

我国水电站大坝事故分析与安全对策

邢林生

(国家电力公司大坝安全监察中心, 浙江 杭州 310014)

摘要:对水电站大坝事故的反馈分析表明,大多数事故与设计阶段的失误、施工过程遗留下的隐患、运行管理中的差错等因素有关。应强化设计、施工、运行全过程的风险意识和安全管理,对运行中的大坝要坚持实施定期检查,及时维修加固和改造,认真进行安全注册,严密制定汛期和低位水位时的防范措施,加大科研力度和开展险情预计,以防止重大事故的突然发生。

关键词:水电站大坝;大坝失事;溃坝;大坝安全

中图分类号:TV698.2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)02-0026-07

我国是世界坝工大国,修建了8万多座坝,水库总库容约4700亿 m^3 ,这些工程兴利除害,为国民经济发展发挥了巨大作用。我国由电力部门负责管理的130多座水电站大坝,从数量上看,虽然只占全国筑坝总数的很小一部分,但在国计民生中却占有特别重要的地位,这130多座水电站的装机容量,约占全国水电总装机的60%。在130多座大坝中大多数为高坝大库,总库容约2000亿 m^3 ,这些大坝的安全,不仅直接影响到水电站自身发、供电效益的发挥,并与下游人民的生命财产、国民经济建设命脉乃至生态环境密切相关。水电站大坝与世界上所有建筑物一样,都有一个建成使用、渐趋老化直到消亡的过程,人们奋斗的目标,就是要对这一过程实行有效的控制,延长大坝的正常使用年限,避免大坝溃决失事造成巨大灾难。大坝溃决失事是一种突发性事件,当其发生时已无法挽回,但引起大坝溃决失事的原因,是有规律可循的,多数大坝的溃决失事,是某些不安全因素由量变发展到质变的结果。如何从大坝已经发生的一些事故中,总结出经验教训,及时采取对策,消除大坝的病害和隐患,防微杜渐,防患于未然,这是摆在广大坝工建设和管理人员面前的重大课题。

1 主要事故回顾

我国20世纪70年代河南板桥、石漫滩两座水库溃坝,给社会和人民带来极大灾难;20世纪90年代青海沟后水库溃坝,再次造成巨大损失。这3座水库溃坝事件,留下了让人们永远难忘的深刻教训。多年来,我国大、中型水电站大坝虽未发生溃坝失事,

但重大工程事故却多次出现,个别装机容量较小的水电站大坝发生的21起事故,按时间顺序,列在表1中。我国水电站大坝几十年来所发生的事故,远非表1所列的这些事例。前事不忘,后事之师,认真分析这些事故的原因,从中吸取深刻教训,无疑是非常必要的。

2 事故原因分析

科学技术发展到今天,人们还不能驾驭洪水和地震,无法杜绝自然灾害的破坏,做不到确保大坝的绝对安全。但对大坝事故的反馈研究表明,绝大多数事故与人们的主观认识不足或工作失误有关。现结合上述典型事故,按设计、施工和运行三个阶段,对事故原因作概略的分析。

2.1 设计阶段的失误

在设计阶段,坝址确定、总体布置、坝型选择、洪水演算等重大问题的决策若有失误,将会给建成以后的大坝,带来难以更改的先天不足,甚至铸成重大事故。实践证明,黄龙滩、白山等工程的总体布置,对泄洪水雾飘移危害认识不足,厂房和开关站置于水雾密集区,又无有效防范措施,这是造成这两起水淹厂房事故的重要原因。选用单支墩大头坝型时,对温度应力的影响程度、上游面裂缝可能产生的危害,和对混凝土强度的要求等问题,分析研究深度不够,致使已建成的几座单支墩大头坝,几乎都受到大型贯穿裂缝的困扰。梅山连拱坝在勘测选址时,对右岸的地质、地貌判断失当,将右岸坝基置于一个三面临坡

作者简介:邢林生(1942—),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事水工结构性态分析和大坝安全评价研究。

表1 我国水电站大坝21起事故的经过

大坝名称	最大坝高 /m	总库容 /亿 m ³	事 故 经 过
柘溪单支墩大头坝	104	35.65	1961年3月6日,大坝首次蓄水至148.9m时,上游右岸1.55km处发生大规模滑坡,总体积165万m ³ ,掀起巨大涌浪,坝前浪高达3.6m,库水漫过坝顶泄向下游,造成一定损失。
新丰江单支墩大头坝	105	138.96	1962年3月19日,距坝1.1km处发生6.1级地震,震中烈度8度,当时库水位110.48m,坝高108.5m高程处产生长达82m的贯穿性水平裂缝,导致库水渗漏,曾被迫降低水位运行 ^[1] 。
梅山连拱坝	88.24	22.63	1962年11月6日,右岸坝基突然大量渗漏水,达70L/s,一个未封堵的灌浆孔喷水高达11m,坝基向上抬动,坝顶强烈摆动,坝体出现几十条裂缝,大坝处于危险状态,被迫放空水库进行加固 ^[2] 。
修文拱坝	49	0.117	1963年7月9日,泄洪时洪水漫过坝顶0.4m,历时约2h。
柘溪单支墩大头坝	104	35.65	1969年6月30日,1号支墩114.5m廊道西侧出现劈头裂缝,缝宽2.5mm,裂缝面积约占大坝横剖面的45%,缝内严重串水,1977年5月16日,2号支墩产生劈头裂缝,射水达40L/s,被迫降低水位运行 ^[3] 。
佛子岭连拱坝	75.9	4.87	1969年7月14日,泄洪时洪水漫过坝顶,持续25.25h,漫顶高度1.08m,坝后厂房被毁,两岸遭受严重冲刷破坏,损失巨大。
独嘴重力坝	85	3.45	1971年汛后发现消力塘两岸侧墙遭受严重冲刷,1975年水下检查发现有侧墙冲坑最大深度达11.5m,1983年水下检查发现大小冲坑86个,冲走混凝土1200m ³ ,1986年水下检查发现漏水道和分水墙冲刷破坏严重。
回龙山重力坝	35	1.23	1976年11月10日和1978年汛期,在开启闸门泄洪时,先后两次发生洪水漫过弧形闸门顶,漫顶水深0.75m。
纪村重力坝	22.5	0.003	1977年建成投运不久即发生坝基红层泥化、软化,1981年检查发现6~8号坝段泥化、软化面积约108m ² ,最大泥化层深达5.5m,1~3号坝段建基面脱开范围约120m ² ,7号坝段坝基摩擦系数由0.4降为0.31,大坝处于危险状态,被迫放空前池不发电进行加固。
陈村重力拱坝	76.3	26.88	1977年至1979年长期低水位运行,大坝下游面105m高程处的水平向大裂缝明显扩展,拱冠部位缝宽扩展1.39mm,河床10个坝段的缝深超过5m,大坝严重漏坝。
风滩空腹重力拱坝	112.5	17.4	1979年6月24日,在泄放流量为3600m ³ /s的洪水时,下泄水流挟带卵石折射进入近旁的副厂房窗口,继而涌入厂房,3台机组被淹水深20cm,造成全厂停电,死亡2人,损失大量机电设备和图纸资料的重大事故。
天桥重力坝	53	0.34	1979年8月13日,当上游发生6000m ³ /s的洪水时,泄洪水流从弧形闸门前翻入检修平台,又通过廊道淹了发电厂房,水轮机层水深1.1m,138台机电设备被淹,被迫停止发电20d。
乌江渡拱坝	165	21.4	1980年6月19日,当发生不足10年一遇洪水时,泄洪水雾弥漫,开关站出线相间短路跳闸,引出线烧断,泄洪水涌入厂房淹了发电机电,造成直接经济损失920万元、少发电3亿kW·h的重大事故。
黄龙滩重力坝	107	11.7	1980年6月23日,遭遇50年一遇洪水泄洪时,泄流飞溅,水雾弥漫,2号机主变放电,被迫停机解列,继而1号机停机解列,厂房前后落水大增,发电机电被淹,停电49d,损失电量2亿kW·h。
湖南锦屏形支墩坝	129	20.6	1983年4月21日,12号坝段灌浆廊道渗流量突然大幅度增加,达上年相同水位时的6倍,随着库水位的上升渗流量以更大幅度增加,排水孔单孔最大达32.83m ³ /d,经检查帷幕已拉断。
丰满重力坝	90.5	117.8	1986年8月7日,泄洪时12~14号坝段溢流面上1920m ³ 混凝土被冲走,破坏面积约1090m ² ,平均冲深约2m,最大冲深3.3m,放流小时被迫关闭,溢流面破坏严重 ^[4] 。
白山重力拱坝	149.5	59.1	1986年8月发生15年一遇洪水,9月3日开闸泄洪时,产生大水雾,坝下右岸开关站放电,1号、2号机组被迫停运,泄放水流激起岸坡石碴磁环开关站瓷瓶,洪水进入厂房,水轮机层水深10cm。
佛子岭连拱坝	75.9	4.87	1993年11月下旬,河床13个垛墙顶向下游的位移量都超过历史最大值,增大值最大的达59%,同时13号垛基础沉降量比历史同期明显增大,坝体裂缝有扩展迹象,被迫控制水位运行。
白山重力拱坝	149.5	59.1	1995年7月下旬至8月上旬,最高库水位超过500年一遇洪水时,坝基渗漏量大增,其中50%来自基础廊道内的几个不明渗水点,有的已将底板二期混凝土顶裂,有一个渗水点产生管涌,射水高2m,带出泥沙污物。
柘林土坝	63.5	79.2	1998年2月10日,例行检查时,发现泄洪放空洞左检修门槽被冲,进一步水下检查发现门槽下游护角钢板翘起,内部的二期混凝土破碎剥离,放空洞不能使用,被迫将汛期起调水位降低1.5m。
喀什一级粘土心墙砂砾石坝	20.5	0.09	1998年6月1日,当发生流量为1890m ³ /s的洪水时,泄洪过程中洪水漫过坝顶导致溃坝,480m长的坝体被冲毁1/2以上,一级及以下的几个电站全部瘫痪,损失巨大,该坝原设计为砂砾石坝壳粘土斜墙坝,坝身铺设了防冲墙,1985年附近大地震时大坝迎水面滑落库中,修复时改变坝型。

的单薄山脊处,而右坝座基岩被三组裂隙交叉切割,破坏了岸体的整体性,这就为库水渗入,裂隙扬压力增加,抗剪强度降低,引起坝体侧向错动创造了条件,在右岸裂隙发育区,未设置排水孔排水减压,导致渗压聚集到十分巨大的程度,最终超过抗滑力而发生基岩错动,这一失误的教训,对于其它类似大坝都有借鉴作用。纪村坝基红层以粘土质粉砂岩为主,粘土矿物中亲水性强、分散性和膨胀性大的蒙脱石含量高,坝基有多条断层穿过,坝前库水在低水位时受附近黄铁矿化带影响呈强酸性,对坝基红层有强烈侵蚀作用,由于前期勘探工作深度不够,未能查

清这些重要工程地质和水文地质问题;在设计中对红层遭受破坏的机理认识不足,对于一定深度内的断裂构造带的渗漏破坏问题,没有给予应有的重视,当7号坝段基坑开挖发现断层多处夹泥且有泉水出露时,只用深为80cm的常规混凝土塞处理,运行实践反馈说明,这一措施没有见效^[5]。喀什一级大坝位于高地震烈度区,而粘土斜墙坝的抗震性能差,原设计在选择这种坝型时,未能对其抗震性能作出科学论证,同时又不适当地将防冲膜放在斜墙下游侧,形成潜在的最薄弱滑裂面^[6],因而在1985年大地震时,使大坝迎水面滑落库中。

2.2 施工阶段遗留下的隐患

施工是实现设计蓝图的重要阶段,从基础开挖、坝体浇筑、设备安装到竣工清理的一道道工序中,某一道工序出现失误,都可能遗留下产生事故的隐患。湖南镇大坝 12 号坝段坝踵部位基础开挖时,尚有超过 20 m^2 的缓倾角裂隙覆盖层未予撬除就浇筑基础薄层混凝土,并受到周围基础开挖放炮的震动影响;当坝体混凝土浇筑到一定高度后该坝段留作施工导流过水缺口,后在长期间歇的混凝土上快速浇筑上部坝体,一、二期冷却工序未能跟上,没有达到稳定温度即进行甲、乙纵缝灌浆,导致纵缝张开 $0.6 \sim 1.0\text{ mm}$,使上游面坝基垂直应力受到损失,这些因素致使 12 号坝段帷幕前坝基面和浅层基岩成为渗流畅通的薄弱部位,是帷幕在高水头作用下失稳的重要原因^[7]。风滩大坝溢流面混凝土墩未清理,天桥大坝检修平台施工门封堵不严,都造成水淹厂房的重大事故。白山大坝基础帷幕前的钻孔,在施工时没有灌浆也未封堵,这一遗忘险些造成重大损失。柘林泄洪放空洞左孔检修门槽的破坏,主要原因是未按图纸施工,没有将护角板(水封座板)与主轨用螺栓穿孔连接起来并整体封焊,而是将护面板切割成槽形插在螺栓处,且未封焊;其次是二期混凝土质量差,在长期泄洪水流的冲击振动和护角板与二期混凝土之间承压的作用下,导致护角板翘起破坏。纪村坝基红层迅速泥化、软化的一个重要原因,是施工中的失误和事故,该坝坝基开挖时部分坝段欠挖 1 m 左右,遗留下渗透性大的表层破碎岩石;在接近建基面 $30 \sim 50\text{ cm}$ 范围未按要求用人工撬挖,仍放炮松动,造成软弱红层表面裂隙增多;浇筑基础混凝土前,曾用高压水冲洗建基面;有部分坝段未及时浇筑基础层混凝土,致使建基面长期暴露经受日晒、雨淋、水泡,使红层遭受一定程度的破坏;7 号坝段上游侧固结灌浆时由于下游侧基础层混凝土仅厚 $0.75 \sim 1.0\text{ m}$,龄期仅 10 d ,灌浆压力也未能适当控制,结果造成下游侧基岩抬动,基础层混凝土产生大面积 X 型裂缝,缝长达 33.5 m ,最大缝宽达 5 mm ,未作彻底处理即在其上继续浇筑混凝土,这一事故与该部位红层恶化有着直接关系。龚嘴大坝尾水部位 4.7 m^3 施工弃渣未予清除,不仅抬高尾水位降低了发电厂房的防洪标准,也是形成淘刷两岸侧墙破坏力的主要因素之一^[8]。喀什一级大坝在 1982 年前施工中,无论是坝体还是防渗斜墙,都未进行碾压,相对密度低,强震时容易液化和沉陷,是 1985 年大坝整体破坏的原因之一。

2.3 运行管理中的诸多问题

相对于设计和施工阶段,运行阶段是受益阶段,

但在发挥工程效益的过程中,一定要贯彻安全第一的方针,否则,从长远观点和全局利益考虑,不仅不能获得效益,反而可能会造成重大灾害,或者使大坝遭受严重损坏。佛子岭大坝 1969 年的漫坝事故,其重要原因就是因盲目追求灌溉效益,不了解洪水出现的随机特性,汛期不适当地抬高运行水位,减少了防洪库容。陈村大坝 1977 ~ 1979 年下游面大型水平裂缝明显扩展,坝体严重受损的一个重要原因,也是因为片面追求下游的灌溉效益,在这几年之内,当地天气干旱,来水量少,大坝长期遭遇低水位与高温、低温组合的不利运行荷载,当库水位已下降至死水位时,仍敞开中孔放水,使库水位在 3 年中有 720 d 低于死水位,坝顶向上游的位移量逐步加大,造成下游面水平裂缝不断扩展^[9]。运行管理中的一些疏忽或失误,往往直接造成事故,带来重大损失,如佛子岭大坝 1969 年汛期提升闸门的关键时刻,闸门开启 $2/3$ 时电源中断,因无备用电源,闸门不能全开,影响了泄洪,是造成洪水漫坝事故的原因之一。回龙山大坝因为无可靠电源和闸门操作不规范,先后两次造成洪水漫过闸门顶。喀什一级大坝 1998 年泄洪时,在闸门提起过程中因输电杆倒杆失电,又无备用电源,使闸门开度不足,影响泄洪能力,这是该坝洪水漫坝导致溃坝的一个重要原因。黄坛滩、天桥等大坝泄洪时水淹厂房,与设计、施工中的一些失误固然有关,但运行人员思想麻痹,安全检查不严,防范措施不周,水情预报不准,排水泵运转失灵,备用电源中断等方面的问题,也是造成事故的一些原因。当大坝已有严重缺陷急需补强加固时,管理人员的掉以轻心或者方案长期不定,往往会贻误时机造成损失,如丰满大坝施工质量差,运行年代长,遭受冻融破坏严重,混凝土老化脆弱,需要及时维护和补强加固,电厂曾多次申报,但因方案久议不决,资金来源渠道不畅等原因,未能防范在先,直到溢流面混凝土 1986 年大面积冲刷破坏后,才被迫冒险抢修。大坝加固方案缺乏科学论证,也有可能达不到加固目的,如新丰江大坝 1962 年地震破坏之前,1960 年曾发生过地震,研制加固方案时,对设计抗震荷载和抗震措施分析研究得不够,加固后 1962 年地震时仍受到破坏,1962 年的加固措施也有一些不合理的地方^[10],有待进一步探讨和研究。喀什一级大坝 1985 年被地震严重损坏后,为了能在短时段内恢复发电,只对大坝做了修复,受损坝体未做根本处理,给 1998 年大洪水泄洪时遗留下重大隐患,是造成溃坝的主要原因之一;1998 年溃坝后修复设计方案中,未将坝顶防浪墙与粘土心墙连接起来,1999 年特大洪水时水位超过粘土心墙顶 0.63 m ,洪水已经漫坝,只是历时

较短,才未再次造成洪水漫坝导致溃坝的严重事故。

3 对策

自20世纪80年代以来,我国政府以及坝工界广大科技人员,为确保水电站大坝的安全,努力探索,勇于实践,将国外先进经验与我国国情相结合,采取了一系列重大举措,取得了显著的成效。随着社会的发展和公共安全观念的普及,对水电站大坝的安全可靠性,有了更高的要求。本文在总结10多年来工作的基础上,参照国际上大坝安全技术的最新发展情况,归纳出以下6条安全对策。

3.1 强化风险意识,加强法制建设

实践证明,大坝的建设和管理,必须转换传统观念,强化风险意识。首先,要对大坝的特殊性有充分的认识,水电站大坝是一种特殊建筑物,其特殊性,一方面体现在大坝一旦失事,将给下游造成无可挽回的重大灾难;另一方面,与一般建筑物相比较,大坝的体量庞大,边界约束条件复杂,在勘测设计中坝体本身及其地基的许多性能和技术参数,还难以准确查明和确定,有的坝型如土石坝的设计还需以经验为主、大坝施工周期一般较长、干扰因素多,难以完全达到设计蓝图的要求,建成后的坝,不仅长期承受水压力、渗压力等巨大荷载,并不断遭到渗流、溶蚀、冲刷、冻融等有害作用,还有可能遭遇特大洪水和地震的破坏,因此,每座大坝实际上都存在一定的失事风险,对于习惯于按确定论思考问题的我们来说,对此要有一个清醒的认识。其次,大坝的安全应在设计、施工和运行每个环节都得到保证,这是强化大坝风险意识的另一个重要问题,如前所述,设计、施工和运行中的任何失误和疏忽,都将影响到大坝的风险度,都有可能酿成大祸;这三个阶段是一个连贯的整体,必须加强全过程安全管理,相互之间应按照有关技术规程和规范,加强协作,有机联系,要精心设计,精心施工,严格进行蓄水 and 竣工安全鉴定,为大坝运行提供安全基础,运行要主动为设计、施工反馈信息,共同努力,提高设计、施工和运行管理水平,确保大坝的安全。

1987年《水电站大坝安全管理暂行办法》由原水利电力部颁发,这是我国政府以及坝工界大坝风险意识明显增强的反映,是在依法管坝道路上迈出的第一步。10多年的实践充分说明,立法工作是确保大坝安全最重要的一项措施。当前,根据国家机构改革和政府职能调整的实际情况,要继续加强法制建设,不断完善法规体系,尤其是要抓紧以下几方面的立法工作:由于保证大坝安全不仅仅是一个企业行为,而且是一个公共安全问题,因此,要通过立法,

明确大坝业主或主管部门的责任,还要明确各级政府应负的责任和具有的权力;在由计划经济向社会主义市场经济转变过程中,对承担大坝安全检查、加固等工作的单位,进行资质确认,对参加定期检查专家组的技术人员进行资格审核,这些都是事关大坝安全管理工作的关键,需用立法加以具体规定。

3.2 坚持实施定期检查

我国自1987年开始的水电站大坝安全定期检查(定检),是对大坝结构性态和安全状况的全面检查和评价,至1998年底,按计划完成了96座水电站大坝的首轮定检。在首轮定检中,根据设计复核、施工复查、运行总结和现场检查的情况,从设计标准、坝基隐患、坝体稳定、泄洪消能以及近坝库岸滑坡等方面,对20世纪80年代末以前投入运行的96座大坝安全状况,作出了评价,被评为险坝的2座,病坝7座,其余87座坝为正常坝。9座险、病坝的缺陷严重,亟待加固处理,而其它正常坝一般也都不同程度地存在着一些缺陷。通过首轮定检,摸清了影响大坝安全的几个重要问题:①防洪标准偏低是主要问题之一,约有1/3的大坝,原设计时采用的防洪标准低于现行规范的规定,或是因上游梯级水库未建使防洪标准不能满足要求,个别大坝泄洪设施存在严重缺陷影响泄洪能力;②混凝土坝产生裂缝的现象十分普遍,约有2/3的混凝土坝存在较多的裂缝,有的坝裂缝规模大,破坏了大坝的整体性,有的坝裂缝已贯穿上下游或与伸缩缝连通,因而渗漏严重,个别坝的裂缝已影响到坝体的稳定;③混凝土低强、老化和冻融破坏也是一个重要问题,尤其是修建年代较早、位于高寒地区的大坝,这类问题比较突出,由于这些坝混凝土强度偏低、密实性差、冻融剥蚀严重,降低了大坝的安全度;④坝基存在隐患、渗流有异常现象的大坝约占总数的1/3,有的大坝断层和软弱夹层处理效果不理想,有的坝基防渗帷幕随着时间的推移,防渗能力明显降低;⑤大坝监测设施是保证大坝安全运行的耳目,其作用十分重要,但约有80%的大坝,存在监测项目不全,监测设施陈旧,监测成果精度低,可靠性差等问题,个别坝甚至没有布设监测设施^[1]。

96座大坝首轮定检的成果有力地证明,定检是一项确保大坝安全的行之有效的措施,应持续不断地定期开展下去。自1997年开始,我国水电站大坝第二轮定检拉开序幕,计划到2003年底,完成130座大坝的定检任务(其中二轮二次定检的大坝为94座)。截止2000年4月底,已有18座大坝完成了二轮定检(其中二轮二次定检的大坝10座),还有27座大坝正在进行二轮定检。二轮二次定检应在首轮定检的基础上适当简化,重点检查首次定检后大坝的现状

运行状态,将大坝水下检查、水工金属结构检测和大坝观测资料分析作为检查工作的重点内容。

3.3 及时维修、加固和改造

据不完全统计,全国 90 多座大、中型水电站大坝 10 多年来共完成规模较大的维修、加固和改造项目 600 多项,大致可归纳为以下 10 个方面:①坝顶、防浪墙顶、防渗心墙顶加高;②坝体裂缝处理;③坝体、坝基预应力锚固;④坝基防渗补强;⑤坝体防渗和坝面保护;⑥溢洪道、泄洪洞、泄洪闸加固或扩建;⑦坝后尾水消能防冲;⑧边坡防护;⑨监测设施更新改造;⑩水工金属结构维护或更新^[12]。经过 10 多年的不懈努力,我国水电站大坝安全状况得到全面改善,根据 1986 年普查情况,计划于 2000 年以前进行除险加固的 22 座大坝,除个别大坝外已基本完成除险加固任务,在首轮定检 9 座缺陷严重的险、病坝中,青铜峡大坝已经“脱帽”,修文、绿水河、以礼河四级 3 座大坝已基本具备“脱帽”条件。

大坝维修、加固和改造需要有一定的资金投入,前述 600 多项工程累计投入的总费用约 8 亿元。但事实表明,多数大坝是以较小的资金投入获取明显的发电经济效益和巨大的社会效益。就水电站的发电而言,能按设计标准挡水和泄洪的大坝,是保证正常发电的基本条件。少数缺陷严重曾被迫降低水位运行的大坝,消除缺陷后水库运行水位恢复到原设计标准,减少了电能损失,如洪门和南水大坝,加固后每年减少电能损失分别约为 4500 万 kW·h 和 205 万 kW·h;纪村大坝加固前年发电量仅为设计年发电量的 15%~10%,加固过程中运行水位逐步抬高,年发电量随之增加,至加固结束时已达年设计发电量的 75%。个别大坝加固后可抬高汛限水位,减少弃水增加电能,如大洪河大坝扩建溢洪道后增大了泄洪能力,可将汛限水位抬高 2 m,每年约可增发电能 1000 万 kW·h。在防洪方面,一些缺陷严重而又承担重要防洪任务的大坝,通过加固消除缺陷后,发挥出巨大的作用。1995 年东北松花江发生大洪水时,经过补强加固、安全状况得到改善的丰满大坝,与上游白山大坝水库联合调度,充分发挥滞洪削峰作用,大大减轻了下游洪水压力,避免了第二松花江堤防决口,仅吉林省范围就减少损失达 176.8 亿元。1996 年安徽南部发生 100 年一遇大洪水,曾因缺陷严重被迫长期降低水位运行,加固至 1993 年底才达到正常坝标准的陈村大坝,两次发挥滞洪削峰作用,使下游灾情得以最大程度的控制,减灾效益达 51.6 亿元。柘溪大坝曾因缺陷严重被列为全国重点加固工程,在 1996 年湖南发生大洪水时经受住了 1000 年一遇特大洪水的考验,与五强溪、凤滩大坝联合滞洪

削峰,使下游总共 952 万人口、597 亿元固定资产得以安全渡汛。柘溪大坝也曾因缺陷严重被列为全国重点危险大坝,经过多次补强加固,增强挡水能力,在 1998 年长江大洪水中共拦蓄洪水近 60 亿 m³,对降低鄱阳湖水位、减少淹没损失和保卫京九铁路大动脉的畅通,作出了巨大贡献。

3.4 认真进行大坝安全注册

1996 年原电力工业部颁发了《水电站大坝安全注册规定》,规定电力系统水电站大坝均要办理安全注册,具体要求是,根据大坝安全状况和管理状况,将大坝分为甲、乙、丙三级,实行百分制分项评分考核,经申报和审核合格后,发给证书,不符合条件者,不予注册发证,并限期整改;每年公布注册名单,若在规定期限内无正当理由不申报注册登记者,属违章运行,造成大坝事故的,按有关法规追究责任。首批于 1998 年公布的 1997 年度审核定级名单中,共有 107 座坝申报注册,其中定级为甲级坝 97 座,乙级坝 7 座,丙级坝 2 座,有 1 座坝不符合条件不予注册;1998 年又有 4 座坝申报注册,经审核和对原已注册大坝的复查,在 1999 年公布的 1998 年度获准注册的 110 座坝中,定级为甲级坝 100 座,乙级坝 8 座,丙级坝 2 座。

大坝安全注册是对大坝安全程度和管理水平两方面的综合考核。一座符合国家设计标准、坝体自身性能完好、能正常发挥其各项功能并有一定安全储备的大坝,是保证大坝安全运行的基础;制定严密的规章制度并得到认真执行,具备充足的检查和加固费用,配备了具有丰富经验和工程知识的人才,是保证大坝安全运行的必要条件。只有上述物质基础和人为因素两方面的完整结合,才能使大坝安全得到真正的保障。

大坝安全注册的一个重要特点,是实行动态管理。甲级和乙、丙级大坝有不同的注册有效期,期满前须申请换证。在有效期内,若大坝注册后新出现的重大缺陷未能按计划消除,或不按计划进行定检,或因人为原因发生重大事故,则将重新评定注册级别或取消注册登记;原来持有乙、丙级注册登记证,或未取得登记证,或被取消注册登记的坝,具备条件时,可随时申报升级或要求注册。这样的规定,适应了大坝安全状况的动态变化规律,也促使大坝主管单位和水电厂,为改善大坝安全状况和提高自身管理素质而不断地努力。

3.5 重点抓好汛期和低水位运行的安全管理

我国位于亚欧大陆东南部,地域广阔,气候条件十分复杂,不可预见的因素很多,濒临海洋的沿海地区具有明显的季风气候特点,内陆地区近年来因全

球气温变暖现象影响到冰雪融化,也频繁发生特大洪水,每年汛期都是对水电站大坝的严峻考验。汛期是大坝事故的多发时段,对大坝事故的统计表明,1/2以上发生在汛期。要按照《水电厂防汛管理办法》的规定,使防汛工作正规化、规范化、制度化。根据多年防汛工作的实践情况,以下两个重要问题应引起高度重视。一个是泄洪闸门启闭设备的备用电源问题,1969年佛子岭洪水漫顶、1976年和1978年回龙山洪水漫过闸门顶、1998年喀什一级大坝溃坝、都与泄洪闸门失去正常启闭电源而又无备用电源有关。另一个重要问题是,汛期坝前水位被人逼高,若再来一定设计标准的大洪水,就有可能引起洪水漫顶造成巨大灾难,面临这样的严峻局面,在积极向防汛指挥部门反映情况,力争避免出现这种情况的同时,努力做好洪水预报和高水位时大坝的监测工作,显得更加重要。要及时将雨情、水情和大坝性状变化资料向有关领导部门反映,供决策时参考;为了使损失减轻到最小程度,各水电厂都应制定对于超标洪水的应急措施^[13]。

一些大坝的运行实践表明,低水位运行有可能对大坝结构造成损坏。我国20世纪五六十年代兴建的拱坝,一般在设计时未考虑死水位加温升的组合情况;我国现行拱坝设计规范,从安全和经济综合协调出发,不把最大温升或最大温降作为温度荷载,也不考虑最大温升和可能出现的低库水位进行组合,但并不是这种运行工况不存在。前述陈村拱坝1977~1979年,连续遭遇低水位高温、低水位低温不利荷载组合的作用后,下游坝面水平向裂缝大幅度扩展,使坝体严重破损是一个典型事例,类似情况,泉水、丰乐、流溪河、里石门、响洪甸等拱坝也曾不同程度地发生过^[14]。对于拱坝而言,连续遭受低水位高温、低水位低温不利荷载组合后,拱坝上面也会遭到一定程度的损害,由于此时拱筒伸展,上游坝面水平向呈受拉状态,同时又叠加遭受低温荷载的冲击,将促使上游坝面产生竖向裂缝或使已有的竖向裂缝进一步扩展。陈村和响洪甸拱坝都曾发生过这种情况^[15]。对于体型单薄的连拱坝来说,低水位低温荷载组合的影响尤为敏感,它加剧拱筒收缩,促使拱筒上一些结合比较薄弱的建筑缝受拉而开裂,如佛子岭连拱坝经过1954、1955和1959年冬三个低水位低温运行期,拱筒下部建筑缝开裂现象逐渐严重,部分产生渗水,1965年放空水库时,建筑缝开裂发展迅速,已占建筑缝总数的57.7%^[16]。在运行中若出现长期低水位运行情况时,应加强大坝的巡视检查和观测资料分析,发现重大异常要及时上报,尽量防止对坝体形成严重损坏,对产生的危害性裂缝要及时

进行修补;已经历长期低水位运行并遭受严重损害的大坝,要通过设计复核,推求出最低允许运行水位,以防坝体应力状态进一步恶化,避免坝体受损程度加剧。

3.6 大力开展科研攻关和险情预计工作

大坝安全理论与技术蕴含内容丰富,属边缘交叉学科,它不仅涉及到水文、气象、地质、地震、水工建筑、大坝性态分析技术、大坝病害诊断技术、大坝修补材料和施工技术等诸多学科,还与系统决策学、工程经济学、社会管理学等密切相关。目前亟待研究的课题较多,其中有3个课题的研究价值尤为突出。第一个是大坝安全状态评价方法的研究。我国在20世纪80年代研制了一套水电站大坝安全状态评价方法,与国外大坝风险评价方法相比较,该方法评价的范围,集中在坝体和坝址附近,对大坝失事风险这个极为重要的评价内容,只在设计标准、坝体稳定和结构计算中,从工程的重要性即工程等级上,隐含了一些对大坝失事风险的评价,相对而言,国外的大坝风险评价方法,对大坝失事的调查研究和分析评判比较全面,比较科学,值得我们借鉴学习。第二个是大坝观测资料分析质量和监控指标的研究。从观测资料分析的实践情况来看,决定分析质量的关键,主要不在于分析模型的复杂程度,而是如何将数学模型分析成果,结合工程实际,对大坝的一些异常现象,作出科学合理的物理成因解释;10多年来,有关坝体变形监控指标的理论研究逐步深入,但真正应用到实践中的比较少,必须理论研究联系实际,使大坝的一些力学参数反演值更精确,研制出合乎客观实际情况的变形监控指标。第三个是水下修补技术的研究。一些大坝的重大缺陷,由于水下修补材料和施工技术不能满足要求,长期以来得不到解决,要组织力量在现有成果的基础上,尽早突破深水下修补这一难关。

大坝险情预计工作十分重要,但我国至今尚未正式开展这项工作。国外有些国家早在20世纪六七十年代就着手制定相应的法规或法令,近年来,有的国家已在部分大坝开始实施险情预计方案。为了保证国民经济的发展和社会大局的稳定,在万一发生溃坝事故时将危害减小到最低程度,必须将险情预计工作提上议事日程,逐步对每一座坝可能的失事模式、失事后果包括淹没范围和损失程度,以及在险情出现和失事时如何采取应付对策、发布警报、组织撤退等,都事先进行预计,做到心中有数。特别是那些下游有重要城镇的险、病坝,在抓紧除险加固的同时,应从现在开始,为开展险情预计工作做好准备,尽早实施。制定出的险情预计和报警计划,应作为内部文件按规定报上级主管单位会同地方政府审批

后,交由防汛指挥部门掌握使用。

4 结 语

水电站大坝安全责任重于泰山。通过对 21 起事故的回顾和分析,说明在大坝设计、施工和运行过程中,任何失误和疏忽都将影响到大坝的风险度,都有可能铸成大祸,造成巨大损失,必须加强大坝设计、施工、运行全过程的安全管理。本文重点针对运行中大坝的安全问题,在总结 10 多年工作的基础上,参照国际上大坝安全技术最新发展情况,归纳出 6 条安全对策,其中有的在实践中已被证明是确保大坝安全行之有效的措施,要坚定不移地继续贯彻下去,有的需调动各方面力量,并与国际上致力于大坝安全的同行们通力合作,共同攻关。在各级领导的充分重视和大力支持下,通过广大运行管理和科技人员的不懈努力,我国必将迅速成为坝工建设和运行管理最先进的国家之一。

参考文献:

[1] 陈东.总结经验教训强化大坝安全全过程管理[J].水力发电,1988(5):12~16.
[2] 汝乃华.梅山连拱坝右坝座的错动及其原因分析[J].水利学报,1988(9):28~35.
[3] 于晓中,买淑芳.混凝土坝裂缝危害性分析和修补[J].大坝与安全,1992(3):27~38.

[4] 曹钟毓.丰满大坝溢流面局部破坏原因分析[J].水力发电,1987(12):23~27.
[5] 邢林生.纪村混凝土坝基层的恶化及其原因分析[J].水利学报,1996(9):38~44.
[6] 左秀泓,等.新疆喀什一级水电站大坝地震害的初步分析[J].水力发电,1986(9):14~21.
[7] 邢林生,胡庚白.湖南镇大坝 12# 坝段帷幕稳定性分析[J].水力发电学报,1997(1):25~32.
[8] 柯厚明,等.龚嘴水电站消力塘冲刷破坏及整治[J].水力发电,1989(11):61~64.
[9] 邢林生,方榴声.陈村拱坝下游坝面 105m 高程附近水平裂缝的性状分析[J].水力发电学报,1988(4):66~74.
[10] 林俊高,等.新丰江大坝动力特性研究与安全评估[J].大坝与安全,1998(1):25~32.
[11] 邢林生.我国水电站大坝安全定期检查成效显著[J].大坝与安全,1995(4):22~27.
[12] 邢林生,朱锦杰.全国水电站大坝维修加固及其效益综述[J].水力发电,1999(8):16~20.
[13] 梁业国.关于华中电网水电站防洪与大坝安全的思考[J].大坝与安全,2000(1):12~15.
[14] 邢林生.低水位运行对拱坝下游面裂缝的影响[J].红水河,1999(2):39~43.
[15] 邢林生.运行工况对二座拱坝上游面竖向裂缝的影响[J].水力发电学报,1999(2):21~30.
[16] 邢林生.《混凝土大坝安全监测技术规范》的修订建议[J].大坝观测与土工测试,1998(4):30~33.

(收稿日期:2000-08-29 编辑:熊水斌)

·小资料·

我国水电站中跨度大于 20m 的地下厂房

在我国已建及在建的众多水电站中,采用地面式厂房的占绝大多数,采用地下厂房的也有一定比重。但多数跨度都在 10~20m 之间,超过 20m 的为数不多,见表 1。在我国现正设计中的大跨度地下厂房还有一些,其中还有 2 座跨度达到或超过 30m,一座是金沙江上的溪洛渡地下厂房,跨度为 30m,另一座是长江上的三峡水利枢纽地下厂房,跨度为 33.5m。

表 1 跨度超过 20m 的地下厂房一览

序号	电站名称	地 点	河 流	地下厂房尺寸/m			装机容量 /万 kW	投资年份
				长度	宽度	高度		
1	大朝山	云南 云县	澜沧江	233.9	26.4	63.1	6 × 22.5 = 135	
2	潘家口	河北迁西	滦 河	128.5	26.2	56.8	3 × 9 = 27	1987
3	二 滩	四川攀枝花	雅鲁藏布江	280.3	25.5	63.9	6 × 55 = 330	1998
4	小浪底	河南孟津	黄 河	251.5	25	57.9	6 × 30 = 180	2000
5	白山一期	吉林桦甸	第二松花江	121.5	25	54.3	3 × 30 = 90	1983
6	刘家峡	甘肃永靖	黄河	86.1	24.5	58.8	2 × 22.5 = 45	1969
7	龚 嘴	四川乐山	大渡河	106	24.5	54.9	3 × 10 = 30	1972
8	十三陵	北京昌平	东沙河	154.4	23	46.6	4 × 20 = 80	1995
9	棉花滩	福建永定	汀 江	129.5	21.9	52.1	4 × 15 = 60	
10	东 风	贵州 黔西 湄潭镇	乌 江	105.5	21.5	51.9	3 × 17 = 51	1994
11	响洪甸	安徽金寨	淠 河	67	21.5	45	2 × 4 = 8	
12	明湖	台湾南投	水里溪	127.2	21.2	45.5	4 × 25 = 100	1985
13	广州一期	广东从化	流溪河	146	21	44.5	4 × 30 = 120	1992
14	广州二期	广东从化	流溪河	152	21	48.1	4 × 30 = 120	1998
15	天荒坪	浙江安吉	大 溪	167.5	21	46	6 × 30 = 180	1998

(吴冀高供稿)