

对岸丁坝不同位置对固定距离双丁坝水流特性的影响试验

董伟, 顾杰, 戚福清

(上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306, Email: jgu@shou.edu.cn)

摘要: 本文利用水槽实验, 应用 PIV 流速测量技术, 研究对岸不同位置单丁坝对固定距离双丁坝水流结构的影响。实验时, 保持进口流量和尾门水位不变, 通过改变单丁坝的位置, 测量双丁坝坝后水平剖面流速分布。结果表明: (1) 单丁坝位于双丁坝中间时, 上游丁坝相对回流区长度最短, 下游丁坝相对回流区长度最长; (2) 单丁坝沿双丁坝中间位置逐渐向上游或下游更远处移动时, 上游丁坝相对回流区长度逐渐增大, 下游丁坝相对回流区长度逐渐减小; (3) 双丁坝的上丁坝及下丁坝与单丁坝的相对距离相同时, 单丁坝对两丁坝坝后水流结构的影响程度较为恒定, 即两丁坝坝后相对回流区长度与距离的变化存在对应关系; (4) 两丁坝坝后涡量与相对回流区长度的变化趋势基本一致。研究成果有助于进一步了解对错口丁坝群的水流结构, 对河道整治、河岸防护等工程具有实际的指导意义。

关键词: PIV 测速; 丁坝; 纵向距离; 回流区; 涡量

1 引言

丁坝的回流区范围是河道整治工程设计的一个重要指标。在整治工程设计之初估算回流区的长度、宽度及其边线对了解回流区的掩护范围、决定丁坝的合理间距、了解修建丁坝后水流的变化以及预估工程的效果等都是十分必要的^[1]。窦国仁等^[2]通过水槽实验对丁坝回流区进行了观测, 研究了正挑直立单丁坝坝后回流区尺度。冯永忠等^[3-4]通过理论分析和水槽实验, 得到了错口丁坝的回流区长度、回流与主流边界线最大宽度公式, 揭示了错口丁坝间相互作用、相互影响的机理。韩玉芳等^[1]根据水槽实验结果, 分析了丁坝回流区长度与丁坝附近河床变化的规律, 随着丁坝局部冲刷坑的形成, 丁坝坝后回流区长度明显减小。韩晗等^[5]利用粒子跟踪测速技术在大型实验水槽中对长度较大、连续正挑丁坝的坝后回流区特性进行试验研究, 发现坝后回流流量的最大值接近主流流量的 50%, 且在坝前和坝后都会在坝根处形成小型的次生回流区。Garde^[6]利用物理模型, 研究分析了丁坝附近流线的缩

窄程度对下游回流区的影响,并进一步研究了丁坝长度与坝后回流区长度之间的关系,发现丁坝下游回流区长度与丁坝长度成正比关系。这些成果都是针对单丁坝或者一种形式布置的丁坝群研究,对多种形式布置的错对口丁坝群水流特性研究较少。因此,利用水槽实验对不同布置形式下错对口丁坝群水流特性进行研究。

2 水槽实验

2.1 实验设备

实验在上海海洋大学水动力学实验室 U 形水槽中进行,实验物理模型主要由实验水槽、丁坝、流量控制系统和 PIV (流速测量系统) 组成。水槽底板及侧壁均为钢化玻璃,直道段长 6.00m,宽 0.45m,高 0.55m,丁坝模型为水晶玻璃,规格为 0.05m×0.05m×0.15m (长×宽×高),实验时,丁坝模型紧贴水槽边壁置于直道中段,实验水槽见图 1。

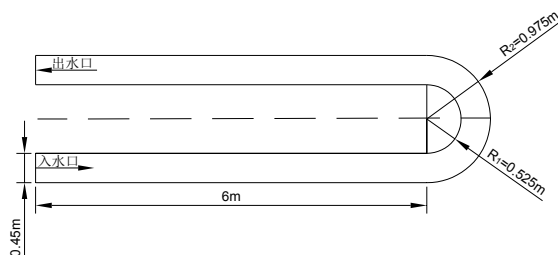


图 1 实验水槽

2.2 实验设计

将非淹没双丁坝 (A、B 丁坝间距为 0.45m) 紧贴边壁放置在水槽左侧,对岸单丁坝 (C 丁坝) 紧贴边壁放置在水槽的右侧 (不同工况, C 丁坝位置不同),实验过程中,进口流量、尾门水位及 A、B 丁坝位置始终保持不变,通过改变 C 丁坝位置,研究 A、B 丁坝附近的水流特性,丁坝布置见图 2,实验工况见表 1。

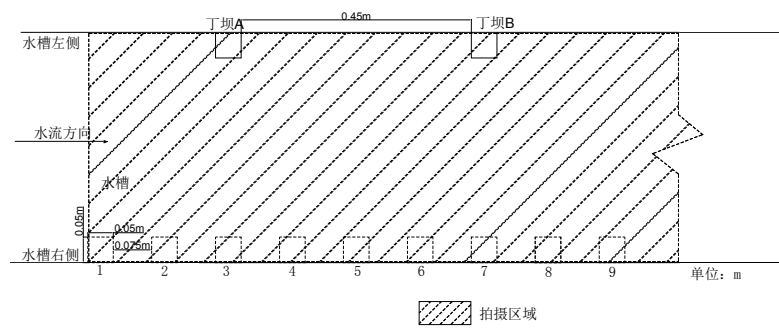


图 2 实验工况

表 1 实验工况

工况	流量 Q (m^3/h)	尾门水深 H (m)	C 丁坝与 A 丁坝 纵向距离 L_A (m)	C 丁坝与 B 丁坝 纵向距离 L_B (m)
1	25	0.140	0.075	0.575
2	25	0.140	0	0.450
3	25	0.140	-0.075	0.325
4	25	0.140	-0.200	0.200
5	25	0.140	-0.325	0.075
6	25	0.140	-0.450	0
7	25	0.140	-0.575	-0.075

注：C 丁坝在 A 丁坝上游时 L_A 为正，C 丁坝在 A 丁坝下游时 L_A 为负；C 丁坝在 B 丁坝上游时 L_B 为正，C 丁坝在 B 丁坝下游时 L_B 为负。

3 水流特性分析

3.1 流场分析

本次实验对各工况 A、B 丁坝周围区域都拍摄 500 张照片数据，导入 Tecplot 软件中处理、分析，得到每个工况 A、B 丁坝周围水流特性数据。图 3 是 A、B 丁坝坝后流场和流速矢量图。

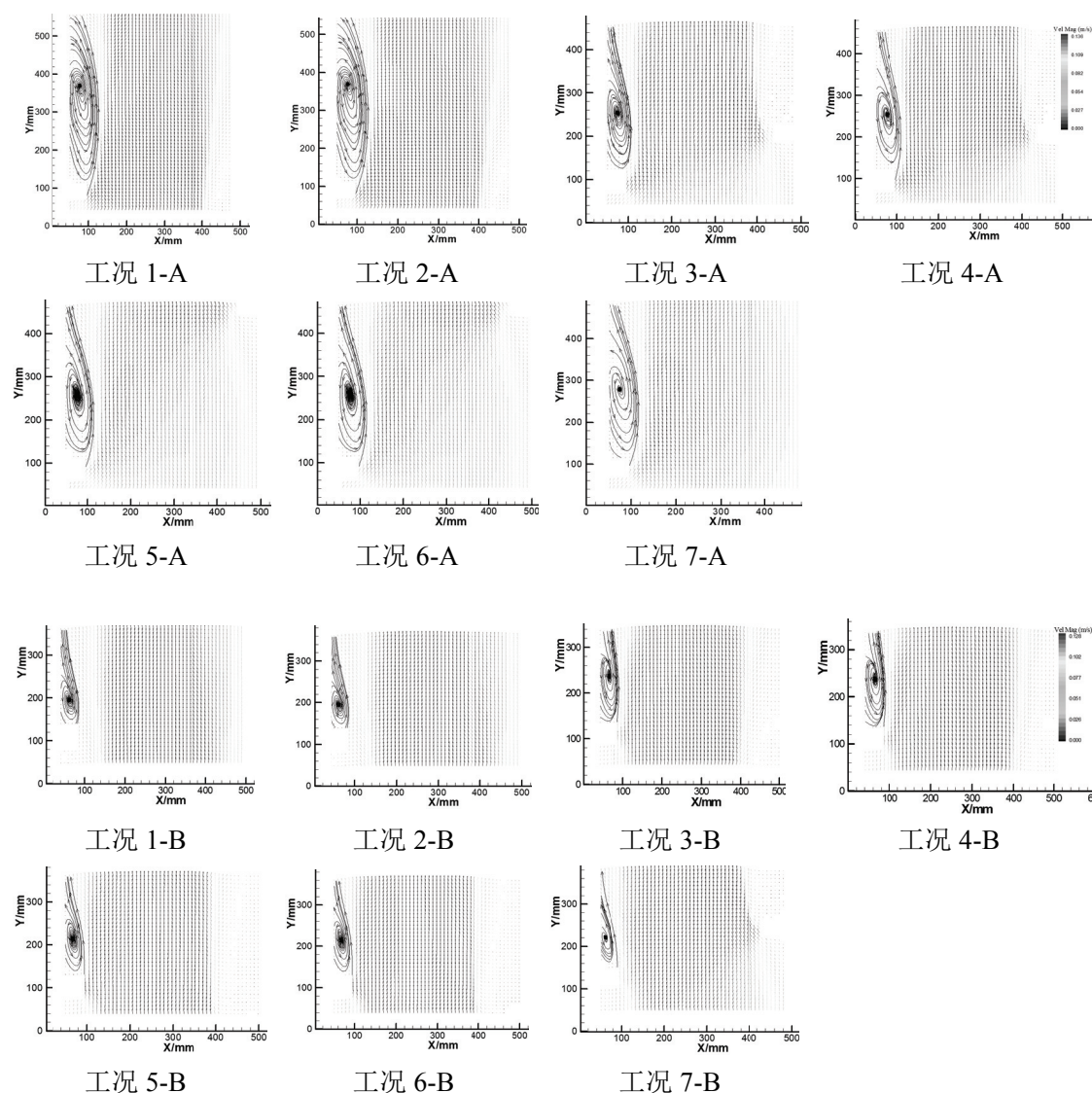


图3 流场图

由图3可以看出,水流流速从主流区到两边边壁,逐渐减小。C丁坝的位置对A、B丁坝的回流区长度、宽度都会产生影响,并且A丁坝下游回流区宽度都大于A丁坝宽度,B丁坝下游回流区宽度不都大于B丁坝宽度。A丁坝回流区区域整体大于B丁坝的回流区区域。

3.2 相对回流区长度变化规律分析

图4是A、B丁坝相对回流区长度(相对回流区长度是回流区长度与坝长的比值,是

将回流区长度无量纲化的结果)变化趋势图。由图 4 可知, A 丁坝的最大相对回流区长度出现在工况 1 为 7.371, 最小相对回流区长度出现在工况 4 为 3.839; B 丁坝的最大相对回流区长度出现在工况 4 为 3.015, 最小相对回流区长度出现在工况 7 为 1.755。对于 A 丁坝, 当 $L_A=-0.200\text{m}$ 时, A 丁坝的相对回流区长度最小, 从 $L_A=-0.200\text{m}$ 向上游或下游移动 C 丁坝, A 丁坝的相对回流区长度都在增大。对于 B 丁坝, 当 $L_B=0.200\text{m}$ 时, B 丁坝的相对回流区长度最大, 从 $L_B=0.200\text{m}$ 向上游或下游移动 C 丁坝, B 丁坝的相对回流区长度都在减小。对比分析可以发现, A、B 丁坝的相对回流区长度变化趋势刚好相反, 并且当 C 丁坝在 A、B 丁坝正中间时都出现极值。

进一步观察 A、B 丁坝相对回流区长度的变化规律, 分析其变化的原因。A、B 丁坝相对回流区长度变化主要受挑流作用和束窄率(丁坝所占过水面积占原水槽过水面积的百分比)的影响。对于 A 丁坝, $-0.200\text{m} \leq L_A \leq 0.075\text{m}$, 挑流作用和束窄率制约回流区长度的发展; $-0.575\text{m} \leq L_A < -0.200\text{m}$, 挑流作用和束窄率逐渐减小, 相对回流区长度逐渐增大。对于 B 丁坝, $0.200\text{m} \leq L_B \leq 0.575\text{m}$, 挑流作用逐渐增大, 相对回流区长度逐渐增大; $-0.075\text{m} \leq L_A < 0.200\text{m}$, 束窄率逐渐增大, 相对回流区长度逐渐减小。

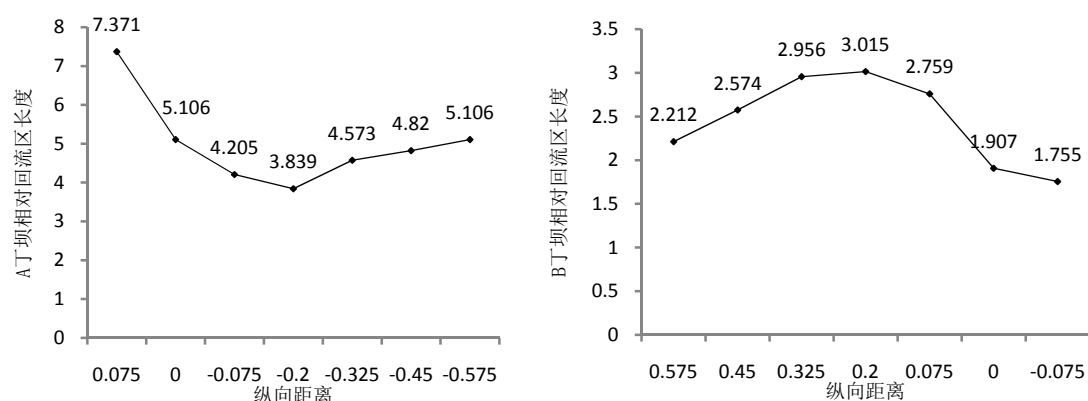


图 4 A、B 丁坝相对回流区长度变化趋势

3.3 相同纵向距离下相对回流区长度的关系

C 丁坝移动, 会出现 C 丁坝与 A 丁坝的纵向距离和 C 丁坝与 B 丁坝的纵向距离相同的情况, 即 $L_A=L_B$, 这时 C 丁坝分别对 A、B 丁坝的挑流作用相似, 故研究相同纵向距离下, A、B 丁坝相对回流区长度的关系。

表 2 相同纵向距离下 A、B 丁坝相对回流区长度

纵向距离 (m)	A 丁坝相对回流区长度	B 丁坝相对回流区长度
0.075	7.371	2.759
0	5.106	1.907
-0.075	4.205	1.755

由表 1 实验工况表可以看出, 工况 1 至工况 3 中 C 丁坝与 A 丁坝的纵向距离 L_A 与工况 5 至工况 7 中 C 丁坝与 B 丁坝的纵向距离 L_B 是相同的。将相同纵向距离下的 A、B 丁坝相对回流区长度统计在表 2, 通过图 5 拟合相同纵向距离下相对回流区长度的关系, 可以发现, 相同纵向距离的相对回流区长度的关系几乎是一条线, 其拟合方程的拟合度 $R^2=0.9808$, 且成正相关。因此, 可以得出结论: C 丁坝对 A、B 丁坝坝后水流结构的影响程度较为恒定, 即两丁坝坝后相对回流区长度与距离的变化存在对应关系。

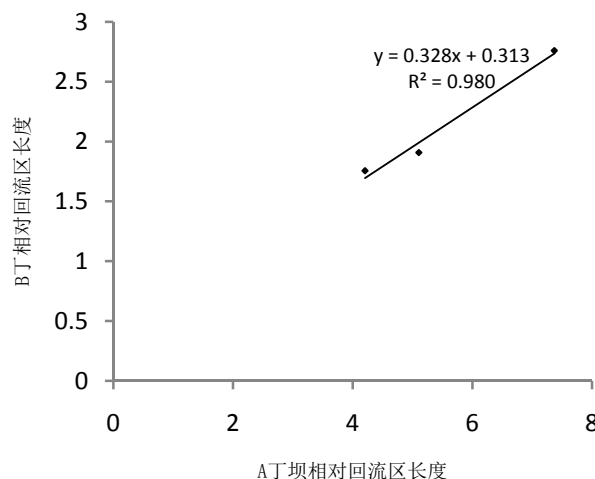


图 5 相同纵向距离下相对回流区长度的关系

3.4 涡量与相对回流区长度的关系

涡量(vorticity)是一个描写涡旋运动常用的物理量。流体速度的旋度 $\text{rot } \mathbf{V}$ 为流场的涡量。涡量的单位是秒分之一 (s^{-1})。计算公式为

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

式中, ω 为涡量; u 为 x 向流速; v 为 y 向流速。

将实验数据导入到 Tecplot 软件中处理和分析, 得到了每个工况下, A、B 丁坝的涡量图。在本实验中, 分别取 A、B 丁坝坝后涡量不小于 2 s^{-1} 的区域, 涡量图如图 6 所示。涡量区域都出现在丁坝右上角, 且呈条带状。

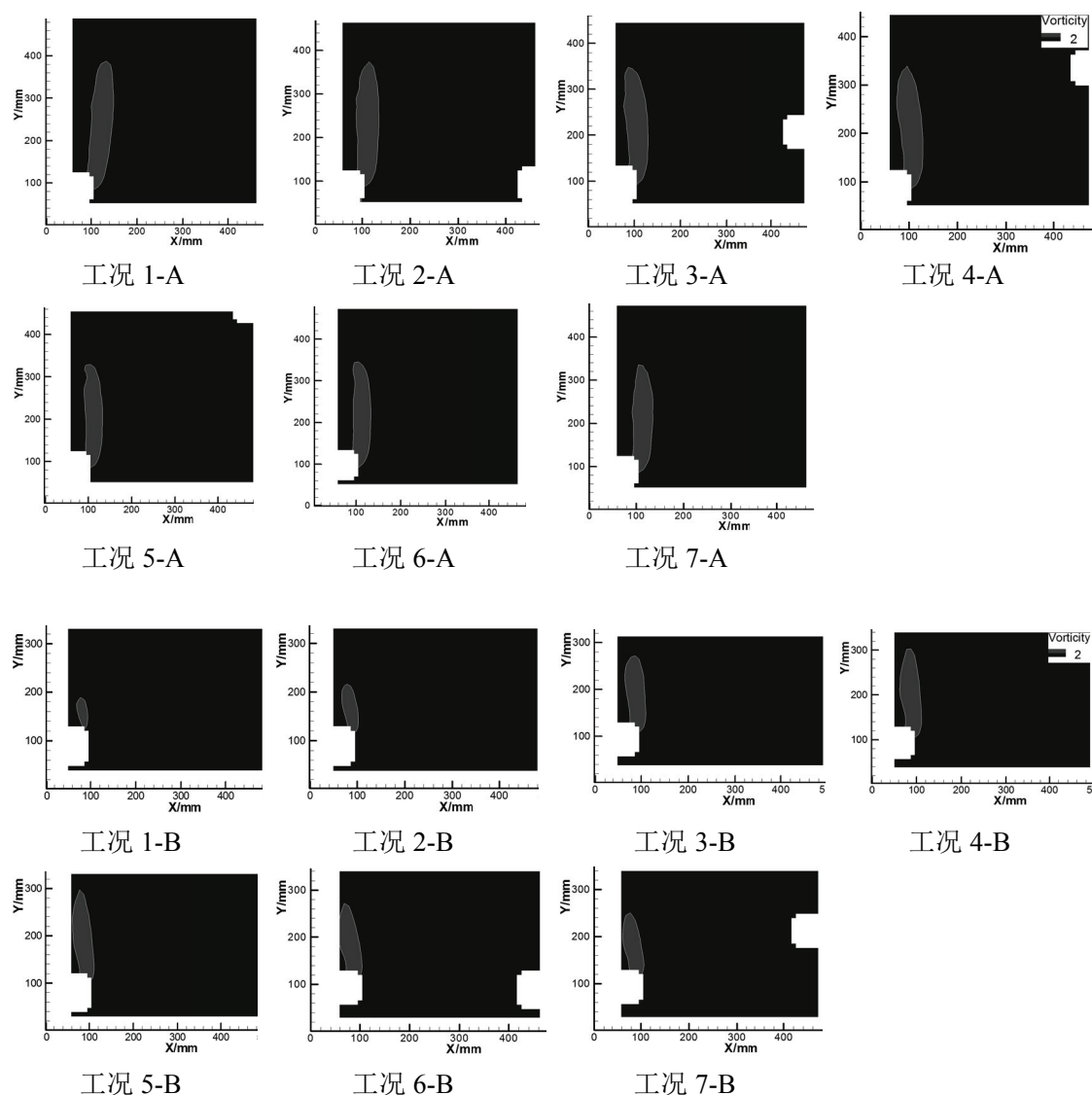


图 6 涡量图

白静等^[5]采用动态亚格子模式和浸没边界法,对宽浅槽道中的丁坝群绕流的水动力学特性进行了三维大涡模拟研究,发现丁坝长度与丁坝之间距离的比值 L/D 对丁坝周围的水流流动形式、湍流强度、涡量分布有显著影响。潘军峰等^[6]建立二维数值模拟模型研究发现涡旋区范围随丁坝占河宽度的加大而加大。本文在前人的基础上研究涡量与相对回流区长度的关系。

图 7 是涡量面积折线图,观察可以看出,工况 1 至工况 5, A 丁坝的涡量面积一直在

减小；工况 6 至工况 7，A 丁坝涡量面积增大。工况 1 至工况 4，B 丁坝涡量面积一直在增大；工况 5 至工况 7，B 丁坝涡量面积一直在减小。

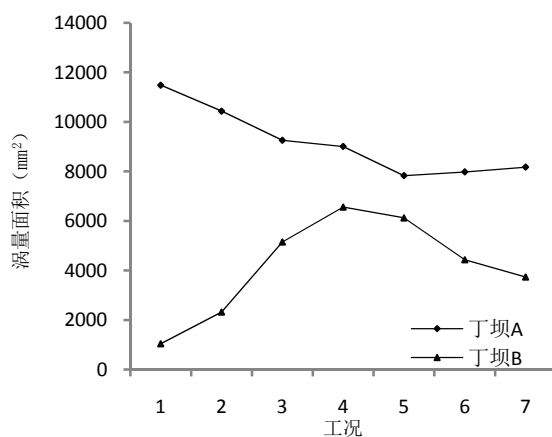


图7 涡量面积折线

由于 A、B 丁坝的相对回流区长度变化均在工况 4 时出现拐点，且两边的变化率不同，而 A、B 丁坝涡量面积变化趋势分别在工况 5、工况 4 出现拐点。综合考虑，在研究相对回流区长度与涡量面积的关系时，以工况 4 为拐点分段研究。图 8 是相对回流区长度与涡量面积关系的拟合图。由图 8 可知，各段相对回流区长度与涡量面积的拟合精度均大于 0.9，拟合精度都比较高，且成正相关。可以得出结论：涡量与相对回流区长度的变化趋势基本一致，即相对回流区长度越长，涡量面积越大；相对回流区长度越短，涡量面积越小。

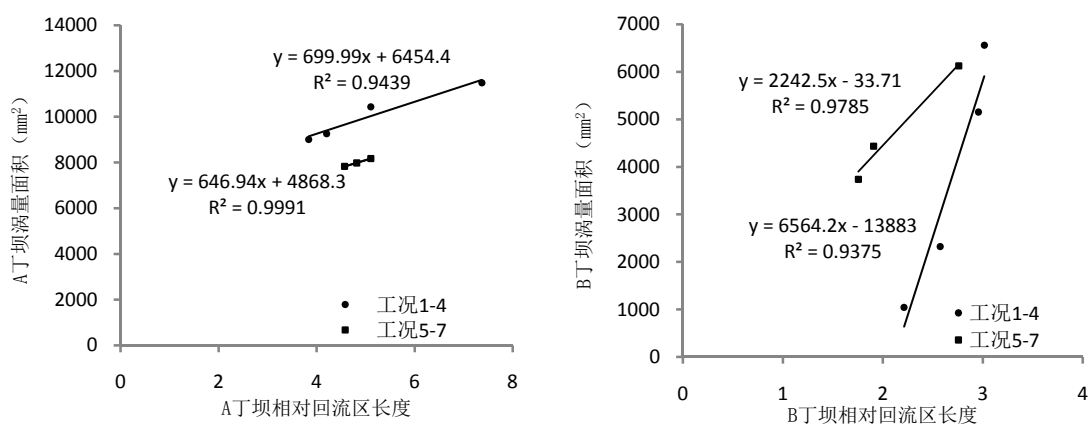


图8 相对回流区长度与涡量面积关系

4 小结

本文通过水槽实验,研究了移动 C 丁坝对对岸固定距离双丁坝 A、B 丁坝水流特性的影响。主要结论如下。

(1) C 丁坝位于 A、B 丁坝中间时, A 丁坝相对回流区长度最短, B 丁坝相对回流区长度最长。

(2) C 丁坝沿双丁坝中间位置逐渐向上游或下游更远处移动时, A 丁坝相对回流区长度逐渐增大, B 丁坝相对回流区长度逐渐减小。

(3) A、B 丁坝与 C 丁坝的相对距离相同时, C 丁坝对 A、B 丁坝坝后水流结构的影响程度较为恒定,即 A、B 丁坝坝后相对回流区长度与距离的变化存在对应关系。

(4) A、B 丁坝坝后涡量与相对回流区长度的变化趋势基本一致。

参 考 文 献

- 1 韩玉芳, 陈志昌. 丁坝回流长度的变化[J]. 水利水运工程学报, 2004(3).
- 2 窦国仁. 丁坝回流及其相似律的研究[J]. 水利水运科技情报, 1978(3):3-26.
- 3 冯永忠. 错口丁坝回流尺度的研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1995(4):69-76.
- 4 冯永忠, 常福田. 错口丁坝在水流中的相互作用[J]. 河海大学学报: 自然科, 1996(1):70-76.
- 5 韩晗, 张曼, 林斌良, 等. 连续丁坝回流特性实验研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(10):84-92.
- 6 Garde R.J., Subramanya K., Nambudripad K.D.. Study of scour around spur-dikes[J]. Journal of the Hydraulic Division, 1961, 86(6): 23-37.
- 7 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.
- 8 潘军峰, 冯民权, 郑邦民, 等. 丁坝绕流及局部冲刷坑二维数值模拟[J]. 工程科学与技术, 2005, 37(1):15-18.

Experiment on the influence of different positions of the opposite shore spur dike on the flow characteristics of fixed distance double spur dike

DONG Wei, GU Jie, QI Fu-qing

(College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, Email:

jgu@shou.edu.cn)

Abstract: This paper uses the experiment of water tank and applies PIV technical methods to study the influence of single spur dike on different positions on the water flow structure of fixed distance double spur dike. During the experiment, the inlet flow rate and the tailgate water level were kept unchanged. By changing the position of the single spur dike, the horizontal profile velocity distribution behind the double spur dike was measured. The results show that: (1) When the single spur dike is located in the middle of the double spur dike, the relative recirculation zone length of upstream spur dike is the shortest, and the relative recirculation zone length of downstream spur dike is the longest; (2) When the single spur dike moves further upstream or downstream from the middle position of the double spur dike, the relative recirculation zone length of upstream spur dike gradually increases, and the relative recirculation zone length of downstream spur dike gradually decreases; (3) When the vertical distance between the double spur dike and the single spur dike is the same, the influence of single spur dike on the water flow structure behind the double spur dike is relatively constant, that is, there is a corresponding relationship between the length of the recirculation zone and the change of relative distance; (4) The vorticity is basically consistent with the change of the length of the relative recirculation zone. The research results will help to further understand the water flow structure of the spur dike group, and have practical guiding significance for river regulation and riverside protection.

Key words: PIV technical methods; Spur dike; Vertical distance; Recirculation zone; Vorticity