

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.008
许百强, 喻涛, 王平义, 等. 长江上游透水丁坝水面线分布试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(5): 62-68. (XU Baiqiang, YU Tao, WANG Pingyi, et al. Experimental studies on flow profile of permeable spur dikes in upper reaches of Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 62-68. (in Chinese))

长江上游透水丁坝水面线分布试验研究

许百强^{1,2}, 喻涛^{1,2}, 王平义^{1,2}, 杨小文³, 张秀芳^{1,2}

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 3. 长江重庆航道局, 重庆 400010)

摘要: 丁坝是长江上游航道整治中最常用的整治建筑物, 工程实践中多采用抛石透水丁坝, 此类丁坝具有一定透水性, 在现有丁坝水沙特性研究中极少考虑透水性对此类丁坝的影响。不同的空隙率和空隙尺寸对改善透水丁坝附近水位场及流速场具有不同效果。通过水槽概化模型试验, 研究了3种空隙尺寸和5种空隙率工况下透水丁坝周围水面线分布情况, 对比分析了不同空隙率和不同空隙尺寸等因素对透水丁坝周围水面线的影响规律。结果表明: 相比实体丁坝, 在一定的空隙率和空隙尺寸条件下, 透水丁坝对其上游的壅水效果更佳, 同时还可增加其下游水深, 降低纵横向水面比降, 对改善丁坝右侧束窄段水流形态、减轻丁坝水毁、延长其使用年限以及改善生态环境等方面也具有更积极的作用。

关键词: 透水丁坝; 空隙率; 水面线; 空隙尺寸

中图分类号: U617.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)05-0062-07

丁坝具有束水攻沙、壅高上游水位及改善航道水流条件的作用。丁坝的布设改变了原有河道的局部水面条件和水流流态, 作为一种航道整治建筑物广泛应用于航道整治工程中。Uijtewaai^[1]通过物理模型试验得出丁坝设计的细微变化对水流之间的相互作用、河床的形态以及泥沙输移等都会产生复杂影响, 对于综合考虑河流系统在生态、航运及防洪方面的优化有很大意义; Mostafa 等^[2-3]通过动床试验得出透水丁坝不会改变主航道中心线处的水深, 而实体丁坝主航道中心线处的水深会发生一些变化; 李明龙等^[4]通过水槽概化模型试验得出双丁坝对丁坝周围水面线的影响规律; 张可^[5]通过水槽概化模型试验得出不同结构形式丁坝对丁坝周围水面线的影响规律; 许光祥等^[6]通过物理模型试验获得了丁坝及其临近断面水位变化值与丁坝束窄度关系的经验计算式; 李志勤等^[7]通过试验验证了VOF模型对模拟丁坝影响范围内自由水面的可行性; 周银军等^[8]通过玻璃水槽动床试验研究了桩柱式透水丁坝的水流特性; Yu 等^[9]通过物理模型试验研究了不同类型丁坝的稳定性; 丁晶晶等^[10]通过水槽试验将透水框架用于改进丁坝坝头, 通过最优透空率使透水坝头控制坝头局部冲刷, 从而获得最好防冲效果; 郑惊涛^[11]通过水槽试验研究了透水框架坝在集鱼效应、提高鱼类栖息适合度等方面的生态效应; 贺伟军等^[12]较为详细地对透水丁坝的研究内容和方法进行了介绍, 推荐了透水丁坝在相关工程设计中的关键参数以及未来的主要发展方向; 刘焕芳等^[13]通过模型试验结合能量方程, 推导出了桩柱式透水丁坝的壅水高度经验公式; 李玉建等^[14]通过推求单排井柱桩形式的透水丁坝上下游的流速公式与计算的塔里木河实际平均流速比较, 从而验证了单排井柱桩形式的透水丁坝对水流的阻缓作用。以上学者及科研人员通过物理模型试验和数学模型等方法对丁坝周围水面线等进行了研

收稿日期: 2018-11-29
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402106-04); 重庆市教委科技项目(KJ1600511); 重庆市前沿与应用基础研究计划项目(cstc2015jcyjA30004)
作者简介: 许百强(1987—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事港口及航道工程等方面的研究。
E-mail: 754783767@qq.com 通信作者: 喻涛(E-mail: yutaochq@sina.com)

究。模型试验的丁坝形式多为实体不透水丁坝,而长江上游的航道整治措施中多采用抛石透水丁坝,对长江上游梯形横截面圆弧头透水丁坝的水面研究甚少,考虑透水性对此类丁坝水面线的影响更是鲜见相关文献。

本文通过水槽概化模型试验与理论分析相结合的方法,从流量、空隙率和空隙尺寸等因素出发研究不同工况下透水丁坝对水面线的影响规律,所得结果对选取透水丁坝空隙率和空隙尺寸以及更好地发挥透水丁坝在航道整治中的作用,具有一定参考价值。

1 模型试验

本试验在重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室 30 m×2 m×1 m(长×宽×高)的矩形玻璃水槽中进行。由 DCMS 流量控制系统控制进口流量,实时水位由 UBL-2 超声波浪/水位采集分析仪跟踪测读,丁坝位置水深由水位测针读取。水位测点及断面布置见图 1。

通过对长江上游丁坝尺寸的统计分析,并结合试验水槽实际宽度,确定透水丁坝坝长 50 cm,坝高 10.0 cm,坝顶宽 7.5 cm,坝底宽 42.5 cm,丁坝横截面采用梯形断面,坝头采用圆弧直头形式;丁坝迎水坡坡比为 1:1.5,背水坡坡比为 1:2.0(图 1)。试验中透水丁坝空隙为圆形,3 种空隙直径尺寸(R)分别为 16,20 和 32 mm;流量(Q)采用 65,95 和 135 L/s 三级流量,分别对应水深是 $H=11,14$ 和 17 cm;模型试验丁坝挑角为 90°。通过组合不同空隙率($P=6.8\%,P=10.6\%,P=14.1\%,P=17.4\%,P=22.5\%$)、不同空隙尺寸($R=16\text{ mm},R=20\text{ mm},R=32\text{ mm}$)和不同水流条件($Q=65\text{ L/s}(H=11\text{ cm}),Q=95\text{ L/s}(H=14\text{ cm}),Q=135\text{ L/s}(H=17\text{ cm})$),进行了 36 组工况的试验。

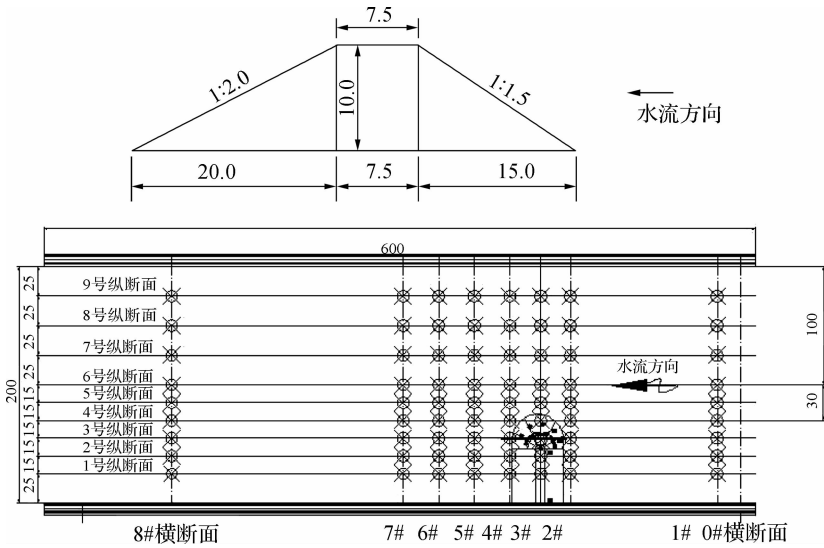


图 1 丁坝横断面及水位测点分布(单位:cm)
Fig.1 Cross-section of spur dike and distribution of water level measuring points (unit: cm)

2 纵向水面线分析

2.1 不同空隙率下纵向水面线变化

当空隙尺寸为 16 mm 时,选取工况 5($P=6.8\%,R=16\text{ mm},Q=95\text{ L/s},H=14\text{ cm}$)、工况 11($P=14.1\%,R=16\text{ mm},Q=95\text{ L/s},H=14\text{ cm}$)、工况 17($P=22.5\%,R=16\text{ mm},Q=95\text{ L/s},H=14\text{ cm}$)进行研究,同时选取实体丁坝的工况 2($P=0,R=0,Q=95\text{ L/s},H=14\text{ cm}$)作为参照,分别绘出 2#,5#,8#纵断面水

面线进行对比分析(图2)。

当空隙尺寸为 20 mm 时,选取工况 20($P = 6.8\%$, $R = 20\text{ mm}$, $Q = 95\text{ L/s}$, $H = 14\text{ cm}$)、工况 23($P = 14.1\%$, $R = 20\text{ mm}$, $Q = 95\text{ L/s}$, $H = 14\text{ cm}$)、工况 26($P = 22.5\%$, $R = 20\text{ mm}$, $Q = 95\text{ L/s}$, $H = 14\text{ cm}$)进行研究,同时选取实体丁坝的工况 2 作为参照,分别绘出 2#、5#、8#纵断面水面线进行对比分析(图2)。

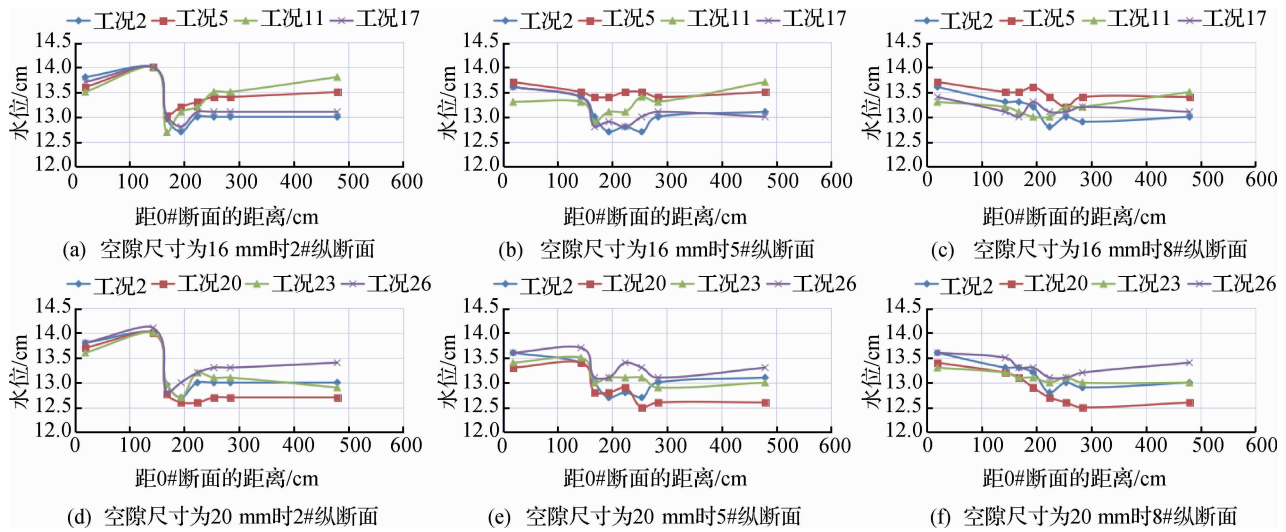


图2 不同空隙率条件下透水丁坝不同纵断面水面线分布

Fig.2 Flow profile distribution of different longitudinal sections of permeable spur dikes under different porosities

空隙尺寸为 32 mm 时,试验结果与空隙尺寸 20 mm 时类似。

对比分析以上几组工况的纵向水面线可见,小空隙率时的工况 5 和大空隙率时的工况 26,相比实体丁坝,在上游壅水效果基本一致情况下,对增加丁坝右岸束窄段水深、改善下游水深以及降低水面纵比降上,实际效果都更好。

图2还表明,左岸丁坝处2#纵断面,各个工况下丁坝处跌水均十分明显,5#纵断面的中间部分测点由于受到绕坝水流影响,在坝头附近水深出现较大波动,8#纵断面因距坝体相对较远一些,水深变化比5#纵断面要平稳些。

在相同流量、相同空隙尺寸和不同空隙率条件下,相比实体丁坝,透水丁坝在上游壅水效果变化不大情况下,对改善右岸束窄段水深、下游水深和降低纵比降等方面效果明显。通过对比效果较好的几组工况,小空隙率时透水丁坝的效果相对最佳,大空隙率时次之,中空隙率时效果要差一些。

由于在不同流量条件下,透水丁坝在水槽的水流形态整体呈现相近规律,在 $Q = 65\text{ L/s}$ 时,水深较浅刚刚淹没丁坝,而 $Q = 135\text{ L/s}$ 时,由于流量和水深都较大,丁坝对水流的影响效果减弱,同时受篇幅所限,侧重以 $Q = 95\text{ L/s}$ 为例,对透水丁坝周围水面线进行分析研究。

2.2 不同空隙尺寸条件下纵向水面线变化

空隙率 6.8% 时,选取工况 5、工况 20、工况 29($P = 6.8\%$, $R = 32\text{ mm}$, $Q = 95\text{ L/s}$, $H = 14\text{ cm}$),同时选取实体丁坝的工况 2 作为参照对比,分别绘出 2#、5#、8#纵断面水面线进行对比分析(图3)。

当空隙率为 14.1% 时,选取工况 11、工况 23、工况 32($P = 14.1\%$, $R = 32\text{ mm}$, $Q = 95\text{ L/s}$, $H = 14\text{ cm}$),同时选取实体丁坝的工况 2 作为参照对比,分别绘制出在 2#、5#、8#纵断面的水面线进行对比分析(图3)。

从图3可见,从靠近左岸丁坝处的2#断面、坝头附近的5#断面和远离丁坝靠近右岸8#断面不同断面出发,受透水丁坝影响,左岸丁坝处的2#断面的水面线跌水十分明显;坝头附近的5#纵断面,受绕坝水流影响在坝头附近水深出现上下较大波动;8#纵断面相对远离坝体,水深变化相比5#纵断面要平稳些,但由于受丁坝影响,整个右岸束窄段的水面线波动还是比较大。

在相同流量、相同空隙率和不同空隙尺寸条件下,相比实体丁坝,透水丁坝在上游壅水效果变化不大情况下,对改善右岸束窄段水深、下游水深和降低纵比降方面效果明显。通过对比效果较好的几组工况,小空隙尺寸时的透水丁坝效果相对最佳,大空隙尺寸时次之,中空隙尺寸效果要差一些。

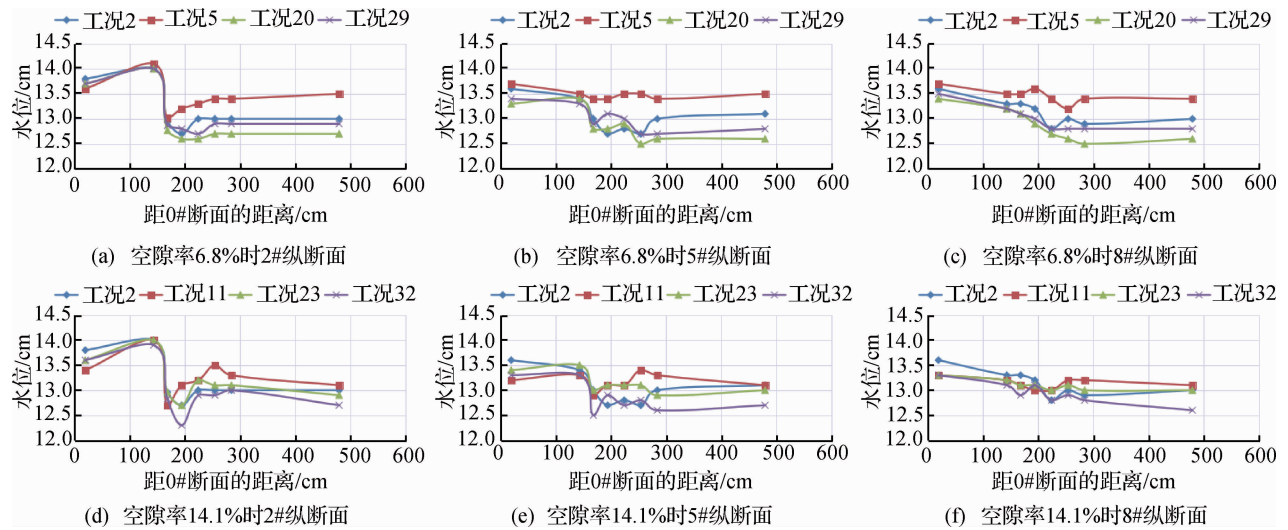


图 3 不同空隙尺寸条件下透水丁坝不同纵断面水面线分布

Fig. 3 Flow profile distribution of different longitudinal sections of permeable spur dikes under different void size conditions

3 横向水面线分析

3.1 不同空隙率条件下横向水面线变化

当空隙尺寸为 16 mm 时,选取工况 5、工况 11、工况 17,同时以实体丁坝的工况 2 作为参照,分别绘出 2#,3#,4#和 7#横断面水面线进行对比分析(见图 4)。

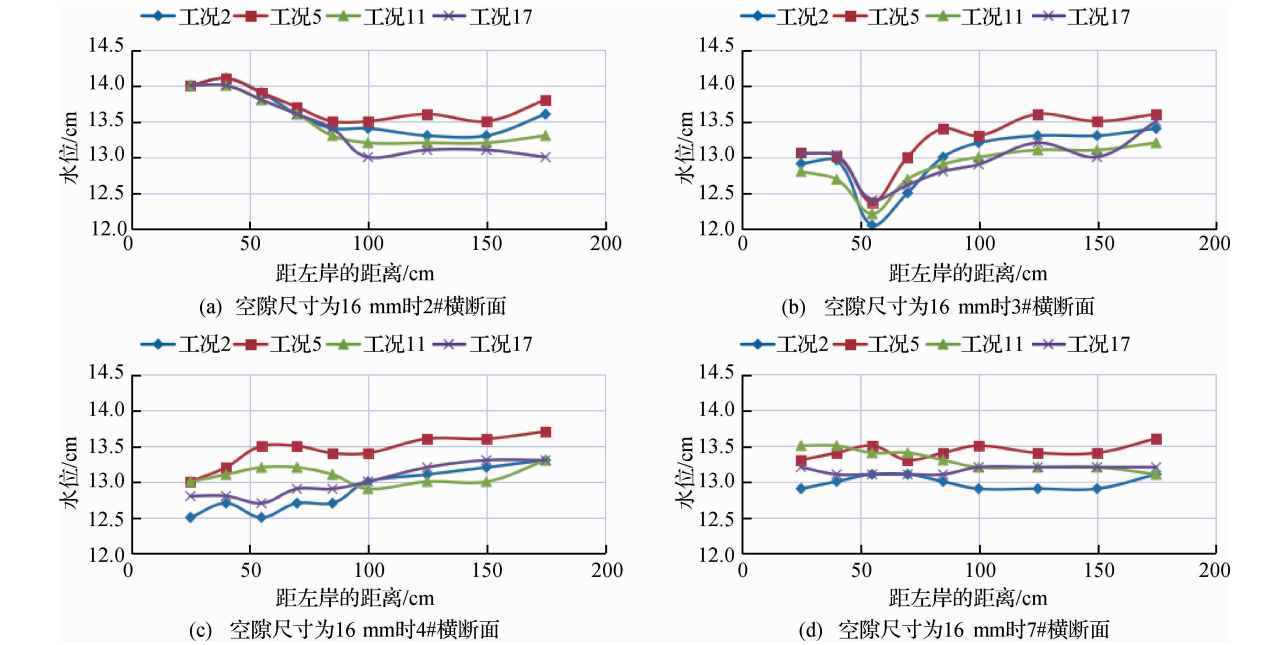


图 4 不同空隙率条件下透水丁坝不同横断面水面线分布

Fig. 4 Flow profile distribution of different cross sections of permeable spur dikes under different porosities

对比以上几组工况的横向水面线,相比实体丁坝,透水丁坝在上游壅水效果变化不大情况下,在改善下游水深及降低横比降等方面,实际影响效果都要优于实体丁坝,其中工况 5,即小空隙率下的透水丁坝在增加右岸束窄段水深和改善下游水深方面效果相对最佳。

同理,可得到空隙尺寸为 20 和 32 mm 时,不同工况下 2#,3#,4#和 7#横断面水面线,分析结果表明,在丁坝上游处 2#横断面的左岸水位壅高明显,横向水面线总体呈现左岸高右岸低;在坝体轴线 3#横断面由于受到坝体阻水作用的影响,出现明显跌水,在坝头附近水深降低十分明显;水流过坝后,4#横断面的整体水面线呈现左岸低右岸高,坝后水深较浅;当水流继续往下游流动一段距离,在远离丁坝的 7#横断面水面线开始趋于平稳,横向水面差较小。

在相同流量、相同空隙尺寸和不同空隙率条件下,各工况在同一横断面上水面线变化也有比较明显的差异,相比实体丁坝,透水丁坝在改善坝后水深和降低横比降等方面效果较为明显,同时明显改变右岸束窄段的水深,水流过坝后的左岸水深普遍增加,在壅高上游水位、降低横比降、增加右岸束窄段水深、改善下游水深等方面,其效果也较为显著,通过对比效果较好的几组工况,透水丁坝在小空隙率时的效果相对最佳,大空隙率时次之,中空隙率时效果要差一些。

3.2 不同空隙尺寸条件下横向水面线变化分析

当空隙率为 6.8% 时,选取工况 5、工况 20、工况 29,同时以实体丁坝的工况 2 作为参照,分别绘出 2#,3#,4#和 7#横断面水面线进行对比分析(见图 5)。

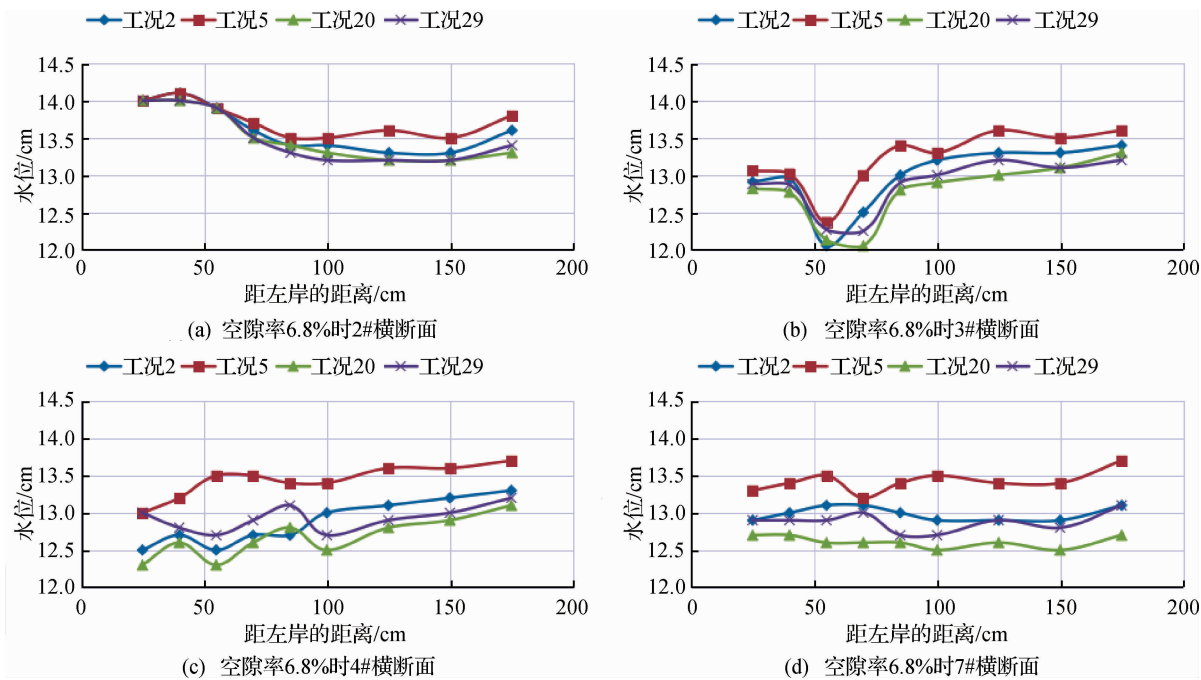


图 5 不同空隙尺寸条件下透水丁坝不同横断面水面线分布

Fig. 5 Flow profile distribution of different cross sections of permeable spur dikes under different void size conditions

同理,可得到空隙率为 14.1% 和 22.5% 时,2#,3#,4#和 7#横断面的水面线。分析结果表明,丁坝上游处 2#横断面的左岸水位壅高明显,横向水面线总体呈现左岸高右岸低;在坝体轴线 3#横断面由于受到坝体的阻水作用影响,出现明显跌水,在坝头附近水位降低十分明显;水流过坝后,在 4#横断面的整体水面线呈现左岸低右岸高,坝后水深较浅;当水流继续往下游流动一段距离,在远离丁坝 7#横断面的水面线开始趋于平稳,横向水面差较小。

在相同流量、相同空隙率和不同空隙尺寸条件下,各工况在同一横断面上水面线变化也有比较明显的差异,相比实体丁坝,透水丁坝在改善坝后水深和降低横比降等方面效果较为明显,同时明显改变右岸束窄

段的水深,普遍增加水流过坝后的左岸水深,在壅高上游水位、降低横比降、增加右岸束窄段水深、改善下游水深等方面的效果较为明显,通过对比效果较好的几组工况,透水丁坝在小空隙尺寸时的效果相对最佳,大空隙尺寸时次之,中空隙尺寸效果要差一些。

分析出现以上水流现象的主要原因是:由于透水丁坝具有一定透水性,水流通过透水丁坝的空隙对下游水流进行了有效补充,改善了坝后水深,同时减小了右岸主流区绕坝水流的流速,绕坝水流对坝后水量的补充减弱,从而增加了右岸水深;此外,由于透水丁坝的空隙条件有限,其本身的阻水缓流作用依旧明显,相比实体丁坝,透水丁坝对上游的壅水效果相差不大,在过坝流、绕坝流和越坝流的联合作用下,明显改善右岸束窄段和下游段的水深;由于透水丁坝在不同空隙率和不同空隙尺寸条件下的空隙数量和密度的分布不同,造成丁坝对水流阻力和流速的影响有所差异,因此对上下游水位的影响也有所不同。

4 结 语

采用水槽概化模型试验,分析研究了不同空隙率和不同空隙尺寸等因素对透水丁坝周围水面线的影响,主要结论如下:

(1) 在同一流量、同一空隙尺寸和不同空隙率条件下,透水丁坝在壅高上游水位、降低横纵比降、增加右岸束窄段水深、改善下游水深等方面要优于实体丁坝,在小空隙率(即本试验所采用的空隙率6.8%)时其效果相对最佳,大空隙率时次之,中等空隙率时效果差一些。

(2) 在同一流量、同一空隙率和不同空隙尺寸条件下,透水丁坝在壅高上游水位、降低横纵比降、增加右岸束窄段水深、改善下游水深等方面要优于实体丁坝,在小空隙尺寸(即本试验所采用的空隙尺寸16 mm)时其效果相对最佳,大空隙尺寸时次之,中等空隙尺寸时效果差一些。

在其他影响因素相同的条件下,透水丁坝对其上游壅水、改善丁坝周围水流流态、减轻丁坝水毁等具有积极作用。因为受限于时间和场地等因素,只做了清水定床试验,下一步将补充动床试验,从定量上给出相对最佳的透水丁坝空隙率和空隙尺寸。

参 考 文 献:

- [1] UIJTTEWAAL W S. Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(9): 782-791.
- [2] MOSTAFA M M, AHMED H S H, ABOZIED G A, et al. Experimental study on flow characteristics around single groyne with different permeability in compound channel floodplain[C]//2013 IAHR Congress. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [3] AHMED H S H, MOSTAFA M M, ABOZIED G A, et al. Flow analysis around groyne with different permeability in compound channel floodplains[J]. Journal of Engineering Sciences, 2013, 41(2): 302-320.
- [4] 李明龙,王平义,刘怀汉,等.山区河流双丁坝水面线试验研究[J].中国水运,2014,14(11):215-219.(LI Minglong, WANG Pingyi, LIU Huaihan, et al. Experimental study on the water surface of the double dam in mountain rivers[J]. China Water Transport, 2014, 14(11): 215-219. (in Chinese))
- [5] 张可.不同结构形式丁坝水流特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.(ZHANG Ke. Study on water flow characteristics of spur dikes with different structures[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [6] 许光祥,程昌华,刘建新.丁坝对河道水位影响的试验研究[J].重庆交通学院学报,1994,13(4):48-53.(XU Guangxiang, CHENG Changhua, LIU Jianxin. Influence on water-surface-profile at the reach of river with spur-dike[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1994, 13(4): 48-53. (in Chinese))
- [7] 李志勤,李洪,李嘉,等.溢流丁坝附近自由水面的实验研究与数值模拟[J].水利学报,2003(8):53-57.(LI Zhiqin, LI Hong, LI Jia, et al. Experimental study and numerical simulation of flow in the vicinity of a submerged spur-dike[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(8): 53-57. (in Chinese))
- [8] 周银军,刘焕芳,何春光,等.桩柱透水丁坝水流特性试验研究[J].泥沙研究,2009(5):58-62.(ZHOU Yinjun, LIU Huanfang, HE Chunguang, et al. Experimental study on water flow characteristics of pile permeable spur dike[J]. Journal of Sediment Research, 2009(5): 58-62. (in Chinese))

- [9] YU Tao, WANG Pingyi, CHEN Li. Experimental study of the stability of spur dyke for different types[J]. Journal of Applied Sciences, 2013(19): 4040-4045.
- [10] 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. Application of permeable frame in improving spur dyke structures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(6): 30-38. (in Chinese))
- [11] 郑惊涛. 透水框架坝生态效应研究[J]. 水运工程, 2018(12): 16-20. (ZHENG Jingtao. Study on ecological effects of penetrating frame dam[J]. Port and Waterway Engineering, 2018(12): 16-20. (in Chinese))
- [12] 贺伟军, 樊新建, 赵文举, 等. 透水丁坝研究简介及展望[J]. 价值工程, 2018(22): 276-280. (HE Weijun, FAN Xinjian, ZHAO Wenju, et al. A brief introduction and prospect of permeable spur dike study[J]. Value Engineering, 2018(22): 276-280. (in Chinese))
- [13] 刘焕芳, 周银军, 宗全利, 等. 透水丁坝壅水高度探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(5): 37-39. (LIU Huanfang, ZHOU Yinjun, ZONG Quanli, et al. Discussion on the height of drowning sluice water[J]. Yangtze River, 2008, 39(5): 37-39. (in Chinese))
- [14] 李玉建, 侍克斌, 李凯. 单排井柱桩透水丁坝的阻水缓流作用分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(8): 89-90. (LI Yujian, SHI Kebin, LI Kai. Analysis of water-blocking and slow-flow effect of single-row well column permeable spur dike[J]. Yellow River, 2008, 30(8): 89-90. (in Chinese))

Experimental studies on flow profile of permeable spur dikes in upper reaches of Yangtze River

XU Baiqiang^{1,2}, YU Tao^{1,2}, WANG Pingyi^{1,2}, YANG Xiaowen³, ZHANG Xiufang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Changjiang Chongqing Waterway Bureau, Chongqing 400010, China)

Abstract: The spur dike is one of the most frequently-used hydraulic structures in the waterway regulation works of the upper reaches of the Yangtze River. And in the engineering practice, the riprap permeable spur dikes are often used in the waterway regulation projects because they have certain permeability. In the studies of water-sediment characteristics of the spur dikes, the influences of permeability on the existing spur dikes located in the Yangtze River are seldom considered. Different porosities and void sizes have different effects on improving the water level field and velocity field near the permeable spur dikes. Based on the flume generalization model tests, studies of the flow profile distribution around the permeable spur dikes under the conditions of three void sizes and five porosities are carried out in this research. And the influence law of different void sizes and different porosities on the flow profile around the permeable spur dikes is understood through comparative analysis. The analysis results show that the backwater effect of the permeable spur dikes is better than that of the solid spur dikes under certain void ratios and void sizes. The permeable spur dikes can also increase the downstream water depth and reduce the vertical and horizontal water surface gradients, which has a more positive effect on improving the flow patterns of the narrow section of the right bundle of the permeable spur dikes, thus reducing the damage of the permeable spur dikes, prolonging the service life and improving the ecological environment. The research results have certain reference value for the design of waterway regulation structures and the improvement of waterway regulation effect in the middle and upper reaches of the Yangtze River.

Key words: permeable spur dike; porosity (void ratio); flow profile; void size