

梯形透水潜坝三维水流特性的数值模拟

王小明^{1,2},程永舟^{1,3},常留红^{1,3},徐斌¹

(1.长沙理工大学水利工程学院,湖南长沙 410114; 2.长江航道规划设计研究院,湖北武汉 430011;
3.水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室,湖南长沙 410114)

摘要:基于OpenFOAM开源程序包,对4种透空率(0.1、0.2、0.3和0.4)潜坝的三维流场进行数值模拟,研究了透空率和流量对透水潜坝周围三维水流特性的影响规律。结果表明:相同流量条件下,随着透空率增大,坝后回流减弱,上升流高度降低,缓流区范围减小,涡量减小,坝体腔内及坝后透水圆孔附近紊动能增大;相同透空率条件下,随着流量增大,坝后缓流区范围增大,回流逐渐减弱,掺混紊动作用加剧,涡量及紊动能的大小和影响范围也逐渐增大。

关键词:透水潜坝;透空率;流场;涡量;紊动能;三维水流特性

中图分类号:TV865 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)05-0051-06

Numerical simulation of three-dimensional flow characteristics of trapezoidal permeable submerged dam//WANG Xiaoming^{1,2}, CHENG Yongzhou^{1,3}, CHANG Lihong^{1,3}, Xu Bin¹ (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Changjiang Waterway Institute of Planning, Design, and Research, Wuhan 430001, China; 3. Hunan Province Key Laboratory of Water, Sediment Sciences and Flood Hazard Prevention, Changsha 410114, China)

Abstract: Three-dimensional flow fields of submerged dams with four permeable rates (0.1, 0.2, 0.3, and 0.4) were numerically simulated based on the OpenFOAM open source package, and the influence of the permeable rate and discharge on the three-dimensional flow characteristics around permeable submerged dams was examined. The results show that, under constant discharge conditions, with the increase of the permeable rate, the reflux behind the dam is weakened; the upwelling height, the range of the slow-flow area, and the vorticity decrease; and the turbulent kinetic energy in the dam and near the permeable circular hole behind the dam increases. Under constant permeable rate conditions, with the increase of the discharge, the range of the slow-flow area behind the dam increases, the reflux is gradually weakened, the mixing is aggravated, and the vorticity and turbulent kinetic energy as well as their influence ranges increase.

Key words: permeable submerged dam; permeable rate; flow field; vorticity; turbulent kinetic energy; three-dimensional flow characteristics

潜坝附近的流场、涡量、紊动能等三维水流特性^[1]是潜坝结构设计及优化的关键因素之一。国内外学者对丁坝周围水流特性做了大量应用研究^[2-5],发现传统丁坝在发挥整治效果的同时,改变了局部流场和冲淤条件,影响了河段的生态环境。而且这些影响较为复杂,时间跨度很长。随着人们对生态环境保护认识的不断深入,近年来各种透水丁坝结构成为工程界和学术界的研究热点。周根娣等^[6]和李若华等^[7]分别研究了四面六边透水框架和框架群附近的水流特性。根据结构透水性的特点,丁晶晶等^[8]将丁坝的实体坝头改成由四面体透水框架铰接而成的透水坝头,认为最优透空率的透

水坝头可有效分散集中绕流,减弱坝头脱离涡,阻滞下潜流,使用透水坝头控制局部冲刷的效果最好。Uijtewaal等^[9]提出了下部为常规丁坝,上部为透水桩坝的组合式丁坝,通过研究认为下游大漩涡是形成主流掺混的主要原因。周根军等^[10]提出了桩柱式透水丁坝,并在研究其局部水头损失系数与阻水流量的关系式基础上,得到了单个桩柱透水丁坝在非淹没状态下局部水头损失系数的经验公式。孙东坡等^[11]研究了新型管桩潜坝的导流及冲刷规律,并结合量纲拟合得到局部冲刷计算方法。嵇欧洋^[12]利用物理模型试验围绕管桩透水顺坝的消浪性能、波压力及护底防冲刷效果进行研究,发现该透

基金项目:国家自然科学基金(51679015);国家重点研发计划(2016YFC0402108);湖南省自然科学基金(2015JJ2006)

作者简介:王小明(1989—),男,硕士研究生,主要从事波浪、水流及其与建筑物相互作用研究。E-mail:1203248419@qq.com

通信作者:程永舟(1974—),男,教授,博士,主要从事港口航道与海岸工程研究。E-mail:chengyongzhou@163.com

水结构消浪效果显著,结构优势明显。

综上所述,在有关透水坝体的研究中,鲜有定量考虑透空率和水流条件对坝体附近三维水流特性影响规律的内容。本文基于 OpenFOAM 中不可压缩气液两相流求解器 interFoam^[13] 建立三维数值水槽,模拟 4 种透空率潜坝在不同流量条件下周围的三维流场。然后根据数值计算结果,分析透空率和水流条件的变化对潜坝周围三维水流特性的影响规律,以为透水潜坝的推广应用提供理论依据。

1 数值模型

1.1 控制方程

不可压缩气液两相流的连续性和动量方程分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T] = -\nabla p^* - g \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u} + \rho \boldsymbol{\tau}] \quad (2)$$

其中
$$\boldsymbol{\tau} = \frac{2}{\rho} \mu_t S - \frac{2}{3} k \mathbf{I}$$

式中: \mathbf{u} 为笛卡尔坐标系下流速; ρ 为密度; p^* 为动水压强; g 为重力加速度; μ 为流体的动力黏度; $\boldsymbol{\tau}$ 为雷诺应力; μ_t 为湍流黏度; S 为应变速率; k 为紊动能; \mathbf{I} 为 Kronecke 张量。

1.2 数值模拟方法

不可压缩气液两相流求解器 interFoam 采用的控制方程为式(1)(2)。数值流场中 N-S 方程通过有限体积法(FVM)进行离散,方程求解采用 PIMPLE 算法实现流体速度解耦,拉普拉斯项离散采用修正后 Gauss 线性离散格式,时间离散采用 Euler 格式。而对空间进行的离散采用有限体积法。计算区域被分解成各个控制体,即离散的体积元。偏微分方程的通量形式在不同体积元之间相互联系。通常情况下流出体积元的通量等于流入的通量,所以有限体积法一般是守恒的。此过程涉及的量值(流速等)是计算在体积元质心的。相邻质心之间数值通过差值来确定。interFoam 求解器采用流体体积法(VOF)对两相流自由界面进行捕捉,并以 VOF 输运方程中的体积分数 α 对两相流自由界面进行定义,其值大小代表液体在计算网格中所占体积比例^[14], $\alpha = 1$ 表示液体, $\alpha = 0$ 表示气体, α 介于 0 和 1 之间表示该网格为气液交界面。VOF 方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u} \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (3)$$

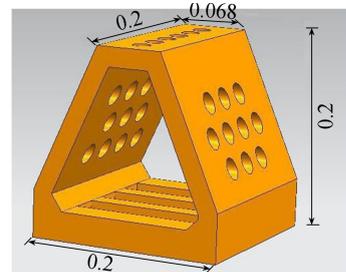
式中: \mathbf{u}_r 为相对速度;最后一项 $\nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)]$ 属于人工压缩项。

1.3 数学模型参数及网格划分

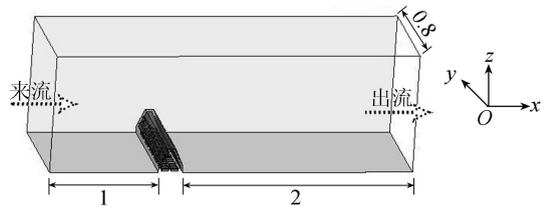
数值水槽(长 3.2 m、宽 0.8 m、高 1.0 m)以透水潜坝(长 80 cm、高 20 cm、上底宽 6.8 cm、下底宽 20 cm)的底部中轴线中点位置为原点,水流方向为 x 轴正方向,水槽断面方向为 y 方向,水深方向为 z 方向建立空间直角坐标系(图 1(b))。透空率 N 是指坝身迎水面开孔总面积 $S_{孔}$ 与迎水面板在过水断面上投影面积的比值,即: $N = \frac{S_{孔}}{0.13 \times 0.2}$ (见表 1 及图 1)。数值水槽及潜坝模型参数见表 1,数值模型结构及网格见图 1。

表 1 数值水槽及潜坝模型参数

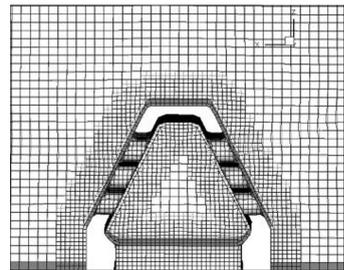
数值水槽			透水潜坝			
流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/ m	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	N	开孔直径/ mm	开孔个数	
					前	后
0.074	0.635	0.145	0.1	17	11	10
0.120	0.700	0.214	0.2	25	11	10
0.220	0.850	0.323	0.3	27	14	13
			0.4	35	11	10



(a) 透水潜坝结构尺寸



(b) 数值水槽布置



(c) 网格划分

图 1 数值模型结构及网格(单位:m)

数值水槽计算模型整体采用分区多块渐变式网格。考虑到水流为恒定单向流,数值水槽采用求解精度较高的边长为 1 cm 的六面体结构化网格进行划分。对结构复杂的透水潜坝采用网格划分工具进行划分,对结构本身采用边长为 5 mm 的加密结构化

网格填充。坝体边缘及与外层网格的衔接部分采用非结构化的三角棱柱网格。同时透水潜坝表面设置边界层网格,以保证其附近流场求解的精确性。透水潜坝表面至水槽其他区域网格密度渐进变化,以保证数值计算的稳定性。数值水槽上边界恒量来流、下边界恒压出流,并按坝前附近的断面流速为控制条件。水槽边壁和透水潜坝表面为固壁无滑移边界。

2 模型验证

验证试验在长沙理工大学水利实验中心水槽中进行。水槽长 45 m、宽 0.8 m、高 1 m,试验水深 0.6~0.85 m,如图 2 所示。试验的流量变化用计算机控制,同时水槽尾部设置调节水位的格栅尾门。流速测量采用 Sontek 公司研制的超声多普勒流速仪,在试验前对仪器进行标定。验证试验选取长 0.8 m、高 0.2 m、透空率为 0.2 的潜坝在 $Q = 0.074 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ 两种流量工况条件下进行。



图 2 验证试验布置图

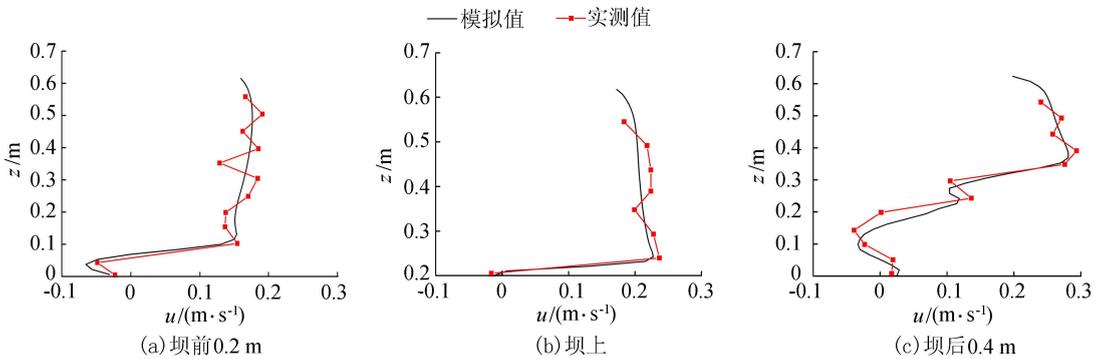


图 3 水槽中轴线上各点垂向流速 ($Q=0.074 \text{ m}^3/\text{s}$)

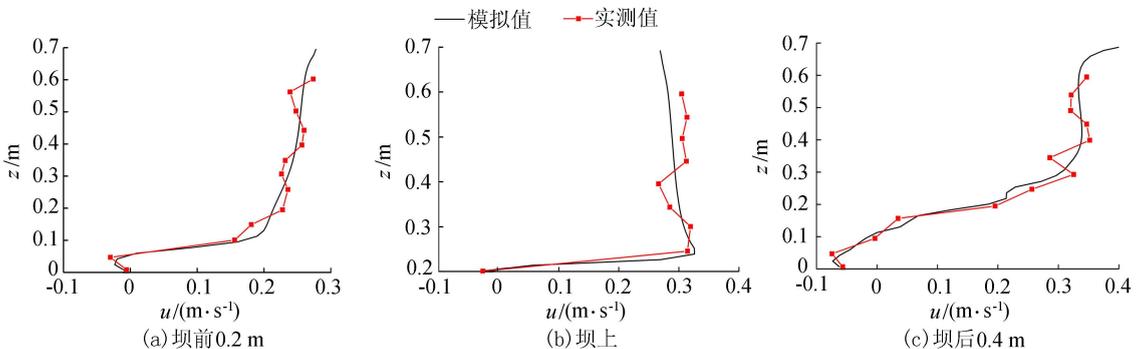


图 4 水槽中轴线上各点垂向流速 ($Q=0.12 \text{ m}^3/\text{s}$)

分析 2 种工况条件下坝前 0.2 m、坝上和坝后 0.4 m 这 3 个位置的垂线流速 u 分布,发现数值计算结果与实测垂线流速吻合较好,两者间最大误差小于 5% (图 3 和图 4),表明该三维数值模型可以较好地模拟透水潜坝周围三维流场。

3 结果与分析

3.1 透空率对透水潜坝周围水动力特性的影响

流量为 $0.074 \text{ m}^3/\text{s}$ 时不同透空率的三维水流特性如图 5 所示。由图 5 可知坝顶上部流速均有明显增大,最大流速约为上游平均流速的 1.5 倍;坝后水域急流主要集中在上部流区。坝体腔内及坝后约 0.7 m ($3.5H$ (坝高)) 范围内,水流均较为平缓,同时在该水域范围内涡旋回流现象显著,强度随透空率的增大而减小。坝前水流受顶托上升汇聚导致坝上水流流速增大,形成上部急流区。上部急流区、坝后上升流及底部回流等共同作用形成了坝后涡旋回流现象。但随着透空率增大,单位时间内透过坝体的

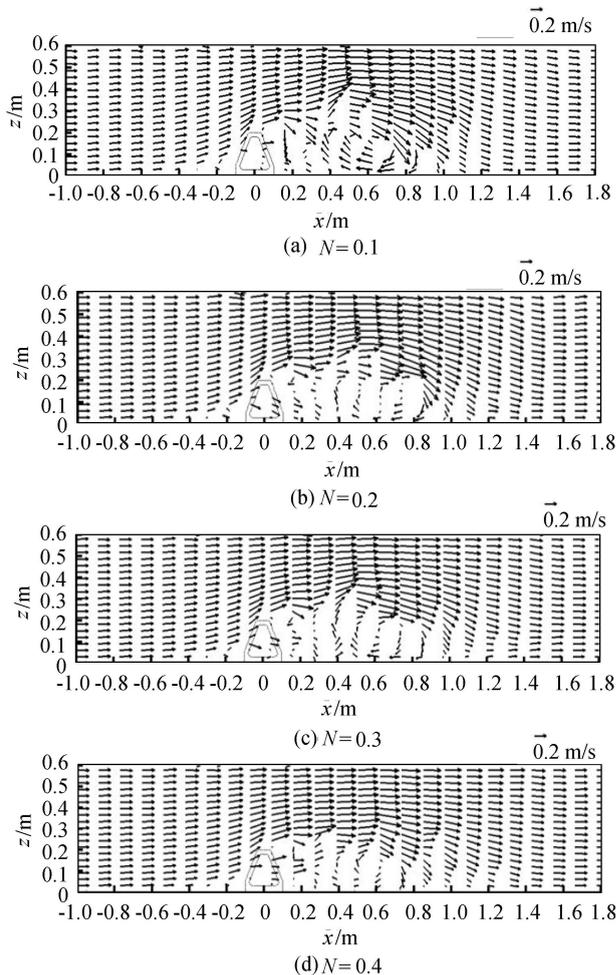


图5 不同透空率透水潜坝周围流速场 ($Q=0.074 \text{ m}^3/\text{s}$)

流量增大,坝后底部回流受到抑制,上升流强度降低,高度减小,涡旋下移变弱。坝前水流较为平顺,坝体腔内除透水孔附近流速较大外,腔内整体水流比较平缓。可以看出同一流量条件下,透空率变化对坝后水域流速影响范围影响不大。对比发现,坝后水域回流流速随着透空率增大而逐渐减小,回流区域位置顺水流方向下移。当透空率为0.4时,涡旋回流基本消失,形成范围更大的掺混紊流区。这是因为透空率增大后,潜坝透水能力增强,坝后底部顺流流速增大。坝后底部和上部水域流速差逐渐变小,涡量减弱,回流涡旋消失,回流流速随之减小。

由图6和图7可知,随着透空率增大,坝前水域涡量强度逐渐减弱。坝后 $3.5H$ 范围内涡量正负间隔分布,强度逐渐减小。而紊动强度较大的区域主要是坝体前后透水圆孔附近。同时由于坝顶上游侧端部对水流的顶托作用,形成一个高紊动强度集中区。由图5可知:高紊动强度条带刚好处于急流区与坝后缓流区分界线附近,分界线两侧流速差较大,中间区域水体交换剧烈,紊动作用较强。另外发现在坝后 $0.6 \sim 0.8 \text{ m}$ ($2.5H \sim 3.5H$)范围内底部涡量和紊动能分布强度较大,但随着透空率增大,两者

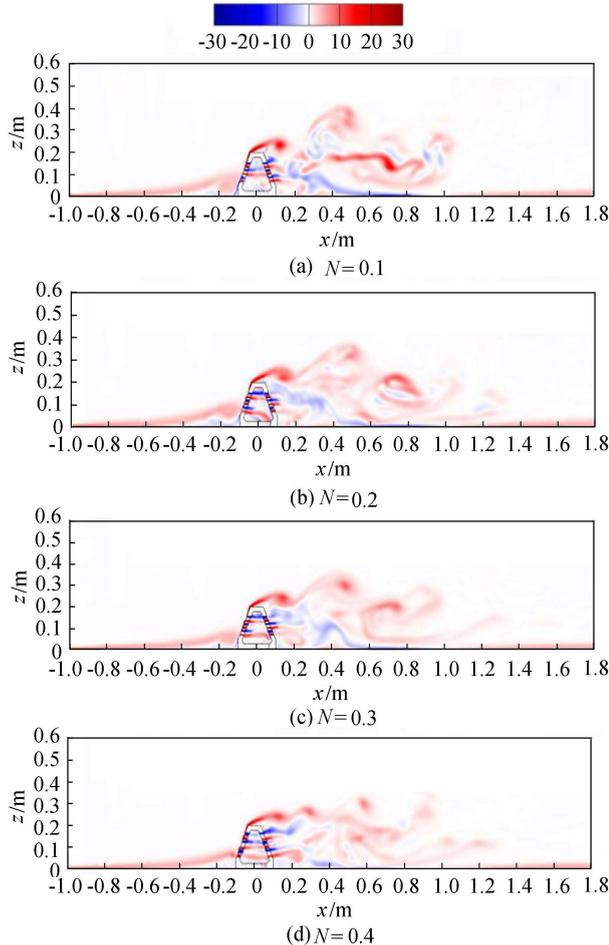


图6 不同透空率透水潜坝周围涡量 ($Q=0.074 \text{ m}^3/\text{s}$, 单位: s^{-1})

强度却逐渐减小。这是因为坝体本身的透水能力增大后,该区域水体紊动受顺水流方向的流速影响作用增强,紊动减弱。

3.2 流量对透水潜坝周围水动力特性的影响

由图8可知坝后缓流区范围随流量增大而增大,而坝后上升流高度随流量增大而逐渐降低。这是因为随着流量增大,流速增大,坝体遮挡作用凸显,坝后缓流区范围后移拉长。上升流遇到上部急流后形成掺混紊动作用,能量迅速耗散,上升流作用减弱,高度降低。另外随着流量增大,坝后涡旋回流区逐渐下移,减弱。这是由于流量增大后,坝体结构整体透水能力变大,底部水流流速增大。底部水流与坝后涡旋回流形成掺混紊动作用,能量迅速耗散,涡旋回流作用逐渐后移减弱。另外在来水流量增大过程中,坝后近底部流速及腔内流速均比较平缓,都在 0.2 m/s 以下。这是由于翻坝水流、过坝水流、下潜流及坝后回流共同作用下,水体紊动强烈,能量耗散迅速,流速平缓。

由图9可知,随着流量增大,涡量增大,影响范围增大。同时发现正负涡量间隔分布,这是造成涡旋形成的主要动力因素。总体来讲涡量强度较大位置主要是透水潜坝前后透水孔附近及沿潜坝顶端偏

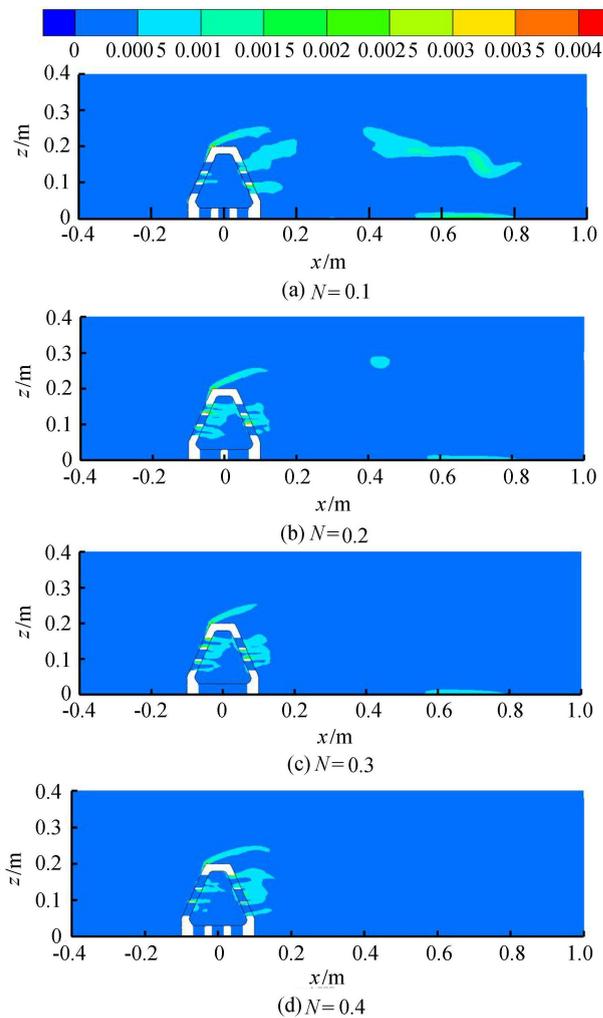


图7 不同透空率透水潜坝周围紊动能 ($Q=0.074 \text{ m}^3/\text{s}$, 单位: J)

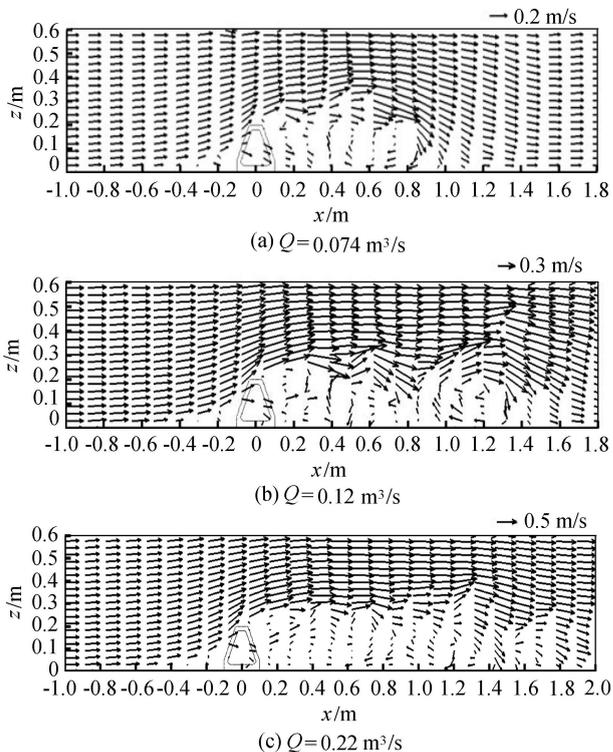


图8 不同流量时透水潜坝周围流速场对比 ($N=0.2$)

上游侧到坝后下游水流一定范围内。同时可以看到坝后涡量强度最大位置的分布和涡旋一致。

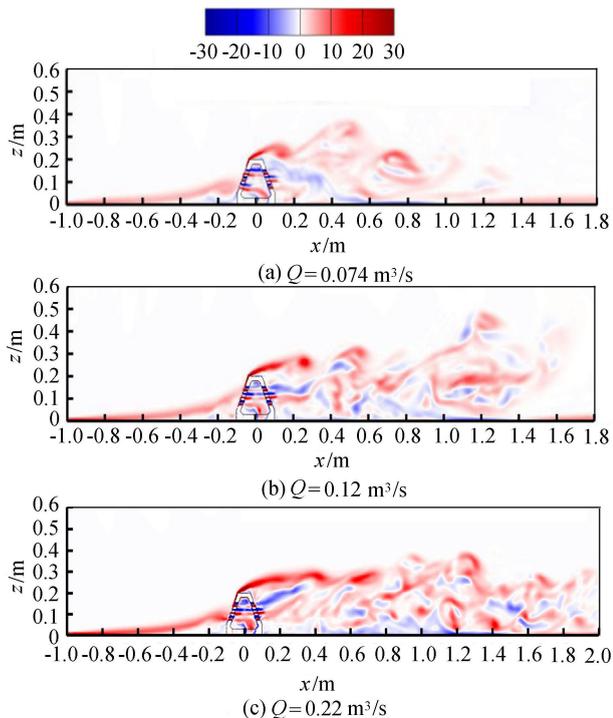


图9 不同流量时透水潜坝周围涡量对比 ($N=0.2$, 单位: s^{-1})

由图 10 可知, 坝体腔内及坝后一定水域的紊动能随流量增大而增大, 影响范围也逐渐增大。但值得注意的是紊动强度较大的区域主要分布在坝后水流平缓区域的边缘和坝体透水孔及其下游附近。水流平缓边缘区及坝后一定水域的紊动强度较大也造

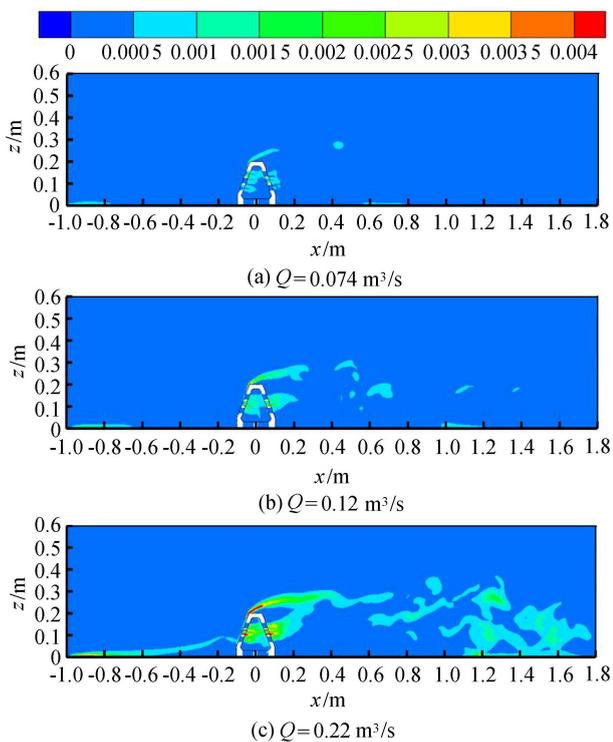


图10 不同流量时透水潜坝周围紊动能对比 ($N=0.2$, 单位: J)

成坝后水域剧烈能量耗散,水流流速减小。透水孔附近水流紊动随流量增大而逐渐增强,而坝后底部强紊动区位置随流量增大逐渐后移,强度也逐渐增大。坝体腔内及坝后 $2H$ 范围内底部水流紊动都较弱。

4 结 论

a. 相同流量条件下,随着透水潜坝透空率增大,坝后回流减弱,上升流高度降低,缓流区范围逐渐减小,涡量逐渐减小,坝体腔内及坝后透水圆孔附近紊动能的大小增大。

b. 相同透空率条件下,随着流量增大,梯形透水潜坝后缓流区范围增大,回流流速逐渐减小,掺混紊动作用更加剧烈。涡量及紊动能增大,影响范围也增大。

c. 梯形透水潜坝周围流场三维水流特性显著:坝顶上部水域流速较大,而坝体腔内及坝后 $3.5H$ 坝高范围内在3种流量条件下水流均较平缓。当透空率为0.2时,防护围挡效果更加显著。

参考文献:

[1] YOSSEF M F M, de VRIEND H J. Flow details near river groynes: experimental investigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 137(5): 504-516.

[2] KUHNLE R A, JIA Y F, ALONSO C V. Measure and simulation flow near a submerged spur dike [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(7): 916-924.

[3] 于守兵, 陈志昌, 韩玉芳. 淹没丁坝端坡对附近水流结构的调整作用 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(1): 39-46. (YU Shoubing, CHEN Zhichang, HAN Yufang. Submerged spur dike end slope on the flow structure near adjustment effect [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(1): 39-46. (in Chinese))

[4] 应强. 淹没丁坝附近的水流流态 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 1995, 23(4): 62-68. (YING Qiang. Flow pattern near the submerged spur dike [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1995, 23(4): 62-68. (in Chinese))

[5] 刘易庄, 蒋昌波, 邓斌, 等. 淹没双丁坝间水流结构特性 PIV 试验 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 26-30. (LIU Yizhuang, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Double submerged groin flow structure characteristics of PIV test [J]. Development of Water Conservancy and Hydropower Science and Technology, 2015, 35(6): 26-30. (in Chinese))

[6] 周根娣, 顾正华, 高柱, 等. 四面六边透水框架尾流场水

力特性 [J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 9-12. (ZHOU Gendi, GU Zhenghua, GAO Zhu, et al. Hydraulic characteristics of the end flow field of the six side permeable frame [J]. Journal of Yangtze River Science, 2005, 22(3): 9-12. (in Chinese))

[7] 李若华, 王少东, 曾甄. 穿越四面六边透水框架群的水流阻力特性试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2005(10): 64-66. (LI Ruohua, WANG Shaodong, ZENG Zhen. Experimental study on the characteristics of water flow in the six side permeable frame [J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2005(10): 64-66. (in Chinese))

[8] 丁晶晶, 陆彦, 陆永军. 透水框架在改进丁坝结构型式上的应用 [J]. 水利水运工程学报, 2014(6): 30-38. (DING Jingjing, LU Yan, LU Yongjun. In the framework of the application of improved permeable groin structure type [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(6): 30-38. (in Chinese))

[9] UIJTTEWAAL W S J, LEHMANN D, MAZIJK A. Exchange processes between a river and its groin fields: model experiments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(11): 928-936.

[10] 周银军, 刘焕芳, 冯源. 桩柱透水丁坝的局部水头损失试验 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(1): 73-76. (ZHOU Yinjun, LIU Huanfang, FENG Yuan. The local head loss test pile permeable spur dike [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science Edition), 2009, 42(1): 73-76. (in Chinese))

[11] 孙东坡, 孟志华, 耿明全, 等. 新型管桩潜坝的局部冲刷研究 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 88-93. (SUN Dongpo, MENG Zhihua, GENG Mingquan, et al. Research on the local scour of the new type of tubular pile [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2012, 31(3): 88-93. (in Chinese))

[12] 嵇欧洋. 管桩抛石顺坝在侵蚀性海岸保滩工程中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(增刊1): 132-135. (JI Ouyang. Application of pipe pile riprap along dam in erosion coastal beach protection project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(Sup1): 132-135. (in Chinese))

[13] OPEN C F D. OpenFOAM user guide [J]. OpenFOAM Foundation, 2011, 2(1): 35-41.

[14] LOPES P, LEANDRO J, CARVALHO R F, et al. Numerical and experimental investigation of a gully under surcharge conditions [J]. Urban Water Journal, 2015, 12(6): 468-476.

(收稿日期:2016-10-10 编辑:刘晓艳)