

高坝泄洪消能研究应用新发展述评

肖兴斌

(长江科学院, 武汉, 430010)

摘要 为适应窄谷河床泄洪消能布置,近年来采用在高程上重叠布置和平面上沿河床纵向拉开的办法,取得了良好的效果。在消能方式方面,除进一步发展了底流,面流(岸流),挑流消能的各自优点外,还发展了适应于窄谷河床高水头,大流量的复合式消能工,内消能以及宽谷河床低佛氏数的泄洪消能布置。有关的科研单位结合国内实际工程提出了一些效果较好的消能工。这些新型消能工分别在实际工程中实施,效果良好。为了进一步提高今后在工程中推广应用与深化研究,进行了初步总结综述,以供参考。

关键词 高坝 泄洪消能 重叠布置 岩基冲刷 新型消能工 大差动高低坎 宽尾墩

1 前言

建国以来,我国的水利水电建设取得了巨大的成就。目前,已建各类大坝 82 900 多座,是世界上建坝最多的国家,建坝水平日益提高。已建和在建的 100m 以上的高坝有 32 座(世界上已建成 400 余座),其中已建成的龙羊峡重力拱坝,坝高 178m,在建的二滩双曲拱坝,坝高 240m,通过可行性审查的小湾水电站,为双曲拱坝,最大坝高 284.5m,将居世界第一。这些高坝的特点:水头高、流量、功率大,位于高山峡谷,给泄洪消能问题带来了困难。近年来,经实践研究采用了在不同的高程上重叠布置和平面上沿河床纵向拉开的办法,取得了良好的效果。如乌江渡水电站采用溢洪道和主副厂房及开关站等多层重叠布置;另一方面又使溢洪道的泄洪洞出水口沿河床纵向拉开,结果下游流态较好,冲刷较轻,是枢纽布置优化的典型。在消能防冲方面的研究,我国与国外相比,并不逊色,特别是新型消能工的研究,取得了显著的进展。鼻坎挑流消能采用了各种异形鼻坎及掺气分流墩,宽尾墩,宽尾墩加其他消能型式联合消能工等,均为我国首创。葛洲坝工程二江泄水闸

底流消能,其最大泄量达 $83\ 900\text{m}^3/\text{s}$,在世界上属少有。掺气减蚀新技术已在近 10 工程中得到推广应用,并取得较好的成效。

2 高坝泄洪消能工试验研究与应用

高水头泄水建筑物下泄水流具有巨大功率,可达几千万千瓦,对下游河床产生严重冲刷。所以,消能设施的合理选择与设计枢纽布置,大坝安全及工程量大小均有密切关系。随着水利枢纽的大量兴建,对高速水流消能防冲问题进行了科学研究和工程实践,使过去的单一消能模式,向多种模式内消能的模式发展,如表孔(宽尾墩)——底孔(挑流)——消力池联合消能工,压力突扩式消能工等。在新技术的研究上,提出了宽尾墩、大差动高低坎、窄缝挑坎、掺气墩、分流墩以及各种异形鼻坎等新型消能工。将水流纵向、横向竖向扩散、错开落点和水舌碰撞等方式,成功地解决了许多大型工程的泄洪消能问题,已取得了良好的效果,积累了丰富的经验。现举例说明如下:

2.1 乌江渡水电站泄洪消能试验研究

乌江渡枢纽为重力拱坝,坝高 165m,坝址岸坡陡峭,河床狭窄,坝基为三迭纪石灰

岩,上下游为页岩层,坝脚下游紧接九级滩页岩组,横穿河谷,允许流速为 $2\sim 3\text{m/s}$,增加了泄洪消能防冲的难度。经水工实验研究,比较了屏流及挑流消能方案。最后选定为泄流量 $20\ 940\text{m}^3/\text{s}$,由6个表孔两个中孔,两条隧洞联合泄洪,其中6个为 $13\text{m}\times 18.1\text{m}$ 孤门控制的表孔溢流坝,流量 $15\ 660\text{m}^3/\text{s}$,单宽流量 $201\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 。中部4孔溢流坝从厂房顶溢流挑越主厂房,左右孔为滑雪道。在挑坎布置方面,中部设高低两组挑坎,左右滑雪道末端挑坎延伸至厂房下游。左右岸两条隧洞向下游超越九级滩页岩外,8个泄水建筑物上共设掺气槽11个,这些措施有利于纵向拉开空中碰撞消能。经过多年运行及原型水力学观测,掺气减蚀,消能效果良好。

2.2 清江隔河岩重力拱坝消能试验研究

清江隔河岩坝高 150m ,为高拱坝大流量工程,1980~1984年进行枢纽整体消能防冲试验,研究了挑流,屏流,底流及斜坡底流等方案。设计与校核流量分别为 $21\ 900$ 及 $23\ 900\text{m}^3/\text{s}$,泄流为7个 $12\text{m}\times 18.2\text{m}$ 表孔,4个 $4.5\text{m}\times 8\text{m}$ 深孔,2个 $4.5\text{m}\times 7.5\text{m}$ 底孔。原先由于拱坝水流向心,流量集中,消能不好,于1986年工程开工后,重点研究表孔跌流坝面设宽尾墩,深孔出口设置窄缝挑坎的联合消力池方案。宽尾墩采用不对称扩散,深孔出口采用窄缝挑坎出口扭向,使水流折射两侧,充分扩散,纵向拉开,以消除池中两侧回流,使流速分布均匀,解决了池中向心水流问题,达到较好的消能效果。

2.3 二滩水电站泄洪消能防冲试验研究

二滩水电站拦河坝为双曲拱坝,最大坝高 240m ,是我国目前最高的拱坝。设计流量为 $20\ 600\text{m}^3/\text{s}$,校核流量 $23\ 900\text{m}^3/\text{s}$,下泄最大功率为 $3\ 900$ 万kW,居世界拱坝的首位。设7个 $11\text{m}\times 11.5\text{m}$ 的溢流表孔,6个 $5\text{m}\times 6\text{m}$ 的中孔和4个 $3\text{m}\times 5\text{m}$ 的放空底孔,右岸设2条 $7\text{m}\times 8\text{m}$ 短进水口,后接 $13\text{m}\times 13.5\text{m}$ 明流泄洪洞。流量的分配是坝身表

孔,中孔及岸边泄洪隧洞各占 $1/3$,以达到分散流量为解决消能创造条件。

80年代后期,二滩泄洪消能研究列入国家“七五”攻关项目。经成勘院研究所、水科院、南科院等单位研究。最后选用的方案是:表孔中孔水舌空中碰撞消能,表孔为大差动高低坎,表孔末端设分流齿坎;中孔采用平面拐弯,立面上翘,尾端横向扩散竖向收缩的“压力上翘”型坝身中孔新型消能工;下游建二道坝形成水垫消力池。由于水舌空中碰撞,使水舌分散,落点纵向,横向拉开距离,大大减轻了水垫塘的冲击力,最大冲击动水压力在 $10\text{mH}_2\text{O}$ 以下,加上水垫塘的消能作用,下游河床消能防冲效果良好。

2.4 长江三峡水利枢纽消能防冲试验研究

三峡工程举世瞩目,为了保证泄洪时枢纽安全,设置了表孔、中孔和深孔,均采和鼻坎挑流的表孔与深孔间隔布置,并有人建议取消堰孔间的长隔墙,使表、深双层过水,挑流在空中碰撞消能。为预测下游基岩被挑流泄洪产生冲刷,确保坝基安全,国家科委把《三峡工程枢纽总体布置优化》列入国家重点科技攻关项目。长江科学院、水科院和清华大学等,广泛地进行了理论和实验研究,取得了丰硕的成果。清华大学用能量法推算出三峡大坝下游极限冲刷深度为 43.7m ,用放大块模拟法进行三峡溢流极限冲刷试验,其极限深度为 40.9m 。长江科学院三峡溢流坝模型中采用了 10.6 、 4.4 及 2.1mm 等4种不同床沙粒径进行冲刷试验,得出极限冲刷深度为 43.0m 。本试验中还观测了不同粒径冲刷坑处的脉动压力,基岩面冲刷前后的脉动压力变化,以及设计条件($P=0.01\%$)以下的极限冲深等。从试验得到 $T\sim d_{50}$ 关系曲线,延长曲线到 $d_{50}=0$,查得极限冲深达 43.0m ,从脉动压力衰减曲线得到的极限冲深为 42.2m ,两者很接近。在 $1:150$ 整体模型中,模型沙粒径为 3mm ,原型最大冲深为 40.0m 。武汉水利电力大学在 $1:54$ 比尺断面模型中,

采用平均粒径 9mm 的碎石作冲刷试验,在水位 175m 时,表、深孔联合泄流。坝下河床冲刷坑深度为 37~37.5m,距坝脚 180m,冲刷坑上游坡度一般均大于 5。冲刷坑不至危及大坝的安全。若将表、深孔体型优化,坝下冲刷还可减轻。

河海大学科研中心用模型方法估算三峡大坝下游冲刷深为 20~30m,并对长科院已做试验值再分析,得出冲深达 48.28m。长科院还进行了溢流坝窄缝挑坎消能试验,其冲刷深度较等宽挑流鼻坎的冲深减少了 46%,消能效果较好。为设计提供了科学依据。

2.5 岩滩水电站泄洪消能试验研究

岩滩水电站为混凝土重力拱坝,坝高 110m,设计洪水流量(频率 0.1%)为 30 500 m³/s,总泄洪功率达 11 620MW。在主河床上布置了溢流坝,其中 7 个表孔以及一个泄水孔(5m×8m)为主要泄洪建筑结构。表孔泄量为总泄量的 88%~75%。戽式消力池底板,高程 147.5m。设计水位 227.2m,入戽最大单宽流量达 304m³/s。佛氏数一般小于 4.5,属于大单宽流量与低佛氏数的大型水利工程。通过水科院、广西水科所等单位共同努力,经过两年多的大量试验研究,最终选用戽式消力池加宽尾墩(即堰顶收缩射流)消能方案,消能效果显著。主要表现在:削波减浪,稳定流态,使出戽最大流速降低 26.1%~33.8%,下游冲刷深度降低 43.2%~59.6%,冲刷范围显著缩小。试验表明,其戽式长度可进一步缩短,但因受池基础断层破碎带的限制,故保留了原设计长度,并经原型运行验证,效果良好。

正在设计的龙滩水电站,为混凝土重力坝,坝高 128m,上下游落差 147m,单宽流量 147m³/s。入戽流速达 51m/s,经试验研究,采用戽式消力池加宽尾墩,改善了下游水流流态,消除涌浪与振荡水流现象,消能效果较好。

3 新型消能工的研究应用与发展

3.1 联合消能工

近 30 年来,我国由平原建闸发展到狭谷建筑高坝。在泄洪消能方面发展的主要经验,可概括为三个方面,一是对底流、挑流、戽(面)流传统的消能形式进行了改善与发展,提高了适应能力,增强了消能效果;二是研究了新型高坝消能的特点,提出了一些新型消能工,三是因地制宜恰当配合采用多种消能工联合消能。

联合泄洪消能充分发挥各单项泄洪建筑物的消能优势,形成立体的泄洪结构并求得最佳的组合效果。近年来,狭谷高坝泄洪消能,经过了大量科学研究,证明最后选定的方案,几乎都是适合该工程的最佳的联合泄洪消能形式。如乌江渡、龙羊峡、东江、白山及正在施工的二滩、清江隔河岩等工程,都是很好的实例。

安康水电站的枢纽布置由于存在高(水头)、大(流量)、偏(流向)、软(地基)4 个特点,使泄洪消能问题极难解决。经过长期研究,各种消能方案的比较,最终选为一级池加宽尾墩再加异形挑流鼻坎的联合泄洪方案,使池长比正规消力池缩短了 1/3,左右两岸河床冲淤变化由 62m 降到 15m 左右。宽尾墩和消力池联合消能工在安康工程上应用属于我国首创。又如清江隔河岩经长期研究采用不对称的宽尾墩(表孔)——深孔(窄缝挑坎)——消力池联合消能工,很好的解决了拱坝向心水流的消能问题,是一种创新。这都是对高水头,大流量消能技术的革新和发展,具有重大的现实意义,同时对水工水力学的发展也有很大的促进作用。

3.2 大差动高低坎

我国最早采用大差动挑坎形式消能的是流溪河枢纽。继后凤滩枢纽也采用两层大差动高、低坎挑流方案,两层射流在不同的地点

注入下游河床。上层挑坎使射流横向扩散,与下层射流相互碰撞消能。1979年建成以来泄洪历时四千多小时,最大泄量达 $12\,500\text{m}^3/\text{s}$,最大流速达 35m/s ,下游冲刷最大深度 18.6m 。高速水流情报网于1987年7月在凤滩水电站召开的“消能防冲现场调研会”认为采用大差动高低坎消能效果是好的,建议严格执行合理的调度,进一步发挥大差动高低坎扩散水流互相碰撞的作用。

白山水电站采用4个表孔与3个深孔的双层挑流鼻坎。二滩水电站表孔为差动坎俯角,跌坎加分流齿坎,中孔选用“压力上翘型短管”,由表、中孔水舌在空中碰撞消能以及表孔分流齿对水舌的分散作用,使水垫塘的冲击压力减少60%以上。这种双层多孔水流碰撞的消能形式在我国高坝建设中还是首次应用。

3.3 溢流表孔分流齿坎

经验表明:在狭谷河槽建高拱坝,一般认为尽可能从坝身布置泄洪建筑物是经济合理的。因此,设计上将水流高度分散作为解决消能的重要措施,提出表孔采用大差动高低坎设分流齿坎,表中孔水流在空中碰撞消能问题进行研究。国外现有经验均为平面直线型式正挑角坝面设分流齿,可使水舌横向扩散,上下碰撞,消能效果较好。二滩工程表孔采用跌坎设分流齿,国内外均未进行过研究,经各种型式的比较及减压空化验证,选定大差动坎设分流齿坎的最优尺寸和布置方式为:齿坎高度 $\Delta H = 0.15 \sim 0.25$,齿坎水头 $H = 3.5\text{m}$,齿坎挑角 20° ,齿槽比 $W/S = 1.2$,每一孔内布置2个齿坎,位置在跌坎的末端,为了防止齿坎两侧面空蚀,在两侧面各设通气孔。经试验证明;通气好,水流分散,跌塘内的动水压力较连续坎(不设分流齿坎)减少了 $53\% \sim 68\%$,是消能效果显著的新型消能工。

3.4 窄缝挑坎

窄缝挑坎水流沿河床纵向拉开,适用于狭窄河谷。70年代末开始进行试验研究,并

应用于实际工程。如东江双曲拱坝,坝高 157m ,右岸溢洪道采用的窄缝式挑坎挑流消能,龙羊峡水电站右岸溢洪道采用的对称和不对称曲面贴角窄缝挑坎,既有导向又有纵向拉开水舌的效果,消能效率较高。

此外,潘家口、安康、五强溪、清江隔河岩、岩滩、龙滩等工程均采用了宽尾墩接消力塘的新型消能工,取得好的消能效果。

3.5 掺气分流墩

掺气分流墩设施由水平掺气坎、侧墙挑坎和高出水面的分流墩三部分组成。其作用是使整体水流分散成多股水舌,并使各股水舌竖向、纵向扩散,碰撞,碎裂、掺气,以增进掺气减蚀和消能效果。陕西机械学院水科所于70年代开始研究,并用于柘林泄洪洞消力池的改建。建成后又经1983年1984年超高水位的考验。同年进行了原型观测,证实掺气减蚀及消能效果较好。此后又进行了系统的试验研究,阐明了掺气分流墩设施的特性和特殊流态,分析了影响设施消能效果的各项因素,提出了整套体型设计参数,研究了掺气分流墩的动力特性,空化特性及消力池压强和掺气特性,提出了设计消能率的估算方法,以及整体的水利设计方法。为这种消能工的推广应用提供了依据,这种掺气分流墩为我国首创。

3.6 大型消力墩

70年代初,巴西的依拉索尔台拱坝,西班牙赛提罗坝在消力池上游陡坡上设置大型分流墩。将陡坡水流分成两股水舌,抛向空中纵向拉开,充分掺气,以减小入池能量,增进消力池中消能效果。

西班牙阿尔康塔拉支墩坝,坝高 130m ,在岸边溢洪道消力池的后半部设置了3个大型消力墩,每个消力墩在平面上呈梯形,前缘宽 12m ,末端宽 16m ,长约 14m ,墩子前缘高 7m ,消力墩的作用是使水跃推至消力池的前半部,以加大水深和降低流速,对于防止空蚀和增进护坦安全都是有益的。

3.7 内消能工

加拿大的麦加堆石坝,坝高 244m。左岸泄洪洞是利用 $\varphi 13\sim 8\text{m}$ 的导流洞改建的,在 180m 的水头下,洞中流速达 50m/s。为降低流速采用了有压消能工,在洞中修建两座混凝土塞,水流在上下塞之间扩散室内掺混消能,流速降至 36m/s。这种消能工是利用漩涡消能,但漩涡引起压力脉动,漩涡中心也会引起空化,使用时必须充分研究,留有一定安全度。黄河小浪底工程有压泄洪隧洞设计,采用多级孔板消能,经试验研究应注意空化,消能效果较好,已被采用。

此外,竖井消能如苏联的查尔瓦克水利枢纽,土坝高 180m,由导流隧洞改建成竖井式泄洪洞,竖井直径 11m,喇叭口为部分圆环,有 5 扇弧门控制,水头 150m,设计流量为 $1\ 200\text{m}^3/\text{s}$,竖井底设有折流挑坎控制流量,消去部分能量。涡流式竖井消能在意大利涡流式竖井泄洪隧洞较多,据记载已建 25 条以上。它的特点是在竖井前专设置一个涡室来

(上接第 26 页)

3. 大洪河流域暴雨洪水具有明显的季节性变化,建议开展本电站前(主汛期)后期分期设计洪水的分析计算以及汛期运行限制水

迫使水流旋转;其优点是能保持宣泄各级流量时的流态稳定。

4 结束语

本文较系统总结了高坝泄洪消能研究及其在工程中的应用情况,列举了大量的应用实例。但必须指出的是,在工程实际中,由于坝址处的地质,地形条件和坝型的差异,以及水文条件不同,在制定消能方案时,必须通过水工模型实验研究,以达到最佳消能效果。

参考文献

- 1 陈椿庭. 高坝大流量泄洪建筑物. 水利水电出版社, 1988. 9
- 2 高速水流情报网第二届全网大会论文集(上、下册). 水利电力部高速水流情报网, 1986. 10
- 3 全国高水头泄水建筑物水力学问题论文集(上、下册). 中国水利学会水力学专业委员会, 1987. 10
- 4 泄水工程与高速水流情报网第三届全网大会论文集(上、下册). 水利水电泄水工程与高速水流情报网, 1990. 11

(收稿日期:19940516)

位分期抬高等的研究。对具有年调节性能的水库电站来说,探求多种增加全年发电量无疑是很裨益的。

(收稿日期:19940910)

Study on Flood Control Alternatives for Reservoir of Dahonghe Hydropower Station

Guo Rongwen

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

Abstract Various problems in related to reservoir flood control have not been settled successfully since the operation of Dahonghe hydropower station 30 years ago. During the first periodic safety inspection of the dam, a more thorough study on safety of reservoir flood control was undertaken and a comprehensive comparisons of flood control alternatives were performed. One alternative was identified practical, the content of which is that remedy works will be taken in the present normal spillway while crest elevation of the spillway will be lowered to increase discharge capacity. Now the project design was finished and construction starts.

Key Words safety inspection of dam reservoir flood control flood standard normal spillway emergency spillway