



# 长江中游界牌河段丁坝周围水流特性试验研究

辛玮琰, 刘晓菲, 刘鹏飞, 程小兵

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 为探求界牌河段丁坝周围水流特性, 明晰丁坝周围水流特性与坝头损毁之间的关系, 采用清水定床、正态模型试验方法研究长江界牌河段丁坝周围水流结构特点, 详细分析流量条件对界牌7#丁坝周围断面测点的流速最大区域及紊动强度最大区域分布的影响, 重点分析坝头周围测点三维流速数据。结果表明, 从x、z向流速和紊动强度的角度考虑, 坎体中部及下游侧是易损区域; 随着坝头流速的增大, 下潜水流、坝头涡旋系、单宽流量分别成为影响坝头损毁的主因。

**关键词:** 界牌河段; 丁坝; 水流特性; 试验研究

中图分类号: U 617; TV 143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0107-07

## Experiment on characteristics of flow around spur dike in Jiepai reach of middle reaches of the Yangtze River

XIN Wei-yan, LIU Xiao-fei, LIU Peng-fei, CHENG Xiao-bing

(Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics of flow around the spur dike in Jiepai reach and clarify the relationship between the flow characteristics and the damaged dike head, this paper, under clear water and fixed bed conditions, uses the normal model to study the characteristics of flow around the spur dike in Jiepai reach of the Yangtze River and analyzes the influence of flow conditions on distributions of areas with the maximum velocity and maximum turbulence intensity from measured sections around the spur dike in Jiepai reach, especially the three-dimensional velocity data measured around dike head. The results show that the middle and lower parts of the dike are vulnerable areas from perspectives of velocity and turbulence intensity in x and z directions. As the velocity in the dike head increases, the submerged flow, dike head vortex system, and unit discharge are the main factors damaging the dike head.

**Keywords:** Jiepai reach; spur dike; flow characteristics; experimental study

丁坝是长江中游坝体类建筑物中常用的类型<sup>[1]</sup>, 其在航道整治过程中主要用于固滩导流、束水归槽, 控制航槽摆动。航道整治建筑物服役期间经常出现水毁的情况, 这是水流与建筑物、床面之间相互作用的结果, 故了解整治建筑物周围水流运动规律是研究其损毁机理的重要基础。关于丁坝挡水致其周围产生的复杂水流流态, 以

往学者多关注紊流<sup>[2]</sup>、回流尺度<sup>[3-6]</sup>、局部冲刷深度<sup>[7-11]</sup>、受力<sup>[12-14]</sup>等的计算。近年来, 相关研究仍在不断深入, 一些学者<sup>[15-17]</sup>研究不同坝型丁坝坝体周围水流特性, 还有一些研究<sup>[18-19]</sup>关注坝体尺寸、位置和水力坡度等因素对于水流特性的影响。

目前丁坝周围水流结构的研究多关注于建筑物影响下的水流结构本身特点, 少有将其落实于

精确划定丁坝易损区域的研究,且对于坝头损毁原因也未有定论。本文将在前人研究的基础上,选择河段内丁坝数量多且其中多处有损毁和维修记录的界牌河段内的丁坝作为研究对象,研究建筑物周围水流结构特点,从三维流速和紊动强度的角度,总结坝身在设计建造和运行使用过程中须被重点关注的区域,明晰坝头附近河床局部冲刷的主因,可为深入认识丁坝周围水流特性和建筑物损毁修复提供帮助。

## 1 试验设计思路

为了解界牌河段丁坝周围水流结构特点,将开展定床、正态丁坝水流特性模型试验。以流速

为控制条件,保持水深不变,研究不同流量条件下丁坝周围三维流速和紊动强度特点,概括总结随着流量增加,流速和紊动强度分布区移动规律,分析坝头损毁的主要原因。

## 2 界牌河段丁坝周围水流特性试验方案

基于对已有丁坝损毁机理和修复措施的认识,本文以界牌河段作为依托河段,统计界牌河段维修过的丁坝数据,选取代表丁坝作为原型进行试验模拟,进一步研究丁坝损毁机理和修复措施。

将界牌河段有过维修记录的(截至 2020 年)典型丁坝工程作为模型丁坝结构设计的参考依据,丁坝特征值见表 1。

表 1 界牌河段丁坝特征值

建筑物	坝长/m	坝顶宽/m	上游坡比	下游坡比	坝头向河心坡比	河宽/m	坝长与河宽之比
6#丁坝	678	3	1:1.5	1:2	1:5	1 473	0.46
7#丁坝	506	3	1:1.5	1:2	1:5	956	0.53
8#丁坝	446	3	1:1.5	1:2	1:5	700	0.64
9#丁坝	454	3	1:1.5	1:2	—	754	0.60
10#丁坝	544	3	1:1.5	1:2	—	990	0.55
11#丁坝	582	3	1:1.5	1:2	—	1 287	0.45
12#丁坝	502	3	1:1.5	1:2	—	1 221	0.41
均值	530	3	1:1.5	1:2	—	1 054	0.52

综合以上丁坝特征数据,可计算坝长与河宽比值,该比值反映了丁坝束窄河道断面和改变周围水流条件的程度,选择与该比值均值最接近的7#丁坝为原型进行模拟。

### 2.1 模型各项比尺的确定

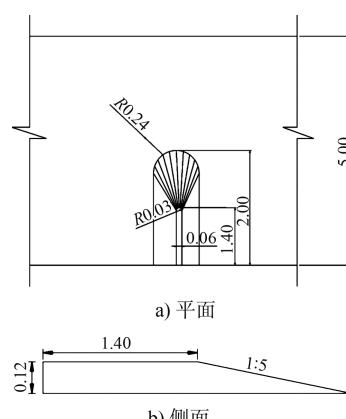
#### 2.1.1 几何比尺

考虑模型范围、试验场地及模型进出水系统等实际情况,概化水槽的尺寸设计为 25 m×5 m×0.7 m(长×宽×高),模型设计为正态,几何比尺  $\lambda_L$  为 1:50,模拟实际丁坝从坝头向坝根方向 100 m 范围内丁坝周围水流结构。模型丁坝坝长设计为  $L_M = 2$  m,其他尺寸见表 2。

表 2 比尺 1:50 模型丁坝与原型的几何尺寸

丁坝类型	坝顶宽/m	坝高/m	坝长/m	面层厚度/m	块石粒径/m
原型	3.00	6.00	100	0.800	0.36~0.60
模型	0.06	0.12	2	0.016	0.01

根据《航道整治工程技术规范》<sup>[20]</sup>和界牌 7#丁坝的结构形式,丁坝坝体采用堆石坝,丁坝横断面采用梯形断面,迎水坡坡度为 1:1.5,背水坡坡度为 1:2,向河坡为 1:5,坡面采用圆弧形,坝顶宽 0.1 cm,坝高 0.30 m。参考界牌河段 7#丁坝附近的地形情况,断面坡度设计为  $J_M = 0.06$ ,模型丁坝布置见图 1。



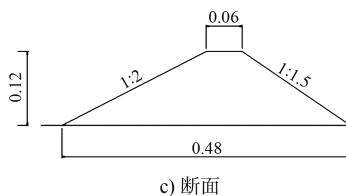


图1 坝体布置 (单位: m)

### 2.1.2 水流比尺

为保证模型水流运动相似, 应采用流速比尺  $\lambda_v = 7.07$ , 流量比尺  $\lambda_Q = 17677.67$ , 时间比尺  $\lambda_t = 7.07$ 。

取原型断面平均流速分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 m/s, 由流速比尺可计算出相应于模型上的流速。假设试验水深为 0.14 m(全淹, 比坝高稍高), 则可计算出试验所用 5 级流量为 127.8、253.8、381.6、509.4、763.2 m<sup>3</sup>/h。

### 2.2 定床试验设计

#### 2.2.1 试验方案

试验水深设计为 0.14 m, 采用计算出的 5 级流量设置为工况 1~5。

#### 2.2.2 观测内容

试验过程中测量各工况下坝体以及坝头周围测点的三维流速。测点布置见图 2, 由于坝根处水深较小, 测点位置尽量覆盖每个测点的 0.2、0.6、0.8 倍垂直水深处。

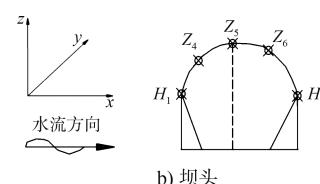
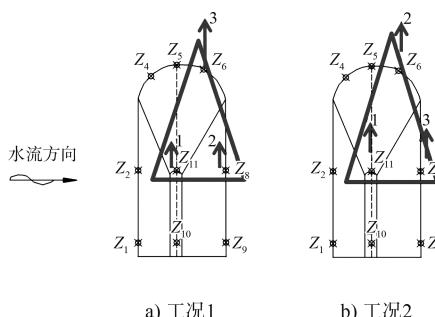
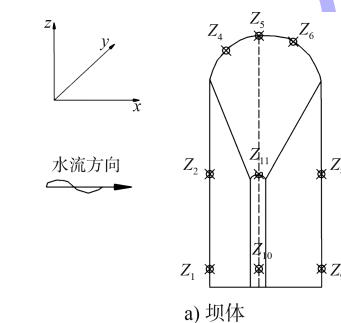


图2 测点布置及三维流速方向

#### 2.2.3 测量仪器

本试验采用声学多普勒三维点式流速仪(ADV)进行逐点测量, 采样频率为 200 Hz, 采样时间为 30 s。

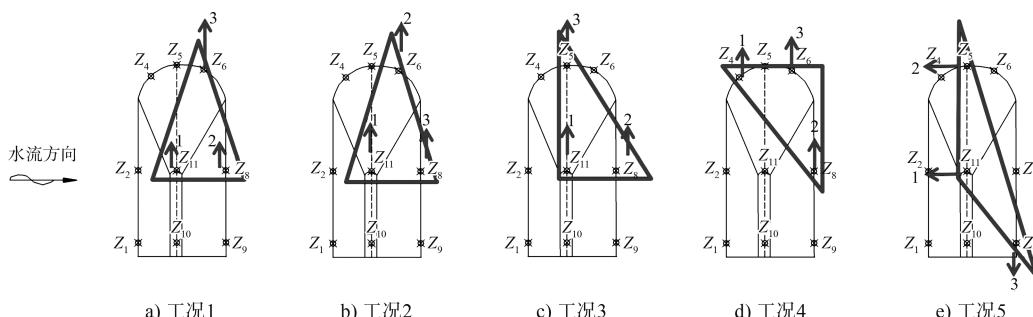
### 3 试验结果及机理分析

为研究随着流量增加丁坝周围测点流速最大区域和紊动强度最强烈区域的移动规律, 利用全淹条件 5 个流量工况条件下各测点 0.2 倍当地水深处的瞬时三维流速数据, 计算各处的  $x$ 、 $z$  向的平均流速、紊动强度, 分别画出  $x$ 、 $z$  向平均流速、紊动强度最大 3 个点所在区域, 并由大到小排列该区域内各点计算值。

#### 3.1 流量对 $x$ 向流速最大区域转移规律的影响

全淹条件 5 级流量工况下  $x$  向流速最大区域随流量条件变化情况见图 3(标示“1”“2”“3”的点为  $x$  向流速最大的 3 个点, 点 1>点 2>点 3)。

由图 3 可知, 前 4 级流量工况下,  $Z_8$  测点都位于  $x$  向流速最大区域内,  $Z_6$  和  $Z_{11}$  点也 3 次进入区域; 在 1~5 级流量工况下, 测点  $Z_{11}$  共 4 次进入区域且在区域内的流速均最大, 应重点予以关注。随着流量增大,  $x$  向流速最大区域多集中在坝体前中部靠下游区域。

图3  $x$  向流速最大区域变化情况

### 3.2 流量对 $z$ 向流速最大区域转移规律的影响

全淹条件 5 级流量工况下  $z$  向流速最大区域

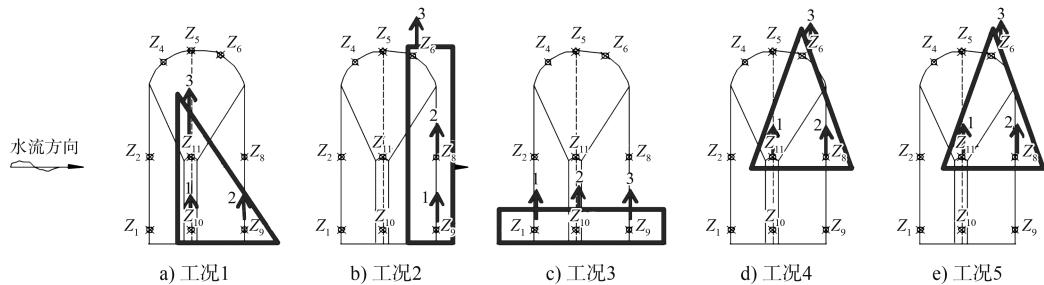


图 4  $z$  向流速最大区域变化情况

由图 4 可知, 前 3 级流量下,  $Z_9$  测点都位于  $z$  向流速最大区域内,  $Z_8$  点也 2 次进入区域; 流量较大时,  $Z_6$ 、 $Z_8$  和  $Z_{11}$  测点稳定于该区域内, 且  $Z_{11}$  和  $Z_8$  两点在区域内的流速最大, 应重点关注。随着流量增大,  $z$  向流速最大区域逐步稳定在坝体前

随流量条件变化情况见图 4。

中部靠下游范围内。

### 3.3 流量条件对 $x$ 向紊动强度最大区域转移规律的影响

全淹条件 5 级流量工况下  $x$  向紊动强度最大区域随流量条件变化情况见图 5。

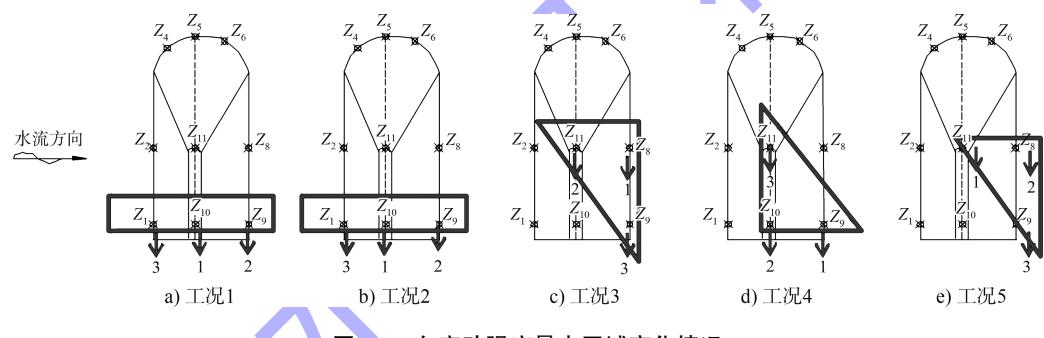


图 5  $x$  向紊动强度最大区域变化情况

由图 5 可知, 流量较小时(工况 1、2),  $x$  向紊动强度最大区域都出现在坝根周围; 随着流量增加, 该区域有向坝头方向推进的趋势, 当流量大于工况 3 流量时, 背水坡坝体根部  $Z_9$  测点一直留在区域内, 坝体中部  $Z_{11}$  测点都出现在  $x$  向紊动强度最大区域内, 与其毗邻的背水坡  $Z_8$  测点也 2 次出现在区域内。可见流量较小时, 坝根处的  $Z_1$ 、

$Z_9$  和  $Z_{10}$  的  $x$  向紊动最强烈, 流量较大时,  $Z_{11}$ 、 $Z_9$  和  $Z_8$  则须重点关注。可以看出,  $x$  向紊动强度最大的区域集中在坝体中后部区域。

### 3.4 流量对 $z$ 向紊动强度最大区域转移规律的影响

全淹条件 5 级流量工况下  $z$  向紊动强度最大区域随流量条件变化情况见图 6。

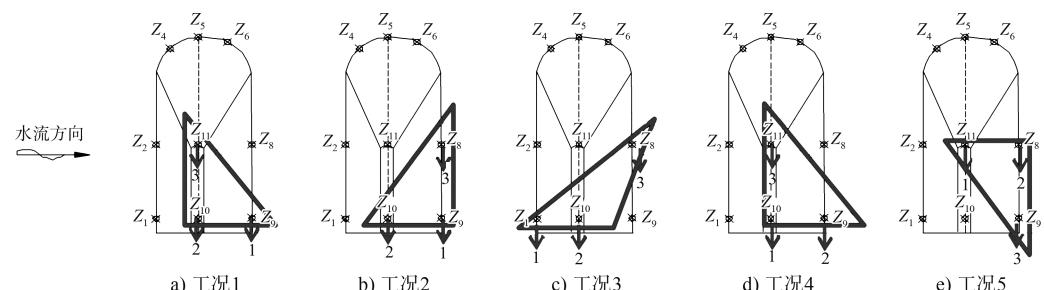


图 6  $z$  向紊动强度最大区域变化情况

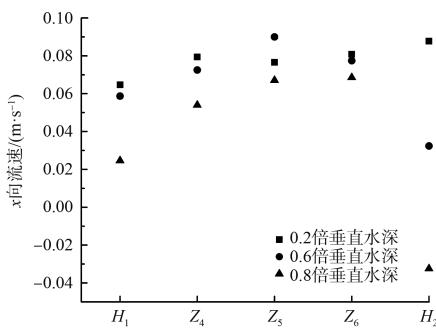
由图6可知,  $z$ 向紊动强度较大的区域都位于坝根和坝体中部测点之间, 没有明显横向转移的倾向。5个工况的 $z$ 向紊动强度最大区域基本是由 $Z_8$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{10}$ 、 $Z_{11}$ 中的3个点围成, 这些点需要重点关注。可以看出,  $z$ 向紊动强度最大的区域集中在坝体中后部区域, 与 $x$ 向紊动强度的范围相似。

综合以上4个须重点关注的区域,  $Z_8$ 和 $Z_{11}$ 测点周围区域是易损区域, 在设计施工和后期养护过程中须重点关注。这也与文献[13]关于界牌7#丁坝损毁部位的描述“坝体中段局部水域及下游侧仍存在冲刷现象”“坝体中段局部水域出现冲刷, 块石滑落, 局部枕袋出露”相吻合。

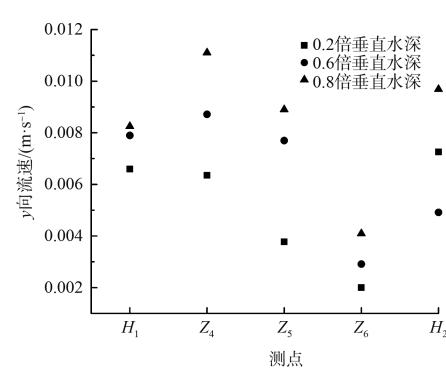
### 3.5 坝头处及周围测点三维流速分析

截至2021年, 长江坝体类损毁30处, 其中坝头损毁占比62%, 有必要对坝头易形成初始破坏的部位和原因进行研究, 为建筑物损毁预防和预测打下基础。对于丁坝坝头产生局部冲刷的主要原因, 尚存在许多认识上的差异, 主要观点为: 1)由坝头附近的涡旋系造成; 2)坝头附近的下潜水流引起; 3)坝头附近的单宽流量增大所致。为探究坝头局部冲刷主因, 在坝头周围设置测点, 选择全淹条件下工况1、3和5坝头周围测点三维数据作为代表进行计算处理, 研究不同流量条件下坝头周围测点三维流速分布规律。选定坝头周围5个测点进行测量, 测点布置见图2b)。

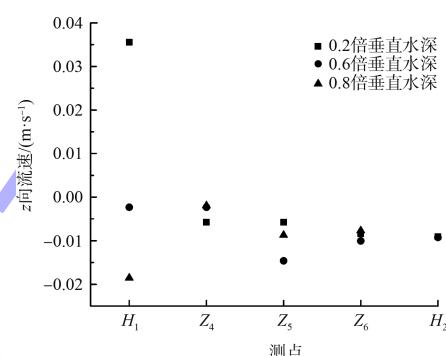
3个工况坝头周围测点的三维流速结果如图7所示。



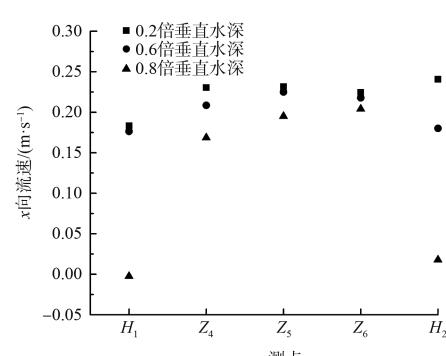
a) 工况1,  $x$ 向流速



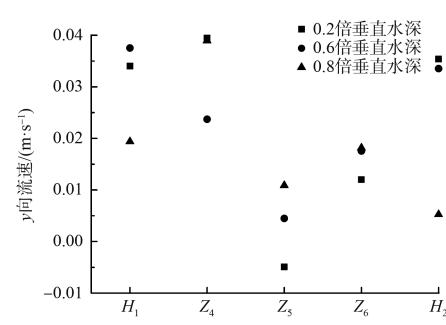
b) 工况1,  $y$ 向流速



c) 工况1,  $z$ 向流速



d) 工况3,  $x$ 向流速



e) 工况3,  $y$ 向流速

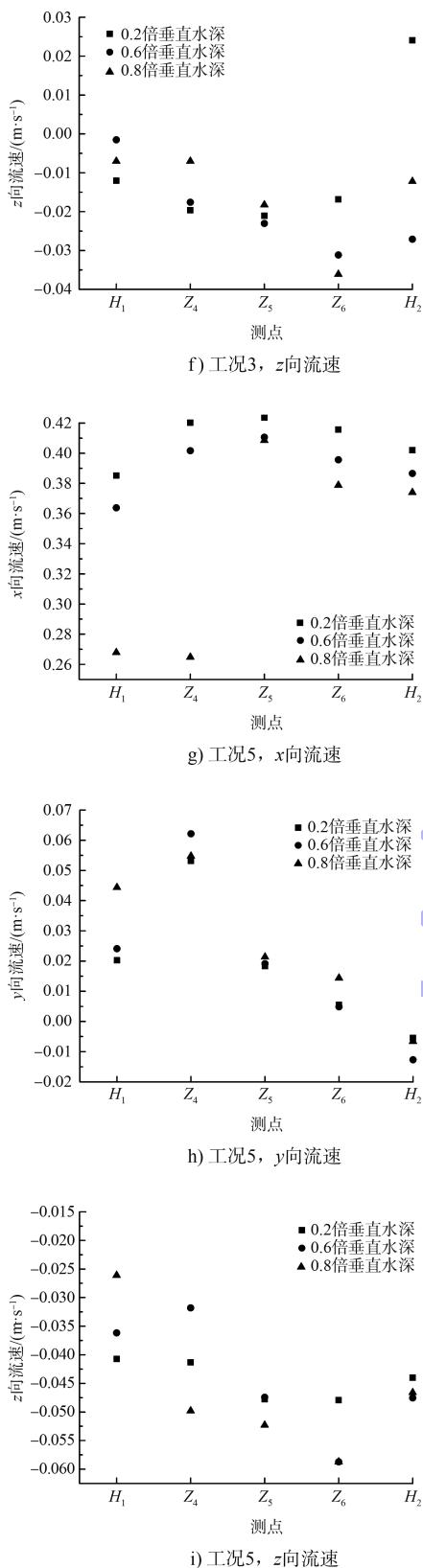


图7 3个工况的坝头周围测点三维流速

从全淹工况下的3级流量试验结果可以看出, 坝头处的单宽流量越大, 水流流速就越大, 这更

容易造成坝头附近的块石起动和附近床沙的起动; 工况1时  $Z_5$  测点  $x$  向流速垂向上出现流速下沉现象; 这3级流量下, 各测点  $z$  向流速几乎都为负值, 且随着流量增加, 流速绝对值逐渐增大。同时, 在工况1时, 坝头  $y$  向流速没有负值; 当流速增大到工况3时, 测点  $Z_5$  处  $y$  向流速出现负值, 这说明随着流速增大, 坝头处出现了平面环流或断面环流; 流速继续增大到工况5时, 所有测点  $y$  向流速负值消失, 这提示, 此时坝头没有显著涡旋出现。

可以看到, 坝头涡旋系、下潜水流、单宽流量是坝头附近河床局部冲刷成因的某个方面, 实际上它们是相互联系和共同作用的。但在其他条件不发生改变, 流量条件变动时, 某一因素会成为坝头损毁的主要作用因素: 流量较小(原型坝头流速小于1.0 m/s)时, 下潜水流是影响坝头损毁的突出原因; 中等流量(原型坝头流速1.0~2.0 m/s)时, 坝头涡旋系对坝头损毁的不利影响突出; 流量较大(原型坝头流速大于2.0 m/s)时, 单宽流量是造成坝头损毁的主要影响因素。

#### 4 结论

1)  $x$  向流速最大区域多集中在坝体前中部靠下游区域。从  $x$  向流速角度考虑,  $Z_8$  和  $Z_{11}$  点须重点关注。

2)  $z$  向流速最大区域多集中在坝体前中部靠下游区域。从  $z$  向流速角度考虑,  $Z_6$ 、 $Z_8$ 、 $Z_{11}$  点须被重点关注。

3)  $x$  向紊动强度最大的区域集中在坝体中后部区域。从  $x$  向紊动强度角度考虑, 随流量增大,  $Z_8$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{11}$  点须被重点关注。

4)  $z$  向紊动强度最大的区域集中在坝体中后部区域。从  $z$  向紊动强度角度考虑,  $Z_8$ 、 $Z_9$ 、 $Z_{10}$ 、 $Z_{11}$  点须被重点关注。

5) 随着坝头流速的增大, 下潜水流、坝头涡旋系、单宽流量分别成为影响坝头损毁的主因。

## 参考文献:

- [1] 窦希萍, 王向明, 娄斌. 潮流波浪作用下丁坝坝头概化模型的冲刷试验[J]. 水利水运工程学报, 2005(1): 28-33.
- [2] DUAN J G, HE L, FU X D, et al. Mean flow and turbulence around experimental spur dike[J]. Advances in water resources, 2009, 32(12): 1717-1725.
- [3] 窦国仁, 柴挺生, 樊明, 等. 丁坝回流及其相似律的研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1978.
- [4] 乐培九, 李旺生, 杨细根. 丁坝回流长度[J]. 水道港口, 1999(2): 3-9.
- [5] 李国斌, 韩信, 傅津先. 非淹没丁坝下游回流长度及最大回流宽度研究[J]. 泥沙研究, 2001(3): 68-73.
- [6] 马永军. 丁坝回流尺度控制方法和减少回流淤积的实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [7] 吴学文, 詹义正. 非均匀河床上的丁坝局部冲刷问题[J]. 江西水利科技, 2006, 32(3): 139-141.
- [8] PANDEY M, VALYRAKIS M, QI M L, et al. Experimental assessment and prediction of temporal scour depth around a spur dike[J]. International journal of sediment research, 2021, 36(1): 17-28.
- [9] GARDE R J, SUBRAMANYA K, NAMBUDRIPAD K D. Study of scour around spur-dikes[J]. Journal of hydraulic engineering, 1961, 87(6): 23-27.
- [10] NAGY H M. Maximum depth of local scour near emerged vertical wall spur dike[J]. Alexandria engineering journal, 2004, 43: 819-830.
- [11] DEY S, BARBHUIYA A K. Time variation of scour at abutments[J]. Journal of hydraulic engineering, 2005, 131(1): 11-23.
- [12] 长江航道规划设计研究院. 2020 年度长江武汉航道局航道整治建筑物技术状况分析评价报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2020.
- [13] 喻涛. 非恒定流条件下丁坝水力特性及冲刷机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [14] 高桂景. 丁坝水力特性及冲刷机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2006.
- [15] 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.
- [16] 蒋胡玲, 张婧, 曾琳, 等. 不同绕流结构体下水流水力特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(5): 637-644.
- [17] 苏伟, 王平义, 胡宝月. 丁坝周围水流紊动特性与地形冲刷的关系[J]. 水运工程, 2016(4): 129-135.
- [18] 顾杰, 李梦玲. 丁坝对弯道水流特性影响的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(6): 786-793.
- [19] 顾杰, 郑宇华. 水力坡度对淹没单丁坝近区水流结构的影响[J]. 水利水运工程学报, 2017(2): 75-81.
- [20] 长江航道局. 航道整治工程技术规范: JTJ 312—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

(本文编辑 王璁)

(上接第 99 页)

- [11] 陈述, 王越, 王建平, 等. 垂直升船机液压系统故障传播路径的模糊推理[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(4): 87-91.
- [12] 江新, 李雪莲, 吴静涵, 等. 敏感性水利工程社会稳定风险演化 SD 模型[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 18-26.
- [13] 郑霞忠, 周佳丽, 邵波, 等. 基于 D-I 的塔机作业物体打击事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 83-89.
- [14] 翟强, 顾伟红, 荆肇秦. 地铁联络通道冻结法施工安全风险评价[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 57-66.

- [15] 程江洲, 朱偲, 付文龙, 等. 基于贝叶斯网络的水力发电系统动态风险评估方法[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 631-640.
- [16] 郭超, 李中华, 胡亚安. 船舶进出船厢对三峡升船机对接锁定机构受力的影响分析[J]. 水运工程, 2020(9): 1-5.
- [17] 胡亚安, 王新, 陈莹颖, 等. 三峡升船机 145 m 水位上游对接厢内水面波动特性实船试验研究[J]. 水运工程, 2020(12): 1-6.

(本文编辑 王璁)