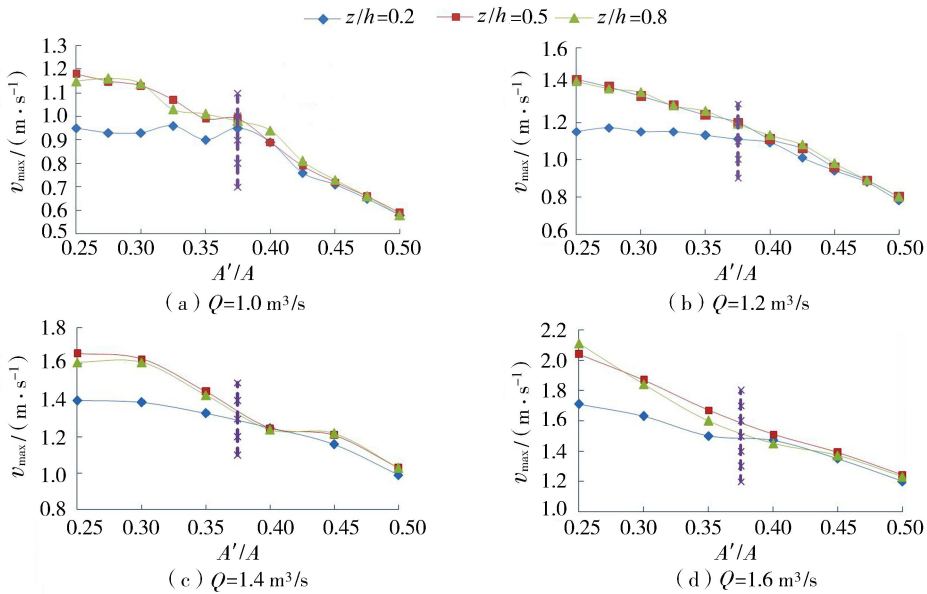


图6 不同流量工况下不同过水断面面积比的水层最大流速值

Fig. 6 Maximum flow velocity value of each layer with different  $A'/A$  and  $Q$

由图6可以看出,在相同的进口流量条件下,随着收缩断面  $A'/A$  的增大,鱼道内各水层的最大流速呈下降趋势;相同工况下,中水层( $z/h=0.5$ )和高水层( $z/h=0.8$ )水流的最大流速值基本相等;在  $A'/A < 0.375$  时,较小进口流量下,低水层( $z/h=0.2$ )水流的最大流速值受收缩断面  $A'/A$  的影响较小,低水层水流的最大流速小于高水层水流的最大流速,表明在池室底层,隔板的长度对池室内水流流速的影响小于底部壁面及边墙对水流流速的影响。在收缩断面  $A'/A < 0.375$  时,随着进口流量的增加,收缩断面  $A'/A$  的增大对最大流速的影响增强,即在较大进口流量下,低水层最大流速随着收缩断面  $A'/A$  的增大呈明显的下降趋势,这是因为随着流量的增加,水流动能逐渐大于重力势能起主导作用;在收缩断面  $A'/A > 0.375$  时,在同一收缩断面  $A'/A$  下,鱼道池室内不同水层的最大流速值基本相等,一定程度上表明随着收缩断面过水面积的增大,鱼道池室内水流的三维



特性减弱,二维特征增强。因此在设计梯形断面鱼道的合理过水断面面积比时,应使收缩断面  $A'/A < 0.375$ 。

## 2.4 梯形断面鱼道长宽比对水流三维特性的影响

由以上分析可知,当收缩断面  $A'/A < 0.375$  时,鱼道高、中、底层之间的最大流速差异明显,体现出鱼道内水流流态的三维性。由图 7 可知,在进口流量不变、下游水位一定、收缩断面  $A'/A$  一定的情况下,随着鱼道池室长度的增加,中、高水层流速由 1.18 m/s 降到 0.92 m/s,低水层的最大流速由 1.07 m/s 降到 0.80 m/s,中、高水层的最大流速降低约 16.4%,低水层最大流速降低约 25.2%。

由图 7 可见,为当收缩断面  $A'/A = 0.325$  时,鱼道内低水层最大流速明显小于高水层最大流速,因此池室长宽比的增加没有改变底层与中高层水流最大流速的差异性。尽管随着长宽比的增大,池室内最大流速缓慢降低,但是各个水层的最大流速值差异均较为明显,即鱼道的三维特性没有明显减小。

## 3 结 语

竖缝式鱼道内的水流呈现二维特性,梯形断面鱼道内水流呈现明显的三维特性。梯形断面鱼道的三维特性随着收缩断面过水断面面积比的增大而减小,收缩断面过水断面面积比小于 0.375 时,三维特性明显。梯形断面鱼道长宽比的变化对鱼道水流的三维特性影响较小。

梯形断面鱼道与天然河道的水流和环境较为相似,与矩形鱼道设施相比,梯形断面鱼道既满足鱼类洄游的需要,同时还增加了河道内鱼类生境的数量和种类。梯形断面鱼道可以使游泳能力较强的鱼类将其作为上溯繁殖的通道,也可以使游泳能力较弱的鱼类顺利上溯至上游。由于对过鱼信息掌握不足,而单纯从水力学的角度研究鱼道会造成很多鱼道过鱼成功率不高的问题。因此,为了保护鱼类资源,恢复河道生物多样性,提高鱼道过鱼成功率,应深入开展对鱼类游泳能力及其行为的研究。

## 参考文献:

- [1] 南京水利科学研究所. 鱼道[M]. 北京:水利电力出版社,1982.
- [2] 张璞,刘欢,胡鹏,等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. 水资源保护,2022,38(2):176-182. (ZHANG Pu, LIU Huan, HU Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):176-182. (in Chinese))
- [3] 高学平,胡泽,闫晨丹,等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. 水资源保护,2022,38(2):41-47. (GAO Xueping, HU Ze, YAN Chendan, et al. Construction and application of water system connectivity evaluation index system considering hydraulic connectivity[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):41-47. (in Chinese))
- [4] 王桂华,夏自强,吴瑶,等. 鱼道规划设计与建设的生态学方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2007,5(4):7-12. (WANG Guihua, XIA Ziqiang, WU Yao, et al. Fishway planning, design and construction in ecology research methods[J]. Water Resources and Architectural Engineering,2007,5(4):7-12. (in Chinese))
- [5] 王兴勇,郭军. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(3):222-228. (WANG Xingyong, GUO Jun. Research and construction of fishway in home and abroad[J]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005,3(3):222-228. (in Chinese))
- [6] LIU M, RAJARATNAM N. Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,132(8):765-777.
- [7] TARRADE L, PINEAU G, CALLUAUD D, et al. Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways[J]. Environmental Fluid Mechanics,2011,11(1):1-21.
- [8] CEA L, PENA L, PUERTAS J, et al. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(2):160-172.
- [9] KATOPODIS C. Introduction to fishway design[M]. Winnipeg, Manitoba, Canada: Freshwater Institute,1992.

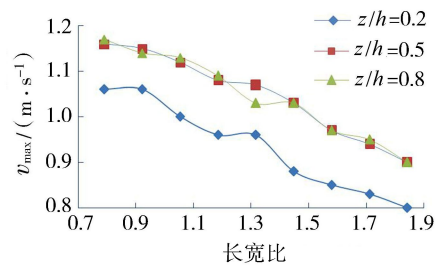


图 7 不同水层的最大流速随梯形断面鱼道长宽比的变化

Fig. 7 Variation of maximum flow velocity with different aspect ratios in different layers

- [31] NOVAK M, BEREDUGO Y O. Vertical vibration of embedded footings[J]. ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1972, 98(12):1291-1131.
- [32] NOVAK M, NOGAMI T, ABOUL-ELLA F. Dynamic soil reactions for plane strain case[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978, 13(4):231-236.
- [33] KONAGAI K, NOGAMI T. Time-domain axial response of dynamically loaded pile groups[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1987, 13(3):417-430.
- [34] KONAGAI K, NOGAMI T. Subgrade model for transient response analysis of multiple embedded bodies[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23(10):1097-1114.
- [35] 王奎华, 杨冬英, 张智卿. 简化平面应变土体模型的精度研究及适用性分析[J]. 计算力学学报, 2010(3):5. (WANG Kuihua, YANG Dongying, ZHANG Zhiqin. A study on precision of simplified plane strain model of soil[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010(3):5. (in Chinese))
- [36] 许宏发, 王斌, 戴小平, 等. 桩土接触面力学参数取值研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(增刊1):54-56. (XU Hongfa, WANG Bin, DAI Xiaoping, et al. Determination of mechanical parameters on pile-soil interface[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2001, 29(Sup1):54-56. (in Chinese))
- [37] MARTIN P P, SEED H B. One dimensional dynamic ground response analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982(7):935-954.
- [38] 李建波. 结构-地基动力相互作用的时域数值分析方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.

(收稿日期:2022-02-23 编辑:胡新宇)

(上接第65页)

- [10] 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 Tibing, SUN Shuangke. Numerical simulation of vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11):1386-1391. (in Chinese))
- [11] 边永欢, 孙双科. 竖缝式鱼道的水力特性研究[J]. 水利学报, 2013, 44(12):1462-1467. (BIAN Yonghuan, SUN Shuangke. Hydraulic characteristics research of vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12):1462-1467. (in Chinese))
- [12] 张国强, 孙双科. 竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1):151-156. (ZHANG Guoqiang, SUN Shuangke. The impact of vertical slot width on the flow structure in vertical slot fishway[J]. Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1):151-156. (in Chinese))
- [13] 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 Zhiyong, FENG Yuping, ERVINE A. Experimental study on hydraulic characteristics of the ipsilateral vertical slot fishway[J]. Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6):121-125. (in Chinese))
- [14] 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 Zhiyong, FENG Yuping, ERVINE A. Experimental study on hydraulic characteristics of the opposite ipsilateral vertical slot fishway[J]. Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6):126-130. (in Chinese))
- [15] WU S, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(4):351-360.
- [16] FUJIHARA M, YAMANAKA S, IZUMI T, et al. Numerical investigation of flow in various types of vertical slot fishways and the function of baffles[J]. The Japanese Society of Fisheries Engineering, 2012, 49(2):85-92.
- [17] 汪红波, 王从峰. 横隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5):65-68. (WANG Hongbo, WANG Congfeng. Numerical simulation of hydraulic characteristics on horizontal diaphragms fishway[J]. Hydroelectric Energy, 2012, 30(5):65-68. (in Chinese))
- [18] 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 Xiaofeng, LI Jia. Structure and hydraulic characteristics research of vertical slot fishway[J]. Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10):50-54. (in Chinese))
- [19] 曹娜, 钟治国, 曹晓红, 等. 我国鱼道建设现状及典型案例分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(6):156-162. (CAO Na, ZHONG Zhiguo, CAO Xiaohong, et al. Status of fishway construction in China and typical case analysis[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):156-162. (in Chinese)).
- [20] 刘超, 张世宝, 王二平, 等. 鳊鱼道堰面加糙的过鱼效果评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2):136-142. (LIU Chao, ZHANG Shibao, WANG Erping, et al. Study on elver passing efficiency for weir surface roughing of eel channel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2):136-142. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-03 编辑:胡新宇)