

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.007

开孔率与布置间距对透空型双丁坝水动力与冲淤特性的影响

常留红^{1,2}, 廖奕^{1,2}, 章富君³, 曾浩荣^{1,2}, 张国安^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 江西省赣抚平原水利工程管理局灌溉试验中心站, 江西 南昌 330201)

摘要:采用三维水动力和泥沙数值模型, 模拟分析了不同开孔率和不同布置间距的透空型双丁坝局部三维水动力特性和冲淤特性以及对水生生物生境的影响。结果表明:透空型双丁坝周围流场结构丰富, 形成了上丁坝坝内环流区、坝间主副环流区以及下丁坝坝后缓流区, 有利于有机质富集; 开孔率 15% 时透空型双丁坝坝间主环流区和坝间涡量最大, 坝间涡量以及紊动能随布置间距的增大而增大, 控制开孔率大小并适当增大布置间距有利于底栖生物索饵洄游; 最大切应力与上游切应力的比值随着开孔率和布置间距的增大逐渐降低, 适当增大布置间距并选择较大的开孔率可减轻下泄水流对坝后河床的冲刷; 坝内及坝后淤积范围和高度随开孔率增大而减小, 随布置间距增大而增大, 实际工程中适当提高开孔率和布置间距有利于透空丁坝减速促淤, 为底栖生物提供丰富的饵料。

关键词:透空型双丁坝; 开孔率; 布置间距; 水动力特性; 冲淤特性

中图分类号:TV863

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)06-0045-08

Effect of opening rate and arrangement spacing on hydrodynamic and erosion-deposition characteristics of permeable double spur dikes

CHANG Liuhong^{1,2}, LIAO Yi^{1,2}, ZHANG Fujun³, ZENG Haorong^{1,2}, ZHANG Guoan^{1,2}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;

3. Jiangxi Ganfu Pingyuan Water Conservancy Engineering Administration Irrigation Test Center Station, Nanchang 330201, China)

Abstract: A three-dimensional hydrodynamic and sediment numerical model was used to simulate and analyze the local three-dimensional hydrodynamic characteristics and erosion-deposition characteristics of permeable double spur dikes with different opening rates and arrangement spacings, as well as their effects on aquatic habitats. The results show that the flow field structure around the permeable double spur dike is rich, forming the inner circulation of the upper spur dike, the main and auxiliary circulation between the dams and the slow flow area behind the lower spur dike, which is conducive to the enrichment of organic matter. When the opening rate is 15 %, the main circulation area and inter-dam vorticity of the permeable double spur dike are the largest. The vorticity and turbulent kinetic energy near the dam increase with the increase of the arrangement spacing. Controlling the opening rate and appropriately increasing the arrangement spacing are beneficial to the migration of benthic organisms. The ratio of the maximum shear stress to the upstream shear stress gradually decreases with the increase of the opening rate and the arrangement spacing. Appropriately increasing the arrangement spacing and selecting a larger opening rate can reduce the scour of the discharged water on the riverbed behind the dam. The range and height of siltation in the dam and behind the dam decrease with the increase of the opening rate, and increase with the increase of the arrangement spacing. In the actual project, properly increasing the opening rate and the arrangement spacing can better achieve the effect of deceleration and siltation of the permeable spur dike, and provide abundant bait for benthic organisms.

Key words: permeable double spur dike; opening rate; arrangement spacing; hydrodynamic characteristics; erosion and deposition characteristics

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200401);湖南省自然科学基金项目(2021JJ30703)

作者简介:常留红(1979—),女,副教授,博士,主要从事水工结构与水生态修复研究。E-mail: claire886@163.com

引用本文:常留红, 廖奕, 章富君, 等. 开孔率与布置间距对透空型双丁坝水动力与冲淤特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 45-52.

CHANG Liuhong, LIAO Yi, ZHANG Fujun, et al. Effect of opening rate and arrangement spacing on hydrodynamic and erosion-deposition characteristics of permeable double spur dikes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 45-52.

随着绿色航道建设的不断推进,各种透空型丁坝在航道整治工程中得到越来越多的应用,此类结构一定程度上改变了水流特性,提升了工程区附近的生境异质性程度。透空型丁坝水动力和局部冲淤特性可为底栖生物的生长繁殖提供良好的环境^[1-2],而结构参数以及布置参数对透空型丁坝性能发挥有重要影响,亟须开展开孔率与布置间距对透空型丁坝水动力与冲淤特性影响的研究。

丁坝水流分布特征影响因素有丁坝结构特征、透空率以及布设排数等。方强等^[3]、王世鹏等^[4]分别研究了方形和梯形丁坝附近时均流速沿程分布规律。张婧等^[5]通过水槽试验,研究了丁坝周围的回流区、水流流态以及流层之间的水流掺混情况。钟亮等^[6-8]研究了不同丁坝纵向分布规律和不同丁坝附近纵向流速的差异。欧阳澍等^[9]基于纳维-斯托克斯方程探讨了透空率、水深、流速等对透空潜坝涡量变化的影响,结果表明相同条件下随流速增大,坝体顶部和孔隙处正负涡量场分布范围增大。李有为^[10]研究了不同孔隙率的透空丁坝周围的流场特征,孔隙率增大能减弱上游的剪切流动,使得尾流涡向下游移动,有利于丁坝结构平稳。不少学者对丁坝周围三维水动力特性和冲淤规律进行了研究。蒋学炼等^[11]研究表明,生态环结构周围涡流结构会改变周围局部流场进而影响冲淤。杜升涛等^[12-13]开展了不同来水条件对结构周围冲刷特性影响的研究,结果表明床面切应力与水流强度正相关,且随着床面切应力的增大泥沙冲刷效率明显提高。齐梅兰等^[14]通过推移质和悬移质的河床变形模型揭示了水流作用下沙质河床水工建筑物周围床面冲刷过程,发现推移质输沙率与床面切应力变化趋势一致。杨兰等^[15]对上挑丁坝群进行了定床和动床三维数值模拟计算,认为河床切应力、下潜水流和旋涡是坝头冲刷的主导因素。Nayer等^[16]发现流速、压强、剪应力和紊动能等水动力特性是形成冲刷坑的主要原因,且丁坝最大冲深位置出现在水动力特征最大值处。黄君保等^[17]研究了水流引发河道水工建筑物局部冲淤的机理,当床面切应力大于床面泥沙临界切应力时,泥沙开始启动输运。张功瑾等^[18-19]研究了坝间淤积形态及淤积速率的主要影响因素,并探讨了不同长宽比坝间水流结构、淤积形态和淤积速率以及坝间与主槽水沙交换的规律。杨旭亮等^[20]基于计算流体力学数值模型研究了双丁坝附近流场和局部冲淤特性。以往研究主要针对不透水丁坝或透水单丁坝周围三维水动力特性与局部冲淤规律,本文以镇扬河段的仪征水道为研究河段,构建透空型双丁坝模型模拟分析开孔率和布置间距对透空型双丁坝三维水动力和泥沙冲淤的影响规律,以期对透空型丁坝设计、施工和管理提供参考。

1 水动力与泥沙冲刷模型

1.1 研究河段概况

仪征水道全长 31 km,江中世业洲将水道分为左右两汉,右汉为主汉,河道弯曲,平均河宽约 1 450 m;左汉为支汉,为顺直型河道,平均河宽约 880 m。仪征水道采取丁坝等护岸工程措施守护世业洲头低滩,稳定汉道分流格局,并通过丁坝等护岸工程措施适当调整右汉进口段流场,增大右汉中上段河槽水流动力。

1.2 控制方程

基于连续性方程以及不可压缩纳维-斯托克斯方程,建立三维水动力模型,分别采用 VOF (volume of fluid) 法对自由表面进行追踪,并利用有限差分法在计算区域内的网格点上对控制方程进行时间离散和空间离散。连续方程和动量方程如下:

∂(A_iu_i)/∂x_i = 0 (i = x, y, z) (1)

∂u_i/∂t + 1/V_F(A_iu_j ∂u_i/∂x_j) = - 1/ρ ∂p/∂x_i + G_i + f_i (i = x, y, z; i ≠ j) (2)

式中:A_x、A_y、A_z分别为空间坐标系下 x、y、z 方向可流动流体的面积分数;u_x、u_y、u_z分别为空间坐标系下 x、y、z 方向的速度分量;ρ 为流体密度;V_F为可流动流体的体积分数;G_x、G_y、G_z分别为物体在空间坐标系下 x、y、z 方向的重力加速度;f_x、f_y、f_z分别为空间坐标系下 x、y、z 方向上流体的黏滞力加速度。

1.3 模型建立

透空型丁坝原型为长 5 m、高 5 m、上底宽 1.7 m、下底宽 5 m 的钢筋混凝土薄壁结构,错孔方式开孔。为精准模拟透空型丁坝周围三维水动力特性,同时模型应符合几何相似、水流运动相似和动力相似等条件,模型比尺选为 1 : 25 的,分别建立 10%、15%、20% 等 3 种不同开孔率的透空型丁坝模型,模型由两个长 0.6 m、高 0.2 m、上底宽 0.068 m、下底宽 0.2 m 的构件组成,开孔数与方式均与原型保持一致。模型布置间距设置为

2.0H、2.5H、3.0H(H为透空型丁坝高度),透空型双丁坝三维数值模型如图1所示。参考张瑞瑾公式计算泥沙的起动流速,通过泥沙粒径和起动流速的计算与分析比选,确定模型沙密度为 1.056 t/m^3 、中值粒径为 0.68 mm 、泥沙粒径比尺为 0.26 ,图2为原型沙和模型沙级配曲线。

1.4 边界条件与网格划分

为研究透空型双丁坝周围三维水动力特性,建立以上游丁坝靠岸前 0.1 m 处为原点,丁坝长度方向指向右岸为 x 轴正方向、水流方向为 y 轴正方向、垂直向上为 z 轴正方向,长、宽、高分别为 20.0 、 1.2 、 1.0 m 的三维数值水槽,如图3所示。为精确捕捉局部流场结构,在透空型丁坝附近进行网格加密嵌套,其余部分适当降低网格大小,在其周围采用边长分别为 10 、 20 、 40 mm 的渐变嵌套网格。左边界为指定速度边界,右边界为压力出流边界,将模型两侧和底部设置为无滑移的壁面边界条件,其余边界为对称边界,流体在该边界条件上的通量和剪切力都为 0 。

用于研究透空型双丁坝冲淤特性的计算区域尺寸为 2.4 m (长) $\times 0.8\text{ m}$ (宽) $\times 1.0\text{ m}$ (高),沙床尺寸为 1.0 m (长) $\times 0.8\text{ m}$ (宽) $\times 0.1\text{ m}$ (高),沙床厚度为丁坝高度,即 0.2 m 。透空型双丁坝布置在沙床表面,前后各布置尺寸为 0.8 m (长) $\times 0.2\text{ m}$ (宽) $\times 0.3\text{ m}$ (高)的固体挡板防止水流从计算区域底部冲刷入流与流出处的沙床。计算区域的入口采用网格覆盖边界(grid overlay),将充分发展的紊流模拟结果作为透空型双丁坝的水流条件。计算区域网格划分与水流模拟的网格划分基本一致,在沙床部位采用精度较高的 1 cm 网格,透空型双丁坝局部采用 5 mm 的边界层网格加密,边界条件与水流模拟一致,数值水槽左边界为指定速度边界,流速、水深由不同工况的流量计算得到;右边界为压力出流边界,模型两侧和底部设置为无滑移的壁面边界条件,无滑移边界条件表示该边界上流体的速度为 0 ,但其周围流体具有流速梯度;其余边界为对称边界,流体在该边界条件上的通量和剪切力都为 0 。泥沙冲刷模拟网格划分见图4。相似模型验证已完成,且数值计算结果与试验水槽实测曲线吻合较好,可用于泥沙冲刷模块计算^[1]。待紊流发展充分后开启泥沙运动模块,冲淤计算时间为 40 min 。

1.5 计算工况

选取研究河段洪季径流以分析透空型双丁坝对底栖生物繁殖及索饵的影响,洪季径流量为 $57\,500\text{ m}^3/\text{s}$,通过河段整体二维数学模型计算得到计算区域对应流量为 $0.147\text{ m}^3/\text{s}$,流速为 0.247 m/s ,水深为 0.744 m ,糙率为 0.035 。开孔率为影响透空型双丁坝减速促淤效果的重要指标,开孔率选择与原型保持一致,选取 10% 、 15% 、 20% 3种开孔率以及 $2.0H$ 、 $2.5H$ 、 $3.0H$ 3种布置间距对应的透空型双丁坝模型,以分析开孔率与布置间距对透空型双丁坝水动力与冲淤特性的影响。

2 水动力特性

基于透空型双丁坝模型,分析模型在不同布置间距和不同开孔率等条件下附近流速、涡量、紊动能等水流特性,采取控制单一变量法研究水流特性对丁坝局部三维水动力特性的影响。

2.1 不同开孔率对双丁坝水动力特性的影响

图5不同开孔率条件下立面流速场及流速矢量分布,相同条件下不开孔双丁坝与透空型双丁坝局部流

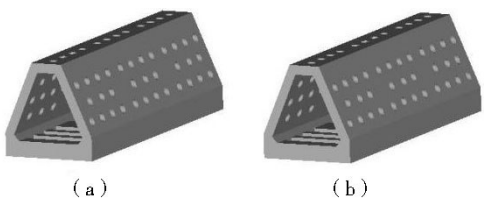


图1 透空型双丁坝模型

Fig.1 Model of permeable double spur dikes

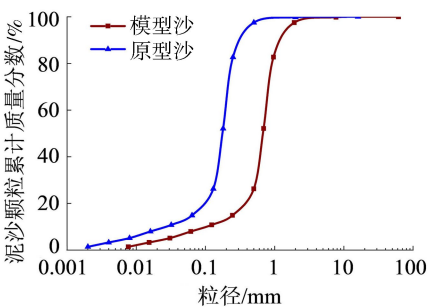


图2 泥沙级配曲线

Fig.2 Particle grading curve of sediment

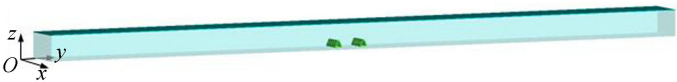


图3 数值水槽

Fig.3 Numerical water tank

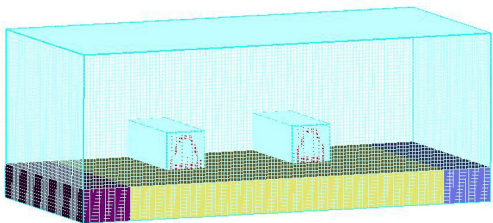


图4 网格划分

Fig.4 Grid meshing

场存在较大差异,透空型双丁坝开孔过流,流场结构较为丰富,形成了大小不一的多个回流区,分别位于上丁坝坝内环流区、坝间主副环流区以及下丁坝坝后缓流区。3 种开孔率条件下流速分布基本一致,主环流区流速在 0.1 m/s 以下,对应原型流速 0.5 m/s,有利于洪季水生底栖生物繁殖,在开孔率为 15% 时坝间主环流区范围最大,形成坝间及坝后大范围的缓流环境,有利于有机质富集和保持坝体稳定。现场监测结果^[2]显示,开孔率 15% 的透空型丁坝原型外有机质含量明显增大,为底栖生物提供了索饵场。

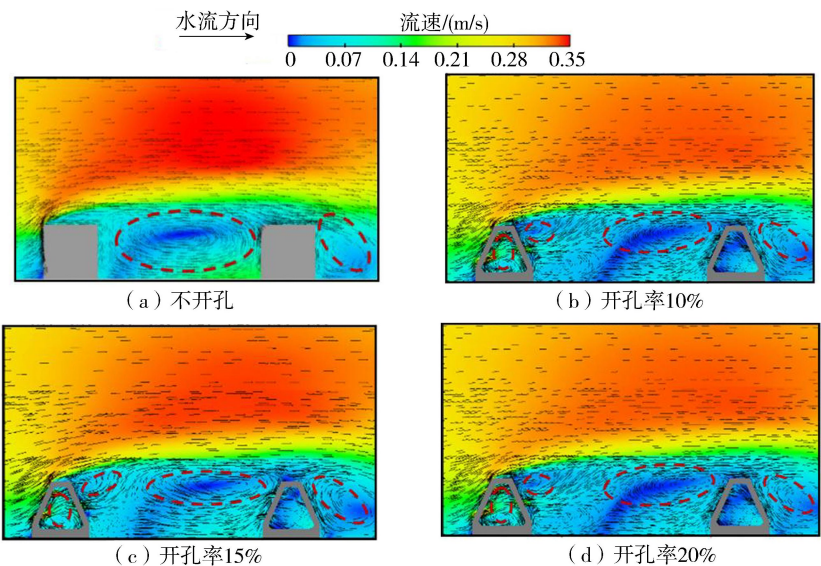


图 5 不同开孔率条件下立面流速场及流速矢量分布

Fig.5 Velocity field and velocity vector distribution of facade under different opening rate

图 6 表明,不同开孔率条件下涡量分布规律大致相似,丁坝坝顶和孔洞处涡量值最大达到 $\pm 15\text{ s}^{-1}$,在开孔率为 15% 时在坝间区域的涡量分布范围最广,有利于促进上下层水流交换,为局部水生生物提供有机质和溶解氧。在开孔率为 15% 时水流条件稳定,更有利于中华绒螯蟹等底栖生物索饵洄游,适合底栖生物栖息,与现场生物监测结果较为吻合。

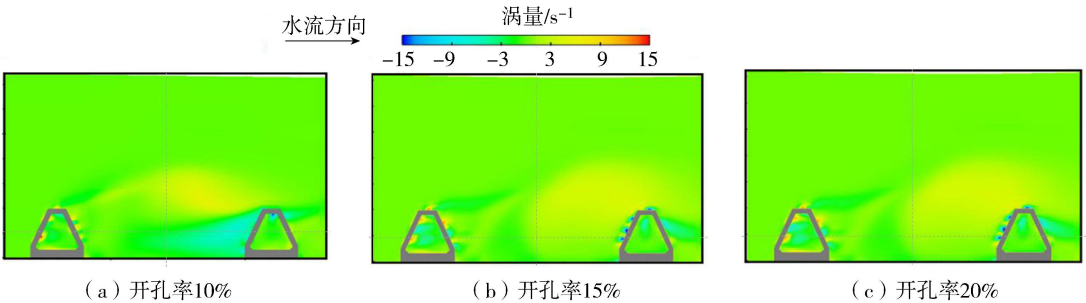


图 6 不同开孔率条件下涡量场分布

Fig.6 Vorticity field distribution under different opening rate

不同开孔率条件下透空型双丁坝局部紊动能横向分布情况如图 7 所示。对比分析不同开孔率条件下的紊动能垂向分布差异可知,开孔率增大减弱了翻坝水流和横向绕流,使得下丁坝坝顶处以及坝间回流区的紊动能有所降低。不同开孔率条件下紊动能沿横向(沿程)分布规律基本相似,上丁坝坝前紊动能变化较小,紊动变化剧烈的部位集中在坝间及坝后回流区、下丁坝坝顶和坝头附近,开孔率增大,孔洞后的紊动能相应有一定程度的增大。由图 7 可知,10%、15% 开孔率条件下的坝后紊动能强度较 20% 更大,坝间区域的紊动能变化强度随开孔率的增大而减小。实际生态透空结构的使用过程中,一定程度上增大结构自身开孔率不仅能够增大结构内部水生生物的活动范围,同时有利于坝间与坝后水流同主流的水体交换,为水生生物提供氧气及丰富饵料。

2.2 不同布置间距对双丁坝水动力特性的影响

图 8 为在开孔率为 15% 时不同布置间距条件下立面流速场及流速矢量分布。图 8 表明,3 种布置间距条件

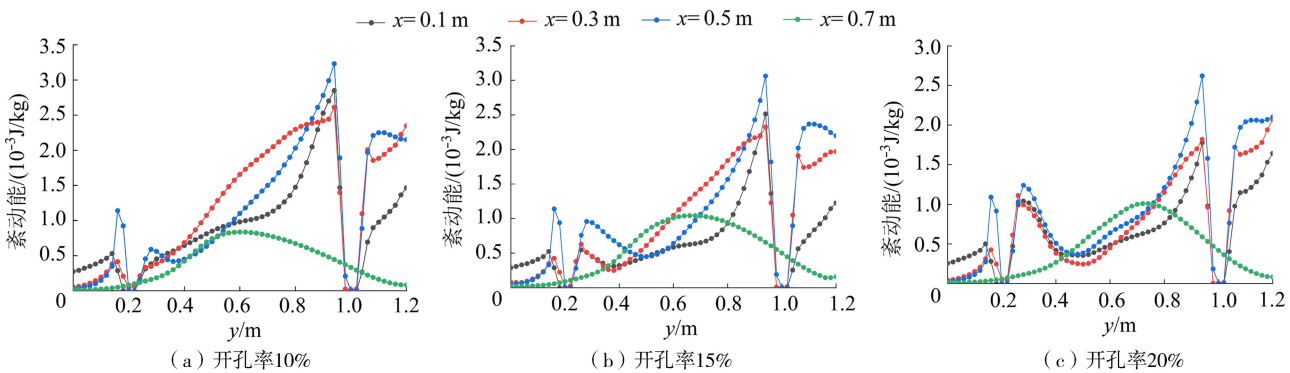


图 7 不同开孔率条件下紊动能横向分布

Fig. 7 Horizontal distribution of turbulent kinetic energy under different opening rate

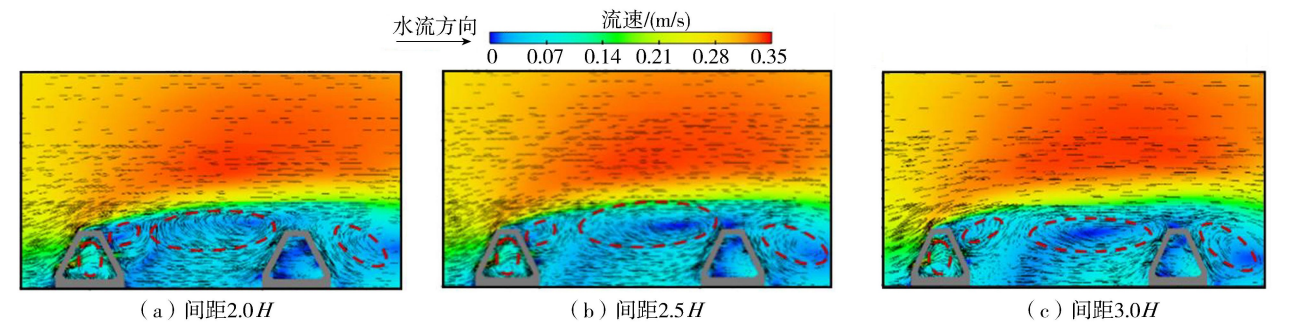


图 8 不同布置间距条件下立面流速场及流速矢量分布

Fig. 8 Velocity field and velocity vector distribution of facade under different arrangement spacings

下流速分布基本一致, 坝间流速控制在 0.15 m/s 左右, 对应原型流速为 0.6 m/s 左右, 适合洪季水生生物繁殖。图 9 为 3 种布置间距条件下涡量场分布, 涡量场分布范围随布置间距的增大而增大, 适当增大布置间距能节省工程造价, 可增大坝间附近的涡量, 有利于促进上下层水流交换, 为局部水生生物提供有机质和溶解氧。

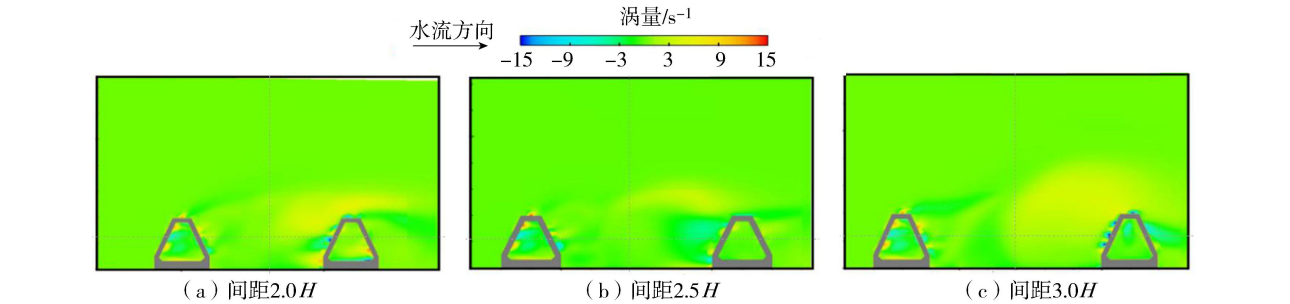


图 9 不同布置间距条件下涡量场分布

Fig. 9 Vorticity field distribution under different arrangement spacings

不同布置间距条件下透空型双丁坝局部紊动能沿横向分布情况如图 10 所示。由图 10 可见, 不同布置间距条件下透空型双丁坝紊动能分布大致相似, 紊动能分布的波动较大, 由于受丁坝作用水位在下丁坝坝头附近和坝后回流区跌落, 加上主流区的交汇, 使得该区域的水流结构复杂, 紊动能峰值出现在下丁坝坝头附近和坝后回流区。对比不同布置间距的紊动能横向分布(图 10)可见, 布置间距 3.0H 较 2.0H 和 2.5H 紊动能峰值大, 且紊动能峰值位置随布置间距增大而向下游移动。在不影响航道整治效果的前提下, 布置间距越大, 坝间水流发展越充分, 坝间与坝后的紊动分布范围也越大, 有利于坝间与坝后水流同主流的水体交换, 为水生生物提供氧气及丰富饵料。

3 冲淤特性

在水动力特性基础上, 基于泥沙冲刷数值模型, 分析不同开孔率和不同布置间距条件下透空型双丁坝局部冲淤特征。

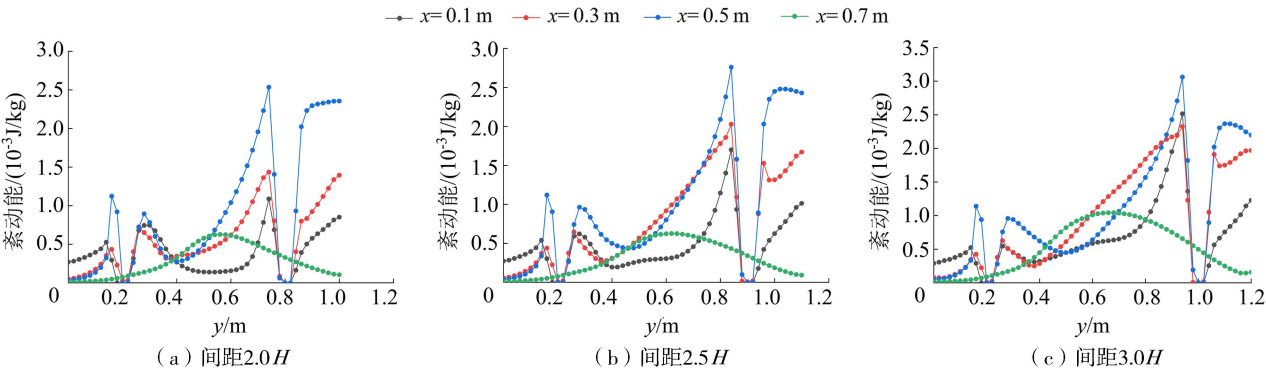


图 10 不同布置间距条件下紊动能横向分布

Fig. 10 Horizontal distribution of turbulent kinetic energy under different arrangement spacings

3.1 开孔率和布置间距对床面切应力分布的影响

床面切应力对河床冲淤变化有重要影响,因此有必要分析不同开孔率和不同布置间距对透空型双丁坝床面切应力的影响。图 11 和图 12 分别给出了不同开孔率和不同布置间距条件下透空型双丁坝在 $z=0.01\text{ m}$ ($z/H=0.05$) 平面上的床面切应力分布,床面切应力最大值均出现在坝间前端区域,坝间与坝后的回流区床面切应力较小。随着开孔率和布置间距的增大,最大切应力与上游切应力的比值逐渐降低,切应力的变化速率减小。因此,在满足透空型丁坝航道整治需求的前提下,适当加大开孔率和布置间距可更大程度地减缓坝前壅水和坝头的绕流,减轻翻坝水流在下游跌落时的下泄水流对坝后河床的冲刷,有利于保持透空型丁坝的整体稳定。

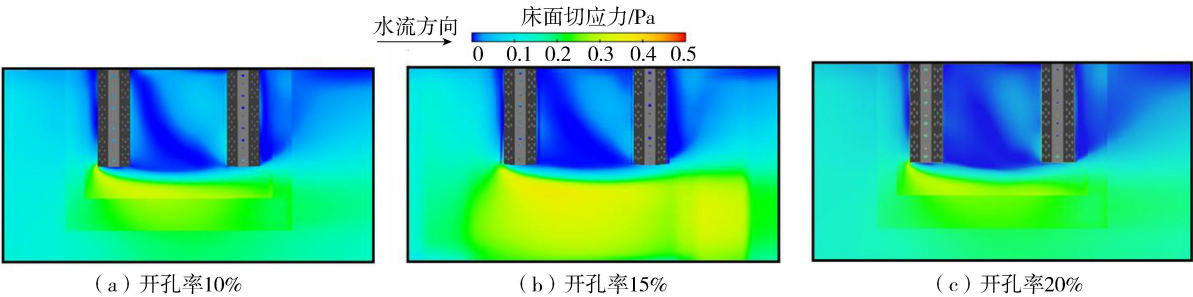


图 11 不同开孔率条件下床面切应力分布

Fig. 11 Shear stress distribution of bed surface under different opening rate conditions

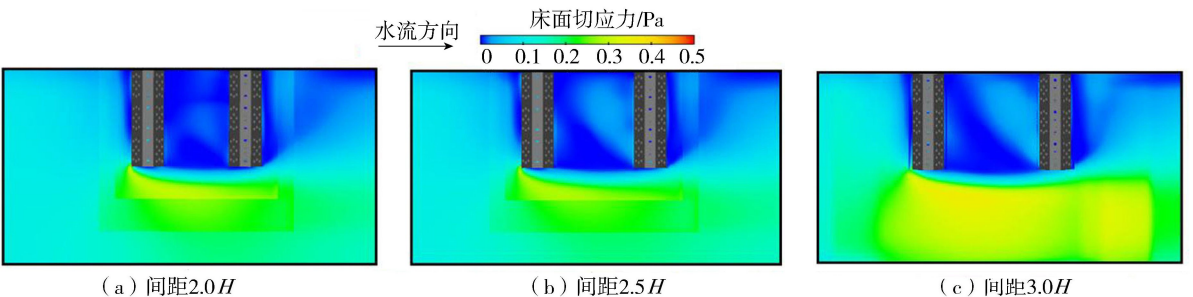


图 12 不同布置间距条件下床面切应力分布

Fig. 12 Shear stress distribution of bed surface under different arrangement spacings

3.2 开孔率和布置间距对局部冲淤的影响

图 13 为不同开孔率条件下床面冲淤前 200 s 形态变化,可见不同开孔率条件下的透空型双丁坝局部冲刷形态变化规律大体相似,坝前较远处和坝头处最早冲刷,冲刷坑沿主流区向下游呈飘带状发展,坝间和坝后回流区泥沙淤积,淤积体位于下游丁坝坝脚两侧。在其他参数相同的情况下,改变开孔率大小可较为明显地改变坝间及坝后的淤积状态,开孔率增大使得水流穿过孔洞时更平稳,减弱了水流的紊动影响,使得水流中的能量耗散较小,坝内与坝间淤积范围和高度均有所减小,适当增大开孔率有利于减速促淤。

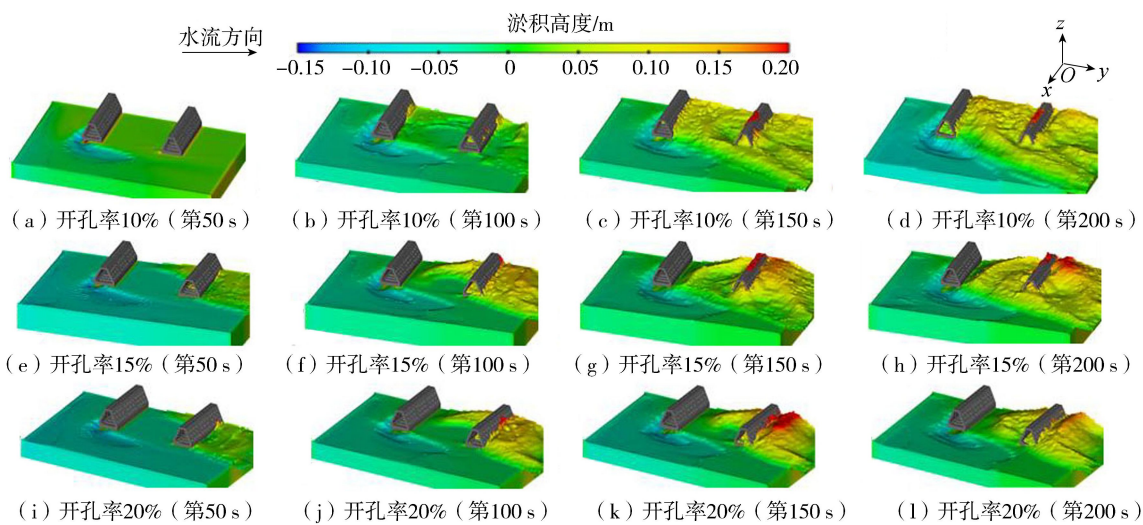


图 13 不同开孔率条件下床面形态的演变

Fig. 13 Morphology evolution of bed surface under different opening rate

不同布置间距条件下床面冲淤前 200 s 床面形态变化如图 14 所示,可见不同布置间距条件下的透空型双丁坝冲淤过程基本相似,在其他参数相同的情况下,布置间距增大使得坝头处冲刷速率增大,且最大冲刷深度位置向上游移动,坝间和坝后的淤积高度增大。因此,实际工程中,适当增大布置间距不仅可以降低工程造价,还可以在主流区形成更深的航道,在坝间和坝后形成更高、更大的淤积体。

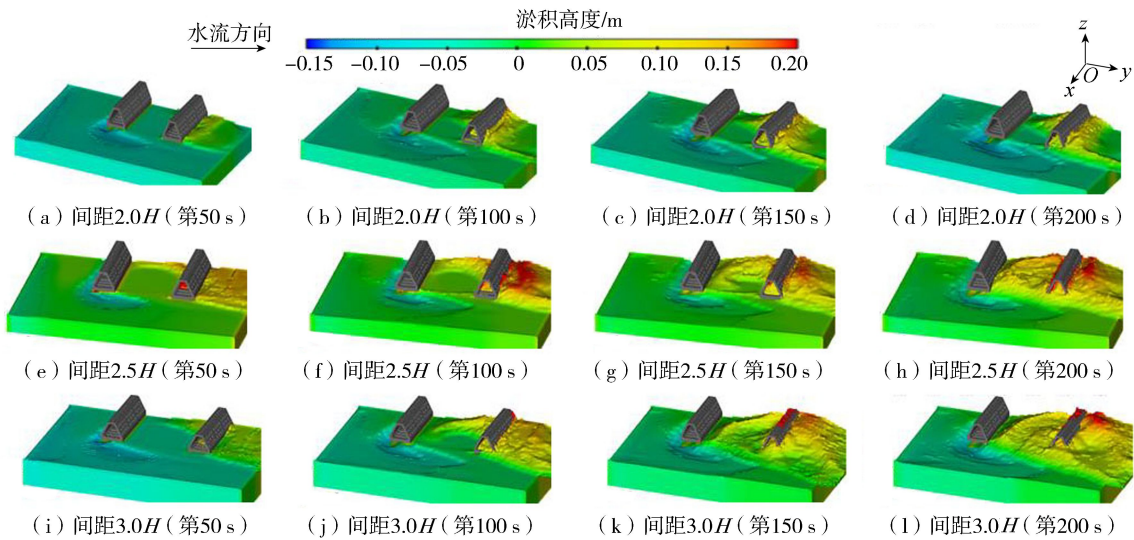


图 14 不同布置间距条件下床面形态的演变

Fig. 14 Morphology evolution of bed surface under different arrangement spacings

4 结 论

- a. 透空型双丁坝周围呈现复杂的三维水流结构,坝间主回流范围在开孔率为 15% 时最大,随布置间距增大而增大。涡量场分布范围随布置间距增大而增大,开孔率影响较小。紊动能峰值及紊动的分布范围随开孔率增大而减小,与布置间距成正比。
- b. 坝内及坝间淤积范围和高度随开孔率和布置间距的增大均有所减小,冲刷深度随布置间距增大而增大,且最大冲刷深度位置向上游移动。
- c. 合理增大布置间距并控制透空型双丁坝坝身开孔率大小有利于坝间与坝后形成大范围的缓流环境,促进上下层水流交换及控制河道水流中泥沙的淤积效果,在保障整治工程稳定的同时,还可一定程度上为水生生物提供良好的栖息环境和食物来源。

参考文献:

- [1] 常留红,王瀚锐,章富君,等. 梯形透空丁坝局部水动力特性对底栖动物生境演替的影响机制[J]. 水资源保护,2023,39(1):216-224. (CHANG Lihong, WANG Hanrui, ZHANG Fujun, et al. Influence mechanism of local hydrodynamic characteristics of trapezoidal hollow spur dike on benthos habitat succession[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):216-224. (in Chinese))
- [2] 常留红,章富君,王瀚锐,等. 梯形透空丁坝局部冲淤演变对底栖动物群落的影响[J]. 水资源保护,2023,39(5):170-177. (CHANG Lihong, ZHANG Fujun, WANG Hanrui, et al. Impact of local erosion and sedimentation evolution of trapezoidal hollow spur dike on benthic animal communities[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):170-177. (in Chinese))
- [3] 方强,黄赛花,王继保,等. 坝头形式对丁坝附近水流结构的影响分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(6):7-11. (FANG Qiang, HUANG Saihua, WANG Jibao, et al. Influence of head types of spur dike on near flow characteristics[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences),2019,41(6):7-11. (in Chinese))
- [4] 王世鹏,钟亮,廖尚超,等. 淹没阶梯形丁坝水流结构 PIV 试验研究[J]. 水运工程,2022(1):100-111. (WANG Shipeng, ZHONG Liang, LIAO Shangchao, et al. PIV experimental study on flow structure of submerged step-shaped spur dike[J]. Port & Waterway Engineering,2022(1):100-111. (in Chinese))
- [5] 张婧,王东,何岸霞,等. 不同绕流结构体对河道水流的影响[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):26-31. (ZHANG Jing, WANG Dong, HE Anxia, et al. Influence of different structures on channel flows[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(6):26-31. (in Chinese))
- [6] 钟亮,王振志,王舒,等. 非淹没复式断面丁坝区的流速分布规律[J]. 长江科学院院报,2018,35(6):60-66. (ZHONG Liang, WANG Zhenzhi, WANG Shu, et al. Flow velocity distribution around non-submerged spur dike with compound section[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2018,35(6):60-66. (in Chinese))
- [7] 陈宇豪,刘成林. 淹没式勾头丁坝水流特性研究[J]. 水电能源科学,2017,35(6):70-73. (CHEN Yuhao, LIU Chenglin. Research on water characteristic of submerged bend-ended spur dike[J]. Water Resources and Power,2017,35(6):70-73. (in Chinese))
- [8] VAGHEFI M, SAFARPOOR Y, AKBARI M. Numerical investigation of flow pattern and components of three-dimensional velocity around a submerged T-shaped spur dike in a 90° bend[J]. Journal of Central South University,2016,23(11):2984-2998.
- [9] 欧阳澍,刘成林,程永舟,等. 透空潜坝附近水流特性的数值模拟[J]. 水利水运工程学报,2019(1):109-118. (OUYANG Shu, LIU Chenglin, CHENG Yongzhou, et al. Numerical simulation of flow characteristics near the permeable submerged dam[J]. Hydro-Science and Engineering,2019(1):109-118. (in Chinese))
- [10] 李有为. 透水性碎石丁坝绕流及块体受力的数值模拟[J]. 水运工程,2021(11):98-104. (LI Youwei. Numerical simulation of flow around permeable rubble spur dike and blocks stress distribution[J]. Port & Waterway Engineering,2021(11):98-104. (in Chinese))
- [11] 蒋学炼,刘畅,赵悦,等. 非线性波作用下潜堤周围的流体分离与涡流结构[J]. 工程科学与技术,2021,53(5):10-20. (JANG Xuelian, LIU Chang, ZHAO Yue, et al. Flow separation and vortical structure around submerged breakwater subject to nonlinear water waves[J]. Advanced Engineering Sciences,2021,53(5):10-20. (in Chinese))
- [12] 杜升涛,王超琳,杨博,等. 水流强度对淹没式方桩局部冲刷特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):92-100. (DU Shengtao, WANG Chaolin, YANG Bo, et al. Influence of flow intensity on local scour characteristics of a submerged square pile[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):92-100. (in Chinese))
- [13] 陈秉如,冀鸿兰,高鹏程,等. 冰盖下组合桥墩的局部冲刷特性及水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):53-60. (CHEN Bingru, JI Honglan, GAO Pengcheng, et al. Local scour and hydraulic characteristics of composite piers under ice sheet[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):53-60. (in Chinese))
- [14] 齐梅兰,石柏辰. 局部冲刷坑发展过程的泥沙输运特性[J]. 水利学报,2018,49(12):1471-1480. (QI Meilan, SHI Pochen. Study on the mechanism of water-sediment interaction in the scouring process around a pile[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(12):1471-1480. (in Chinese))
- [15] 杨兰,李国栋,李奇龙,等. 丁坝群附近流场及局部冲刷的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2016,31(3):372-378. (YANG Lan, LI Guodong, LI Qilong, et al. 3D numerical simulation of flow field and local scour around spur dikes[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2016,31(3):372-378. (in Chinese))
- [16] NAYYER S, FARZIN S, KARAMI H, et al. A numerical and experimental investigation of the effects of combination of spur dikes in series on a flow field[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2019,41(6):256-266.

1770-1777. (LAO Weikang, ZHOU Liyun, WANG Zhao. Field test and theoretical analysis on flexible large-diameter rock-socketed steel pipe piles under lateral load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1770-1777. (in Chinese))

[36] 王建华, 陈锦剑, 柯学. 水平荷载下大直径嵌岩桩的承载力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1194-1198. (WANG Jianhua, CHEN Jinjian, KE Xue. Characteristics of large diameter rock-socketed piles under lateral loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1194-1198. (in Chinese))

[37] HE Rui, JI Ji, ZHANG Jisheng, et al. Dynamic impedances of offshore rock-socketed monopiles[J]. Journal of Marine and Science Engineering, 2019, 7(5): 134.

[38] FENG Lingyun, LYU Wei, CHEN Shuiyue, et al. Field tests of rock-socketed monopile in coastal area subjected to lateral cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 164: 107616.

[39] CHOO Y W, KIM D. Experimental development of the p - y relationship for large-diameter offshore monopiles in sands: centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 04015058.

[40] FUTAI M M, DONG Jing, HAIGH S K, et al. Dynamic response of monopiles in sand using centrifuge modelling[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 90-103.

[41] LIN Jie, GUO Yakun. Numerical investigation of non-cohesive seabed response around a mono-pile by crossing wave-current[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(1): 57-68.

[42] CHEN Songgui, GONG Enyu, ZHAO Xu, et al. Large-scale experimental study on scour around offshore wind monopiles under irregular waves[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(1): 40-46.

[43] 林韵梅. 实验岩石力学: 模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.

[44] 马博. 海上风机嵌岩单桩侧向静刚度研究[D]. 南京: 河海大学, 2020.

[45] 校建东, 林毅峰. 海上风电机组大直径嵌岩单桩基础结构设计关键参数的研究[J]. 太阳能, 2019(7): 64-68. (XIAO Jiandong, LIN Yifeng. Study on key parameters of large diameter rock-socketed single pile foundation structure design for offshore wind turbines[J]. Solar Energy, 2019(7): 64-68. (in Chinese))

[46] OVESEN N K. The use of physical models in design: the scaling law relationship[C]//Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brighton: British Geotechnical Society, 1979: 318-323.

[47] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86. (XU Guangming, ZHANG Weimin. A study of size effect and boundary effect in centrifugal tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: British Geotechnical Society, 1996, 18(3): 80-86. (in Chinese))

[48] 汪明元, 吴金标, 张建经, 等. 一种适用于室内模型试验的循环加载装置研制及试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1145-1151. (WANG Mingyuan, WU Jinbiao, ZHANG Jianjing, et al. Development of a cyclic loading instrument for laboratory model test and its experimental study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1145-1151. (in Chinese))

[49] KONG L G, ZHANG L M. Rate-controlled lateral-load pile tests using a robotic manipulator in centrifuge[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(3): 192-201.

(收稿日期: 2023-12-11 编辑: 刘晓艳)

(上接第52页)

[17] 黄君宝, 肖厅厅, 孙志林, 等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 441-446. (HUANG Junbao, XIAO Tingting, SUN Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5): 441-446. (in Chinese))

[18] 张功瑾, 杨明金, 王任超, 等. 长江口水沙条件对丁坝群坝田淤积的影响研究[J]. 水文, 2020, 40(6): 24-30. (ZHANG Gongjin, YANG Mingjin, WANG Renchao, et al. Research on the influence of water and sediment conditions in Yangtze River Estuary on deposition in the fields among spur dikes[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6): 24-30. (in Chinese))

[19] 张功瑾, 罗小峰, 路川藤, 等. 潮汐河口坝田长宽比对泥沙淤积特征影响试验研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 29-36. (ZHANG Gongjin, LUO Xiaofeng, LU Chuanteng, et al. Experimental analysis of the effect of changing the length-width ratio of dam fields on sediment deposition[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(4): 29-36. (in Chinese))

[20] 杨旭亮, 戚蓝, 曾庆达, 等. 双丁坝间流场及局部冲刷的数值模拟研究[J]. 水力发电, 2020, 46(11): 56-60. (YANG Xuliang, QI Lan, ZENG Qingda. Study on numerical simulation of flow field and local scour between double spur dikes[J]. Water Power, 2020, 46(11): 56-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-12-18 编辑: 熊水斌)