

三峡工程建筑物设计关键技术问题研究与实践

郑守仁¹, 钮新强²

(1. 长江水利委员会, 武汉 430010; 2. 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

[摘要] 针对三峡水利枢纽拦河大坝泄洪流量大、孔口多、泄洪消能结构复杂, 岸坡厂房坝段基岩长大缓倾角结构面因坝后厂房深挖临空危及坝基稳定, 坝体混凝土耐久性要求高且温控防裂困难; 茅坪溪防护土石坝沥青混凝土心墙设计施工尚缺乏实践经验; 电站运行水头高、变幅大, 引水压力管道及进水口选型和蜗壳埋设方式技术复杂, 地下电站采用变顶高尾水洞替代常规的尾水调压室; 双线五级船闸运行水头高、输水水力条件复杂, 且在山体深挖岩槽中修建, 全衬砌船闸结构、高水头输水系统和大型人字闸门及启闭机设计难度大等关键技术问题, 文章重点介绍了各建筑物设计研究解决问题的途径、采用的优选方案及技术措施和通过实践检验的创新成果。

[关键词] 三峡工程; 建筑物; 设计; 关键技术; 实践

[中图分类号] TV73 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)07-0020-08

1 前言

三峡水利枢纽建筑物由大坝(包括拦河大坝和茅坪溪防护坝)、水电站厂房和通航建筑物(船闸及升船机)组成。关于枢纽总布置, 根据三峡工程的运行特点, 结合坝址的地形、地质条件, 长江水利委员会进行过多种不同枢纽布置方案的建筑物形式的研究和试验, 在大量工作的基础上, 总结出如下规律性结论^[1]:

1) 枢纽泄洪、导流流量大, 防洪、排沙任务重, 上游水位变幅大, 拦河大坝采用混凝土重力坝, 泄洪建筑物以在主河槽布置深孔结合表孔的河床中部泄洪坝段为宜。

2) 电站从厂房结构、土建工程量、施工运行条件等因素综合考虑, 以充分利用河床两岸滩地布置坝后式厂房最为经济合理。

3) 根据坝址河势特点, 从上下游引航道出进出口通航水流条件和泥沙淤积碍航考虑, 通航建筑物布置在左岸。船闸采用双线五级连续船闸, 升船机采用一线单级垂直提升式是合适的。

4) 枢纽工程施工导流流量大, 施工期要求通航, 宜采用分期导流方式, 可利用坝址河床中的中堡岛布置纵向围堰, 并在其右侧天然汉河(后河)布置导流明渠。据此, 1986—1988年三峡工程重新论证阶段, 拟定了三峡枢纽布置方案, 1992年初步设计阶段对枢纽布置方案进一步优化和局部调整, 确定的枢纽布置见图1。

拦河大坝为混凝土重力坝, 坝顶高程 185 m, 坝轴线全长 2 309.5 m, 最大坝高 181 m; 泄洪坝段位于河床中部, 两侧为厂房坝段, 坝后布置左右岸电站厂房, 分别安装 14 台和 12 台单机容量为 700 MW 的水轮发电机组; 另在右岸布置地下电站, 安装 6 台 700 MW 机组和左岸布置电源电站安装 2 台 50 MW 机组, 总装机容量 22 500 MW, 年均发电量为 882 亿 kW·h。在左岸非溢流坝内布置有升船机上闸首和临时船闸坝段。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, 顶高程 185.0 m, 坝顶长度 1 840.0 m, 最大坝高 104.0 m, 在坝顶上游侧设混凝土防浪墙, 墙顶高程 186.5 m。通航建筑物船闸和升船机均布

[收稿日期] 2011-05-10

[作者简介] 郑守仁(1940—), 男, 安徽颍上县人, 中国工程院院士, 长江水利委员会总工程师, 从事水利水电工程结构设计和施工技术研究; E-mail: zhengsr@cjw.com.cn

置在左岸。船闸为双线连续五级船闸,设计总水头 113 m,闸室最大输水水头 45.2 m,闸室有效尺寸 280 m×34 m×5.0 m(长×宽×槛上最小水深)。

升船机上闸首为档水建筑物的组成部分,与大坝同时建成,承船厢室及下闸首等续建工程尚未完建。

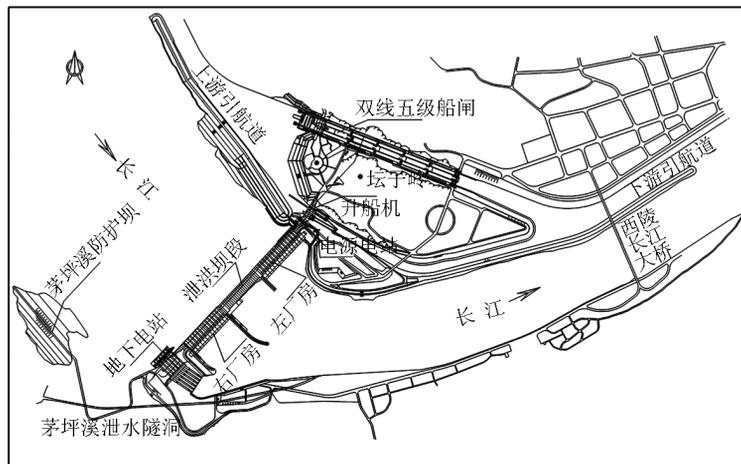


图1 长江三峡水利枢纽布置示意图

Fig. 1 General layout of Three Gorges Project

国家批准的三峡工程初步设计,施工采用分期导流,分为三期施工,总工期 17 年。施工准备及一期工程 5 年,二期和三期工程均为 6 年。1993 年开始施工准备,1994 年 12 月正式开工,1997 年 11 月大江截流,标志一期工程结束;2003 年 6 月蓄水至水位 135 m,双线五级船闸试通航,同年 7 月左岸电站首批机组发电,标志二期工程结束;2006 年 5 月,大坝全线混凝土浇筑至坝顶高程 185 m,2008 年右岸电站 12 台机组全部投产,提前一年完成三期工程建设任务。

三峡工程在工程规模、综合利用效益和技术水平等许多方面都位居世界前列。工程技术复杂,涉及的专业面广,设计难度超出了国内外已建水利水电工程,在枢纽建筑物设计中面临一系列极具挑战性的重大技术难题。在工程设计研究和施工过程中,通过运用新的手段,提出新思路,研发新技术,解决各种关键技术问题,丰富了水利水电工程设计和施工技术的理论与实践。

2 大坝

2.1 大坝泄洪布置及消能设计

三峡大坝按 1 000 年一遇洪水流量 98 800 m³/s 设计,相应设计洪水位 175.0 m,水库库容 393 亿 m³;按 10 000 年一遇加大 10% 的洪水流量 124 300 m³/s 校核,相应校核水位 180.4 m,水库总库容 450 亿 m³;汛期防洪限制水位 145 m 的防洪库

容 221.5 亿 m³。为满足防洪调度要求,在防洪限制水位时,泄洪建筑物需具有下泄洪水流量 57 600 m³/s 的能力,遇设计洪水和校核洪水时,泄流能力必须分别达到 71 000 m³/s 和 102 500 m³/s;同时需从战时工程防护考虑,泄洪设备需能在短时间内将库水位降低到防护限制水位以下;泄洪孔的进口高程需低于电站进水口高程,以适应“蓄清排浑”的运用方式满足保留长期有效库容的要求,并需设置冲沙孔以降低电站进水口前淤沙高程;设置能在防洪限制水位上下运行的明流孔以排漂;为降低明渠截流落差,需要布置低高程的导流底孔,以满足三期围堰挡水发电期由深孔与导流底孔共同承担度汛任务的要求。总之,三峡泄洪建筑物泄洪流量大,并要兼顾排漂、排沙和施工导流、截流要求,而泄洪前缘受电站机组台数多的制约,增加了泄洪布置难度,成为泄洪建筑物设计的主要的关键技术问题。

三峡工程对泄洪布置重点研究了 3 种方案^[2]: a. 河床泄洪方案——泄洪坝段设深孔、表孔,全部布置在河床中部;b. 右岸隧洞辅助泄洪方案——右岸山体内部布置 2 条有压隧洞,取代河床泄洪坝段的部分深孔;c. 厂房顶辅助泄洪方案——紧邻泄洪坝段的部分厂房采用厂顶溢流式,取代河床泄洪坝段的表孔。经比较,后两个方案虽然可以缩短河床泄洪坝段前缘长度,但枢纽布置和运行条件复杂、施工干扰大,技术经济综合比较第一个方案较优,故选用河床泄洪方案。

泄洪坝段前缘总长 483 m,分为 23 个坝段。23 个深孔(7 m×9 m)布置在各坝段中部,采用有压短管接明流泄槽形式,进口底高程 90 m;22 个表孔跨横缝布置,净宽 8 m,堰顶高程 158 m;在泄洪坝段两侧的左导墙坝段和纵向围堰 1 号坝段各布置一个泄洪排漂孔(10.0 m×12.0 m),进口底高程 133 m;在右岸厂房安Ⅱ坝段布置一个排漂孔(7.0 m×10.0 m),进口底高程 130 m;布置 7 个排沙孔(直径 5 m),其中左岸电站布置 3 个,右岸电站布置 4 个,进口底高程分别为 75 m 和 90 m;另外,在地下电站进口布置 1 个排沙洞,进口底高程 102 m,22 个导流底孔(6.0 m×8.5 m)跨横缝布置在表孔正下方,采用有压长管形式,中间 16 孔进口高程 56 m,有压段出口高程 55.0 m;两侧各 3 孔进出口高程分别抬高 1.0 m。深孔、导流底孔的设计水头达 85 m,出口流速达 35 m/s,且孔数多,运行条件极其复杂;在同一坝段内布置深孔、表孔和导流底孔三层孔口,坝体挖空率大,结构较单薄,在国内尚无先例。

针对大坝泄洪水头高、泄流量大、排沙量多、三层泄洪孔运行条件复杂及上游水位变幅大等难点,在泄洪孔口的体形选择和水力学设计中采取坝前布设拦砂槽、孔内设置通气孔和跌坎掺气、有压段局部设置钢衬、孔口过流面用高标号混凝土,局部横缝灌浆和横缝止水后移以利用横缝间水压力减小泄洪深孔有压段孔口应力等措施,成功解决了高速水流下孔口抗空化及防泥沙磨损、下游水力学衔接、消能防冲和结构受力等关键技术问题。水工模型试验表明,各泄水孔口水流在泄槽内无扩散和收缩现象,流态较平稳。鉴于导流底孔挑流鼻坎高程较低,受下游水位淹没影响,水流出鼻坎后,下游水流衔接流态基本上为面流,水舌下有逆向漩滚。消能防冲设计在泄洪坝段下游两侧布置左、右导墙,防止泄洪对两侧电站运行产生不利影响。左导墙建基岩面高程较低,未设防冲保护;右导墙基础高程 45.0 m,在左侧设混凝土防冲齿墙(墙底高程 30.0 m);在泄 16 号坝段以右坝脚处设置 50.0 m 宽的混凝土护坦以防坝趾附近基础淘刷。泄洪建筑物于 2002 年投入运行以来,各泄洪孔水流流态平稳,挑流消能效果良好;导流底孔运行未发现异常,并于 2007 年 3 月已全部回填混凝土封堵。

2.2 岸坡厂房坝段沿岩体缓倾结构面深层抗滑稳定及处理技术

左岸厂房 1[#]~5[#]坝段和右岸 24[#]~26[#]坝段基岩

为闪云斜长花岗岩缓倾角裂隙相对发育区。下游布置坝后式厂房,其最低建基高程为 22.2 m,致使岸坡厂房坝段基岩下游面临空,形成坡度约 54°,临时坡高 67.8 m,永久坡高 39 m 的高陡边坡,近百米高的混凝土坝座落在坡顶。由于坝基岩体中存在倾向下游的长大缓倾角结构面,使得沿此类缓倾角结构面向下游临空面的深层抗滑稳定成为大坝设计的关键技术问题。

对于该部位的缓倾角结构面,在勘察方面,采用一套综合性的技术思路、手段和方法,查明了坝基长大缓倾角结构面的确切位置、产状、性状、展布范围与组合关系。a. 研究改进钻进设备与工艺,采用该工艺的岩芯获得率达到 100%,并使得岩芯完整地保留结构面的位置、倾角及性状;b. 研究改进并完善了钻孔彩电录像与解译设备,对钻孔所有结构面一条不漏地进行空间定位及产状量测;c. 总结基于钻孔岩芯和彩电录像的长大缓倾角结构面判据,用于现场地质编录;d. 采用 15~20 m 的密集孔距勘探,在重要或有疑义的部位加密到 10 m 左右;e. 将钻孔彩电录像与岩芯鉴定记录进行对比研究,对钻孔中长大缓倾面的位置、产状、规模、性状进行综合判定;f. 通过现场原型抗剪断试验并辅以大量室内试验,确定缓倾角结构面抗剪断指标。

在坝基深层抗滑稳定分析计算中,以沿经勘探查明的长大缓倾角结构面滑动为基本滑移模式,另外考虑两种沿假想面滑动的极端滑移模式,采用刚体极限平衡等安全系数法计算成果,作为设计判断是否满足规范要求或特定的规定的依据;同时辅以线性和非线性有限元分析及地质力学模型试验,用以分析岩体和结构变形、应力状态、结构之间的应力传递、结构的超载能力和材料强度储备系数等,并与刚体极限平衡等安全系数法的计算结果相互验证。计算结果表明,在厂坝联合作用下,各坝段确定性滑移模式的抗滑稳定安全系数均在 3.0 以上;在设想的极端滑移模式下,抗滑稳定安全系数满足大于 2.3~2.5 的设计规定,并有裕度。二维、三维有限元计算结果和地质力学模型试验结果也得出相同的结论。

鉴于三峡大坝的重要性,设计采取了如下综合处理措施:厂房与大坝基础岩坡面进行接触灌浆,确保结合良好,实现厂、坝联合作用;适当降低建基面高程,并在坝踵处设齿槽;坝踵前伸并将帷幕排水前移,以充分利用坝前水重;大坝和厂房基础设置封闭

抽排系统,并在建基岩体内布设排水廊道,以降低坝基岩体和厂房的扬压力;对长大缓倾角裂隙从下游坡面设置预应力锚索;坝段间横缝设置键槽并灌浆,提高坝段整体作用;采用控制爆破技术避免损伤建基岩体;对临空的高陡边坡加强锚固支护及固结灌浆;在坝体内预留纵、横向廊道,必要时可进行加固处理。

根据2010年10月蓄水至设计水位175.0 m运行的监测成果,最不利两种确定性滑移模式滑移面上实测扬压力仅为设计值的40%~56%,其深层抗滑稳定安全系数分别为3.37和4.2,均比设计值大,且坝基渗流水位均在滑移面以下。综合分析,对岸坡厂房坝段沿坝基缓倾角结构面抗滑稳定采用的综合技术措施有效,深层抗滑稳定满足规范和设计要求,大坝运行安全可靠。

2.3 大坝混凝土按耐久性与强度并重设计及其温控防裂技术

三峡大坝混凝土量达1 605万 m^3 ,大坝混凝土除满足强度要求外,还应满足抗冻、抗渗、抗碳化、抗冲磨、抗侵蚀性和防止碱骨料反应等与混凝土耐久性有关的要求。混凝土耐久性是大坝在实际运用条件下抵抗各种环境因素作用,并能长期保持外观完整性和长久使用的能力。

设计从传统的混凝土强度设计转为按混凝土耐久性与强度并重设计。针对三峡大坝混凝土原材料的特点和对耐久性的要求,在优选混凝土原材料的基础上,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,大坝混凝土按耐久性与强度并重的原则进行设计(经技术经济比较,优选出大坝各部位混凝土配合比,其混凝土强度均超强,会导致增加温控防裂的难度)。大坝混凝土设计提高耐久性的主要技术措施有:a. 选用I级粉煤灰,用以减少用水量,节省水泥、降低混凝土温度,减少干缩、改善混凝土性能;b. 选用具有微膨胀性能的42.5强度等级中热水泥,适当提高水泥MgO含量,利用其膨胀性补偿混凝土降温阶段的体积收缩,提高抗裂性能;c. 选用缓凝高效减水剂,减少人工骨料混凝土用水量,降低水胶比(大坝内部0.55;外部水上、水下0.5,水位变化区0.45;基础0.50);d. 掺用引气剂,提高混凝土的抗冻等级,大坝内部混凝土为 F_{100} ,基础混凝土为 F_{150} ,表部混凝土及其他部位为 F_{250} ;e. 提高掺粉煤灰质量分数(大坝内部40%,外部30%,基础

35%,结构20%),减少水泥用量;f. 大坝混凝土采用花岗岩人工骨料,虽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、外加剂等的含碱量和混凝土总碱量进行严格限制,按最不利情况即原材料以最大含碱量及大坝混凝土以最高标号($R_{28} 250$)计算混凝土总碱量最大值为 $2.3 \text{ kg}/m^3$,未超过控制值 $2.5 \text{ kg}/m^3$ 。

三峡大坝混凝土温控防裂技术措施,除采用优化混凝土配合比,提高混凝土抗裂性能;控制大坝混凝土浇筑温度及最高温度,初期通水冷却以削减混凝土最高温度;基础约束区混凝土尽量避开在夏季浇筑,控制大坝混凝土施工程序,合理安排施工进度和确定浇筑层厚及间歇期;混凝土通水冷却按初期、中期和后期通水控制;加强大坝混凝土表面保温和养护等常规技术措施。在大坝混凝土温控防裂技术方面有所突破:a. 通水冷却首次提出按不同标号的混凝土进行“个性化”通水,将传统的中期通水冷却混凝土温度降至 $20^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$ 调整为降至 $18^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$,并在入秋后将中期通水与后期通水冷却连续进行,降低了大坝混凝土的内外温差,更利于防裂;b. 大坝混凝土施工监控实行天气预警、温度预警和间歇期预警制度,以利于各施工、监理单位合理安排大坝混凝土施工和科学落实温度控制防裂措施;使大坝整体均匀连续上升,控制相邻坝块高差,有利于纵缝张开,进行接缝灌浆;防止浇筑层面长间歇,受气温骤降影响而产生裂缝;c. 大坝混凝土生产系统首创二次风冷技术,保证了低温(7°C)混凝土生产能力,为大坝混凝土又好又快地施工创造了条件。

三峡大坝混凝土设计将耐久性与强度并重,优选混凝土原材料及配合比,施工中采取严格的温度控制和综合防裂技术,使大坝混凝土裂缝得到有效控制,一、二期工程施工的大坝混凝土浅表层裂缝0.032条/万 m^3 ,无贯穿性裂缝;三期工程施工大坝混凝土396.5万 m^3 ,未发现1条裂缝,在当今世界已建混凝土重力坝是罕见的。

2.4 沥青混凝土心墙土石坝设计

茅坪溪防护坝为沥青混凝土心墙土石坝,坝高104.0 m,为我国目前建在岩基上最高的沥青混凝土心墙土石坝,我国尚缺少设计、施工经验,又无成熟的计算方法和配合的试验规程,成为沥青混凝土心墙土石坝的设计难题。

设计采用非线性有限元和利用室内三轴试验的参数进行沥青混凝土心墙土石坝的应力应变分析,

非线性有限元计算选用国内外常用的邓肯—张 $E-\mu$ 模型。三轴试验研究表明, $E-\mu$ 模型较好地反映土体应力—应变非线性规律, 可作为茅坪溪防护土石坝坝体填料的本构关系模型。沥青混凝土是由矿物骨料、沥青胶结料和孔隙所组成的具有空间网状结构的多相分散体系, 由于沥青的粘聚作用, 其矿物骨料自身强度远大于沥青的粘结强度, 材料的破坏形式更接近于剪切破坏, 仍可认为沥青混凝土是一种散粒体材料, 因此可利用土体的本构模型研究沥青混凝土心墙的应力变形特性。通过研究沥青混凝土原材料试验、沥青混凝土物理力学性能试验方法及技术要求, 并将沥青混凝土三轴试验的抗剪断强度 (ϕ' 、 C') 值及模型数 K 值作为沥青混凝土质量指标。研究发现沥青混凝土是一种弹塑性粘性变形材料, 通过试验获得符合客观规律的、精确的沥青混凝土力学性能指标, 比之其他筑坝材料难度较大, 同时通过与土石坝其他填料同样的方法所获得的试验数据, 也难以准确反映沥青混凝土的性能。鉴于沥青混凝土具有蠕变特性, 采用邓肯—张 $E-\mu$ 模型分析计算, 将沥青混凝土作为弹性材料, 存在一定的局限。为此, 设计对沥青混凝土心墙采用弹塑性耦合模型进行应力应变分析计算, 其模型参数根据室内试验成果, 对各级荷载用弹塑性耦合模型对应的弹塑性矩阵计算相应的应变增量, 采用优化方法与试验结果拟合后求得, 并利用施工期的监测资料, 反演分析验证模型参数。设计单位通过大量试验研究, 提出沥青混凝土心墙土石坝施工技术要求和沥青混凝土运输、入仓、摊铺碾压质量检测及评定标准。为茅坪溪防护坝施工提供了技术支撑。

茅坪溪防护坝于 2003 年 6 月竣工并开始挡水, 2010 年 10 月蓄水至设计水位 175.0 m 运行, 监测成果表明, 沥青混凝土心墙应力应变、渗流渗压观测值均较设计计算值小, 坝体变形已收敛, 茅坪溪防护坝运行正常。实践证明沥青混凝土心墙土石坝设计安全可靠、先进合理, 施工质量优良。

3 电站

3.1 大流量巨型水轮发电机组引水系统

三峡工程的容量为 700 MW 的水轮发电机组, 采用单机单管引水, 压力钢管直径 12.4 m, 设计引用流量 $966 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大设计水头 143 m。机组容量大, 运用水位变幅达 40 m, 技术复杂成为电站设计的主要难题。厂房引水系统设计主要采用以下

技术。

3.1.1 电站进水口采用单孔小进水口形式^[3]

针对三峡坝后电站进水口的水位变幅大、规模大、坝体结构单薄、水流条件复杂等特点, 采用模型试验及数值分析等方法, 对单孔大进水口、单孔小进水口、双孔进水口等多种形式进行了比较论证, 创新采用单孔、小孔口及斜孔口的进水口体型, 是我国在水电站大型进水口设计技术上的一大突破; 该体型既减小水头损失, 增加发电量, 又减小了孔口对坝体的削弱, 改善了坝体受力及进水口运行条件, 对类似电站具有推广应用价值。

3.1.2 在超大直径压力管道中采用钢衬与钢筋混凝土联合承载结构

三峡坝后电站引水压力管道 HD 值高达 $1\ 733 \text{ m}^2$, 是当今世界上同类型管道中规模最大、技术参数最高的电站引水压力管道。通过三维有限元数值分析及物理模型试验, 对大坝中压力管道的布置及结构形式进行了深入研究和优选, 创新采用浅埋、钢管与外包混凝土联合承载的坝后背管布置形式; 并经论证, 对管道整体安全系数、钢筋、钢衬材质进行了优化, 使外包钢筋层数减少、间距加大, 方便了施工, 保证混凝土浇筑质量, 节省工程投资。三峡水电站钢衬钢筋混凝土压力管道的成功设计方法和实践经验, 促进了世界高水头、大直径压力管道技术的发展。

3.1.3 压力管道在厂坝相接处采用套筒式内加设波纹水封伸缩节及垫层管替代伸缩节

三峡电站位于河床部位的引水压力管道, 在厂坝相接处为适应温度变化或基础的不均匀沉陷设有伸缩节, 采用套筒式内加设波纹水封形式。波纹管水封采用复式自由型膨胀结构带加强的 U 型波纹管, 波纹管填充弹性发泡材料用以阻沙; 水封填料则选用普通橡胶盘根与遇水膨胀橡胶盘根相间布置。当波纹水封正常工作时, 可减小伸缩节轴向变位时的摩阻力。该伸缩节满足结构强度、刚度、稳定性、变形、疲劳寿命及封水不泄漏等要求。

岸坡坝段坝体高度相对较小, 研究表明, 温度变化及厂坝分缝处不均匀沉陷相对小, 因此采用局部垫层管布置, 即在厂坝分缝处压力钢管外表面一定范围敷设弹性垫层, 再浇筑外包钢筋混凝土, 从而使分缝处钢管可适应温度变化和一定范围内的基础的不均匀沉陷, 替代伸缩节的作用。垫层敷设长度为 10 m, 包角 360° , 并在垫层管的上游端设置三道止推环。垫层材料为 L-600 高压闭孔泡沫板, $E =$

(1.5 ± 0.5) MPa, 厚度 50 mm。

2003 年 7 月左岸电站首批水轮发电机组发电, 2005 年 9 月左岸电站 14 台机组全部投产; 2008 年 10 月右岸电站 12 台机组全部投产, 截至 2010 年 4 月, 左右电站累计发电 4 688 亿 kW·h。电站运行实践证明, 厂房及引水、流道、尾水系统等水工建筑物运行正常。

3.2 巨型蜗壳埋设方式

水电站建设中, 影响机组安全、稳定运行的技术问题较多, 蜗壳及外围混凝土联合结构是机组的重要支撑体系, 蜗壳埋设方式直接影响该体系的承载能力及正常使用极限状态和振动特性, 是关键技术问题之一。

三峡电站蜗壳进口直径 12.4 m, HD 值 1 773 m², HD² 值 22 000 m³, 其中直径及控制结构变形的 HD² 值为同期世界最大, 而蜗壳外围混凝土相对较薄。三峡机组蜗壳的埋设方式通过系统研究, 采用了三种埋设方式, 以资比较。a. 首次在 700 MW 级水力发电机组提出并成功应用“直埋 + 垫层”的组合理设方式, 解决了巨型机组蜗壳直埋方式外围混凝土开裂对结构刚度的影响和下机架基础变形过大等技术难题; b. 首次在 700 MW 级水力发电机组蜗壳中采用垫层埋设方式, 研究解决了巨型机组蜗壳垫层敷设范围、刚度、厚度及材料性能等问题及技术标准; c. 针对三峡电站机组蜗壳内水压力变幅大、水温随季节变化温差大的特殊性, 首次提出并成功应用了蜗壳不设垫层采用充水保温保压浇筑外围混凝土的新技术。左右岸电站 26 台机组蜗壳有 21 台采用保压方式埋设, 4 台采用垫层方式埋设, 1 台采用直埋加垫层(在进口至 -45° 范围设置垫层) 组合方式。三种埋设方式的蜗壳监测成果表明, 各项监测值均在设计控制指标内, 机组安全, 稳定运行。保压和垫层方式埋设的蜗壳应力较为接近, 直埋加垫层组合方式略小, 均满足设计要求。

三峡巨型机组蜗壳不同埋入方式在电站的成功实施以及完整设计技术体系与相关技术标准的形成, 不同埋设方式的机组成功实施全过程结构动、静力及机组运行参数系统监测, 不仅保证了引水发电建筑物及机组安全稳定运行, 而且提高了我国水电工程设计、施工、科研的综合水平, 为巨型机组相关行业规范制定技术标准奠定了基础, 推动了我国水电科学技术的进步, 有利于提高我国水电行业走向世界的竞争力。

3.3 地下电站采用变顶高尾水洞

三峡地下电站所在山体单薄, 地下厂房上覆岩体最薄处仅 34 m, 地下洞室群布置困难。为此, 经大量数值分析和模型试验, 采用变顶高尾水洞替代常规的尾水调压室。

变顶高尾水洞的工作原理是让下游水位与尾水洞顶任意处衔接, 将尾水洞分成有压满流段和无压明流段。下游处于低水位时, 水轮机的淹没水深比较小, 但无压明流段长, 有压满流段短, 过渡过程中负水击压力小, 所以尾水管进口断面的最小绝对压力不会超过规范的要求。随着下游水位升高, 尽管无压明流段的长度逐渐减短, 有压满流段的长度逐渐增长, 负水击越来越大, 直到尾水洞全部呈有压流, 但水轮机的淹没水深逐渐加大, 而且有压满流段的平均流速也逐渐小, 正负两方面的作用相互抵消, 使得尾水管进口断面的最小绝对压力能控制在规范的范围之内。因此, 不但可替代常规尾水调压室, 还使结构更加安全可靠, 经济上更加合理, 能保证机组安全运行。

变顶高尾水洞新技术的应用, 有效地解决了有压流与明流相互转换时的流态问题, 并改善了地下洞室群围岩的稳定。在国际上首次开展了带模型机组的大比尺水机电联合过渡过程试验, 定量给出了采用变顶高尾水洞形式的机组调保参数, 准确反映了调速器主要参数对变顶高尾水洞水力特性的影响。

4 船闸

三峡双线连续五级船闸为全衬砌船闸, 设计总水头 113 m, 级间最大工作水头 45.2 m。船闸按照通过万吨级船队设计, 通航净空 18 m, 闸室有效尺寸 280 m × 34 m × 5 m, 规划年单向运量 5 000 万 t。船闸线路总长 6 442 m, 其中主体段长 1 621 m, 上游引航道长 2 113 m, 下游引航道长 2 708 m。坝址水、沙条件和河道地形复杂, 工程需适应枢纽分期运行要求, 是目前世界上规模和级间水头最大、技术最复杂的船闸。尤其是船闸结构技术、超高水头船闸输水、大型人字闸门及其启闭机等设计的技术难度, 远超过当时世界已建船闸的水平。设计研究采用全衬砌船闸结构, 超高水头船闸输水系统, 并解决大型人字闸门及启闭机设计中的难题。三峡船闸 2003 年 6 月进入试航阶段, 2004 年 7 月通过国家验收转入正式通航。截至 2010 年累计运行 63 728 闸次, 通过船舶 44.8 万艘, 货运 3.606 亿 t, 客运 926.3 万人次。

4.1 全衬砌船闸结构^[4]

船闸主体结构在山体中开挖兴建,开挖边坡高度一般在120 m以上,最高达170 m。为充分利用坝区基岩强度高、完整性好的有利条件,降低工程造价,经研究,三峡船闸采用全衬砌船闸,即船闸主体段在闸槽下部,采用高达70 m直立岩坡开挖,闸首、闸室的边墙,采用钢筋混凝土衬砌式结构,并通过高强锚杆与墙后岩体联合受力。研究如何采用确保闸墙—锚杆—岩体联合受力的技术措施,使闸墙在各种工况下,能够充分发挥各自的材料特性,保证工程安全可靠、经济是全衬砌船闸需要解决的关键技术问题。

1) 深入研究结构与岩体间的接触机理。在两者的接触边界上,引入了接触面单元,接触面采用的物理方程,考虑了由于变温和其他方面的原因引起的初始间隙,以及岩体表面不平整对接触面剪切应力的影响,能较真实地反映接触面的工作性态。施工期计算,模拟混凝土的浇筑过程,考虑温度作用与混凝土的徐变;检修期计算,考虑墙后渗透压力与温度变化的共同作用,使各种工况下的闸墙结构—锚杆—岩体三者之间的联合受力计算成果,符合工程实际的受力状态。

2) 合理布置设有自由段的复合型高强锚杆。在锚杆混凝土与岩基接触面处,设置能自由变形的“自由段”,有效地降低了锚杆内力,使锚杆受力分布均匀,延长了锚杆的使用寿命;同时,由于船闸直立边坡受开挖爆破影响和卸荷松弛,加上岩体不利结构面的存在,需进行系统支护和加固处理,研究采用岩体支护锚杆与衬砌结构锚杆合二为一的复合型高强锚杆,既满足边坡支护和加固要求,也保证混凝土与岩体的联合受力条件。

3) 设置新颖高效、可靠的“井”字形墙后排水系统。研究采用水平和垂直方向排水管组成的“井”字形墙后排水系统,能高效、可靠的排除墙后渗水,降低墙后水压力,满足衬砌墙在渗水压力作用下保持稳定的要求。为满足检修疏通要求,每条竖向排水管铅直进行布置,管顶与闸墙顶部的管线廊道连通,必要时可进行检查和维护。

4.2 超高水头船闸输水系统

三峡船闸闸室的最大输水水头达45.2 m,且充、泄水体大,最大一次充、泄水水体为23.7万 m^3 ,要求的输水时间短,充、泄水时间控制在12 min以内,闸室水面上升速度快和超高输水水头条件下,满足闸室快速充、泄水要求的同时,保证在充泄水过程

中,输水阀门段不发生有害的声振和气蚀,闸室内水面升降平稳,成为船闸输水的关键技术问题。设计采用了以下重要技术:

1) 对总水头合理分级,采用先进的防空化技术。将三峡船闸的总水头等分成5级,最大输水水头45.2 m,输水系统主廊道按照船闸结构的特点,与闸墙结构分开布置,在船闸两侧山体内开挖隧洞,通过较方便地降低阀门段廊道高程,增加阀门的淹没水深,提高阀门后廊道压力,以提高廊道输水水流的空化数,防止廊道产生空蚀和声振。

2) 优化廊道体型。在阀门后,廊道顶部采用以1:10坡比逐渐扩大,廊道底部采用垂直向下突然扩大的体型,利用扩散后的漩滚水流消除能量,降低门后水流的平均速度及改变门后的流态,提高门后的压力,进一步提高水流的空化数。

3) 快速开启阀门。通过快速开启阀门,利用水体惯性提高门后廊道内压力及抑制阀门底缘水流漩滚的发展,缩短低压状态的历时,抑制门后水流空化的发生与发展;并采取在阀门的门楣和在阀门后底槛上进行通气,以及采用全包式阀门和不锈钢阀门面板等技术措施。

4) 在闸室内,采用对称布置输水支廊道的4区段廊道顶部出水加消能盖板的等惯性输水系统,保证了闸室水面的快速、平稳升降。

4.3 大型人字闸门及其启闭机

船闸人字闸门的最大高度38.5 m、单扇门的宽度20.2 m,门重850 t,最大淹没水深36 m,启闭机的启门力2700 kN。闸门既要在频繁的反复荷载作用下启闭,保持门体足够的刚度和强度,防止产生裂缝;又要适应闸首的微量变形,以保证刚性止水的效果;巨大的门体自重,加大了保持底枢润滑的难度,巨大的启闭力,使常规使用的四连杆大齿轮启闭机不再具备被采用的可行性。合理设计大型人字闸门及其启闭机成为保证船闸正常运行的关键课题。

1) 优化闸门结构。人字闸门的门页,采用横梁式结构,主梁采用变宽度翼缘,在门页下游面设两层背拉杆,在主横梁中间截面、端部及边柱的设计中,采用充分利用材料强度,降低应力幅值,提高结构抗疲劳能力的设计方法、技术措施。

2) 提高闸门运行的可靠性。增加了门轴柱的抗扭刚度,对支、枕垫块的接触形式,改变过去通常采用的同弧半径、面与面的接触形式,改用大曲率半径的线接触形式。人字闸门的底枢,由过去通常采

用的压力注油改为自润滑材料,提高了人字闸门运行的安全可靠。

3)采用大行程卧缸直连式无级变速液压启闭机。通过在启闭机细长的液压油缸尾部设置支撑小轮,调整活塞杆拉门点位置等技术,启闭机采用无级变速运行方式,降低了运行阻力,减小了启闭机规模。在细长油缸尾部增设弹性支承,保证了启闭机运行的安全可靠。

5 结语

三峡工程于2006年5月大坝全线施工至设计高程,10月蓄水至初期运行水位156 m;2008年11月和2009年11月,试验性蓄水位分别达172.8 m和171.4 m,2010年10月试验性蓄水至设计水位175 m,工程开始全面发挥防洪、发电、航运、供水等综合效益。枢纽各建筑物投运以来的监测成果表明,变形、渗流、应力应变等项目监测值均小于设计

计算值,建筑物性态正常,运行安全可靠,各建筑物设计先进合理,施工质量总体优良。

三峡水利枢纽建筑物设计研究和建设过程中,得到国内众多专家的热忱指导和大力帮助,凝聚了各位专家的智慧,借此深表诚挚的感谢!

参考文献

- [1] 郑守仁. 三峡工程设计重大技术问题综述[C]//三峡工程设计论文集. 北京:中国水利水电出版社,2003,8:3-14.
- [2] 钮新强,王小毛. 三峡工程枢纽布置设计与研究[C]//三峡工程设计论文集. 北京:中国水利水电出版社,2003,8:395-402.
- [3] 符志远,谢红兵. 三峡左岸厂房的几个技术问题[C]//三峡工程设计论文集. 北京:中国水利水电出版社,2003,8:453-458.
- [4] 钮新强,童迪. 三峡船闸关键技术研究[J]. 水力发电学报,2009(6):36-42.

The research and practice of key technological issues in structure design of Three Gorges Project

Zheng Shouren¹, Niu Xinqiang²

(1. Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

[Abstract] The dam of Three Gorges Project is characterized by large flood discharge capacity, more outlets complicated flood discharge and energy dissipation structure etc., the gentle-dip structural plane of the bedrock in powerhouse dam section endangers the dam foundation stability due to the deep excavation of powerhouse at the dam-toe. For the dam body concrete, the durability requirement is high as well as the temperature control and crack prevention are difficult. There is a lack of practical experiences in the design and construction of asphalt concrete core wall for Maopingxi protective earth-rock dam. The power station operates with high water head and large head variation. The type selection of penstock and intake as well as the embedding way of spiral case are complicated in technique, and the tailrace tunnel with sloping ceiling of underground power plant is arranged instead of traditional tailrace surge tank. For the double-line five-step ship-lock, the design of fully lined ship-lock, high head delivery system and large-sized miter gates and hoists is very difficult due to high operation head, complicated delivery conditions and building in deep excavated rock. The preferred solutions, optimal schemes and technical measures for various structures, as well as the innovation achievements proved by practice are highlighted.

[Key words] Three Gorges Project; structure; design; key techniques; practice