



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.027

马斌, 马永磊, 邢仕强. 带键槽透水底板上举力特性模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 161-166. MA Bin, MA Yong lei, XING Shi qiang. Model test on uplift force of pervious floor with a keyway [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 161-166. (in Chinese)

带键槽透水底板上举力特性模型试验研究

马斌, 马永磊, 邢仕强

(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: 为保护高坝下游河床和岸坡不受泄洪高速水流的严重冲刷, 危及大坝安全, 需修建各类消力塘防护结构以构建大坝安全第一道防线。各类消力塘防护结构的安全是高坝泄洪安全的前提保障。随着对高坝下游防护工程的研究不断深入, 相继提出了带键槽消力塘底板、透水底板等不同结构形式的底板, 增加消力塘的稳定性。消力塘形式也从“被动防护”模式向“主动防护”模式转变。对“主动防护”与“被动防护”相结合的带键槽的透水底板进行研究, 通过模型试验从最大值、概率密度分布、幅值和功率谱等角度分析上举力的特性。结果表明, 与带键槽的底板相比, 增加透水孔可以降低上举力; 上举力概率密度分布基本符合正态分布; 上举力幅值降低; 功率谱密度更加的趋近于低频。

关键词: 水利水电工程; 键槽; 透水底板; 上举力; 模型试验

中图分类号: TV 653 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0161-06

Model test on uplift force of pervious floor with a keyway

MA Bin, MA Yong lei, XING Shi qiang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To protect the downstream river bed and bank slope of the high dam from the serious erosion by high-speed flood flow, which will endanger dam safety, it is necessary to build all kinds of stilling pond protective structures as the first line of defense for dam safety. The security of all types of stilling pond protective structures is the premise for the safety of high dam flood discharge. As the studies on downstream protective works of the high dam dig deeper, floors of different structural forms have been proposed, such as the stilling pond floor with a keyway and the pervious floor, to increase the stability of the stilling pond. The form of the stilling pond also transformed from the "passive protection" model to the "active protection" model. This paper studied the pervious floor with a keyway that combines "active protection" with "passive protection". A model test was conducted to analyze the uplift force in terms of the maximum value, probability density distribution, amplitude, and power spectrum. The results showed: In comparison with the floor with a keyway, increasing permeable holes can reduce the uplift force. The probability density distribution of the uplift force basically conforms to the normal distribution. The magnitude of the uplift force is reduced. The power spectral density is even closer to a low frequency.

Key words: hydraulic and hydroelectric engineering; keyway; pervious floor; uplift force; model test

收稿日期: 2016-01-11 修回日期: 2016-04-16 网络出版时间: 2017-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0922.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51309177); 国家科技支撑计划(2011BA05B05); 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(20120032120051)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51309177); Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program(2011BA05B05); Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20120032120051)

作者简介: 马斌(1979-), 男, 安徽宿州人, 博士, 副教授, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: mabin97@tju.edu.cn

通讯作者: 马永磊(1991-), 男(回族), 新疆伊宁人, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: 382809167@qq.com

我国的水利水电事业不断取得了巨大的成就, 巨型水电站与高坝在逐年增多。水利事业的建设中心已经逐渐转向水能资源比较丰富的西北、西南地区的黄河与长江上游, 一大批接近 300 m 或超过 300 m 的高坝或超高坝正在或将要建设, 多建于高山峡谷地区, 这些地方的水利工程都面临着流量大、泄流功率大、水头高、河谷狭窄等问题^[1], 大坝下游河床的消能防冲设计成为一个难题, 高坝泄洪消能防护安全问题十分突出。为了保护高坝下游河床和岸坡不受泄洪高速水流的严重冲刷, 危及大坝安全, 需修建各类消力塘防护结构以构建大坝安全第一道防线, 消力塘安全是高坝泄洪安全的前提保障。

国内外学者通过对消力塘失稳机理的研究^[2-6]以及对水力学特性研究^[7-10], 提出从优化设计的角度出发, 可通过改进防护结构造型来提高消力塘底板的整体抗力。彭彬^[11]等利用有限元分析计算百色消力池设置键槽对消力塘底板应力与变形的影响, 计算结果表明设置键槽可以有效消除板块间的不均匀沉降及错台现象, 增强了底板块的安全。许翔^[12]分析了消力塘底板增设键槽的对上举力特性的影响, 表明增加键槽之后, 板块的整体性得到加强, 且上举力明显减小, 提高了底板的稳定安全。马斌^[13]等通过建立有限元模型, 模拟键槽的工作机理得到了在底板设置键槽可以保障消力塘稳定性的结论。

随着对高坝下游防护工程的研究不断深入和对一些水利工程破坏的实例分析, 消力塘稳定性的研究逐渐从“被动防护”模式向“主动防护”模式转变。哈焕文^[14]通过试验研究了透水护坦的水力学特性, 表明在护坦范围内设置排水孔可以降低脉动荷载。张少济^[15]等对透水底板脉动压力特性试验表明, 底板开孔相当于缩小了板块的有效尺度。

本文主要对将“主动防护”与“被动防护”相结合的带键槽透水底板进行了模型试验研究, 从最大值、概率密度分布、幅值和功率谱等角度分析上举力的特性。

1 模型试验及测试方法

试验依托向家坝物理模型为研究对象, 其最大坝高 161 m, 最大泄量 $48\ 660\ \text{m}^3/\text{s}$, 消能形式为中-表孔交叉间隔布置的底流消能, 共 12 表孔 10 中孔。消力塘长 228 m, 分左右两区为平底板结构。

试验模型比尺采用重力相似准则, 比尺为 1: 80。主要针对左半区消力塘的 6 表孔和 5 中孔同时泄水情况下进行试验测量。为了保证模型的相似性, 底板的模型材料满足结构的动力相似要求,

所以在对底板稳定性的研究中, 底板均采用加重橡胶材料加工, 加重橡胶的容重和弹性模量满足结构动力相似准则, 能在承受水动力荷载后保证变形相似, 反映实际工程的特征。在底板中间位置布置 9 块 $20\ \text{cm} \times 20\ \text{cm} \times 12\ \text{cm}$ 相同的加重橡胶板块, 其他地方采用有机玻璃填平, 试验板块布置图见图 1。在顺水流方向上, 板块沿垂直方向增设键槽, 键槽布置图见图 2。在每个板块均匀增设透水孔, 依次改变其开孔率。由于缝隙水流比较复杂, 认为它属于层流的范畴。在此情况之下不再适用弗劳德准则。原型与模型缝隙的大小属于同量级, 所以, 满足模型与原型缝隙的流场相似, 就同时满足了压力脉动相似。故所有的板块之间保留 2 mm 的间隙来保证动水压力传递的相似性^[16]。

为了保证测量的精确性, 需将每个传感器在测量之前进行率定, 并在静水中调零。在试验中, 为了研究带键槽底板增加透水孔之后对上举力特性的影响, 采用控制变量的方法, 首先在模型中测量传统形式的平底板、带透水孔的平底板、带键槽的平底板在动水荷载作用下的上举力作为对照组, 然后在带键槽底板上增加透水孔, 依次改变其开孔率, 并利用 DASP 数据和采集软件进行采集分析上举力。测量布置图见图 3。



图 1 试验板块布置

Fig. 1 Test floor arrangement diagram

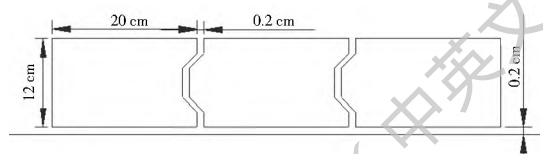


图 2 键槽布置

Fig. 2 Keyway arrangement diagram



图 3 测量传感器布置

Fig. 3 Measuring transducers arrangement

2 底板上举力试验结果

2.1 开孔率 k 对底板上举力的影响

从优化设计的角度出发, 前人提出了多种不同

结构形式的底板,针对本文研究的内容,选取带透水孔底板与带键槽底板作为对比对象。根据文献资料[17],平底板在开孔率 k 为 3.5% 时,板块上举力降低效果最为显著,故在本对比试验之中,开孔率为 3.5%。试验结果如图 4 所示,在不同工况之下,相对比传统形式的平底板,透水孔底板与带键槽底板在不同的工况之下其上举力最大值与标准差分别降低。标准差能反映数据集的离散程度,在图 4 中,工况二标准差比值基本相同说明这两种新型结构可以使上举力值更加集中,降低了瞬时上举力超过板块抗力的概率,从而避免了板块的浮升失稳。

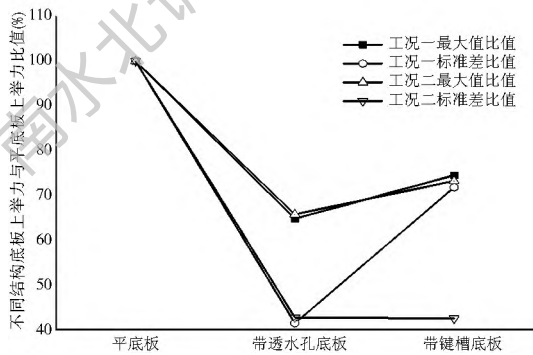


图 4 不同结构形式对底板上举力的影响

Fig. 4 The effects of different forms of structure on the uplift force of the floor

键槽降低上举力的作用机理为:键槽能够将单一板块与周边相邻的板块连接成为受力整体,多个这样的板块形成联动整体,由于瞬时较大上举力作用在独立板块上而产生的集中荷载效应会被联动整体的均化作用削弱,降低了独立板块上举力的波动性,所以脉动上举力会降低。由毛野^[18]的岩基冲刷理论可知,当上举力足够大时底板板块被向上顶起,底板块与底板块之间由于有键槽的存在,其垂向的交接长度较大,所以难以及时的向底板下表面充水,底板下表面的压强减少,上举力减少,底板跌落。在底板下落时,底板下表面的水又因为键槽使得缝隙长度加长而难以畅快的排出,使得板块浮动着。此种防护机制属于被动防护。

透水孔降低上举力的作用机理为:透水底板脉动压力传播路径较不透水底板有所减小,所以脉动压力能更快的传递至整个下表面,透水底板上下表面的脉动压力相位差减小,相当于透水孔减小了不透水底板的有效尺寸,使得透水底板上下表面的动水压差减小,最终能够使整体荷载变小。此种防护机制属于主动防护。

为了研究不同开孔率对带键槽异型结构底板上举力的变化规律,在相同的弗劳德数下,仅改变底板的开孔率,由于顺水流方向键槽的存在,使得在试验

之中相邻的三块板块,受力相互影响,由相关文献^[19]可知以最大上举力作为底板稳定的控制标准是较为安全的,故在分析上举力变化规律时,以三块为一组,取其中的最大值分析。图 5 是某组底板块在相同的弗劳德数下,上举力随底板开孔率变化的变化结果。

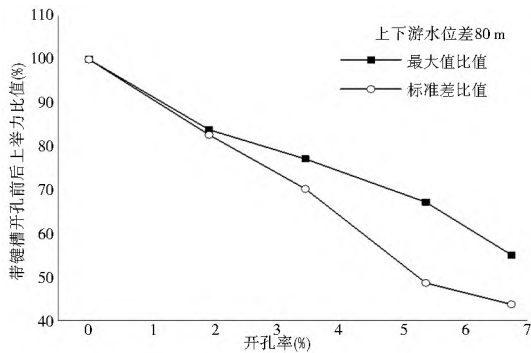


图 5 底板开孔率 k 对上举力的影响

Fig. 5 Effect of floor porosity (k) on the uplift force

从图 5 可以看到,当带键槽的消力塘底板增加透水孔之后,底板上举力与上举力的标准差都随着开孔率的增加而降低,说明此种结构底板能够有效的降低底板上举力与减小上举力的波动性,但这种趋势也随着开孔率增加而在变缓。当开孔率为 3.46% 时,与不开孔底板比较,上举力降低了 22.84%,标准差降低了 29.72%。

带键槽的透水底板,将被动防护与主动防护相结合,其降低上举力原因在于:键槽的存在使得相邻的板块成为受力整体,多板块联动整体的均化作削弱瞬时较大上举力作用在某独立板块上的集中荷载效应,降低了独立板块上举力的波动性,导致脉动能量降低。透水孔的存在,使得底板上下表面的水能畅快的排出,所以在此情况之下,毛野的岩基冲刷理论不再适用。增加透水孔之后,底板上下表面的脉动荷载经过板块间的键槽和透水孔相互传递,使作用在底板表面与底面的脉动荷载发生平均,这样使得底板上下表面的动水压差减少。键槽的均化作用与透水孔的类似于调压井的作用相结合,使得板块的上举力进一步减小。

2.2 上举力概率密度分布与时程图

在水流脉动压力分析中,对脉动幅值的分布特征和计算重要统计特性通常使用概率密度函数来推断。

偏度峰度法是常用的分析研究方法,即求出数据的偏态系数 C_s 和峰度系数 C_E ,从而来比较其正态性,偏态系数 C_s 表示的是概率密度函数不对称性的度量;峰度系数 C_E 为该随机变量的间歇性,峰值的高低和标准情况的偏离程度。 $C_s = 0$; $C_E = 3$,则称随机

变量 x 符合正态分布。以某典型工况为例,不同开孔率下各测点的偏差系数和峰度系数见表 1。

表 1 不同开孔率各测点的偏差系数与峰度系数

Tab. 1 Deviation coefficient and coefficient of kurtosis of the measuring points of different porosities

开孔率 (%)		测点								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	C_S	3.166	2.994	3.663	3.446	3.078	3.560	3.098	3.377	2.870
	C_E	0.039	0.040	-0.054	0.004	0.139	0.245	0.011	0.040	0.013
1.92	C_S	3.324	3.198	3.201	3.204	3.423	3.457	3.284	3.335	3.008
	C_E	0.258	0.141	0.060	0.032	0.040	0.275	0.138	0.070	0.113
3.46	C_S	3.031	3.409	3.194	3.201	3.178	3.217	2.813	3.454	2.967
	C_E	0.074	-0.089	-0.101	0.126	0.310	0.178	0.130	0.132	-0.040
5.38	C_S	3.022	3.271	3.041	3.163	3.112	3.006	3.263	3.222	2.850
	C_E	-0.007	0.142	0.037	0.077	0.131	0.157	-0.032	0.134	0.049
6.75	C_S	3.548	3.114	3.293	3.232	3.156	3.369	3.112	3.129	2.794
	C_E	0.365	-0.010	0.233	-0.025	0.055	0.192	0.049	-0.046	-0.015

从表 1 中可以看出,在带键槽不同开孔率的底板的上举力实测的数据的偏差系数在 -0.101 到 0.365 之间,峰度系数在 2.794 到 3.663 之间,基本符合正态分布,进一步验证,水流脉动压力(荷载)除急变流外基本上服从正态分布规律^[20]。图 6,图 7 分别是典型的带键槽不开孔底板与带键槽开孔透水底板上举力的概率密度分布图。

后的典型测点的时程图。从图可见,在增加透水孔之后,脉动上举力的幅值发生了变化。带键槽底板的脉动上举力的幅值在 -0.7~1.2 之间,增加透水孔之后,脉动上举力的幅值在 ± 0.5 之间,幅值衰减明显,说明增加透水孔之后可以对脉动压力的传播产生影响。

分析其原因在于:板块之间的缝隙内的阻尼会导致脉动压力幅值的衰减,而增设键槽后缝隙的几何形状发生了变化,其几何形状特征对阻尼作用的影响很大。当消力塘在泄水运行时,脉动压力在板块下缝隙层传递,由于存在透水孔,脉动压力会沿透水孔向底板上表面传递的过程之中在孔内振荡衰减,作用机理类似蜂窝降噪,与此同时脉动压力也能够得到及时的释放。两种作用叠加在一起时,进一步减小了脉动上举力的幅值。

2.3 对上举力功率谱密度的影响

功率谱密度 $G(f)$ 反映了信号的功率在频域内随频率 f 的分布。图 9 是典型的带键槽底板和增加了透水孔的带键槽底板的上举力功率谱。在增加透水孔之后,底板的上举力脉动过程仍然属于低频。与未开孔的键槽底板功率谱相比,上举力脉动过程进一步趋近于低频,峰值向前移动,可以看出脉动能量更加集中。平底板的失稳形式经历三个阶段,作用时间短的高频大振幅的脉动能量对其中第一阶段板块间的伸缩缝部分或全部止水破坏与第三阶段与基岩脱落随机出穴起主要作用,其表现为破坏板块间止水、板块与座穴分割、锚筋松动,脉动能量集中且趋于低频就可以减少高频脉动能量作用,从而增加消力塘的稳定性。原因在于增加透水孔之后,对

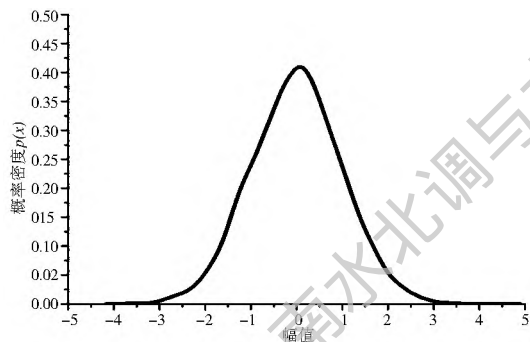


图 6 带键槽底板上举力概率密度分布
Fig. 6 Probability density distribution of the uplift force of the floor with a keyway

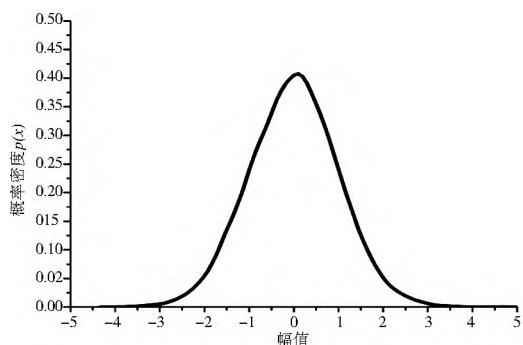


图 7 带键槽透水孔底板上举力密度分布
Fig. 7 Density distribution of the uplift force of the pervious floor with a keyway

图 8 是带键槽的底板增加不同开孔率透水孔之

于脉动压力的传播具有一定的衰减作用,同时透水孔相当于低通滤波器,将脉动上举力的高频部分滤

掉,这样上举力就以低频为主,促使板块出穴的主要动力即是上举力低频、大振幅分量。

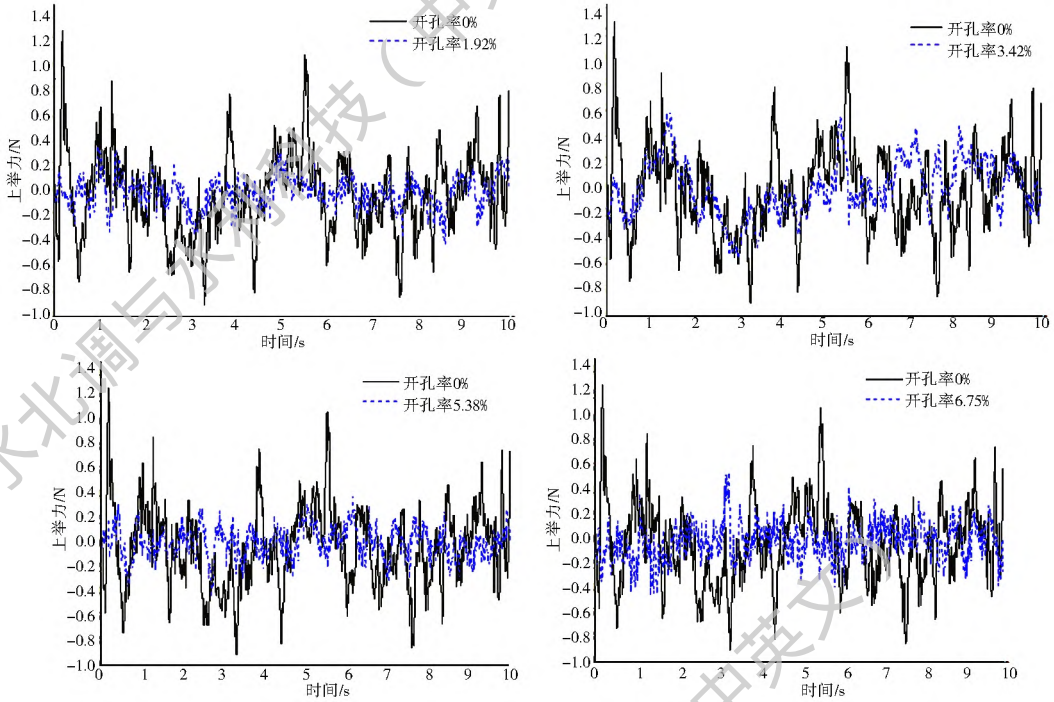


图 8 典型测点不同开孔率下的上举力时程

Fig. 8 Time history of the uplift force at a typical measuring point at different porosities

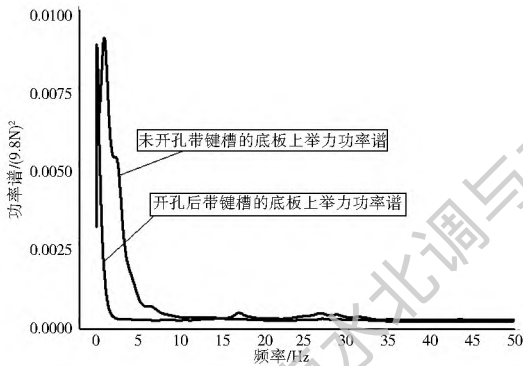


图 9 功率谱比较

Fig. 9 Comparison of power spectrum s

3 结论

本文以向家坝消力塘物理模型试验为基础,研究了带键槽底板在不同开孔率之下上举力特性。得出了下列结论。

(1) 当带键槽的消力塘底板增加透水孔之后,底板上举力得到有效降低。当开孔率为 3.46% 时,降低效果最为明显。

(2) 通过对典型工况不同开孔率之下底板上举力的偏差系数与峰度系数的比较,得出带键槽透水孔的脉动上举力的概率密度分布基本符合正态分布的结论。

(3) 通过对典型工况下不同开孔率底板上举力

的时程图的比较,透水孔能够使带键槽的底板脉动上举力的幅值降低。

(4) 通过对功率谱密度的对比,增加透水孔之后,带键槽底板的脉动上举力更加的趋向于低频,脉动能量更加集中。

参考文献(References):

- [1] 练继建. 高坝泄洪安全关键技术研究[J]. 水利水电技术, 2009(8): 80-88. (LIAN J r jian. Key technologies for safety of high dam flood discharge[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009(8): 80-88. (in Chinese))
- [2] 练继建, 杨敏, 安刚, 等. 反拱型水垫塘底板结构的稳定性研究[J]. 水利水电技术, 2001(12): 24-26, 76. (LIAN J r jian, YANG Min, AN Gang, et al. Study on stability of counter arch slab in plunge pool[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001(12): 24-26, 76. (in Chinese))
- [3] 杨敏, 刘鹏. 反拱水垫塘衬砌结构整体稳定性研究[J]. 水利学报, 2005(10): 1219-1223, 1229. (YANG Min, LIU Peng. Study on integral stability of slab in inverted arch type plunge pool[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(10): 1219-1223, 1229. (in Chinese))
- [4] 马斌, 练继建, 杨敏. 水垫塘反拱型底板衬砌结构的非线性分析[J]. 天津大学学报, 2007(5): 536-541. (MA Bin, LIAN J r jian, YANG Min. Nonlinear analysis of the counter arched slab in plunge pool[J]. Journal of Tianjin University, 2007(5): 536-541. (in Chinese))
- [5] 杨敏, 练继建, 王继敏, 等. 水垫塘反拱形底板局部稳性分析

- [J]. 天津大学学报, 2004(7): 605-609. (YANG Min, LIAN Jijian, WANG Jirmin, et al. A study on local stability of counter-arched slab in plunge pool[J]. Journal of Tianjin University, 2004(7): 605-609. (in Chinese))
- [6] 孙建, 陈长植. 平底水垫塘底板失稳的数值模拟[J]. 水利学报, 2002(11): 84-88. (SUN Jian, CHEN Changzhi. Numerical simulation for stability failure of plunge pool floor slabs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(11): 84-88. (in Chinese))
- [7] 侯庆国. 水垫塘拱底板单块体上举力的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(7): 88-90. (HOU Qingguo. Experimental research on the uplift force of single blocks of counter-arched slabs in plunge pool[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(7): 88-90. (in Chinese))
- [8] 张建民, 杨永全, 王玉蓉, 等. 水垫塘底板上举力的数值研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003(1): 63-67. (ZHANG Jianmin, YANG Yongquan, WANG Yurong, et al. Numerical solution of uplift on floors of plunge pool[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003(1): 63-67. (in Chinese))
- [9] 许翔, 杨敏. 挑跌流水垫塘透底板水动力特性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 15-20. (XU Xiang, YANG Min. Experimental study on hydrodynamic loads of the pervious slabs in plunge pool[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(2): 15-20. (in Chinese))
- [10] 刘沛清, 高季章. 超短型水垫塘底板上脉动上举力试验研究[J]. 水利学报, 1998(4): 2-7. (LIU Peiqing, GAO Jizhang. Experimental investigation of fluctuating uplift acting at the bottom of a short plunge pool[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(4): 2-7. (in Chinese))
- [11] 彭彬, 张建海, 蒙承刚, 等. 右江百色重力坝消力池结构缝键槽布置方案优化研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004(1): 19-23. (PENG Bin, ZHANG Jianhai, MENG Chenggang, et al. Optimization of key groove setting for Baise Stilling Basin[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2004(1): 19-23. (in Chinese))
- [12] 许翔. 水垫塘板块结构特性对底板稳定性的影响分析[D]. 天津: 天津大学, 2012. (XU Xiang. Analysis of the influence of structural characteristics of plunge pool plates on base plate stability[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese). (in Chinese))
- [13] 马斌, 练继建, 刘喜珠. 带键槽消力塘底板的安全性分析[J]. 水利水电技术, 2009(1): 66-70. (MA Bin, LIAN Jijian, LIU Xizhu. Safety analysis on bottom slab of plunge pool with key grooves[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009(1): 66-70. (in Chinese))
- [14] 哈焮文. 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. Study on the hydrodynamic load and the pulsation of the permeable apron[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(2): 14-26. (in Chinese))
- [15] 张少济, 杨敏. 消力塘透底板脉动压力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 85-89, 94. (ZHANG Shaoji, YANG Min. Experimental study on characteristics of pressure fluctuations on the pervious bottom slab of a plunge pool[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 85-89, 94 (in Chinese).)
- [16] 杨敏, 彭新民, 崔广涛. 水垫塘底板的试验仿真模拟研究[J]. 水利水电技术, 2002(3): 40-42, 57. (YANG Min, PENG Xinmin, CUI Guangtao. Study on experiment simulation of slabs in plunge pool[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002(3): 40-42, 57. (in Chinese))
- [17] 杨敏, 孙勉. 水垫塘透底板上举力试验研究[J]. 水力发电学报, 2007(6): 88-90, 95. (YANG Min, SUN Mian. Experimental study on the uplifting force of the pervious slabs in plunge pool[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(6): 88-90, 95. (in Chinese))
- [18] 毛野. 有关岩基冲刷机理的探讨[J]. 水利学报, 1982(2): 46-54. (MAO Ye. Study on Mechanism of scour on Rock Beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982(2): 46-54. (in Chinese))
- [19] 练继建, 杨敏. 高坝泄流工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 30-30. (LIAN Jijian, YANG Min. Hydrodynamics for High Dam[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008: 30-30. (in Chinese))
- [20] Freedman D, Diaconis P. On the histogram as a density estimator: L2 theory[J]. Probability Theory and Related Fields, 1981, 57(4): 453-476.

(上接第 66 页)

- [19] 刘洪斌, 王伟, 魏朝富, 等. AR 模型在土壤水分动态模拟中的应用[J]. 山地学报, 2004, 21(1): 121-125. (LIU Hongbin, WU Wei, WEI Chaofu, et al. Soil water dynamics simulation by autoregression models[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 21(1): 121-125. (in Chinese))
- [20] Tang J, Zhao X J. An Enhanced Opposition-based Particle Swarm Optimization [C]. Intelligent Systems, 2009 WRI Global Congress (GCIS 2009) [A], Xiamen, China, 2009: 149-153. DOI: 10.1146/10.1109/GCIS.2009.56
- [21] 唐俊. PSO 算法原理及应用[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(2): 213-216. (TANG Jun. Principle and Application of PSO Algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(2): 213-216. (in Chinese))
- [22] Salisbury J I, Wimbush M. Using modern time series analysis techniques to predict ENSO events from the SOI time series [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2002, 9(3/4): 341-345. DOI: 10.5194/npg-9-341-2002