

高拱坝水垫塘水动力特性研究^{*}

徐根海

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 在模型试验的基础上, 从水力学角度对高拱坝平底水垫塘及反拱水垫塘的水动力特性进行了分析评价。结果表明, 无论是水体特性还是水动力特性, 平底水垫塘都优于反拱水垫塘; 在消能效果方面, 平底水垫塘消能率与反拱水垫塘基本一致, 二者的消能率均接近 95%。

[关键词] 高拱坝; 水垫塘; 冲击压强; 水动力特性; 消能效果

[中图分类号] TV 653⁺. 9

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)01-0223-06

Study on hydrodynamic characteristics of high arc dam plunge pool

XU Gen-hai

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Based on the hydraulic model test results, some hydrodynamic characteristics of plane bottom board plunge pool and reversed arch bottom board plunge pool, from hydraulics angle, were analyzed and discussed in this paper. The results show that, be it water volume property or hydrodynamic characteristics, the shape of plane bottom board plunge pool is better than that of reversed arch bottom board plunge pool. In aspect of energy dissipation effect, both values of energy dissipation rate of two kinds of shapes of plunge pool are large, both approximately 95%.

Key words: high arch dam; plunge pool; impinging pressure; hydrodynamic characteristic; energy dissipation effect

当前, 我国高拱坝建设已进入一个新的发展时期, 一批坝高为 200~300 m 的高拱坝正处于可行性研究或前期准备阶段, 这些巨型水电工程的建成和运营, 必将对我国社会经济的发展起到巨大的推动作用。在高拱坝建设中, 泄洪消能是非常突出的技术难题, 是工程成败的关键之一。“六五”以来, 许多科研院所结合具体工程对高拱坝泄洪和消能问题进行了系列攻关, 取得了一批优秀的科研成果, 也产生了显著的经济效益^[1-4]。

实践表明, 挑跌流与水垫塘相结合是高拱坝工程普遍采用且最为经济的一种坝身泄洪消能型式。但过去对高拱坝泄洪消能的研究, 多集中在泄水建筑物的布置形式、结构物体型、水垫塘结构受力和稳定性及消能机理等方面^[5-9], 而对不同体型水垫塘水

力学特性的研究则见之不多。为此, 本研究拟通过模型试验对两种典型水垫塘型式, 即平底水垫塘和反拱水垫塘的水力学特性及消能效果进行比较分析, 以为高拱坝消能设施的设计提供参考。

1 水垫塘的体型特征

试验是在某高拱坝工程泄洪消能方案水工模型试验基础上进行的, 模型比尺为 1:100。该工程平底水垫塘长 217.3 m, 中心线与中表孔中心线重合, 水垫塘断面为复合梯形, 底部宽度由 51 m (坝 0+035.5 m) 扩大至 60 m (坝 0+077.5 m) 再收缩至 55.0 m (坝 0+240.0 m), 塘底水平, 高程为 2 215 m。水垫塘底板及在 2 265.0 m 以下的边坡采用钢筋混凝土衬砌, 塘后设二道坝, 位于 0+240.0 m 处, 坝

^{*} [收稿日期] 2005-12-23

[基金项目] 西北农林科技大学科研专项基金项目(04ZM 072)

[作者简介] 徐根海(1963-), 男, 陕西高陵人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工水力学及河流动力学研究。

高 28.5 m, 坝顶宽 7 m, 长 90.05 m, 顶部高程 2243.5 m, 二道坝后铺设水平护坦, 纵向长 33.0 m, 顶面高程 2220.0 m, 其后以 1:4 反坡与下游河道相接。该坝的特征断面见图 1。

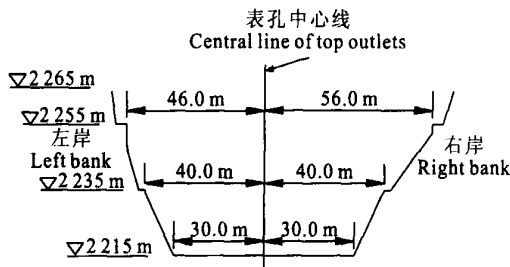


图 1 平底水垫塘特征断面
Fig. 1 Typical section of plane
bottom board plunge pool

该工程反拱水垫塘与平底水垫塘长度相同。塘底高程 2215.0 m, 2215.0~2227.0 m 断面为反拱形, 半径 60.0 m, 中心角 73.7°; 口宽 72.0 m; 2227.0~2265.0 m 为复合梯形边坡。塘底中线与

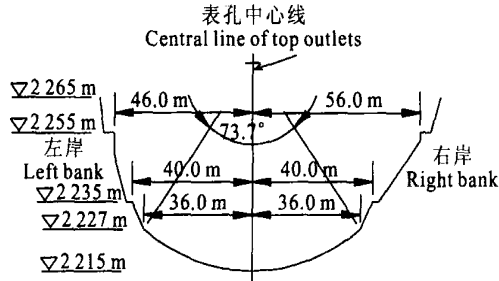


图 2 反拱水垫塘特征断面
Fig. 2 Typical section of reversed
arch bottom board plunge pool

平底水垫塘一致, 塘后二道坝及护坦布置也与平底水垫塘相同。其特征断面见图 2。两种体型水垫塘特征断面尺寸对照见表 1。

表 1 水垫塘特征断面尺寸比较

Table 1 Comparison of typical section size between plane bottom board plunge pool and reversed arch bottom board plunge pool

水垫塘型式 Type of plunge pool	高程/m Elevation	桩号 Section					
		0+ 045.50 m	0+ 077.50 m	0+ 101.50 m	0+ 182.50 m	0+ 212.50 m	0+ 240.00 m
平底 Plane bottom board	2215	53.0	60.0	59.5	58.0	56.4	56.4
	2227	65.0	72.0	71.5	70.0	68.4	68.4
	2235	77.0	84.0	83.5	82.0	80.4	80.4
	2255	92.0	109.0	108.5	107.0	105.4	105.4
	2265	95.0	114.0	113.5	112.0	110.9	110.9
反拱 Reversed arch bottom board	2215	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2227	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0
	2235	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0
	2255	99.0	109.0	109.0	109.0	109.0	109.0
	2265	102.0	114.0	114.0	114.0	114.0	114.0

由表 1 可见, 在 2227 m 高程, 平底水垫塘断面宽度略小于反拱水垫塘断面宽度, 但若将 2215 m 高程与 2227 m 高程各断面宽度进行平均则可看出, 平底水垫塘的平均宽度(59~66 m)明显大于反拱水垫塘的平均宽度(36 m)。也就是说, 在 2221 m 高程以下, 平底水垫塘的水体范围较反拱水垫塘的水体范围大得多, 从而有利于水垫塘消能和结构的稳定。一般来说, 水垫塘断面上口越宽, 越有利于入水水舌的横向扩散, 而水垫塘断面底部越宽, 则水舌入水后临底的可能性就越小, 底板所承受的动水压强和冲击压强也就越小, 结构就越稳定。因此, 就此

而言, 平底水垫塘优于反拱水垫塘。

2 水垫塘动水压强

在泄水建筑物布置形式及鼻坎体型相同的情况下, 对 3 种工况进行了试验研究。其中工况 1 为 2 个表孔与 2 个深孔联合泄水; 工况 2 为 2 个深孔泄水; 工况 3 为 2 个深孔与 2 个底孔联合泄水。观测得到的平底水垫塘和反拱水垫塘底板冲击区的动水压强如表 2 所示。水垫塘底板测压孔布置原则为, 间距不大于底板块最小尺寸的一半并能捕捉到最大动水压强值。

表 2 平底水垫塘和反拱水垫塘底板冲击区动水压强比较

Table 2 Comparison of pressure in impact zone between plane bottom board plunge pool and reversed arch bottom board plunge pool

kPa

桩号 Section	测压孔编号 No. of pressure measuring point	平底水垫塘 Plane bottom board plunge pool				反拱水垫塘 Reversed arch bottom board plunge pool			
		测压孔 高程/m Elevation of pressure measuring point	工况 1 Condition 1	工况 2 Condition 2	工况 3 Condition 3	测压孔 高程/m Elevation of pressure measuring point	工况 1 Condition 1	工况 2 Condition 2	工况 3 Condition 3
0+ 130 m	22	2 215 00	292 3	286 4	293 3	2 219 77	252 4	235 7	249 5
	23	2 215 00	284 5	276 6	291 4	2 215 47	284 8	275 0	294 6
	24	2 215 00	286 4	281 5	296 3	2 215 47	289 7	279 9	291 7
	25	2 215 00	306 6	285 5	296 3	2 219 77	250 4	237 7	249 5
0+ 140 m	26	2 215 00	279 6	284 5	296 3	2 224 18	199 3	194 4	209 1
	27	2 215 00	294 3~ 345 3	286 5	297 3	2 216 90	275 7~ 359 0	263 9	280 6
	28	2 215 00	316 4	285 5	294 3	2 215 00	299 2	282 5	304 1
	29	2 215 00	288 4	289 4	294 3	2 216 90	265 9	263 9	285 5
	30	2 215 00	286 9	292 3	296 3	2 224 18	199 3	189 5	210 1
0+ 150 m	31	2 215 00	282 0	289 4	299 2	2 219 77	237 7	237 7	254 4
	32	2 215 00	282 0	294 3	299 2	2 215 47	279 9	279 9	299 5
	33	2 215 00	284 5	293 3	301 2	2 215 47	284 8	279 9	297 5
	34	2 215 00	286 9	289 4	298 2	2 219 77	237 7	235 7	252 4

由表 2 可以看出,在桩号相同的断面上,作用在平底水垫塘底板上的动水压强较反拱水垫塘大。在现行《溢洪道设计规范》中,底板稳定安全系数 K 有 3 种计算模式^[10],即

$$A: K_a = (P_1 + P_2 + P_3) / (Q_1 + Q_2),$$
$$B: K_b = P_1 / (Q_1 + Q_2 - P_2 - P_3),$$
$$C: K_c = (P_w + P_3) / (Q_1 + \Delta P).$$

式中, P_1 为底板块自重; P_2 为作用在板块上表面的时均水压力; P_3 为锚固力; Q_1 为作用在板块上表面的脉动压力; Q_2 为作用在板块底面的扬压力; P_w 为底板块浮重; ΔP 为动水冲击压差(冲击区最大冲击动水压力和其后的最小压力之差,简称压力差)。

由计算模式 A 和 B 可以看出,作用在板块上表面的时均水压力 P_2 是底板稳定的重要因素,时均动水压强越大,底板块越稳定。因此,从水力条件来看,平底水垫塘的稳定性较反拱水垫塘高。

3 水垫塘冲击压强

水垫塘冲击压强是衡量泄水建筑物布置形式及其体型优劣的重要指标,同时又是水垫塘结构设计

的控制性水力参数。试验表明,在脉动上举力大于底板锚筋拉力和底板块自重的条件下,水垫塘底板可能会发生失稳破坏,其动力来源于向上的时均压力和脉动压力,冲击动水压力通过失效的止水缝或混凝土板的裂缝形成上举力,而脉动上举力既存在于板块上表面,也可通过缝隙传到板块下表面^[10]。虽然准确的定量计算还有困难,但大量试验表明,冲击压强越大,脉动上举力就越大,可能传到板块下表面的时均上举力也就越大^[10-14]。因此,控制最大冲击压强,是防止水垫塘底板失稳破坏的主要措施。笔者通过模型试验对平底水垫塘和反拱水垫塘底板冲击压强进行了观测,两种体型水垫塘冲击区动水压强和冲击压强特征值如表 3 所示。

由表 3 可以看出,在该泄洪方案试验工况中,平底水垫塘所承受的冲击压强均小于反拱水垫塘,二者最大值之差(反拱水垫塘冲击压强减平底水垫塘冲击压强)达 19 23~ 66 32 kPa,占平底水垫塘冲击压强值的 32%~ 33 8%。由此可见,平底水垫塘的冲击压强特性优于反拱水垫塘。

表 3 平底水垫塘与反拱水垫塘冲击区动水压强和冲击压强特征值比较

Table 3 Comparison of characteristic value of pressure and impact pressure in impact zone between plane bottom board plunge pool and reversed arch bottom board plunge pool

工况 Condition	水垫塘型式 Type of plunge pool	测压孔编号 No. of pressure measuring point	动水压强/kPa Pressure			冲击压强/kPa Impact pressure			有效水深/m Effective water depth
			正常值 Normal value	平均值 Mean value	最大值 Maximum value	正常值 Normal value	平均值 Mean value	最大值 Maximum value	
1	平底 Plane bottom	27	294.30	319.80	345.30	8.24	33.75	59.25	29.16
	反拱 Reversed arch bottom	27	294.30	336.00	377.70	2.94	44.64	78.48	29.70
2	平底 Plane bottom	52	264.90	277.60	290.40	5.88	6.87	19.62	27.60
	反拱 Reversed arch bottom	52	279.60	32.75	363.00	2.55	44.24	85.94	28.24
3	平底 Plane bottom	60	323.70	353.20	382.60	0.00	29.43	58.86	33.00
	反拱 Reversed arch bottom	51	313.90	365.40	416.90	11.77	63.27	114.80	30.80

注: 1 动水压强= (测压管水柱顶平均高程- 2.215 00) × 9.81 kPa; 2 有效水深= 测压孔所在断面水面平均高程- 2.215 00; 3 冲击压强= 动水压强- 相应断面的有效水深 × 9.81 kPa

Note: 1 Pressure= (Mean elevation of water column in piezometer tube- 2.215 00) × 9.81 kPa; 2 Effective water depth= Mean elevation of water surface in measuring section- 2.215 00; 3 Impact pressure= Pressure- effective water depth × 9.81 kPa

4 水垫塘的脉动特性

工程实践表明, 高拱坝挑跌流+ 水垫塘泄洪消能型式, 不但经济有效而且也是高拱坝泄洪消能发展的主要方向^[15]。在水垫塘结构设计和安全稳定性研究中, 泄洪时作用在水垫塘底板上的脉动压(强)力也是一个控制性水力参数, 虽然已有研究提出了脉动压(强)力的计算公式^[16], 但由于该问题的复杂

性, 重要工程的脉动压力常由水力学模型试验测定。本文结合某高拱坝工程水工模型试验, 对平底水垫塘和反拱水垫塘的脉动特性进行了观测, 其试验工况的动水压强脉动特性值即动水压强平均值 P (均值)、动水压强脉动值的均方差(脉动压强的强度) σ 、紊动系数 C_v 及最大冲击压强 P_{max} 的观测结果列于表 4 和表 5。

表 4 平底水垫塘水舌冲击区脉动压强特征值

Table 4 Representative values of turbulent pressure in impact zone of plane bottom board plunge pool

工况 Condon	测点 Measuring point	P /kPa	σ /kPa	C_v	P_{max} /kPa	y_h /kPa	ΔP_{max} /kPa	主频/Hz Main frequency
1	1	311.7	26.30	8.44	390.6	304.70	85.90	0.5
	2	314.0	23.20	7.39	383.6	304.70	78.95	1.7
	3	287.9	15.3	5.31	333.8	283.88	49.92	0.5
	4	294.0	14.00	4.76	336.0	283.88	52.12	0.2
	5	296.5	17.60	5.94	349.3	300.84	48.46	0.2
	6	296.2	11.60	3.92	331.0	308.31	22.69	2.9
2	1	287.3	6.80	2.37	307.7	287.63	20.07	0.2
	2	291.2	6.60	2.27	311.0	287.63	23.37	0.1
	3	287.6	6.80	2.36	308.0	291.60	16.40	0.2
	4	289.7	8.00	2.76	313.7	291.60	22.10	0.1
	5	275.0	17.30	6.29	326.9	279.09	47.81	0.2
	6	272.6	15.40	5.65	318.8	270.10	48.70	0.4
3	1	302.0	4.41	1.46	315.2	295.67	19.53	0.4
	2	306.6	5.20	1.70	322.2	295.67	26.53	0.4
	3	304.4	4.12	1.35	316.8	299.45	17.35	0.4
	4	304.4	5.00	1.64	319.4	299.45	19.95	0.4
	5	315.8	25.20	7.98	391.4	300.38	91.02	0.1
	6	304.4	13.30	4.37	344.3	291.85	52.45	0.1

表 4, 表 5 中的测点为脉动传感器的安装点, 即脉动压强观测点(简称测点), 一般位于冲击压强最大或较大的测压孔位置。表 4, 表 5 结果表明, 水垫

塘脉动压强的频谱密度呈多峰型, 有一定的频带宽度, 脉动能量集中在低频范围内, 属低频大尺度涡动性质, 高频区能量迅速衰减。概率密度曲线基本呈正

态分布, 出现概率大于 99.7% 测点的最大可能脉动幅值 $A_{\max} = 3\sigma$ 按此可求得最大冲击压强的量值为:

式中: $\Delta P_{\max}$ 为最大冲击压强 (kPa); γ 为水的容重 (N/m^3); h 塘为水垫塘的有效水深 (m)。

$$\Delta P_{\max} = (P + 3\sigma) - \gamma h_{\text{塘}}$$

表 5 反拱水垫塘水舌冲击区脉动压强特征值

Table 5 Representative values of turbulent pressure in impact zone of reversed arch bottom board plunge pool

工况 Condition	测点 Measuring point	P/kPa	σ/kPa	C_v	$P_{\max}/\text{kPa}$	$\gamma h_{\text{塘}}/\text{kPa}$	$\Delta P_{\max}/\text{kPa}$	主频/Hz Main frequency
1	1	335.5	13.0	3.87	374.5	290.1	84.4	0.2
	2	286.0	25.0	8.74	361.0	286.7	74.3	0.1
	3	144.5	20.0	13.84	204.5	280.8	-76.3	0.5
	4	300.5	24.0	7.98	372.5	308.7	63.8	1.3
	5	330.5	19.0	5.75	387.5	290.1	97.4	0.6
	6	326.5	15.0	4.59	371.5	295.0	76.5	0.4
2	1	334.5	7.0	2.09	355.5	278.4	77.1	0.2
	2	281.0	8.0	2.85	305.0	263.4	41.6	0.2
	3	206.5	19.0	9.20	263.5	279.1	-15.6	0.1
	4	275.5	22.0	7.98	341.5	291.1	50.4	0.4
	5	335.5	30.0	8.94	425.5	272.4	153.1	0.4
	6	304.5	18.0	5.91	358.5	280.3	78.2	1.2
3	1	322.3	7.0	2.17	343.3	292.1	51.2	0.1
	2	290.5	8.0	2.75	314.5	282.4	32.1	0.1
	3	247.8	21.0	8.47	310.8	296.7	14.1	0.7
	4	345.8	40.0	11.57	465.8	321.0	144.8	1.5
	5	305.3	34.0	11.14	407.3	302.3	105.0	0.1
	6	314.8	21.0	6.67	377.8	326.8	51.0	1.8

由表 4, 表 5 可以看出, 平底水垫塘脉动压强的最大冲击压强值为 91.02 kPa, 占观测点次的 5.56%; 次大冲击压强值为 85.90 kPa, 50~100 kPa 的点次占 27.78%, 其余测点冲击压强均较小, 约有 73% 点次的冲击压强量级不及 50 kPa。反拱水垫塘的最大冲击压强值为 153.1 kPa, 次大冲击压强值为 144.8 kPa, 量值大于 100 kPa 的点次有 3 个, 占观测点次的 16.66%; 50~100 kPa 的点次占 72.22%, 0~50 kPa 的占 16.66%, 另外还有 11.11% 的点次属于负冲击。通过两种体型水垫塘脉动压强观测值的比较可知, 反拱水垫塘最大冲击压强的量级较平底水垫塘增大了 68.2%; 两种体型水垫塘中等强度冲击压强所占比重大体相当; 而反拱水垫塘的小强度冲击压强却较平底水垫塘减少了近 56.34%。因此, 平底水垫塘承受水舌冲击力的状态优于反拱水垫塘。

由表 4, 表 5 还可以看出, 平底水垫塘水流的紊动系数 C_v 值均小于 10; 反拱水垫塘水流紊动系数大于 10 的测点有 3 个, 量值分别为 11.14, 11.57 和 13.84, 占总测点数的 16.66%。表明反拱水垫塘的水流紊动强度大于平底水垫塘。从主频特性(模型)来看, 两种体型水垫塘的水流脉动均属于低频范围, 其中平底水垫塘主频范围为 0.1~2.9 Hz, 反拱水

垫塘的主频范围为 0.1~1.8 Hz, 基本属于同一量级。

5 水垫塘的消能特性

以往对挑流泄洪消能的研究主要着眼于下游河床的冲淤对枢纽建筑物运行安全的影响^[17-18], 如冲刷坑的位置、深度、形状、大小及冲刷坑的水流特性和冲刷机理等, 所取得的成果虽不能完全解决工程问题, 但对工程的初步设计、方案的优化选择及运行管理有一定的参考价值。高拱坝挑跌流+水垫塘泄洪消能方式与传统的挑流消能有相似之处但又不完全相同, 其主要消能原理是通过合理布置坝身各层孔口, 使下泄水流分层和大差动出流, 不同层出流水股在空中碰撞分散与消能, 尽可能地增加入水射流的纵向分散度, 减轻下泄水流对水垫塘底板的冲击破坏力。挑跌流+水垫塘的泄洪消能过程可分为 3 个部分: (1) 下泄水流流经泄水建筑物时与周界摩擦所损失的能量; (2) 挑射水股在空中扩散、掺气、碰撞及与空气摩擦所损失的能量; (3) 挑流水股落入下游水垫塘后由于水流紊动剪切所消耗的能量。对挑流冲刷坑消能而言, 3 部分所消除的能量占总水头差的比例分别为 21.8%, 1.5% 和 71.55%^[19]。水垫塘消能一般采用淹没冲击射流流态, 单股射流试验结

果表明,在淹没射流区,时均动能衰减较快,其时均消能率为 70%;在淹没水跃区(壁射流区和上部漩滚区),时均消能率由 70% 增加到 95%^[10]。在实际工程中,一般多为两股或多股射流平行或交叉射入水垫塘,虽然流态较为复杂,但消能机理与单股射流水垫塘消能类似。关于水垫塘消能率的计算目前尚未见报道,由于泄水建筑物布置及泄洪工况相同,本文将挑跌流+水垫塘泄洪消能过程作为一个整体来考虑,同时为便于进行比较,通过二道坝顶(0+240

m)及其后护坦末端(0+300 m)两个断面,计算平底水垫塘和反拱水垫塘的消能率。其计算方法如下:

$$\text{消能率} \epsilon = \frac{\text{总水头 } H - \text{断面比能 } E}{\text{总水头 } H},$$

式中:总水头 H 为上游库水位与计算断面底部高程之差(m);断面比能 $E = h + V^2/2g$,其中 h 为断面平均水深(m), V 为断面平均流速(m/s)。

试验工况下,平底水垫塘与反拱水垫塘消能率的计算结果如表 6 所示。

表 6 平底水垫塘与反拱水垫塘消能率的比较

Table 6 Comparison of energy dissipation rates between plane bottom board plunge pool and reversed arch bottom board plunge pool

水垫塘型式 Type of plunge pool	工况 Condon	二道坝 0+240 m Secondary dam				护坦末 0+300 m End of protection apron			
		水深/m Depth	流速/ (m·s ⁻¹) Velocity	断面比能/m Energy of section	消能率/% Rate of energy dissipation	水深/m Depth	流速/ (m·s ⁻¹) Velocity	断面比能/m Energy of section	消能率/% Rate of energy dissipation
平底 Plane bottom board	1	8.50	6.19	10.45	94.99	25.17	2.93	25.61	88.96
	2	8.60	5.62	10.21	95.10	22.67	2.26	22.93	90.12
	3	12.00	3.55	12.64	93.22	25.50	2.48	25.81	87.71
反拱 Reversed arch bottom board	1	7.27	6.50	9.42	95.48	24.47	2.52	24.79	89.31
	2	8.77	4.89	9.99	95.21	24.60	2.07	24.82	89.30
	3	11.27	5.82	13.00	93.03	25.20	2.90	25.63	87.80

从表 6 二道坝(0+240 m)断面的消能率来看,高拱坝挑跌流+水垫塘型式的消能效果较好,不同工况下两种体型水垫塘的消能率大体一致;二道坝后护坦末(0+300 m)断面的消能率受该断面形状及下游水流条件的影响,虽不能真实反映水垫塘的消能效果,但相对来看,平底水垫塘与反拱水垫塘在上下游水力条件相同的情况下,二者的消能效果基本相同。另外,从二道坝(0+240 m)断面不同工况消能率的平均值来看,平底水垫塘的消能率为 94.44%,反拱水垫塘的消能率为 94.57%,后者稍大于前者;同时,该结果与文献[10]水垫塘消能率达 95% 的结论基本一致。

6 结 论

本研究在特定泄洪方案下,从水力学角度对平底水垫塘和反拱水垫塘的水力特性及消能效果进行了分析比较,结论如下:

1) 从挑跌流+水垫塘泄洪消能机理及试验结果看,平底水垫塘的底部宽度较反拱水垫塘的底部宽度大,即平底水垫塘底部的水体体积较反拱水垫塘底部的水体体积大。而水垫塘底部水体的多少对水垫塘消能效果和降低底板所承受的冲击压力,即

增加底板的稳定性有非常重要的作用。因而,从这一点看,平底水垫塘优于反拱水垫塘。

2) 试验结果表明,在底板顶高程(最低点)相同的情况下,作用于平底水垫塘底板上的时均动水压强大于反拱水垫塘。即从水力学角度看,平底水垫塘的安全稳定性高于反拱水垫塘。

3) 不同工况两种水垫塘体型水舌冲击区冲击压强和脉动特性的比较表明,反拱水垫塘的冲击压强大于平底水垫塘,二者最大値之差达 19.23~66.3 kPa,占平底水垫塘冲击压强值的 32%~33.8%;从水垫塘水流紊动强度来看,平底水垫塘各工况水流紊动系数 C_v 值为 1.35~8.44,而反拱水垫塘水流紊动系数 C_v 值为 2.09~13.84,其中 C_v 值大于 10 的测点有 3 个,占总测点数的 16.67%。可见,反拱水垫塘内的水流紊动强度较平底水垫塘大,即反拱水垫塘内的水力特性较差。

4) 试验表明,两种体型水垫塘消能效果均很理想,消能率都接近 95%,但从水力学角度来看,平底水垫塘的水力特性要优于反拱水垫塘。

(下转第 234 页)

还有待进一步健全。

[参考文献]

- [1] 李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004
- [2] Marco D, luca M. G. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 1-26
- [3] Luca M. G, Marco D. Ant-Q: a reinforcement learning approach to the traveling salesman problem[C]. Proceeding of 12th machine learning conference Palo Alto, CA: morgan kauffman, 1995: 252-260
- [4] 刘士新, 宋健海, 唐加福. 蚁群最优化—模型、算法及应用综述[J]. 系统工程学报, 2004, 19(5): 496-502
- [5] 水利部长江水利委员会水文局, 水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 中国水利出版社, 2001
- [6] 邹正达, 孙雅明, 张智晟. 基于蚁群化算法递归神经网络的短期负荷预测[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 59-63
- [7] Colomi A, Marco D, Maniezzo V. An investigation of some properties of an "Ant algorithm"[C]. Proceedings of the parallel problem solving from nature conference (PPSN92). Belgium: Elsevier Publishing, 1995: 509-520

(上接第 228 页)

[参考文献]

- [1] 杨永全. 高拱坝泄洪消能的水力学问题[C]//水动力学研究与进展编辑部. 1992 年水动力学研讨会文集. 成都: [出版者不详], 1992: 52-61.
- [2] 陈长植, 茅泽育, 李春花, 等. "九五"国家重点科技攻关子课题项目: 溪洛渡水电站水垫塘优化布置与底板稳定性试验研究报告[R]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 1999
- [3] 韩继斌, 袁玲玲, 肖兴斌. 从高拱坝的工程实践看构皮滩泄洪消能设计的可行性[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(1): 7-11.
- [4] 张声鸣, 陈建. 水垫塘底板稳定研究[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 5-9
- [5] 刘仁山, 高树华, 孙思惠. 白山水电站泄洪消能试验研究[M]//邵维文, 赵文谦, 梁在潮, 等. 中国水利水电工程技术进展. 北京: 海洋出版社, 1999: 379-390
- [6] 刘之平, 刘沛清. 溪洛渡拱坝坝身可能最大泄量研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1997: 9-25
- [7] 孙建, 陈长植. 平底水垫塘底板块失稳的数值模拟[J]. 水利学报, 2002, 33(11): 84-88
- [8] 黄国强. 水垫塘消能建筑物的安全问题[J]. 云南水电技术, 2002(3): 55-58
- [9] 刘沛清, 李福田. 高坝下游水垫塘内典型六态演变问题探讨[J]. 水利学报, 2001, 32(10): 38-43
- [10] 朱伯芳, 高季章, 陈祖煜, 等. 拱坝设计与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 122-127.
- [11] 孙建, 陈长植. 反拱水垫塘底板块上举力变化规律[J]. 应用力学学报, 2004, 21(4): 47-51.
- [12] 崔广涛, 彭新民, 杨敏. 反拱型水垫塘——窄河谷大流量高拱坝消能工的合理选择[J]. 水利水电技术, 2001, 32(12): 1-3
- [13] 吕阳泉, 李永祥, 冬俊瑞. 水垫塘的水流特征和消能规律研究[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(1): 10-12
- [14] 黄种为, 陈瑾. 高拱坝泄洪与水垫塘底板动水压力问题的试验研究[J]. 水利学报, 1992, 23(11): 50-56
- [15] 尹洪昌, 苑润保. 泄水工程水力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2002: 256-308
- [16] 孙建. 高拱坝坝身泄洪和消能防冲[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002: 23-40
- [17] 徐秉衡, 刘新纪. 溢流坝鼻坎挑流对岩基冲刷深度与位置的估算[C]//泄水建筑物消能防冲论文集编审组. 泄水建筑物消能防冲论文集. 北京: 水利出版社, 1980: 309-321
- [18] 饶冠生. 岩基挑流冲刷中岩体构造特性的影响和模拟试验问题[C]//泄水建筑物消能防冲论文集编审组. 泄水建筑物消能防冲论文集. 北京: 水利出版社, 1980: 352-363
- [19] 柴华, 冬俊瑞, 李永祥. 热膜测速技术在高坝挑射水流特征与消能机理研究中的应用[C]//刘沛清. 泄水建筑物消能防冲论文选集. 北京: 中国科学技术出版社, 2000: 255-268