

平底型与反拱型水垫塘动水荷载对比试验研究

徐建荣¹, 彭育¹, 辜晋德², 王宇², 章道生³

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210006)

摘要: 水垫塘结构是影响高坝泄洪消能的关键, 优化水垫塘底板型式对有效地增加底板稳定性和减小动水荷载至关重要。平底型和反拱型底板作为两种常见的水垫塘结构型式被业界广泛采用, 但关于两者的动水荷载特性对比研究尚不多见。基于白鹤滩水电站 1:50 整体模型, 采用物理模型试验的方法对比了平底型和反拱型水垫塘在时均压强和脉动压强方面的特性。结果表明: 反拱型水垫塘底板的时均压强峰值小于平底型, 来流方向上反拱型水垫塘底板的时均压强低谷值小于平底型; 两种型式水垫塘脉动压强峰值差异较小, 反拱型底板整体脉动压强大于平底型, 但反拱型脉动压强梯度小于平底型。

关键词: 水工模型试验; 平底型水垫塘; 反拱型水垫塘; 动水荷载

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0131-05

Comparison of hydrodynamic load characteristics between flat and inverted arch plunge pools

XU Jianrong¹, PENG Yu¹, GU Jinde², WANG Yu², ZHANG Daosheng³

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Nanjing Water Planning and Designing Institute Corporation Limited, Nanjing 210006, China)

Abstract: The structure of plunge pool is a key factor influencing energy dissipation of high dams, and the optimization of bottom plate type is crucial to effectively increasing the stability of the bottom plate and decreasing hydrodynamic load. Flat bottom and inverted arch types are widely used as two common plunge pools; however, the comparative study of hydrodynamic load characteristics between these types is rare. Based on the 1:50 integral model of Baihetan Hydropower Station, the characteristics of average pressure and fluctuating pressure of flat and inverted arch plunge pools are compared using physical model test. The results show that the peak value of average pressure of inverted arch is smaller than that of flat bottom, so is the lowest value in flow direction. The difference of peak values of fluctuating pressure is negligible. The overall pressure fluctuation of inverted arch is larger than that of flat bottom; however, the gradient of the fluctuating pressure of inverted arch is smaller than that of flat bottom.

Key words: hydraulic model test; flat bottom plunge pool; inverted arch plunge pool; hydrodynamic load

1 研究背景

目前高水头、大流量的水利工程建设方兴未艾, 泄洪消能仍然是高坝工程中的一个重要问题^[1-2]。高水头大坝喷射出的高速射流在冲击下游岩质河床

时产生冲刷和侵蚀, 从而有可能影响大坝本身的稳定性^[3]。水垫塘设置在大坝下游, 可缓冲下泄水流的射流冲击作用并消散入水能量, 特别适用于大流量、大功率泄洪工况^[4]; 射流产生的冲击压强作用于水垫塘底部, 并通过岩石裂隙内部传递到岩体节

收稿日期: 2020-05-26; 修回日期: 2020-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401705); 中国博士后科学基金项目(2019M661883); 南京水利科学研究院基金项目(Y120008)

作者简介: 徐建荣(1964-), 男, 江苏苏州人, 教授级高级工程师, 研究方向为水利水电工程。

通讯作者: 王宇(1989-), 男, 山东济南人, 博士, 研究方向为工程水力学。

理处,易造成水垫塘底部的岩石块体隆升和失稳^[5]。因此,水垫塘防护结构的稳定性不仅是水利工程安全领域的热点问题,也是水电工程建设中需要解决的关键技术问题。

考虑基岩和局部地质特征,优化水垫塘几何形状,提高其抗失稳能力迫在眉睫^[6]。当前,水垫塘的底板几何型式主要有平底底板、反拱底板、透水底板和带键槽底板等型式,其中平底型和反拱型底板因具有超载能力大、稳定性好、开挖量小等优点被业界认可^[7]。传统的平底型水垫塘在国内外各大水电工程中得到了广泛应用,而格鲁吉亚 Inguri、西班牙 Susqueda、中国拉西瓦等水电站工程中采用反拱型水垫塘,也凸显了其设计优势^[8]。

平底型水垫塘底板是平底块状结构,多为矩形或梯形,板块间为垂直或平行的缝隙,并加设止水设施;而反拱型水垫塘可依据山坡走势进行设计和施工,由于反拱型结构可将荷载传递至拱端,因此从防护和结构稳定的角度看,反拱型底板具有诸多优点^[9]。目前,对于平底型水垫塘的研究主要针对水流流态、底板稳定性等方面,而脉动压强引起上举力变化或许是板块失稳破坏的重要原因^[10-11]。对于反拱型底板,除常规水力和结构特性外,业界主要关注其特有的拱端力和反拱失稳破坏机制等^[12-13]。

从国内外研究进展来看,当前主要采用有限元等数值分析的方法研究不同反拱控制参数对反拱型底板稳定性的影响^[14-17],对于平底型和反拱型底板的对比研究则重点关注水流流态^[18]和底板结构稳定性^[19]等方面;事实上,水垫塘动水荷载作为影响底板结构稳定的主要参数,也是影响坝身泄水建筑物设计的重要指标^[20-21]。目前,有关不同型式水垫塘动水荷载比较的文献尚不多见,在时均和脉动压

强方面做进一步对比是必要的。

本文采用白鹤滩水利枢纽 1:50 大尺度整体物理模型试验,基于模型试验数据对比了平底型和反拱型水垫塘在不同来流工况下时均压强和脉动压强的异同,分析了两种型式水垫塘动水荷载作用机制的差异,为相关设计提供参考。

2 工程概况

白鹤滩水利枢纽工程拦河坝为混凝土双曲拱坝,坝顶高程 834.0 m,最大坝高 289.0 m。泄洪消能设施由坝身 6 个表孔(14.0 m×15.0 m)、7 个深孔(5.5 m×8.0 m)及坝体下游长约 400 m 的水垫塘、二道坝组成。水垫塘二道坝设为重力坝型式,上游坡面坡度为 1:0.6,下游坡面坡度为 1:0.8,二道坝坝顶高程 602.0 m,坝顶宽度 8.0 m,坝高 42.0 m。

由于坝下游河谷为不对称 V 型(左缓右陡),为了使枢纽拱坝线布置适应于坝址区下游河道地形的特点,水垫塘底板中心线与坝身孔口溢流中心线平行并右移 11.4 m,水垫塘横断面亦根据地质条件为不对称布置。

白鹤滩水利枢纽工程平底型和反拱型两种方案水垫塘横剖面图如图 1 所示。平底型水垫塘断面型式为复式梯形,底板顶面高程为 560.0 m,底板厚 4.0 m,底板水平宽 84.8 m,两边分别以圆弧与边墙相衔接,左侧圆弧半径为 35.0 m,右侧圆弧半径为 25.0 m。左岸边墙坡度为 1:1.0,右岸 582.0 m 高程以下坡度为 1:0.6,582.0 m 高程以上坡度为 1:0.4;左、右岸各在 582.0、604.0 m 高程处设一条 5.0 m 宽的马道,582.0 m 高程以下边墙厚度为 4.0 m,582.0 m 高程以上为 3.0 m。水垫塘顶高程为 635.0 m,水垫塘顶宽 210.0 m。

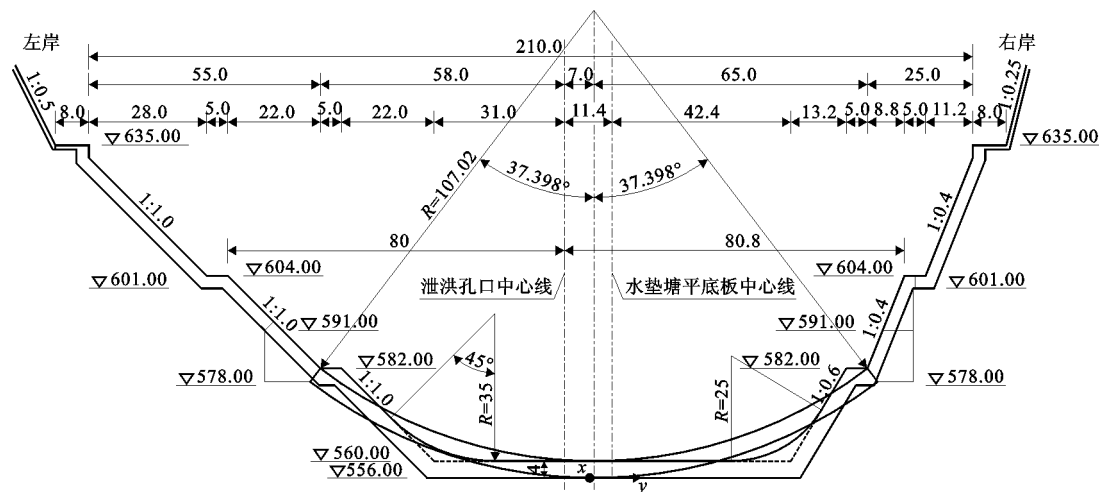


图1 白鹤滩水利枢纽工程平底型和反拱型两种方案水垫塘横剖面图(单位:m)

平底型与反拱型水垫塘布置的主要差别在于582.0 m高程以下部分,而582.0 m高程以上部分不变。反拱底板最低点顶面高程为560.0 m,底板厚4.0 m,反拱中心角为 74.8° ,反拱底板中心线偏离溢流中心线7.0 m,反拱半径为107.02 m,两边分别以圆弧在582.0 m高程与边墙相衔接。

3 试验模型与方法

建立白鹤滩水利枢纽1:50大尺度整体物理模型,模型布置见图2。以反拱底板中心线与底板的交点为坐标原点,顺水流方向为 x 轴,垂直水流指向右岸方向为 y 轴。在测点布置方面,平底型水垫塘时均压力测点 x 向间距为5.0 m, y 向间距为6.0 m(均为原型尺寸,下同),并且在水舌冲击区进行了局部加密,即 x 向间距为2.5 m, y 向间距为3.0 m;在水流流动范围内,反拱型水垫塘以 7° 圆心角为间距布置了19排测点。

试验观测了校核工况(上游水位832.34 m,下游水位627.41 m)、设计工况(上游水位827.83 m,下游水位623.45 m)和消能设计工况(上游水位825.00 m,下游水位619.82 m)下两种型式的水垫塘时均压强和脉动压强。时均压强采用测压管量测,脉动压强数据采用脉动压强传感器(宝鸡华强传感测控有限公司生产)采集,传感器量程为0~

3 m,电源24 Vdc,输出电压为0~5 V,精度0.05 m。



图2 白鹤滩水利枢纽工程试验模型布置

4 试验结果与分析

4.1 两种型式水垫塘时均压强对比

试验量测了水垫塘底板各测点的时均压强数据,结果表明,校核工况下两种型式底板时均压强峰值均出现在 $y=0$ 部位;设计工况下两种型式底板时均压强峰值均出现在 $y=15$ m部位。为方便表示,图3绘制了校核工况($y=0$)和设计工况($y=15$ m)两种型式水垫塘底板的时均压强沿水流方向分布;图4给出了校核工况和设计工况下两种底板型式时均压强横向(y 方向)分布。

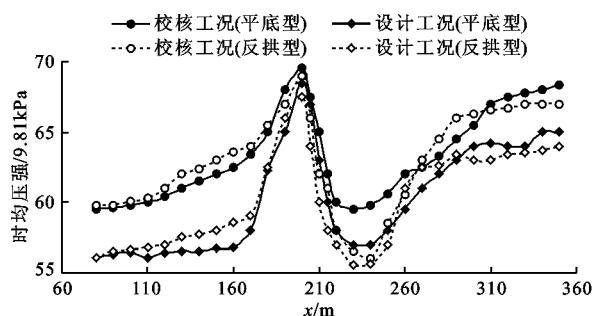


图3 不同工况下两种型式水垫塘底板的时均压强沿水流方向分布

由图3可以看出:(1)校核和设计工况均在 $x=200$ m底板处出现时均压强峰值,随后在 $x=230\sim 240$ m范围内出现时均压强低谷值,由于水垫塘后二道坝的存在,时均压强在低谷值后稳步增加并趋于平稳。(2)两种底板型式下时均压强峰值点位置无显著差异,但反拱底板时均压强峰值相对较小。(3)两种底板型式下时均压强峰值后的低谷点略有不同,校核工况下,平底板低谷值平均压强约为 60×9.8 kPa,而反拱底板低谷值平均压强约在 56×9.8

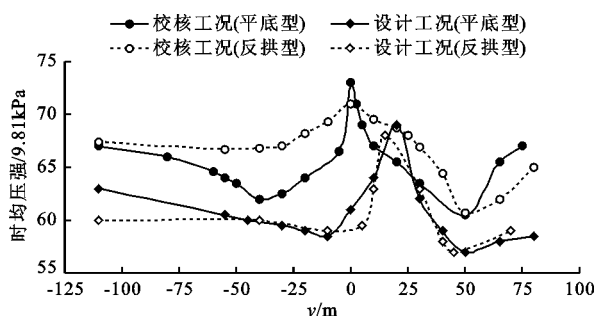


图4 不同工况下两种型式水垫塘底板的时均压强横向分布

kPa左右,两者相差约 4×9.8 kPa;设计工况下,两种底板低谷差值略小,约在 1×9.8 kPa左右。

由图4可以看出:(1)在校核工况下,两种型式水垫塘的底板冲击压力峰值位置比较接近,平底板水垫塘的峰值略高。(2)平底板压强峰值的左、右侧各有1个较明显的低谷值;而反拱底板压强峰值的左侧压强基本稳定,没有明显差异,说明反拱底板横向压强分布较为均匀(压强梯度较小)。(3)在水垫塘压强峰值两侧,反拱底板的压强值大于平底板,

校核工况尤为明显,这是由于反拱底板两侧高程渐增使局部水垫厚度减小所致。

综合以上结果,反拱底板比平底板水垫塘两侧消能空间略小,导致在相同泄流条件下反拱底板两侧受力略大,同时产生压强低谷值的差异。从校核和设计工况试验实测数值来看,反拱型底板所受压强普遍较大,但反拱底板与平底板所受冲击压强的最大峰值相当。

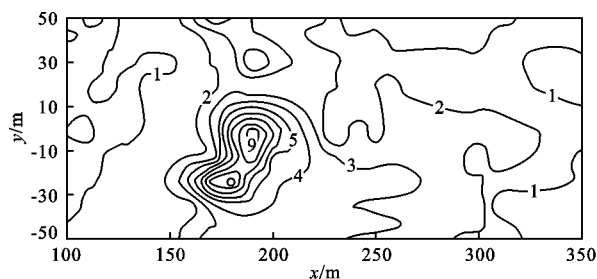
4.2 两种型式水垫塘脉动压强对比

图5、6分别为设计工况和消能设计工况下平底板及反拱底板脉动压强等值线图。由图5可以看出,两种底板型式最大脉动压强值接近,均为 $9.0 \times 9.81 \text{ kPa}$ 左右;从等值线的分布看,反拱底板脉动压强梯度比平底板略小,反拱底板脉动压强大于 $5.0 \times 9.81 \text{ kPa}$ 的区域范围大于平底板,这或许归因于反拱底板有效水垫深度较小,使水舌冲击区附近整体脉动较大。由图6可以看出,两种型式底板消能设计工况与设计工况的脉动压强分布规律类似,水舌冲击区域平底板脉动压强梯度更大;反拱底板的脉

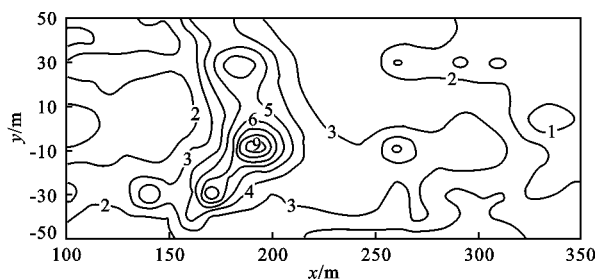
动压强最大值略小于平底板,但从整体分布上看,反拱底板的脉动压强更大。

反拱型式与平底型水垫塘底板压强分布的差别主要与冲击区距底板中心线的位置有关,而在同一冲击位置所造成的底板压强分布差异的原因主要有两点:(1)有效水垫厚度不同,水垫厚度小则冲击压强较大;(2)冲击压对底板的作用方向也有差异,作用角度(压强作用方向与底板切向夹角)小则冲击压力小。

由此导致压强分布主要分为几个典型区域:(1)在底板中心线附近,有效水垫深度无明显变化,冲击压强作用角度略有不同,两种型式底板压强峰值基本相当且反拱型式底板相对略小;(2)在底板中心线两侧,反拱型式的有效水垫深度减小,而且冲击压强作用角度亦变小,两者作用相互抵消,压强峰值基本相当;(3)在水垫塘两侧的边壁区,反拱型式水垫塘的有效水垫深度减小,而冲击压强作用角度变大,导致反拱型式该部位的底板压强明显高于平底板型式。

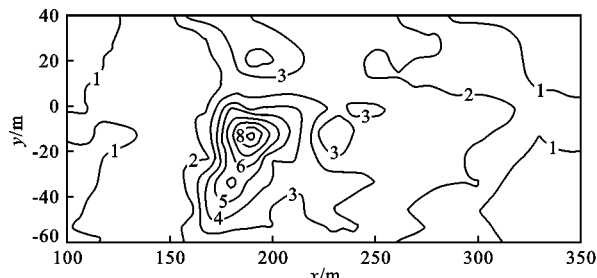


(a) 平底板

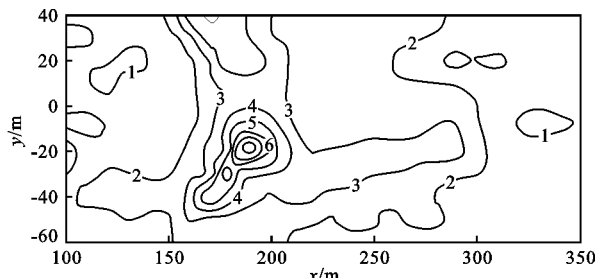


(b) 反拱底板

图5 设计工况下两种型式水垫塘底板脉动压强等值线图(单位:9.81 kPa)



(a) 平底板



(b) 反拱底板

图6 消能设计工况下两种型式水垫塘底板脉动压强等值线图(单位:9.81 kPa)

5 结 论

本文以白鹤滩水电站典型泄洪工况为例,采用物理模型试验对比了平底型和反拱型水垫塘动水荷载变化规律,分析了时均压强和脉动压强分布特性。结果表明:

(1) 反拱型底板的时均压强峰值小于平底型,来流方向上反拱型底板的时均压强低谷值小于平底型,横向上反拱型底板的时均压强梯度更小。

(2) 两种型式水垫塘脉动压强峰值差异较小,反拱型底板整体脉动压强大于平底型,但反拱型脉动压强梯度小于平底型。

参考文献:

- [1] QIAN Shangtuo, WU Jianhua, XU Hui, et al. Discussion of "Estimated splash and training wall height requirements for stepped chutes applied to embankment dams" by Sherry L Hunt and Kem C Kadavy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(11): 07018018.
- [2] WANG Yu, WU Jianhua, MA Fei, et al. Pressure distribution of bottom rollers below the aerator device [J]. Water Science and Technology, 2019, 79(4): 668-675.
- [3] CASTILLO L G, CARRILLO J M. Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 92: 171-180.
- [4] ERVINE D A, FALVEY H T, WITHERS W. Pressure fluctuations on plunge pool floors [J]. Journal of Hydraulic Research 1997, 35(2): 257-279.
- [5] MELO J F, PINHEIRO A N, RAMOS C M. Forces on plunge pool slabs: Influence of joints location and width [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(1): 49-60.
- [6] 王伟, 陈和春, 高甜, 等. 高坝块体护底水垫塘水动力特性研究 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 101-103+216.
- [7] 岳颖, 马斌, 杨敏. 水垫塘坝体型式研究进展及趋势 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 176-180.
- [8] 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.
- [9] LIAN Jijian, LIU Xizhu, MA Bin. Safety evaluation and the static-dynamic coupling analysis of counter-arched slab in plunge pool [J]. Science in China: Technological Sciences, 2009, 52(5): 1397-1412.
- [10] 江春波, 王英奎, 张世彦. 水垫塘底板冲击压强分布特性试验研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 42(12): 2123-2126.
- [11] 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.
- [12] 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(4): 45-50.
- [13] 陈亮, 卢亮, 张莹. 反拱形水垫塘结构在拉西瓦水电站上的研究与应用 [J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 196-199.
- [14] 何小敏, 杨敏, 李琳, 等. 基于刚体极限平衡法的反拱底板稳定性研究 [J]. 水利水电技术, 2013, 44(6): 36-40.
- [15] 贾国新, 徐建荣, 彭育, 等. 基于离散元的白鹤滩反拱型水垫塘底板稳定性研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 81-87.
- [16] 何小敏, 杨敏, 董天松, 等. 白鹤滩水电站反拱型底板非线性静力分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 40-44.
- [17] 杨敏, 李琳, 董天松, 等. 白鹤滩水电站反拱型水垫塘水动力特性及底板稳定性分析 [J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 120-126.
- [18] 孙建, 张春财, 丰小玲, 等. 溪洛渡高拱坝反拱水垫塘与平底水垫塘流场的三维数值模拟比较 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(5): 8-16.
- [19] 孙建, 陈长植. 反拱水垫塘与平底水垫塘底板稳定性诸方面之比较 [J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 3-6.
- [20] 何若飞. 严寒地区拱坝水垫塘底板稳定性分析 [J]. 水利规划与设计, 2017(5): 150-152.
- [21] WANG Yu, HU Yaan, GU Jinde, et al. Impact pressure distribution of inverted arch plunge pool for large discharge [J]. Water Supply, 2020, 20(1): 209-218.

(上接第130页)

- [16] 陈永当, 任慧娟, 王钰鑫, 等. 基于知识管理的航空发动机设计知识分类与获取 [J]. 航空制造技术, 2011(18): 81-85.
- [17] 李迎宾, 李萌. 基于混合数据分类树的深基坑CAD系统 [J]. 制造业自动化, 2019, 41(5): 152-156.
- [18] 杨洋, 何飞, 李洁. 公路桥梁病害分类与编码构建方法 [J]. 北方交通, 2020(11): 28-31+36.
- [19] 吴集林, 莫颖均. 数据库关系范式的几个注记及图解规范化方法 [J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(27): 17-19.
- [20] 朱珍. 基于E-R模型数据库设计的关键技术研究 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2019(5): 77-79.
- [21] 寇嘉玮, 董增川, 周洁, 等. 基于WebGIS的洪泽湖地区洪水预报预警系统 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 145-150+157.