

# 不同淹没度下鱼类友好型涵洞水力特性的大涡模拟研究

戴杰<sup>1</sup>, 龚轶青<sup>2</sup>, 毛劲乔<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 211106)

**摘要:**为阐明鱼类友好型涵洞的水力特性,基于大涡模拟方法构建了含三角形侧向挡板的鱼类友好型涵洞数值模型,开展了不同淹没度下涵洞水流的三维数值模拟研究,并通过水槽试验对数值模型的准确性和可靠性进行了验证。研究结果表明:挡板一半高度处的水流沿着挡板外缘发生流动分离,再循环区的范围随着淹没度的下降而增加;挡板周围剪切层的强度和紊动水平与淹没度呈负相关关系;浅水流动下的涡旋脱落更为无序,靠近水面的涡旋结构在强度上和数量上均高于床面附近的涡旋结构。

**关键词:**鱼类友好型涵洞;淹没度;流动分离;大涡模拟;涡旋结构

**中图分类号:**TV131

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2025)06-0114-06

**Large-eddy simulation of hydraulic characteristics of fish-friendly culverts under different submergence levels//** DAI Jie<sup>1</sup>, GONG Yiqing<sup>2</sup>, MAO Jingqiao<sup>1</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** To investigate the hydraulic characteristics of fish-friendly culverts, a numerical model of a fish-friendly culvert with triangular lateral baffles was developed based on the large eddy simulation method. Three-dimensional numerical simulation of flow within the culvert was conducted under various submergence levels, and the accuracy and reliability of the numerical model were validated through flume experiments. The results indicate that at half the height of the baffle, flow separation occurs along the outer edge of the baffle, and the size of the recirculation zone increases as the submergence level decreases. The intensity of the shear layer and the turbulence around the baffle are negatively correlated with the submergence level. Under shallow flow conditions, vortex shedding becomes more chaotic, with stronger and more numerous vortex structures near the water surface compared to those near the bed.

**Key words:** fish-friendly culvert; submergence level; flow separation; large-eddy simulation; vortex structure

涵洞通常是指箱形或者管式设计的输水通道,广泛存在于公路、堤防和河流等场景中,其最初的设计目的是最大化其过流能力,因此,涵洞中的水流往往具有流速较高、动量较大等特点<sup>[1]</sup>。随着社会的发展,涵洞不仅扮演着输水通道的角色,也成了水生生物迁移的重要路径。例如,南昌至上栗高速共有800余道涵洞工程,已成为路桥建设中不可忽视的河流修复手段<sup>[2]</sup>。然而,涵洞中的高速水流也成了鱼类上溯的障碍,尤其是针对幼鱼和游泳能力较弱的鱼类<sup>[3]</sup>。随着涵洞这种输水通道的生态功能逐渐被重视,鱼类友好型涵洞<sup>[4]</sup>的概念被提出,其中应用最为广泛的是在涵洞中加装侧向挡板。相关研

究<sup>[5]</sup>表明,安装侧向挡板后,通道中的流速降低,水深增加,尤其是与鱼类上溯相关的低流速区占比显著增加,约增加了40%~260%。

除了提供更多帮助鱼类上溯的低流速区外,涵洞中的侧向挡板与水流相互作用,改变了其周围的流场结构,最为显著的特征是挡板后方形成了再循环区,这主要是挡板外侧的高速流体与挡板内侧的低速流体动量交换造成的流动分离<sup>[6]</sup>。这一区域与鱼类在涵洞中的上溯行为密切相关,一方面,鱼类上溯过程中可在该区域休息、恢复体力<sup>[7]</sup>,同时,也有鱼类在这区域迷失上溯方向<sup>[8]</sup>。针对这一流动现象,国内外学者开展了大量研究,包括水槽模型试

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52279013,52279055)

**作者简介:**戴杰(1995—),男,博士研究生,主要从事水动力数值模拟研究。E-mail:jiedai@hhu.edu.cn

**通信作者:**毛劲乔(1978—),男,教授,博士,主要从事生态水力学及水利水电生态调控研究。E-mail:maojq@hhu.edu.cn

验和数值模拟等。例如: Cabonce 等<sup>[6]</sup>通过染料可视化捕捉了挡板后方再循环区尾迹; Khodier 等<sup>[9]</sup>通过  $k-\varepsilon$  湍流模型还原了挡板后方的再循环涡流。随着计算机技术的发展, 大涡模拟 (LES) 技术相对于传统的雷诺时均模型, 能够更好地捕捉这一流动现象, 并刻画瞬时参数下的紊流结构<sup>[10-11]</sup>, 因此, 有必要对挡板结构影响下的鱼类友好型涵洞中的水流结构进行进一步精细模拟。此外, 已有的研究往往针对常规淹没度下的流动情况, 而涵洞的水流情况复杂多变, 其中的湍流结构会随着淹没度的改变而发生显著变化<sup>[12]</sup>, 这一变化特性目前尚不明确。

因此, 本文以大涡模拟为主要研究方法, 对挡板影响下的涵洞水流三维水力特性开展研究, 重点关注常规水深和浅水流动工况下时均流场和瞬时流场的变化规律, 明确淹没度对鱼类友好型涵洞水流结构的影响, 以期为涵洞等输水通道的合理运行及恢复河流连通性提供科学支撑。

1 数值模拟方法

为精准模拟鱼类友好型涵洞中挡板影响下的三维流场结构, 使用开源程序 Hydro3D<sup>[13-16]</sup> 求解三维不可压缩 Navier-Stokes (N-S) 方程组。Hydro3D 是基于有限差分方法和笛卡尔网格的并行计算程序, 采用四阶精度的差分格式离散 N-S 方程组的对流项和扩散项, 采用三阶龙格-库塔方法进行时间项的离散。在计算过程中, 采用库朗特数控制时间步长, 其值固定为 0.6。

本文的鱼类友好型涵洞数值模型参考毛劲乔等<sup>[5]</sup>开展的水槽模型试验。该模型试验在一个长 8 m、宽 0.5 m 的循环水槽中进行, 在水槽中以间距  $L_b=0.5$  m 连续布设三角形挡板, 挡板为等腰直角三角形, 厚度为 8 mm, 边长  $h_b$  为 0.14 m。试验中, 流量为  $0.045\text{ m}^3/\text{s}$ , 水深  $H$  保持在 0.18 m, 因此断面平均进口流速  $U_b=0.5\text{ m/s}$ , 水力雷诺数  $Re=90\,000$ , 弗劳德数  $Fr=0.376$ 。在流动充分发展区域使用声学多普勒流速仪进行水力测量, 流速数据的采集频率为 50 Hz, 每个测点数据采集时间超过 150 s, 并使用该数据对数值模型的准确性进行验证。模拟工况共有两个: 工况 1 的水力参数和试验保持一致, 水深为 0.18 m, 淹没比  $H/h_b=1.28$ ; 为了探究淹没度对涵洞内部流场结构的影响, 将工况 2 设置为浅水流动, 模拟水深只有试验水深的一半, 即 0.09 m, 淹没比  $H/h_b=0.64$ 。控制两个模拟工况的  $Fr$  相等, 模拟工况的水力参数见表 1。

为减少数值模拟的计算成本, 本研究仅对流动充分发展区域进行模拟。计算域如图 1 所示, 长

| 表 1 模拟工况水力参数 |      |            |        |       |
|--------------|------|------------|--------|-------|
| 工况           | 水位/m | 进口流速/(m/s) | $Re$   | $Fr$  |
| 1            | 0.18 | 0.500      | 90 000 | 0.376 |
| 2            | 0.09 | 0.353      | 31 770 | 0.376 |

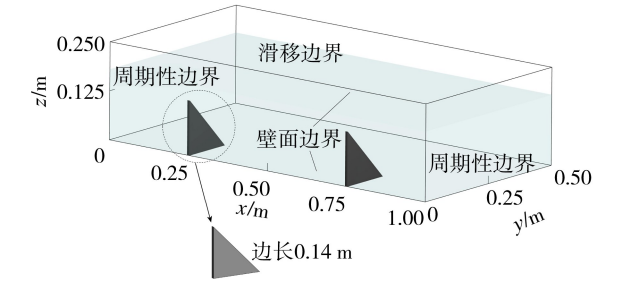


图 1 计算域示意图

1 m、宽 0.5 m、高 0.25 m, 计算域的宽度和高度还原了试验中的水槽宽度和水深, 长度为两倍的挡板间距。计算域进口和出口均采用周期性边界, 两侧壁面边界及底部边界条件均采用无滑移条件。由于 2 种模拟工况的  $Fr$  均为 0.376, 小于  $0.5^{[17]}$ , 因此不考虑水面波动, 采用刚盖假定对水面进行概化, 顶部采用滑移边界。计算域中的三角形挡板采用浸没边界点表示, 以实现几何表面为无滑移条件。整个计算域采用均匀的笛卡尔网格进行划分, 网格尺寸为  $\Delta x=\Delta z=0.001\text{ m}$ ,  $\Delta y=0.002\text{ m}$ , 共有  $1\,000\times 250\times 180=4.5\times 10^7$  个网格单元, 两种工况下的无量纲网格间距分别为 5.78 和 4.46。为了在模拟中获得充分发展的湍流, 进行 10 个流动贯穿周期的模拟时长后, 开始统计一阶湍流数据, 在进行 20 个流动贯穿周期的模拟时长后, 开始统计二阶湍流统计数据。

图 2 为模拟工况 1 中挡板后方 4 条流速垂向测线的时均流速  $U_m$  与试验中充分发展区域的流速数据验证对比结果, 四条测线均位于断面  $x=0.2525\text{ m}$ , 即位于第一个挡板后方 0.025 m。从图 2(a) 可以看出, 大涡模拟很好地还原了挡板后方的负流速区, 这主要是挡板后方的回流区导致的, 随着测线位置远离水槽侧壁, 负流速区垂向范围缩小, 如图 2(b) 所示, 负流速区仅在  $0.04<z/H<0.25$  位置处出现。随着测线进一步远离水槽边壁, 向水槽中心线靠近时, 负流速区消失, 速度剖面逐渐恢复至对数分布, 如图 2(c) 和 2(d) 所示。整体上来看, 数值模型预测的流场与试验数据吻合较好, 说明大涡模拟能够用于接下来的分析和研究。

2 结果与分析

2.1 流动分离与时均流场

图 3(a) 和 3(b) 分别为工况 1 和工况 2 中挡板一半高度处 ( $z/H=0.5$ ) 的无量纲化瞬时流向速度场 ( $u/U_b$ ) 云图。由图 3 可知, 三角形挡板的存在显

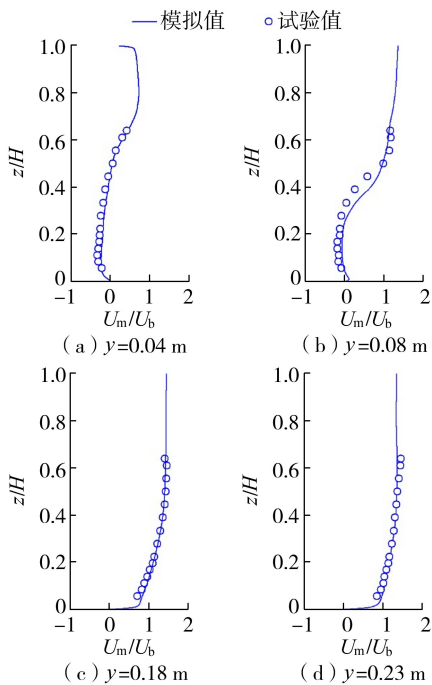


图2 模型验证

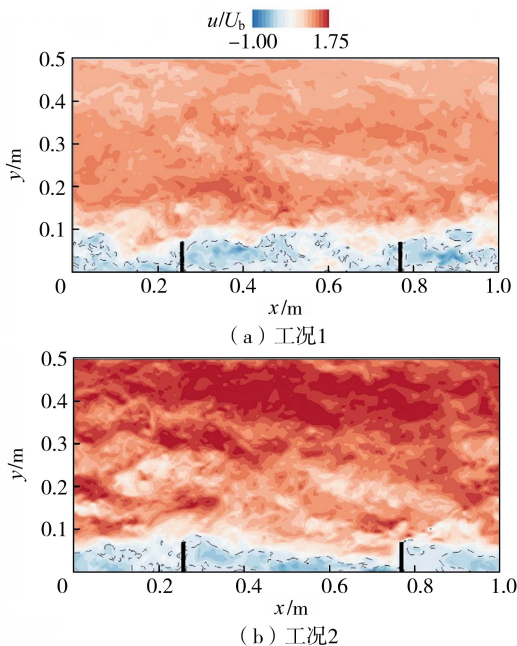


图3 瞬时流场分布 ( $z/H=0.5$ )

著改变了涵洞周围的水流结构,由于挡板的阻流效应,远离挡板一侧的水流加速流向下游,出现了明显的高流速区,而挡板后方出现了明显的低流速区。为了凸显两种不同速度流体造成的流动分离现象,该平面位置处的速度为 0 的交界区域用灰色的虚线进行标记,可以看出,工况 1 中的交界区域明显在  $x=0.5\text{ m}$  处出现间断,而工况 2 中的交界区域一直在两个相邻挡板区域之间连续,这表明两种工况下挡板后方再循环区的特性发生了显著变化,存在明显差异。

为进一步捕捉和量化两种工况下挡板后方的再

循环区特性的差异,图 4(a) 和 4(b) 分别为工况 1 和工况 2 在相同水平面的无量纲化时均流向速度 ( $U_m/U_b$ ) 分布和流线图。由图 4 可知,挡板的存在诱导了流动分离,工况 1 中主流区最大  $U_m$  约为平均流速的 1.3 倍,而浅水流动的工况 2 中的无量纲流速最大为 1.7。此外,从图上可以看出挡板的上下游均出现了若干个不同类型的再循环区。在工况 1 中,第一个再循环区位于挡板上游,主要是挡板对上游来流造成阻挡,在该位置处发生回流;第二个再循环区是在下游水槽侧壁与挡板交界处出现生成的角涡。最为显著的是两个挡板之间呈现顺时针特性主循环区,在流向和展向上延伸的距离分别为 0.22 m 和 0.092 m。在工况 2 中,主循环区的特性也发生了明显变化,相比于工况 1 向下游延伸的距离更长,约为 0.382 m,流向上增加了 73.6%;在展向上的延伸随着向下游发展而变化,靠近上游位置处的长度为 0.081 m,靠近下游位置处的长度为 0.053 m。主循环区的发展抑制了相邻位置角涡的发展,工况 2 中挡板下游的角涡消失。时均流场中的再循环区特性与瞬时流场中速度为 0 的交界区域表现出了一致性。

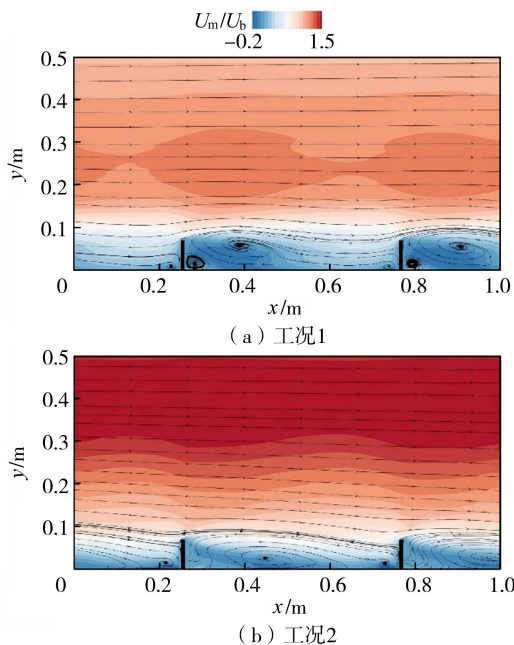


图4 时均流场分布 ( $z/H=0.5$ )

## 2.2 雷诺应力和紊动能

雷诺应力是紊动产生的附加切应力,是反映水体脉动交换的剧烈程度的重要指标<sup>[18]</sup>。图 5(a) 为工况 1 中挡板一半高度处 ( $z/H=0.5$ ) 的无量纲化雷诺应力 ( $-\overline{u'v'}/U_b^2$ ) 分布图,其中  $u'$  和  $v'$  分别为流向和展向的脉动流速。由图 5(a) 可以看出,挡板外缘出现了明显的高应力区,最高可达  $0.029U_b^2$ ,这主要是由该位置处频繁的动量交换导致的。这一高应

力区向下游发展,并始终维持在高强度剪切水平。图 5(b) 为工况 2 的无量纲化雷诺应力云图,从图上可以明显看出该平面位置处存在两个高雷诺应力区,最高可达  $0.031U_b^2$ ,第一个位置与工况 1 类似,是挡板外缘的剪切层的原因;第二个高雷诺应力区位于第一个高雷诺应力区的下游,这表明该水平面处流场受到其他位置处湍流结构的影响,对高应力区的发展和扩散造成了影响。

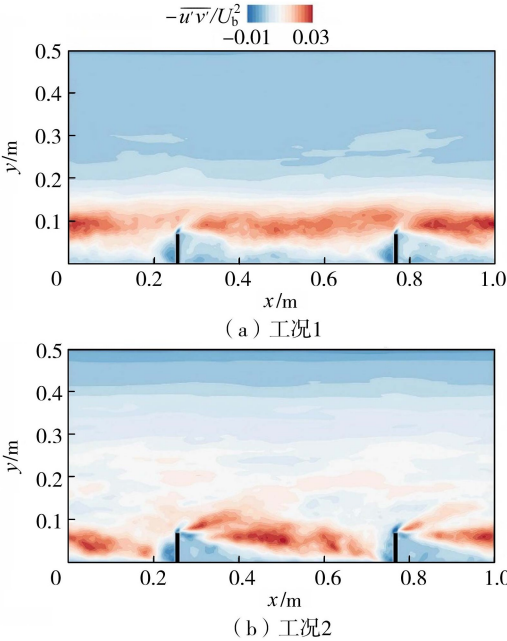


图 5 雷诺应力分布 ( $z/H=0.5$ )

紊动能是反映水体湍动性质的重要指标,也是鱼类水力学中的重要参数<sup>[19]</sup>。两种工况的无量纲化紊动能( $K/U_b^2$ )分布如图 6 所示。从图 6 可以看出,挡板下游与水槽边壁出现明显的低紊动区,这一范围与低雷诺应力区基本一致。高紊动区从挡板外缘向下游和水槽侧壁发展,其主要由该位置处剪切层脱落导致。两种工况下的最大无量纲化紊动能分别为 0.111 和 0.125,表明随着水位的降低,涵洞内部的水流紊动更加剧烈,这与 Luo 等<sup>[20]</sup>的研究一致。除此之外,最大紊动能出现的位置也有差异,工况 1 在下游发展一段距离后达到最大值,约在  $x=0.424\text{ m}$  位置处;工况 2 几乎在靠近挡板的下游侧就达到最大值,约在  $x=0.31\text{ m}$  位置处。通过挡板一半高度处流场的雷诺应力和紊动能分析可以看出,随着淹没度的下降,所在平面的水体紊动特性增强,紊动的扩散和发展方向也相应发生改变。

### 2.3 瞬时流场结构

图 7 为两种工况下挡板一半高度处( $z/H=0.5$ )的瞬时垂向涡量( $\omega_z$ )分布,红、蓝两种颜色云图分别代表了逆时针和顺时针的涡旋运动。从图 7 可以看出,工况 1 的高涡量区在展向上主要集中在  $y<$

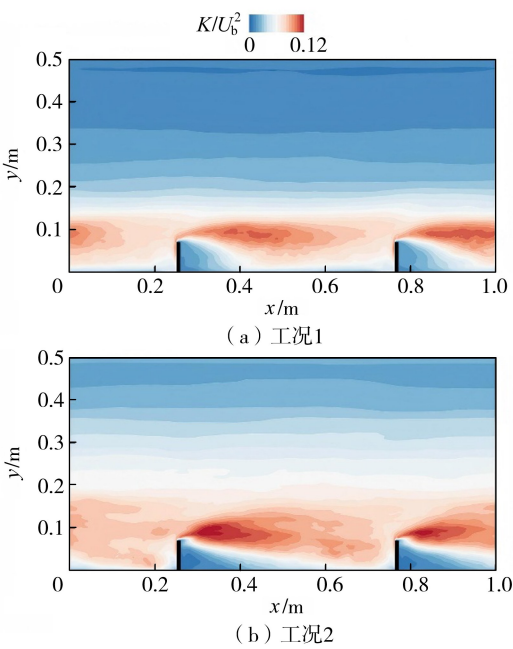


图 6 紊动能分布 ( $z/H=0.5$ )

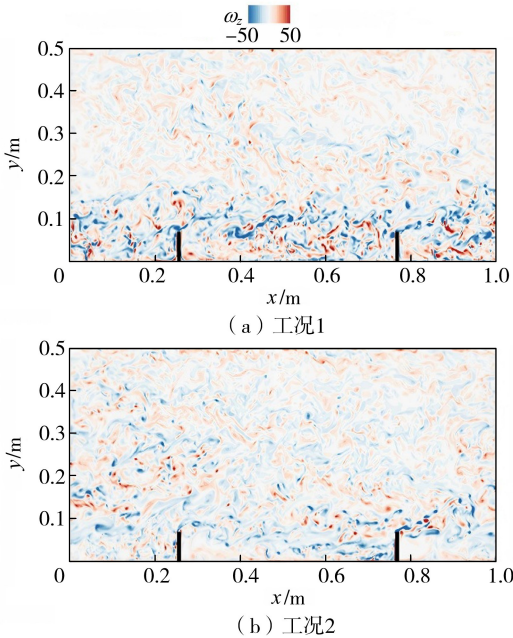


图 7 瞬时垂向涡量分布 ( $z/H=0.5$ )

$0.1\text{ m}$  的空间范围内,涡旋从挡板外缘开始脱落并且向下游发展至最大尺度。工况 2 的垂向涡量分布图与工况 1 具有显著差异,浅水工况中的涡旋脱落和发展的轨迹明显受到干扰,表现得更为无序,高涡量区甚至扩散到水槽中心线位置处。

为了避免剪切运动对识别流场涡旋的影响,采用  $Q$  准则<sup>[21]</sup> 绘制流场中的拟序结构。图 8 为工况 1 中三个视角下的涡旋结构分布图,为展示不同水深处的涡旋结构,采用相对水深( $z/H$ )着色,可以看出工况 1 中大量的涡旋结构主要集中在挡板一侧 ( $y<0.25\text{ m}$ ),并伴随不同尺度,其中可以明显观察到形状较为完整、尺度较大的涡旋结构,呈现出细

长、沿流向延伸的特征。这些涡旋结构有的是从剪切层脱落的涡旋,在剪切层中不断被拉伸向下游移动;有的是源于底部撕裂的马蹄涡向流动方向扩散。同时,在流场中也观察到大量的小尺度涡旋结构,这些往往是从剪切层脱落的涡旋结构由于开尔文-亥姆霍兹不稳定性逐渐分解<sup>[10]</sup>、耗散导致的。

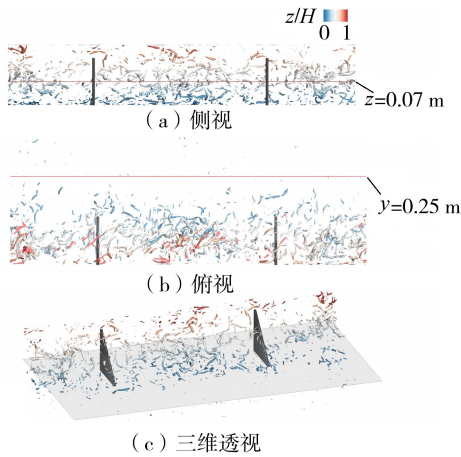


图8 Q 准则涡旋结构(工况 1)

图9为工况2中三个视角下的涡旋结构分布图,从图中可以看出,在垂向空间上,涡旋结构主要集中在两个位置:靠近床面位置和靠近水面位置。从图9(b)俯视图中可以进一步看出浅水工况流动下涡旋结构的展向空间分布与工况1的差异,可以明显看出工况2中的涡旋结构不再集中在挡板所在一侧,更多的涡旋结构分布在靠近水槽中心线甚至越过了水槽中心( $y>0.25\text{ m}$ )。此外,可以观察到着色为红色的涡旋结构明显多于着色为蓝色的涡旋结构,这表明工况2中靠近水面位置的紊动特性高于靠近床面位置的紊动特性。三维透视视角也证实了这一发现,靠近水面位置有一连串的发夹涡旋从挡板下游脱落,脱落的方向并没有平行于流向方向,而是向水槽中心线一侧偏移。

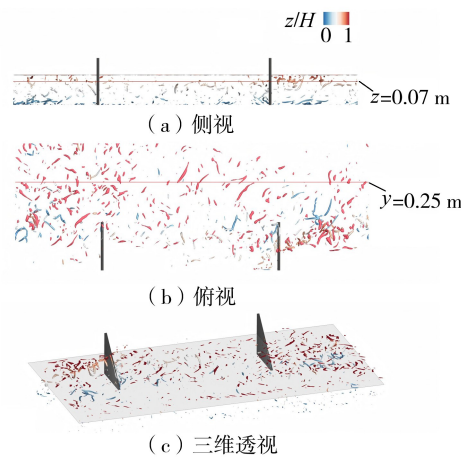


图9 Q 准则涡旋结构(工况 2)

### 3 结 论

a. 涵洞中的挡板诱导了流动分离,随着淹没度的下降,挡板下游的角涡消失,主循环区的大小随着淹没度的下降而增加。

b. 挡板所在一侧的剪切效应和紊动特性都高于无挡板的一侧,所在平面水体的剪切强度和紊动特性与淹没度呈负相关关系。水深降低后,水体紊动的扩散和发展也发生了改变。

c. 淹没度的改变显著影响了涡旋脱落和涡旋结构的分布,相比正常水深,浅水流动下的涡旋脱落更为无序,涡旋结构的分布向水槽中心线靠近,靠近水面的涡旋结构在强度上和数量上均高于床面附近的涡旋结构。

#### 参考文献:

[ 1 ] CHANSON H. Hydraulics of large culvert beneath roman aqueduct of Nîmes[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(5): 326-330.

[ 2 ] 洪亮. 基于小体型鱼类上溯行为的涵洞鱼道典型挡板水力特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.

[ 3 ] KROON F J, PHILLIPS S. Identification of human-made physical barriers to fish passage in the Wet Tropics region, Australia[J]. Marine and Freshwater Research, 2016, 67(5): 677-681.

[ 4 ] WANG Hang, UYS W, CHANSON H. Alternative mitigation measures for fish passage in standard box culverts: physical modelling [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2018, 19: 214-223.

[ 5 ] 毛劲乔, 陆鹏, 龚轶青, 等. 设置挡水隔板的鱼类友好型涵洞水力特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(7): 104-111. (MAO Jingqiao, LU Peng, GONG Yiqing, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of fish-friendly culverts with baffles [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(7): 104-111. (in Chinese))

[ 6 ] CABONCE J, FERNANDO R, WANG Hang, et al. Using small triangular baffles to facilitate upstream fish passage in standard box culverts [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019, 19(1): 157-179.

[ 7 ] DUGUAY J M, LACEY R W J. Numerical study of an innovative fish ladder design for perched culverts [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2016, 43(2): 173-181.

[ 8 ] CABONCE J, WANG Hang, CHANSON H. Ventilated corner baffles to assist upstream passage of small-bodied fish in box culverts[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2018, 144(8): 04018020.

[ 9 ] KHODIER M A, TULLIS B P. Experimental and

computational comparison of baffled-culvert hydrodynamics for fish passage[J]. Journal of Applied Water Engineering and Research,2018,6(3):191-199.

[10] OURO P, MUHAWENIMANA V, WILSON C A M E. Asymmetric wake of a horizontal cylinder in close proximity to a solid boundary for Reynolds numbers in the subcritical turbulence regime[J]. Physical Review Fluids, 2019,4(10):104604.

[11] 胡彬,水庆象,王大国,等.特征线算子分裂有限元的圆柱绕流大涡模拟[J]. 水利水电科技进展,2017,37(2):27-32. (HU Bin,SHUI Qingxiang, WANG Daguo, et al. Large eddy simulation of flow around circular cylinder combined with characteristic-based operator-splitting finite element method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(2):27-32. (in Chinese))

[12] ZHANG Peipei, GONG Yiqing, CHUA K V, et al. Numerical study of submerged bending vegetation under unidirectional flow[J]. Water Science and Engineering, 2024,17(1):92-100.

[13] 李晗玫,毛劲乔,龚轶青,等.圆柱形植物斑块水动力特性的大涡模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2022,37(1):108-114. (LI Hanmei, MAO Jingqiao, GONG Yiqing, et al. Numerical investigation of hydrodynamic properties of cylindrical vegetation patch using large-eddy simulation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2022,37(1):108-114. (in Chinese))

[14] 高欢,龚轶青,毛劲乔,等.基于 LES 的连续分布植物斑块水动力特性研究[J]. 工程科学与技术,2025,57(3):184-191. (GAO Huan, GONG Yiqing, MAO Jingqiao, et al. Study on hydrodynamic characteristics of continuous distribution vegetation patches based on LES [J]. Advanced Engineering Sciences,2025,57(3):184-191. (in Chinese))

[15] DAI Jie, MAO Jingqiao, GONG Yiqing, et al. Effect of triangular baffle designs on flow dynamics and sediment transport within standard box culverts [J]. Journal of Hydrodynamics,2024,36(6):1142-1154.

[16] DAI Jie, GONG Yiqing, WANG Kang, et al. Wake dynamics and turbulence structures of flow past two tandem circular cylinders near a plane wall[J]. Ocean Engineering,2025,334:121575.

[17] KIRKIL G, CONSTANTINESCU G, ETTEMA R. Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,135(11):888-901.

[18] SILVA A T, LUCAS M C, CASTRO-SANTOS T, et al. The future of fish passage science, engineering, and practice [J]. Fish and Fisheries,2018,19(2):340-362.

[19] MARRINER B A, BAKI A B M, ZHU D Z, et al. The hydraulics of a vertical slot fishway: a case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada[J]. Ecological Engineering,2016,90:190-202.

[20] LUO Qianyu, STOESSERT T, JALALABADI R, et al. Hydrodynamics and turbulence of free-surface flow over a backward-facing step[J]. Journal of Hydraulic Research, 2023,61(5):611-630.

[21] ALFONSI G. Coherent structures of turbulence: methods of education and results [J]. Applied Mechanics Reviews, 2006,59(6):307-323.

(收稿日期:2024-11-29 编辑:俞云利)

+++++

(上接第 90 页)

[11] 宋锦焘,葛佳豪,杨杰,等.基于时空聚类和深度学习的混凝土坝变形异常值识别方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):65-71. (SONG Jintao,GE Jiahao, YANG Jie, et al. A method for identifying deformation outliers in concrete dams based on spatio-temporal clustering and deep learning[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):65-71. (in Chinese))

[12] 王晓玲,李克,张宗亮,等.耦合 ALO-LSTM 和特征注意力机制的土石坝渗压预测模型[J]. 水利学报,2022,53(4):403-412. (WANG Xiaoling, LI Ke, ZHANG Zongliang, et al. Coupled ALO-LSTM and feature attention mechanism prediction model for seepage pressure of earth-rock dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(4):403-412. (in Chinese))

[13] HE Y, ZHAO J. Temporal Convolutional networks for anomaly detection in time series[J]. Journal of Physics; Conference Series,2019,1213(4):042050.

[14] AKIBA T, SANO S, YANASE T, et al. Optuna: a next-generation hyperparameter optimization framework [C]//Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. New York:ACM,2019:2623-2631.

[15] SCHMIDL S, WENIG P, PAPENBROCK T. Anomaly detection in time series: a comprehensive evaluation[J]. Proceedings of the VLDB Endowment,2022,15(9):1779-1797.

[16] HUNDMAN K, CONSTANTINOU V, LAPORTE C, et al. Detecting spacecraft anomalies using LSTMs and nonparametric dynamic thresholding [C]//Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. New York:ACM, 2018:387-395.

(收稿日期:2024-11-26 编辑:熊水斌)