

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220906

间距对错口插板透水丁坝缓流效果的影响

安 鹏, 李玉建, 耿义鑫

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 探究间距对错口插板透水丁坝缓流效果的影响, 可为现代护岸工程的设计提供理论依据。使用 CCHE2D 软件对塔里木河新其满河段实体水槽模型进行二维数值模拟研究, 分析了不同间距错口插板透水丁坝对上游透水丁坝作用区水面线、流速、河床切应力分布的影响规律。结果表明, 当相对坝长比 $b/B = 0.21$, 且在来流量、坝长等因素不变的情况下, 透水丁坝间距越大, 上游插板透水丁坝坝后缓流及流速均匀性越好, 水位雍高值逐渐减小且河床切应力呈减小趋势。当间距为 5 倍有效坝长时, 上游插板透水丁坝坝后流速、水位及河床切应力均趋于稳定。研究结果可完善插板透水丁坝作用区缓流效果理论。

关键词: 透水丁坝; CCHE2D; 缓流效果; 丁坝间距

中图分类号: TV863

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0108-04

1 引言

插板透水丁坝作为一种新型护岸建筑物, 相较于其他护岸结构整治效果明显, 水流结构更加稳定。其坝身特殊的透水性及在坝后形成缓流促淤区对治理多沙内陆河有明显成效。周正平等^[1]通过 CCHE2D 模型研究了插板透水丁坝坝后淤积区的形态及最优流量; 周庆庆^[2]通过室内动床水槽模型的研究发现水力插板透水丁坝在坝头冲刷及坝后落淤均优于实体丁坝, 且当透水率为 30% 时缓流促淤效果最好。实体错口丁坝修建后会在原河道形成高滩深槽, 增大河道行洪能力, 从而治理游荡型河道^[3]。插板透水丁坝则利用坝身的透水性减小对原河道的影响, 通过在坝后形成缓流促淤区来治理多沙内陆河^[2]。目前, 对实体错口丁坝已做了部分研究, 但对错口插板透水丁坝尚未开展相关研究。鉴于此, 本文通过数值模拟方法研究了间距对错口插板透水丁坝缓流效果的影响, 旨在为插板透水丁坝对河道整治工程的设计与布置提供科学依据。

2 试验概况

2.1 水槽模型

水槽模型试验在新疆农业大学农水实验室进行^[2]。通过研究干旱区内陆河治理与防护, 确定以塔里木河新其满河段^{#3}引水口河段为原型建立水槽模型。模型长 6.00 m、宽 1.20 m、高 0.45 m、在坡降 $i = 1/500$ 混凝土水槽中进行, 模型比尺见表 1。根据塔里木河水沙资料^[4], 20 年一遇洪水典型流量 16.03 L/m^3 下, 在距进口 164 cm 处出现局部严重掏刷, 选择坝高为 30 cm、厚度为 1.8 mm、有效坝长 25 cm、 $b/B = 0.21$ 、透空率 30% 的插板透水丁坝以正挑方式布置在该位置, 见图 1。实验测量仪器包括 LGY-II 型流速仪、钢卷尺、水准仪等。

表 1 变态模型比尺

Tab. 1 Variable model scale

水平比尺	垂直比尺	几何变率比尺	流速比尺	流量比尺	比降比尺	时间比尺	糙率比尺
250	25	10	5	31 250	0.1	50	0.54

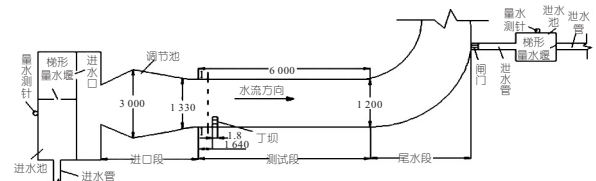


图 1 模型水槽平面布置图(单位: mm)

Fig. 1 Model sink plan layout

收稿日期: 2022-04-03, 修回日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469032)

作者简介: 安鹏(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为内陆河整治及生态修复工程, E-mail: 1505992565@qq.com

通讯作者: 李玉建(1967-), 男, 博士、副教授、高级工程师, 研究方向为内陆河整治及生态修复工程, E-mail:

1760191908@qq.com

2.2 模拟试验设计

对插板透水丁坝研究发现,在有效坝长 20~25 cm,透水率为 30% 时缓流促淤效果最佳^[2]。故选择流量为 16.03 L/m³、有效坝长为 25 cm、透水率为 30%、 $b/B=0.21$,以正挑的方式布置在水槽中,间隔 1、2、3、4、5 倍坝间距和单丁坝来放置插板透水丁坝。

2.2.1 模型网格建立

利用 CCHE-MESH 进行模型网格划分。在保证计算可靠的前提下采用 RL 正交网格(带光滑函数-1)进行网格划分,并且控制 I 线与 J 线来满足网格与边界的光滑性。在网格计算优化中,选取纵向网格数 $I_{\max}=100$,横向网格数 $J_{\max}=300$,共计 30 000 个(除加密网格)。

2.2.2 初始边界条件

将实测物理模型地形 xyz 坐标用三角形插值法进行插值并设置进出口断面。设置初始水面高程为 0.841 m,出口水面高程为 0.826 m,水槽糙率率定为 0.018^[5]。在设置进口边界条件时设置进口总流量为 16.03 L/m³,在设置出口边界条件时设置出口水面高程为 0.826 m。

2.2.3 控制方程

为计算水流的水位、流速和河床切应力等水力要素,利用 CCHE2D 水流数值模型求解控制方程中连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中, x 、 y 均为水平直角坐标; h 为水深,m; U 、 V 分别为 x 、 y 方向的深度平均流速,m/s。

动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{\partial(hUU)}{\partial x} + \frac{\partial(hVU)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} + \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \\ \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho}(\tau_{sx} - \tau_{bx}) + f_c hV \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hV)}{\partial t} + \frac{\partial(hUV)}{\partial x} + \frac{\partial(hVV)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} + \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{yx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + \\ \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho}(\tau_{sy} - \tau_{by}) + f_c hU \end{aligned} \quad (3)$$

式中, z_s 为水面高程,m; g 为重力加速度,m/s²; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 均为平均深度湍流应力,N/m²; D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yx} 、 D_{yy} 均为由于流速的不均匀性和二次流的影响而产生的离散项,在弯曲通道的情况下很重要; ρ 为水的密度,kg/m³;

τ_{bx} 、 τ_{by} 均为作用于床面的剪切应力; τ_{sx} 、 τ_{sy} 均为作用于水面的剪切应力,N/m²; f_c 为科里奥利系数。

2.3 模型验证

取流量为 16.03 L/m³,泥沙粒径 0.05 mm、坝长 25 cm、 $b/B=0.21$ 的动床试验结果对坝后 5 cm 处断面的模型数据与数值模拟数据进行比较(图 2)。由图 2 可知,坝后 5 cm 横断面流速、水面线吻合均较好。说明 CCHE 数值模拟精度满足试验要求。

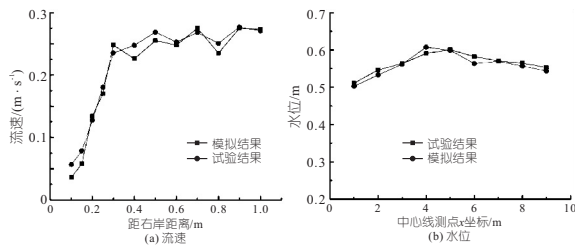


图 2 模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured value

3 模拟结果与分析

3.1 丁坝间距对流速的影响

试验平面布置见图 3。由图 3 可知,将插板透水丁坝放入水槽会使透水丁坝的坝后流速再分布。试验以距离右岸透水丁坝坝后 5、20、60 cm 作为典型横断面进行测量,结果见图 4。

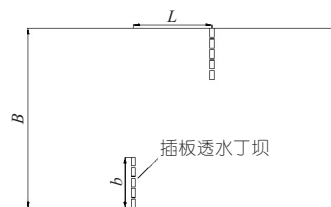


图 3 试验平面布置

Fig. 3 Experimental layout

如图 4 所示,水槽中布置异侧透水丁坝,除间距为 1 倍坝长时上游透水丁坝坝后流速均比布置单侧透水丁坝的流速减小。当间距为 1 倍坝长时,由于间距过小左右岸透水丁坝形成对口丁坝束窄主河道^[6],当流量保持不变,过水断面面积减小导致透水丁坝坝后流速增大。当 $L=2b$ 以上时形成错口丁坝,受下游透水丁坝的挡水作用,下游透水丁坝坝前水位雍高。水流通过的过水断面面积增大使上游透水丁坝坝后流速减小,缓流效果比布置单侧丁坝效果好。坝间距越长,上游透水丁坝坝后缓流区水流与主流区水流掺混的距离越长从而使断面流速减小。当受到下游透水丁坝

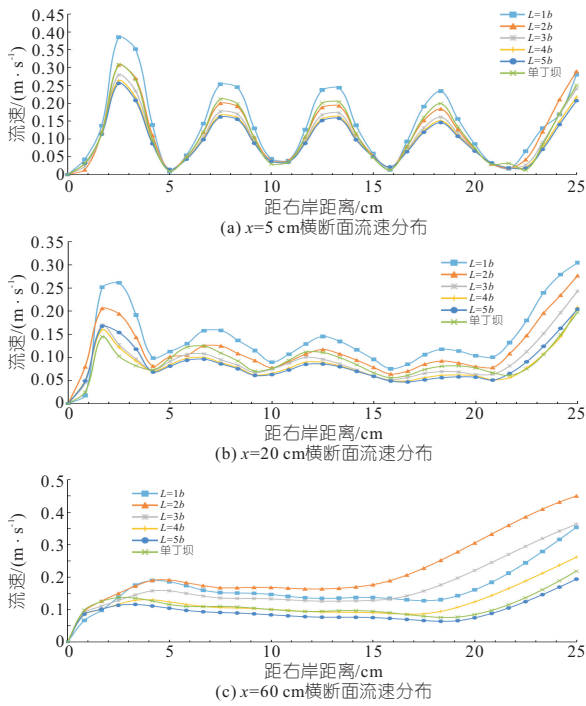


图 4 插板透水丁坝作用区横断面流速分布图

Fig. 4 cross-sectional flow velocity distribution in the action area of the insert permeable dam

阻挡作用时坝间形成的大断面、小流速的作用使下游透水丁坝坝前雍水距离较长,绕过和穿过上游透水丁坝的水流流速减小。因此,在来流量、坝长等条件不变时,间距为 5b 时缓流效果最好。

表 2 为不同间距坝后流速。由表 2 可知,间距越长坝后平均流速越小。当 $L = 5b$ 时坝后 5、20、60 cm 断面平均流速最小且缓流效果最佳。当 $L = 5b$ 时,各断面平均流速变化较小。

表 2 不同间距坝后流速

Tab. 2 Flow rate after different spacing dam m/s

\bar{V}	$L=1b$	$L=2b$	$L=3b$	$L=4b$	$L=5b$	单丁坝
$\bar{V}_{x=5}$	0.137	0.115	0.102	0.096	0.093	0.112
$\bar{V}_{x=20}$	0.138	0.115	0.092	0.081	0.079	0.090
$\bar{V}_{x=60}$	0.162	0.219	0.169	0.118	0.093	0.108

为探究间距对透水丁坝流速的影响,不仅要关注坝后平均流速还要分析流场是否均匀,本文采用方差分析上游插板透水丁坝作用区流速均匀性:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{V} - V_i)^2 \quad (4)$$

式中, S^2 为样本方差; \bar{V} 为所有采样点平均速度; V_i 为第 i 个观测点的速度; n 为观测点个数。

比较不同间距的 S^2 , 判断纵断面流速的均匀性,图 5 为透水丁坝坝后 5、60 cm 处断面流速均匀值。由图 5 可知,随着间距的增加,流速均匀度

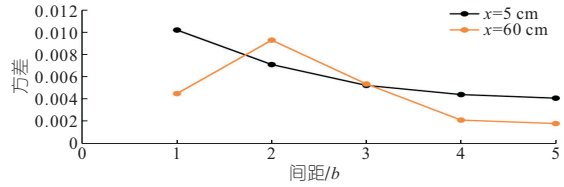


图 5 不同间距流速均匀性对比

Fig. 5 Comparison of flow rate uniformity at different pitches

逐渐增大。当间距为 5b 时,流速均匀性逐渐趋于稳定。因此,在流量、坝长等条件不变的情况下,间距为 5b 时坝后流速均匀性最好。

3.2 丁坝间距对水面线的影响

选取距离上游透水丁坝±20 cm 纵断面作为水位的测量断面,不同间距上游丁坝水面线分布见图 6。

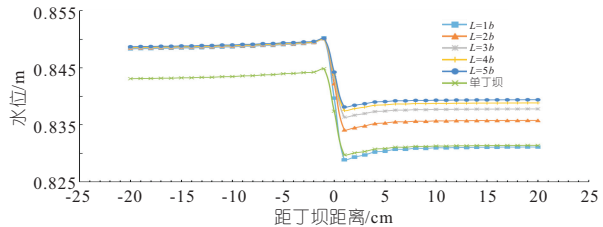


图 6 不同间距下上游丁坝水面线分布

Fig. 6 Water surface line distribution of upstream dam under different spacing

由图 6 可知,在水槽布置错口丁坝后,上游丁坝作用区水面线发生明显变化。在左岸布置丁坝后上游丁坝水位明显增加。原因在于受两岸丁坝的阻挡作用,当河槽被束窄后,水流在坝前坝后形成壅水缓流区,当流量不变时,流速减小、过水断面面积增大导致上游丁坝水位增加。透水丁坝间距越大,上游透水丁坝坝后水位越大。透水丁坝上游水位受间距影响较小,下游水位随着间距增大其雍高值逐渐减小。在间距 1b、2b、3b、4b、5b 及单丁坝雍高值分别为 0.021 3、0.016 0、0.013 6、0.012 5、0.015 1 m。由此可知,间距越大,壅高水位值越小。水位壅高值越小,上下游水位差越小,坝体结构越稳定。这表明在来流量、坝长不变的情况下间距为 5b 时壅水高度最小,结构越稳定。

3.3 丁坝间距对河床切应力的影响

受双丁坝的阻挡作用,透水丁坝作用下河床切应力受间距大小影响,切应力越大对河床影响就越强。图 7 为不同间距下插板透水丁坝作用区河床切应力分布图。由图 7 可知,间距越大,透水丁坝对河床的切应力越小且对河床的影响范围就越小。随着丁坝间距的增大切应力的变化减小,当丁坝间距为 5b 时,透水丁坝作用区对河床作用的影响最小且变化最小。

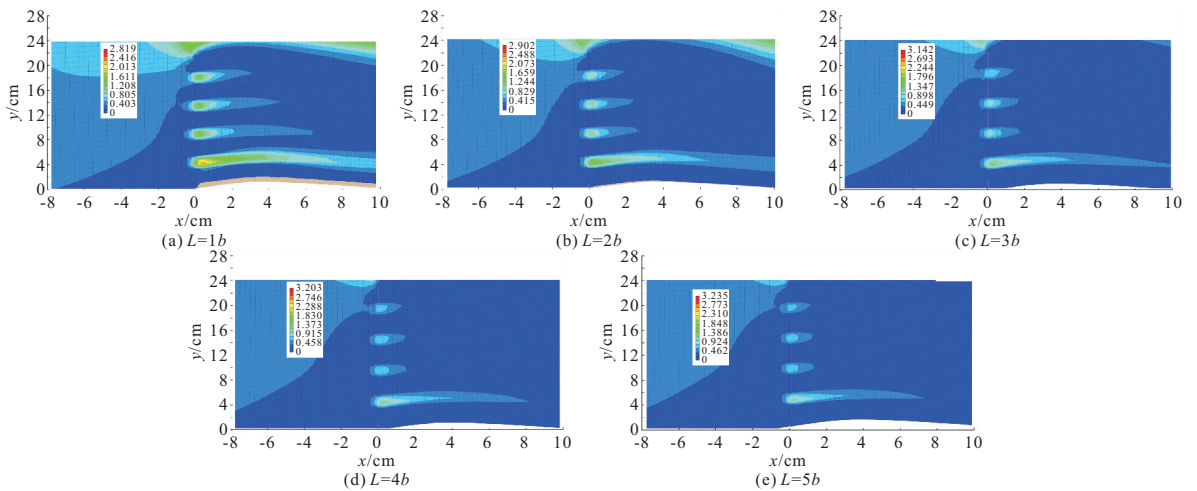


图 7 不同间距下插板透水丁坝作用区河床切应力分布图(单位:Pa)

Fig. 7 Distribution of riverbed shear stress in the action area of inserted permeable dam with different spacing

4 结论

a. 当其他条件不变且 $b/B=0.21$ 时,间距越大,上游透水丁坝坝后流速越小,缓流效果越好,流速均匀性越好,上游丁坝水位均增大,水位雍高值减小,坝体结构越稳定,表明间距对上游透水丁坝的水位、流速的影响较大,且当间距为 $5b$ 时,坝后流速及水位趋于稳定且缓流效果最好。

b. 当其他条件不变且 $b/B=0.21$ 时,间距越长,上游透水丁坝河床切应力随着间距的增加呈减小趋势,表明间距对河床切应力有一定影响,当间距为 $5b$ 时,透水丁坝对河床影响最小且变化最小。

参考文献:

- [1] 周正平,李玉建,申帅辉,等. 流量对单排插板透水丁坝促淤效果的影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11):26-30.
- [2] 周庆庆. 水力插板透水丁坝缓流促淤效果及主要影响因素试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2015.
- [3] 马颖,江恩惠,李军华,等. 丁坝在荷兰莱茵河航道整治中的作用[J]. 人民长江, 2008, 39(5):77-78, 81.
- [4] 胡春宏,王延贵,国庆超,等. 塔里木河干流河道演变与整治[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [5] LI YUJIAN, GENG YIXIN, MAO LIANG. Calibration method of manning's roughness coefficient for river flume model[J]. Water supply, 2020, 20(8): 3597-3603.
- [6] 田世民,张防修,刘香君,等. 对口丁坝两岸整治对黄河下游河道冲淤的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6):9-13.

The Effect of Spacing on the Slow Flow Effect of Staggered Insert Permeable Spur Dike

AN Peng, LI Yu-jian, GENG Yi-xin

(College of Water Resources and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Investigating the effect of spacing on the effect of staggered-slip permeable spur dike on flow mitigation can provide a theoretical basis for the design of modern shore protection projects. The CCHE2D software was used to conduct a two-dimensional numerical simulation study of the solid flume model in the Xinqiman section of the Tarim River. And then the effect of different spacing on the water surface line, flow velocity and bed shear stress distribution in the upstream permeable spur dike area under the action of staggered-slab permeable spur dike was analyzed. When the relative dam length ratio is 0.21, and the inflow and dam length remain unchanged, the larger the spacing, the better the uniformity of flow and velocity behind the upstream permeable spur dike, and the lower the value of water level and shear stress in the riverbed. When the spacing is 5 times the effective dam length, the flow velocity, water level and riverbed shear stress behind the upstream permeable spur dike tend to be stable. The results of the study can improve the theory of flow mitigation effect in the action area of inserted permeable spur dike.

Key words: permeable spur dike; CCHE2D; slow flow; spur dike spacing