水　利　学　报

2011年6月　SHUILI　XUEBAO　第42卷　第6期

文章编号:0559-9350(2011)06-0666-06

反拱透水底板拱端推力与板块位移研究

张少济，杨　敏，孙　勉

（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：本文基于模型试验并结合数值模拟研究了反拱透水底板的拱端推力与板块位移特性。结果表明，与不透水底板相比，透水底板可以显著的减小拱端推力，并且拱端推力与板块位移均随开孔率的增加而减小，从而可以提高反拱底板的稳定性。结合拱端推力的频谱分析可知，开孔后拱端推力的脉动能量降低，并且功率谱重心向低频移动。

关键词：水利水电工程；反拱水垫塘；透水底板；拱端推力；板块位移

中图分类号：TV135.2　　**文献标识码：**A

1　研究背景

狭窄河谷中高拱坝下游的消能防冲是影响大坝稳定性的一个关键问题。目前通常采用的工程措施是坝后设置水垫塘，在水垫塘内以三元水跃旋滚消杀水流能量，确保水流与下游合理衔接。但是，迄今为止，关于水垫塘防护结构稳定性的研究都局限于一种“被动防护”的模式，相应的措施包括设抽排、加锚固，或加大结构尺寸。然而，由于技术上的原因，锚固力不可能无限制地加大；而增加底板厚度的效果也只能是事倍功半。为此，有关学者对水垫塘防护结构的研究作了一些工作，力图从根本上改变防护的理念。20世纪60年代，北京水利水电科学研究院的哈焕文曾研究了消力池透水底板的水力特性[1]。崔莉等[2]研究表明护坦板浮升翻转失稳的充分条件还包括护坦板底部的受力情况。杨敏等[3-5]对反拱形底板的稳定性做了专门的研究。索风营水电站水垫塘的透水底板目前已经施工。本文通过模型试验和数值模拟，研究开孔率对反拱形底板拱端推力与板块位移的影响，为水垫塘防护结构“主动防护”模式在工程中的应用提供科学参考。

反拱水垫塘是利用河床基岩的天然形状将底板做成反拱形，利用拱形结构的力学特性，将射流冲击荷载传递到两岸山体或拱座，充分发挥混凝土材料的抗压特性和拱结构的超载能力。崔广涛等[6]通过力学原理分析和水垫塘底板块“拉拔”试验研究得出：反拱底板的抗浮稳定安全系数比平底板大得多，反拱形水垫塘是高拱坝坝身泄洪消能的合理选择；练继建等[7]、刘沛清[8]、彭新民等[9]分别对反拱形底板的整体稳定性进行了研究，得出结论：反拱底板的整体稳定性依赖于拱座整体稳定，即拱形底板的稳定条件已不是单块浮升失稳控制，而是以其拱座稳定为控制条件。因此，在反拱形透水底板研究中，主要研究拱端推力与板块位移随板块开孔率的变化规律。

2　试验模型与数值模型简介

某双曲拱坝最大坝高250m，电站装机容量6×700MW，为Ⅰ等大(1)型工程。坝址区为高山峡谷地貌，两岸坡陡峻。坝身泄洪建筑物由3个表孔和2个深(中)孔组成，分两层分别布置于坝身不同坝

收稿日期：2009-06-09

基金项目：国家自然科学基金(50539060，50779044)；国家杰出青年基金资助项目(50725929)

作者简介：张少济(1983-)，男，博士，主要从事高坝泄流安全研究。E-mail：zhangshaoji0823@yahoo.com.cn

段，坝后主要消能建筑物为水垫塘和二道坝。坝址的地形、地质条件决定了水垫塘适宜采用反拱形底板衬砌形式。反拱形水垫塘长度约为218.3m，横剖面按圆弧设计，从上游到下游等宽布置，沿水流方向15m为一段分永久缝。底板最低点高程2 215.0m，每块平均宽15.83m。反拱形水垫塘横剖面如图1所示，图中高程以m计，其它数据单位为cm。

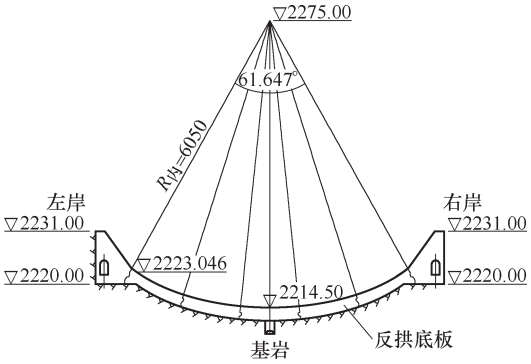

图1　水垫塘横剖面图

试验用模型几何比尺为1:100。所有板块间和板块与基岩间都留1mm左右的间隙，以保证动水压力传递的相似性。拱端推力传感器采用自制的测力传感器，根据射流冲击荷载引起底板拱圈结构变形测量反拱拱圈的推力。试验中，固定上游水位(上游水位为2 450m)，改变下游水位和底板的开孔率k(底板上孔洞的面积和板块表面积比值的百分数)，测量冲击区的拱端推力随开孔率的变化。

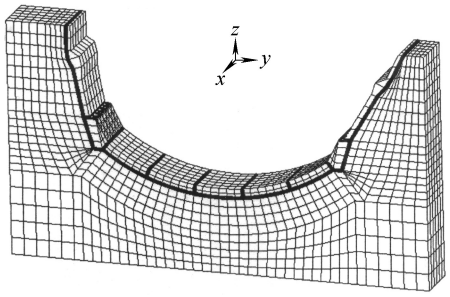

图2　反拱水垫塘有限元模型

数值计算中反拱水垫塘衬砌结构有限元模型如图2所示。基岩宽15m，厚25m，板块、拱座、边坡、基岩间允许发生滑动变形，按接触分析(图中黑线表示接触)。混凝土间摩擦系数0.5，基岩和混凝土间摩擦系数0.55。由于基岩选取的宽度不大，因此只加垂直河向的约束，地基底表面进行全约束。材料参数如表1。岩体采用六面体单元。模型共4 104个3D单元，节点总数为7 798个，30个接触面，15个接触对。

表1　材料属性

材料	属性
基岩	弹性材料，弹模50GPa，变形模量12GPa，泊松比0.2，ρ=2 750kg/m^3
底板、边坡	弹性材料，弹模28GPa，泊松比0.167，ρ=2 400kg/m^3
拱座	弹性材料，弹模30GPa，泊松比0.167，ρ=2 400kg/m^3

底板开孔后其材料属性不变，但是由于底板有一定曲率和模型中存在接触，建模将无法进行。考虑到底板的孔洞是均匀布置的，且底板上所受的上举力垂直于其表面，可以认为底板在沿拱圈方向上的刚度是相同的，杨敏等[10]在反拱透水底板水动力特性研究中利用相同横截面的实心底板来代替透水底板。用悬臂梁的挠度计算来确定等效后底板的弹性模量。本文同样采取这种方法处理。

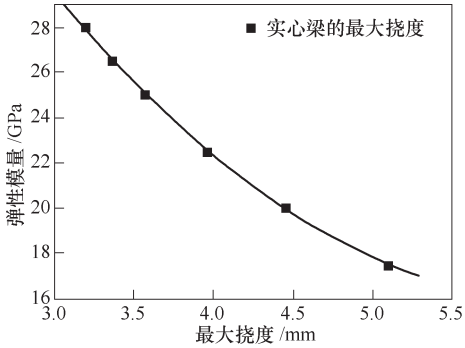

图3　实心梁弹模和最大挠度的关系

悬臂梁尺寸为12m×4m×120m，梁的长度相当于10个12m×4m×12m底板连接的长度。在其悬臂端施加10kN的集中力，分别计算实心梁和开孔梁的最大挠度，算得的实心梁弹模和最大挠度的关系如图3所示，同时计算不和实心梁相同材料属性的开孔梁的最大挠度，并查出对应的此开孔率下的实心梁的弹模，来作为代替透水梁的实心梁的等效弹模。

通过此方法得出，开孔率k=3.14%、k=5.94%、k=9.62%的透水底板的等效弹模分别为26.4GPa、24.8GPa和22.8GPa，而其等效密度分别为2 325kg/m^3、2 257kg/m^3、2 169kg/m^3。在透水底板建模中，边坡、拱座和地基的材料属性和不透水的相同。将模型实测5条上举力时间过程线分别施加于对应底板的下表面(上举力时间过程线如图4所示)来计算不同开孔率下底板的拱端推力与板块位移。

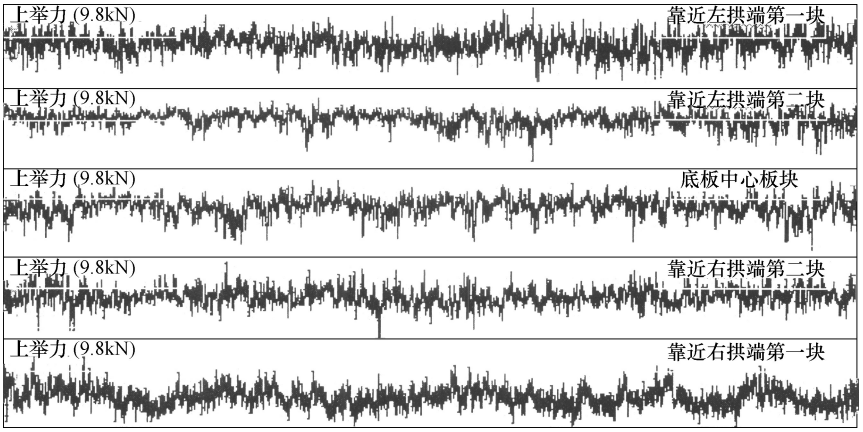

图4　上举力时间过程线

3　拱端推力结果分析

3.1　拱端推力与板块开孔率的关系　分别通过模型试验和数值模拟两种方法对反拱形透水底板的拱端推力随开孔率变化而变化的规律进行了研究。模型试验中，保证相同的水力条件下只改变拱圈上透水底板的开孔率，研究水垫塘冲击区拱圈的拱端推力随板块开孔率的变化规律；数值模拟分别计算了不透水反拱形底板和开孔率 k 分别为3.14%、5.94%以及9.62%时的拱圈拱端推力时间过程。图5给出了反拱形水垫塘内冲击区拱端推力随板块开孔率的变化结果。图中纵坐标表示开孔后拱端推力与开孔前的比值，图中数据包含试验数据和数值模拟数据。

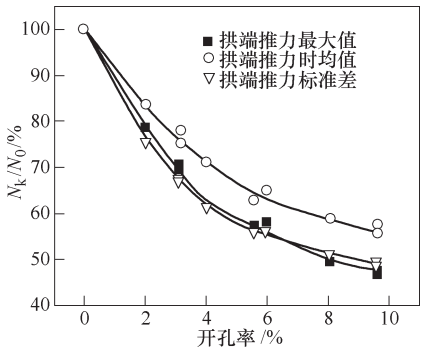

图5　开孔率与拱端推力的关系

从图中可以看出，在反拱拱圈上开孔能够有效的降低拱端推力。拱端推力随板块开孔率的增加而减小，且减小的趋势逐渐变缓。拱端推力最大值和标准差随板块开孔率减小的幅度比拱端推力时均值要大。分析产生这一变化规律的原因：作用在底板上下表面的动水压力差形成了上举力，同一拱圈内各板块的上举力通过拱作用传递到拱端形成拱端推力。当板块上开孔后，作用在底板的下表面脉动荷载经过板块间的缝隙和透水孔相互传递，由于底板上下表面的脉动荷载相位差减小，结果使其上下表面的动水压强差减小，从而减小了底板的上举力，进而减小了拱圈拱端推力。此结果与透水底板下表面脉动压力传播特征相吻合：透水底板下表面其它各测点与缝隙处测点互相关系数较不透水底板有所减小(见图6，图中符号：x 为测点到缝隙处测点的距离，L 为板块尺寸)。

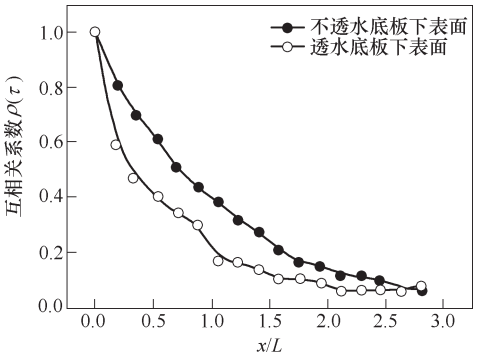

图6　不透水底板与透水底板脉动压力互相关系数比较

3.2　拱端推力统计参数比较　在板块间以及板块和地基间止水破坏的条件下，泄洪期间水垫塘底板上下表面就会产生动水荷载。由于各板块间动水荷载的随机性，使得整个反拱结构上的上举力荷载分布很不均匀，拱端推力是拱圈内所有板块上举力综合作用的结果。底板开孔后，拱端推力信号会有所变化，本节研究拱端推力信号的统计参数随底板开孔率的变化规律。

表2给出了模型实测拱端推力信号的峰态和偏态系数随板块开孔率的变化情况，可以看出随着开孔率的增加，拱端推力信号的峰态系数C_E更接近于3、偏态系数C_S更接近于0，即随着开孔率的增加，拱端推力信号更接近正态分布。图7给出了反拱底板开孔前后的模型拱端推力功率谱。图中可以知道：开孔后拱端推力仍属于低频脉动；脉动能量比开孔前的明显降低且功率谱重心向低频移动。其可能的原因是：反拱底板开孔后，底板上下表面的动水压强差减小，致使作用在底板上的动水荷载减小，从而传递到拱端的推力脉动能量降低。

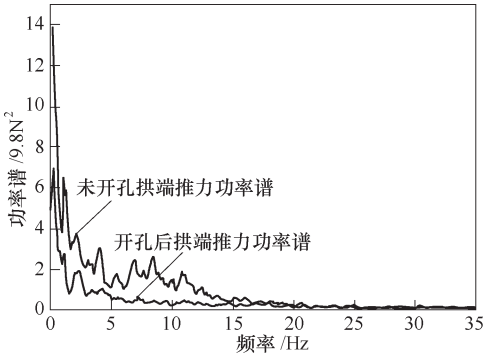

图7　模型实测拱端推力功率谱

表2　实测拱端推力信号的峰态系数与偏态系数

开孔率/%	0	2.01	3.14	4.03	5.58	8.04	9.62
C_E	7.78	4.26	3.49	3.6	3.53	3.38	3.36
C_S	1.63	0.58	0.5	0.07	0	−0.23	0.19

4　板块动位移结果分析

4.1　板块位移与板块开孔率的关系　水垫塘内各板块受到冲击荷载的作用会发生不同程度的振动。过大的振动会使底板块脱离附近板块和锚筋的约束而出穴，这将是灾难性的。因此研究板块在水动力荷载作用下的振动特性十分必要。本节以有限元模型为基础，在板块底板下表面施加上举力时间过程进行动力分析，计算出泄洪工况下水垫塘内最危险拱圈(承受上举力最大的拱圈)各板块的位移特性。拱圈上的板块从左侧到右侧(顺河向观察)，编号依次为1、2、3、4和5。

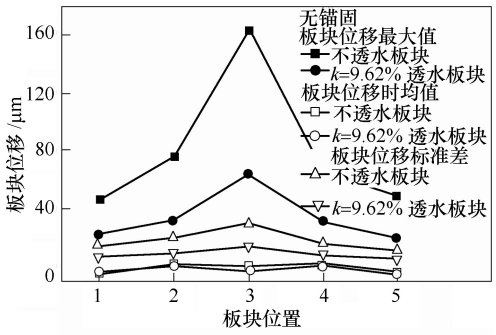

图8　透水与不透水各板块位移特性对比

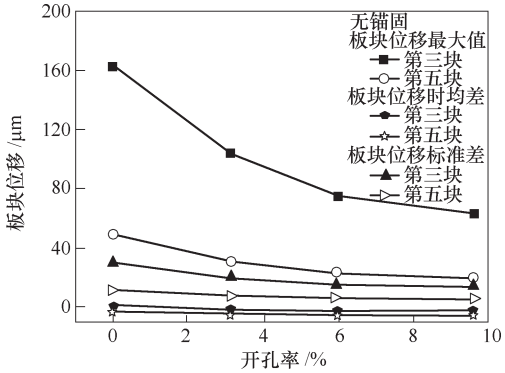

图9　透水板块位移与开孔率的关系

在动水荷载的作用下，反拱形水垫塘底板透水前后板块动位移的变化见图8、9所示。可以看出，在水动力荷载作用下，各板块位移随着开孔率的增大而减小。板块位移最大值和时均值随开孔率的增大变化较大，由于板块的时均值绝对值较小，因此开孔对板块位移时均值的影响不大。无锚固，开孔率为9.62%拱圈跨中位移(即：第三板块位移)最大值、标准差比不透水底板的分别减小了约60.9%、52.4%，而对时均值的影响较小，看出开孔对板块位移的脉动量的影响较大；同拱圈内各板块的位移，跨中板块的位移最大，向两岸逐渐减小。

4.2　板块位移统计参数比较　将板块位移的峰态系数和偏态系数进行分析，结果见表3。由统计参数可以看出：反拱底板振动位移接近正态分布，且底板开孔后，板块位移更接近正态分布。

表3　板块位移统计参数

板块形态	统计参数	无锚固					有锚固				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
不透水	C_s	0.19	0.20	0.65	0.56	0.44	0.21	0.20	0.32	0.52	0.48
底板	C_E	3.36	3.59	6.27	3.40	4.41	3.31	3.61	4.58	3.32	4.12
k=9.62%	C_s	0.23	0.28	0.35	0.70	0.40	0.23	0.19	0.11	0.56	0.37
透水底板	C_E	3.42	3.77	4.30	3.35	3.97	3.30	3.79	3.54	3.15	3.78

5　透水底板抗浮稳定性随开孔率变化分析

对于消力塘来说，在稳定计算模式中一是考虑荷载，二是考虑结构本身的抗力(抵抗荷载的能力)。而荷载取决于消力塘的运行工况，在稳定性计算中，一般考虑两种最不利荷载状况作为稳定的设计和评价的标准。消力塘正常运行时通常考虑的是止水破坏且排水失效，而检修放空工况下则是以止水完好且排水失效作为稳定控制条件。崔广涛等[6]根据板块受力平衡条件(板块受力情况如图10所示)推导出反拱底板板块稳定安全系数表达式：

$$K_c = \frac{G_0 + 2N_0(\sin\beta + f\cos\beta)}{L_0} \tag{1}$$

式中：G_0为浮重；N_0为轴向力；L_0为上举力；f为摩擦系数(图10中F_0为板块间摩擦力)。

此外，杨敏等[5]研究了底板上举力随开孔率的变化规律，图11给出了相同上下游水位差、同工况下底板上举力随开孔率的变化规律(图中纵坐标表示底板开孔后上举力与开孔前的比值)。从图中可以看出，底板开孔能够有效的降低底板上举力，但是作用在底板的上举力并不是随底板开孔率的增加而无限制地降低。开孔率在3.5%以前，随开孔率的增大，板块上举力降低的比较显著；3.5%以后，随着开孔率的继续增加，底板上举力降低的趋势变缓。

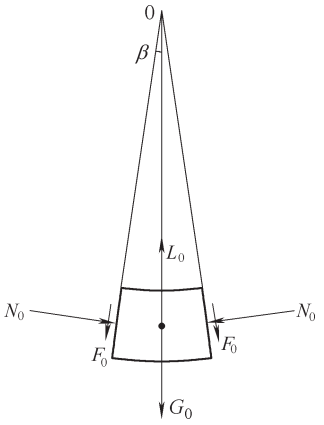

图10　反拱消力塘板块受力分析

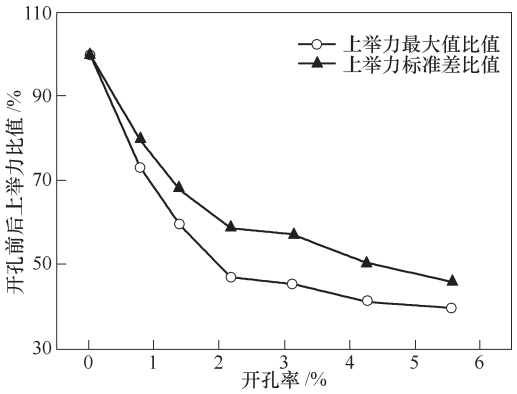

图11　开孔率对底板上举力的影响

由以上分析可以看出，板块稳定安全系数公式中，板块所受轴向力与摩擦力随开孔率的变化不会发生变化，而随着开孔率的增加，板块所受浮重有所减小，当开孔率为1.0%、3.14%、5.94%时，浮重则分别也同样减小1.0%、3.14%、5.94%；但是板块所受上举力的减小幅度分别大概减小35%、45%、60%。因此，随着开孔率的增加，板块稳定安全系数是增加的。然而，与上举力相似，随开孔率的增加，板块抗浮稳定性的增加不是无限制的，开孔率在3.5%以前，随开孔率的增大，板块抗浮稳定性增加的比较显著；3.5%以后，随着开孔率的继续增加，板块抗浮稳定性增加的趋势变缓。

6 结语

本文以模型试验为基础并结合有限元动力响应分析，对反拱形水垫塘底板开孔前后拱端推力和板块振动位移进行研究，得出以下结论：

(1)在泄洪期间，拱端推力随着拱圈内底板开孔率的增加，拱端推力的减小并不是线性的，而是减小的趋势逐渐变缓；当开孔率为3.14%、5.94%、9.62%时，拱端推力分别减小约25%、40%与50%；

(2)板块的振动位移均随开孔率的增加而减小，且减小趋势逐渐变缓；无锚固，开孔率为9.62%拱圈跨中板块位移最大值、标准差比不透水底板分别减小了约60.9%、52.4%；

(3)开孔后拱端推力的脉动能量降低，并且功率谱重心向低频移动；并且随开孔率的增加，反拱底板板块本身的抗浮稳定性是增加的，但开孔率在3.5%以前，随开孔率的增大，板块抗浮稳定性增加的比较显著；3.5%以后，随着开孔率的继续增加，板块抗浮稳定性增加的趋势变缓。

参 考 文 献：

[1] 哈焕文．透水护坦动水荷载及其脉动的研究[J]．水利学报，1964(2)：14-26．

[2] 崔莉，张廷芳．射流冲击下护坦板失稳机理的随机分析[J]．水动力学研究与进展，1992，7(2)：212-21．

[3] 杨敏，练继建．水垫塘反拱形底板体型研究[J]．水力发电学报，2002，21(4)：45-50．

[4] 杨敏，崔广涛．水垫塘底板稳定性控制指标的探讨[J]．水利学报，2003，34(8)：6-10．

[5] 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．

[6] 崔广涛，彭新民，杨敏．反拱型水垫塘-窄河谷大流量高坝泄洪消能工的合理选择[J]．水利水电技术，2001，32(12)：1-3．

[7] 练继建，杨敏，安刚，胡明罡．反拱型水垫塘底板结构的稳定性研究[J]．水利水电技术，2001，32(12)：24-26．

[8] 刘沛清．高拱坝下游水垫塘底板块稳定性设计[J]．水利学报，1999(2)：5-12．

[9] 彭新民，王继敏，崔广涛．拱坝水垫塘拱形底板受力与稳定性实验研究[J]．水力发电学报，1999(2)：52-59．

[10] 杨敏，李萍，孙勉．反拱透水底板水动力特性研究[C]//第三届全国水力学与水利信息学进展，2007，284-288．

Study on the thrust at springer and plate displacement of the pervious slabs in inverted-arch plunge pool

ZHANG Shao-ji, YANG Min, SUN Mian

(*Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: The hydrodynamic characteristics of pervious slabs in inverted-arch plunge pool were studied by model test and numerical simulation. Compared with impervious slabs, the thrust at springer acting on the pervious slabs can be reduced obviously. The thrust at the springer and plate displacement decrease with the increase of the opening rate of slabs. Therefore, the stability of previous inverted-arch slabs is improved. The frequency spectrum analysis of the thrust at springer show that the energy fluctuation of thrust at springer reduced when previous holes on the slab are constructed and the barycenter of power spectrum transfer to lower frequency.

Key words: hydraulic and hydro-power engineering; inverted-arch plunge pool; pervious slab; thrust at springer; plate displacement

（责任编辑：李福田）