

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.04.002

三峡水利枢纽工程安全及长期使用问题研究

郑守仁

(长江水利委员会 湖北 武汉 430010)

摘要:针对三峡水利枢纽工程安全及长期使用问题的重要性,进行了如下研究:①大坝、电站厂房、船闸等枢纽建筑物的设计安全标准、抗震设计标准及提高安全度的措施,以及工程防护核武器袭击及溃坝洪水灾害的减免措施;②枢纽建筑物提高耐久性、水库减少泥沙淤积及保护水环境的措施,保障三峡工程安全运行及长期使用。

关键词:三峡水利枢纽工程;工程运行安全;建筑物耐久性

中图分类号:TV632.63;TU311.2 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2011)04-0001-07

Safe operation and long-term service of Three Gorges Project//ZHENG Shou-ren(Changjiang Water Resources Commission , Wuhan 430010 , China)

Abstract : Aiming at the significance of safe operation and long-term service problems of Three Gorges Project , the following studies were performed : (1) the design safety standards , seismic design standards and safety improvement measures for hydraulic structures such as dams , powerhouses , shiplocks and ship lifts , etc . , the measures for preventing the project from nuclear weapon ' s attack and the mitigation measures of disasters caused by dam-break floods ; (2) the measures for hydraulic structures to improve their durability and for the reservoir to reduce sediment silting and to reserve water environment so as to guarantee the safe operation and long-term service of Three Gorges Project .

Key words : Three Gorges Project ; safe operation of projects ; long-term service of structures

长江是我国第一大河,全长 6 300 余 km,居世界第 3 位。长江干流自西向东流经青海、四川、西藏、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等 11 个省(自治区、直辖市),支流展延至贵州、甘肃、陕西、河南、浙江、广西、广东、福建等 8 个省(自治

区)(图 1)。长江流域横跨我国西部、中部、东部三大地区,流域面积约 180 万 km²,约占我国国土面积的 18.8%。流域多年平均水资源总量为 9 958 亿 m³,约占全国的 35%,居全国各大江河之首,单位国土面积水资源量为 56 万 m³/km²,约为全

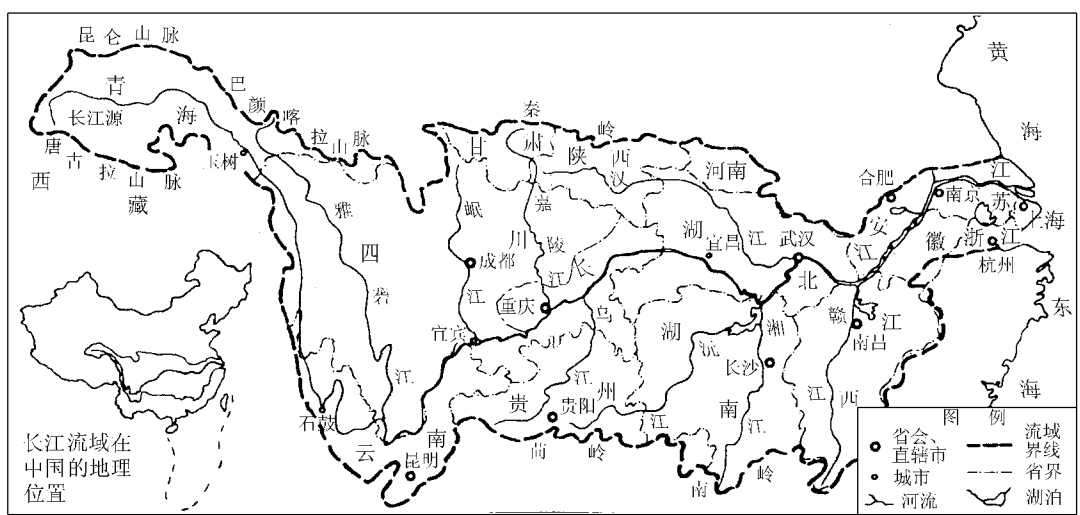


图 1 长江流域示意图

作者简介:郑守仁(1940—)男,安徽颍上人,中国工程院院士,从事水利水电工程结构设计及施工技术研究。E-mail:zhengsr@cjw.com.cn

国平均值的 2 倍。流域水能资源理论蕴藏量达 3.05 亿 kW(含理论蕴藏量 1 万 kW 以下河流及单站 100~500 kW 装机容量,下同),约占全国的 40%;技术可开发装机容量为 2.81 亿 kW,年发电量为 1.32 万亿 kW·h,约占全国的 48%;经济可开发装机容量为 2.28 亿 kW,年发电量为 1.05 万亿 kW·h,约占全国的 60%。流域内煤炭、石油、天然气等矿物能源较少,但其他能源资源如风能、太阳能、生物能、地热能等十分丰富,是我国新能源发展的重要地区。长江流域矿产资源丰富,种类齐全,储量占全国 50% 以上的约有 30 种。流域内森林面积约 3 600 万 km²,木材蓄积量约占全国的 1/4。流域鱼类资源共有鱼类达 400 余种,其中特有鱼类 166 种。长江素有“黄金水道”的誉称,是联系我国东、中、西部的大动脉,长江水系通航河流 3 600 多条,总计通航里程超过 7.1 万 km,占全国内河通航里程的 56%。2007 年,长江流域人口 4.27 亿人,占全国的 32.3%,城镇化率达 42%,流域平均人口密度为 240 人/km²,约为全国平均人口密度的 1.8 倍。长江流域 2007 年地区生产总值 8.48 万亿元,占全国的 34.0%^[1]。

1 三峡水利枢纽工程概况

三峡水利枢纽工程(以下简称三峡工程)是治理、开发和利用长江水资源的关键性骨干工程,具有巨大的防洪、发电、航运、供水等综合效益,并有利于改善环境与生态,对长江流域经济社会可持续发展和实施西部大开发战略具有重要的作用和影响。三峡工程坝址位于湖北省宜昌市三斗坪镇,控制流域面积为 100 万 km²,多年平均径流量为 4 510 亿 m³。

设计正常蓄水位为 175.0 m,相应库容为 393.0 亿 m³;校核水位为 180.4 m,水库总库容为 450.0 亿 m³;汛期防洪限制水位为 145.0 m,防洪库容为 221.5 亿 m³;枯水期最低消落水位为 155.0 m,兴利库容为 165.0 亿 m³。枢纽建筑物由大坝、电站厂房、船闸及升船机组成(图 2)。拦河大坝为混凝土重力坝,坝顶总长为 2 309.5 m,坝顶高程为 185.00 m,最大坝高为 181.0 m。泄洪坝段位于河床中部,设置泄洪深孔和表孔,与排沙孔、排漂孔和电站机组联合运行,总泄洪流量达 116 000 m³/s。茅坪溪防护坝位于拦河大坝右岸上游约 1.0 km 的茅坪溪出口处,为沥青混凝土心墙土石坝,坝顶高程为 185.00 m,坝顶总长为 1 890.0 m,最大坝高为 104.0 m,坝顶宽度为 20.0 m,迎水侧设混凝土防浪墙,坝顶高程为 186.50 m。电站厂房采用坝后式,在泄洪坝段两侧坝后分设左岸及右岸厂房,分别安装 14 台及 12 台水轮发电机组,单机装机容量为 70 万 kW;另在右岸坝肩右侧山体布置的地下电站厂房安装 6 台单机装机容量为 70 万 kW 的水轮发电机组,在左岸电站左侧山体布置枢纽的电源电站安装 2 台单机装机容量为 5 万 kW 的水轮发电机组。4 座电站的总装机容量为 2 250 万 kW,年均发电量为 882 亿 kW·h。通航建筑物船闸和升船机均布置在左岸,船闸为双线五级连续船闸,布置在左岸山体深切开挖槽内,距升船机约 1 km,闸室有效尺寸为长 280 m、宽 34 m、坎上水深 5 m,可通过万吨级船队;船舶通过五级船闸主体段(长度为 1 621 m)的历时约为 2.4 h,从上游引航道口门至下游引航道口门(总长度为 6 442 m)历时约为 3.1 h,船闸单向年通过能力为 5 000 万 t。升船机采用齿轮齿条爬升平衡重式垂直

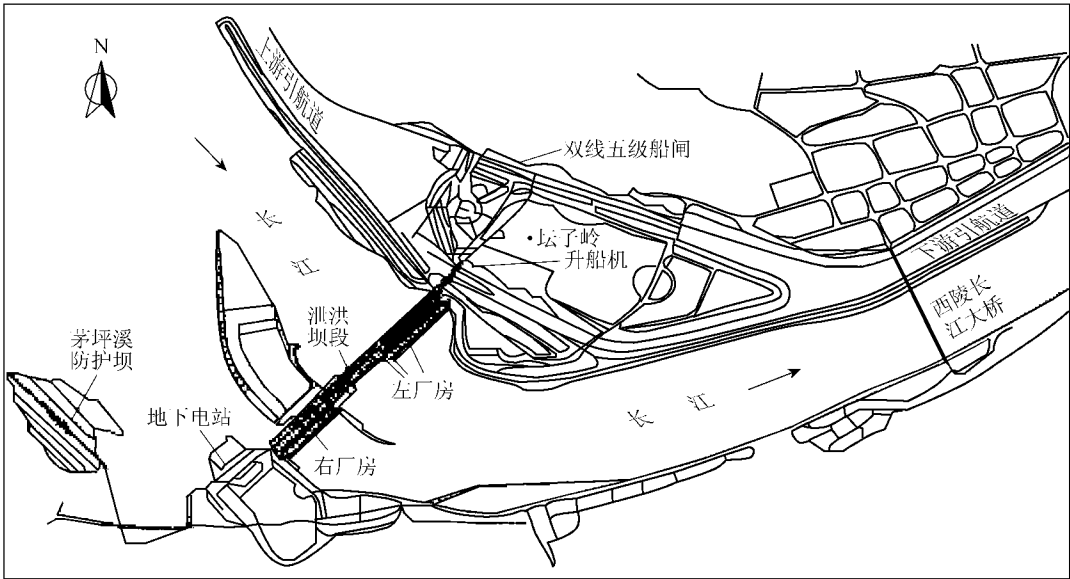


图 2 三峡水利枢纽平面布置示意图

升船机,布置在左岸非溢流坝7号与8号坝段之间,升船机最大提升高度为113 m,承船厢有效尺寸为长120 m、宽18 m、水深3.5 m,承船厢与厢内水体总质量约为15 500 t,1次可通过1艘3 000 t级客货轮或1 500 t级船队,升船机单向运行间隔时间约为40 min,双向运行间隔时间约为70 min,按过货轮计算年单向通过能力约为400万^[2]。

三峡工程是当今世界上规模最大的水利水电工程,其工程运行安全直接关系到坝下游地区数百万人民生命财产的安全和经济社会的发展,是工程成败的重大问题。我国目前对水利水电工程使用年限尚未颁布规程规范,但三峡工程使用年限问题引起了社会各界的关注。三峡工程设计总单位长江水利委员会在国内相关科研、高等院校的通力协作下,针对影响工程安全和长期使用可能出现的各种最不利工况及问题,吸取国内外一些大坝失事造成惨痛灾难的经验教训,深入研究并进行了大量科学试验和计算分析工作,在工程设计和施工中采取了一系列防治措施,以提高枢纽建筑物的安全可靠度及耐久性,并使水库减少泥沙淤积及保护水环境。工程投入运行后,通过精心维护和检修,延长其使用年限,以保障三峡工程安全可靠和长期使用。

2 工程安全问题研究

2.1 枢纽建筑物设计安全标准问题

三峡工程为一等工程,枢纽建筑物大坝(拦河大坝和茅坪溪防护坝)、电站厂房、船闸、升船机均为一级建筑物。大坝按1 000年一遇洪水设计、10 000年一遇洪水加10%校核。设计洪水流量为98 800 m³/s,大坝设计挡水位为175.0 m,校核洪水流量124 300 m³/s,大坝校核挡水位180.4 m。大坝抗滑稳定安全系数 K_C 按国家规范要求:设计工况下 $K_C > 3.0$,校核工况下 $K_C > 2.5$,地震工况下 $K_C > 2.3$ 。大坝坝体及坝基应力、孔口应力及配筋满足安全运行要求。大坝坝基为前震旦纪闪云斜长花岗岩,岩体均一、完整,力学强度高,微风化和新鲜岩石的饱和抗压强度达100 MPa,变形模量为30~40 GPa。两岸岸坡厂房坝段下游布置坝后式厂房,其最低建基岩面高程为22.20 m,致使岸坡坝段下游面临空,形成坡度约为54°、坡高为67.80 m的高陡边坡,近100 m高的混凝土坝坐落在坡顶,坝基岩体缓倾角结构面构成潜在的不利滑动面,是深层抗滑稳定的控制滑面,成为三峡大坝安全的关键技术问题。设计单位查明坝基深部岩体的长大缓倾角结构面的位置、产状、规模和形状,为抗滑稳定分析提供了较确切的坝基地质资料。此外,委托多家科研单位和高

等院校采用刚体极限平衡法、有限元法(包括非线性有限元)、地质力学结构模型试验等多种方法进行研究,按最不利坝段的坝基抗滑稳定概化模式和相应的计算条件及参数,采取上述多种方法进行计算,所得结果与试验成果相近,表明在设计工况下可以满足抗滑稳定安全系数 $K_C \geq 3.0$ 的要求。鉴于三峡工程的重要性,为确保大坝安全,采取了综合措施:适当降低坝基高程,并在坝踵处设齿槽,加大坝体上游底宽,帷幕及排水部位相应前移,充分利用坝前水压力,在厂房混凝土与岩坡之间设锚筋及接触灌浆系统,利用厂房与坝体边坡紧密相靠以增加抗滑力,相邻坝段的横缝间设键槽并灌浆,提高整体作用,坝基与厂房基础设全封闭抽排系统,降低扬压力;采取控制爆破的方法,确保爆破施工不至于影响建基岩体的完整性,对浅层岩层中缓倾角裂隙及长大中缓倾角裂隙面进行预应力锚索锚固,并加强固结灌浆处理,增强建基岩体的整体性,根据厂房与大坝岩坡紧靠后的受力条件,对厂房下部结构采取适当加固措施;在最不利坝段基岩增设1个横向排水洞,加强坝基排水;坝基岩面上出露的缓倾角结构面挖槽、回填混凝土处理,对临空的高陡边坡进行混凝土支护,并预留纵横向廊道,必要时可进行预应力锚索加固处理,加强对该部位坝基扬压力和坝基变形监测,必要时可采取工程措施。电站厂房、船闸、升船机上游挡水部位设计洪水标准及安全系数按国家规范,满足安全运行要求。三峡工程各建筑物设计标准严格按照国家颁布的相关设计规范,可保证工程安全运行。

大坝上游近坝26 km河段内不存在直接威胁枢纽建筑物施工和运行安全的不稳定岸坡和崩塌、滑坡体,距坝址最近的新滩滑坡(26 km)及对岸的链子崖危岩体(27 km),按最不利条件进行的涌浪计算和试验表明,可能造成的涌浪在坝址处最大浪高为2.7 m,与校核水位叠加,距大坝等挡水建筑物顶面仍差1.9 m,不至于危及三峡工程的安全。

2.2 工程抗震问题

三峡工程坝址所在的黄陵结晶基底区无活动性断裂及中强震的发震构造,是一个稳定程度较高的刚性地块。在中国地震烈度区划及震中分布图上三峡地区远离几个主要地震活动区(带),水库区及坝址周围相当范围是地震活动比较微弱的地区。据2 000多年以来的历史记载,以三峡坝址为中心的300 km半径范围内没有很强的破坏性地震。有4次6.0~6.5级的地震(震中烈度为Ⅷ度)均发生在距坝址200 km以远的不同构造单元地区,5.0~6.0级的地震也都发生在130 km以远的地区。三峡工程坝址及库区邻近的10余个县市历史上无破坏性地震

记载。三峡库区从坝址至秭归县庙河长 16 km 为结晶岩低山丘陵宽谷段,天然地震活动十分微弱,不会产生构造型和岩溶性水库地震;庙河至奉节县白帝城长 141.5 m 为碳酸岩夹碎屑岩峡谷段,该段仙女山—九畹溪断层展布区、周家山(牛口)、高桥等断层分布区有可能发生构造型水库诱发地震,最高震级 5.5~6.0 级。不利的情况是仙女山—九畹溪断裂带距大坝最近处(17 km)发生 6.0 级的极限水库地震,震中地震烈度为Ⅷ度,经过 17 km 的衰减,传至三峡坝址的影响烈度为Ⅵ度。三峡坝址周围在 1958 年建立了 7 个地震台监测微震、小震的活动,至 1996 年的 38 a 间,半径 300 km 范围内记录到震级大于 1 级的地震共 2 108 次。其中距坝址 60~70 km 处发生过 3 次震级 4.8~5.1 级的中强震,震中烈度为Ⅶ度,影响到坝址的烈度都在Ⅴ度以下。而坝址所在的黄陵结晶岩地块内,38 a 共记录到震级低于 2 级的地震 10 余次。所以说该区基本上是一个无震或地震活动极其微弱的地区。

国家地震部门前后 4 次鉴定(最后一次是 1987 年经国家地震烈度鉴定委员会审核批准),都将三峡工程所在地区的地震基本烈度定为Ⅵ度。采用地震危险性分析方法,按不同超越概率进行计算,得出坝址区不同概率水平的基岩水平加速度峰值、相应的反应谱和场地烈度值。在极端条件(年超越概率 10^{-4} 为 10 000 年一遇)下,三峡工程坝址可能出现的地震烈度为Ⅶ度,与工程采用的抗震设计烈度相当。2003 年 6 月至 2010 年 12 月,三峡工程蓄水投入运行以来,重点监视区共记录 0 级以上微震、极微震 3 030 余次,其中 0~0.9 级地震 2 584 次,1~1.9 级地震 400 次,2~2.9 级地震 44 次,3~3.9 级地震 1 次,4~4.9 级地震 1 次,最大地震为 2008 年 11 月 22 日发生在秭归县屈原镇的 4.1 级地震,远小于预测值。2010 年 10 月 26 日试验性蓄水至设计水位 175.0 m 运行以来,地震强度和频次呈减缓趋势。

大坝等建筑物抗震计算表明,地震荷载不是建筑物稳定的控制因素。因此,从工程所在地区的地震活动水平和工程采用的抗震标准两方面来看,三峡工程在抗御地震破坏方面留有足够的安全裕度。

2.3 工程防护问题

三峡工程防护安全问题早在 1958 年就已开始研究,三峡大坝为混凝土重力坝,与一般的工业与民用建筑物相比,其体积庞大,抗爆能力比通常的地面建筑物强,利用常规爆炸方式欲达到破坏整个大坝坝体的可能性很小,最坏的情况是核弹直接命中大坝,造成坝体溃口,库水突然下泄,那样的话将会给坝下游造成严重的水患灾害。工程防护主要研究两

方面内容:①加强防御能力,阻止核弹袭击,保障工程安全;②倘若核弹击中时大坝溃坝洪水对坝下游地区的影响以及减免灾害的措施。1983—1988 年在湖北省蒲圻陆水水库坝址试验场进行了大比尺(水平比尺 1:500,垂直比尺 1:250)的溃坝试验研究,溃坝模型范围坝址上游为全库区,下游至沙市以下 6 km。溃坝试验研究以下 2 种情况:①大坝瞬时全溃(沿坝基全断面溃决),溃口宽分别为 200 m,250 m,400 m,1 000 m;②大坝瞬时半溃(坝体沿孔口处溃决,高程 110.00 m 以下坝体尚能拦蓄库水),溃口宽分别为 400 m 和 1 000 m。试验结果表明:三峡大坝遭受核武器破坏而坝体全溃时,100 余亿 m^3 库水短时间内下泄,坝址至沙市江段沿岸受溃坝形成的特大洪水直接冲击而导致洪水灾害。但由于三峡水库为峡谷河道型水库,溃坝后坝上游水面坡降陡,突泄库水水量受峡谷控制,溃坝洪峰尖削,历时很短,仅数分钟即急剧下降。坝址下游长约 40 km 为西陵峡江段,且多急弯;尤其是莲沱至南津关长 20 km 的峡谷,两岸山体陡峻,江面宽 200~300 m,还有 3 处 90°的弯道,峡谷河道对溃坝突泄库水有很大的约束作用,使溃坝洪峰衰减很快。为减轻溃坝洪水对下游的灾害,考虑临战前适当降低库水位运行并在下游采取相应的分洪措施,可以将溃坝洪水淹没损失限制在一定范围内。在库水位 145 m 的试验条件下,宜昌水文站实测溃坝洪水过程,流量大于 60 000 m^3/s 的时间仅 2 d 多,一般情况下 3~5 d 溃坝洪水即全部退至原河槽内。与天然洪水相比,溃坝洪水峰高而量小,如 1870 年的历史洪水和 1954 年的大洪水,宜昌水文站洪水流量长期居高不下,洪量超过 1 000 亿 m^3 。溃坝试验表明,采取预降库水位和分洪措施后,溃坝最大的洪水灾害面积为 3 000 km^2 左右,淹没农田为 13.33 万 hm^2 ,受灾人口为 100 多万人,淹没范围只相当于 1954 年洪水导致长江中下游淹没范围的 4% 左右,远小于历史上发生的一次大洪水的灾害损失^[3]。灾害范围局限在上荆江一带洲滩围垸内,不至于影响沙市和荆江大堤的安全,属于局部地区性灾害。在采取一些防护措施后,灾害可进一步减轻。

3 工程长期使用问题研究

3.1 枢纽建筑物提高耐久性与长期使用问题

三峡工程枢纽建筑物的耐久性直接影响其使用年限,各建筑物混凝土设计除满足强度要求外,还应满足抗冻、抗渗、抗裂、抗碳化、抗冲磨及抗侵蚀性、防止碱骨料反应等耐久性方面的要求。针对枢纽建筑物混凝土原材料的特点和提高耐久性的要求,在

原材料优选的基础上,通过不同水胶比、不同粉煤灰掺量的多种组合对混凝土配合比进行了力学、热学、变形等全面的性能试验,经技术经济比较,优选出各建筑物混凝土配合比。枢纽建筑物混凝土设计从传统的强度设计转变为耐久性和强度并重。

①抗冻性是混凝土耐久性的主要指标,三峡坝区不属于寒冷地区,但为了增强各建筑物混凝土对自然风化因素的抵抗能力,提高混凝土的耐久性,对混凝土仍提出较高的抗冻性要求。各建筑物抗冻标号内部混凝土为 F_{100} ,基础混凝土为 F_{150} ,表部及其他部位混凝土为 F_{250} 。混凝土配合比通过降低水胶比、掺用引气剂、掺Ⅰ级粉煤灰、降低用水量等综合措施提高混凝土抗冻标号。室内试验及施工检测成果表明,各建筑物混凝土抗冻标号均达到并超过设计标准,具有很高的抗冻耐久性。

②混凝土的渗透性对耐久性起重要的作用,各建筑物混凝土通过采用低水胶比、降低用水量以及控制施工振捣和养护,保证了混凝土的抗渗性。检测成果表明,各建筑物内部混凝土抗渗等级大于 W_8 ,其他部位的混凝土抗渗等级均大于 W_{10} ,在达到设计抗渗等级的同时,试件渗水程度较低,说明混凝土具有良好的抗渗能力和密实性。

③枢纽建筑物混凝土中有部分为结构混凝土(如泄流孔),须考虑混凝土的碳化和钢筋锈蚀问题。结构混凝土水胶比均小于 0.45,掺粉煤灰质量分数不大于 20%,碳化试验测得 28 d 最大的碳化深度仅为 1.26 cm,大致相当于自然环境中 50 a 的碳化深度,而结构混凝土保护层厚度一般大于 6 cm。利用多系数碳化方程计算,预测碳化深度达到钢筋保护层厚度至少要 500 a 以上。

④枢纽建筑物混凝土裂缝引起渗漏、溶蚀、冻融破坏及钢筋锈蚀等,严重的裂缝会影响结构的整体性和稳定性,甚至危及建筑物安全运行。因此,混凝土抗裂性能也是耐久性的重要方面。混凝土通过加大Ⅰ级粉煤灰掺量、采用优质外加剂及质量分数 4% 左右 MgO 的中热水泥,改善了混凝土的变形性能,使混凝土具有低热性能和体积稳定性。试验成果表明,混凝土极限拉伸值均在 85×10^{-6} 以上(90 d);干缩变形较小,在 382×10^{-6} 以内(90 d);绝热温升值较低,为 $19.9 \sim 22.9^\circ C$;混凝土具有微膨胀性,自身体积变形约为 $(15 \sim 45) \times 10^{-6}$,满足混凝土抗裂性的要求。

⑤枢纽建筑物混凝土如果发生碱骨料反应,将导致其膨胀开裂,严重时会导致建筑物结构破坏。各建筑物混凝土采用的花岗岩人工骨料经多种试验方法检测,判定为非活性骨料,但仍对混凝土原材料水泥、粉煤灰、外加剂的碱含量和混凝土总碱量进行严格限制,其控制指标高于国家标准和有关规定。从现场检测结果看,

原材料碱含量远低于控制指标,水泥熟料含碱质量分数小于 0.5%,粉煤灰含碱质量分数为 1.0%,而以最不利情况即原材料以最大含碱量及结构混凝土以最高强度($R_{28}400$)配合比计算混凝土总碱量最大值为 2.3 kg/m^3 ,小于控制值(2.5 kg/m^3)。

三峡工程枢纽建筑物混凝土设计从混凝土抗冻、抗渗、抗碳化、抗裂、抗冲磨及抗侵蚀性等指标提高耐久性,并通过“双控”(控制混凝土原材料含碱量和总碱量)防止发生碱骨料反应,金属结构和机电设备采用耐久性能高的材料。工程建设过程中,严格控制土建施工质量和金属结构及机电设备安装质量,达到优良标准。工程投入运行后,通过精心维护、定期安全检查鉴定,发现问题及时修复和加固处理,延长其使用年限,以达到安全可靠、长期使用。

3.2 三峡库区地质灾害对库容和水库寿命影响问题

三峡库区地形地质条件复杂,从其形成演化历史来看,三峡地区自古以来就是崩塌、滑坡等地质灾害频发的地区。历史记载的大型崩塌、滑坡就有 10 余处之多。如发生于北宋天圣四年和明朝嘉靖二十一年的新滩滑坡,分别堵塞长江航道 25 a 和 80 a 之久;巴东西溪口在 1950 年发生大滑坡,冲越龙船河截断河流,在河中成坝,壅高水位约 30 m,堵塞河道达 3 a。从 1982 年到三峡工程开始建设(1993 年)的 12 a 内,库区两岸发生严重的滑坡、崩塌近百处,规模较大的有数十处。如 1982 年 7 月云阳县宝塔滑坡西侧发生的鸡扒子滑坡,滑坡体积约 2000 万 m^3 ,其中约 230 万 m^3 进入长江,使江水面宽度由 120 m 减至 40 m,严重碍航,后来花巨资进行了整治;1985 年 6 月秭归县新滩发生滑坡,滑坡体积约 3000 万 m^3 ,其中约 340 万 m^3 进入长江,造成断航 7 d,产生的涌浪打翻 10 条船舶。

长江水利委员会高度重视三峡工程的库岸稳定问题,将其列为水库的主要工程地质问题。在三峡工程论证阶段,相关部门组织地质专家进行了深入的研究工作,论证的主要结论如下:就整个库岸而言,三峡工程库岸稳定性是好的,稳定条件好的和较好的岸段占库岸总长的 90% 左右,稳定条件差的 16.1 km 库岸只分布在几个局部地段上。长江水利委员会在论证工作完成后,重新编制了《长江三峡工程可行性研究报告》^[4],报告结论与上述论证结论基本一致,对库岸稳定的结论如下:三峡水库干流库岸全长 1300 km,以坚硬-中等坚硬的岩石为主,没有大面积松散堆积体分布。干流库岸体积在 10 万 m^3 以上的崩塌、滑坡体已基本查清,共约 270 处,总体积为 17 亿 ~ 20 亿 m^3 。其中体积大于 100 万 m^3 的 140 处大中型崩塌、滑坡体中,正在发展的有 8 处,

稳定性差、蓄水后可能失稳的有 14 处,两者总体积约为 3.1 亿 ~ 3.9 亿 m^3 ,散布在整个库段内。从最不利情况估计,假定这 22 处全部整体失稳入库,对水库库容和寿命也无实质性影响^[5]。

三峡工程建库以来,占全库干流库段 10% 的稳定性较差和差的库段由于实施了库岸工程治理,仅发生了小规模 and 零星的崩塌、滑坡。2003 年 6 月三峡水库蓄水以来未发生过大面积的崩塌滑坡入江,2008—2010 年 175.0 m 试验性蓄水监测库岸再造渐趋稳定,说明论证和可行性研究报告的结论是正确的。考虑库区地质灾害经过治理,对崩塌、滑坡有所控制,其结论是留有一定安全裕度的。

3.3 三峡水库泥沙淤积与长期使用问题

水库蓄水后,库区水位大幅度抬高,流速减缓,上游进入水库的泥沙将大量淤积在库内,水库的库容日益减少。若水库运用不当,可能导致其被泥沙淤满报废。我国北方多沙河流修建的水库迄今已有一部分被泥沙淤满而不能继续发挥效益。三峡坝址多年平均含沙量为 1.12 kg/m^3 ,多年平均年输沙量为 4.9 亿 t,汛期(6—9 月)输沙量占全年总量的 89%,水量占全年的 63%。针对三峡水库是一座典型的峡谷河道型水库、长江洪水和泥沙主要集中在汛期的特点,设计单位、国内相关科研单位以及高等院校经过长期的河道水文泥沙实地观测调查,并进行泥沙数学模型计算分析和泥沙实体模型试验研究,根据泥沙运动规律和三门峡、丹江口等多座水库运用的实践经验,认为三峡水库采用“蓄清排浑”的运用方式可以保持绝大部分有效库容供长期使用。“蓄清排浑”运用方式是汛期库水位降至防洪限制水位 145.0 m,利用大坝泄洪排沙设施泄洪“排浑”,将洪水中的泥沙通过泄洪排出水库至大坝下游,减少水库泥沙淤积,将超额洪水淤在库内的泥沙大部分拦蓄在死库容部位;洪水过后,又将库水位降至 145.0 m,使水库调蓄洪水时淤积在有效库容中的泥沙基本可以排除。“蓄清”是在汛末 9 月中旬上游来水泥沙少时开始蓄水,水库内蓄清水,10 月底或 11 月初蓄至正常蓄水位 175.0 m 运行。12 月至次年 4 月库水位逐渐降落,泄放库水以满足航运和下游供水需求,消落库水位不低于 155.0 m,以满足水库变动回水区的航道水深要求;6 月上中旬库水位降至防洪限制水位。水库采用“蓄清排浑”运行方式,可减少库尾段的泥沙淤积,也有利于将泥沙排出库外。若遇大洪水年份调蓄洪水时,由于水库水位抬高,库内泥沙淤积量将随之增加,并有部分淤积在有效库容内。但大洪水持续时间不长,待洪水过后库水位降至防洪限制水位时,淤积在有效库容内的

大部分泥沙将被冲刷(或在第 2 年汛前库水位消落时及汛期水位处于低水位时被冲刷),只有在稳定河槽宽度以外的滩地上有少量残存的淤积,但这部分泥沙也将随第 2 年库水位消落时被冲刷一部分,在宽河谷库段河滩地残留累积性淤积。根据水库淤积数学模型计算分析,采用“蓄清排浑”运用方式,三峡水库运用 80 ~ 100 a 后冲淤将基本达到平衡,水库仍能保持 86% 的防洪库容和 92% 的兴利库容,长期发挥防洪、发电、航运、供水等综合效益。同时,9 座库区泥沙实体模型试验结果表明,库区航道、港区较建库前有较大改善,个别库段在枯水期库水位消落期出现碍航问题,可以辅以航道整治和疏浚措施加以解决。上述计算分析和试验结果尚未考虑三峡水库上游干支流拟建的金沙江溪洛渡、向家坝、雅鲁江锦屏、嘉陵江亭子口等水库以及正在实施的长江上游水土保持重点防治工程的拦沙效果。若加上这些新建工程和水土保持工程的拦沙作用,三峡水库泥沙淤积量将进一步减少。三峡水库上游实测年均输沙量 1990 年前为 4.804 亿 t,1991—2002 年为 3.506 亿 t,后者比前者减少 27%;2003—2009 年实测年均入库泥沙为 2.116 亿 t,比 1990 年前减少 56%。2003 年 6 月至 2010 年 6 月实测排沙比为 27.8%,汛期流量大于 $30\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时排沙比达到 81%,说明“排浑”效果显著。枢纽建筑物电站进水口比大坝泄洪深孔高 18 m,且在进水口下部设置排沙孔,防止泥沙淤积以确保电站机组发电运行,船闸及升船机上下游引航道设置隔流堤减少引航道淤积,并辅以清淤措施,保障正常通航。三峡水库泥沙问题的解决,可长期发挥综合效益。

3.4 水库水环境保护问题

三峡水库正常蓄水位为 175.0 m,水面面积为 $1\,084 \text{ km}^2$,水库周边岸线总长达到 5 311 km,涉及湖北省以及重庆市的 20 个县、市(区),人口 2 000 万左右(图 3)。水库是淡水资源库,其水环境影响工程正常运行和长期使用。库区周边密集的城镇及居民点和工矿企业对水库水环境造成不利影响,水库的水环境保护难度大、任务重。水库主要污染源有:库区内城市排放的生活污水和工业污水,含大量化肥、农药的农田径流和城镇地表径流,以及由水库上游干流和支流嘉陵江、乌江等进入水库的污染负荷。水库运行水位变幅达到 30.0 m,库区水位消落区面积为 300 km^2 左右,对水环境及水质将造成不利影响。为了确保三峡水库的水环境安全和工程的正常运行,有效控制库区水环境污染,2001 年 11 月国务院批准了《三峡库区及其上游水污染防治规划》(国函(2001)147 号,以下简称《规划》),要求在工程蓄水

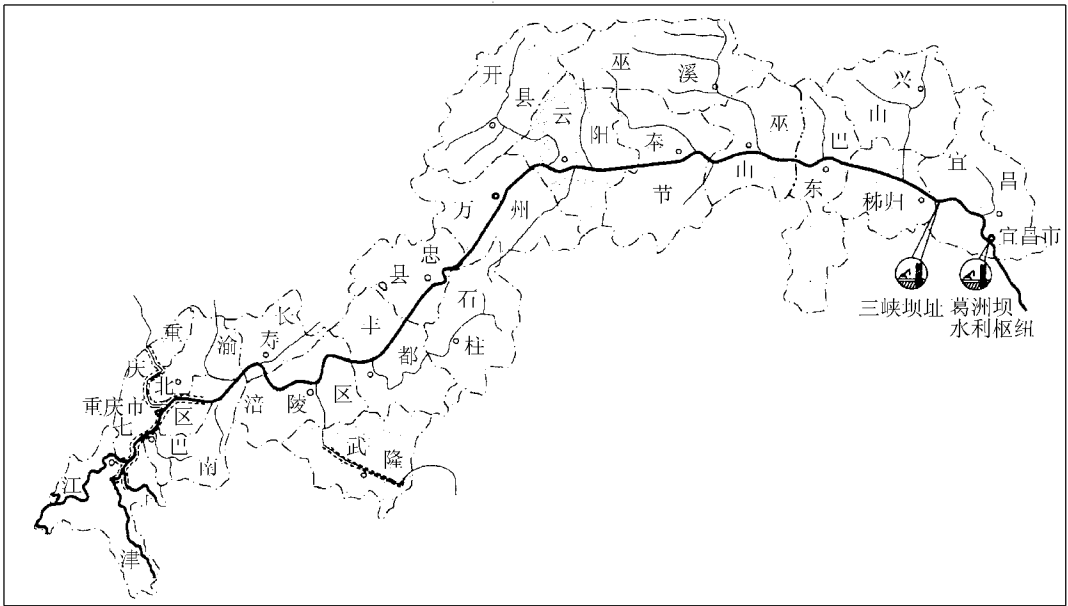


图3 三峡水库库区范围示意图

之前完成蓄水位以下库底的清理工作,完成库区污水处理厂和垃圾处理场建设,并投入运行。在2003年6月三峡水库蓄水至135.0m水位前,关闭了库区所有规模以下的造纸、制革、农药、染料等污染严重的企业,对小氮肥厂进行了技术改造,同时完成了库底清理。按《规划》要求,2005年之前库区沿江城市兴建污水处理厂25座,设计处理规模为60万t/d,兴建垃圾处理场21座,设计处理规模为7030t/d。兴建的污水处理厂和垃圾处理场基本能正常运行,有效地减少了入库点污染负荷,保护了水库的水环境及水质^[1]。三峡水库2003年6月蓄水以来,监测资料表明,库区水环境质量总体保持稳定,对库区干流和坝下游水质没有明显影响,库区水质基本稳定在Ⅱ类、Ⅲ类水平,主要污染物高锰酸盐指数、氨氮、石油类、重金属汞和铅等没有明显变化。库区干流城市岸边污染带在蓄水后有加宽加长的趋势,但尚未影响饮用水源的水质安全。目前,库区重庆市(区、县)累计建成94座生活污水处理厂和48座垃圾处理场,有效地将三峡库区的生活污水集中处理率和生活垃圾无害化处理率分别提升到84%和94%,远高于全国平均水平。但汛期,特别是出现较大洪水时,水库内漂浮物较多(每年20万m³左右,2010年达到52万m³),不仅影响水质,而且汇集在坝前,对工程的正常运行造成不利影响。

鉴于三峡水库水环境安全防护的艰巨性、长期性和复杂性,今后仍需按照《规划》要求严格控制库区各类污染源,抓紧完善城镇污染管网配套,解决污水处理厂和垃圾处理场运行经费,提高正常运行效率,控制库区产业发展结构,防止引进高污染、高风险

的产业,控制库区城镇发展规模,实施人口有序转移、库区人口逐步下降的长期发展战略,减轻库区环境压力,积极推进库区及其上游地区农村面污染防治工作,在库区扶持农村发展绿色农业,合理规划畜禽养殖,推广以沼气为纽带的生态农业模式,使用沼渣沼液等有机肥,减少农药化肥用量,全面推进农村面污染防治工作,研究培育适合消落带生长的高效经济作物,加大水库清除漂浮物的力度,库区各地需配置清除漂浮物的设备,提高其效率,开展“水华”控制技术研究,预防发生“水华”,加快库区周边防护林和生态屏障建设,提升该地区水污染防治的综合能力,将三峡水库对水环境的不利影响降至最低,确保水库水环境安全,把三峡水库建成国家战略性淡水资源库,保障库区和长江中下游居民的饮水安全。

4 结 语

三峡工程于1994年12月正式开工,枢纽工程建设和库区移民搬迁进展顺利,除升船机续建项目和地下电站外,2008年大坝、电站厂房、船闸已全部完成建设,左、右岸电站26台水轮发电机组全部投产,并具备蓄水位175.0m的条件;在移民方面,12座县城和114座集镇迁建完成,搬迁安置移民124万多人,有关专项经主管部门组织验收,均满足水库蓄水至175.0m的要求。经国务院批准,2006年汛末蓄水至水位156.0m,提前1a进入初期运行期,2008年和2009年汛末进行175.0m的试验性蓄水,当年坝前最高水位分别达到172.8m和171.2m,2010年汛末进行175.0m试验性蓄水,于10月26日蓄至设计水位175.0m运行。3a的试验

(下转第37页)

[6] 蔡后建 陈伟民. 微囊藻水华的飘移和沉降对太湖环境的影响[M]. 北京 : 气象出版社 ,1998.

[7] 陈荷生. 太湖湖内污染控制理念与技术[J]. 中国水利 , 2006(9) 23-26.

[8] 谢平. 太湖蓝藻的历史发展与水华灾害[M]. 北京 : 科学出版社 ,2008.

[9] 濮培民 王国祥 胡春华 ,等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗 ?[J]. 湖泊科学 ,2009 ,21(3) 269-278.

[10] 张运林 秦伯强 陈伟民. 太湖水体中悬浮物研究[J]. 长江流域资源与环境 ,2004 ,13(3) 266-271.

[11] 秦伯强 胡维平 张金善. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报 ,2003 ,48(17) : 1822-1831.

[12] 范成新 张路. 太湖沉积物污染与修复原理[M]. 北京 : 科学出版社 ,2009.

[13] 沈培民 陈正夫 张东平. 恶臭的评价与分析[M]. 北京 : 化学工业出版社 ,2005.

[14] 李勇 张晓健 陈超. 我国饮用水中嗅味问题及其研究进展[J]. 环境科学 ,2008 ,30(2) 583-588.

[15] 张晓健 张悦 王欢 ,等. 无锡自来水事件的城市供水应急除臭技术[J]. 给水排水 ,2007(9) 7-12.

[16] 王建伟 李宗来. 无锡市饮用水嗅味突发事件致嗅原因及潜在问题分析[J]. 环境科学学报 ,2007 ,27(11) :1771-1777.

[17] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议[J]. 湖泊科学 ,2007 ,19(11) 357-368.

[18] 秦伯强 王小冬 汤祥明 ,等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机原因与对策[J]. 地球科学进展 ,2007 ,22 :896-906.

[19] 钟继承 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学 ,2007 ,19(1) 1-10.

(收稿日期 2010-10-13 编辑 方宇彤)

(上接第 7 页)

性蓄水期间 ,对库区地震、地质灾害、生态与水环境、泥沙冲淤、城镇以及居民点住房及交通道路桥梁等设施进行周密的监测 ,并对枢纽建筑物进行安全监测及水轮发电机组进行试验。监测成果表明 :各枢纽建筑物变形、渗流、应力应变符合正常规律 ,监测值均小于计算值 ,建筑物工作性态正常 ,运行安全 ;库区地震 99.9% 都是低于 3 级的微震和极微震 ,实测最大震级 4.1 级 ,低于设计预计的 5.5 级 ,试验性蓄水过程中库岸再造所出现的问题均在设计范围之内 ,且已渐趋稳定 ,符合水库蓄水的库岸再造规律。三峡工程蓄水至设计水位 175.0 m 进入正常运行期后 ,对枢纽建筑物、水库泥沙、库区移民设施、地质地震灾害及水环境仍需加强监测 ,发现问题及时处理 ,以防患于未然 ,确保工程安全运行及长期使用 ,全面发挥综合效益 ,保长江安澜 ,沿岸城乡构建和谐社会 ,促进流域经济社会的可持续发展。

参考文献 :

[1] 长江水利委员会. 长江治理开发保护 60 年[M]. 武汉 : 长江出版社 ,2009.

[2] 潘家铮. 中国三峡工程[M]. 杭州 : 浙江科学技术出版社 ,1999.

[3] 长江水利委员会. 长江三峡水利枢纽初步设计报告(枢纽工程) [R]. 武汉 : 长江水利委员会 ,1992.

[4] 长江水利委员会. 长江三峡工程可行性研究报告[R]. 武汉 : 长江水利委员会 ,1983.

[5] 长江水利委员会. 三峡工程论证及可行性研究阶段性评估设计工作汇报材料[R]. 武汉 : 长江水利委员会 ,2008.

(收稿日期 2010-01-27 编辑 高建群)

(上接第 19 页)

[2] 周君亮. 关于南水北调东线工程的建议[C]// 中国工程院第四次院士大会学术报告汇编. 北京 : 中国工程院 ,1998 :269-277.

[3] 周君亮. 对南水北调工程规划布局的意见[J]. 科技导报 ,2002(5) 6-10.

[4] 周君亮. 南水北调规划布局商榷[C]// 陈吉余. 南水北调(东线) 对长江口生态环境影响及其对策. 上海 : 华东师范大学出版社 ,2001 :1-7.

[5] 周君亮. 关于淮河入海水道工程[J]. 江苏水利 ,2001 (2) 8-9.

[6] 周君亮. 中国水利可持续发展[J]. 中国水利 ,2000(8) : 35-37.

[7] 周君亮. 洪泽湖与淮河下游的关系[J]. 河海大学学报 : 自然科学版 ,2006 ,34(S2) 1-8.

[8] 王御华 辉才兴. 河口海岸工程导论[M]. 北京 : 海洋出版社 ,2004.

[9] 严恺. 中国海岸工程[M]. 南京 : 河海大学出版社 ,1992.

[10] 薛鸿超. 海岸及近海工程[M]. 北京 : 中国环境科学出版社 ,2003 :128.

[11] 陈吉余. 中国河口海岸研究与实践[M]. 北京 : 高等教育出版社 ,2007.

[12] 窦国仁. 潮汐水流中悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报 ,1963 ,34(4) 13-24.

[13] 刘凌 常木春 毛媛媛 ,等. 里下河地区主要通海通道冲淤保港生态需水量研究[C]// 江苏省水利厅. 江苏省沿海闸下通道淤积防治对策研究论文集. 北京 : 海洋出版社 ,2007.

[14] 王学功 王久晟 张波. 淮河与洪泽湖分离方案比较[J]. 水利水电科技进展 ,2011 ,31(1) 1-7.

(收稿日期 2011-01-27 编辑 高建群)