

高拱坝泄洪消能水力设计研究与应用述评

⑥
19-23

肖兴斌, 芦俊英

(长江科学院, 湖北武汉 430010)

TV642.4
TV653

摘要:高拱坝泄洪消能的特点是坝高落差大, 流量大, 功率大, 位于河谷狭窄地区, 泄洪消能与防冲问题突出。经科学研究, 采用“分散泄洪, 削弱水流冲击力, 加固河床, 增强河道抗冲能力”的综合治理措施, 较好地解决泄洪消能布置问题。提出了表孔大差动坎加分流齿、双层多孔、水流撞击、下设水垫塘联合消能的典型布置方案, 经实践证明, 方案可靠, 消能效果好。

关键词:高拱坝; 分散泄洪; 水流撞击; 水垫塘; 消能效果

中图分类号:TV641.4, TV653

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2000)02-0019-05

随着我国水电工程高坝建设的迅速发展, 泄洪消能设计任务越来越繁重。尤其是峡谷河床的高拱坝, 通过坝身宣泄大量洪水, 泄流集中, 泄洪功率大, 泄洪消能与防冲问题更加突出。

据不完全统计, 我国的二滩等工程泄洪消能功率均居世界前列, 这说明我国筑坝技术已达到世界领先水平(表1)。

如何安全经济地泄放如此巨大的能量, 一直是人们十分关注的问题。我国已把高坝泄洪消能防冲课题列为重点攻关科研项目, 组织各科研单位及大专院校进行深入细致的研究, 现已取得较为丰硕的研究成果。

二滩根据“分散泄流, 削弱水流冲刷力, 加固河床, 增强河道抗冲能力”的综合治理措施^①, 经过多方案研究泄洪消能可靠计算与风险分析, 选用了坝身7表孔(11m×11.5m)、6中孔(6m×5m)和右岸2条泄洪隧洞(13m×16m)三套泄洪设施联合泄洪, 坝

下设水垫塘和二道坝, 表、中孔水舌碰撞消能和泄洪洞分区消能方式等泄洪消能总布置方案, 较好地解决了泄洪消能问题。

这种泄洪消能布置原则可归纳为: 多种设施, 分散泄洪; 双层多孔, 水流撞击; 分区消能, 按需防护。对高水头、大流量、窄河谷的大型水利枢纽泄洪消能布置具有较普遍的意义。

借鉴二滩工程泄洪消能成功经验, 小湾、构皮滩和溪洛渡等工程均采用了分层出流, 水流撞击; 分区消能, 按需防护的方案, 经水工模型试验验证, 方案可靠。该方案水流冲击小, 消能效果好, 即利用表孔大差动坎加分流齿, 表、中孔分层出流和上下水舌在空中碰撞消能, 使水舌在纵向上尽可能地拉开与分散, 削弱射流的集中强度, 并在下游设水垫塘来集中刹下泄水流的机械能。工程实践表明: 这是一种既安全又经济的泄洪消能方案, 被国内外多项工程采用, 已成为高拱坝泄洪消能的一种典范。

表1 国内外200m以上高拱坝泄洪消能方案比较

工程名称	坝高/m	落差/m	下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	泄洪功率/MW	泄洪消能方式
英古里(前苏联)	272	230	2500	5040	坝身表、中孔、消力塘
莫拉丁其(南斯拉夫)	220	175	2200	3890	坝身表、中孔、消力塘
埃尔卡洪(洪都拉斯)	231	184	8590	15500	坝身表、中孔, 坝外隧洞消力塘
卡比尔(伊朗)	200		16200		坝左滑雪道、挑流
二滩(中国)	240	166.3	23900(16300)	39000(26500)	坝身表、中孔, 2条泄洪洞水垫塘 坝身表、中孔, 2条泄洪洞水垫塘
小湾(中国)	285	230.6	20540(15230)	46400(34400)	坝身表、中孔, 水垫塘
构皮滩(中国)	234	148	(27470)	(39600)	2表+6浅+7中+6泄洪洞, 水垫塘
溪洛渡(中国)	295	205.2	46800(24000)	94100(48300)	

注: 括号内的数值为坝身下泄流量和泄洪功率。

作者简介: 肖兴斌(1929—), 男, 高级工程师, 从事工程水力学研究。

①肖富仁. 高混凝土坝泄洪和消能的研究. 成都勘测设计研究院, 1991。

1 高拱坝泄洪消能的特点

1.1 坝高落差大

二滩坝高 240 m, 落差 166.3 m, 是国内在建的最高薄拱坝, 居世界第三位。正在设计的构皮滩, 坝高 234 m, 落差 148 m; 拉西瓦坝高 250 m, 落差 210 m; 小湾坝高 285 m, 落差 230.6 m; 溪洛渡坝高 295 m, 落差 205.2 m, 将居世界薄拱坝第一位。坝高, 落差大, 流速也就大, 由此将带来一系列高速水流问题, 如空化、空蚀、掺气、振动、脉动、消能防冲、建材的防磨、防蚀及雾化等, 增加了工程建设的难度。

1.2 泄洪流量大、功率大

通过可行性审查的我国小湾水电站为双曲拱坝, 下泄流量 $20\,540\text{ m}^3/\text{s}$, 泄洪功率 46 400 MW; 构皮滩下泄流量 $27\,470\text{ m}^3/\text{s}$, 功率 39 600 MW; 溪洛渡下泄流量 $46\,800\text{ m}^3/\text{s}$, 泄洪功率 94 100 MW, 为世界之冠。文献[1]指出, 坝高 H 愈大, 泄洪流量 Q 愈大, 可用 γQH 的乘积来表达泄洪功率指标, 反映泄洪消能、防洪的技术难度, 并统计出坝高大于 180 m, 流量大于 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的 27 座世界高坝, 其中 γQH 最大达 $12 \times 10^7\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{s}$ 。若将我国拟建的高拱坝列入, 小湾的泄洪功率指标 γQH 为 $5.8 \times 10^7\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{s}$, 溪洛渡的为 $13.8 \times 10^7\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{s}$, 在建二滩的为 $5.7 \times 10^7\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{s}$ (若将三峡工程作为重力坝计算, 泄洪功率指标约为 $19 \times 10^7\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{s}$), 因此, 我国在建的三峡工程及拟建的溪洛渡拱坝工程的泄洪功率指标 γQH 居世界之冠, 我国在建坝方面所遇到的枢纽泄洪消能、防冲以及高速水流问题的技术难度, 亦居世界第一。

1.3 坝区河谷狭窄

一般高拱坝位于峡谷河床, 山高、坡陡、谷狭。如构皮滩两岸边坡最陡坡 1:0.3, 在设计校核洪水时, 水面宽度仅 70 ~ 100 m; 加上巨大的泄洪功率和流量, 使泄洪设施和厂房的布置以及消能防冲问题复杂化。冲刷区地质条件差, 坝轴线下游为灰岩与页岩, 抗冲流速为 $3.5\text{ m}/\text{s}$; 由于冲刷区河床两岸边坡为陡坡, 使消能防冲设施的布置受到限制。不过, 构皮滩河床水深较大, 洪水时水垫深度在 50 ~ 77 m 之间变化, 有利于水垫消能。

2 泄洪消能防冲措施

2.1 水垫塘水力设计研究与应用

构皮滩水电站为双曲线拱坝, 坝高 234 m, 校核

流量 $27\,470\text{ m}^3/\text{s}$, 设计流量 $22\,520\text{ m}^3/\text{s}$, 校核和设计泄洪功率分别为 39 100 MW 和 33 100 MW, 泄洪功率相当大, 全部流量集中由坝身宣泄。经科学研究, 选用坝身设 6 个 $12\text{ m} \times 22.5\text{ m}$ 表孔跌坎和 7 个 $6\text{ m} \times 7\text{ m}$ 中孔挑流, 坝下设二道坝水垫塘的消能方案。表孔采用出口平面扩散、各孔高低差动加分流齿, 中孔为平面扩散, 竖向收缩。进口高程分 2 层, 出口尺寸 $6\text{ m} \times 7\text{ m}$, 挑角为 $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ 等 3 种挑角的组合挑流鼻坎, 获得了较好的消能效果。

2.1.1 表孔溢洪道单独泄洪工况

设计洪水时, 全部泄洪建筑物投入运行, 由于表孔、中孔采用水舌碰撞措施, 消能效果好。但当表孔单独泄洪时, 跌落水舌未经碰撞, 消能效果差。因此, 表孔单独泄洪往往成为泄洪消能水力设计控制工况。

中国水利水电科学研究院对构皮滩枢纽进行试验, 实测得水垫塘底板上最大冲击压力为 254.08 kPa (原方案) 及 141.26 kPa (优化方案); 长江科学院实测值为 147.15 kPa (原方案) 及 85.2 kPa (优化方案)。冲击动水压力的大小与表孔体型布置有关, 根据二滩水工模型试验资料可知, 表孔为大差动加分流齿坎的冲击力比连续坎 (无齿坎) 降低 54% ~ 67%。构皮滩大差动加分流齿坎水工模型的试验表明: 最佳的分流齿坎组合方案与最差组合方案的冲击力相差可达 50% 左右。在拉西瓦表孔模型试验中, 当低水头 (10 m 以下) 时^①, 差动坎加不对称宽尾墩比差动坎冲击压力降低 90%。因此, 通过模型试验对比来确定表孔体型最佳布置方案, 其改进潜力是很大的。

为了进一步说明构皮滩水垫塘的消能效果, 将其与国内外几个工程有关参数作一对比, 见表 2。

表 2 几个工程水力指数比较^②

工程名称	动力作用指数 L_a	理论淹没度 G_c	压力脉动系数 C_{FP}
二滩 (中国)	0.44	1.41	1.53
莫西洛克 (美国)	0.58	1.14	2.66
罗克斯 (南非)	0.31	1.28	2.35
拉克瓦 (印度)	0.28	0.78	2.47
构皮滩 (中国)	0.43	1.70	2.10

注: 压力脉动系数 $C_{FP} = P_{\max}/\Delta P$, 即最大动水压力与平均压力之比^[2]。

从表 2 可以看出, 构皮滩工程采用的坝身集中泄洪、集中消能的水垫塘消能方式与国内外几个工程比较, 有关参数指标是合适的, 消能效果较好。

2.1.2 中孔单独泄洪工况

中孔的特点是水头高, 流速大, 射程远, 是水垫塘长度设计控制因素。设计时要充分利用空气阻力

①吴丽等, 拉西瓦水电站泄洪消能方案研究, 西北勘测设计院, 1990。

②杨国瑞, 二滩水电站坝下水垫塘的水力设计, 成都勘测设计研究院科学研究所, 1996。

消能,同时由于径向集中的显著影响,水舌降落搭接严重,入水区狭窄,因此在竖向分层布置出口部分为上翘型和不同坎挑角(出口挑角一般为 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$,平面外向转角为 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$),如二滩水电站中孔中心线后半截在平面上向两侧分别转角 $1^{\circ}, 2^{\circ}, 3^{\circ}$,形成平面转弯立面上翘,尾部横向扩散竖向收缩的“压力上翘”新型消能工。构皮滩7个中孔采用不同挑角组合消能工:2号、4号、6号中孔为压力上翘,挑角 30° ;3号、5号中孔为出口顶部下压的平底跌流;7号中孔出口下压,鼻坎挑角 10° ,其目的是使中孔水流沿纵向拉开,横向适当扩散,错开落点,克服径向集中的影响,从而提高消能效果。

中孔泄洪时作用在水垫塘底板上的压力与表孔泄洪相比,在相同的水位条件下,冲击力仅为表孔的 $10\%\sim 20\%$,试验中从水垫塘底板中心上的压力分布上看不出明显的峰值,在设计条件下,水垫塘内最大冲击力为 9.8 kPa ,故非控制情况,但需研究中孔泄洪时射流入水时的漩滚长度,以论证水垫塘的长度能否满足要求。

a. 水垫塘水力设计。水垫塘长度受水舌跌落位置的控制,一般认为水垫塘总长度应大于水舌挑距与水跃长度之和,按中川博次和多田敏一的建议:

$$\text{水垫塘长度} = \text{水舌射程} + \text{水垫深度} \quad (1)$$

式中:水垫塘深度大于等于 $(1.25\sim 2.0)h_2$ (h_2 为第二共扼水深)。

或采用下式计算:

$$\text{水垫塘总长度} = \text{水舌挑距} + \text{水跃长度} \quad (2)$$

构皮滩工程水垫有关数据为:实测挑距 $L_p = 186\text{ m}$, $h_2 = 27.5\text{ m}$ (计算值),水跃长 116 m ,代入式(1)、式(2),求出水垫塘长度分别为 302 m 及 210 m ,设计长度为 286 m 。从水流流态观测,设计长度偏短。二滩水电站水垫塘长度按式(1)、式(2)计算分别为 300 m 和 262 m ,均小于设计长度 316 m 。

b. 水垫塘二道坝的作用及高度问题。水垫塘深度约为第二共扼水深的 1.8 倍,塘内产生淹没水跃。二道坝要保证塘内流态良好,设、校洪水时塘内最大回流流速为 $9\sim 10\text{ m/s}$,二道坝最大流速 $8\sim 10\text{ m/s}$,坝顶处的 F_r 一般为 $0.7\sim 0.8$,属于缓流,坝下不产生二级水跃,并可结合塘的检修。因此,确定二道坝顶高程为 1012 m (塘底高程 970 m)。

2.1.3 表、中孔联合泄洪工况

当宣泄设计、校核洪水流量时,采用坝身表、中孔联合泄洪,虽下泄洪水功率很大,但由于表中孔水舌在空中碰撞,消能效果好。通过模型实验实测,作用在水垫塘的动水压力并不大。

a. 基本条件和水力因素。成都勘测设计研究院科学研究所杨国瑞曾对水舌空气中碰撞消能问题进行过专门研究,得到在这一新条件下的动水压力计算公式

$$\Delta P_m = C_1 \frac{qz^{1/2}}{h} \quad (3)$$

其中:

$$C_1 = \frac{\varphi K_1^2 \sin^3 \theta}{\sqrt{2g}}$$

$$K_1 = 0.37 \frac{(\cos \beta_0)^{0.5}}{\left[\frac{q_{\#}}{q_{\#} + q_{\text{表}}} \right] \left(\frac{h}{z} \right)^{0.75}}$$

式中: θ 为入水角度; β_0 为表、中孔水舌碰撞的夹角; z 为上、下游水位差; h 为下游水深; φ 为射流入水流速系数;将基本资料代入式(3)所得 ΔP_m 值与试验成果一并列入表3。

b. 局部冲刷计算。拟用陈椿庭的局部冲刷公式 $T = Kq^{0.5}Z^{0.25}$,其中冲刷系数 K 值,考虑水垫塘为混凝土块衬护,相应基岩特性关系采用 $K = 1.2$ 。在校核条件下,求得冲刷坑水垫塘深度为 54.3 m ,小于水垫塘深度 77.4 m 。

c. 单位水体泄洪功率。表、中孔联合泄洪时,虽然下泄功率大,但因水垫塘深度深,表、中孔联合泄洪时经碰撞消能,动水压力较小,计算泄洪功率 39100 MW ,塘内水体积 230 万 m^3 ,单位水体承受功率 17.2 kW/m^3 ,与世界其它工程相比^[2],水体偏小,是否应适当加大有待进一步研究。

2.2 空中碰撞消能水力设计研究与应用

由于坝身泄洪时,各泄洪建筑物单独或联合泄洪的下泄流量和功率仍十分巨大。因此,应予高度重视和慎重对待,必须采用新型有效的消能方式,提高消能效果,以确保大坝和电站安全运行。

根据近年来的实践经验,在溢流坝上采用高低坎挑射水舌于空中碰撞消能,取得了良好的消能效果。关于表、中孔水舌空中碰撞的一些水力参数,

表3 构皮滩表中孔联合泄洪特征

上游水位/m	下游水位/m	表孔泄量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	中孔泄量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	落差 Z/m	水垫深度/m	动水压力/kPa	数据来源
637.18	489.4	16090	10330	147.7	77.4	35.3	计算值
637.18	489.4	16090	10330	147.7	77.4	28.4	中国水利水电科学研究院
637.18	489.4	26420 ^①		147.7	77.4	0	长江科学院

注:①为表、中孔总泄量。

表4 拱坝表、中孔水舌空中碰撞消能实例

坝名	坝高/m	坝型	泄洪量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	泄洪消能方式	消能效果	建设情况
流溪河	78	拱坝	941	溢流、高低坎	良好	已建
凤滩	113	空腹重力拱坝	2660	表溢流、高低坎	较连续坎冲坑浅 60%	已建
白山	149.5	重力拱坝	11 100	高孔 4、深孔 3、碰撞	较不分层冲坑浅 60%	已建
二滩	240	双曲拱坝	9600(表) 6700(中)	表、中孔水舌碰撞	冲击压力减小 60%	在建
构皮滩	234	双曲拱坝	16000(表) 10330(中)	表、中孔水舌碰撞	塘内底板动水压力为 0	拟建

如水舌碰撞位置、两股水舌迹线碰撞夹角等,在成都勘测研究院科学研究所关于二滩水电站泄洪消能总布置方案优化研究成果中已有详述,本文仅简介碰撞消能流态及在工程中应用的效果,见表 4。

碰撞消能的流态:表中孔联合泄洪时,上下两股水舌沿各自的挑坎射出,呈抛物轨迹下落,在空中某一位置相碰撞,碰撞后的合流水舌发生破碎、裂散并掺入大量空气,成为无数不连续的水股、水团,并以一定的方向和速度下落,形成气水混合二相流水舌,其水舌厚度沿程呈帚形扩散,与空气的接触和摩擦面增加,在抵达下游水面时已损失大部分能量,据有关试验资料^①,测出未经碰撞的水舌入水流速系数 φ 为 0.8~0.9;碰撞后的流速系数下降到 0.4~0.6。其下游水面的流速及冲击力均会显著减小,提高了消能率,但加强了下游的雾化。

我国 50 年代流溪河拱坝 7 孔间隔高低大差动挑坎,水舌出坎后亦有左右扩散、交叉并碰撞作用,由于是山区河流,下游无尾水,经多年运行,坝下游并未形成大的冲坑。

继后的凤滩空腹重力拱坝,坝高 113 m,13 孔堰顶溢流采用 2 层间隔高低大差动坎,出口 6 个高坎成舌状,以利横向扩散,7 个低坎水流至坎末扩散,布满 13 个孔坎宽,经空间碰撞和掺气纵向拉开,大大降低了射流水舌的单位面积流量,冲刷坑深度则大大减小,工程于 1978 年建成,1980 年 8 月泄洪最高水位接近正常水位,流量达 $12\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 。1987 年实测河床以下冲深 18.6 m,冲坑深度仅为连续式鼻坎挑流的 40%,冲坑上游坡为 1:6.7~1:11,目前大坝运行正常。

白山重力拱坝表孔(4 孔)与深孔(3 孔)采用间隔 2 层大差动扩散挑坎,表孔的低坎末两侧位置略下,中孔高坎末亦有扩宽,水流能纵向分层拉开、横向扩散并互相穿射碰撞掺气。东北勘测设计院科研所试验表明,此方案“比不分层冲深减小约 80%”。乌江渡在水头高、单宽流量大、地质复杂的情况下,采用综合大差动鼻坎(中间溢流坝、两侧滑雪道、泄

洪隧洞)沿河床大拉开的布置,使水流得到纵向拉开扩散消能,经多年实际运行,消能情况良好。

3 消能效果的衡量指标

在工程泄水建筑物的水力设计和水工模型试验的研究工作中,如何衡量和评价消能工的消能效果,目前还没有规范或规程性质的公认标准,这也给设计、科研带来一定的困难。

在长江科学院“泄水建筑物下游消能防冲问题”研究成果中,对底流水跃消力池的流态水面波动、掺气、尾坎压力、水跃淹没度、跃后流速垂线分布、冲刷等情况提出一些消能效果的判断和评价的指标,根据有关文献资料归纳如下,以供讨论并逐步修正完善。

3.1 泄洪功率

若总泄洪功率太大,宜选择相应的各种泄洪设施以分散泄洪功率,并对各种泄洪设施的泄洪功率有所控制,因此要合理分配单位泄水建筑物的下泄流量,同时要控制入水单宽流量,采用性能良好的新型消能工,分散入水单位面积上的流量,以取得良好的消能效果。

对 60 多个大型水电工程的统计表明,水垫塘单位过水断面上功率 $\Delta n = 9.89 qZ/h$ (h 为水垫塘水深),当 $\Delta n = 3\text{ MW}/\text{m}^2$ 时,表示水力条件艰巨。据有关资料计算,二滩 $\Delta n = 5.112\text{ MW}/\text{m}^2 > 3\text{ MW}/\text{m}^2$;构皮滩 $\Delta n = 4.520\text{ MW}/\text{m}^2 > 3\text{ MW}/\text{m}^2$;说明两工程在消能防冲问题上任务都十分艰巨。

从单宽流量看:冲刷计算公式 $T = Kq^{0.5}Z^{0.25}$ 中, q 的影响比 Z 大得多,因此对于不同的工程应有不同限制。

文献[2]在研究跌流冲刷时提出的指标:平均动水压力 $\Delta P < 30 \times 90.81\text{ kPa}$;动力作用指数 $L_a = t/t_m > 0.3$ (t 为下游水深, t_m 为冲刷深度);理论淹没度 $G_s = t/h'' > 1.0$;压力脉动系数 $C_{FP} \approx 3$ ($C_{FP} = P_{\max}/P$)。

3.2 冲区的动水压力

冲区河床和岸坡在有混凝土保护的情况下,对水垫塘底和岸坡上冲击动水压力 ΔP 加以控制是必

①二滩水电站泄洪消能总布置方案优化研究,成都勘测研究院科学研究所,1990。

要的,目前尚无公认指标.国外文献在研究跌流冲刷时提出平均动水压力小于 $30 \times 9.81 \text{ kPa}$,国内二滩水垫塘的冲击动水压力 ΔP 控制在 $(10 \sim 15) \times 9.81 \text{ kPa}$.经实践证明,在大单宽流量条件下,表孔采用差动坎加分流齿,表、中孔水舌空中碰撞,消能效果较好,因此,水垫塘内冲击动水压力 ΔP 控制在 $(10 \sim 15) \times 9.81 \text{ kPa}$ 左右较为合理.

3.3 单位水体所承受的下泄功率

据成都勘测研究院科学研究所收集的一些工程资料,统计出单位水体所承受功率与消能效果的关系.暂用单位体积泄洪功率作为指标衡量消能效果,即下泄功率 W 与消力塘(池)总水体 A_w 的比值控制在小于 10 kW/m^3 范围内.

3.4 评价水垫塘消能效率的综合指标

中国水利水电科学研究院高季章等^[3]分析水垫塘的水流特征,提出一个综合水垫塘消能效率的新指标,用下列无量纲数表示:

$$\Phi = \frac{\Delta P_m}{rh} \cdot \frac{\eta}{r \sqrt{gz}} \quad (4)$$

式中: $\eta = \frac{rQz}{A_w}$; 塘底板的冲击力: $\frac{\Delta P_m}{r} = \frac{P_{\max}}{r} - h$; z 为上下游水位差; A_w 为水垫塘内的总的水体体积; h 为下游水深; $P_{\max}/r$ 为塘内最大动水压力. Φ 可作为水垫塘消能效率的综合评价指标.

对于水垫塘为梯形断面:

$$\Phi = (0.95 \sin^2 \beta + 0.175) \frac{(1 + 2m \frac{h}{B}) q^{5/3} z^{5/6}}{(1 + m \frac{h}{B}) K g^{5/6} h^{7/3} L_p} \quad (5)$$

式中: β 为射流的入水角度; B 为水垫塘底宽,水垫塘两岸边坡坡度为 $1:m$; q 为射流入水单宽流量, m^2/s ; g 为重力加速度; L_p 为水垫塘的长度; $K = B_w/B_c$, B_w 为水垫塘水面宽度, B_c 为射流入水宽度.

高季章^[3]结合二滩、小湾及构皮滩等工程水垫塘消能的有关水力参数计算,建议对于高坝下游水垫塘设计中的动水压力应控制在 $\Delta P \leq 15.0 \times 9.81 \text{ kPa}$; 而 Φ 应控制为 $\Phi \geq 0.0077$.

3.5 下游冲刷

应根据冲刷区的地质情况和岸坡的稳定情况,把冲刷度控制在工程设计所能允许的范围内,特别是狭窄河床最高地应力集中区,下游冲刷不允许有过大的冲深,即使水垫塘作全面混凝土保护的情况下,用冲刷也可以相对比较各种消能的优劣.

从实际调查 12 座拱坝挑流消能工的冲刷对坝体稳定的影响来看,由凤滩、乌江渡、闽东等 12 座拱坝原型冲刷资料可以看出冲坑的上游坡一般较陡^[4],最

大为 $1:1.2 \sim 1:1.3$. 国外卡里巴由于单宽流量大、落差大,实际冲深达 85 m ,冲坑上游坡为 $1:2$; 皮科特工程 $1:2.8$. 上述工程虽冲坑上游坡较陡,但工程拱坝尚安全. 从拱坝抗滑稳定的角度来看,起控制作用的是坝肩,基础抗滑处于从属地位,因此拱坝下冲坑上游坡的允许坡度建议可取 $1:2$ 左右为宜.

4 结 语

a. 我国已建和拟建的高拱坝工程,其水头高、流量大、泄洪功率大、河谷狭窄、地质条件复杂等特点,天然地占据着世界超级水平的地位,高拱坝泄洪消能的水力问题中有许多是超国际水平的难题. 近几年来,在科学工作者和设计人员共同努力下,提出“分散泄洪,削弱水流冲刷力,加固河床,增强河道抗冲能力”等综合治理措施,创造出新的枢纽总体布置和新型消能工,较好解决了高拱坝泄洪消能防冲问题,并已取得了较好的消能效果. 但其中很多问题尚待进一步研究.

b. 根据科学试验与实践,对高拱坝泄洪消能防冲问题,采用“分层出流,水流撞击;分区消能,按需防护”的原则,提出了表孔大差动;加分流齿,中孔“压力上翘”型的新型消能工,表孔、中孔水舌碰撞,下设水垫塘的联合消能方案,经实践证明消能效果好,已成为高拱坝泄洪消能的一种典型布置方案.

c. 水垫塘水力设计的控制指标及消能效果衡量标准,目前尚无公认标准,本文根据有关资料归纳了一些意见,仅供讨论研究,有待实践论证,逐步完善.

参考文献:

- [1] 陈椿庭. 高坝大流量泄洪建筑物[M]. 北京: 水力电力出版社, 1998.
- [2] 王奎译. 欣古坝的消能系统[A]. 见: 峰谷建坝布置及消能防冲译文集[C]. 北京: 水利出版社, 1983.
- [3] 高季章等. 水垫塘的水流特征及其综合评价指标[J]. 长江科学院院报, 1997(3).
- [4] 艾克明. 挑流消能的冲刷破坏及防治[J]. 泄水工程与高速水流, 1995(3).

(收稿日期: 1999-03-01 编辑: 张志琴)

