

⑦
25-30

三峡工程主要科研成果及应用

TV752.63
TV632.63
F204

戴会超

(中国长江三峡工程开发总公司 宜昌 443002)

摘要 介绍三峡工程的科研项目,综述三峡工程开工以来的主要科研成果及工程应用情况,包括:一期土石围堰基础处理与施工技术;大江截流上下游土石围堰平抛垫底研究;二期围堰防渗工程研究;大江截流计算机科学管理;大坝混凝土浇筑方案及主要施工机械选型;混凝土的原材料和耐久性优化试验研究;大坝基础深层抗滑稳定研究;三峡电站进水口型式研究;钢衬钢筋混凝土引水道研究;蜗壳打压、厂坝间伸缩节问题研究;永久船闸的引航道布置、输水系统及水力学、高边坡稳定、混凝土衬砌墙的结构与支护研究;特大型水轮发电机组的科学研究。

关键词 围堰;截流;混凝土;施工;船闸;高边坡;水轮发电机组;三峡水利枢纽

三峡工程 科研成果 应用

1 三峡工程科学研究综述

三峡工程是一项涉及科学技术、经济、社会发展等多门类的复杂系统工程。规模巨大,影响深远,经过70余年几代中国人的努力,长期的规划勘察,方案设计,科学研究、试验和论证,人们加深了对大自然的认识和对长江的自然规律的认识,得出的最终结论是:三峡工程建设是必要的,技术上是可行的,经济上是合理的。

三峡工程规模巨大,技术复杂,科技工作是三峡工程的先导和基础。三峡工程的科研项目包括三峡工程前期科研项目;国务院三峡重大装备办公室安排的“三峡工程重大装备的研制”;国家科委安排的“六五”、“七五”、“八五”攻关课题;8个单项技术审查科研项目;长江水利委员会安排的设计科研项目;配合国家自然科学基金委员会安排的国家基金重大项目“三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用研究”;“九五”国家重大技术装备研制和国产化三峡水利枢纽工程成套设备科研项目;三峡工程施工科研等。专业面涉及泥沙、航运、水文、地质、水工、施工、建材、金属结构、机电设备、生态环境等多学科、多专业。除直接参与工程建设的设计、施工、监理单位的科技人员外,全国有数十家科研单位和高校、数千名科技人员投入三峡科技工作,提交了近2000份科技成果报告。这些科技成果已经和将要对三峡工程建设重大问题决策奠定科学基础,对优化设计、改进施工工艺、保证工程质量、节约工程投资、促进现代化管理发挥重要作用。

2 截流和围堰科学研究成果

2.1 三峡水利枢纽一期土石围堰基础处理与施工技术研究

三峡一期土石围堰基础地质条件复杂,堰基粉细砂、块球体及花岗岩中强风化带、弱风化带的严重透水性是一般围堰工程难以遇到的特殊地层,其技术处理方案直接关系到工程的成败。在设计与施工中对围堰基础粉细砂层的物理力学性状及液化特性和渗流稳定进行一系列的试验研究和计算分析,提出对粉细砂地层采取“外堵内排,保留粉细砂”的技术处理方案;对块球体等地层采取“柔性墙、高压旋喷灌浆、帷幕灌浆”的综合处理措施防渗技术,确保了土石围堰按期完成和安全运行。一期土石围堰经受了3个汛期的考验,于1997年汛前完成了使命。经工程施工验收和专家鉴定,该项技术为三峡水利枢纽混凝土纵向围堰提前10个月浇筑混凝土创造了条件,并节约大量工程投资。

2.2 大江截流上下游土石围堰平抛垫底科学研究

三峡大江截流主河床深槽段最大深度达60多米,为世界水电工程建设史上之罕见。为避免可能发生截流戗堤和堰体抛填过程中堤头坍塌现象,威胁施工人员和施工机械的安全,减少截流时的抛投强度,经模型试验和堤头坍塌机理分析,采用平抛垫底抬高河床高程的措施,使截流水深减至30m左右,为大江截流创造了良好的条件。结合平抛垫底高程,调整防渗墙与戗堤轴线距离,减小围堰填筑工程

量 80 万 m^3 。

2.3 二期围堰防渗工程科学技术问题

三峡二期围堰由上下游横向围堰和已建成的右岸混凝土纵向围堰组成。上下游土石围堰是三峡工程建设过程中最重要的临时建筑物。二期围堰断面采用“两侧石碴夹风化砂的堰体,垂直防渗”结构型式,围堰防渗采用塑性混凝土防渗墙下接帷幕灌浆,墙上接防渗土工膜方案,上游围堰在防渗墙深度超过 40 m 的深槽段加设第二道防渗墙,间距 6 m,墙厚 1.0 m 和 0.8 m,最大深度 74 m。下游围堰深槽段,根据防渗施工专家的咨询意见和考虑到施工承包单位高喷设备性能和数量难以满足设计要求的具体情况,防渗墙其厚度由原 1.0 m 改为按 1.1 m 的方案实施,同时取消该部位的高喷墙。防渗墙施工采用液压双轮铣和“两钻一抓”以及双反弧接头槽法等新工艺。为了提高深槽段的安全可靠性,在上游围堰双墙段增设混凝土隔墙,在基岩陡坡段和左侧轴线反拱拐点,辅以高压旋喷加固措施。对平抛垫底部位采用振冲加密和预灌浓浆,以改善力学和防渗特性。1998 年长江虽然相继形成了 8 次洪峰,但围堰渗水量 50 L/s,远小于设计预测值 600 L/s,防渗效果良好。

2.4 大江截流计算机科学管理研究

随着计算机图形技术的发展,美国、德国和日本一些发达国家非常重视运用直观的图形和基于计算机支持的施工组织管理系统指导重要工程及其重要施工阶段的施工。三峡工程是举世瞩目的跨世纪工程,应尽可能实施现代化的计算机管理,大江截流这样重要的施工阶段建立基于计算机的管理系统是非常必要的。为此,中国长江三峡工程开发总公司组织有关院校开发了大江截流决策支持系统,用以指导施工组织管理。大江截流决策支持系统的建立和实施存在以下技术难点:

a. 模型建立工作量大,几乎概括了三峡工程施工的各个环节,需要进行大量的数据准备和建模工作。

b. 三维动画数据量大,场景复杂,编辑困难,渲染机时消耗大。以三峡工程大江截流模拟为例,三维模型组成面数高达 27 万之多,几乎达到微机处理能力的极限。

c. 虚拟现实技术(virtual reality, VR)的运用:VR 是一种高级终端用户界面,它的功能包括实时模拟和通过多种传感通道完成交互操作。本次将运用此技术对三峡水利枢纽主要建筑物进行 VR 三维建模,使得用户可以用鼠标随意旋转建筑模型,并可将每个模型单独拿出来观看查询细部信息,可按用户指定的路径实时生成三维漫游动画。

d. 导截流数学模型的实现。以往导截流设计和施工基本上以物理模型为依据,不仅费时耗物,且受比尺效应的影响,不能形象地反映真实的流动情况。相比之下,数学模型具有花费少、适应能力强、提供详细的流场资料、便于方案比较等优点。人们愈来愈重视运用数值模拟手段预测各种复杂的水流现象及流场的内部结构。国际上一些享有盛名的单位已由过去的物理模型为主要决策依据转化为数学模型为主要决策依据。为保证大江截流的顺利完成,长江水利委员会作了不同比尺的物理模型实验,但物理模型本身存在费用高、周期长、比尺效应等限制。三峡工程大江截流期间,截流指挥势必要按当时的长江来水条件、戗堤进占形象及施工机械配置等具体条件相机进行截流工程的决策安排。在大量的物理模型基础上,采用经过物理模型验证的导截流数学模型,形成了自由表面和水流流场的三维实体和截流水力学参数。

在施工之前,大家对大江截流缺乏形象、直观的认识,通过本系统使我们在实际施工之前,能迅速、精确直观地看到所采取的措施将产生的结果,对不同的施工方案进行比较研究,为大江截流的正确决策提供强有力的支持。而且使人们通过中央电视台或计算机多媒体光盘,提前看到了大江截流惊心动魄的一幕,如同身临三峡工程的施工现场。该成果已在中央电视台和众多新闻媒体报道,经水利部组织的专家组会议鉴定,整体达到国际先进水平。

3 大坝和厂房科学研究成果

3.1 大坝混凝土浇筑方案及主要施工机械选型

三峡工程二期大坝和厂房施工是三峡工程中最艰巨的项目,其施工方案的优劣是直接关系到三峡工程能否如期建成、能否提前发挥效益的关键。三峡工程以其工程量巨大、施工强度高、高温季节持续时间长、结构复杂而显著区别于国内外已建或在建的其它工程,国内外目前现有的设备均难以完成。施工方案的研究,在论证和初设阶段以及“七五”国家科技重点攻关项目中都做了大量的科研工作。中国长江三峡工程开发总公司成立后,又组织了全国大专院校和科研机构进行补充研究,聘请国际上著名专家进行技术咨询;并决定采用带施工方案的施工设备招标方式,进行国际公开竞争性招标,即让设备投标商首先做出三峡二期工程施工方案,然后据此确定最优设备参数及最佳的设备配置。经过认真的招标、评标工作,总结出两个适合于三峡工程特点的优化的施工方案:一为以大型塔机和高架门机为主的施工方案;二为塔带机为主辅以缆机和高架门塔机

的施工方案,这两个方案都是可行的,均可满足三峡工程的施工及进度要求。在充分比较、论证,充分听取各方面意见的基础上,最终选定以塔带机为主辅以缆机和高架门塔机的施工方案。

3.2 混凝土的原材料和耐久性

三峡工程混凝土量大、由于工程的特殊性和重要性,对混凝土的质量和耐久性提出了很高的要求。因而,对混凝土各项性能指标及配合比设计参数等进行了不断的优化试验研究,制定了一整套混凝土施工质量的评定标准。

a. 水泥。对于大坝内部和基础混凝土,采用 525 号大坝中热硅酸盐水泥和 425 号大坝矿渣低热水泥混凝土配合比方案,大坝外部混凝土采用 525 号大坝中热硅酸盐水泥混凝土配合比方案。通过招标,水泥供应厂家由生产优质水泥的葛洲坝水泥厂、湖北华新水泥厂和湖南特种水泥厂中标。规定 525 号中热硅酸盐水泥熟料的碱含量不得超过 0.5%,低于国家规定的不得超过 0.6% 的控制指标。425 号大坝矿渣低热水泥,也必须严格按国家标准控制含碱量,并力争更低一些。525 号大坝中热水泥 MgO 含量不得超过 5% 的国家标准,为使水泥具有微膨胀性,要求 MgO 含量不小于 3.5%。

b. 粉煤灰。粉煤灰作为掺合料在国内外已广泛得到应用,在施工现场掺优质粉煤灰除了能节约部分水泥外,更重要的是能改善混凝土的和易性,降低混凝土水化热温升,抑制碱骨料反应,对混凝土起到改性作用。Ⅰ级粉煤灰与Ⅱ级粉煤灰相比具有明显的优越性,经过综合比较,确定大坝混凝土掺用Ⅰ级粉煤灰。通过招标,考虑质量和运输保证条件,确定Ⅰ级粉煤灰主供厂家为平圩电厂、南京电厂、珞璜电厂和神头电厂。

c. 外加剂。经广泛调研、咨询及大量对比试验研究,推荐使用 ZB—1A, FDN 9001, R 561 等高效减水剂。引气剂的选择主要考虑了高效、稳定、气泡特性以及与减水剂相互适应性好,推荐使用 PC—2、DH9 等。

d. 骨料。三峡工程采用的骨料分为人工骨料和天然骨料两种,一期工程由于施工工期紧、人工骨料加工系统尚未形成,故采用天然砂石料。二期工程采用人工骨料。天然骨料为长江天然料场和黄柏河天然料场,距坝址约 54~85 km。人工骨料利用基坑开挖的新鲜闪云斜长花岗岩及下岸溪斑状花岗岩。采用目前国内外各种试验方法对骨料进行碱活性检验,一致认为三峡工程采用的花岗岩人工骨料为非活性骨料,另考虑到三峡工程的重要性,由于三峡工程混凝土骨料数量巨大,应根据地质情况继续进行

碱活性定期验定;检验成果还表明,三峡工程用的天然料场中骨料有部分系活性骨料和可疑活性骨料,今后应继续取样,系统研究其碱活性规律,确定安全使用条件。

e. 混凝土含碱量。试验表明,经选用以上原材料、花岗岩人工骨料配制的混凝土,总含碱量均可以严格控制在 2.5 kg/m^3 以内。如使用天然骨料,要求混凝土总含碱量不得超过 2.0 kg/m^3 。因而,三峡工程混凝土碱骨料反应得到有效控制,能满足混凝土的耐久性要求。

f. 混凝土配合比设计。对三峡工程第二阶段混凝土配合比进行了大量的优选试验。在混凝土配合比设计试验优化过程中采取了几项技术措施,如混凝土全部掺用引气剂,选用品质优良的高效减水剂,掺用Ⅰ级粉煤灰并缩小水胶比增大粉煤灰掺量,采用具有一定补偿收缩性能的水泥,严格限制原材料碱含量和混凝土总碱量等。通过以上措施,成功地把四级配花岗岩人工骨料混凝土用水量由原来的 110 kg/m^3 降至 85 kg/m^3 左右,不但使混凝土各项指标满足设计技术要求而且还使混凝土具有优良的性能,提高了混凝土的抗裂性和耐久性,并将取得显著的经济效益。以大坝混凝土为例,R90 200 大坝外部混凝土,采用 525 号大坝中热水泥、水胶比 0.50,粉煤灰掺量 45%,用水量为 80 kg/m^3 左右,胶凝材料总量 160 kg/m^3 。混凝土配合比设计由业主推荐参数,承包商选定、经监理批准,重大变更经业主审核,以形成一个比较完整的质量控制体系,以保证混凝土的高质量。

3.3 大坝泄洪水力学问题

三峡工程承担长江中、下游的防洪任务,大坝采用千年一遇洪水设计,万年一遇洪水加大 10% 校核。在设计水位 175 m 时,需渲泄流量 $69800\text{ m}^3/\text{s}$,校核洪水条件下,具备 $102500\text{ m}^3/\text{s}$ 的泄洪能力;经反复研究,采用深孔及表孔两套泄洪设施,为了尽量缩短溢流前缘,采用了现在的深孔与表孔相间布置的型式。

泄洪坝段总长 483 m,分为 23 个坝段,坝块中央设置深孔,表孔跨缝布置;为满足三期截流和导流期泄洪要求,在表孔正下方布置有 22 个导流底孔,导流底孔采用长有压管方案。三峡工程的泄洪深孔是三峡枢纽的主要泄水建筑物,千年一遇以下的洪水主要由深孔泄洪。同时深孔还担负着三期导流和施工围堰挡水的度汛任务。深孔的设计水头 85 m,常规止水设计有相当的难度,深孔最大流速约 35 m/s ,宜采用掺气减蚀措施。因此深孔研究中存在着有压长短管选择、掺气与否及突扩方案与常规止水方案的比较等问题。经中国长江三峡工程开发总公司技术委员会审查,从设计、施工、水力学和运行条件综合

比较,最后深孔体型确定为有压短管方案,深孔闸门按跌坎掺气方案设计。原设计泄洪深孔仅设置3扇事故检修门,为确保深孔安全运行,研究了每孔各设一扇事故检修门,在非汛期挡水,保证深孔闸门基本不漏水,并减轻弧门长期在高水头工作的负担,也便于维修。综合考虑深孔弧门的运行、检修的影响因素,深孔事故门宜分批安装制造。第一批可安装制造6~8扇,其余可待水库蓄水后再陆续安装制造。深孔弧门的关键在确保工作弧门自身运行可靠性,尤其是止水的可靠性。

3.4 大坝基础深层抗滑稳定问题

三峡坝基岩体总体上是较完整的花岗岩,但左岸1~5号厂房坝段,坝基岩面缓倾角结构面较发育,局部地段还展布长大缓倾角裂隙,并有少量中倾角裂隙。

该坝段位于左岸山体斜坡部位,坝基高程90m,而坝后厂房最低建基面高程为22.2m,坝下游基岩需开挖成人工高陡临空边坡,因此,对1~5号厂房坝段重点分析研究了坝基深层抗滑问题。

a. 根据地质已揭露的缓倾角、中倾角裂隙和结构面,分析其分布规律,确定其在坝基下的分布、产状等。

b. 测试结构面的性状及力学参数,拟定设计采用的参数。

c. 确定各种可能滑动面的概化模式,进行抗滑稳定分析,判断可能产生深层滑动最不利的滑移面,分析其抗滑稳定安全度。

d. 根据坝基可能最不利的深层滑动,研究应采取抗滑安全的工程技术措施。

3.5 电站进水口型式

三峡电站机组采用单机单管引水,单机引用流量大,为满足电站运行要求,进水口尺寸大、高程低。因此,闸门尺寸长、水头高,需采用大容量启闭设备。

借鉴国内外大型水电站进水口设计和实践经验,采用单孔小喇叭进口体型,进口底高程108.00m,进口曲线为变半径双圆弧曲线,喇叭口宽12.11m,高17.62m,工作闸门为9.2m×13.24m。机组进水口布置,经对单、双孔方案进行大比尺水工模型试验后作了选定,不仅改善了流态,而且取得了减少0.3m水头损失的效果,可增加年发电量约3亿kW·h,经济效益显著。

3.6 钢衬钢筋混凝土引水管道

鉴于三峡电站压力管道具有直径大(12.4m),条数多(26条),HD值高(1730m²)等特点;经综合比选,坝内管段选用钢衬钢筋混凝土联合受力结构。坝后管段结构形式研究比较了钢管单独受力(即明管)

和钢衬钢筋混凝土联合受力方案。通过二维及三维仿真材料模型试验和二维、三维线性及非线性有限元计算,认为钢衬钢筋混凝土方案钢板较薄,有利于保证钢材材质和焊接质量,只要认真浇筑外包混凝土,可以保证钢衬钢筋混凝土联合受力。其安全度比明管大,国内外已有成功经验,故选用钢衬钢筋混凝土联合受力方案。钢衬钢筋混凝土联合受力方案,要求压力管道在设计内水压力下,外包混凝土按限裂设计,全部内水压力由钢衬、钢筋共同承担,总的安全系数应大于2.2;钢衬、钢筋各自单独承担全部内水压力时要求安全系数均大于1.0。该方案,外包混凝土选用Ⅱ级钢筋,需布设4~5层环筋,施工难度大,不利于保证混凝土浇筑质量。长江水利委员会进行优化设计,适当降低结构的安全系数,以减少环筋的层数。经过优化设计,总的安全系数为2.0,钢衬、钢筋各自单独承担全部内水压力时安全系数分别为1.2和0.8,选用Ⅲ级钢筋,调整为3层环筋,可节约钢材10%左右。

中国长江三峡工程开发总公司原则同意长江水利委员会优化设计报告。考虑到前苏联对钢衬钢筋混凝土联合受力压力管道技术已有丰富的经验和规范可借鉴,中国长江三峡工程开发总公司委托俄罗斯水电专家对三峡水电站压力管道优化设计结果进行复核。复核结果表明:优化设计满足俄罗斯的规范;钢衬、钢筋计算应力均较小,外包混凝土的裂缝宽度小于0.2mm;优化后仍有较大的安全余地;考虑到三峡压力管道的极端重要性,俄罗斯专家认为三峡压力管道的安全系数 $k=2.0$ 是适当的。

3.7 蜗壳打压问题

三峡水轮机蜗壳与外围混凝土结构型式,先后研究了充水加压、半包(上部铺设垫层)和全包(全部铺设垫层)三个方案,经综合分析,为更有利于水轮发电机组稳定运行和结构安全考虑,1997年7月中国长江三峡工程开发总公司确定采用打压方案,并请长江水利委员会按照该方案进行施工图设计。由于长江水利委员会原厂房总体设计是按设置垫层方案考虑,厂房尺寸十分紧凑,加上三峡蜗壳打压水头高,钢管及蜗壳尺寸大,因而闷头很难在厂内布置,经比较确定闷头位于厂外副厂房下部的布置方案。由于闷头布置在副厂房下部,造成副厂房的施工进度推迟达9.5个月之久,对2003年机组投产发电计划目标有较大影响。鉴于对蜗壳焊缝质量检查已有可靠手段,为简化闷头结构和有利于闷头布置,同时又能保证蜗壳与外围混凝土紧密结合,有利于抗振和保证机组安全运行,取消1.5倍最高运行水头的打压试验工序,仅采用保压浇蜗壳外围混凝土。针对

三峡水轮发电机组运行水头变幅大,初期水库处于低水头运行,后期又有相当长的时间内在防洪限制水位运行的特点,为保证在运行期间蜗壳与外围混凝土贴紧,联成整体,保压水头确定为 78 m,相应初期运行水位 135 m.

3.8 厂坝间伸缩节问题

1998 年 6 月 6~12 日,中国科学院、中国工程院张光斗、潘家铮两位两院院士来三峡工地进行咨询时认为:1~6 岸坡坝段伸缩节可以取消;7~14 河床坝段伸缩节也倾向取消,可待俄罗斯专家咨询报告提交和进行一些补充分析后再定;可否取消伸缩节,其重要的因素是国内外工程实践及垫层管两端的相对位移和钢管的应力在允许应力的范围内.

俄罗斯专家在对三峡水电站钢衬钢筋混凝土联合受力压力管道的施工技术进行咨询时介绍,前苏联在最近 25 年来所建设的 10 余座高混凝土坝(包括 200 m 以上高拱坝)坝后式厂房,厂坝间均未设伸缩节.俄罗斯萨扬舒申斯克(重力拱坝,坝高 245 m,坝后厂房)、契尔盖(双曲拱坝,坝高 232 m,坝后厂房)、克拉斯诺雅尔斯克(重力坝,坝高 125 m,坝后厂房)等水电站均取消伸缩节,设置一段补偿节来解决厂坝之间的相对位移问题.上述水电站运行情况良好.厂坝间原型观测的相对变形较小,一般仅为计算值的 50%~60%.

国内 80 年代以来所建成的高混凝土坝坝后厂房也逐步取消伸缩节,如水口(管径 $D=10.5$ m)、岩滩($D=10.8$ m)、李家峡($D=8.0$ m)等水电站,目前这些电站压力管道均正常运行.而 80 年代以前,厂坝间采用套筒式伸缩节的工程,常因伸缩节漏水难以维修,不得不采用其它补救措施.从我国采用的套筒式双伸缩节的实践看,12.4 m 直径的伸缩节的制作安装和维护都存在一定困难,其运行可靠性也较难保证.

根据计算分析成果,1~6 岸坡坝段用垫层管取代伸缩节,其厂坝间的相对位移和转角小,在任何季节合拢钢管的应力均在允许应力范围内,可以用垫层管取代伸缩节;7~14 河床坝段的相对位移值也在允许范围之内,钢管应力绝大部分在允许应力范围内,仅局部应力超过允许应力,若合理选择合拢时间,河床坝段伸缩节也可取消.为确保河床坝段垫层管的安全,俄罗斯专家建议采用:加厚垫层管四周垫层厚度和垫层管长度;垫层管底部设置排水,并埋设监测仪器;垫层管外包钢筋混凝土,钢筋混凝土可按全水头(静水头)设计;垫层管不设加劲环,其两端钢管设置止推环.长江水利委员会认为,7~14 河床机组段垫层管工作条件相对复杂,所提出的工程措施或技术保证措施尚难以落实,倾向保留原定的伸缩节方案.

4 永久船闸科学研究成果

4.1 永久船闸输水系统及水力学

永久船闸最大工作水头 113 m,分为 5 级,单级最大工作水头达 45.2 m,为目前世界上规模最大、水头最高的船闸.为此对船闸输水系统充泄水阀门型式及阀门段水力学条件、防空化措施、闸室充泄水水力指标和船只停泊条件等船闸水力学问题,进行水工模型试验研究.永久船闸输水系统采用长隧洞等惯性型式,每线船闸两侧岸体内对称布置两条输水隧洞,输水隧洞最大输水流量 $550 \text{ m}^3/\text{s}$,闸室充水底部廓道顶设出水盖板消能.模型试验表明,在各种通航水位条件输水时,过闸船只的纵向系缆力小于 49 kN,横向系缆力小于 29.4 kN,可满足安全停泊要求.对充泄水阀门型式比较了正向弧门和反向弧门,两种门型在技术上都是可行的,鉴于反向弧门在国内外高水差船闸有成功的经验,特别是葛洲坝工程中已经过长期的运行考验,选用反向弧门.为解决充泄水阀门及阀门段的振动和空化问题,采取适当降低隧洞高程,以保证阀门有足够的淹没水深;操作时快速开启阀门;阀门后隧洞采用顶部扩大及底部扩大的体型;阀门后通气等措施,可防止阀门区出现空化问题,并满足闸室停泊水流条件要求,保证输水隧洞及泄水阀门安全运行.

4.2 永久船闸引航道布置

永久船闸引航道布置及通航水流条件与坝区泥沙淤积密切相关.重点研究水库运行不同历时,引航道内外泥沙淤积对通航水流条件的影响,以及在各种情况下为满足通航水流条件需要采取的防淤清淤措施问题.上下游引航道布置,按通航水流条件要求,控制口门纵向流速小于 2 m/s ,横向流速小于 0.3 m/s ,回流流速小于 0.3 m/s ,涌浪高度小于 0.5 m .为此在上游引航道右侧设置隔流堤,将航道与长江主流隔开,形成单独的人工航道.对隔流堤布置方案研究比较短隔流堤方案和将升船机引航道置于隔流堤以内的“大包方案”,以及将临时船闸改建的冲沙闸也包进隔流堤内的“全包方案”.在未考虑上游建库,并在水沙系列中每 20 年增加一个相当于 80 年一遇的 1954 年型丰水丰沙过程的条件,坝区泥沙模型试验成果表明:水库运行 $(30+2)$ 年,坝前淤积不多,上游引航道不建隔流堤,永久船闸和升船机引航道的水流条件均可满足通航要求;水库运行 50~70 年后,引航道泥沙逐渐淤高,水流流速增加,对船舶航行有一定的影响,需要采取措施.中国长江三峡工程开发总公司原则同意按专家组审查意见实施上航道隔流堤“全包”方案.

下游引航道右侧为土石隔流堤,出口口门距坝轴线 4.5 km,受枢纽下泄水流和波浪影响较小。水库运行 50~80 年,一般年份上、下引航道淤积量不是很大,且主要淤积在引航道口门以外,采取临时船闸改为冲砂闸;在引航道口门处设截沙槽或设水(气)幕破坏异重流进入航道,减少淤积;配备自航式高性能挖泥船挖除航道内的淤沙等措施,可满足通航水流条件。

4.3 永久船闸高边坡研究

永久船闸高边坡和一般高边坡相比具有以下特点:

a. 它是在山体中深切出来的陡高边坡,高度大、形态复杂、范围广、应力释放充分,呈现出明显的卸荷和非均质特征。

b. 边坡稳定,尤其是变形特性有严格要求。长江是我国的黄金水道,作为永久船闸的边坡,不仅整体和局部稳定必须保证,而且对边坡的流变必须严格控制,以满足船闸人字门的正常运行要求。

c. 施工难度大、干扰多、工期紧。船闸工程不仅地面施工强度高,窄、深且陡的闸室直立边墙开挖困难,而且与大量地下隧洞与竖井开挖同步进行,如何解决开挖爆破的相互影响,最大限度地减少岩体损伤和确保施工安全都是需要处理的难题。

为了解决三峡永久船闸高边坡施工中的问题,在“七五”、“八五”和“九五”国家重大科研项目中,对岩体边坡的基本力学参数试验方法与取值标准;边坡卸荷、非线性、非均质及流变特性;永久船闸长期变形;岩体位移对三峡永久船闸大型人字门工作性态的影响;渗流对边坡稳定的影响;边坡稳定分析方法、破坏机制与安全评判准则;边坡安全监测和反馈分析;边坡爆破开挖和支护技术等一系列课题进行科学研究和联合攻关,取得了一大批有水平的成果,并已应用到设计和施工中。

4.4 永久船闸闸室混凝土衬砌墙的结构与支护研究

三峡永久船闸高边坡开挖具有边坡高度大、延伸长度长,轮廓复杂及直立深切等特点,加上花岗岩坚硬性脆、裂缝发育等地质特点,使之成为开挖难度大、技术要求高的挑战性工程。衬砌墙布置 11 万根高强锚杆,主要作用是保证混凝土衬砌墙的稳定,同时兼顾高边坡岩石的稳定,现结构锚杆设计是按衬砌墙的外水压力和温度应力的最不利组合来考虑的。从衬砌墙分块尺寸看,属于长宽比严重失调的板结构(宽 12 m,高 40~60 m,厚 1.5~2.4 m)。对此,张光斗院士认为:结构锚杆主要是承受外水压力对衬砌墙的推力,对温度应力作用不大。温度变化产生的变形受开挖岩面凹凸不平及开挖台阶的约束,即使混凝土与岩面脱开,其尺度也小于岩面的不平整度,在锚杆逐步

受温差变形产生荷载的过程中,目前设计的混凝土衬砌墙因内外变形的差异和受岩体的约束,必然会产生水平裂缝。混凝土衬砌墙开裂后,其对锚杆产生的荷载随即相应减少。因此,应增设 1~2 条水平结构缝,该水平止水缝宜布置在衬砌厚度突变处,减少温度应力,为加强衬砌墙的整体性,可设过缝钢筋,但不要太多;增加混凝土衬砌墙的温度应力钢筋,以分散温度应力引起的裂缝及减少裂缝的宽度;进一步优化结构锚杆,减少混凝土墙开裂的风险,并可减少高强锚杆数量,或采用延性好的Ⅲ级普通钢筋。

5 特大型水轮发电机组科学研究成果

三峡 700 MW 混流式水轮发电机组,运行水头初期为 61~94 m,后期为 71~113 m。针对三峡电站机组具有单机容量大,工作水头变幅大,过机水流含有一定量的泥沙等特点,重点研究水轮发电机组稳定性能和改善运行稳定性的措施;水轮发电机组主要参数优选及结构方案;调速器及油压装置选型等问题。鉴于三峡电站机组台数多、容量大,在电力系统中的地位极其重要,必须从机组选型、设计、制造上采取措施,确保机组运行稳定可靠。按后期运行条件拟定水轮机最优工况的水头,以确保水轮机在高水头运行工况的稳定性和效率,同时也兼顾低水头的运行性能。水轮发电机组主要参数,经过反复比较拟定为:水轮额定转速 75 r/min,额定水头 80.6 m,额定出力 710 MW,最大出力 852 MW;发电机最大容量 840 MVA,功率因数 0.9。机组冷却方式比较了全空冷方案和定子水冷、转子空冷方案。鉴于两种方案各有优缺点,以制造厂家各自的技术优势来确定。机组的推力负荷达 5 500 t 左右,为世界之最,推力轴承的布置研究了水轮机顶盖和下机架两种方式,推荐承重下机架的方案。调速器采用数字式微机调速器。机组油压装置为分离结构。

机组采用国际公开招标,第一是质量,第二是引进技术。利用这个机会,把我国国内水电设备的制造水平提高到国际水平。左岸电站 14 台 700 MW 水轮发电机组国际招标采购合同于 1997 年 9 月正式签订,由两个供货集团中标。法国通用电气阿尔斯通和瑞士 ABB 公司组成的供货集团中标 8 台水轮发电机组,采用挪威克瓦纳公司的水力设计。加拿大 GE、德国伏伊特、西门子公司三峡联合体中标 6 台水轮发电机组。1997 年年底水轮机埋件部分的第一批货物已运抵工地,意味三峡水轮发电机组埋件的安装将拉开序幕。

(收稿日期:1998-09-04 编辑:马敏峰)