

阶梯式丁坝群水流结构的试验研究

戚福清, 顾杰, 董伟

(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: 采用 PIV 流速测量技术, 在水槽中试验研究了降低式阶梯丁坝群不同间距时丁坝附近的水流结构变化情况。研究表明: 回流区长度由上至下逐渐减小, 主流区特征线最大流速点逐渐向丁坝对岸侧移动; 随着间距的减小, 阶梯丁坝群紊动强度不断减弱, 高紊动强度带逐渐变窄, 第二座丁坝坝后回流区长度逐渐增加, 第三座丁坝坝后回流区长度逐渐减小, 而第一座丁坝当间距减小到一定距离时, 坝后回流区长度与坝间距相等。研究结果对于进一步理解丁坝群的水流结构及实际河道工程设计具有理论上的指导意义。

关键字: 阶梯式丁坝群; 回流区; 流速; 紊动强度

1 引言

丁坝是河道整治中最常见的建筑物, 在实际工程中, 丁坝的布置分为单坝和群坝, 且以群坝布置方式较多; 不同的丁坝群布置方式对水流结构会产生不同的影响。近年来众多学者利用水槽试验和数值模拟对丁坝群的水流结构特性进行了研究。常福田等^[1]通过试验水槽对丁坝群中主槽的流场进行了试验和分析, 表明最大和最小流速区域分别位于第一座丁坝坝头和第二座丁坝坝头处, 其他丁坝坝头周围流速在一定范围内波动。应强等^[2]以水槽试验为基础, 应用因次分析方法以及动量方程对不同间距情况下淹没丁坝群壅水公式进行了推导; 彭静等^[3]运用颜料示踪和油膜技术研究了丁坝群附近水流结构, 表明在一定范围内丁坝群坝间距的大小对坝后回流区范围会产生影响; 胡田^[4]研究了流量和水位变化对于双丁坝附近流速和沿程水面线的影响, 表明当水位一定时, 随着流量的增大, 第一个丁坝坝头区域的高流速区逐渐向丁坝上游移动, 第二个丁坝附近的水流流态愈发紊乱; 当流量一定时, 随着水位的上升, 第一个丁坝坝头区域的高流速区逐渐向丁坝下游移动, 第二个丁坝附近的水流流态更加平稳。刘易庄等^[5]采用 PIV (Particle Image Velocimetry) 研究了淹没双丁坝对坝间水流结构的影响, 表明丁坝间距与丁坝长度的比值对坝间漩涡中心位置、坝间回流区及涡量分布有着显著的影响; 郭晓峰等^[6]运用有限体积法对正挑高丁坝群附近流场进行了数值模拟, 表明坝后会产生较大的逆时针漩涡, 第一座丁坝坝头处有下潜水流, 且横向上切应力达到最大值。杨兰等^[7]运用 Flow-3d 软件对上挑丁坝群附近的流场进行了研究, 表明丁坝群间涡系结构复杂, 第一座丁坝坝头处有一对反向的漩涡和下潜水流, 切

应力达到最大值,使得坝头下有较大的冲刷坑发生。以上研究成果都是针对等高丁坝群布置形式,而对于非等高丁坝群布置形式研究较少,本文利用水槽试验,研究并分析阶梯降低式丁坝群近区及对水流结构的影响。

2 试验模型与工况

2.1 试验设备

实验在上海海洋大学水动力学实验室进行。试验设备主要由U形水槽、流量控制系统、流速测量系统及丁坝模型组成。U形水槽底板及侧壁均为钢化玻璃,水槽直道长6.00m,宽0.45m,高0.55m,水槽示意图如图1所示。试验所采用的丁坝模型材质为水晶玻璃,形状为立方体,其长、宽、高分别为 $5\text{cm}\times 5\text{cm}\times 15\text{cm}$ 、 $5\text{cm}\times 5\text{cm}\times 10\text{cm}$ 和 $5\text{cm}\times 5\text{cm}\times 5\text{cm}$ 。

2.2 试验设计

在水槽直道中段,紧贴水槽边壁,按照不同间距布置丁坝群(图1)。工况布置见表1。试验流量设置为 $25\text{m}^3/\text{h}$,尾门水位控制为14cm,试验过程中进口流量和尾门水位保持不变,依次改变丁坝间间距,以研究间距变化对丁坝群水流结构的影响。

流速测量系统采用PIV技术,该系统主要由示踪粒子、光路系统、CCD相机、同步仪以及图像处理系统构成。由于相机拍摄范围以及激光宽度有限,本次实验水平剖面设置3个测量区,拍摄水平剖面距水槽底部2cm;每次拍摄500张,然后取其平均。每个坝间分别取 $y=0.25d$, $y=0.5d$, $y=0.75d$ (d 为间距)三线为特征断面^[8],第三座丁坝坝后取坝后距丁坝5cm和10cm断面两个断面,共8个特征断面,沿水流方向,特征断面按序号1~8编排;在该特征断面上按同一水深(本文为拍摄剖面高度)取水槽宽度的直线即为特征线,每个特征线上设置8个观察点,按丁坝侧至丁坝对岸侧序号1~8编排,丁坝位置及标识、流速测量区域、特征断面及特征线观察点布置如图2所示。

表1 试验工况

工况	流量(m^3/h)	水位(cm)	间距(cm)	是否淹没/淹没深度(cm)		
				丁坝A	丁坝B	丁坝C
1	25	14.01	40	非淹没	淹没/5	淹没/9
2	25	14.01	30	非淹没	淹没/5	淹没/9
3	25	14.01	20	非淹没	淹没/5	淹没/9

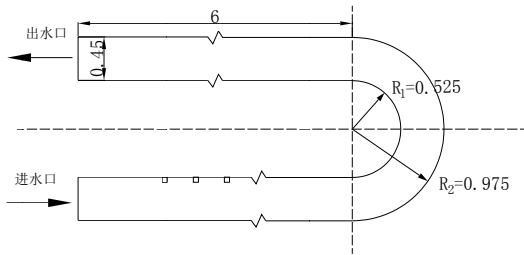


图1 实验水槽示意图 (单位: m)

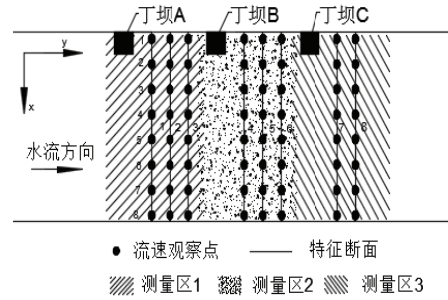


图2 流速测量区域及观察点设置情况, 以间距为20cm为例

3 实验结果与分析

3.1 回流区分析

图3、图4和图5分别为丁坝A、B、C附近区域不同坝间距水平剖面流场图, 由流线图可知, 丁坝的存在会改变原来的水流状况, 将水流挑向对岸, 使得丁坝坝头前至对岸流速较大, 而坝后流速较小, 形成大小不等的回流区。

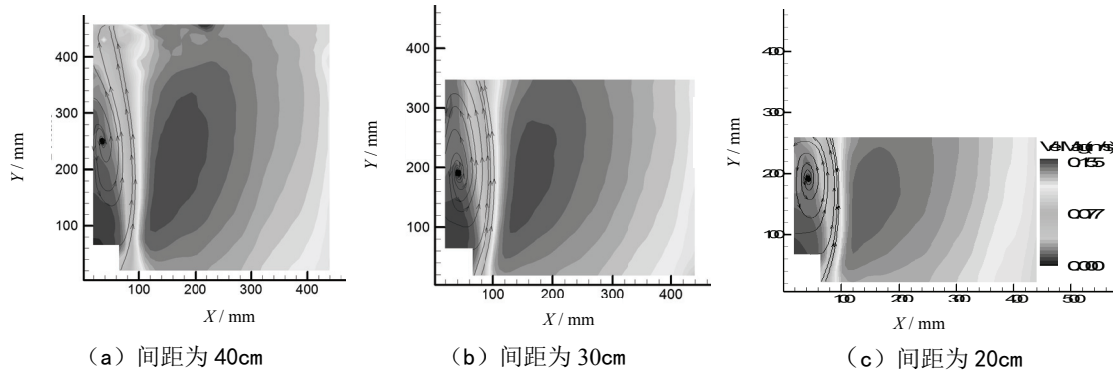


图3 不同间距情况下丁坝A及其后方区域流场

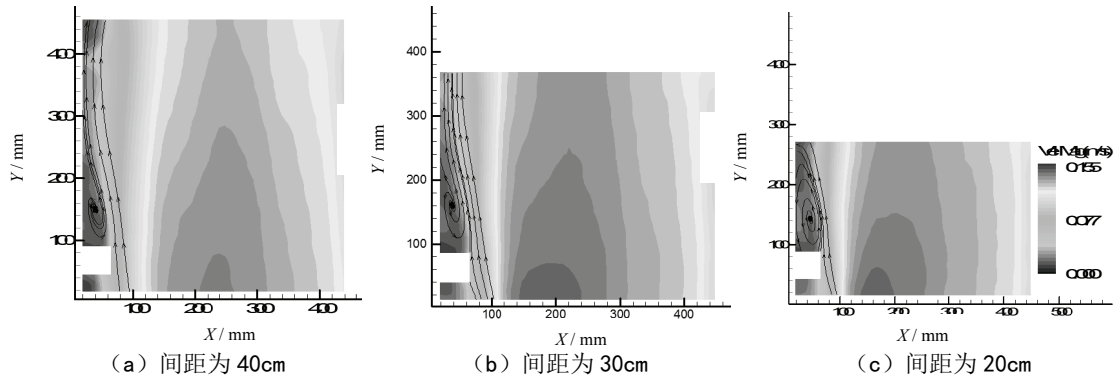


图 4 不同间距情况下丁坝 B 及其后方区域流场图

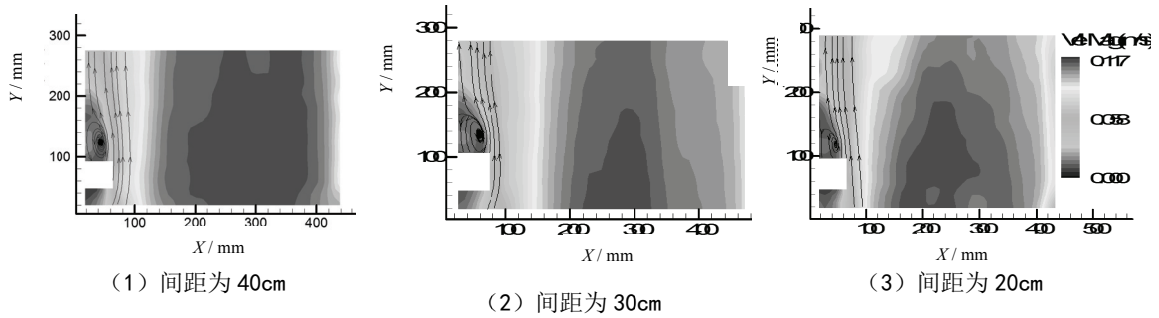


图 5 不同间距情况下丁坝 C 及其后方区域流场

表 2 不同工况回流区长度及宽度实验结果

		cm		
间距	回流区长度/宽度	丁坝 A	丁坝 B	丁坝 C
40	长度	24.7	10.5	7.3
	宽度	7.1	5	5
30	长度	30	11.6	6.1
	宽度	7.7	5	5
20	长度	20	16.2	5.2
	宽度	7.3	5	5

表 2 为三丁坝坝后回流区长度和宽度统计结果。由表 2 可知，丁坝 A 坝后回流区长度最大，丁坝 B 次之，丁坝 C 坝后回流区长度最小，即顺着水流方向，回流区长度从上至下依次减小；随着间距的减小，各丁坝坝后回流区长度和宽度变化各有其特点。

丁坝 A 坝后回流区长度变化受间距变化影响较大。当间距为 40cm 时，坝后回流区长

度为 24.7cm，宽度为 7.1cm；当坝间距为 30cm 时，回流区的长度等于相应的坝间距，回流区的宽度为 7.7cm，而当坝间距为 20cm 时，回流区长度也等于相应的坝间距，但回流区的宽度为 7.3cm，显然，当坝间距小于一定距离时，下游丁坝 B 对上游丁坝 A 回流区长度的发展有促进作用，而当坝间距进一步减小时，下游丁坝 B 对上游丁坝 A 回流区长度的发展产生了抑制作用，此时，丁坝 B 都处于丁坝 A 的挑流范围内。

丁坝 B 坝后回流区长度随着间距的减小而增加。间距由 40cm 变为 30cm 时，回流区长度增幅较小，表明当间距不小于 30cm 时，间距的变化对丁坝 B 坝后回流区长度的影响较小；间距为 20cm 时，回流区长度增幅较大，显然，当坝间距小于一定距离时，下游丁坝 C 对上游丁坝 B 回流区长度的发展有促进作用。三种间距情况下，丁坝 B 坝后回流区宽度基本相同，且与坝长相等。丁坝 C 坝后回流区长度比丁坝 B 小，而丁坝 C 坝顶溢流较丁坝 B 强，显然，坝顶溢流越强，坝后回流区长度则越小。

丁坝 C 坝后回流区长度随间距的减小逐渐减小，间距为 40cm 时，回流区长度为 7.3cm，间距为 30cm 时，回流区长度为 6.1cm，减小幅度为 16.4%，间距为 20cm 时，回流区长度为 5.2cm，减小幅度为 14.5%，减小幅度有所收缩。丁坝群间距越小，丁坝群对水流的阻力越大，丁坝 c 坝前水位越高，丁坝 C 坝顶的溢流作用就越强，则坝后的回流区长度也就越小。丁坝 c 坝后回流区宽度与丁坝 B 一样，等于坝长，显然，有坝顶溢流发生时，回流区的宽度等于坝长。

3.2 特征线流速分析

图 6 是特征线流速分布图。由图 6 可知，各特征线上流速沿程变化较为相似。受丁坝阻挡作用的影响，各特征线上最小流速点均为坝后点 1 处。受沿程丁坝挑流作用的影响，主流区流速较大，且沿程最大流速点越往后越向丁坝对岸侧偏移。当受丁坝 A 挑流影响时，前 3 个特征线上最大流速点均为点 3；受丁坝 A 和丁坝 B 挑流影响时，中间 3 个特征线最大流速点为点 5；受丁坝 A、丁坝 B 和丁坝 C 挑流影响时，最后两个特征线上最大流速点为点 5。丁坝对岸侧，因受边壁摩擦力的影响，近对岸侧流速有所减小。

随着丁坝间距的减小，不同丁坝间特征线流速变化有些差别。在丁坝 A 与丁坝 B 之间，各特征线流速逐渐减小，但间距从 40cm 变为 30cm 时，各特征线流速变化较小，而间距变为 20cm 时，各特征线流速减小较大；在丁坝 B 与丁坝 C 之间，间距为 30cm 时各特征线流速最大，间距为 20cm 时各特征线流速最小，间距为 40cm 居于二者之间；在丁坝 C 下游，间距为 20cm 时各特征线流速最小，间距为 30cm 时，特征线 7 主流区至对岸流速大于间距为 40cm 时的流速，特征线 8 只有主流区 3 个点的流速大于间距为 40cm 时的流速。

图 7 为各特征线各点平均流速沿程分布图。由图 7 可知，间距为 30cm 时，各特征线流速最大，间距为 40cm 时各特征线流速略有减小，间距为 20cm 时，各特征线流速最小，且减小幅度较大。坝间距为 40cm 和 30cm 时，特征线 1 至特征线 3 流速逐渐增加，至丁坝 B 坝后特征线 4 流速下降较大，说明水流壅水较明显，丁坝 B 与丁坝 C 之间即特征线 4 至特征线 6 流速变化较小，水流较平缓，至丁坝 C 坝后特征线 7 流速进一步下降，且下降幅

度更大，说明水流变化剧烈，至特征线 8 流速又有所上升；坝间距为 20cm 时，特征线 1 至特征线 3 流速略有下降，至丁坝 C 坝后特征线 7 流速逐渐下降，但下降幅度较缓，至特征线 8 流速又略有上升，沿程水流变化都较平缓。

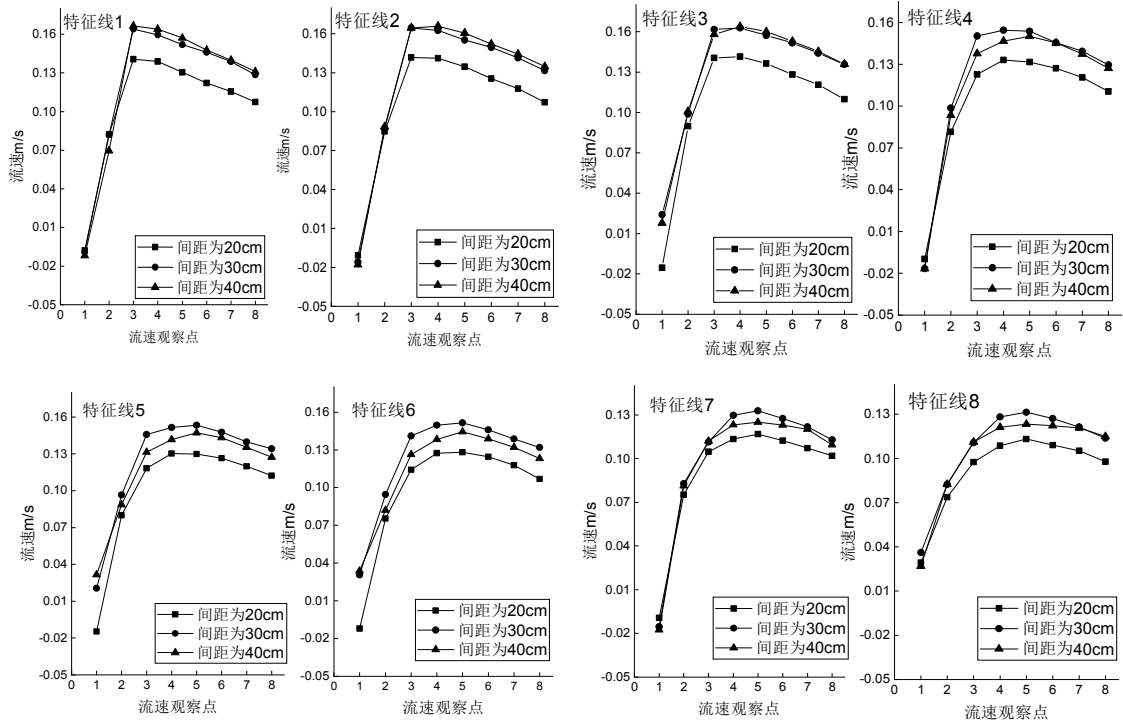


图 6 不同间距情况下特征线流速分布

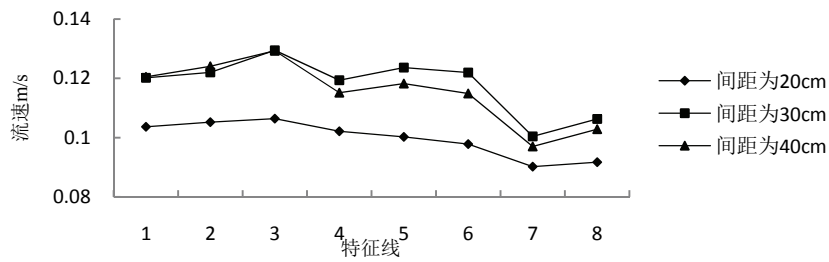


图 7 特征线平均流速分布

3.3 紊动强度分析

紊动水流一般采用脉动速度的均方根来表示紊动强度，其表达式为： $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ，其中， $k_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}$ ， $k_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}$ ， k 为某点的总紊动强度， k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 向的紊动强度， u_i 、 v_i 为该点在 x 、 y 向上的瞬时流速， \bar{u} 、 \bar{v} 为该点在 x 、 y 向上的时均流速。

图 8 至图 10 是阶梯丁坝群在不同间距情况下紊动强度分布云图。由图可知，各丁坝在坝头及下游一段区域里紊动强度较大，且随着间距的减小，紊动强度逐渐减小，但各丁坝强紊动强度区域分布有些差别。

丁坝 A 坝头处紊动强度最大，坝后回流区范围里紊动强度相对较小，而在回流区后端即丁坝 B 附近紊动强度也较大。当间距为 40cm、30cm 时，丁坝 A 坝头及回流区后端强紊动强度区域明显比间距为 20cm 时大许多，而水流紊动强度越大，水流交换越充分，沿垂向流速分布越趋于均匀，但水流能量消耗会较多，断面平均流速会减小。结合上述特征线平均流速沿程分布分析，间距为 20cm 时，沿程特征线平均流速最小，显然，间距为 20cm 时由底部向上流速梯度最大，即近水面流速最大，间距为 40cm 水流紊动强度最强，近水面流速最小，间距为 30cm 时紊动强度次之，近水面流速介于两者之间。而丁坝 A 坝后最大紊动强度区域在丁坝 B 附近，即沿程特征线紊动强度逐渐增大，水流垂向交换更加充分，沿程特征线流速（近底部）遂逐渐增大（图 7）。

丁坝 B 坝头处紊动强度相对较小，而在坝后约 1/2 坝间中间区域紊动强度较大，近丁坝 C 紊动强度相对也较小，且坝后水平漩涡分离点也在坝后约 1/2 处，两坝中间水流混合更充分，因此，近底层两坝中间流速最大，丁坝 B 坝后近区及近丁坝 C 处流速较小。随着间距的减小，两坝间中间区域紊动强度减小较大，而丁坝 B 坝后近区及近丁坝 C 处紊动强度减小程度较小。当间距为 40cm 时，两坝间中间区域强紊动强度区域较大，而丁坝 B 是淹没丁坝，水流超过丁坝 B 坝顶后，会产生向下运动的流速分量，并在坝后产生垂向漩涡，坝后垂向水流会得到更加充分的混合，而淹没丁坝坝后水流垂向混合能力主要取决于向下运动的流速分量，即与坝顶及坝后水位差有关，因此，由图 9 紊动强度大小分布及图 7 特征线平均流速过程线可以推测，间距为 30cm 时，坝顶与坝后水位差最大，间距为 40cm 时次之，间距为 20cm 时最小。

丁坝 C 坝头及坝后近区紊动强度相对较大，随着间距的减小，坝后近区紊动强度略有减小，但总体上范围及强度都较小，紊动强度的大小对水流的混合作用影响较小。由图 2 可知，特征线 7 大致位于坝后漩涡中心处，而特征线 8 大致位于坝后漩涡分离点附近，因此，近底层特征线 8 流速大于特征线 7 流速，而丁坝 C 也是淹没丁坝，且淹没深度大于 9cm，随着间距的变化，丁坝 C 坝后两特征线流速变化趋势，与丁坝 B 相似，即与坝顶及坝后水位差有关。

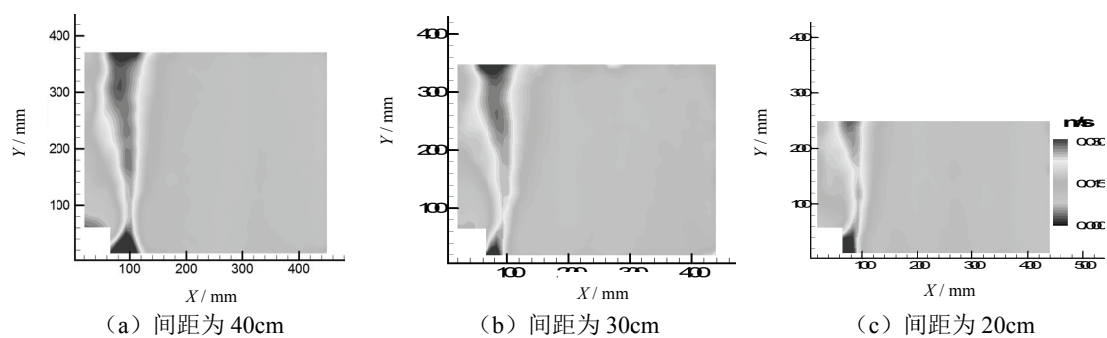


图 8 丁坝 A 及其后方区域在不同间距情况下紊动强度分布

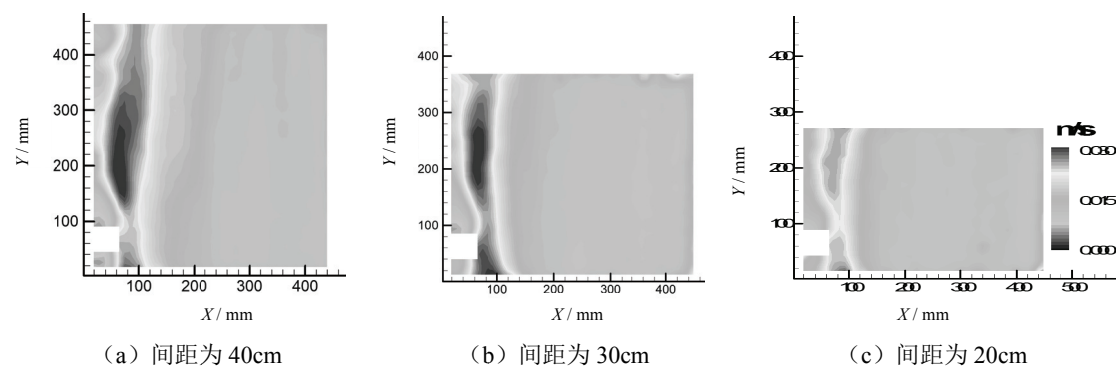


图 9 丁坝 B 及其后方区域在不同间距情况下紊动强度分布

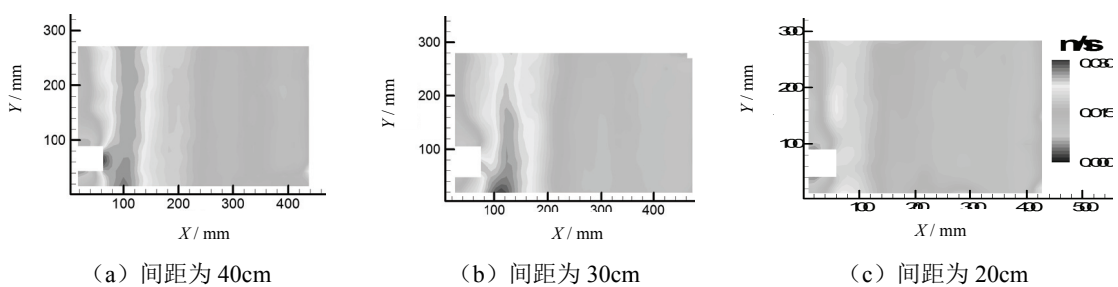


图 10 丁坝 C 及其后方区域在不同间距情况下紊动强度分布

4 结论

本文通过水槽试验研究了阶梯式丁坝群在不同间距情况下的水流特性,并得到以下结论。

(1) 随着间距的减小, 两淹丁坝表现出相反的性质, 第二座丁坝坝后回流区长度逐渐增加, 第三座丁坝坝后回流区长度逐渐减小。非淹没丁坝即第一座丁坝因回流区较长, 当间距为 40cm 时, 下游丁坝对它的影响较小, 坝后回流区及分离点特征明显, 当坝间距小于 40cm 接近 30cm 时, 回流区受下游丁坝影响较大, 漩涡长度为坝间距离。

(2) 因水流向下运动连续受丁坝阻挡及挑流的影响, 主流区最大流速点位置逐渐向丁坝对岸移动。丁坝淹没时, 坝顶坝后水位差越大, 水流的垂向混合越充分, 因此, 坝间距为 30cm 时, 沿程各特征线流速最大。

(3) 丁坝未淹没时, 水流的紊动强度对丁坝附近的水流混合起主要作用, 丁坝淹没后, 紊动强度对丁坝附近的水流混合影响较小。

参 考 文 献

- 1 常福田, 丰玮. 丁坝群合理间距的试验研究[J]. 河海大学学报, 1992(04):7-14.
- 2 应强, 孔祥柏. 淹没丁坝群壅水试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1995(01):13-21.
- 3 彭静, 河原能久. 丁坝群近体流动结构的可视化实验研究[J]. 水利学报, 2000(03):44-47.
- 4 胡田. 双丁坝水流特性的水槽试验和数值模拟研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- 5 刘易庄, 蒋昌波, 邓斌, 等. 淹没双丁坝间水流结构特性 PIV 试验[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(06):26-30, 46.
- 6 郭晓峰, 杨兰. 丁坝群附近流场的三维数值模拟研究[J]. 河南水利与南水北调, 2016(04):106-107.
- 7 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(03):372-378.
- 8 WEITBRECHT V. Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers [D]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, 2004.

Experimental study on water flow structure around stepped spur dikes

QI Fu-qing, GU Jie, DONG Wei

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

Email: jgu@shou.edu.cn)

Abstract: Using PIV technology methods for measuring velocity, the variation of water flow structure near the spur dike at different intervals of the reduced stepped spur dikes was studied in a flume. Experimental results show that: The length of the recirculation zone gradually decreases from top to bottom, and the maximum velocity point of the characteristic line of the mainstream zone gradually moves to the opposite side of the spur dike. With the decreases of spacing, the turbulence intensity of the stepped spur dikes is continuously weakened and the high turbulence

intensity band is gradually narrowed; the length of the recirculation zone after the second spur dike is gradually increased, and the third spur dike is gradually reduced; When the spacing is reduced to a certain distance, the length of the recirculation zone behind the first spur dike is equal to the spacing; The research results have theoretical guiding significance for further understanding of the water flow structure of spur dikes and the actual river engineering design.

Key words: Stepped spur dikes; Recirculation zone; Flow velocity; Turbulence intensity.