

底流钢膜消力池底板上表面脉动压力试验

齐春风,练继建,刘 昉,李会平,欧阳群安

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:为确保消力池防护结构在水流冲击下的安全,探索一种新的钢膜消力池防护结构,即在消力池传统的不透水混凝土底板上部铺设一层均匀开孔的薄钢板。基于某底流消力池模型试验,研究了铺设均匀开孔钢膜对不透水底板上表面脉动压力分布规律的影响。试验结果表明:铺设均匀开孔的钢膜后,对于消力池前端旋滚区,脉动压力强度系数减小、概率密度函数基本满足正态分布,但幅值范围更加集中;纵向各点的相关性降低、空间积分尺度下降,涡旋保持性降低;脉动压力主频基本不变,但脉动能量集中的频带变窄。与透水底板比较,钢膜消力池防护结构可以有效减小作用在消力池前端底板上表面的脉动荷载,初步表明这种结构具有一定的可行性。

关键词:消力池;防护结构;钢膜;脉动压力;透水底板;模型试验

中图分类号:TV135.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)02-0033-06

Experimental study on fluctuating pressure acting on the upper surface of the slab in a underflow stilling basin with a steel membrane//QI Chunfeng, LIAN Jijian, LIU Fang, LI Huiping, OUYANG Qunan (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To ensure the safety of the protective structures of a stilling basin under high speed flow, stilling basin with a steel membrane is proposed as a new type of protective structure in which is a layer of thin homogeneous perforated steel plate is laid on the stilling basin slab. Based on hydraulic model test, the effect of the uniform perforated steel membrane on the distribution of the fluctuating pressure acting on the upper surface of the slab was studied. The results show that, when the uniform perforated steel membrane is laid, the fluctuating pressure intensity coefficient of the upper surface is reduced and the probability density function basically follows the normal distribution with more concentrated range of fluctuating pressure amplitude in the water rolling zone at the front of the stilling basin. The correlation and the spatial integral scale of the longitudinal points decrease, indicating that the vortex retention is reduced. The dominant frequency of the fluctuating pressure is basically the same, but the pressure fluctuation energy has a narrower band. Compared with the pervious slab, the protective structure of steel membrane can effectively reduce the fluctuating load acting on the upper surface of the slab in the front of the stilling basin, indicating that this new type of protective structure shows certain feasibility.

Key words: stilling basin; protective structure; steel membrane; fluctuating pressure; pervious slab; model test

筑坝壅高水库水位,使得下泄水流携带巨大的能量,特别是在高坝水利枢纽中,由于坝高和泄洪功率巨大而带来的泄洪消能问题更加突出。消力池作为下游河床的主要防护结构,其自身在高速水流冲击下的安全是实现消能和防冲目的的关键^[1-5]。目前工程上采用的消力池底板大多为不透水底板,这种结构在止水没有破坏的情况下,只有板块上表面受动水荷载作用,一般不会存在失稳问题。但若止水遭到破坏,后果会很严重。脉动压力沿缝隙传播,使得底板板块上下表面同时作用动水荷载,板块上

下表面压差过大是底板失稳的主要原因。为了抵抗这些压差,需要增加板块厚度或者增加锚筋,或者增设抽排措施。然而增加底板自重起到的作用很小,锚固力也不能无限制加大,抽排设施也有可能会出现机械或电气故障。这种被动的防护理念有时很难保证防护结构的安全,例如 20 世纪 80 年代俄罗斯萨杨舒申斯克水电站消力池的严重破坏^[6],20 世纪 90 年代我国湖南五强溪水电站右消力池的破坏^[7]和陕西安康水电站消力池的多次破坏^[8]等。

透水底板是一种新型的消能防护结构。脉动压

力通过透水底板的透水孔得以传递,从而改变底板的水动力特性。透水孔在泄洪期间可以有效平衡上下表面的动水压力差,在非泄洪期间则可以释放扬压力,从而降低作用在防护结构上的荷载。众多学者对透水底板的脉动荷载进行了研究。哈焕文^[9]试验研究了底流消能条件下透水护坦的水力特性,表明设置排水孔可有效降低作用在护坦上的水流脉动压力;杨敏等^[10-12]通过模型试验对透水底板的水力特性进行了系统研究,其中包括挑跌流透水底板的水力特性,研究表明板块开孔可有效减小射流冲击区板块的上举力;王继敏^[5]研究了透水底板开孔率对上举力的影响;张少济等^[11]初步研究了反拱消力池透水底板减压降载机理;杨敏等^[12]研究了平底水垫塘透水底板下表面脉动压力随开孔率的变化;刘安富等^[13]研究了宽尾墩消力池透水底板开孔前后脉动压力和上举力的变化;李会平等^[14]研究了透水孔内的脉动压力特性,发现透水孔内脉动压力的幅值和频谱特性与板块上表面的脉动压强基本相当,上表面传入孔内的脉动压强瞬时传遍整个透水孔。目前,透水底板已经在乌江索风营水电站的消力池中得到了应用,从2005年运行至今,消力池底板未发现破坏。然而,透水底板也存在一些潜在的安全问题。由于板块开孔,底板的刚度降低,可能会使板块发生折断失稳;透水孔内的高速水流,有可能会严重冲刷底板混凝土和基岩,进而淘空消力池底板混凝土;透水孔内流态复杂,水流紊动可能会在孔内引起空蚀现象。

从主动防护的观念出发,笔者在透水底板的基础上提出一种新的钢膜消力池防护结构形式。钢膜消力池,是在传统的不透水混凝土底板上铺设一层均匀开孔的薄钢板而形成,脉动压力和扬压力可通过钢板孔传递。钢板不分缝,故整体抗冲击能力较强,而且钢材表面平整,故抗空蚀性能好。通过模型试验,对钢膜防护结构下混凝土底板表面的脉动压力特性进行研究,探索这种新型防护结构的可行性。

1 模型概况

以某深孔放空排沙洞平底消力池为研究对象。该深孔放空排沙洞由引渠段、进口有压洞段、检修闸井段、有压洞身段、工作闸井段、出口无压洞段、消能段、明渠段组成。消能段分为泄槽段、消力池段及明渠段,为维护消力池边墙稳定,在两边墙内部垂直水流方向布置一系列拉杆。模型按重力相似准则设计,几何比尺为1:37.89。消力池长2.5 m,宽0.475 m。

在消力池不透水底板上部铺设一层与底板表面尺寸相同的厚0.5 mm的薄钢板,钢板上部均匀开孔,孔径 $D=2\text{ mm}$ 、孔距 $b=40\text{ mm}$,开孔个数为756,开孔率 k (钢板孔面积与钢板面积之比)为0.2%。钢板与消力池底板用螺丝钉固结、稍有缝隙,钢板四周用703密封胶封水。沿消力池底板纵向中心线布置12个脉动压力测点,测点间距 $d=0.132\text{ m}$ 。消力池模型布置及测点分布如图1所示。

2 试验方法

试验在来流条件恒定、消力池入池单宽流量 $q=0.188\text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下进行,在钢板铺设前后分别测量原不透水底板上表面的脉动压力,相应测试工况下消力池流态如图2所示,池内为临界水跃。为分析开孔率对脉动压力的影响,增设部分钢板孔被封堵的工况。考虑钢板孔分布的均匀性,增设工况为钢板孔隔二开一,此时开孔率 $k=0.02\%$ 。令未铺设钢板的工况 $k=0$,则试验工况可用开孔率表示为:①未铺设钢板, $k=0$;②钢板孔隔二开一, $k=0.02\%$;③钢板孔全部开启, $k=0.2\%$ 。脉动压力测量采用中国水利水电科学研究院研制的DJ800型多功能监测与采集系统,脉动压力传感器为硅压阻式差压传感器,脉动压力采集系统及采集流程如图3所示。根据前人研究成果及已有试验资料,脉动压力主频一般集中在15 Hz以下,参照奈奎斯特采样定理,本试验采样频率取50 Hz,样本容量为4096。

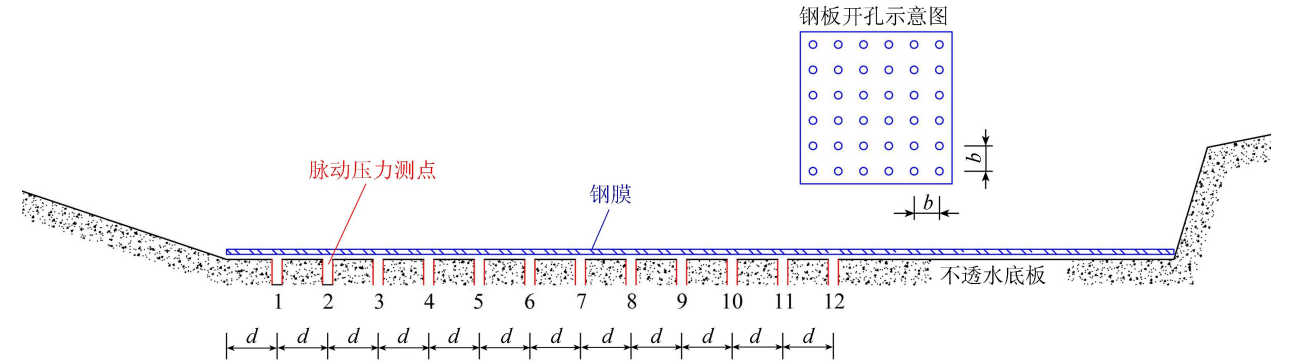


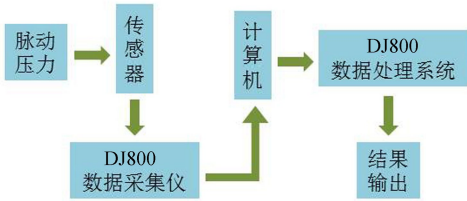
图1 消力池模型布置及测点分布示意图



图2 测试工况消力池流态



(a) DJ800型多功能监测与采集系统



(b) 脉动压力数据采集流程

图3 脉动压力数据采集系统及采集流程示意图

3 结果分析

典型测点(测点10)的脉动压力时程线如图4所示,各工况下测点的幅值分布都是随机的。

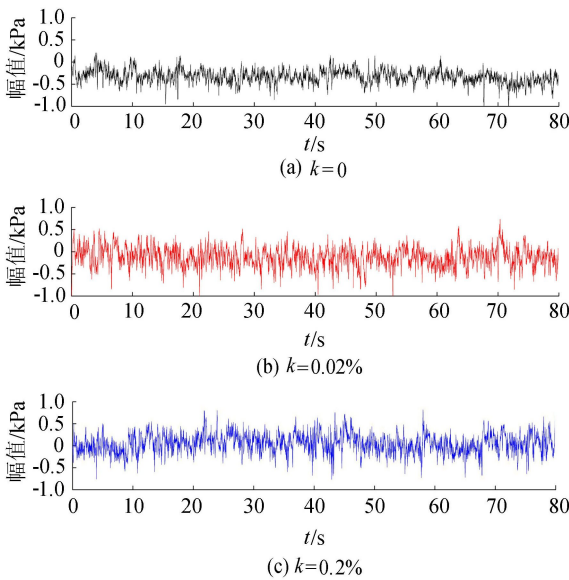


图4 典型测点(测点10)的脉动压力时程线

3.1 脉动压力幅值特征

3.1.1 脉动压力强度系数

脉动压力的强度常用脉动压力标准差 σ 来表示,用上下游水位差 H 将其无量纲化得到脉动压力强度系数 β :

$$\beta = \frac{\sigma}{H} \quad (1)$$

测点位置用相距消力池底板前端的距离与消力池长度的比值 x/L 表示,将不同开孔率时的脉动压力强度系数绘于同一张图上,图5给出了来流条件恒定时的脉动压力强度系数沿程分布。由图5可以看出,受水跃旋滚的影响,消力池前端 β 较大,中后部比较平稳^[15], β 的分布趋势基本一致。但是铺设均匀开孔的钢膜后,消力池前部水流旋滚区钢膜下表面的 β 随着 k 的增大而减小,最多可减小40%,随着 x/L 的增大, β 逐渐减小且分布趋于一致,至消力池中后部水流平稳区,开孔后的 β 较不开孔略大。分析其原因:钢膜均匀开孔以后,其上表面的水流紊动通过透水孔进入钢膜与消力池底板之间,对于消力池前部旋滚区,由于透水孔的分散作用,使得传递到钢膜下面的脉动压力强度相比其上表面小,但是由于钢膜与底板之间的固结作用和缝隙很小,使得消力池中部钢膜下表面的脉动压力难以很快释放,而此处消力池底板上表面的脉动压力是由钢膜上部水体的强烈紊动沿透水孔传递以及钢膜与消力池底板之间的缝隙内水流紊动的积累所产生,所以其脉动压力强度会稍有增大。

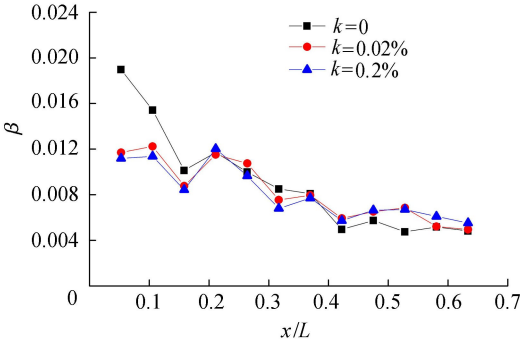


图5 脉动压力强度系数沿程分布

从 $k=0.022\%$ 增加到 $k=0.2\%$, β 的分布基本是一致的,表明钢板开孔面积达到一定比例就可以起到显著降低脉动压力的作用,从经济和安全角度考虑,过大的开孔率是不必要的。

3.1.2 脉动压力概率密度函数

脉动压力作为随机变量,需要关注其分布的正态性。正态性的验证,通常采用偏度峰度法,即采用偏差系数 C_s 和峰度系数 C_e 来表征与正态分布的偏离程度。图6分别给出了消力池前部($x/L=0.107$)和中部($x/L=0.581$)典型位置的脉动压力概率密度函数,表1列出了所有测点的偏差系数和峰度系数。

由图6可以看出,消力池底板铺设钢膜前后的脉动压力基本都符合正态分布。由表1可知,所有测点的脉动压力偏差系数 C_s 大致都在0附近波动,

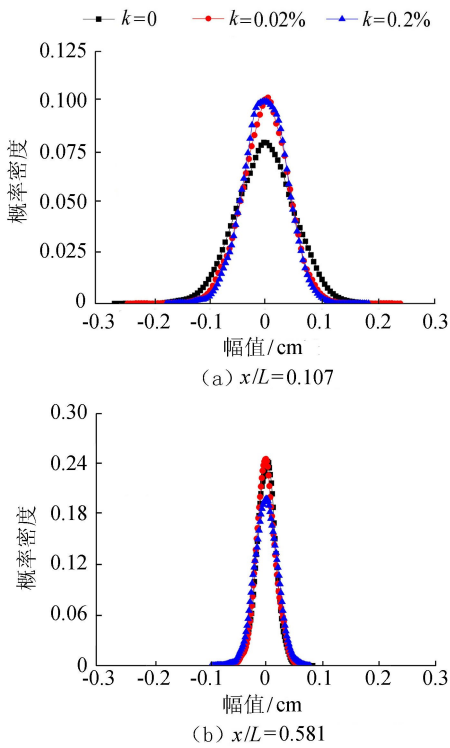


图6 典型位置的脉动压力概率密度函数

表1 实测脉动压力的偏差系数和峰度系数

测点 编号	C_s			C_e		
	$k=0$	$k=0.02\%$	$k=0.2\%$	$k=0$	$k=0.02\%$	$k=0.2\%$
1	0.05	-0.04	-0.08	4.28	2.98	3.13
2	-0.08	-0.17	-0.13	3.19	3.58	3.21
3	0.02	-0.30	-0.28	3.05	3.23	3.43
4	0.14	-0.33	-0.42	3.25	3.44	3.60
5	0.16	-0.46	-0.31	3.44	4.00	3.98
6	-0.14	-0.07	-0.08	4.30	3.4	3.57
7	0.03	-0.07	-0.02	3.74	3.37	3.26
8	-0.07	-0.51	-0.18	3.51	4.02	3.27
9	-0.09	-0.35	-0.34	3.34	3.47	3.51
10	-0.14	-0.12	0.00	3.73	3.46	3.21
11	-0.22	-0.02	-0.07	3.65	3.42	3.25
12	-0.19	-0.12	0.22	3.35	3.24	3.35

表明脉动压力的正态分布基本是左右对称的,但是测点的脉动压力峰度系数 C_e 基本都大于3,相应地概率密度分布函数呈现“尖峰厚尾”形态,中间峰值较高,两端的尾部较厚。消力池中部($x/L=0.581$)的概率密度函数明显比前部($x/L=0.107$)瘦高,表明其脉动压力幅值范围比较集中。

对于铺设均匀开孔的钢膜,消力池前部($x/L=0.107$)的概率密度函数较为敏感,峰度上升,脉动压力幅值分布更为集中、幅值减小更多;消力池中部($x/L=0.581$)的概率密度函数对小开孔率 $k=0.02\%$ 不敏感,但当钢板孔全开 $k=0.2\%$ 时概率密度函数峰度下降,脉动压力幅值更为分散、幅值相对加大。这与脉动压力强度系数的分布趋势是一致的。

3.2 脉动压力相关特征

3.2.1 脉动压力瞬时空相关系数

瞬时空相关系数用于分析不同空间点的脉动压力之间的相互依赖关系。实际应用中,瞬时空相关系数通常是由计算时空相关系数得到的,对于顺水流方向相距 l 的两点的时空相关系数可表示为

$$\rho(x, l, \tau) = \frac{\overline{p'(x, t) p'(x + l, t + \tau)}}{\left[\overline{p'^2(x, t)} \overline{p'^2(x + l, t + \tau)} \right]^{1/2}} \quad (2)$$

式中: τ 为时间延迟,当 $\tau=0$ 时, $\rho(x, l)$ 为瞬时空相关系数; $p'(x, t)$ 为顺流向点 x 处 t 时刻的脉动压力; $p'(x+l, t+\tau)$ 为与 x 点相距 l 的点 $(x+l)$ 处 $(t+\tau)$ 时刻的脉动压力; $\overline{p'(x, t) p'(x+l, t+\tau)}$ 为 x 和 $(x+l)$ 两点处脉动压力的时均值。

瞬时空相关系数可以反映涡旋特征尺度的大小,图7为同等水力条件下纵向各测点与 $x/L=0.158$ 处测点(测点3)的瞬时空相关系数 $\rho(x, l)$ 的分布。可以看出,沿水流方向,与既定测点的相关系数先是基本呈正向对称分布,然后逐渐减小出现负相关,之后再逐渐趋近于零。钢膜均匀开孔以后,在正相关区域相关系数有所减小。这一现象表明在消力池前部旋滚比较剧烈的区域存在着大涡旋结构,随着钢膜开孔率的增加,测点之间相关性有所减小、涡旋变得破碎、保持性降低。

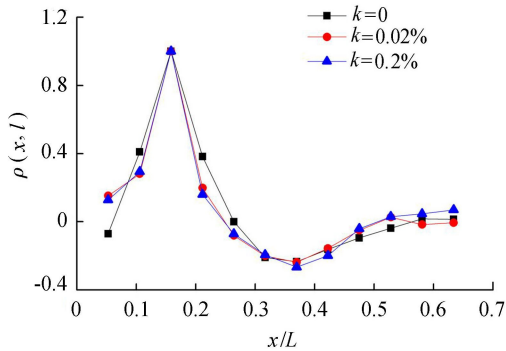


图7 脉动压力空间相关系数

3.2.2 脉动压力空间积分尺度

空间积分尺度可以表征紊流大涡旋结构的平均尺度,定义空间积分尺度

$$L_x = \int_0^{l_0} \rho(x, l) dl \quad (3)$$

式中 l_0 为第1个使瞬时空相关系数 $\rho(x, l)=0$ 的 l 值。

图8给出了来流条件恒定时沿顺水流方向脉动压力空间积分尺度随开孔率的变化情况。未铺设钢膜前,随着 x/L 的增大, L_x 先递增后稍有减小,在 $x/L=0.317$ 处达到最大值。铺设均匀开孔的钢膜后,消力池前部 L_x 下降,在 $x/L=0.158$ 处最大约下降了

18.9%, 然后 L_x 不断增大, 至 $x/L=0.317$ 处, 开孔率 $k=0.2\%$ 时和未铺设钢膜时的 L_x 基本一致; 至 $x/L=0.370$ 处 $k=0.2\%$ 时的 L_x 超过了未铺设钢膜时的 L_x , 而 $k=0.02\%$ 的 L_x 基本与未铺设钢膜时相等。

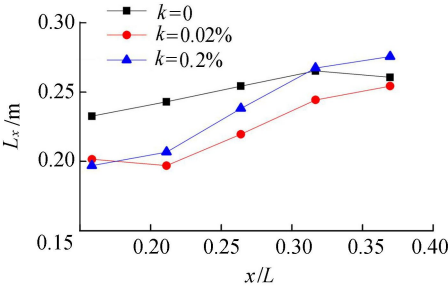


图8 脉动压力空间积分尺度

分析其原因, 由于水跃的影响, 消力池前部水流紊动剧烈, 涡旋不断产生并向下游扩散, 开始阶段涡旋尺度较小, 然后逐渐增大至最大值, 随后涡旋尺度缓速下降。铺设均匀开孔的钢膜后, 水流紊动通过钢板孔进入钢膜下表面, 由于透水孔多而小, 使得钢膜下表面的水流在各个方向都相互影响, 并向四面八方传递。在消力池前端, 钢膜上表面的紊流涡旋经过透水孔的分散作用而破碎, 涡旋尺度减小, 随着距消力池前端距离的增大, 不透水底板上表面的测点不仅受其上方大尺度涡旋经过钢膜透水孔传递的影响, 由于钢膜与底板四周的固结作用还会受到钢膜与不透水底板之间传递过来的水流紊动沿程积累的影响, 相对前部测点其涡旋尺度叠加之后变大。铺设均匀开孔的钢膜, 对于不透水底板上表面, 其前部由于透水孔的分散作用涡旋破碎、尺度减小, 而越向后, 虽然也受透水孔的传递作用, 但钢膜下表面和 不透水底板上表面之间的缝隙内水流的紊动沿程积累作用逐渐增强, 涡旋尺度变大。铺设均匀开孔的钢膜, 使得大涡旋尺度在空间上向后推移。

3.3 脉动压力频谱特征

功率谱密度是自相关函数的傅里叶变换, 其全程积分代表该点的水流能量^[16]。图9 为消力池前部($x/L=0.107$) 和中部($x/L=0.581$) 典型位置的脉动压力功率谱密度, 可以看出脉动压力分布具有明显的低频特性, 消力池前部水流旋滚区脉动能量主要分布在 $0 \sim 10\text{ Hz}$ 以内, 消力池中后部水流比较平稳, 脉动能量主要分布在 $0 \sim 2\text{ Hz}$ 以内。铺设均匀开孔的钢膜后, 脉动压力分布的主频基本不变, 但水流能量有所变化, 消力池前部水流能量降低, 脉动能量集中的频带变窄; 中后部水流能量增高, 脉动能量集中的频带变宽。这与脉动压力强度系数的分布规律是一致的, 铺设均匀开孔的钢膜以后, 消力池前部

由于透水孔的分散作用脉动能量减小, 而中后部由于钢膜和底板的固结作用脉动能量有所增大。

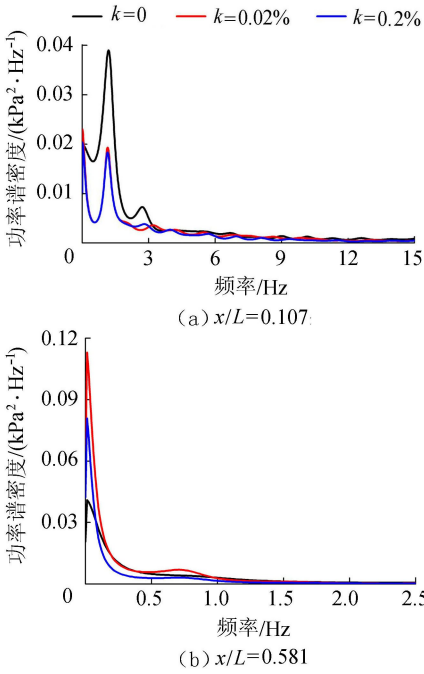


图9 典型测点的脉动压力功率谱密度

4 钢膜消力池与透水底板的比较

透水底板是在混凝土底板板块上开孔, 而钢膜消力池是在原不透水底板表面铺设透水钢板, 二者构成不同, 但都是利用透水孔对脉动压力的分散作用来降低作用在板块上的动水荷载。文献[13]中测量的是透水底板下表面的脉动压力, 是通过缝隙及透水孔进入下表面的水流紊动形成的, 本文测量的是钢膜下不透水底板上表面的脉动压力, 是由钢膜上表面的水流紊动通过透水孔传递形成的。虽然测量位置及脉动压力机理不同, 但都是透水孔作用下的脉动压力, 仍然可以用来比较透水孔的作用。利用文献[13]的数据, 对钢膜消力池与透水底板的脉动压力分布规律进行比较。图10 和图11 分别为钢膜消力池和透水底板的脉动压力强度系数及空间积分尺度的对比。

由图10 可知, 增设透水孔后, 钢膜消力池前部测点 β 下降, 中后部 β 稍有上升, 而对于透水底板是相反的, 消力池前中部 β 上升、后部 β 下降。这是由于二者形成机理不同造成的。对于钢膜消力池, 钢膜上表面水流紊动通过透水孔传递, 前部测点由于透水孔的削减作用 β 下降, 而中后部测点由于钢膜与底板之间缝隙内水流紊动的沿程传递而使得 β 稍有上升。对于透水底板, 底板上部水流紊动通过缝隙及透水孔传递, 消力池前部水流紊动剧烈使得传入下表面的强烈水流紊动难以有效释放, 故而 β 上

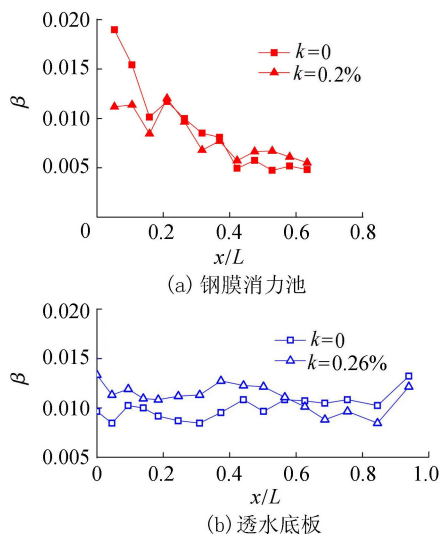


图 10 钢膜消力池和透水底板脉动压力强度系数比较

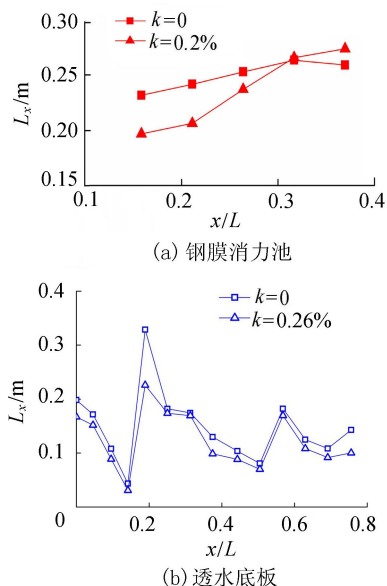


图 11 钢膜消力池和透水底板脉动压力空间积分尺度比较

升,而消力池后部水流紊动相对较弱,下表面脉动压力可以有效释放,故而 β 下降。

由图 11 可知,增设透水孔后,钢膜消力池前部测点 L_x 下降,随着 x/L 的增大, L_x 逐渐上升并超过未铺设钢膜时;而透水底板的 L_x 沿程分布趋势基本是一致的,开孔后的 L_x 值稍有降低。钢膜下的水流紊动是由透水孔传递形成的,前部测点涡旋变得破碎、尺度减小,而随着 x/L 的增大,受钢膜与底板之间缝隙内水流紊动沿程积累的影响,涡旋尺度增大。透水底板下表面的水流紊动是由板块缝隙及透水孔传递形成的,传递路径较为通畅、涡旋保持性相对较高,所以 L_x 的分布趋势基本一致。

在不透水底板表面铺设均匀开孔的钢膜,有助于减小消力池前端旋滚区不透水底板上表面的脉动压力强度,旋滚区涡旋更为破碎,降低直接作用在底板表面的水流脉动能量。而透水底板使得消力池前

端旋滚区的脉动压力强度增加,涡旋保持性稍有降低,主要是通过上下连通的透水孔来平衡板块上下表面的压差。

5 结 论

a. 消力池前端旋滚区不透水底板上表面的脉动压力强度系数减小,概率密度函数峰度上升,脉动压力幅值范围减小且分布更为集中。

b. 消力池前端不透水底板上表面纵向各点与既定点的的相关系数有所减小,空间积分尺度下降,降低了脉动压力的相关性,使得涡旋破碎、涡旋保持性降低。

c. 脉动压力的主频基本不变,但消力池前端旋滚区脉动能量集中的频带变窄,水流紊动能量降低。因此认为钢膜消力池结构可有效减小消力池前端旋滚区的脉动荷载。钢膜消力池底板上表面的脉动压力与透水底板下表面的脉动压力的形成机理不同,钢膜消力池通过透水孔传递水流紊动并降低直接作用在底板表面的脉动压力,而透水底板主要通过透水孔来平衡上下表面的压差。

参考文献:

- [1] 练继建,杨敏. 高坝泄流工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 崔广涛,马斌. 泄流诱发水工结构振动问题的综合集成研讨[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1): 1-10. (CUI Guangtao, MA Bin. Comprehensive compound method for flow-induced vibration of hydraulic structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010,30(1): 1-10. (in Chinese))
- [3] 刘沛清. 挑跌流水垫塘消能形式的消能防护设计准则探讨[J]. 长江科学院院报,2003,20(1): 3-6. (LIU Peiqing. Probe into design criteria on energy dissipation and scour-prevention for plunge-pools [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003,20(1): 3-6. (in Chinese))
- [4] 肖兴斌,芦俊英. 高拱坝泄洪消能水力设计研究与应用述评[J]. 水利水电科技进展,2000,20(2): 19-23. (XIAO Xingbin, LU Junying. Review of studies and application of hydraulic design of discharge and energy dissipation for high arch dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000,20(2): 19-23. (in Chinese))
- [5] 王继敏. 高坝消力塘防护结构安全问题研究[D]. 天津:天津大学,2006.
- [6] 杨立信,李运辉. 俄罗斯萨杨舒申斯克水电站事故原因分析[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.

(下转第 69 页)

- 制[J]. 水科学进展, 2014, 25 (2): 170-180. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, ZHANG Chendi, et al. A study on the mechanism of wetland degradation in Ruoergai swamp[J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (2): 170-180. (in Chinese))
- [26] KVARNER J, SNILSBERG P. The Romeriksporten railway tunnel-drainage effects on peatlands in the Lake Northern Puttjern area[J]. Engineering Geology, 2008, 101 (3): 75-88.
- [27] 蒲珉锴, 杨满业, 杜笑村, 等. 日干乔湿地恢复的可行性分析[J]. 草业与畜牧, 2010 (10): 50-52. (PU Mingkai, YANG Manye, DU Xiaochun, et al. Feasibility analysis of the recovery of Riganqiao Wetland[J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2010(10): 50-52. (in Chinese))
- [28] 蒋锦刚, 李爱农, 边金虎, 等. 1974—2007 年若尔盖县湿地变化研究[J]. 湿地科学, 2012, 10 (3): 318-326. (JIANG Jingang, LI Ainong, BIAN Jinhu, et al. Change of wetlands in Zoige County from 1974 to 2007[J]. Wetland Science, 2012, 10(3): 318-326. (in Chinese))
- [29] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006, 30 (1): 1-8. (YANG Yuanhe, PIAO Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30 (1): 1-8. (in Chinese))
- [30] 刘晓帆, 任立良, 袁飞, 等. 老哈河流域 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38 (1): 1-5. (LIU Xiaofan, REN Liliang, YUAN Fei, et al. Dynamic variation of NDVI in Laoha River Basin and its relationship with climatic factors[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38 (1): 1-5. (in Chinese))
- [31] 杨福明, 杨宗荣. 龙口坝泥炭沼泽改造途径的实验研究[J]. 地理科学, 1986, 6(3): 284-289. (YANG Fuming, YANG Zonglong. A study on transformation way of the peat moor of Longriba region[J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(3): 284-289. (in Chinese))
- [32] ZHANG Xiaohong, LIU Hongyu, BAKER C, et al. Restoration approaches used for degraded peatlands in Ruoergai (Zoige), Tibetan Plateau, China, for sustainable land management[J]. Ecological Engineering, 2012, 38 (1): 86-92.

(收稿日期: 2017-04-15 编辑: 郑孝宇)

(上接第 38 页)

- [7] 刘沛清, 高季章, 李桂芬. 五强溪水电站右消力池底板块失事分析[J]. 水利学报, 1999, 30 (1): 9-17. (LIU Peiqing, GAO Jizhang, LI Guifen. Study on failure cause of bottom slabs in stilling basin for Wuqiangxi Hydropower Station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30 (1): 9-17. (in Chinese))
- [8] 雷中俊. 安康水电站表孔消力池破损原因分析及加固处理[J]. 水力发电, 2000 (11): 48-49. (LEI Zhongjun. Analysis on the damage causes of the stilling basin for the Ankang Hydropower Station and its reinforcement[J]. Water Power, 2000(11): 48-49. (in Chinese))
- [9] 哈焕文. 透水护坦上动水荷载及其脉动的研究[J]. 水利学报, 1964 (2): 14-26. (HA Huanwen. Research on dynamic loads and its fluctuating characteristics on pervious apron[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964 (2): 14-26. (in Chinese))
- [10] 杨敏, 孙勉. 水垫塘透水底板上举力试验研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 88-90. (YANG Min, SUN Mian. Experiment study on the uplifting force of the previous slabs in stilling basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(6): 88-90. (in Chinese))
- [11] 张少济, 杨敏. 消力塘透水底板脉动压力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29 (6): 85-89. (ZHANG Shaoji, YANG Min. Experimental study on characteristics of pressure fluctuations on the pervious bottom slab of a stilling basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 85-89. (in Chinese))
- [12] 杨敏, 李树宁. 平底水垫塘透水底板下表面脉动压力试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42 (11): 1368-1378. (YANG Min, LI Shuning. Experimental investigation of fluctuating pressure on the undersurface of pervious slabs in flat-bottom stilling basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1368-1378. (in Chinese))
- [13] 刘安富, 杨敏, 李会平, 等. 宽尾墩消力池透水底板脉动压力试验研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 243-248. (LIU Anfu, YANG Min, LI Huiping, et al. Experimental study of the fluctuating pressure on previous slab in sting basin under jet flow form tail-flaring piers[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 243-248. (in Chinese))
- [14] 李会平, 杨敏, 董天松. 消力池底板透水孔内脉动压强试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46 (9): 105-108. (LI Huiping, YANG Min, DONG Tiansong. Experimental study on fluctuating pressure in previous hole of the bottom slab of the stilling basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46 (9): 105-108. (in Chinese))
- [15] FIOROTTO V, RINALDO A. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps[J]. Journal of Hydraulic Research, 1992, 30(4): 499-520.
- [16] 刘昉, 练继建, 辜晋德. 基于自回归模型的水流脉动压力频谱特征研究[J]. 水利学报, 2009, 40 (11): 1397-1402. (LIU Fang, LIAN Jijian, GU Jinde. Spectral analysis of pressure fluctuation signals of flow using AR method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (11): 1397-1402. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-03-01 编辑: 骆超)