

淹没双丁坝间水流结构特性 PIV 试验

刘易庄¹, 蒋昌波^{1,2}, 邓 斌^{1,2}, 王 刚³

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要:为探讨淹没双丁坝对坝间水流的影响,采用粒子图像测速(PIV)系统对坝间水平面流场进行了测量,并对坝间水流结构进行了分析。结果表明:丁坝间距与丁坝长度的比值 d/B (B 为定值)对坝间漩涡中心位置、坝间回流区及涡量分布有着显著影响; d/B 越大,坝间“漩涡”中心越接近坝头线;坝间回流区宽度随 d/B 增大而增大,零速度线基本呈线性关系且其斜率随 d/B 增大而减小,同时回流区流速也随之发生很大变化;上游丁坝头附近出现最大负涡量而在下游丁坝头附近出现最大正涡量。

关键词:淹没双丁坝;回流区;流场;涡量;水流特性;粒子图像测速

中图分类号:TV863;TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)06-0026-05

PIV experiment on flow characteristics between submerged double spur dikes//LIU Yizhuang¹, JIANG Changbo^{1,2}, DENG Bin^{1,2}, WANG Gang³ (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China; 3. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: In order to study the influence of submerged double spur dikes on the flow characteristics between them, this study measured the horizontal flow field within the area between the spur dikes using a particle image velocimetry (PIV) system, and analyzed the flow characteristics between the spur dikes. Results show that the ratio of the gap between the double spur dikes to the dike length d/B (B is a constant) has a significant impact on the location of the eddy's core between the spur dikes, the recirculation flow between the spur dikes, and the vorticity distribution around the heads of the spur dikes. When the value of d/B increases, the eddy's core is closer to the line connecting the tips of the spur dikes, and the width of the recirculation zone increases. The zero velocity line changes linearly in the streamwise direction, and its slope decreases with the increase of d/B . The velocity in the recirculation zone changes significantly with the value of d/B . The maximum negative vorticity occurs near the head of the upstream spur dike, while the maximum positive vorticity occurs near the head of the downstream spur dike.

Key words: submerged double spur dikes; recirculation zone; flow field; vorticity; flow characteristics; particle image velocimetry

丁坝能够引导水流,防止河岸发生冲刷而淤高河滩,是一种广泛使用的航道整治建筑物。水流在绕过丁坝后,水流流场及压力场都发生显著变化^[1],在坝头附近形成“马蹄形”漩涡^[2]以及一系列的尾流漩涡^[3],水流呈现较强的三维特性。许多学者^[1,4-7]对单丁坝的来流特性、回流区特性、局部冲刷、冲刷坑内水流结构以及单丁坝周边的流速、雷诺应力分布及紊流特性等方面进行了深入研究。然而,在实际应用中,大多采用丁坝群进行航道整治,而双丁坝是最简单的丁坝群,可以将双丁坝视为研究丁坝群的单元,因此,研究双丁坝间水流特性对理解坝间泥沙

输移和能量交换、选取合理的坝间距有着重要意义。徐晓东^[8]采用声学多普勒流速仪(ADV)对双丁坝附近水流结构进行了研究,但 ADV 作为一种接触式单点测量技术,必然会对测点周边水流流场结构造成较大干扰。粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)是一种瞬态、多点、无接触式的流体测速技术,可提供丰富的流场空间结构,因此能较好地弥补 ADV 测量技术的不足。齐鄂荣等^[8-9]采用 PIV 研究了二维突起物绕流结构,主要分析了漩涡结构运动及发展过程、流场结构的时均特点;张冠卿等^[11-12]采用 PIV 研究了单丁坝坝后水流特征,对坝

基金项目:国家自然科学基金(51239001,51179015);水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金(2013SS08)

作者简介:刘易庄(1990—),男,湖南隆回人,博士研究生,主要从事河流、海岸动力过程及其数值模拟技术研究。E-mail:877210356@qq.com

通信作者:蒋昌波(1970—),男,陕西石泉人,教授,博士,主要从事河流、海岸动力过程及其数值模拟技术研究。E-mail:jcb36@163.com

后时均流速及涡量场进行了分析;Weitbrecht^[13]采用PIV研究了掺混区水流特性。

以往关于PIV对丁坝的研究一般都集中在单丁坝或丁坝群的流速分布、紊动特性及漩涡结构等方面,本文采用PIV对淹没双丁坝间水流流场进行测量,主要分析丁坝间距与丁坝长度的比值(d/B)对坝间平面回流区流速分布、零速度线以及涡量分布的影响。

1 试验方法

1.1 试验条件与试验装置

试验在长沙理工大学水利实验中心的变坡水槽(试验中采用平坡)中进行,水槽长16 m,宽0.4 m,高0.5 m。水槽采用水泵供水,在水槽尾部设置调节水位的格栅尾门,试验装置见图1。丁坝采用透明有机玻璃制成,长 $B=5\text{ cm}$,高 $h=18\text{ cm}$,厚 $t=1\text{ cm}$,如图2所示。流场测试采用美国TSI公司的

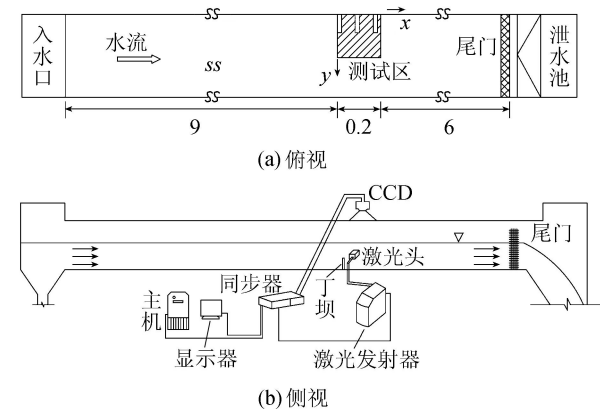


图1 水槽试验装置及PIV系统(单位:m)

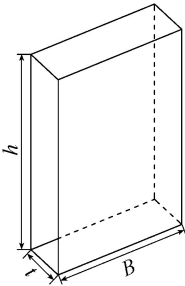
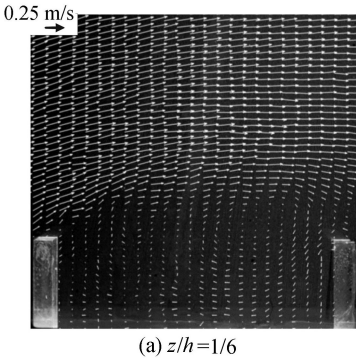
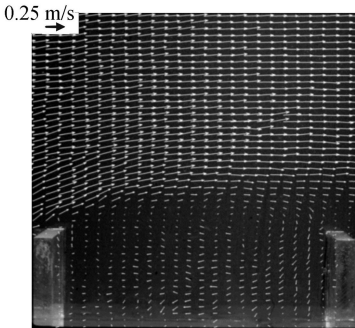


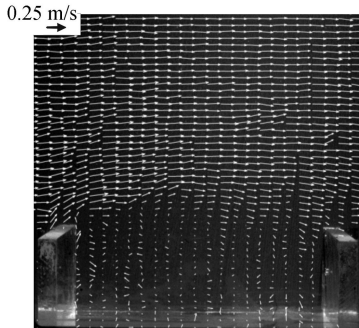
图2 丁坝示意图



(a) $z/h=1/6$



(b) $z/h=1/2$



(c) $z/h=5/6$

图3 不同相对水深水平面流场($d/B=3$)

PIV系统,其中光源为双脉冲激光,采用强激光(强度约为120 mJ)以保证能均匀照亮所测流场,由同步器控制触发,采集频率为1.04 Hz;PIV系统通过CCD(2048×2048像素)记录图像数据并传输到INSIGHT3G软件进行分析,图像采集间隔为100 μs。试验测量了3个不同相对水深($z/h=1/6$ 、 $z/h=1/2$ 、 $z/h=5/6$, z 轴以水槽底为零点,沿水槽壁往上为正)的水平面流场,测量区域大小为200 mm×200 mm,试验测量区域及坐标系如图1(a)所示。

1.2 试验工况

试验流量 $Q=57.6\text{ m}^3/\text{h}$,水深 $H=0.20\text{ m}$,流速 $u_s=0.20\text{ m/s}$,在3种不同坝间距 d ($d=0.075\text{ m}$ 、 $d=0.15\text{ m}$ 、 $d=\infty$ (表示单个丁坝))的情况下分别测量 $z=0.03\text{ m}$ 、 $z=0.09\text{ m}$ 和 $z=0.15\text{ m}$ 3个水平面流场。试验过程中在水槽首部和尾部分别布置超声波水位计测量试验水深。

2 试验结果及分析

2.1 水平面流场

为探讨淹没双丁坝不同相对水深位置的水平面(xOy 平面)流场情况,选取坝间距 $d=0.15\text{ m}$ ($d/B=3$)、相对水深 $z/h=1/6$ 、 $z/h=1/2$ 、 $z/h=5/6$ 的3个平面(图3)进行流场分析。由于上游丁坝的阻挡,坝后形成相对静水区,坝头水流由于丁坝的束窄作用导致流速增大,水流绕过丁坝后向无丁坝一侧偏转,与坝间相对静水区形成剪切流,使坝间出现漩涡。从图3(a)可以看出在坝间近底区水流较平顺,形成了稳定规则的漩涡;随着相对水深的增大漩涡尺度变小(图3(b));近水面处坝间水流流速分布忽大忽小、忽左忽右,流态较为混乱,也几乎看不到漩涡(图3(c)),这是由于水流受到坝顶的影响,离坝顶越近水流流态越不平稳,也越不易形成漩涡。由于在 $z/h=1/6$ 处存在稳定规则的漩涡,为了更好地阐述双丁坝间回流区水流结构特性及涡量分布规律,选择 $z/h=1/6$ 平面作为分析对象平面。

图4为 $z/h=1/6$ 平面不同坝间距的水平面流

场。坝头发生水流分离形成剪切流,使坝后形成漩涡。由图4可以看出,当 $d/B=1.5$ 时,漩涡中心在坝头线之上,随 d/B 的增大,漩涡中心向坝头线移动,当 $d/B=\infty$ 时,漩涡中心几乎与坝头线齐平。这说明下游丁坝的存在限制了上游丁坝坝后漩涡的自由发展,而使得坝间漩涡受到下游丁坝的“挤压”,并有向丁坝外侧溢出的趋势;随着坝间距的增大,下游丁坝的“挤压”作用也越弱,因此漩涡中心向坝头线移动。

2.2 流速

图5为不同坝间距条件下双丁坝附近 x 方向流速分布云图(箭头线为主流区与回流区分界线,虚线椭圆区域为负流区),可以看出由于上游丁坝的阻挡,水流立即向无丁坝侧偏转,在坝间形成回流。

将过上游丁坝坝头的流线(箭头线)作为回流区的分界线^[14],当 $d/B=1.5$ 时,回流区最大宽度为 $1.6B$;当 $d/B=1.5$ 时,回流区最大宽度为 $1.8B$;当 $d/B=\infty$ 时,回流区最大宽度为 $2B$ 。这说明随着 d/B 的增大,回流区宽度也随之增大。此外,坝间回流区出现负向流速,当 $d/B=1.5$ 时,仅在下游丁坝头出现明显负向流速,随着 d/B 的增大负流区向坝间移动,且负流区面积(虚线椭圆区域)和负向流速大小也随之增大。

图6为 $x=0, 0.84B, 1.68B, 2.46B, 3.24B$ 处 x 方向流速分布(根据坝间距 $d=0.15\text{ m}$ 平均选取5个断面,竖线表示特征断面,圆点与竖线之间的距离表示流速大小,椭圆区为坝头逆流)。可以看出在下游坝头处出现明显逆流(椭圆圈内),其最大负

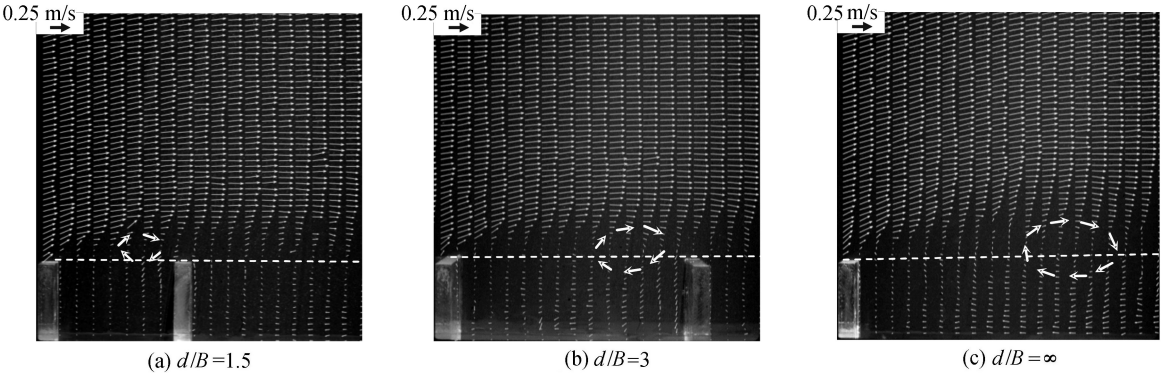


图4 不同坝间距水平面流场($z/h=1/6$)

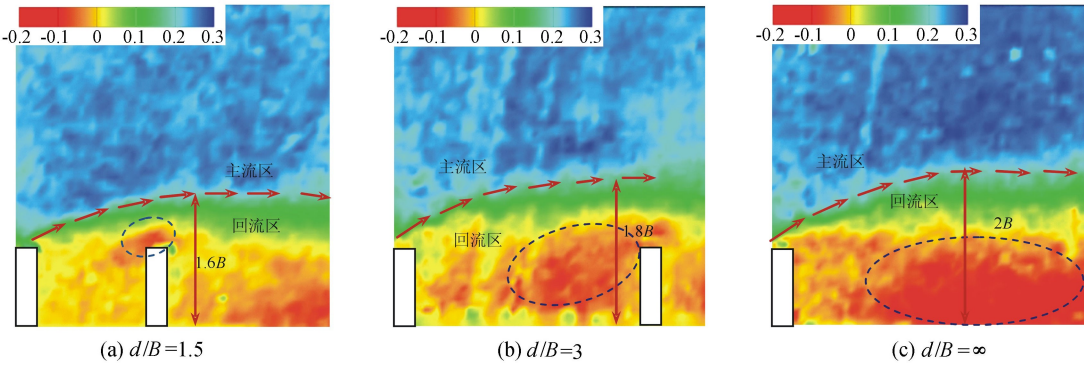


图5 坝后 x 方向流速云图(单位:m/s)

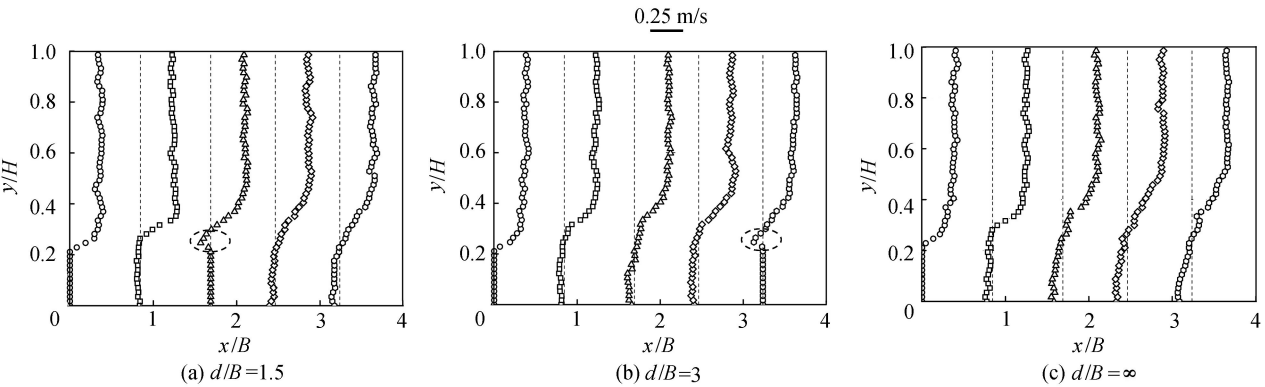


图6 坝后特征断面 x 方向流速分布

向流速分别为 0.075 m/s ($d/B=1.5$) 和 0.068 m/s ($d/B=3$), 分别占主流流速 u_s 的 37.5% 和 34.0% ; 这是由于下游丁坝仍处在上游丁坝的影响范围内, 减小了上游丁坝坝后回流长度, 为了维持坝间流体连续性^[1], 因此坝头出现逆流; 并且 d/B 越大其负向流速越小, 这是由于距离越大, 下游丁坝对上游丁坝坝后回流区影响越小。

坝间回流区内存在一条零速度线^[4], 图 7 给出了不同坝间距情况下零速度线位置的沿程变化曲线。由图 7 可以看出, 零速度线沿程变化可简化为线性变化, 但其斜率各不相同, 具体拟合公式如下:

$$\frac{y}{B} = \begin{cases} 0.04039(x/B) + 0.2414 & d/B = 1.5 \\ 0.07045(x/B) + 1.00138 & d/B = 3 \\ -0.00729(x/B) + 1.10957 & d/B = \infty \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以看出单丁坝坝后零速度线斜率为负, 这与陈稚聪等^[4]研究的结论一致; 而双丁坝间零速度线斜率为正, 且坝间距越大零速度线斜率越小。

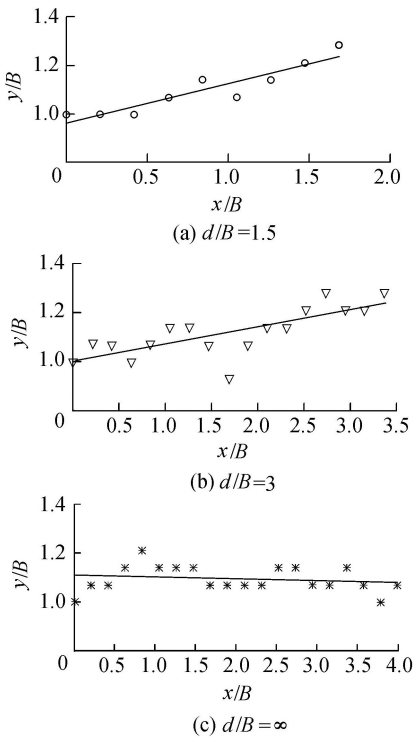


图 7 零速度线沿程变化

为了更加细化分析 d/B 对坝间回流区流速的分布影响, 结合 Weitbrecht^[13] 的研究方法分别选取 $x=0.25d$ 、 $x=0.50d$ 、 $x=0.75d$ 3 条测线 x 方向流速进行分析, 坝间特征断面流速分布如图 8 (图中横线表示坝头线, 竖线表示特征断面, 十字点和圆点与竖线之间的距离表示流速大小) 所示。回流区流速沿着丁坝方向先增大后减小 (图 8), 且 d/B 越大, 坝间流速也越大。当 $d/B=1.5$ 时, 最大流速点靠近坝头线区域, 而当 $d/B=3$ 时, 最大流速点则靠近边壁 (图 5(b))。这是由于当 $d/B=1.5$ 时下游丁坝头出

现较强的回流, 坝间漩涡较小, $x=0.75d$ 测线穿过的下游丁坝坝后回流流线靠近坝头, 因此在靠近坝头线处出现较大负向流速; 而当 $d/B=3$ 时, 坝间漩涡较大, $x=0.75d$ 测线穿过的下游丁坝坝后回流流线靠近边壁, 因此在边壁处出现最大流速。

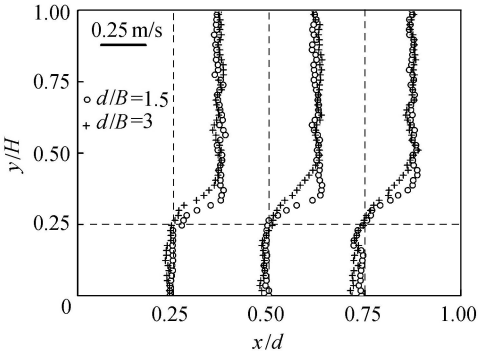


图 8 坝间特征断面流速分布

在坝间回流区内, 两种坝间距坝间流速相差不大, 在靠近下游丁坝 ($x/d=0.75$ 测线) 才出现明显差异。但在掺混区, 由图 8 可以看出, d/B 越大, 掺混区流速梯度越小, 且进入主流区的位置离坝头线越远 ($d/B=1.5$ 在 $y/H=0.375$ 处进入主流区, 而 $d/B=3$ 在 $y/H=0.5$ 附近进入主流区)。

2.3 涡量

涡动结构对丁坝附近冲淤以及掺混区的物质交换有着重要影响, 因此有必要对双丁坝周边涡量结构进行分析。

垂直方向上涡量的计算公式^[15]为

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

式中: ω_z 为垂向涡量; u 、 v 分别为 x 、 y 方向流速。

图 9 为 $z/h=1/6$ 时不同坝间距的平面垂向涡量。由图 9 可见, 水流绕过上游丁坝坝头后分离, 产生涡量值较大 (负向) 而范围较小的漩涡, 沿着水流方向涡量强度逐渐减小, 漩涡呈“喇叭”式逐渐增大, 漩涡范围增加到一定值后, 漩涡便分散成许多小块。同时从图 9 还可以看出, d/B 越大漩涡越早分散; 特别当 $d/B=1.5$ 时漩涡一直延续到下游丁坝坝后才分散, 从而加速来流水体与坝间相对静水区的掺混。以往研究认为正涡量区只在贴近上下游丁坝壁、水槽壁以及坝间小回流区出现^[15], 但此次研究发现由于下游丁坝坝头出现较大逆流, 涡量在下游丁坝坝头附近出现较大范围的正涡量区且涡量值最大可达 0.02 s^{-1} ($d/B=1.5$) 和 0.01 s^{-1} ($d/B=3$)。

3 结 论

a. 水流绕过上游丁坝坝头后边界层即发生分离, 坝间形成明显回流区, d/B 越大回流现象越明

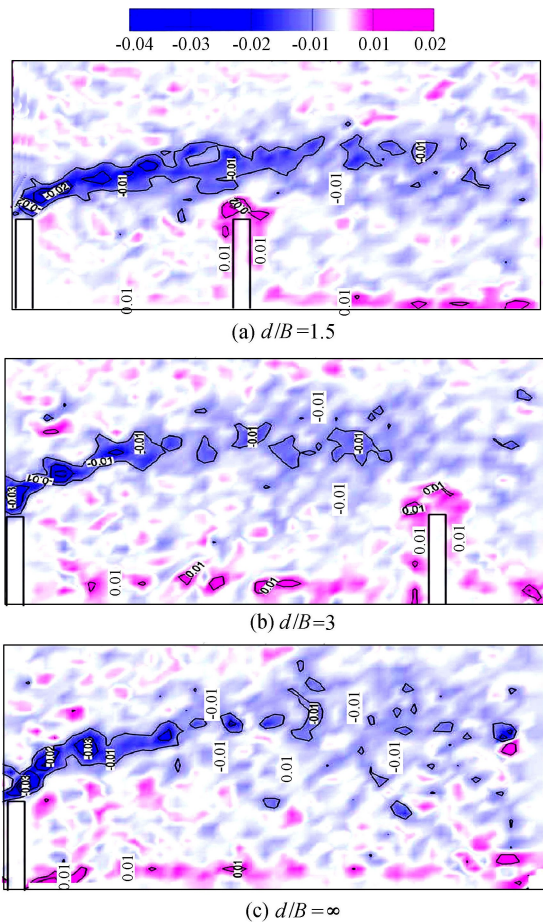


图9 坝后涡量云图(单位: s^{-1})

显,漩涡中心越靠近坝头线。

b. 坝间回流区宽度、负向流速区面积及负向流速大小随着坝间距的增大而增大。下游丁坝坝头均出现逆流,当 $d/B = 1.5$ 时,负向流速最大可达 0.075 m/s ,占主流流速的 37.5% ;而在 $d/B = 3$ 时,最大负向流速为 0.068 m/s ,占主流流速的 34% ,说明 d/B 越大逆流流速越小,下游丁坝坝头附近水体交换强度越弱。

c. 双丁坝间零速度线沿程基本呈线性关系,且其斜率为正并随 d/B 的增大而减小。此外, d/B 越大坝间回流区最大流速点越靠近边壁,掺混区流速梯度越小。

d. 上游丁坝坝头附近出现较大负涡量值,负涡量区沿水流方向呈“喇叭”式扩展,而下游丁坝坝头附近则出现较大正涡量值。

参考文献:

[1] 陆永军,周耀庭. 丁坝绕流机理及其下游流场的研究[J]. 河海大学学报,1990,18(1):28-36. (LU Yongjun, ZHOU Yaoting. Study on flow mechanism and velocity field near groin-like structure [J]. Journal of Hohai University,1990,18(1):28-36. (in Chinese))

[2] KAMIL H M AL I. Simulation of flow around piers [J].

Journal of Hydraulic Research,2002,40(2):161-174.

[3] 陈小莉,马吉明. 受漩涡作用的水下块石的起动流速[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(3):315-318. (CHEN Xiaoli, MA Jiming. Critical velocity for initiation motion of rocks under water due to vortex motion [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2005,45(3):315-318. (in Chinese))

[4] 陈稚聪,黑鹏飞,丁翔. 丁坝回流分区机理及回流尺度流量试验研究[J]. 水科学进展,2008,19(5):613-617. (CHEN Zhicong, HEI Pengfei, DING Xiang. Division and flow scale investigation of circulation zone around spur dike [J]. Advances in Water Science,2008,19(5):613-617. (in Chinese))

[5] 曹艳敏,张华庆,蒋昌波,等. 丁坝冲刷坑及下游回流区流场和紊动特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2008,23(5):560-570. (CAO Yanmin, ZHANG Huaqing, JIANG Changbo, et al. The experimental research of the flow field and turbulence characteristics in the scour and backflow region around a groin [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2008,23(5):560-570. (in Chinese))

[6] DUANJ G. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135:803-811.

[7] CHEN Liping, JIANG Juncheng. Experiments and numerical simulations on transport of dissolved pollutants around spur dike [J]. Water Science and Engineering, 2010,3(3):341-353.

[8] 徐晓东. 非淹没正交双体丁坝的水流特性及作用尺度研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.

[9] 齐鄂荣,黄明海,李炜,等. 应用 PIV 进行二维后向台阶流动特性的研究二维后向台阶流的漩涡结构的研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2004,19(4):525-532. (QI Erong, HUANG Minghai, LI Wei, et al. Investigation of vortex structure of the 2D backward facing step flow via PIV [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2004,19(4):525-532. (in Chinese))

[10] 齐鄂荣,邱兰,卢伟娟,等. 二维矩形突起物绕流流动结构的实验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2006,21(3):388-394. (QI Erong, QIU Lan, LU Weijuan, et al. Experimental investigation of structure of flow over 2D rectangular obstacle [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2006,21(3):388-394. (in Chinese))

[11] 张冠卿,林鹏智. 明渠流淹没丁坝周围流场特性的实验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(增刊2):31-33. (ZHANG Guanqin, LIN Pengzhi. Flow characteristics around open channel submerged spur-dike [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource,2012,32(Sup2):31-33. (in Chinese))

(下转第 46 页)

- [10] 王祥,周顺华,顾湘生,等.路堤式加筋土挡土墙的试验研究[J].土木工程学报,2005,38(10):119-128. (WANG Xiang, ZHOU Shunhua, GU Xiangsheng, et al. An experimental study on the reinforced retaining wall for embankment[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10):119-128. (in Chinese))
- [11] 刘华北.水平与竖向地震作用下土工格栅加筋土挡土墙动力分析[J].岩土工程学报,2006,28(5):594-599. (LIU Huabei. Analysis on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall subjected to horizontal and vertical excitations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5):594-599. (in Chinese))
- [12] 程火焰,周亦唐,钟国强.加筋土挡土墙地震动力特性研究[J].公路交通科技,2004,21(9):16-20. (CHENG Huoyan, ZHOU Yitang, ZHONG Guoqiang. Study on the seismic properties of the reinforced soil retaining wall[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9):16-20. (in Chinese))
- [13] 刘斯宏,松冈元.土工袋加固地基新技术[J].岩土力学,2007,28(8):1665-1670. (LIU Sihong, MATSUOKA H. A new earth reinforcement method by soilbags[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8):1665-1670. (in Chinese))
- [14] MATSUOKA H, LIU Sihong. A new earth reinforcement method using soilbags [M]. London: Taylor & Francis Group, 2006.
- [15] 刘斯宏,汪易森.土工袋技术及其应用前景[J].水利学报,2007,38(增刊1):644-648. (LIU Sihong, WANG Yishen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup1):644-648. (in Chinese))
- [16] 刘斯宏,白福青,汪易森.膨胀土土工袋浸水变形及强度特性试验研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):54-58. (LIU Sihong, BAI Fuqing, WANG Yishen. Experimental study on wetting induced deformation and strength characteristics of soilbag filled with expansive soil [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6):54-58. (in Chinese))
- [17] 刘斯宏,汪易森.岩土新技术在南水北调工程中的应用研究[J].水利水电技术,2009,40(8):61-66. (LIU Sihong, WANG Yishen. Application of new geotechnologies to South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8):61-66. (in Chinese))
- [18] 刘斯宏,王柳江,李卓.土工袋加固软土地基现场荷载试验的数值模拟[J].水利水电科技进展,2012,32(1):78-82. (LIU Sihong, WANG Liujiang, LI Zhuo. Numerical simulation of in-situ loading tests on a soilbag-reinforced soft foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1):78-82. (in Chinese))
- [19] 刘斯宏,王艳巧,金远征.土工袋基础减隔震试验[J].水利水电科技进展,2012,32(1):87-90. (LIU Sihong, WANG Yanyao, JIN Yuanzheng. Experimental study on vibration reduction and isolation of bases with soilbag [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1):87-90. (in Chinese))
- [20] 高军军,刘斯宏,王柳江.竖向荷载作用下土工袋的有限元数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2014,42(6):524-528. (GAO Junjun, LIU Sihong, WANG Liujiang. Numerical simulation of a soilbag under vertical loads by FEM [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(6):524-528. (in Chinese))
- [21] 马石城,张勋武,李锋.袋装水泥土材料的力学性能试验研究[J].湘潭大学自然科学学报,2007,29(3):97-102. (MA Shicheng, ZHANG Xunwu, LI Feng. Experimental study of mechanical properties of sacked cemented-soil [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2007, 29(3):97-102. (in Chinese))
- [22] 孙见松.一种袋装碎石重力式挡土墙的设计理论与应用研究[D].湘潭:湘潭大学,2011.

(收稿日期:2014-07-24 编辑:骆超)

(上接第30页)

- [12] 贾国珍,余俊华,王涛,等.淹没丁坝坝后水流结构 PIV 试验研究[J].水电能源科学,2012,30(3):84-86. (JIA Guozhen, SHE Junhua, WANG Tao, et al. PIV measurement of flow structure behind submerged spur dike [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3):84-86. (in Chinese))
- [13] WEITBRECHT V. Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers [D]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, 2004
- [14] 乐培九,李旺生,杨细根.丁坝回流长度[J].水道港口, 1999(2):3-9. (YUE Peijiu, LI Wangsheng, YANG Xigen. Length of whirlpool behind dikes [J]. Journal of Water and Harbor, 1999(2):3-9. (in Chinese))
- [15] 白静,方红卫,何国建.非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟研究[J].力学学报,2013,45(2):151-157. (BAI Jing, FANG Hongwei, HE Guojian. Study of non-submerged groin turbulence flow in a shallow open channel by LES [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(2):151-157. (in Chinese))

(收稿日期:2014-09-04 编辑:熊水斌)