

不同水力坡度对丁坝近区水流的影响

郑宇华¹, 郑 健², 顾 杰², 匡翠萍¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘要: 采用超声水位和 PIV 流速测量技术, 对不同水力坡度下非淹没丁坝近区的水流结构进行了试验研究。结果表明, 随着水力坡度的降低, 在坝头处, 紊动强度较大的区域逐渐向主流区及上游扩散; 在坝后, 跌水最低点逐渐下移, 漩涡中心向丁坝侧边壁靠近。回流区长度与宽度的变化和水力坡度的变化无明显对应关系, 但坝头近壁区的流速与坝后回流区的长度及宽度存在高度响应的线性关系。研究成果揭示了丁坝在不同水力坡度下调整水流结构的机理, 同时对各家测量得到的回流区长度不等有了较明确的答案, 为工程中丁坝的设计及河道岸线的规划提供了科学依据。

关键词: 水力坡度; 非淹没丁坝; 紊动强度; 回流区; 坝头近壁区的流速

中图分类号: TV863 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)03-0066-09

DOI: 10.11759/hyxx20180328002

丁坝是航道整治及护岸工程最广泛的水工建筑物, 它的存在改变了局部水流结构。在非淹没情况下, 丁坝主要作用是束窄河道, 提高水流流速以冲刷浅滩, 或是阻挡水流以壅高上游水位, 减缓水流比降。目前关于非淹没丁坝近区的水流特性已有许多研究成果。

随着实验条件和仪器设备的不断完善与更新, 水槽试验已成为研究丁坝绕流的重要手段。Garde 等^[1]测量发现丁坝下游回流区长度和宽度的变化主要受到来流速度等因素的影响。Francis^[2]对有边坡丁坝的回流特性进行了水槽试验, 发现有边坡的丁坝与同等坝长的直立坝头丁坝相比, 其下游回流宽度的范围较小, 但回流长度基本不变。Rajaratnam 等^[3]通过试验分析了单丁坝周围的流速分布, 发现丁坝近区沿水深分布的流速符合对数分布规律。胡华锋^[4]对丁坝的绕流机理进行了试验研究, 结果显示坝头底部是马蹄涡的发生地, 且该处的横向流速大于垂线上其它位置的流速。许光祥等^[5]通过对比多组不同流量和丁坝束窄度的实验结果, 发现缓流时丁坝上游较小的水位壅高会引起较长的壅水范围, 丁坝下游的跌水深度随着束窄度的增大而增大。高桂景^[6]利用水槽试验, 发现非淹没丁坝坝头处水流紊动较强的区域内, 脉动流速变化梯度比淹没丁坝大。陈稚聪等^[7]对坝后回流区进行了测量与分析, 结果表明在纵向上, 坝后回流区流量沿程分布呈纺锤形, 且回流区流速区的宽度与回流区的宽度呈线性变化。

近年来, 计算机和数值模拟技术迅速发展, 通过数模软件, Tingsanchali 等^[8]采用沿水深平均和修正经验系数后的二维模型, 计算得到了丁坝附近的河床应力分布。Mayerle 等^[9]在水深方向上采用静水压强假定, 对丁坝近区的紊流流场进行了三维模拟计算, 发现丁坝下游尾迹流动形态的变化与涡粘系数、流速、水深以及坝后回流长度的变化有关。Ouillon 等^[10]应用标准 $k-\epsilon$ 方程, 分别结合 3D 动压刚盖模型和 3D 自由水面追踪模型模拟单丁坝的绕流现象, 得到坝后相对回流长度分别为 8.0 和 10.7。李中伟等^[11]模拟了不同长度的丁坝近区的局部流场, 发现随着坝长的增加, 坝后回流区的长度与宽度相应增加, 最近回流点的位置越靠后。周宜林等^[12]应用大涡模拟研究了丁坝设置不同角度对水流运动特性的影响, 结果表明下挑丁坝对坝头的防护效果较好。蔡亚希等^[13]模拟计算得到, 不同进口流速下的回流区长度为丁坝长度的 2.5~10 倍, 且进口流速越大, 回流区越长越宽。雷亚等^[14]对非淹没的圆头、拐头和梯形丁坝下游流场进行了数值模拟, 发现随着水深增加, 圆头坝和拐头坝坝后回流区范围逐渐减小, 而梯形坝实验结果与前两个丁坝结果相反。李子龙

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776098)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41776098]

作者简介: 郑宇华, 女, 博士, 电话: 13262561220, E-mail: yuvaz@sina.com; 顾杰, 通信作者, 男, 江苏兴化人, 教授, 主要从事水文、海岸工程和环境工程研究, E-mail: jgu@shou.edu.cn;

等^[15]对不同佛汝德数下丁坝附近的局部流场进行模拟计算,结果表明随着佛汝德数的增大,坝根处产生的马蹄涡强度逐渐增大,坝后回流长度约为坝长的6倍。

现有的研究成果中,众多学者在单一床面结构的基础上,主要通过改变流量和坝长等水力参数对丁坝的绕流现象进行研究。而在河道中修建丁坝后,河床会产生调整,丁坝周围的床面结构非常复杂,并处于不断变化的状态。因此,本文利用水槽试验,对不同水力坡度下非淹没丁坝近区的水流结构展开研究。

1 水槽试验

1.1 实验概况

本实验以非淹没丁坝为研究对象,在一定的流量下,通过改变水槽坡度,将丁坝近区水流结构的变化情况作为研究的重点。物理模型主要由实验水槽、流量控制系统、超声波自动水位测量系统及PIV流速测量系统组成。

试验在上海海洋大学水动力学实验室的U形水槽中进行,水槽直道段长6.00 m,宽0.45 m,高0.55 m,弯道段的圆弧半径分别为0.525 m(R_1)和0.975 m(R_2),水槽底板和侧壁均为钢化玻璃,实验水槽如图1所示。丁坝模型长为0.05 m、宽为0.10 m,高为0.25 m,材料为普通玻璃,紧贴水槽边壁置于直道中段。

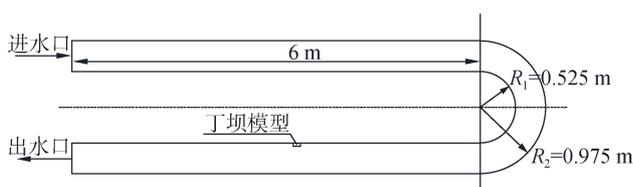


图1 实验水槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental flume

1.2 实验设计

实验过程中进口流量、丁坝位置与尾门水位始终保持不变,通过调节变坡器依次改变水槽的坡度为-3‰、-2‰、-1‰、0、1‰、2‰和3‰。主要实验参数见表1。

表1 主要实验参数

Tab. 1 Major experimental parameters

工况	进口流量/(m ³ /h)	出口水位/m	水槽坡度/‰
1	50.0	0.20	-3
2	50.0	0.20	-2
3	50.0	0.20	-1
4	50.0	0.20	0
5	50.0	0.20	1
6	50.0	0.20	2
7	50.0	0.20	3

水位测量采用超声波测量技术,测量系统主要由3个高精度超声水位探头、移动测车(水槽两边壁上方各有一固定的导轨,移动测车底部焊接有与导轨相吻合的滑轮)、水位采集综合控制箱以及自动水位测量软件等组成。在移动测车上,固定两个超声探头(两超声探头距离须大于0.25 m,否则信号会有干扰),丁坝对岸侧与丁坝侧的超声探头测量点位置距离水槽边壁均为0.05 m。在丁坝上游设置4个观测断面,下游设置7个观测断面。相邻两观测断面距离为0.10 m,每个观测断面上均设置两个观测点,各断面水位观测点布置如图2所示(图中沿程水位观测点按从上游到下游以1—11序号编排)。

流速测量采用PIV技术,PIV测量系统主要由示踪粒子、光路系统、CCD相机、同步器以及图像处理软件构成,照明光源采用双脉冲激光器,片光厚约2 mm,CCD相机为2 048像素×2 048像素。由于激光宽度及相机的拍摄范围有限,因此,本实验共设置

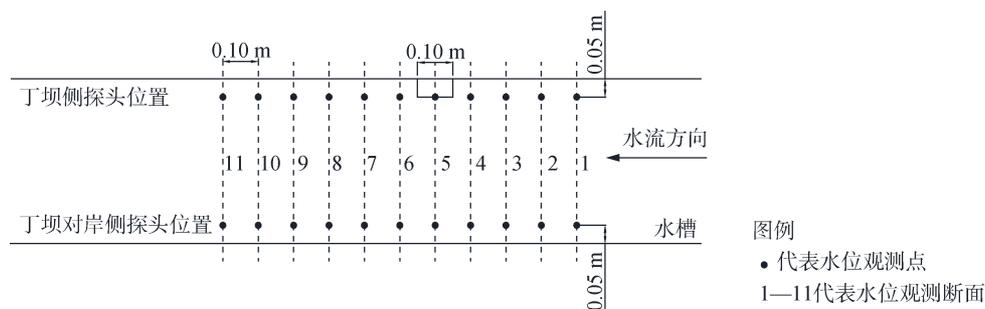


图2 水位观测断面及观测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of layout of water level observation sections and points

了2个同一高度的测量区域(测压 1, 2), 拍摄的水平剖面距离水槽底部 0.10 m, 流速测量区域如图 3 所示, 图中标示的横向观测点, 相邻两点间距离约为 0.032 m。

2 实验结果与分析

2.1 丁坝近区水位沿程变化分析

水位测量前, 先对第一个断面上的两个观测点进行水位零值标定, 这两个观测点的初始水位标定为 0 m,

然后对其余断面上的两个观测点进行初始水位测量, 测量时每次采集数据 1 min, 每个点约有 1 000 个水位数据, 对其求平均后, 作为测量点的初始水位值。水位测量时, 每个断面两个点同样每次采集数据 1 min, 对其求平均后, 减去该点的初始水位值, 即为该点的实际水位值。

在测量过程中, 水槽坡度为 2‰ 时出现了电压等不可控的波动因素, 导致测量结果偏差较大, 因此本次分析将剔除该坡度测量数据。

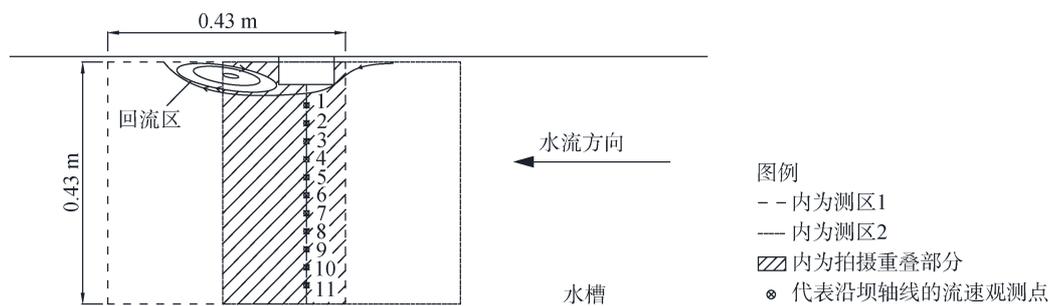
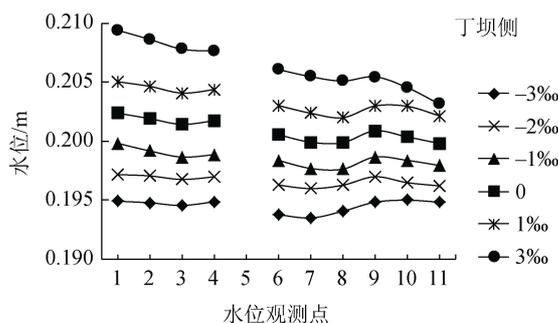


图 3 流速测量区域及流速观测点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of layouts of flow velocity measurement regions and regions

图 4 为不同水槽坡度时, 各观测断面水位的沿程变化情况。从图上可以看出, 水槽坡度从 -3‰ 变化到 3‰ 时, 坝前均有明显的局部壅水现象, 随着坡度的上升, 各观测点的水位都是增加的, 且增加幅度与水槽坡度变化存在较好的对应关系。除水槽坡度为 -3‰ 时, 水槽两侧断面 10 的水位最高外, 其余情况下都是断面 1 的水位最高。

在丁坝侧, 在坝前, 当水槽坡度为 -3‰~1‰ 时,



坝前产生局部壅水, 坝前水位断面 4 高于断面 3, 且断面 3 水位最低; 而水槽坡度为 3‰ 时, 水位从断面 1 到断面 4 逐渐降低, 坝前无明显壅水。在坝后, 断面 6 与坝前断面 4 相比, 各水槽坡度水位都明显下跌, 当水槽坡度为 -3‰~2‰ 时, 水位在断面 7 跌至最低点, 当水槽坡度为 -1‰~3‰ 时, 坝后水位跌落的最低点下移至断面 8, 然后水位缓慢上升一段距离后逐渐回落。

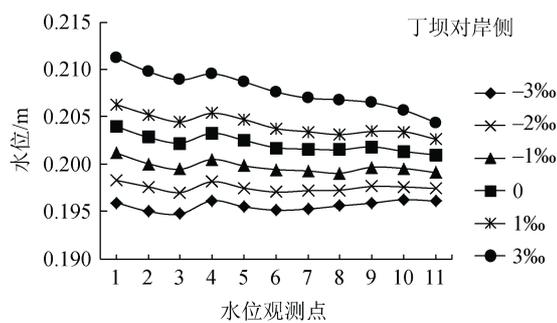


图 4 不同水槽坡度下各观测点水位变化情况

Fig. 4 Water level changes of measured points under different flume slopes

在丁坝对岸侧, 坝前都出现了壅水现象, 且壅水程度比丁坝侧较大。在坝后, 水面自断面 4 开始出现不同程度的下跌, 当水槽坡度为 -3‰~2‰ 时, 水位在断面 6 处跌至最低点, 然后逐渐上升再回落; 当

水槽坡度为 -1‰~1‰ 时, 水位最低点在断面 8 处, 同样再上升再回落; 当水槽坡度为 3‰ 时, 水位自断面 4 一直下降至断面 11。这说明随着水槽坡度的升高, 坝后跌水的最低点逐渐下移。

2.2 丁坝下游回流区特性分析

应用 PIV 技术, 对每个测量区域分别拍摄 300 张图片, 对其求平均, 得到该区域的流场图。图 5 为不同水槽坡度时, 丁坝下游距水槽底部 0.10 m 处的水平剖面流场图, 图中的 X 轴和 Y 轴分别代表流场图的横、纵向长度。

从图 5 中可以看出, 由于丁坝的束窄作用, 水流

流经丁坝束窄区段流速会加大, 过丁坝后水面忽然放宽, 主流在惯性作用下仍保持原来的方向流动, 在主流强剪切和边界层的分离影响下, 坝后形成了较大的漩涡, 漩涡速度分布较相似, 但漩涡中心点位置、回流区长度、宽度等都有所不同。

表 2 为水槽坡度不同时沿丁坝中轴线横向观测点流速统计结果(自丁坝侧向丁坝对岸侧用 1—11 编号,

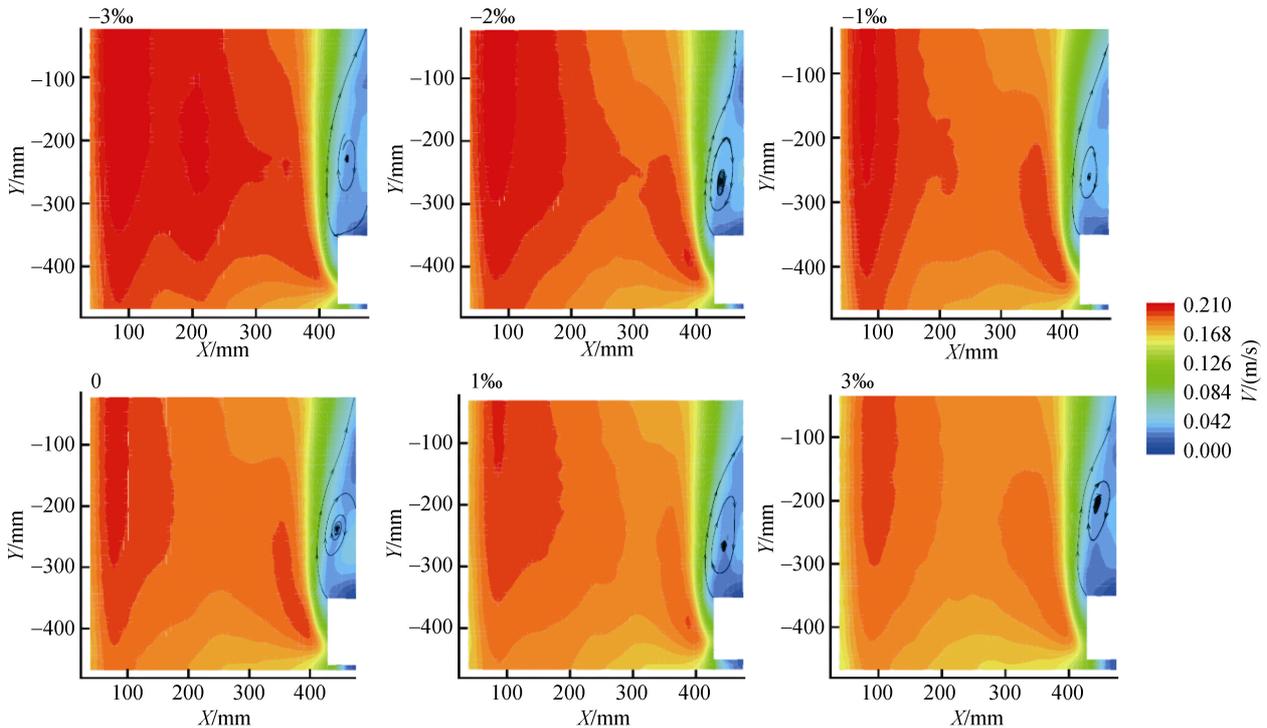


图 5 丁坝下游距水槽底部 0.10 m 处水平剖面流速场图

Fig. 5 Flow velocity fields in the horizontal plane with 0.10 m distance from the flume bottom at downstream of the spur dike under different flume slopes

表 2 不同水槽坡度下沿坝轴线的横向观测点流速

Tab.2 Flow velocity at traverse observation points along the midline of spur dike under different flume slopes

流速观测点	流速/(m/s)					
	-3‰	-2‰	-1‰	0	1‰	3‰
1	0.201	0.204	0.203	0.201	0.197	0.194
2	0.197	0.195	0.194	0.192	0.187	0.186
3	0.194	0.190	0.189	0.187	0.181	0.181
4	0.194	0.188	0.186	0.184	0.180	0.178
5	0.195	0.188	0.187	0.183	0.183	0.177
6	0.200	0.190	0.188	0.184	0.184	0.178
7	0.202	0.193	0.188	0.187	0.187	0.179
8	0.199	0.196	0.189	0.189	0.188	0.182
9	0.200	0.199	0.194	0.191	0.190	0.186
10	0.204	0.202	0.200	0.194	0.192	0.190
11	0.207	0.205	0.204	0.198	0.193	0.190
流速均值	0.199	0.195	0.193	0.190	0.187	0.184
最大流速	0.207	0.205	0.204	0.201	0.197	0.194

如图 3)。从表中可以看出,随着水槽坡度的增加,断面平均流速是逐渐减小的。受丁坝上角挑流的作用及丁坝下游回流区的影响,流线会向丁坝对岸侧收紧,丁坝一侧的流速小于丁坝对岸侧流速。

表 3 为不同水槽坡度回流区特征参数统计结果,从表中可以看出,随着水槽坡度的增大,漩涡中心点位置与丁坝侧边壁距离逐渐减小,但漩涡中心点与丁坝的距离变化较大。当水槽坡度为-3‰和 3‰时,漩涡中心点与丁坝的距离都较大;当水槽坡度为 0 时漩涡中心点与丁坝的距离为次大;当水槽坡度为-2‰、-1‰和 1‰时,漩涡中心点与丁坝的距离却较近,坝后的回流区中心点与丁坝的距离显出了紊动水流的随机特性。

回流区平均相对长度为 4.42,变化范围为 3.96~5.10,变化范围较大。回流区平均相对宽度为 1.30,变

化范围为 1.25~1.35,变化范围较小。水槽坡度为-3‰时,回流区长度最长,为 25.48 cm,水槽坡度为-1‰时,回流区长度最短,为 19.80 cm。水槽坡度为-3‰和 0 时,回流区宽度最宽,为 6.73 cm;水槽坡度为-1‰时,回流区宽度最小,为 6.25 cm。显然,回流区的长度和宽度的变化与水槽坡度的变化不存在对应的关系,但它们的变化都有一个先减小再增大再减小再增大的过程,即回流区的长度与宽度的变化具有一致的统计特性。

为了分析回流区长度与宽度随水槽坡度变化内在的联动关系,点绘无量纲 L/B (长度与宽度之比)与 L/b (相对回流长度)关系曲线(如图 6), L/B 与 L/b 呈现出非常好的线性关系,即有:

$$L/B = (1.5726L/b) - 0.9296, \quad (1)$$

式(1)说明,回流区长度和宽度的变化两者是完全关联的。

表 3 不同水槽坡度坝后回流区统计结果

Tab. 3 Statistical results of recirculation region behind the spur dike under different flume slopes

水槽坡度/‰	漩涡中心		回流区				
	与丁坝距离/cm	与丁坝侧边壁距离/cm	L/cm	B/cm	L/B	L/b	B/b
-3	12.14	4.26	25.48	6.73	3.79	5.10	1.35
-2	7.96	3.93	22.35	6.51	3.44	4.47	1.30
-1	8.86	3.47	19.80	6.25	3.17	3.96	1.25
0	10.60	3.43	21.37	6.73	3.18	4.27	1.35
1	8.37	3.31	20.94	6.34	3.30	4.19	1.27
3	14.75	3.32	22.67	6.42	3.53	4.53	1.28
平均值	10.45	3.62	22.10	6.50	3.40	4.42	1.30

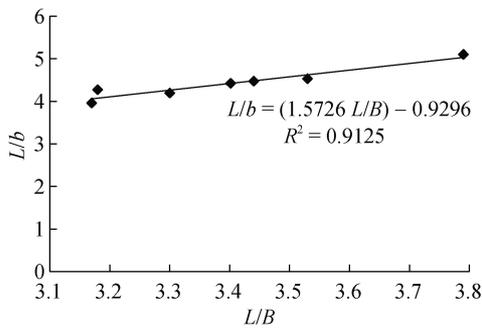


图 6 回流区长宽比(L/B)与相对回流长度(L/b)关系图

Fig. 6 The relationship between the ratio of length and width of recirculation region (L/B) and relative length of recirculation (L/b)

2.3 丁坝下游紊动强度对回流区的影响分析

一般而言,丁坝后形成的回流区大小与水流紊动强度有关,紊动主要是通过剪切作用产生的,描述水

流的紊动强度可以用脉动流速的均方根表示,即:

$$k_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ (v_i - \bar{v})^2 \right\}}{n}}, \quad (2)$$

$$k_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ (u_i - \bar{u})^2 \right\}}{n}}, \quad (3)$$

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}. \quad (4)$$

式中, k_x 、 k_y 分别为 x 方向和 y 方向上的紊动强度; v_i 、 u_i 分别为 x 、 y 方向上的瞬时流速; \bar{v} 、 \bar{u} 分别为 x 、 y 方向上的时均流速; k 为总紊动强度。

图 7 为不同水槽坡度丁坝下游的紊动强度分布图,从图中可以看出,丁坝对岸及主流区紊动强度较小($k < 0.022$ m/s),坝头紊动强度最大($k > 0.055$ m/s),过坝头向下游延伸有一条带状的紊动强度较大的区域(0.055 m/s $< k < 0.022$ m/s),在坝根处,紊动强度最小($k < 0.015$ m/s)。

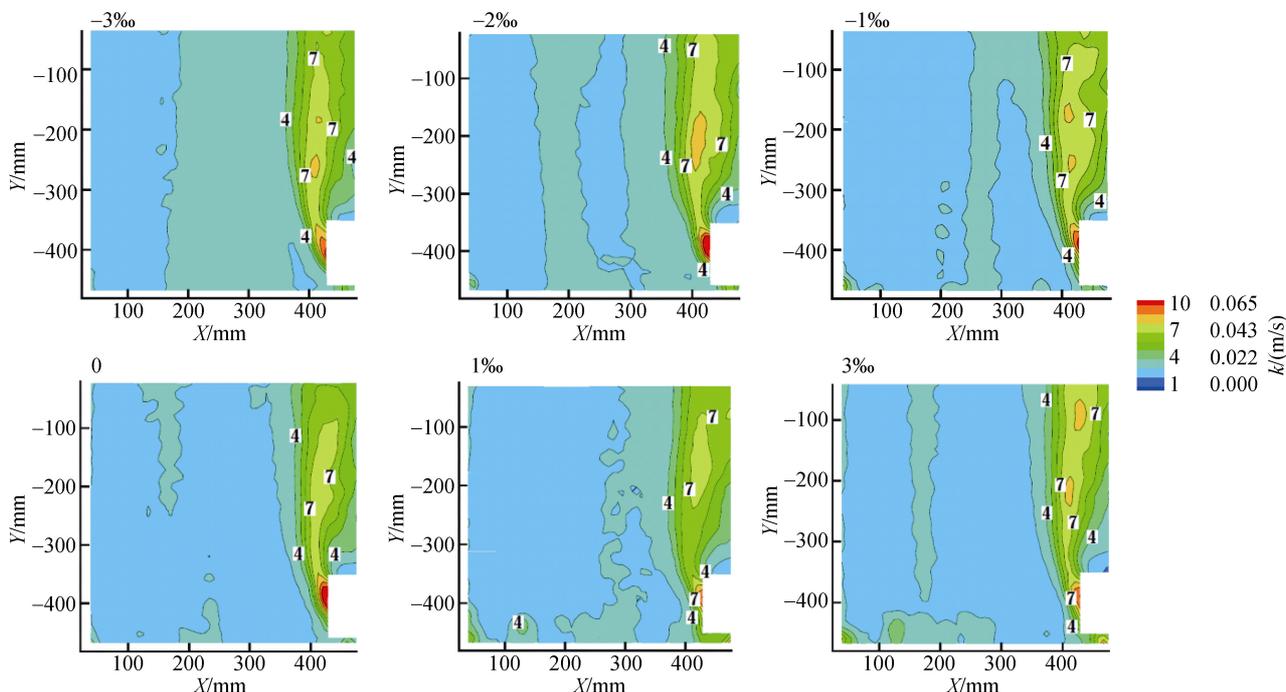


图 7 不同水槽坡度下丁坝下游紊动强度等值线图

Fig. 7 Contours of turbulent intensity downstream of the spur dike under different flume slopes

紊动强度等值线 $k=0.022$ m/s)是主流区与紊动掺混区的分界线。当水槽坡度为 -3% 时,等值线 4 上起始点位置落在坝头近 $1/4$ 处,随着水槽坡度的升高,等值线 4 上起始点位置沿丁坝头逐渐向上移动,但变化较小;当水槽坡度为正坡时,等值线 4 上起始点位置已经越过丁坝,由于丁坝上游也会形成一个紊动强度较大的区域,因此,等值线 4 上起始点位置应落在丁坝上游的水槽壁面上。显然,随着水槽坡度的升高,紊动强度较大的区域($k \geq 0.022$ m/s)在丁坝处会向主流区及上游扩散。

图 8 为不同水槽坡度坝头处最大紊动强度柱形图,水槽坡度为正坡时,坝头处最大紊动强度较小,水槽坡度为负坡和平坡时,坝头处最大紊动强度较大,

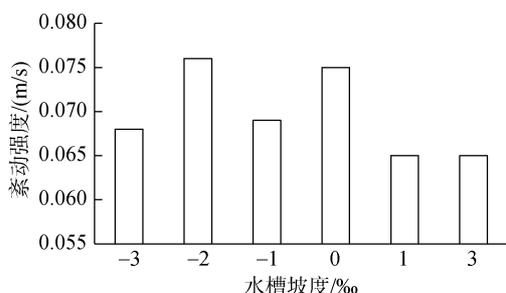


图 8 不同水槽坡度坝头处最大紊动强度柱状图

Fig. 8 Histogram of the maximum turbulence intensity at the head of spur dike under different flume slopes

且水槽坡度为 -2% 和 0 时,坝头处最大紊动强度最大,坝头处紊动强度变化与水槽坡度的变化没有相关性,与回流区的大小也没有对应关系。显然,在较小的坡度变化范围内,紊动水流的各特性变化随机性较为明显。

2.4 坝头近壁区流速对回流区的影响分析

由于坝头处紊动强度最大,显然,在坝头壁面,流动受到黏性的显著影响,流速沿坝头壁面法向变化剧烈,在来流紊动、坝头粗糙程度及水流黏性等共同作用下,在坝头处将会产生频率不等大小不一的漩涡。在相同的流量情况下,水槽坡度越大来流速度越大,边界层越薄,其产生的漩涡能量也越大。这些漩涡一般会在坝后分解,并把能量传递给坝后产生的漩涡,对坝后回流区的大小会产生影响。

图 9 为 $T+0$ 时刻和 $T+0.125$ s 时刻坝头局部流场图(T 表示任意起始时间),从图上可以看出,在坝头前三分之一范围里,由于水槽断面受丁坝束窄的影响,该范围里贴近坝头壁面流速都较大,边界层相对较薄。而在坝头壁面后三分之二的范围里,近壁面流速较小,且流速沿壁面法向方向变化较大,水流在边界层的影响下,在 $T+0$ 时刻贴着边界层产生一个顺时针的漩涡,并在 $T+0.125$ s 在坝后有所分解,将能量传递给坝后同样顺时针的漩涡。显然,在不确定的扰动因素影响下,坝头边界层流速分布决定了

坝头处产生漩涡的频率、大小等,也即坝后漩涡从坝头漩涡获得的能量与坝头边界层流速分布有关。

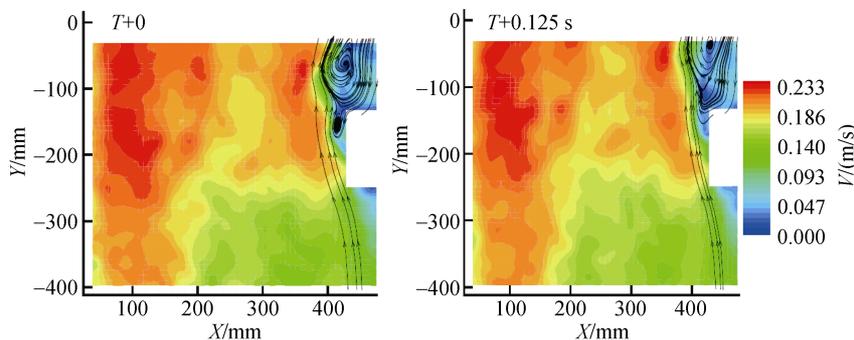


图9 T+0时刻和 T+0.125 s时刻流场图
Fig. 9 Flow fields at the moments of T+0 and T+0.125 s

表4为丁坝坝头后三分之二长度、法向宽度为1.5 cm,沿水流方向分三层每层各5个观测点的纵向流速统计结果,从表中可以看出,沿壁面向外流速是逐渐增大的,随水槽坡度的变化,任一层的平均流速与三层总的平均流速大小分布完全一致,但流速大小与坡度的变化没有对应关系。

为了分析坝头近壁区流速与丁坝后回流区长度的关系,取三层平均流速(也可取某一层的平均流速)及回流区的长度进行归一化处理,即:

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (5)$$

式中, x_i 、 x_i^* 分别表示数据归一化前后的值, x_{\min} 、 x_{\max} 分别表示观测数据里的最小、最大值,计算后并绘图(图10)。

从图10可以看出,坝头近壁区流速与回流区的长度存在非常高的响应关系,当坝头近壁区流速较小时,

即流速沿坝头边壁法向变化较大,紊动较强,回流区长度会较大,而当坝头近壁区流速较大时,即流速沿坝头边壁法向变化较小,紊动较弱,回流区长度会较小。坝头近壁区流速的变化本质上体现了边界层流速的变化。

对各水槽坡度距坝头边壁1.5 cm平均流速(即表4中第三层流速)做无量纲处理,即:

$$v_i' = v_i / v_0, \quad (6)$$

式中: v_i 为距坝头边壁1.5 cm平均流速, v_0 为水槽坡度为0时坝头中轴线横断面平均流速。点绘 $L/b \sim v_i'$ 关系曲线(图11), L/b 与 v_i' 呈现出非常好的线性关系,即:

$$L/b = -0.9058v_i' + 10.301, \quad (7)$$

该式说明,在较小的流速变化范围里,回流区的长度与水槽坡度的关系较弱,而与边界层的扰动即近壁区的流速分布关系较强。在实际工程应用中,当河流水流速度变化较小时,坝头的粗糙度及水流的扰动程度将影响回流区的长度。

表4 不同水槽坡度下坝头近壁区各观测点流速统计结果

Tab. 4 Statistical results of velocity at observation points in the region near the dike head under different flume slopes

流速观测点	流速/($\times 10^{-2}$ m/s)																	
	-3‰			-2‰			-1‰			0			1‰			3‰		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
1	1.6	2.2	6.7	1.2	3.1	7.4	1.6	3.6	8.1	1.3	3.5	7.9	1.4	3.6	8.2	1.5	3.6	7.8
2	0.4	3.0	7.8	3.2	5.2	9.5	3.1	5.5	10.2	3.6	5.7	10.1	3.9	6.1	10.3	3.9	5.9	9.8
3	1.5	4.7	10.0	5.8	7.9	12.1	6.5	9.1	13.4	6.0	8.2	12.6	6.7	8.9	12.7	6.1	8.1	12.0
4	4.0	7.9	13.1	9.2	11.1	14.9	10.2	12.9	16.3	9.2	11.4	15.1	9.5	11.8	15.2	8.5	10.9	14.6
5	9.5	13.1	16.8	12.7	14.9	17.6	14.2	16.4	18.5	12.2	15.0	17.6	12.8	14.9	17.2	11.4	13.8	16.5
平均流速	3.4	6.2	10.9	6.4	8.4	12.3	7.1	9.5	13.3	6.5	8.8	12.7	6.8	9.1	12.7	6.3	8.5	12.1
总平均流速	6.8			9.1			10.0			9.3			9.5			9.0		

注: ①代表距坝头壁面0.3 cm流速; ②代表距坝头壁面0.8 cm流速; ③代表距坝头壁面1.5 cm流速。

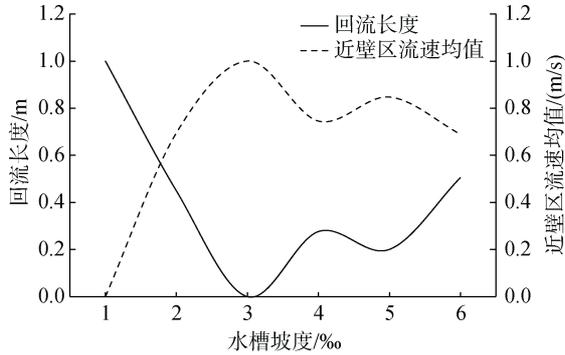


图 10 归一处理后的近壁区流速与回流区长度

Fig. 10 The normalized velocity in the region near the wall and recirculation length under different flume slopes

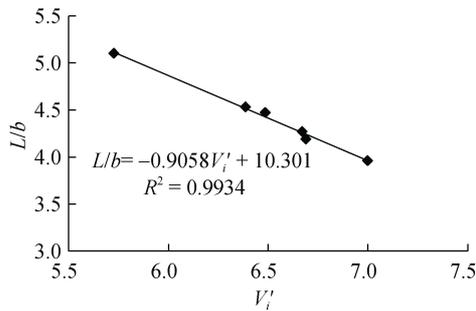


图 11 归一处理后近壁区流速与回流区长度的关系图

Fig. 11 The relationship between the normalized velocity in the region near the wall and relative recirculation length

3 结论

本文通过实验研究的方法，分析了不同水力坡度对非淹没单丁坝近区水流结构的影响，实验结果表明：

1) 随着水槽坡度的上升，丁坝前后、丁坝侧与对岸侧水位都相应抬高，且丁坝对岸侧水位高于丁坝侧水位；

2) 在水槽坡度变化较小即流速变化较小的情况下，回流区的长度、宽度变化与流速变化关系不大，但回流区的长度与宽度之间有一个内在的联系；

3) 回流区的长度变化与最大紊动能产生区域有关，但与最大紊动能没有直接的对应关系；

4) 在来流流速变化较小时，来流流速对回流区长度的影响很小，而坝头近壁区流速对回流区长度影响很大，即坝头边界层流速决定了回流区的长度；

5) 由 4)可以推论，在实际工程应用中，当河流水流速度变化较小时，坝头的粗糙度及水流的扰动程度将直接影响回流区的长度。

参考文献:

[1] Grade R J, Subramanya K, Nambudripad K D. Study of scour around spur-dikes[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1961, 86(6): 23-37.

[2] Rajaratnam N, Nwachukwu B A. Erosion near groyne-like structures [J]. Journal of Hydraulic Research, 1983, 21(4): 277-287.

[3] Francis J R D, Pattanaik A B, Wearne S H. Observation of flow patterns around some simplified groyne structure in channels[C]//the Institution of Civil Engineers . Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London: the Institution of Civil Engineers, 1968: 829-846.

[4] 胡华锋. 丁坝绕流结构的试验及数值研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
Hu Huafeng. Experiment and numerical research of flow structure around spur dike[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2006.

[5] 许光祥, 程昌华, 刘建新. 丁坝对河道水位影响的实验研究[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 University, 1994, 13(4): 48-53.

[6] 高桂景. 丁坝附近水流动能分布研究[J]. 水运工程, 2007(11): 75-79, 119.
Gao Guijing. Distribution of pulsation kinetic energy of flow around spur dike[J]. Port & Waterway Engineering, 2007(11): 75-79, 119.

[7] 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.

[8] Tingsanchali T, Maheswaran S. 2-D Depth-average flow computation near groyne[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (1): 71-86.

[9] Mayerle R, Toro F M, Wang S S Y. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(2): 178-196.

[10] Ouillon S, Dartus D. Three-dimensional computation of flow around groyne[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(11): 962-970.

[11] 李中伟, 余明辉, 段文忠, 等. 丁坝附近局部流场的数值模拟[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(3): 18-22.
Li Zhongwei, Yu Minghui, Duan Wenzhong, et al. Numerical simulation of local flow field around spur dike[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and

- Electric Engineering, 2000, 33(3): 18-22.
- [12] 周宜林, 道上正规, 桧谷治. 非淹没丁坝附近三维水流运动特性的研究[J]. 水利学报, 2004, 8: 46-53.
Zhou Yilin, Michiue M, Hinokidani O. Study on flow characteristics around the non-submerged spur-dikes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 8: 46-53.
- [13] 蔡亚希, 魏文礼, 刘玉玲. 进口流速对丁坝回流长度影响的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 51-54, 59.
Cai Yaxi, Wei Wenli, Liu Yuling. Study of numerical simulation on influence of inlet velocity on recirculation scale[J]. Journal of Water Resource & Water Engineering, 2013, 24(6): 51-54, 59.
- [14] 雷亚, 刘杰. 基于 Fluent 的丁坝回流区数值模拟[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(2): 4-6.
Lei Ya, Liu Jie. Simulation of the backflow zone around spur dike based on FLUENT[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2015, 21(2): 4-6.
- [15] 李子龙, 寇军, 张景新. 明渠条件下单丁坝绕流特征的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2016, 33(2): 245-251.
Li Zilong, Kou Jun, Zhang Jingxin. Numerical simulations of flow around a single spur dike in an open channel[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(2): 245-251.

Influences of different hydraulic gradients on flow structures near the spur dike

ZHENG Yu-hua¹, ZHENG Jian², GU Jie², KUANG Cui-ping¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Received: Mar. 28, 2018

Key words: hydraulic gradient; emerged spur dike; turbulent energy; recirculation zone; velocity in the region near the dike head

Abstract: This study investigated the flow structures in the near-field of an emerged spur dike under different hydraulic gradients by laboratory experiments using ultrasonic wave and PIV technical methods for measuring the water level and velocity, respectively. Experimental results showed that with the decrease in the hydraulic gradient, at the head of the dike, the area of the strong turbulence intensity gradually spread toward the main stream and upstream. At the downstream of the dike, the lowest point of the hydraulic gradient dropped gradually downward, and the vortex center was close to the wall of the dike side. There was no obvious relationship between the change in the length and width of the recirculation zone and the change in the hydraulic gradient; however, a highly linear relationship was observed between the velocity in the region near the dike head and the length and width of the recirculation zone. These research achievements reveal the mechanism of the regulative action of the dike to the flow structure under different hydraulic gradients. At the same time, these findings could clearly explain the difference in the length of the recirculation zone obtained by measurements of previous researchers and further provide a scientific basis for designing the spur dike and planning the river shoreline.

(本文编辑: 刘珊珊)