

· 航道及通航建筑物 ·



## 丁坝受力试验研究\*

路 鼎<sup>1,2</sup>, 王平义<sup>1,2</sup>, 刘怀汉<sup>3</sup>, 喻 涛<sup>1,2</sup>

(1. 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;

2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 长江航道局, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 通过水槽模型试验, 测得不同工况下丁坝坝体动水压力和脉动压力的分布情况, 并绘制出动水压力和脉动压力的分布图, 得到不同水深、流量及坝长情况下动水压力和脉动压力的分布规律, 并通过理论分析找到其原因。最终得出迎水面动水压力随水深、流量和坝长的增加而增加, 脉动压力随着水深增加而减小、随着流量和坝长增加而增加等结论。

**关键词:** 丁坝; 动水压力; 脉动压力

中图分类号: TV 142

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0085-05

### Distribution disciplinarian of pressure in spur dike

LU Ding<sup>1,2</sup>, WANG Ping-yi<sup>1,2</sup>, LIU Huai-han<sup>3</sup>, YU Tao<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400074, China; 3. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430014, China )

**Abstract:** Based on the model test, we measure the dynamic water pressure and fluctuating pressure of spur dikes under different working conditions, and draw the contour maps and scatter plots of water pressure and fluctuating pressure, through which, we get the distribution law of the dynamic water pressure and fluctuating pressure under different water depth, flow and length of dike, and find out the reason for it according to the theoretical analysis. The conclusion is drawn that the dynamic water pressure increases with water depth, flow and length of dike, and the fluctuating pressure decreases with water depth and increases with flow and length of dike.

**Key words:** spur dike; dynamic hydraulic pressure; fluctuation pressure

丁坝的存在使得周围的水流状况变得较为复杂。丁坝下游在一个较大范围内水流速度、流向及水位脉动强度均较大, 回流长度和宽度亦存在一定幅度的摆动。受旋涡和水面的波动所影响的脉动压力可大大加强瞬时水压力而导致坝头冲刷和坝体破坏。此外, 脉动水流还可以沿泥沙和坝体的缝隙传播, 使坝头区的泥沙在瞬时更易起动<sup>[1]</sup>。而目前国内外对于坝体空

间的受力研究较少, 陈小莉等<sup>[2]</sup>对块石进行受力分析简化求解了旋涡对块石的吸附作用力; 缙元有<sup>[3]</sup>建立了根石走失的物理模型, 导出了天然河道根石走失的力学计算公式; 王平义等<sup>[4]</sup>仅对丁坝床面的压力进行研究。因此, 通过模型试验弄清坝体受力的空间分布情况及其影响因素, 对于优化丁坝的设计、防止丁坝水毁的发生十分重要<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2013-10-29

\*基金项目: 国家自然科学基金(51079165); 交通运输部“黄金水道通过能力提升技术”重大专项(201132800050); 西部交通建设科技项目(2009328814012)

作者简介: 路鼎(1989—), 男, 硕士, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。

### 1 试验设计

#### 1.1 试验设备

本试验在重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室航道厅的矩形玻璃水槽中进行 (30 m 长,

2 m 宽)。进口流量由电磁流量系统控制, 尾门由翻板门结合小水阀控制水位<sup>[5]</sup>。图 1 为试验自动循环控制系统。

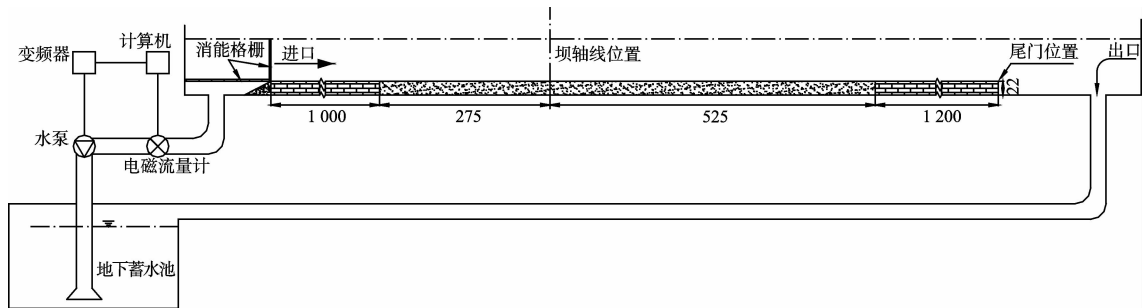


图 1 自动控制系统

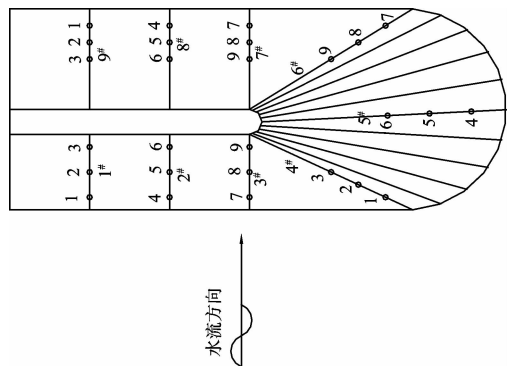
#### 1.2 试验方案

试验丁坝分别采用坝顶长度为 20, 30, 50 cm 的 3 种坝体, 根据《航道整治工程技术规范》<sup>[6]</sup>中对丁坝坝体结构的要求, 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, 向河坡坡度为 1:5, 坝顶宽度为 12 cm, 坝高为 10 cm。坝体材料使用有机材料。试验流量选取 25.8, 38.7, 51, 68 L/s 共 4 级流量。为了研究不同水深坝体受力情况, 水深采用非淹没时、刚好淹没时和完全淹没时 3 种情况下相应的水深 8, 10, 12 cm。综上所述, 本试验选用 3 种坝长、4 级流量和 3 种水深共 36 组工况进行试验研究。

设定为 4 000 次/s, 频率响应速度为 100 Hz。

#### 1.3 压力测点布置

坝长为 50 cm 时, 在丁坝的迎水面、背水面和坝头面各布置 3 个测压断面, 每个测压断面布置 3 个测压点; 坝长为 30 cm 和 20 cm 时, 由于丁坝截短坝体上的 1# 和 9# 测压断面被去掉, 故在丁坝的迎水面和背水面分别布置 2 个测压断面, 坝头面布置 3 个测压断面, 每个测压断面布置 3 个测压点。图 2 为 50 cm 坝长的坝体测力的平面布置。力采样传感器采用陕西宝鸡秦岭传感器厂研制的压力传感器 (型号为 CYG1145T, 测量范围为 6 kPa, 精度为 0.5 级), 试验压力采集系统采用日产 3 066 型高精度笔式记录仪器, 自动跟踪记录, 其误差能保证在 5% 以内。试验中系统的采样速度



注: #表示测压断面; 数字表示测压点。

图 2 坝体测点布置

### 2 试验成果分析

#### 2.1 压力数据处理

动水压力取测得的瞬时压力的平均值, 而脉动压力取值采用工程上常用的 2 倍标准差的方法, 计算公式如下:

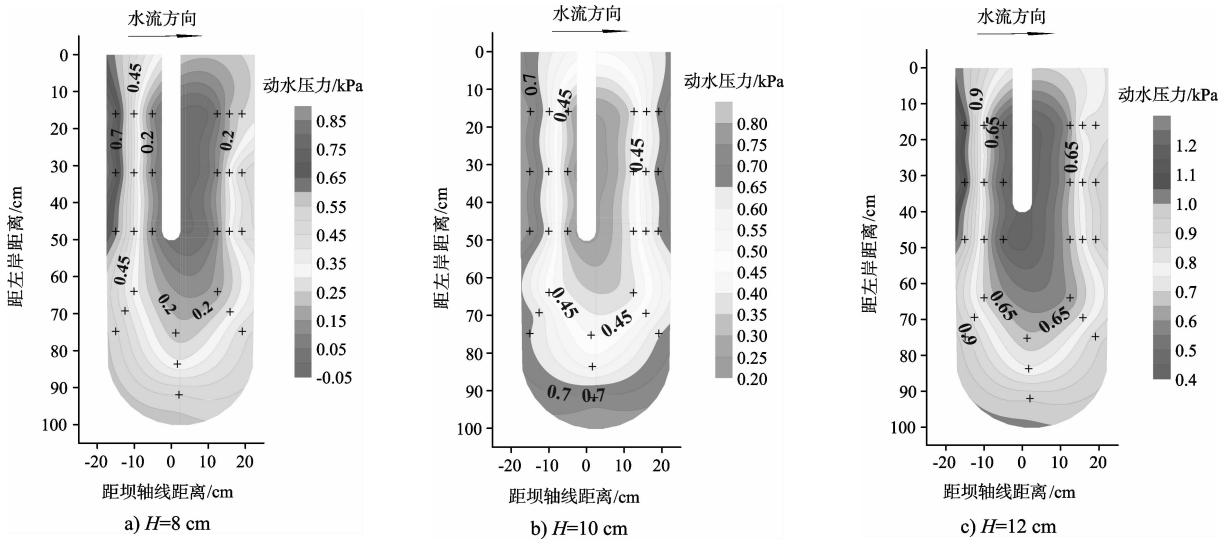
$$A = 2\sigma = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n}} \quad (1)$$

式中:  $A$  为脉动压力;  $p_i$  为压力瞬时值;  $\bar{p}$  为压力平均值;  $n$  为采样个数, 本试验中  $n = 3\ 000$ 。

#### 2.2 动水压力分布

##### 2.2.1 动水压力随水深的变化

试验中测量断面较多, 故采用等值线图的方法来分分析动水压力分布规律 (图 3)。



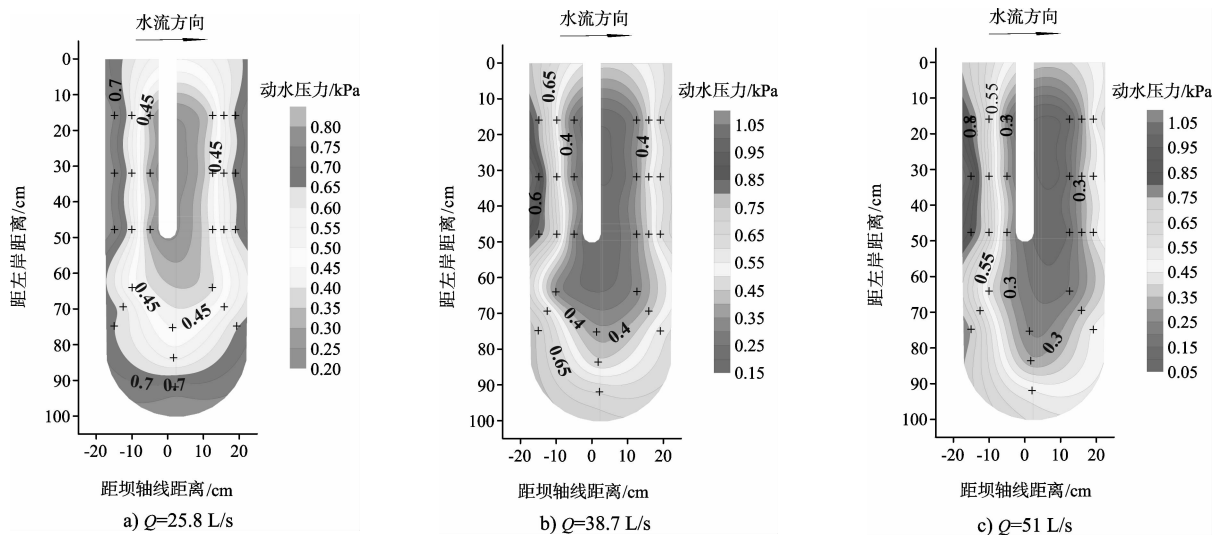
注: + 表示试验中丁坝上安放的压力测点, 由于在坝顶位置没有设置压力传感器, 故中间坝顶区域用白色来表示。L=50 cm, Q=25.8 L/s。

图 3 不同水深动水压力对比

从图 3 可以看出动水压力随着水深的增加而增加, 迎水面、坝头区域和背水面中迎水面动水压力最大, 坝头区域其次, 背水面最小; 3 块区域中, 迎水面压力梯度最大, 背水面其次, 坝头区域最小, 这和三者的坡度大小顺序是一致的。在丁坝迎水面附近由于丁坝壅水作用, 水面抬高, 水流绕过坝头后水面急剧下降, 在下游甚至会形成反比降, 故而迎水面的动水压力较大, 而背水面的较小。

### 2.2.2 动水压力随流量的变化

由图 4 可知迎水面的动水压力随着流量的增加而增加, 而背水面动水压力随着流量的增加而减小。这是因为其他因素不变时, 随着流量的增加流速必然变大, 而水流对阻流面的冲击力正比于流速的平方<sup>[1]</sup>, 故随着流量的增加迎水面冲击力变大, 从而测得的动水压力也较大。而随着流量的增加背水面水面线反而下降, 故而动水压力也随之减小。



注: L=50 cm, H=10 cm。

图 4 不同流量动水压力对比

### 2.2.3 动水压力随坝长的变化

从图 5 可知迎水面区域动水压力随着坝长的增加而增加，而背水面和坝头区域动水压力都是随着坝长的增加而减小；坝长较短时等值线图相对稀疏，压力梯度较小。这是由于坝长较小时，丁坝的阻水作用较小，流速较小，根据水位壅高的基本方程<sup>[7]</sup>可知，局部水头损失  $h_j$  对有整治建筑物的水位壅高计算起主要作用。根据实测资料非淹没丁坝局部水头损失公式<sup>[8]</sup>：

$$h_j = 3.55 \left( \frac{Q_b}{Q} \right)^{1.55} \cdot \frac{u_0^2}{2g} \quad (2)$$

式中： $u_0$  为坝头处无坝时的垂线平均流速； $Q_b$  为丁坝的阻挡流量，其大小随着坝长的增加而变大； $Q$  为断面总流量。因水位的壅高随着坝长的增加而增加，所以丁坝较长时，迎水面的动水压力较

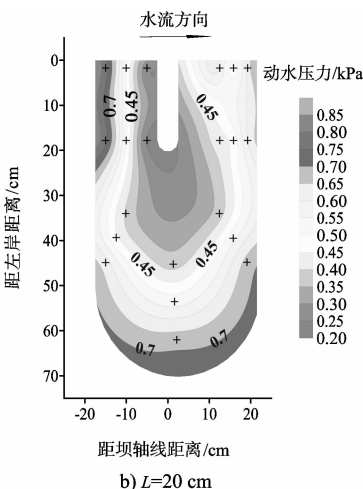
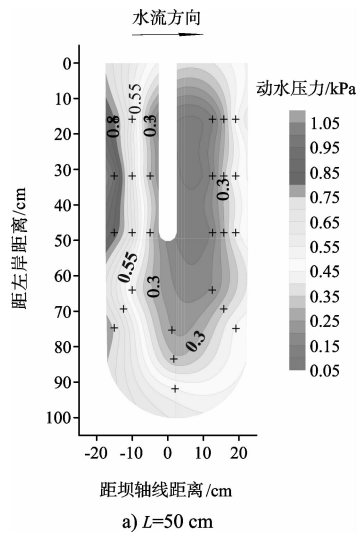
大；由于坝长较短时水面比降较小，水面平缓，故而背水面和坝头处的水位较坝长较长时大。

### 2.3 脉动压力分布

由于脉动压力数值较小，当测点靠近槽壁，或者测点水深较浅时，测得数据会出现失真，导致无法使用等值线图来分析脉动压力，故只使用散点图来分析丁坝淹没状态下脉动压力随流量和坝长的变化规律和丁坝脉动压力随水深的变化规律。

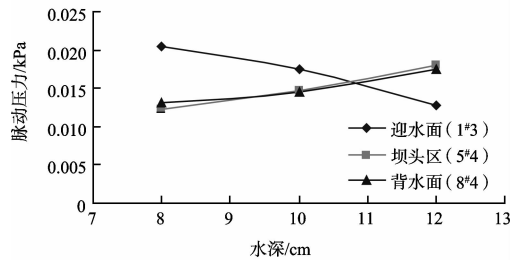
#### 2.3.1 脉动压力随水深的变化

选取流量为 25.8 L/s 和坝长 50 cm 的工况分析脉动压力随水深的变化。从图 6 中可以看出，迎水面脉动压力随着水深的增加而减小，背水面和坝头区脉动压力随着水深的增加而增加。这是由于随着水深的增加，过水断面面积变大，而在流量恒定的情况下，流速则会减小，从而迎水面的脉动压力变小；试验中可以观察到坝头处的竖轴旋涡尺寸随着水深的增加而变大，受此影响坝头处的脉动压力变大；而丁坝淹没时在背水面会形成平轴旋涡，且随着水深的增加尺寸也会变大，故而背水面的脉动压力随着水深的增加而增加。



注： $Q=51 \text{ L/s}$ ， $H=10 \text{ cm}$ 。

图 5 不同坝长动水压力对比



注：1#3表示1号断面3测点。

图 6 不同水深脉动压力对比

#### 2.3.2 脉动压力随流量的变化

选取水深 12 cm 和坝长 50 cm 的工况分析脉动压力随流量的变化。从图 7 可以看出，随着流量的增加脉动压力变大，坝头处脉动压力随流量的增加较快，背水面的脉动压力比迎水面脉动压力大。这是由于其它因素不变的情况下流量增加流速必然增加，从而雷诺数变大，水质点混杂碰撞剧烈，故而整体上脉动压力随着流量的增加而增加；当水流绕过坝头后边界层发生分离，分离点以下会产生竖轴旋涡，而坝头部恰是竖轴旋涡的

涡源所在<sup>[5]</sup>,另外坝头处一般相对其它部位流速较大,而回流与主流交界面的紊动混掺系数与流速成正比<sup>[1]</sup>,故而坝头处脉动压力受流量的影响较大;淹没丁坝的水流明显被丁坝分成面流和底流,而坝顶以下的底流,从上游绕过坝顶在坝下游形成一个很强的水平轴环流区<sup>[7]</sup>,受此平轴涡旋体系的影响,背水面水流紊动较强,故而背水面的脉动压力比迎水面的大。

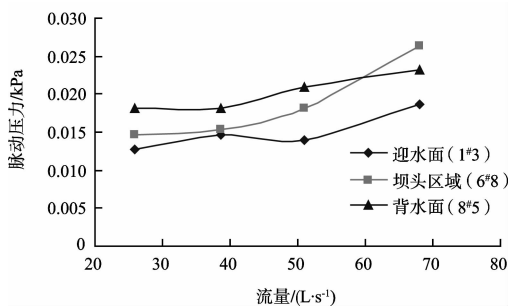


图7 不同流量脉动压力对比

### 2.3.3 脉动压力随坝长的变化

选取流量为 51 L/s 和水深 12 cm 的工况分析脉动压力随坝长的变化。从图 8 可知脉动压力随着坝长的增加而增加。这是由于丁坝坝长增加,丁坝对水流的调流作用变强,阻挡流量变大,过水断面减小,流速变大,水流紊动变强,故而脉动压力变大。和图 7 一样,背水面脉动压力大于迎水面脉动压力,此处不做重复分析。

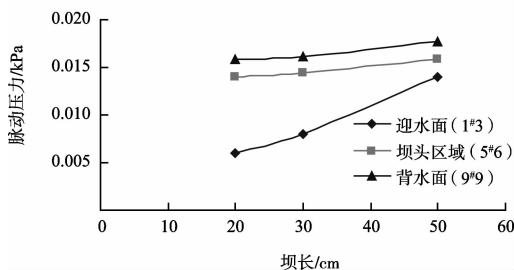


图8 不同坝长脉动压力对比

## 3 结论

动水压力随着水深的增加而增加。迎水面的动水压力随着流量的增加而增加,而背水面动水压力随着流量的增加而减小。迎水面动水压力随着坝长的增加而增加,而背水面和坝头动水压力都是随着坝长的增加而减小。

迎水面脉动压力随着水深的增加而减小,背水面和坝头区脉动压力随着水深的增加而增加。脉动压力随着流量的增加而变大,坝头处脉动压力随流量的增加较快,背水面的脉动压力比迎水面脉动压力大。脉动压力随着坝长的增加而增加。

## 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] 陈小莉,马吉明. 受漩涡作用的水下块石的起动流速[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(3):315-318.
- [3] 缙元有. 河道整治工程根石走失的力学分析研究[J]. 人民黄河,2000,22(4):4-5.
- [4] 王平义,高桂景,刘怀汉. 丁坝周围床面受力的试验研究[J]. 水运工程,2012(3):1-6.
- [5] 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.
- [6] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].
- [7] 应强,焦志斌. 丁坝水力学[M]. 北京:海洋出版社,2004.
- [8] 孔祥柏,程年生. 丁、潜坝局部水头损失的试验研究[J]. 水利水运科学研究,1992(4):387-395.
- [9] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社,1992.

(本文编辑 武亚庆)