

· 综 合 ·



# 不同坝型丁坝坝体周围水流紊动特性试验研究\*

张可, 王平义, 喻涛

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 通过水槽试验, 结合理论分析, 研究丁坝附近水流紊动强度沿水流方向、水深方向和横向的分布规律。绘制5种不同坝体结构形式其周围水流脉动动能和紊动强度的分布等值线图并分析分布规律, 进一步探讨不同坝体挑角对丁坝附近水流紊动强度和脉动动能的影响。

**关键词:** 紊动强度; 丁坝; 水流; 紊动动能; 结构形式

中图分类号: TV 142

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0001-07

## Experimental study on surrounding flow turbulence of different types of spur dikes

ZHANG Ke, WANG Ping-yi, YU Tao

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** This paper studies the distribution laws of flow intensity along the flow direction, the depth direction and the transverse direction based on the flume experiments and theoretical analysis, drafting the contour maps of the flow turbulence intensity and turbulent kinetic energy of the five different types of dam structures and distribution laws. Furthermore, the effect of different dam angles on the flow turbulence intensity and turbulent kinetic energy is also explored.

**Key words:** turbulence intensity; spur dike; flow; turbulent kinetic energy; dam structure

丁坝对水流有明显的扰动影响, 局部水流产生漩涡和分离, 坝头和坝顶区域的水流都将出现分离和旋转<sup>[1-2]</sup>。因此, 丁坝附近的局部流态非常复杂, 呈现出强烈的三维紊流特性, 其中包含了许多复杂的水流现象, 如分离流、旋转流、曲线剪切层、高紊动强度以及自由表面变化等。所以, 研究丁坝附近水流的紊动是非常重要的。现阶段, 高桂景、王平义等<sup>[3]</sup>结合试验对丁坝坝体周围水流动能进行了研究分析, 并对不同流量、坝长和水深对丁坝坝体周围水流动能的影响做了对比。但是, 没有对不同的坝体结构形式的丁坝

坝体周围水流紊动强度进行对比研究, 特别是尚未开展三维紊动特性的实验观测研究, 所以本实验, 对三维紊动强度沿程变化趋势沿水深、沿横向和沿纵向分别进行了分析, 并且对比分析研究了不同挑角和不同坝体结构形式下丁坝附近水流的纵向紊动强度。

### 1 试验方案

试验在重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心航道试验厅30 m长、2 m宽的矩形玻璃水槽中进行丁坝正态概化模型试验。进口流量

收稿日期: 2011-12-20

\*基金项目: 国家自然科学基金(51079165); 西部交通建设科技项目(2009328814012); 重庆交通大学省部共建水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2010B06)

作者简介: 张可(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

由DCMS流量控制系统控制，坝前控制水位通过水位测针控制，实时水位通过超声自动水位测量系统量测，流速采用先进的Horizon ADV三维流速测量系统进行测量，系统设定采样频率为30 Hz，采用脉冲采样方法，每个点采样时长为30 s。

丁坝布置在水槽左岸，丁坝坝体为水泥砂浆浆砌坝体。丁坝坝身横断面分为梯形断面和圆弧断面（图1），迎水坡坡度为1：1.5，背水坡坡度为1：2，坝头向河坡为1：3，坡面采用圆弧形，坝顶宽7.5 cm，坝身高10 cm。坝长采用50 cm和70 cm，控制水深为刚好淹没11 cm、淹没14 cm和洪水淹没17 cm，流量控制为65 L/s、95 L/s和135 L/s。坝体挑角控制为正挑90°和下挑120°。坝头结构形式分为圆弧头和扇形头两种，并区分坝头为直头还是勾头。对以上5种控制因素进行组合，共得到52种工况。在丁坝附近布置13个测试横断面，每个横断面根据位置不同分别布置7~17个测点，每个测点采用3点法（0.2h、0.6h、0.8h）采样流速数据（图2）。丁坝及观测断面布置如图3所示。

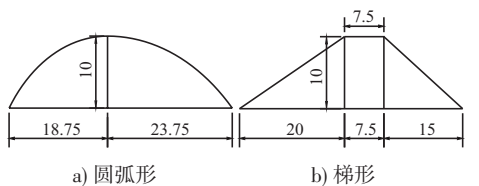


图1 2种丁坝坝身断面

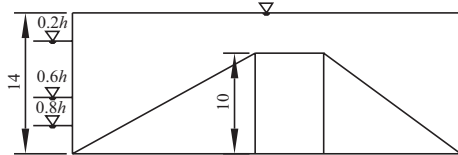


图2 相对水深示意

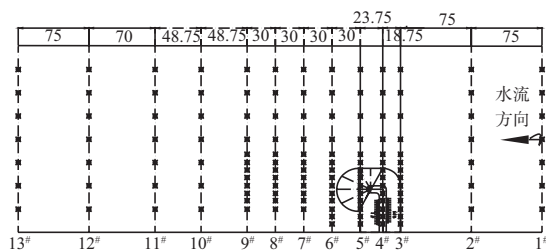


图3 丁坝及观测断面布置

相对水深在本实验中定义为，0.2h水深为从水面往下到0.2倍水深的点，依此类推得到0.6h水深和0.8h水深。

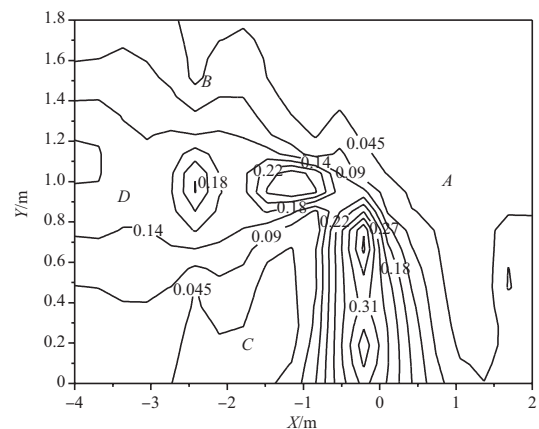
## 2 水流紊动能的分布

水流的紊动能为  $E = \frac{1}{2}(\overline{v_u^2} + \overline{v_v^2} + \overline{v_w^2})$ ，用进口段平均流速  $v_0$  对紊动能进行无量纲化，得到水流紊动能的无量纲形式  $\frac{E}{v_0}$ ，以此来分析水流紊动能的变化。表1为不同坝型水流紊动能变化研究选用工况。

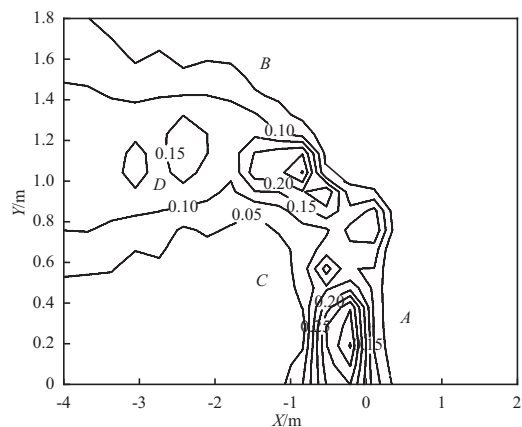
表1 选用工况

工况	结构形式
5	50 cm正挑梯形断面圆弧勾头
26	70 cm正挑梯形断面圆弧直头
29	70 cm正挑梯形断面圆弧勾头
32	70 cm正挑梯形断面扇形直头
35	70 cm正挑梯形断面扇形勾头
50	70 cm正挑圆弧断面直头

研究紊动能随流量的变化关系，选取工况26，工况29，工况35和工况50进行对比，流量取  $Q=95 \text{ L/s}$ ，0.8h时丁坝周围紊动能等值线图的分布情况如图4所示。



a) 工况26 (70 cm 正挑梯形断面圆弧直头)



b) 工况35 (70 cm 正挑梯形断面扇形勾头)

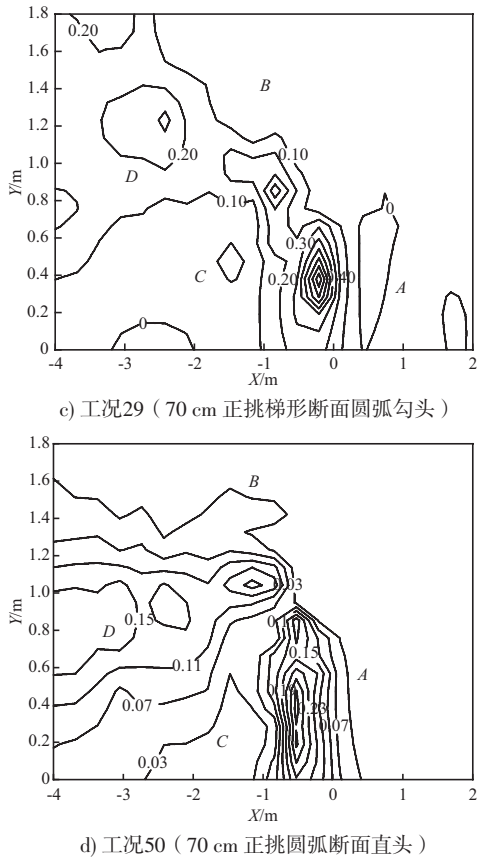


图4 不同坝型时紊动能等值线

总体来看,在坝头下游附近紊动等值线较密,且其值较大,最大值出现在坝头前一段距离,在坝头附近紊动变化较大,在坝身背水坡也有一较大值出现。坝头附近紊动能值最大为工况26,最小为工况50,工况29和工况35处于中间;从坝头结构形式看,勾头丁坝紊动能等值线密集区离坝头较近,直头丁坝紊动能等值线密集区离坝头较远,且扇形丁坝紊动能最大值较圆弧形大;直头丁坝强紊动区(D区)分布范围较直头丁坝大,紊动能密集区主要靠近丁坝右岸,且扇形勾头丁坝强紊动区(D区)分布范围较圆弧头大,紊动能变化较大的密集区主要在坝头附近;从坝体结构形式看,圆弧断面直头丁坝强紊动区(D区)分布范围较梯形断面小,且紊动能等值线较梯形断面稀疏,但坝身背水坡紊动能等值线较梯形断面大,这是由于圆弧断面坝身较光滑,下潜流速较梯形断面大,紊动较强。

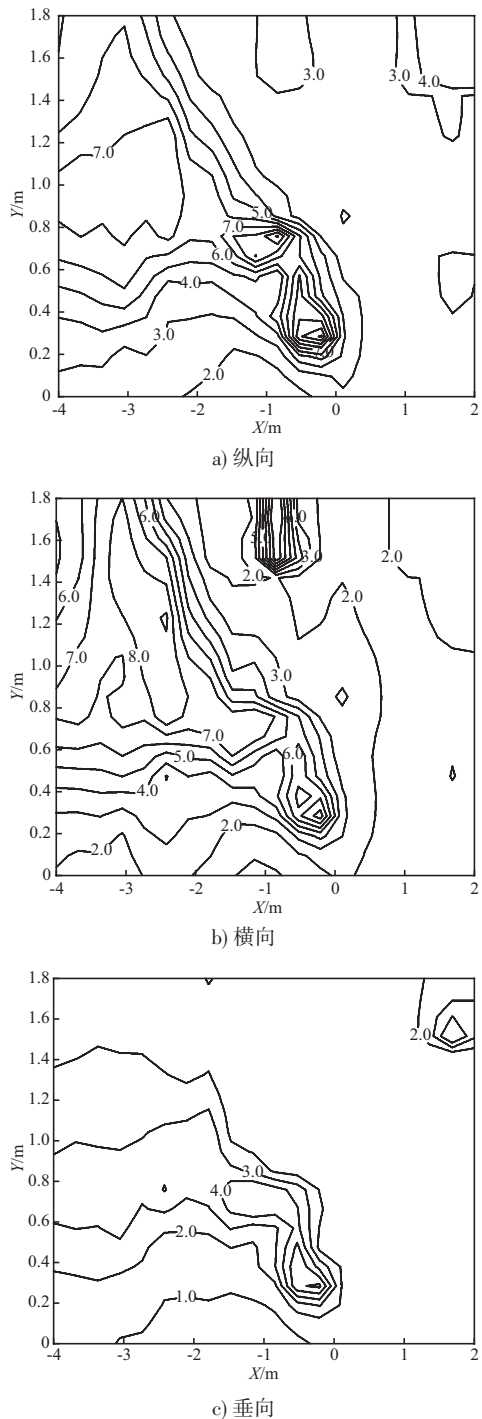
3 水流紊动强度在整个测区的分布

试验在前人研究丁坝附近水流结构的基础

上,主要研究和分析了不同坝体结构形式下丁坝附近水流的纵向紊动强度。且对同一工况下,不同方向上的三维紊动强度值在整个测区的分布做了分析对比。

3.1 三维紊动强度在整个测区的变化

选取工况5,3个方向上0.8h处水流的纵向紊动强度如图5所示。



注:工况5 70 cm 正挑梯形断面圆弧勾头。

图5 紊动强度分布等值线

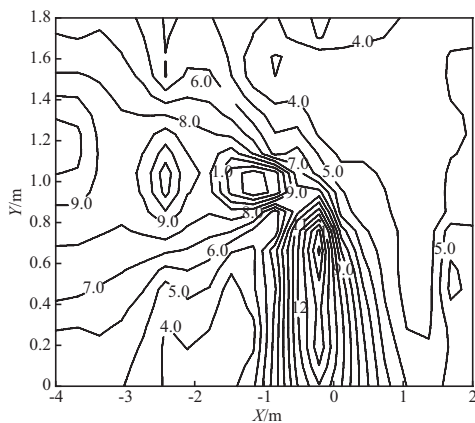
可见，整体上，3个方向上的紊动强度在整个测区的分布有相同之处。首先是，紊动强度值较大和比较集中的区域都主要分布在坝身周围和坝头下游区域。其他区域的分布情况为强度较小。从纵向紊动强度等值线图 and 横向紊动等值线图可以看出，由于丁坝挡水，造成坝前壅水和坝前水流绕行，到坝顶断面开始产生跌水，水位下降，纵向流速和横向流速都增大，以及坝头挑流的作用，所以在整个测区的0~3 m区域，坝头和右岸收缩段的纵向紊动强度和横向紊动强度都较大，而坝后左岸位于回流区，纵向和横向流速小，紊动强度也较小。而垂向的紊动强度在坝前分布较少，主要产生在坝轴线断面，也就是跌水产生的地方。且在坝后区域在左岸回流区分布较广，而在右岸收缩段分布较小。

### 3.2 坝型不同时紊动强度变化

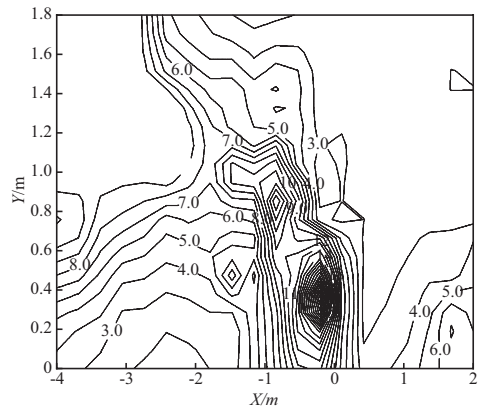
选取流量为95 L/s，控制水深为14 cm时  $L=70\text{ cm}$  的丁坝，分析工况26（梯形断面圆弧形直头）、工况29（梯形断面圆弧形勾头）、工况32（梯形断面扇形直头）、工况35（梯形断面扇形勾头）和工况50（圆弧断面圆弧形直头），进行5个不同坝型 $0.8h$ 水流纵向紊动强度对比分析（图6）。

可见，对于5种不同坝体结构形式的工况，在流量、水深、坝长和挑角都相同的情况下， $0.8h$ 纵向紊动强度在整个测区的分布情况，相同之处在于，5种工况，其各自的强紊动区域分布都位于坝身和坝体背水坡以及坝头下游区域。

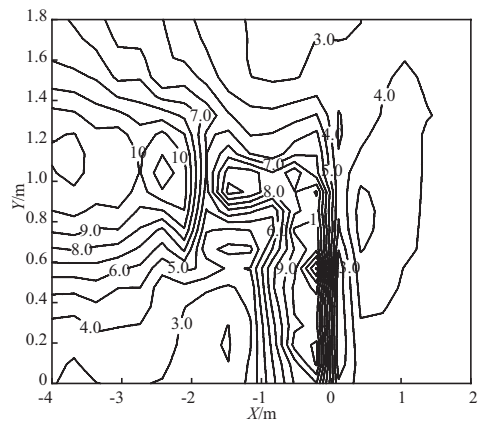
从各个工况之间来看，工况29的坝身和坝头附近紊动强度值较大，其他4个基本相同。而工



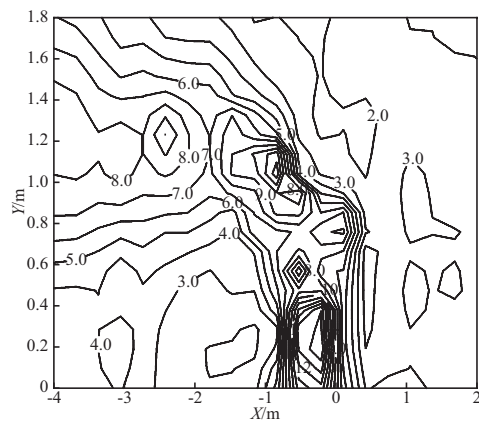
a) 工况26 (70 cm正挑梯形断面圆弧形直头)



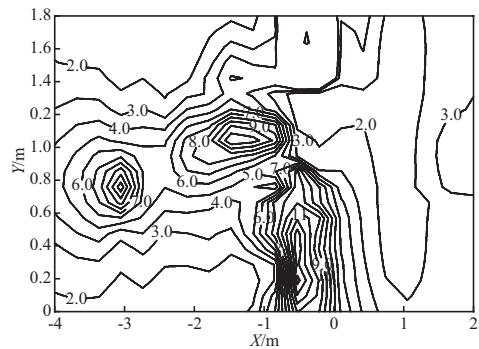
b) 工况29 (70 cm正挑梯形断面圆弧勾头)



c) 工况32 (70 cm正挑梯形断面扇形直头)



d) 工况35 (70 cm正挑梯形断面扇形勾头)



e) 工况50 (70 cm正挑圆弧断面直头)

图6 坝型不同时紊动强度分布

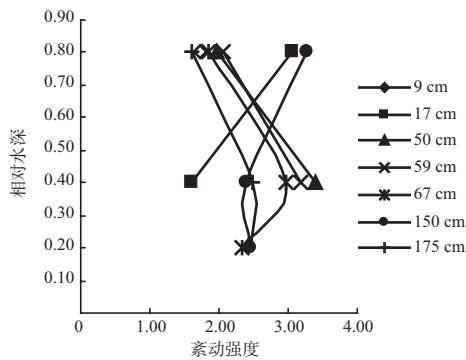
况50对坝前和坝后收缩段的影响较小, 工况50这些区域紊动强度值较小, 且区域范围较小。而扇形头的工况32和工况35由于其坝头挑流作用最明显, 这2个工况对下游收缩段的影响比较大。工况26和工况29的影响介于这2种之间。在坝后回流区, 由于5种工况都是70 cm长的丁坝, 其坝后回流区强紊动区域范围相差不多, 但是直头坝的区域较大且紊动强度值稍大, 勾头坝稍小, 最小的为圆弧断面坝。

### 3.3 紊动强度沿程变化趋势

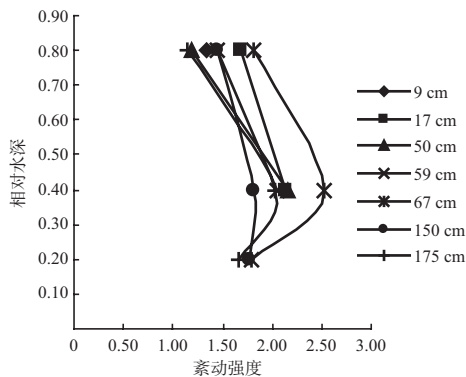
#### 3.3.1 三维紊动强度随水深的变化

选取工况5丁坝横断面3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>和7<sup>#</sup>断面(图3), 给出横向断面上所有测点的三维紊动强度沿垂线方向的分布, 水槽水流的三维紊动强度沿程的分布如图7所示。

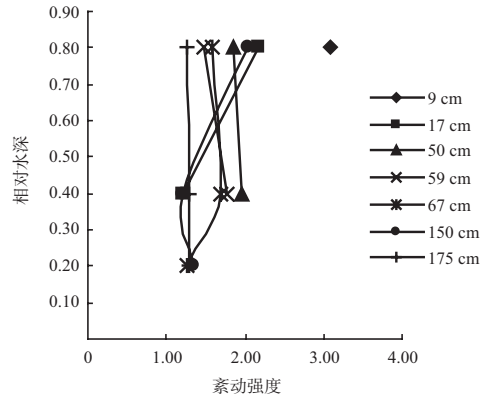
可见, 工况5丁坝的3<sup>#</sup>断面位于丁坝上游, 3个方向上水流的紊动强度基本上越靠近水槽底部就越大, 并且各个测点上增大的幅度不一样, 靠近丁坝左岸各测点紊动强度较大, 且增幅较大, 3<sup>#</sup>断面刚好位于丁坝迎水坡前沿, 在坝头附近几个点的紊动强度相对较小, 但是随水深的增幅较



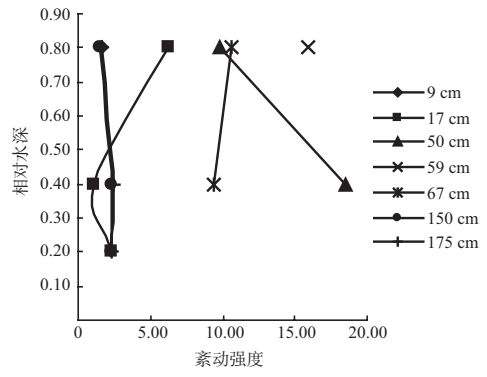
a) 3<sup>#</sup>断面纵向紊动强度



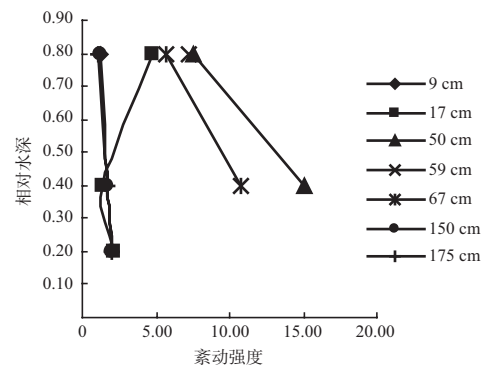
b) 3<sup>#</sup>断面横向紊动强度



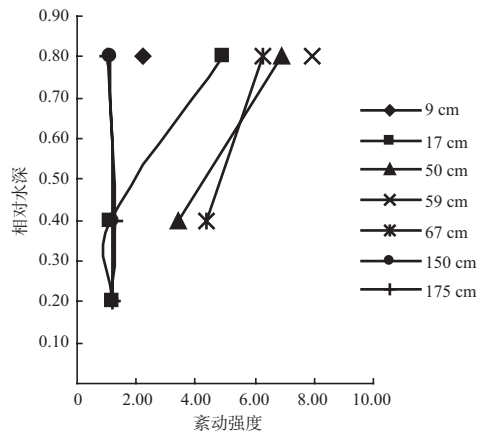
c) 3<sup>#</sup>断面垂向紊动强度



d) 5<sup>#</sup>断面纵向紊动强度



e) 5<sup>#</sup>断面横向紊动强度



f) 5<sup>#</sup>断面垂向紊动强度



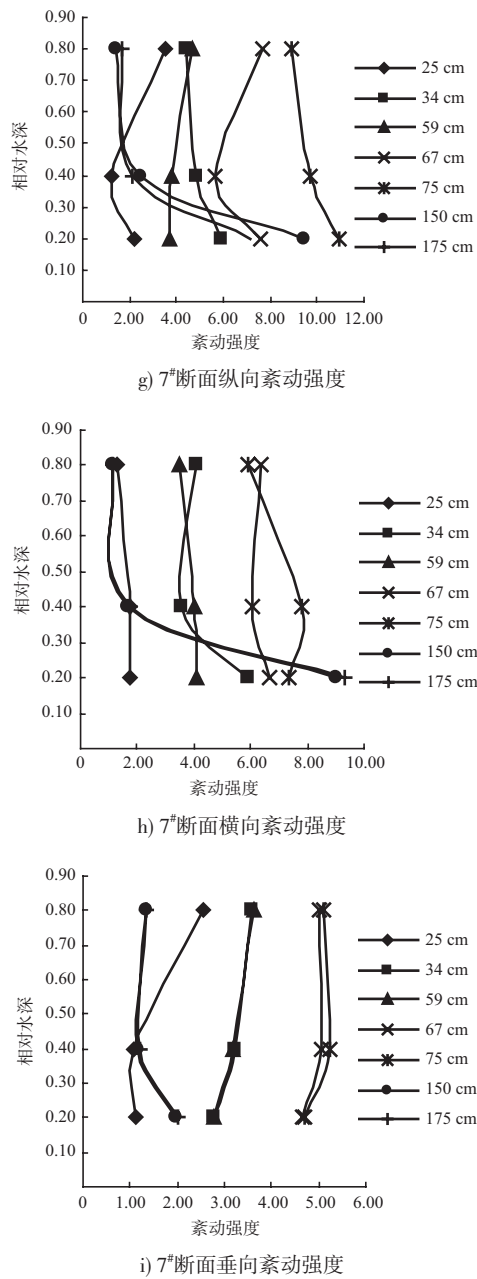


图7 三维平均紊动强度沿水深方向的分布

大。丁坝左岸回流区各测点紊动强度较其他两个区域较小，且增幅也较小。位于丁坝迎水坡的5#断面，其3个方向上水流的紊动强度在丁坝坝头和左岸较紊乱，规律不明显，有些随水深增大而增大，另一些随水深增大而减小，且趋势不一。这是因为5#断面左岸位于丁坝坝后跌水区 and 回流区交界的地方，整个流态很紊乱且不稳定，变化较大。再靠后一点位于下游回流区的7#断面，其3个方向上的水流紊动强度分布呈在左岸和坝头区域，随水深的增大，从面流到中间层的水流，其

紊动强度减小，再到底流，紊动强度又增大的规律。在右岸，紊动强度较左岸和坝头区域较小，但是随水深增大幅度很大。

### 3.3.2 三维紊动强度沿横向的变化

选取工况5（50 cm正挑梯形断面圆弧勾头） $L=70\text{ cm}$ ， $Q=95\text{ L/s}$ ，选取3#、5#和7#断面（图3）绘制三维平均紊动强度沿横向的分布，如图8所示。

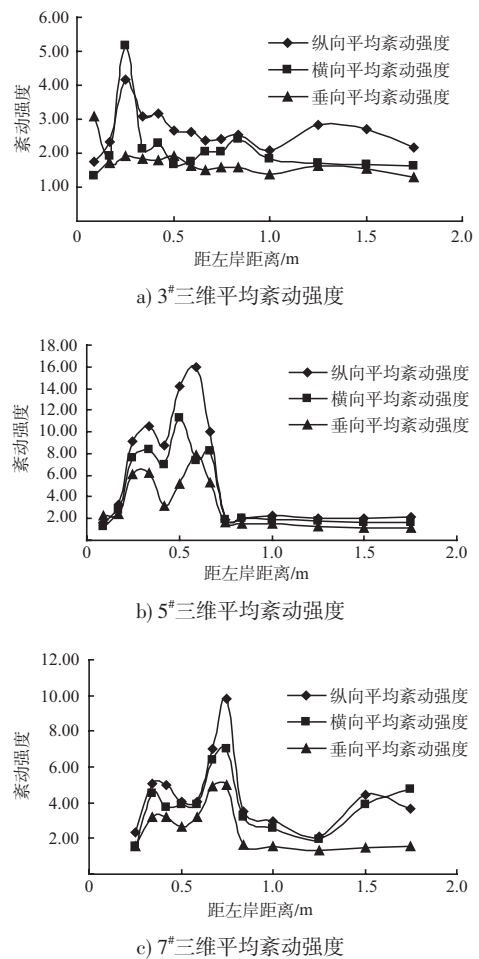


图8 三维平均紊动强度沿横向的分布

可见，位于丁坝上游的3#断面，3个方向上的紊动强度基本都呈现出在左岸较大，到坝头处较小，再到右岸又略有增大的规律。且在左岸最大，坝头位置处最小。从位于坝后跌水区 and 回流区交界处的5#断面来看，3个方向上紊动强度分布规律基本一致，在左岸起始点都较小，随着向坝头靠近，紊动强度越来越大，到坝头处又急速减小，到再靠近右岸，分布区域均匀，变化不大。完全处于坝后回流区的7#断面，其3个方向上的紊动强度从起始点开始较小，随着距离向水槽中部

靠拢,3个方向上的紊动强度都增大,在坝头位置处急速减小。而纵向和横向的紊动强度在从坝头小值向右岸靠拢的过程中,又略有增大,而垂向紊动强度从坝头到右岸基本分布均匀,变化很小。

### 3.3.3 三维紊动强度沿纵向的变化

选取工况5(50 cm正挑梯形断面圆弧勾头) $L=70$  cm, $Q=95$  L/s,点绘三维平均紊动强度沿纵向的分布,如图9所示。

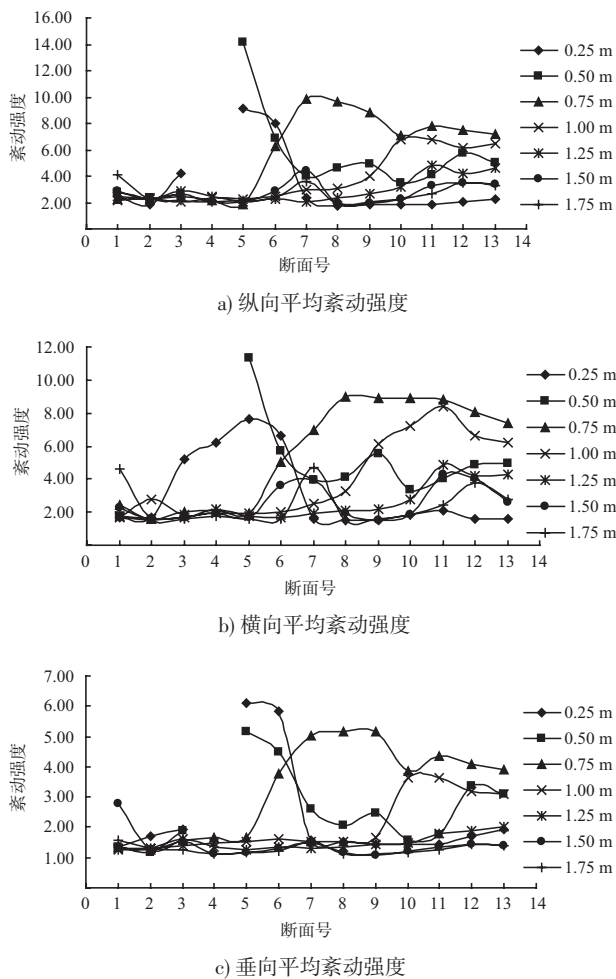


图9 三维紊动强度沿纵向的分布

可见,3个方向上的紊动强度在坝前断面都较小,在靠近坝身前略有波动,但是变化不大。在靠近坝轴线断面之后,开始剧烈波动,增大幅度较大。到坝后回流区,3个方向上的紊动强度在

4#~7#断面增大到最大值,过了7#断面之后开始下降,再到下游11#断面处又略有回升。从坝后所有断面来看,3个方向上的紊动强度平均值较大,但波动也较大,呈明显的陡涨陡落规律。而从横向断面上来看,由于左岸是回流区,流态紊乱,水流结构复杂,各个方向上的流速变化较大,所以0.25 m,0.50 m,0.75 m和1.00 m处的3个方向上的紊动强度值较大且波动幅度也更大。右岸流态相对稳定,所以紊动强度值较小且波动幅度也较小。

## 4 结论

紊动强度值较大和比较集中的区域都主要分布在坝身周围和坝头下游区域。其他区域存在强度较小和区域较小的分布情况。沿水深方向,基本上水深越深,紊动强度就越大。沿横断面上,水槽左岸较右岸较大,水槽中部较大位置处于坝头后挑流带。沿程变化,在坝身位置、坝后回流区和坝头后挑流区域较大。

得到丁坝坝体周围水流紊动强度的影响因素。坝长越长,水流流线与丁坝坝轴线交角越接近 $90^\circ$ ,坝体结构形式造成的丁坝挡水作用越明显,导致坝头和坝身附近跌水越大,坝后回流区流态越紊乱,则这些区域紊动强度就越大。相应地,在这些区域的冲刷也会较其他区域严重。

## 参考文献:

- [1] 王平义,程昌华,荣学文,等. 航道整治建筑物水毁理论及模拟技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社,1992.
- [3] 张可. 长江上游航道整治建筑物水毁及检测修复技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [4] 高桂景,王平义,杨成渝,等. 丁坝附近水流动能分布研究. 水运工程,2007(11):75-79.
- [5] 卢金友,徐海涛,姚仕明. 天然河道水流紊动特性分析[J]. 水利学报,2005,36(9):1029-1034.

(本文编辑 郭雪珍)