

淹没阶梯形丁坝水流结构 PIV 试验研究^{*}

王世鹏¹, 钟亮^{1,2}, 廖尚超¹, 邓晓龙¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 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)

摘要: 阶梯形丁坝在航道整治中应用广泛, 但其水流结构研究仍不充分。基于 PIV 室内水槽试验, 探讨阶梯形丁坝区无量纲纵向时均流速 u^+ 、紊动强度 T_u^+ 、雷诺应力 R^+ 和紊动能 E^+ 的分布规律。结果表明: 丁坝水流在纵剖面上可划分为顺流区、回流区和过渡区, 丁坝内侧至一级丁坝坝头各剖面 u^+ 高速区位于坝顶上部, 低速区和回流区位于坝顶下部; 丁坝外侧各剖面 u^+ 沿程变化表现为先增大后减小。受水流翻越坝顶影响, 丁坝上游各垂线的 T_u^+ 随 y^+ 变化明显, 而下游各垂线的 T_u^+ 变化相对平缓。 R^+ 高值区位于坝顶附近且呈带状, 流量较小时, R^+ 沿 y^+ 的垂线变化相对平缓, 坝顶附近 R^+ 分布曲线呈“S”形, 流量增大后丁坝上游 R^+ 变化加剧。 E^+ 高值区由坝顶向水槽底部和水面扩散呈三角状, 且 E^+ 随流量的增加而增大。

关键词: 阶梯形丁坝; 明槽紊流; 时均流速; 紊动强度; 雷诺应力; 紊动能

中图分类号: TV 863; U 617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0100-12

PIV experimental study on flow structure of submerged step-shaped spur dike

WANG Shi-peng¹, ZHONG Liang^{1,2}, LIAO Shang-chao¹, DENG Xiao-long¹

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Step-shaped spur dike is widely used in waterway regulation, but its flow structure is still not fully studied. Based on the PIV indoor flume test, we discuss the distribution of dimensionless longitudinal time average velocity u^+ , turbulence intensity T_u^+ , Reynolds stress R^+ and turbulent kinetic energy E^+ in the stepped spur dike area. The results show that the longitudinal section of spur dike flow can be divided into downstream area, reflux area and transition area. The high velocity area of u^+ for each profile from the inside of spur dike to the head of the first step spur dike is located in the upper part of the dam crest, while the low velocity area and the reflux area are located in the lower part of the dam crest, the u^+ of section outside spur dike variation first increases and then decreases. Affected by the flow over the dam crest, T_u^+ of vertical line upstream of spur dike change obviously with y^+ , while T_u^+ of vertical line downstream of spur dike change relatively gentle with y^+ . The high value area of R^+ is located near the dam crest and is in a strip shape. When the discharge is small, the vertical change of R^+ with y^+ is relatively gentle, and the distribution curve of R^+ near the dam crest is in “S” shape. The change of R^+ in the upstream of spur dike is intensified with the increase of discharge. The high value area of E^+ diffuses from the top of the dam to the bottom of the flume and water surface in a triangular shape, and E^+ increases with the increase of discharge.

Keywords: step-shaped spur dike; open channel turbulence; time average velocity; turbulence intensity; Reynolds stress; turbulent kinetic energy

收稿日期: 2021-03-14

***基金项目:** 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0278); 重庆交通大学大学生创新创业训练计划资助项目(202010618002)

作者简介: 王世鹏(1996—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 钟亮(1980—), 男, 博士, 教授, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zlcqjtu@163.com

航道整治工程中多采用单式断面丁坝,但在某些汛期淤积严重的河段,为使其在洪水期少淤、退水期早冲,丁坝断面设计常考虑两级整治水位相结合的方法,同时为减小对洪水壅高的影响,较高一级整治水位对应的整治线宽度须适当增加,从而形成阶梯形丁坝。阶梯形丁坝能够利用各级台阶分散坝头的集中绕流,削弱坝头脱离涡强度,减小局部冲坑深度,保持坝头稳定,因而已在航道整治工程中广泛应用^[1]。

目前,国内外学者对单式断面丁坝水流结构问题开展较多研究。在时均流速方面,周宜林等^[2]分析丁坝布置方式与流速分布的响应关系;李冰冻等^[3]、蔡喆伟等^[4]探讨丁坝水流的流速分布和绕流特性;张岩等^[5]研究丁坝长度对弯道流速分布的影响。在紊动强度方面,陈稚聪等^[6]分析丁坝回流区纵向紊动强度的沿程变化规律;张可等^[7]讨论丁坝类型对水流紊动强度空间分布的影响;郑宇华等^[8]研究丁坝水流紊动强度随水力坡度的变化规律;郭维东等^[9]探讨弯道内丁坝水流纵向紊动强度的分布特征。在雷诺应力方面,Duan^[10]研究丁坝周围雷诺应力的分布特征;Jeon 等^[11]分析非淹没丁坝自由液面变形与雷诺应力的相关性;Kumar 等^[12]探讨雷诺应力随丁坝结构形式的变化规律。在紊动能方面,崔占峰等^[13]研究淹没丁坝附近水流紊动能及其耗散率的分布问题;欧阳澍等^[14]讨论水深、流速对丁坝附近水流紊动能和涡量的影响规律;方强等^[15]分析丁坝坝头形式对水流紊动能分布特征的

影响。

对于阶梯形丁坝,钟亮等^[16]探讨非淹没阶梯形丁坝尺度对水流流速的影响规律;丁晶晶等^[17]研究台阶式丁坝水流流速分布及坝头局部流态;戚福清等^[18]分析阶梯式丁坝群在不同间距情况下的水流特性。相比较而言,阶梯形丁坝水流结构的研究仍较薄弱,对相关问题的认识还有待深入。为此,本文以淹没阶梯形丁坝为例,基于 PIV (particle image velocimetry, 粒子图像测速) 水槽明渠紊流试验资料,研究时均流速、紊动强度、雷诺应力、紊动能等水流结构参数的变化特征和分布规律。

1 水槽试验

1.1 试验装置

试验水槽长 12 m、宽 0.25 m、深 0.25 m。水槽进口设有消能池和整流格栅,以使水流入流平顺;出口设有合页式尾门,可控制试验水位。试验段长约 1 m,距水槽进口 8 m,距出口尾门 3 m。流量通过电磁流量计控制,底坡利用水槽进出口断面的调坡测针控制,水位采用测针观测。

采用阶梯形丁坝,一级丁坝长 $b_1=9\text{ cm}$ 、高 $d_1=3\text{ cm}$,二级丁坝长 $b_2=6\text{ cm}$ 、高 $d_2=1.5\text{ cm}$ 。阶梯形丁坝布置在水槽左侧,试验段布置 4 个测流纵剖面,剖面间距 3 cm,剖面编号由水槽左侧至右侧依次为剖面 1~4,剖面 1 距水槽左侧 3 cm。共进行 2 组试验,试验工况参数见表 1。

表 1 PIV 水槽试验工况

工况	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	h/cm	i	B/h	$\bar{v}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	Re	Fr
1	3	6	0.005	4.17	20.0	7 104	0.261
2	5	6	0.005	4.17	33.3	11 840	0.435

注: Q 为流量; h 为尾门断面水深; i 为底坡, B 为水槽宽度; \bar{v} 为尾门断面平均流速; Re 为水流雷诺数; Fr 为弗劳德数。

1.2 流场采集

流场采集应用二维高频 PIV 系统,该系统主要由高频 CMOS (complementary metal oxide semiconductor, 互补金属氧化物半导体) 相机、8 W 半导体连续激光和 PIV 流场计算软件组成,具有非接触式、对水流无扰动、高分辨率全场测量等优点。PIV 流场计算采用 WIDIM (window

deformation iterative multi-grid scheme, 窗口变形迭代多重网格格式) 算法,最小诊断窗口为 16 像素×16 像素, x 与 y 方向网格重叠系数为 50%,得到计算流场最终分辨率为 8 像素×8 像素(网格边长约 0.8 mm×0.8 mm)。采用高频连续采样方式采集流场,采样频率 800 Hz,样本容量 5 000 次(10 000 帧流场图像)^[19]。丁坝剖面及试验装置见图 1、2。

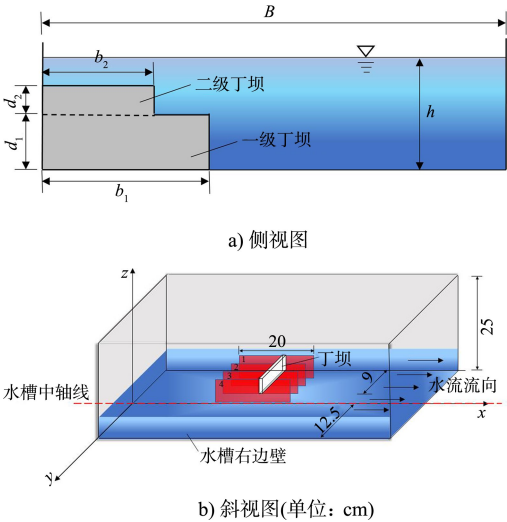


图 1 丁坝剖面

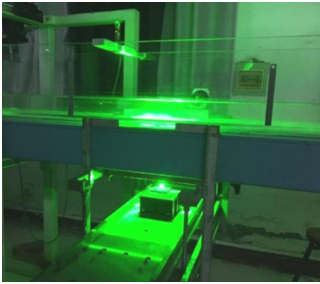


图 2 水槽试验装置

2 结果分析

本文采用无量纲化后的水流结构参数，无量纲化后的纵向时均流速 u^+ 、纵向紊动强度 T_u^+ 、雷诺应力 R^+ 和紊动能 E^+ 的计算公式为：

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{\bar{v}} \tag{1}$$

$$T_u^+ = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2}}{\bar{v}} \tag{2}$$

$$R^+ = \frac{\left| -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i v_i \right|}{\bar{v}^2} \tag{3}$$

$$E^+ = \frac{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (u_i^2 + v_i^2)}{\bar{v}^2} \tag{4}$$

式中： \bar{u} 为纵向时均流速； \bar{v} 为尾门断面平均流速； u_i 、 v_i 分别为纵向、垂向脉动流速， i 为采样点编号； n 为样本容量。定义沿程相对位置 $x^+ = x/b_1$ ，丁坝轴线处 $x^+ = 0$ ，上游 $x^+ < 0$ ，下游 $x^+ > 0$ ；定义相对水深 $y^+ = y/h$ ，槽底 $y^+ = 0$ ，水面 $y^+ = 1$ 。

2.1 时均流速

2.1.1 纵剖面时均流场分区

根据二级丁坝坝头附近水流流态，纵剖面时均流场可划分为顺流区、回流区和过渡区，见图 3。具体为：1) 在丁坝上游坝顶以上区域和下游远离丁坝区域，水流受丁坝阻碍作用较小，基本仍能平顺通过，该区域称为顺流区，即 $BCDE$ 线以上区域和 EH 线下游区域；其中 B 点为流线变向点， C 、 D 点为丁坝与流线的交点， EH 线垂直于槽底。2) 在丁坝上游坝顶以下区域，水流被丁坝阻挡而产生回流，流场中存在流线 ABC ，该流线至下而上由逆流逐渐调整为顺流向，并在坝顶附近发展形成顺流流线 CDE ，因此，定义 $KBCJ$ 区域为回流区，回流区又可分为主回流区 ($KBAJ$) 和回流上升区 (ABC)；其中 BK 、 CJ 线垂直于槽底。3) 在丁坝下游近坝区，存在水流反向交界面 FG ，上升流、下潜流分别在 GE 和 GH 断面过渡为顺流，因此，定义 $DEHI$ 区域为过渡区，过渡区又可分为上升过渡区 ($DEGF$) 和下潜过渡区 ($FGHI$)；其中 DI 线垂直于槽底。

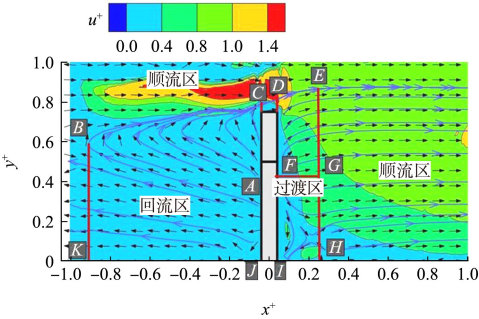


图 3 纵剖面时均流场分区

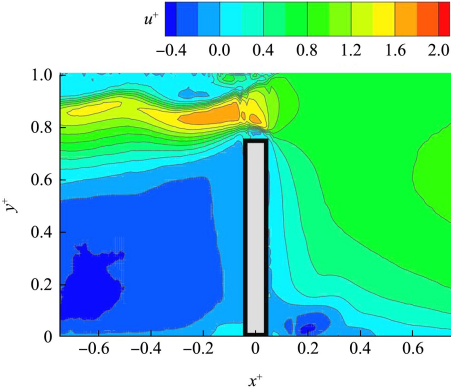
2.1.2 纵向时均流速的沿程变化

根据测流剖面布置，剖面 1 位于丁坝内侧，剖面 2 位于二级丁坝坝头，剖面 3 位于一级丁坝坝头，剖面 4 位于丁坝外侧。阶梯形丁坝各剖面纵向时均流速的沿程变化见图 4。可以看出：1) 丁坝内侧至一级丁坝坝头各剖面（剖面 1~3），纵向时均流速的沿程分布规律总体相似，高速区位于坝顶上部，低速区和回流区则位居坝顶下部；相比较而言，一级丁坝坝头剖面的高速区范围最大，回流区范围最小，高速区范围约为丁坝内侧及二级丁坝坝头剖面的 2 倍，高速区核心区域 u^+ 趋近

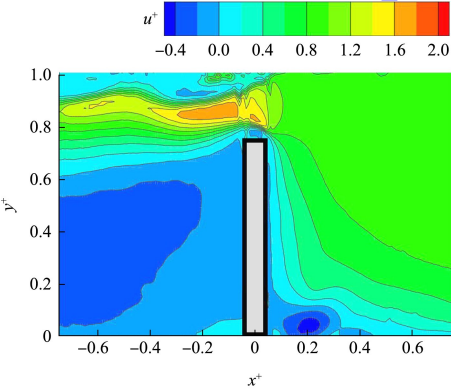
于 2.0。流量较大时，各层水流的流速较大，原本处于回流区的水流，因为流量增大、流速增大，所以越过丁坝的能力增强，因此回流区范围减小。

2) 丁坝外侧，水流经过丁坝作用区时先收缩后扩散，流速沿程变化表现为先增大后减小，高速区出现在坝轴线上游 0.5 b_1 附近。

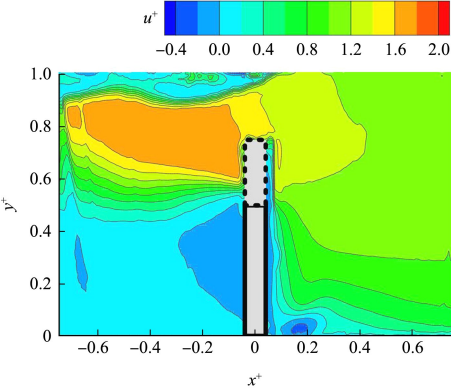
3) 流量较小时，坝顶上部高速带大致水平，水流平顺流经坝顶；流量增大后，高速带与水平方向呈一定夹角，水流以翻越方式通过坝顶，该趋势在剖面 2 尤为明显；二级丁坝坝头和内侧剖面回流区范围随流量的增大而减小，并向槽底转移。



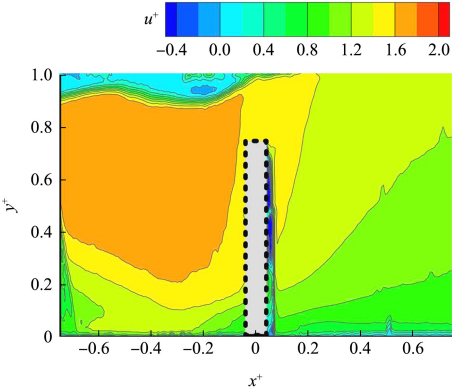
a) 工况1，剖面1



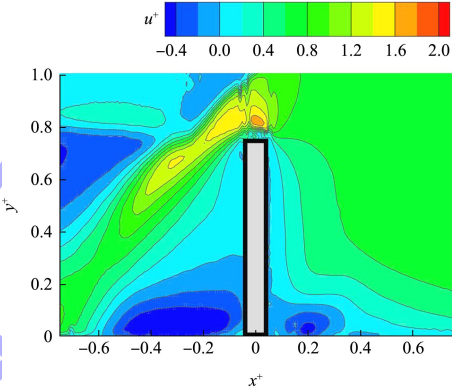
b) 工况1，剖面2



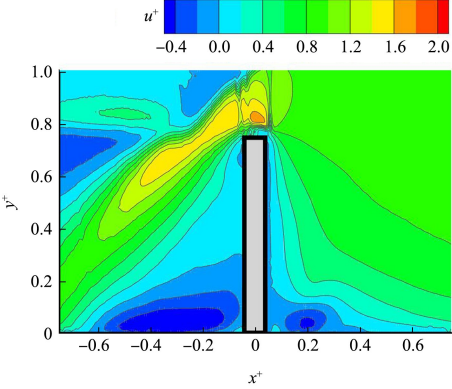
c) 工况1，剖面3



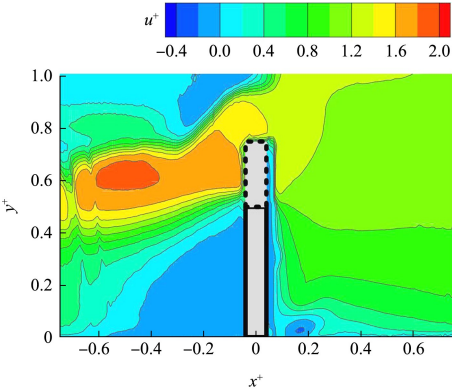
d) 工况1，剖面4



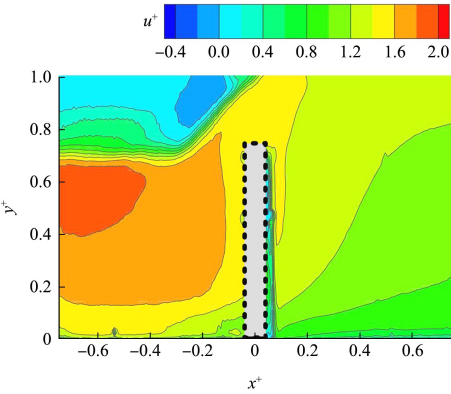
e) 工况2，剖面1



f) 工况2，剖面2



g) 工况2，剖面3



h) 工况2, 剖面4

图 4 纵向时均流速的沿程变化

2.1.3 纵向时均流速的垂线分布

在各剖面的上、下游分别选取 3 条代表垂线，从上游至下游垂线编号依次为 1#~6#，沿程相对位置 x^+ 为 -0.6、-0.4、-0.2、0.2、0.4、0.6。限于篇幅，以工况 1 为例，阶梯形丁坝各剖面纵向时均流速的垂线分布见图 5。试验结果表明：1) 丁坝内侧，上游 1#~3#垂线在流量较小时，相对水深 $y^+ \leq 0.6$ 的 u^+ 基本保持为某一负值， $y^+ > 0.6$ 时 u^+ 随 y^+ 的增大而增大，在二级坝顶附近达到最大值，此后逐渐减小并趋近于 0，流量增大后流速分布波动增加；下游 4#~6#垂线分布趋势总体相似，在 $y^+ \leq 0.2$ 时 4#垂线 u^+ 波动比 5#、6#垂线大，且槽底流速为负，这是由于 4#垂线距丁坝较近，位于下潜过渡区，流态较为复杂，水流尚未恢复到顺流状态。2) 二级丁坝坝头处， u^+ 垂线分布规律与丁坝内侧较为相似，上游 1#~3#垂线 u^+ 分布较下游 4#~6#垂线更加复杂。3) 一级丁坝坝头对水流阻挡作用小，上游几乎不产生回流，因此流速转折点以下 u^+ 几乎为 0，随着 y^+ 的增大， u^+ 分布曲线呈“ \cap ”状；下游各垂线 u^+ 随 y^+ 的增大而增大，内区 u^+ 增幅明显，外区 u^+ 增幅较小，并在水面附近趋于稳定。4) 丁坝外侧，1#~3#垂线的 u^+ 总体大于 4#~6#垂线， u^+ 垂线分布均呈“近槽底明显增大、中间区趋于稳定、水面区明显减小”的变化趋势，即在近槽底区 u^+ 由 0.8 增加到 1.6，中间区稳定在 1.6 附近，水面区 u^+ 逐渐减小到 0。

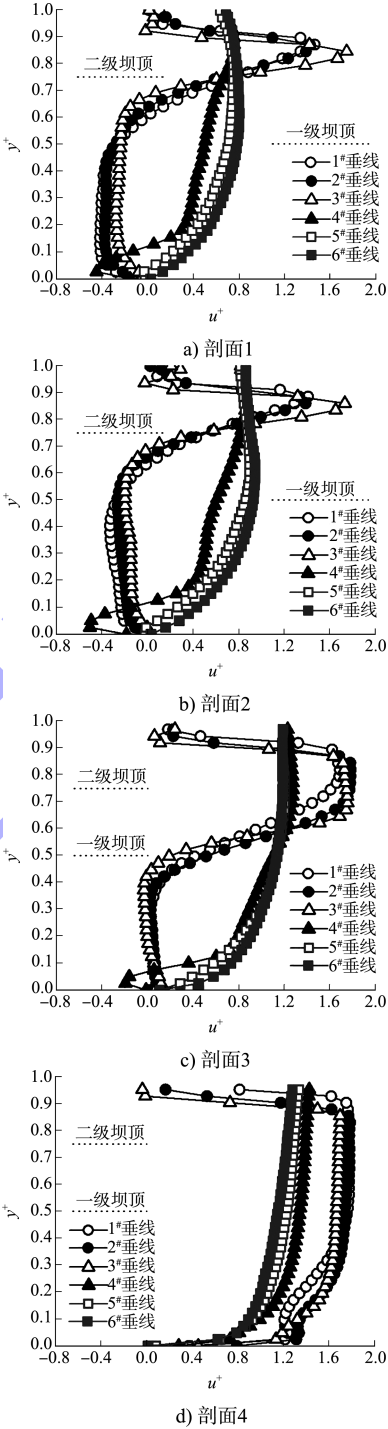


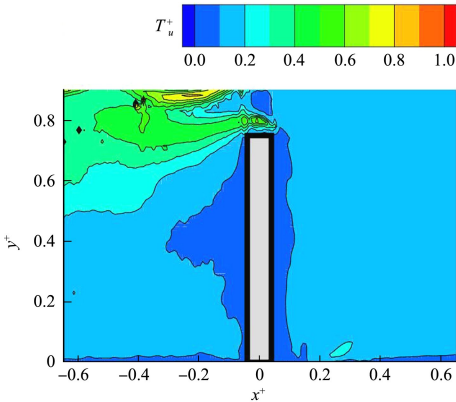
图 5 纵向时均流速的垂线分布

2.2 纵向紊动强度

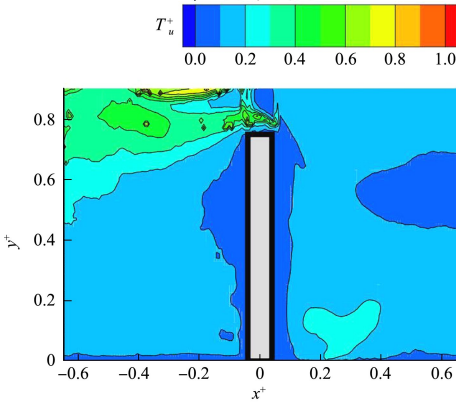
2.2.1 纵向紊动强度的沿程变化

阶梯形丁坝各剖面纵向紊动强度的沿程变化见图 6。可以看出：1) 丁坝内侧，上游区段的 T_u^+ 分布与 u^+ 较为吻合，流量较小时， T_u^+ 高值区位于坝顶上部且基本呈水平方向， T_u^+ 变幅约为 0.4，流量增大后， T_u^+ 高值区与水平方向呈约 45° 夹角；下游区段水流纵向紊动强度相对较弱，并稳定在 0~0.4 之间。2) 二级丁

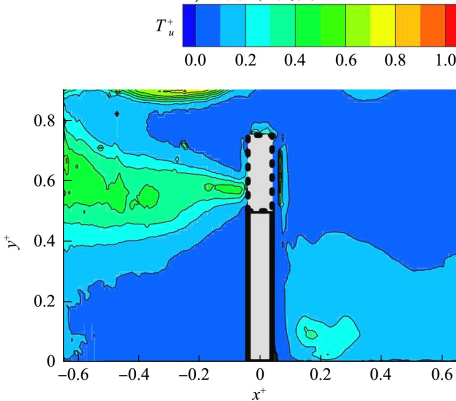
坝坝头处, T_u^+ 沿程变化与丁坝内侧总体相似, 并在下游 $x^+=0.2$ 左右近底区域出现小范围的 T_u^+ 较大值, 这主要由于该区域位于下潜过渡区, 水流紊动相对增强。3) 一级丁坝坝头, 水流受丁坝的阻拦作用较小, 流量较小时, 在一级坝顶上部形成锥状 T_u^+ 高值区, T_u^+ 变幅约为 0.6, 下部回流区的 T_u^+ 相对较小, 趋近于 0; 流量增大后, T_u^+ 低值区范围减小, 高值区范围增大, T_u^+ 最大值接近 1.0, 出现在顺流区。4) 丁坝外侧, 流量较小时上游靠近槽底的 T_u^+ 成倾斜条带状分布, 流量增大后, 在坝顶上游出现 T_u^+ 最大值, 坝顶下游 T_u^+ 无明显变化。



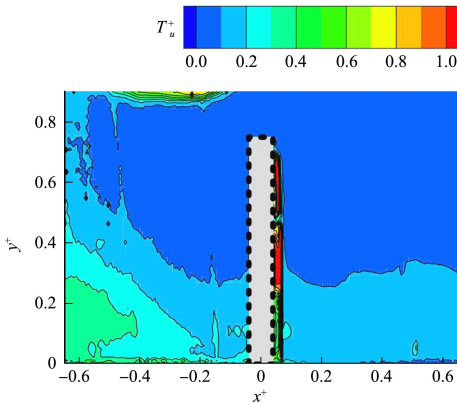
a) 工况1, 剖面1



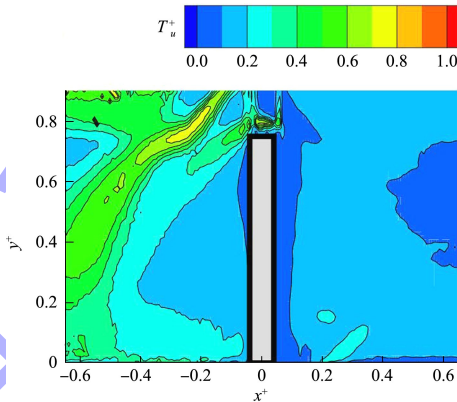
b) 工况1, 剖面2



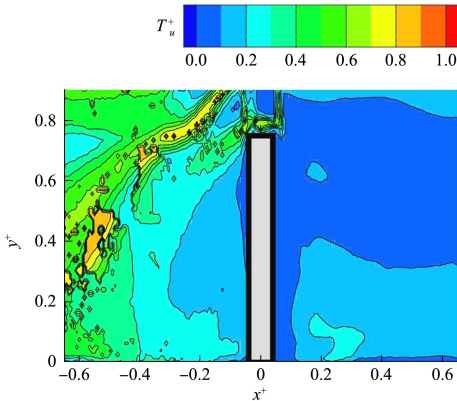
c) 工况1, 剖面3



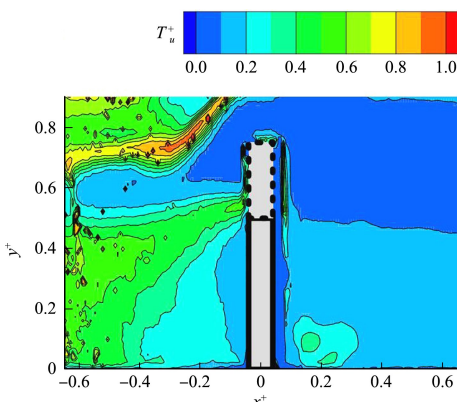
d) 工况1, 剖面4



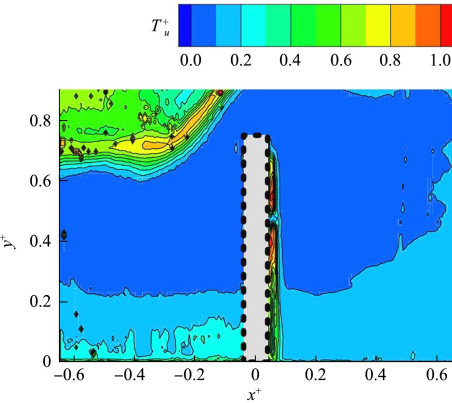
e) 工况2, 剖面1



f) 工况2, 剖面2



g) 工况2, 剖面3

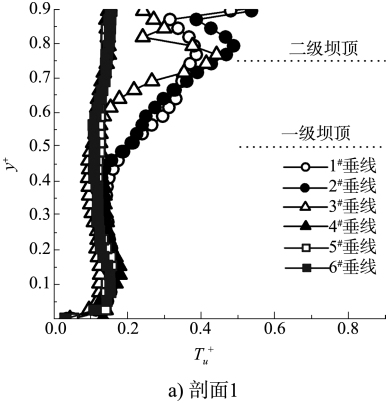


h) 工况2, 剖面4

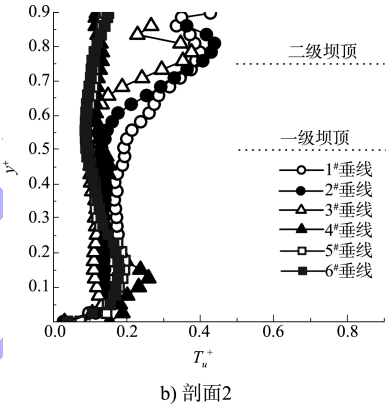
图 6 纵向紊动强度的沿程变化

2.2.2 纵向紊动强度的垂线分布

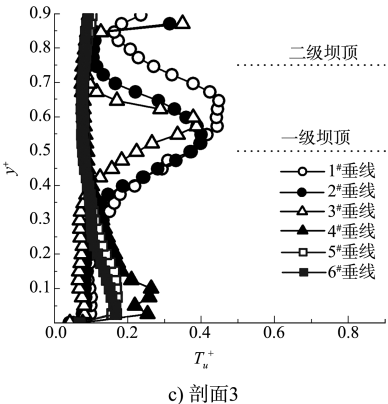
以工况 1 为例, 阶梯形丁坝各剖面纵向紊动强度的垂线分布见图 7。试验结果显示: 1) 丁坝内侧, 流量较小时, 上游 1#~3#垂线 T_u^+ 随 y^+ 的增大而增大, 在 $y^+=0.75$ 附近, T_u^+ 达到最大值, 至近水面区 T_u^+ 波动明显, 该区域水流翻越坝顶, 流态复杂, T_u^+ 变化较大, 下游 4#~6#垂线 T_u^+ 变化相对平缓, 因下潜流作用, 4#垂线近底区 T_u^+ 有所波动; 流量增大后, 1#~3#垂线槽底附近的 T_u^+ 变幅加大, 而 4#~6#垂线的 T_u^+ 变化很小。2) 二级丁坝坝头, T_u^+ 的垂线分布规律和丁坝内侧相似, 上游 1#~3#垂线在流量较小时 T_u^+ 最大值出现在水面附近, 下游 4#~6#垂线 T_u^+ 数值变化与丁坝内侧相近, 保持在 0.1 左右波动; 流量较大时 T_u^+ 沿水深波动增加, 数值上也有所增大; 下游 4#~6#垂线 T_u^+ 沿水深的变化相对平缓, 数值上与丁坝内侧也较接近。3) 一级丁坝坝头, 流量较小时, 1#~3#垂线在 $y^+ \leq 0.4$ 范围内 T_u^+ 稳定在 0.1 左右, y^+ 增大后, T_u^+ 曲线沿水深呈“S”形变化, T_u^+ 最大值出现在一级丁坝和二级丁坝之间; 流量增大后, 1#~3#垂线 T_u^+ 沿水深变化更加明显, 并在一级丁坝坝顶和二级丁坝坝顶处出现双峰值。4) 丁坝外侧, 1#~3#垂线 T_u^+ 随 y^+ 的增大而减小, 至 $y^+=0.5$ 以后趋于稳定, 受水流翻越坝顶影响, 近水面区域 T_u^+ 有小幅波动; 4#~6#垂线 T_u^+ 沿相对水深分布基本稳定, 受流量变化影响较小。



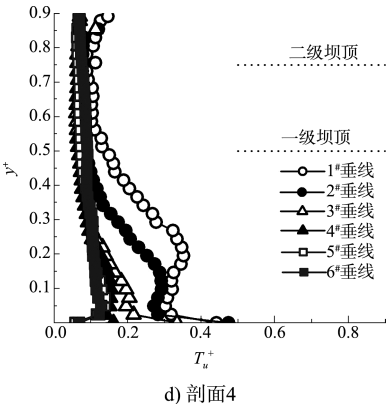
a) 剖面1



b) 剖面2



c) 剖面3



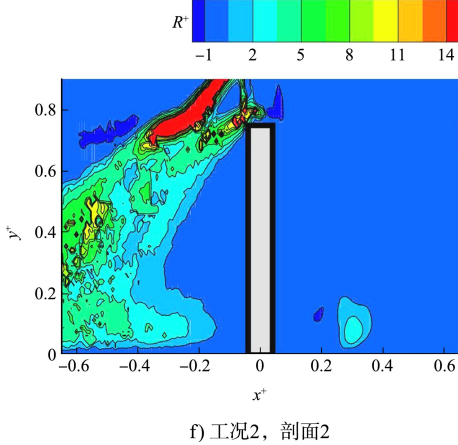
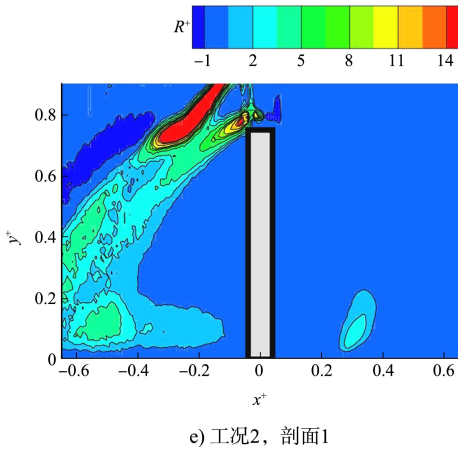
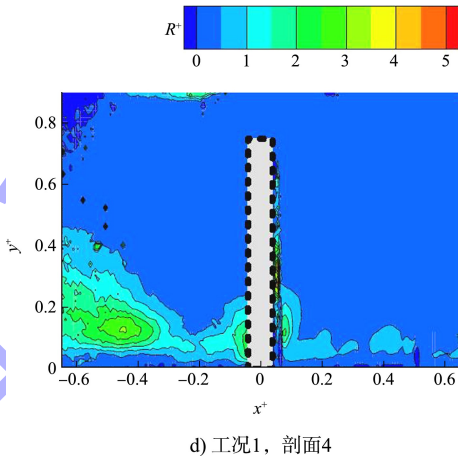
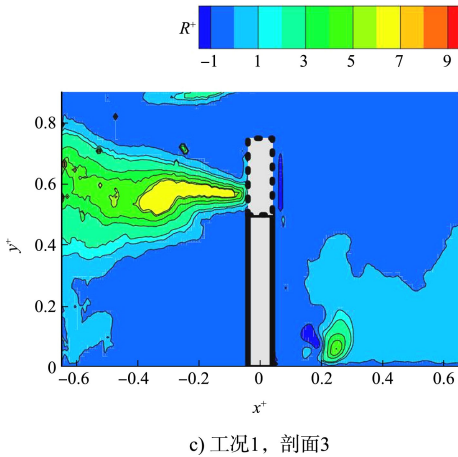
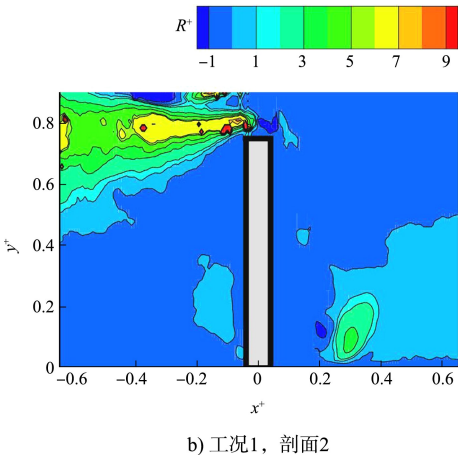
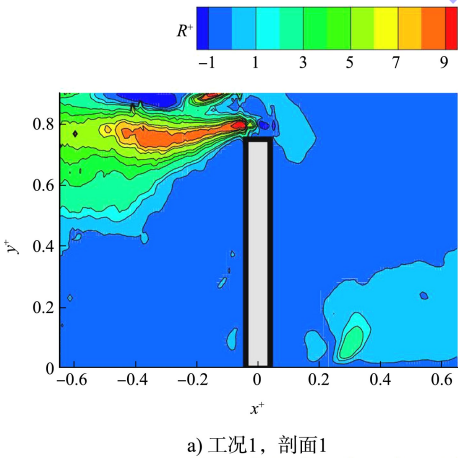
d) 剖面4

图 7 纵向紊动强度的垂线分布

2.3 雷诺应力

2.3.1 雷诺应力的沿程变化

阶梯形丁坝各剖面雷诺应力的沿程变化见图 8, 因无量纲化后的 R^+ 较小, 为便于显示, 图中 R^+ 放大了 100 倍。结果表明: 1) 丁坝内侧, 在 $y^+=0.75$ 附近 R^+ 出现较大值区域, 该区域由坝顶向上游发散, 流量增大时, 较大值区域向水面移动, 分布带与水平方向形成约 45° 夹角。2) 二级丁坝坝头处, R^+ 的分布规律与丁坝内侧基本一致。3) 一级丁坝坝头处, 流量较小时, R^+ 较大值区域分布在 $0.4 < y^+ < 0.8$ 范围, 从上游向一级丁坝坝顶 $y^+=0.5$ 收敛; 流量增大后, R^+ 有所增大并在近水面附近出现最大值。4) 丁坝外侧, 流量较小时, R^+ 较大值出现在 $y^+ \leq 0.2$ 范围, 外区 R^+ 随水深的增加而减小; 流量增大后, 水流翻越坝顶加剧了质点混掺, 坝顶上部出现 R^+ 高值条带, 同时内区 R^+ 仍为高值区。



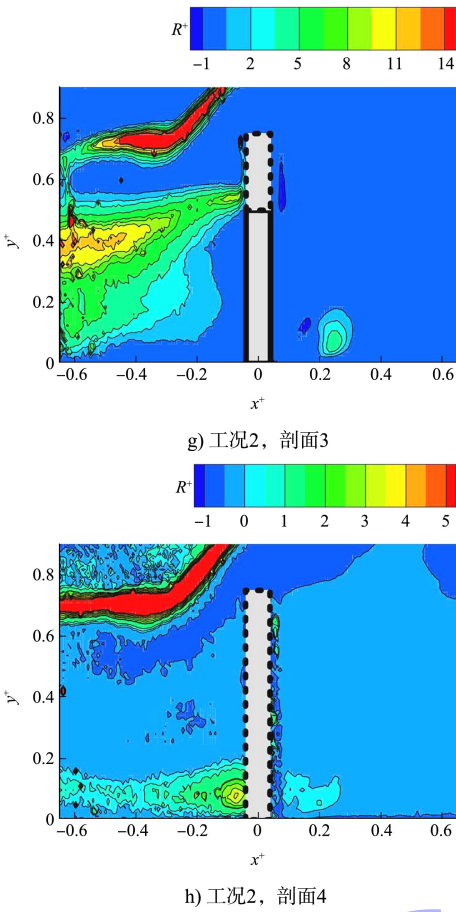


图 8 雷诺应力的沿程变化

2.3.2 雷诺应力的垂线分布

工况 1 为例，阶梯形丁坝各剖面雷诺应力的垂线分布见图 9。试验结果表明：1) 丁坝内侧，上游 1#~3#垂线在流量较小时， $y^+ \leq 0.5$ 范围内的 R^+ 变化很小，此后随着 y^+ 的增大 R^+ 呈先增大后减小的变化趋势，并在二级丁坝坝顶附近 ($y^+ = 0.7$) 取得最大值；流量增大后， R^+ 沿垂线的波动更加明显；下游 4#~6#垂线的 R^+ 沿水深基本不变。2) 二级丁坝坝头， R^+ 的垂线分布与丁坝内侧基本一致。3) 一级丁坝坝头，上游 1#~3#垂线在流量较小时，在 $y^+ \leq 0.4$ 范围内 R^+ 趋于 0， y^+ 增大后， R^+ 曲线沿水深呈“S”形变化， R^+ 最大值出现在一级丁坝和二级丁坝之间；流量增大后，1#~3#垂线 R^+ 沿水深变化加剧，最大值出现在一级丁坝坝顶附近；下游 4#~6#垂线的 R^+ 水深基本保持不变。4) 丁坝外侧，1#~3#垂线 R^+ 在近槽底出现最大值，随着 y^+ 的增大， R^+ 逐渐减小，到一级坝顶趋于 0 左右保持稳定；4#~6#垂线 R^+ 变化很小。

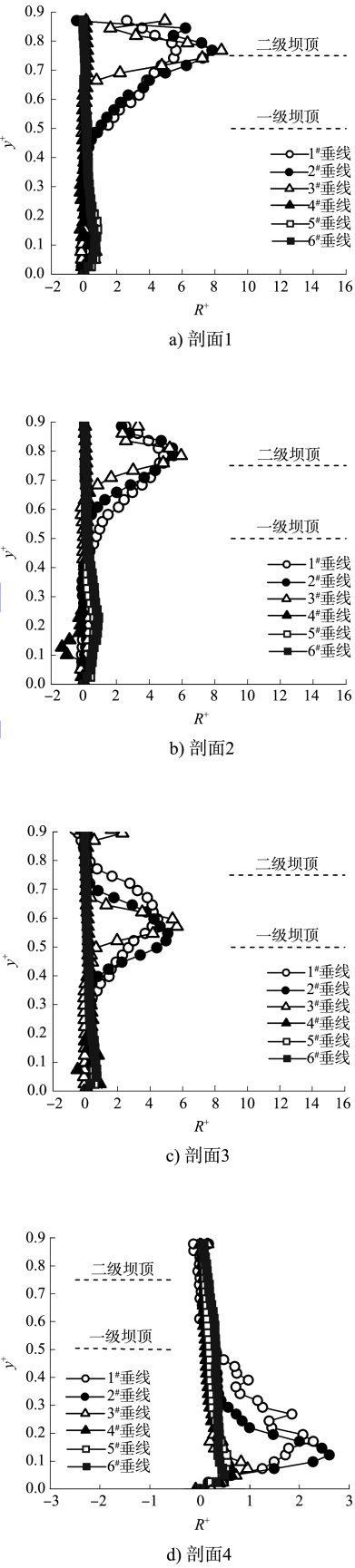
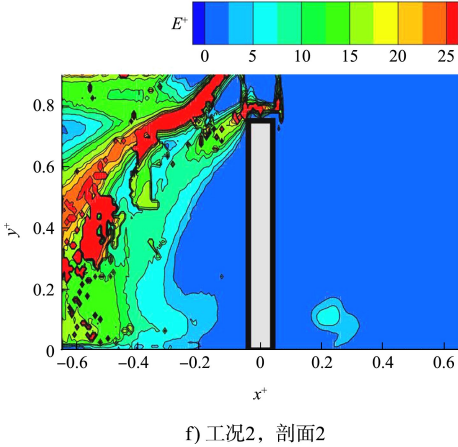
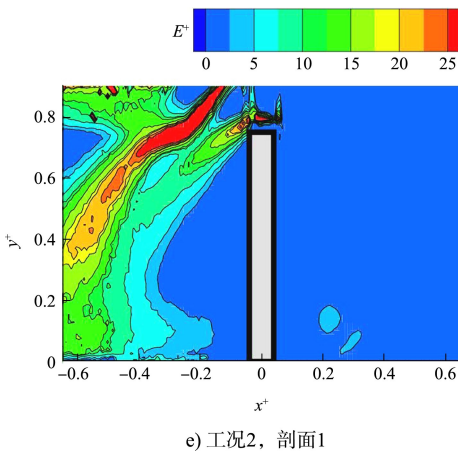
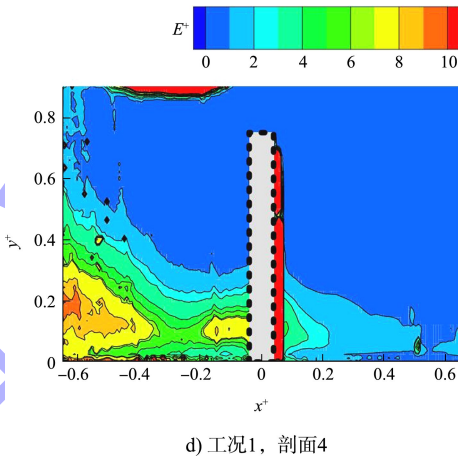
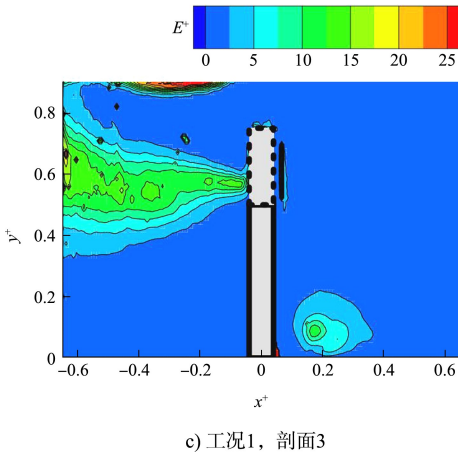
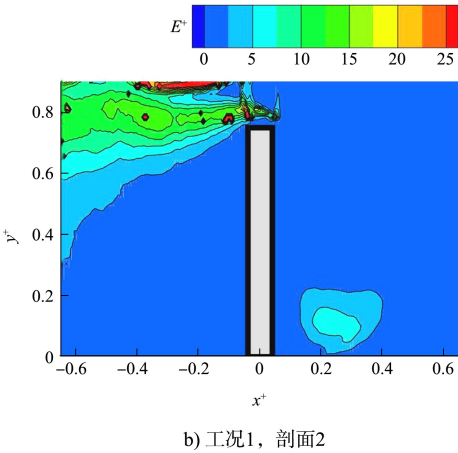
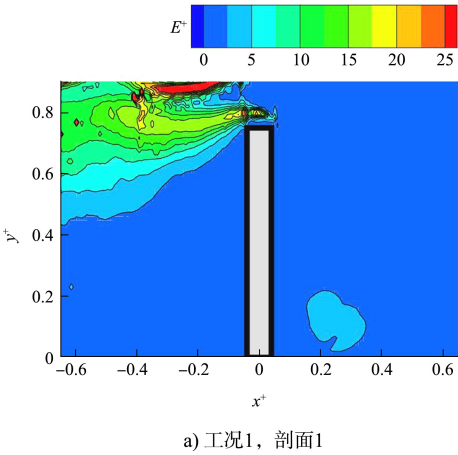


图 9 雷诺应力的垂线分布

2.4 紊动能

2.4.1 紊动能的沿程变化

阶梯形丁坝各剖面紊动能的沿程变化见图 10, 因无量纲化后的 E^+ 较小, 为便于显示, 图中 E^+ 放大了 100 倍。结果表明: 1) 丁坝内侧, 在 $y^+ = 0.75$ 附近 E^+ 出现较大值区域, 该区域由坝顶向上游发散, 流量增大时, 较大值区域带与水平方向形成约 45° 夹角, 下边界接近 $y^+ = 0.6$ 。2) 二级丁坝坝头处, E^+ 的分布规律与丁坝内侧基本一致。3) 一级坝头处, 上游 E^+ 较大值区域的收敛点与丁坝内侧、二级坝头处有所差异, 这主要是各剖面丁坝实际阻水高度不同造成的, 较大值区域的收敛点始终在该剖面实际阻水高度的附近。4) 丁坝外侧, 流量较小时, E^+ 最大值出现在近水面区域, 在上游近槽底附近 E^+ 收敛于丁坝底部; 流量增大后, E^+ 最大值区域向丁坝坝顶靠近, 上游近槽底 E^+ 呈带状分层分布。



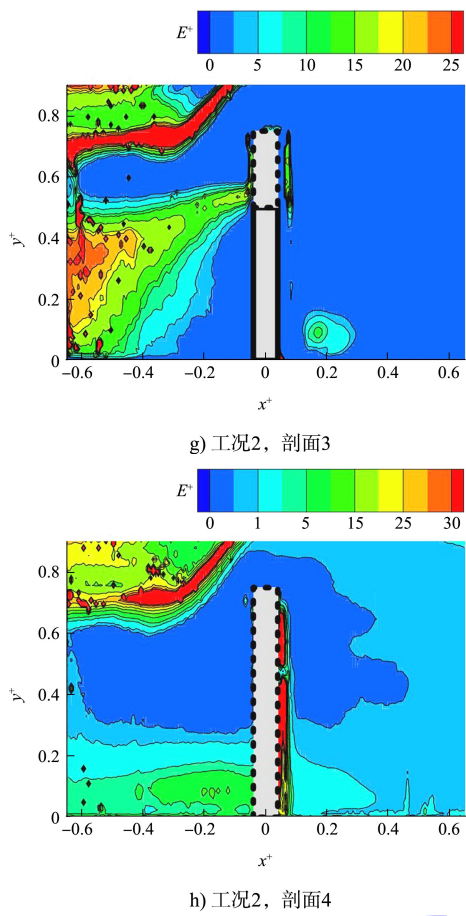


图 10 紊动能的沿程变化

2.4.2 紊动能的垂线分布

以工况 1 为例，阶梯形丁坝各剖面紊动能的垂线分布见图 11。试验结果显示：1) 丁坝内侧，1#~3#垂线 E^+ 沿 y^+ 的增大呈先在近槽底区域保持稳定，然后在 $0.5 < y^+ < 0.8$ 中间区增大后减小，最后在近水面区增大并达到最大值，这是因为近水面区紊动能波动较大，流速存在分层引起的，4#~6#垂线 E^+ 沿相对水深 y^+ 变化比较稳定。2) 丁坝二级坝头和丁坝内侧 E^+ 在沿水深方向有相近的分布规律，4#垂线在近槽底 E^+ 的变化较丁坝内侧更加明显。3) 丁坝一级坝头，1#~3#垂线在流量较小时， E^+ 随相对水深 y^+ 的增大，在近槽底区域保持稳定， $y^+ \geq 0.4$ 后， E^+ 随着相对水深 y^+ 的增大，呈“S”形分布，在一级坝顶附近达到最大值；流量增大后 E^+ 沿水深变化加剧；4#~6#垂线的 E^+ 垂线分布基本保持不变。4) 丁坝外侧，1#~3#垂线和 4#~6#垂线 E^+ 在 $0.5 < y^+ < 0.75$ 区域差异不大，1#~3#垂线在近水面和近槽底 E^+ 出现

最大值，1#垂线 E^+ 最大值约为 3#垂线的 2 倍，说明在丁坝外侧，近槽底、近水面区域水流紊动较为明显。

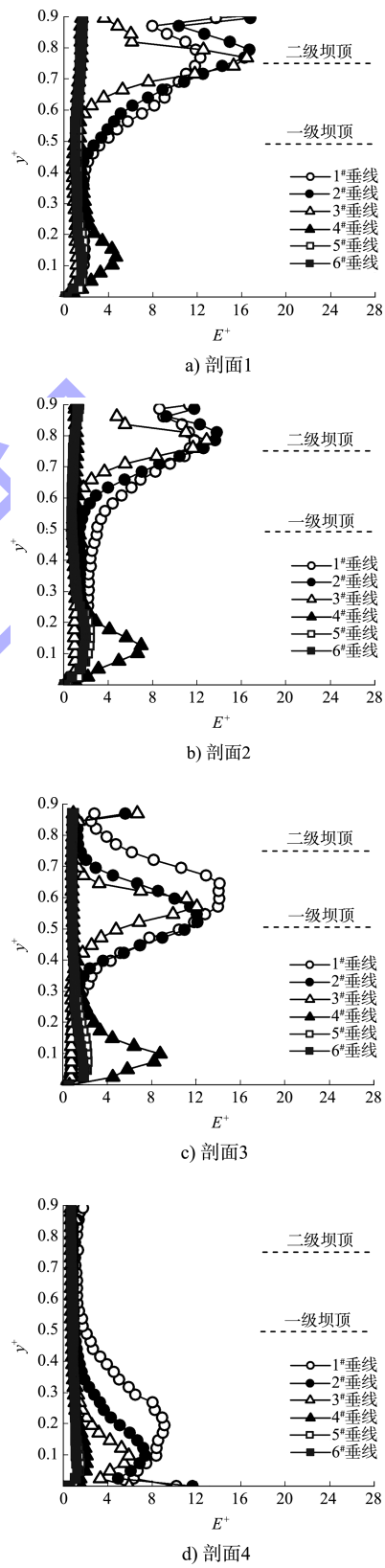


图 11 紊动能的垂线分布

3 结论

1) 丁坝水流在纵剖面上可划分为顺流区、回流区和过渡区, 丁坝内侧至一级丁坝坝头各剖面, 无量纲纵向时均流速 u^+ 的沿程分布规律总体相似, 高速区位于坝顶上部, 低速区和回流区则位居坝顶下部; 丁坝外侧各剖面 u^+ 沿程变化表现为先增大后减小, 高速区出现在坝轴线上游 $0.5b_1$ 附近。丁坝上游各垂线 u^+ 沿相对水深 y^+ 波动明显, 在一级丁坝坝顶 u^+ 分布曲线呈“ \cap ”状, 而下游各垂线 u^+ 沿 y^+ 变化基本接近对数分布。

2) 无量纲纵向紊动强度 T_u^+ 在丁坝内侧和二级坝头处有相似的变化规律, 流量较小时坝顶上部存在接近水平带状的 T_u^+ 高值区, 流量增大后 T_u^+ 高值区与水平方向呈约 45° 夹角, 丁坝外侧坝顶上游出现 T_u^+ 最大值; 受水流翻越坝顶影响, 丁坝上游各垂线的 T_u^+ 随 y^+ 变化明显, 而下游各垂线的 T_u^+ 变化则相对平缓。

3) 丁坝内侧和二级坝头处的无量纲雷诺应力 R^+ 沿程分布规律相似, R^+ 高值区位于坝顶附近且呈带状, 丁坝外侧坝顶上部出现 R^+ 高值条带; 流量较小时, R^+ 沿 y^+ 的垂线变化相对平缓, 坝顶附近 R^+ 分布曲线呈“S”形, 流量增大后丁坝上游 R^+ 变化明显加剧。

4) 无量纲紊动能 E^+ 高值区由坝顶向水槽底部和水面扩散呈三角状, 且 E^+ 随流量的增加而增大; 丁坝下游各垂线的 E^+ 沿水深变化很小, 而上游各垂线的 E^+ 沿水深变化明显, 流量较小时坝顶附近 E^+ 出现“S”形分布。

参考文献:

[1] 钟亮, 孙建云, 刘珺洁, 等. 阶梯形丁坝下游回流规律分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 9-17.

[2] 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.

[3] 李冰冻, 李嘉, 李克锋. 丁坝水流的水槽试验及数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(2): 176-183.

[4] 蔡喆伟, 夏云峰, 徐华, 等. 深水航道整治中新型结构淹没丁坝水流力特性研究[J]. 水利水运工程学报,

2018(3): 16-23.

[5] 张岩, 吴伊平, 崔鹏义, 等. 丁坝长度对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 164-170.

[6] 陈稚聪, 黑鹏飞, 丁翔. 丁坝回流区水流紊动强度试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2053-2056.

[7] 张可, 王平义, 喻涛. 不同坝型丁坝坝体周围水流紊动特性试验研究[J]. 水运工程, 2012(7): 1-7.

[8] 郑宇华, 郑健, 顾杰, 等. 不同水力坡度对丁坝近区水流的影响[J]. 海洋科学, 2019, 43(3): 66-74.

[9] 郭维东, 周阳, 梁岳, 等. 丁坝对弯道水流紊动强度影响的试验研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(5): 70-72.

[10] DUAN J G. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike[J]. Journal of hydraulic engineering, 2009, 135(10): 803-811.

[11] JEON J, LEE J Y, KANG S. Experimental investigation of Three-Dimensional flow structure and turbulent flow mechanisms around a nonsubmerged spur dike with a low length-to-depth ratio[J]. Water resources research, 2018, 54(5): 3030-3056.

[12] KUMAR A, OJHA C S P. Effect of different compositions in unsubmerged l-head groynes to mean and turbulent flow characteristics[J]. KSCE journal of civil engineering, 2019, 23(10): 4327-4338.

[13] 崔占峰, 张小峰. 三维紊流模型在丁坝中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(1): 15-20.

[14] 欧阳澍, 刘成林, 程永舟, 等. 透空潜坝附近水流特性的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 109-118.

[15] 方强, 黄赛花, 王继保, 等. 坝头形式对丁坝附近水流结构的影响分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 7-11.

[16] 钟亮, 王振志, 王舒, 等. 非淹没复式断面丁坝区的流速分布规律[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 60-66.

[17] 丁晶晶, 陆彦, 陆永军. 台阶式丁坝水动力特性及防冲效应[J]. 水利水运工程学报, 2014(5): 67-74.

[18] 戚福清, 顾杰, 董伟. 阶梯式丁坝群水流结构的试验研究[C]//吴有生, 邵雪明, 王军. 第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2019: 512-521.

[19] 廖尚超. 阶梯形丁坝水流结构的 PIV 试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020. (本文编辑 王璁)