

清江水布垭水利枢纽 工程地质研究

主 编 徐瑞春
副主编 杨火平 柳景华

QINGJIANG SHUIBUYA SHUILI SHUNIU
GONGCHENG DIZHI YANJIU



CUGP

中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

清江水布垭水利枢纽 工程地质研究

主 编：徐瑞春

副主编：杨火平 柳景华

编 写：徐瑞春 杨火平 柳景华 李会中

徐同海 钟 华 曹伟轩



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

清江水布垭水利枢纽工程地质研究/徐瑞春主编,杨火平、柳景华副主编 —武汉:中国地质大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-5625-2315-4

I. 清…

II. ①徐…②杨…③柳…

III. 水利枢纽-工程地质-研究-湖北省

IV. P642.426.3 TV632.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 177185 号

清江水布垭水利枢纽工程地质研究

徐瑞春 主 编

杨火平 柳景华 副主编

责任编辑:徐润英

选题策划:郭金楠

责任校对:陆惠琴

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话 (027)67883511

传真:67883580

E-mail: cbb @ cug. edu. cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cn>

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:650 千字 印张:25.375 插页:2

版次:2010 年 1 月第 1 版

印次:2010 年 1 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—800 册

ISBN 978-7-5625-2315-4

定价:98.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

清江流域是我国著名的岩溶强烈发育地区,72%的流域面积为碳酸盐岩(石灰岩)所覆盖。亚洲最大的岩溶洞穴(腾龙洞)就发育在清江。清江流域雨量丰沛,年径流量达135亿 m^3 ,蕴藏着丰富的水力资源。自20世纪50年代以来,长江水利委员会就开始普查和研究清江水力资源的利用和洪水灾害的防治工作,到了20世纪60年代开始较系统的勘察、水文测流和水力资源规划工作。清江流域开发以三级开发最为有利,自下而上为高坝洲、隔河岩与水布垭水利枢纽,这三个水利枢纽工程均是岩溶强烈发育的石灰岩坝址。

自1987年12月15日隔河岩枢纽工程开工建设到2007年7月22日水布垭水电站第一台机组并网发电,历经20年,清江水电梯级开发完成。

这三个大型水利枢纽工程的地质条件各具特色,积累了丰富的在岩溶地区建坝的经验,也丰富了我国水利水电工程地质学的理论宝库。进行系统的总结并进一步升华是非常必要的。借水利部长江水利委员会长江三峡勘测研究院建院五十周年之际,中国地质大学出版社出版了《长江三峡水利枢纽工程地质研究》和清江水电梯级开发三个大型水电工程系列地质丛书:《隔河岩水利枢纽工程与地质》、《清江水布垭水利枢纽工程地质研究》和《高坝洲水利枢纽工程地质研究》。对现代和以后水电站建设都是一件大好事,对今后按照中央制定的科学发展观来发展我国水电事业也是一个贡献。

水布垭工程地质研究中的几大亮点

(一)因地制宜“合理选择坝型”

考虑坝址区地形地貌、地层岩性、岩体结构等特征及坝区天然建筑材料丰富、环境地质问题等综合因素,得出水布垭以建当地材料坝为宜的结论,即利用坝区天然建材的优势,选择经济合理,同时对坝基岩体要求相对较低的混凝土面板堆石坝作为优选坝型,避开了坝型选择存在的地质风险。

(二)确定最高面板堆石坝趾板建基面标准

水布垭面板堆石坝高233m,趾板建基面岩体主要为二叠系下统栖霞组($P_1^{4-15}q$)及茅口组(P_1m)灰岩、生物碎屑灰岩夹含泥炭质生物碎屑灰岩,软硬相间,岩性复杂。根据《混凝土面板堆石坝设计规范》(DL/T5016—1999)第1.0.2条规定,对于200m以上高坝应进行专门研究。由于水布垭建坝岩体主要为灰岩类,难以划分风化带,《规范》所规定的标准也就很难应用。如何结合水布垭趾板区岩体工程地质条件确定可利用建基面标准,成为建坝最主要的关键性技术问题之一。

通过趾板建基岩体组合特征及大量科学试验研究,从趾板基础岩体自身的抗冲蚀能力要求和防渗帷幕灌浆提高压力的需要出发,确定水布垭最高面板堆石坝趾板建基面利用标准:

趾板可利用建基面岩体应坚硬,不会发生冲蚀且具有可灌性。趾板基础可置于弱卸荷岩体或更好的岩体中,要求岩体为较坚硬和较完整的Ⅲ级岩体,岩块抗压强度大于30MPa,岩体

完整性系数大于 0.55,岩体变形模量大于 4.5GPa。趾板的基础开挖深度宜至弱卸荷岩层,建基面验收时声波波速值不宜小于 3850m/s。凡趾板下出露的断层破碎带、剪切带、溶洞等缺陷不宜保留。若受其他条件的限制,无法挖至弱卸荷下部岩层时,需采取工程措施进行处理。

(三)创先例“利用河床覆盖层作为高面板堆石坝基础”

水布垭大坝坝体填筑量约 1 600 万 m^3 ,坝体前后宽约 800 余 m,河床砂砾石层能否作为大坝地基是该工程的关键技术问题之一。在此之前,国内尚无工程先例用砂砾石层作为超高面板堆石坝地基,一般高面板坝对砂砾石层均进行了全挖除处理。

水布垭运用综合勘察手段,查清了砂卵砾石层地质结构特征、工程地质参数特性,确定了水布垭砂砾石覆盖层经过强夯处理后可以部分作为大坝坝基,并提出了覆盖层利用保留原则:

(1)考虑世界最高面板堆石坝安全稳定的重要性,趾板区向下游一定范围砂砾石层全部挖除,基础挖到基岩面。

(2)主堆石区是大坝承受水荷载的支撑体,为了防止发生较大沉陷,主堆石区范围要求无大片的粘性土层或者透镜体层,否则需予以挖除。

(3)下游 RCC 围堰为坝体的一部分,其基础及下游坝坡一定范围内要求挖除覆盖层至基岩。

(4)确定的保留区,松散的砂卵砾石须采取工程加固处理措施提高其干密度。

实际覆盖层顺河保留长度约为 366m,占大坝底宽约 60%,在最大坝高剖面的坝基覆盖层顶部共布置了 5 个土位移计,用于监测覆盖层的沉降量。相应的沉降、填筑高程变化过程如图 0-1 所示。至 2008 年 2 月,测点 MW01-1-5 的累积沉降变形最大,为 -100.47mm。覆盖层沉降主要发生在 2004 年 10 月以前,之后的沉降逐渐趋于稳定,变化很小。

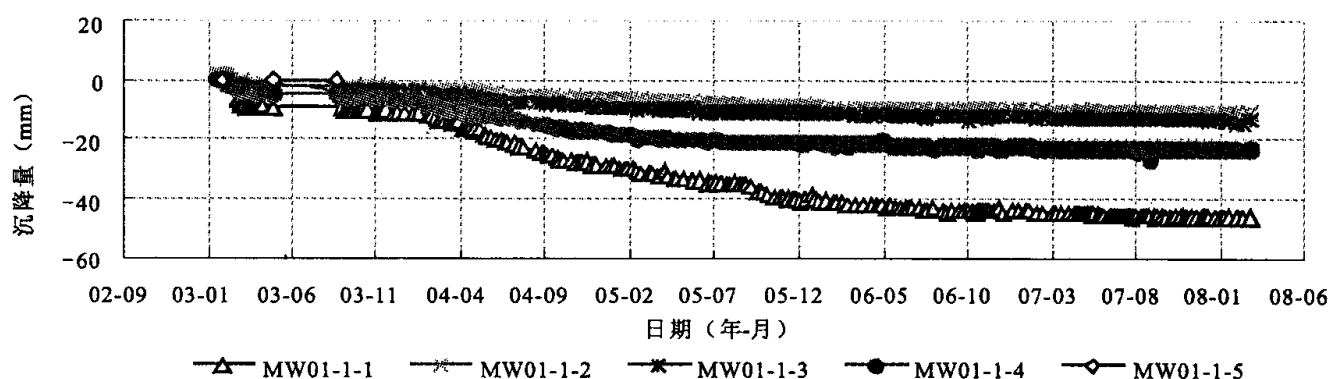


图 0-1 最大坝体监测剖面坝基覆盖层沉降变化过程线

监测结果表明,覆盖层经过强夯处理后,效果显著,覆盖层的沉降量相对大坝总的沉降量其贡献并不大。保留河床覆盖层由此节省开挖、回填工程投资近 1000 万余元,同时加快了工程施工进度,大坝沉降完全在可控范围内,目前大坝运行状况良好。水布垭工程利用砂卵砾石层作为超高面板坝地基,取得了较好的经济效益,必将推动我国面板坝技术在基础应用方面的发展。

(四)合理利用“软岩开挖料”,建设经济型大坝

水布垭面板堆石坝庞大的填筑堆石体需要充足的料源,在堆石料源的选择时主要考虑以

下几个方面:

(1)合理利用、优先利用建筑物开挖料,尽可能提高开挖料的利用率。

(2)充分发挥面板堆石坝就地取材、就近取材的优势,兼顾高料高用、低料低用的特点,在左、右岸合理布置堆石料场。

(3)根据大坝分区以及不同分区对大坝填料的技术要求,在具体选择料场时,主堆石区(ⅢB)、过渡区(ⅢA)、垫层区(ⅡA)填筑料采用茅口组灰岩料,来源于右岸桥沟料场、左岸公山包料场以及溢洪道引水渠开挖料。次堆石区(ⅢC)及下游堆石区(ⅢD)主要采用栖霞组软、硬相间灰岩料,来源于马崖高边坡、溢洪道等建筑物开挖料及桥沟、公山包料场。

水布垭开挖料种类繁多,地质工程师根据基本岩性、沉积岩相、岩石结构、岩石物理力学试验、干湿循环和冻融试验等多种分析手段,为大坝用料做了科学论断:栖霞组软岩料、龙潭组第2段料与硬岩料混和可作为大坝次堆石区填料使用;龙潭第1段岩体在堆积与时间效应下存在自然现象,自然产生的有害物质对混凝土面板有腐蚀作用,不能作为大坝填筑料。事后表明这一决策非常正确,避免了给工程带来巨大负面影响和巨额经济损失。利为我所用,害为我所弃,扎实的地质勘察工作给工程带来了不可预估的经济效益和社会效益。

(五)大型地下洞室“软岩置换处理”新思路

水布垭坝址区岩溶发育,岩层软硬相间,地下主厂房的大方量、大跨度开挖($168.5 \times 23 \times 69\text{m}$,长 $\times$ 宽 $\times$ 高),不可避免存在岩溶塌方及软岩成洞问题。

在复杂的地质条件下布置地下厂房具有很大难度与挑战性,由于厂房的规模趋向扩大,如何处理局部软岩是厂房洞室稳定的关键技术问题。目前国内外在洞室软岩的处理方面主要是采用灌浆、锚杆、锚索、喷混凝土支护等方式进行加固,具有一定的局限性。本工程经过系统分析,地质工程师提出的“软岩置换处理”是解决这一问题的重要手段。本工程第一次在地下电站工程设计中大规模对软岩进行混凝土置换,处理彻底、效果好,在软岩处理方面是一种创新思路。

地质工程师根据坝区岩溶发育特点从宏观上判断,使厂房处于坝区F2、F3大断层形成的岩溶弱发育区间,且避让了大断裂的穿插,合理确定了厂房在山体的空间布置。实际开挖无大溶洞出露,也无因岩溶塌方而影响施工开挖、工程进度问题;同时利用栖霞组第4段厚层硬岩作为厂房顶拱、软岩进行置换方法,成功解决了软岩成洞问题,使厂房开挖过程进展顺利。科学的研究、合理的判断创造了大型地下洞室开挖的又一个奇迹。

(六)“变岩溶化岩体为裂隙性岩体”,构建大坝防渗线

水布垭工程是一个石灰岩坝址,岩溶化程度很高,坝基及绕坝渗漏问题十分突出。计算表明,如果坝址不作防渗处理,其渗漏量可达 $7\text{m}^3/\text{s}$,水量及电能损失严重,还将对坝基中的剪切带产生冲刷破坏,埋藏在坝基下的多条岩溶管道系统在洪水期将直接冲刷大坝的堆石体。为此需要设置一条总长 2588.3m ,面积达 44.14万m^2 ,钻灌总进尺达 39.2万m 的地下帷幕工程。防渗帷幕初期采用了全封闭方案,投资 4.76亿元 (与大坝投资相当)。经大量的地质科学研究,包括岩溶发育的控制因素、发育规律及岩体渗透特性等,提出了I号岩溶管道具有独立的补、迳、排系统,邹家沟一带存在弱岩溶化地块,该地块隔断I号岩溶系统与库水的联系;对于帷幕线上的强岩溶发育区通过封堵岩溶洞穴可以实现“变岩溶化岩体为裂隙性岩体”,同时提出了在复杂岩溶地区帷幕优化的原则和类型。基于地质条件的帷幕优化取得了巨大经济效益和工程效益,节省了工程投资近亿元,而且简化了灌浆工艺和难度,为整个工程按期发电做

出了重要贡献。

在岩溶极其发育的地区形成防渗帷幕是非常困难的,本着以“变岩溶化岩体为裂隙性岩体”的理论为指导思想,水布垭巨大的防渗帷幕施工实施顺利。这一自创体系得到了工程界的广泛认同。

(七)在复杂的地质环境中建起世界第一高面板堆石坝

水布垭工程实践说明这里的环境地质问题在某种程度上比原预测还要复杂。坝后除大岩墙、马岩湾、台子上三大滑坡及右岸马崖高陡边坡外,整个下游两岸边坡,特别是左岸边坡大部由土坡组成。在进场公路的开挖过程中,左岸除新形成了古树包滑坡外,还形成了多处大—中—小型滑坡或变形体[古树包滑坡、郑家坡滑塌体(含打磨沟变形体)、丁家沟崩滑体]。右岸虽然大部分由风化的志留系砂、页岩组成,但也因公路开挖形成了沈家坡变形体(50万 m^3)、水井坪滑坡(约80万 m^3)。这个脆弱的河谷边坡段(约长4km)正是水布垭工程地下厂房尾水出口段,也是泄洪消力池冲刷坑分布段,在工程运行期间一旦两岸边坡出现问题,其后果不堪设想。

在工程实施过程中,加大了对环境地质问题的研究力度,查明了这些不利物理地质体的物质组成与结构、几何边界、地下水环境、岩土的物理力学参数等,并对其稳定性进行了综合分析。在滑坡、变形体的治理过程中,主要采取了经典的抗滑桩与地下排水的治理措施,也有少数进行了压脚处理或前部支挡处理,或采取了阻滑键的处理措施。经过3年的水库运行检验以及溢洪道试泄检验,这些经过治理后的不利物理地质体稳定状态良好。

一般来说,坝址选择应尽量避免开环境地质条件较差的地段。水布垭工程在这样复杂的环境地质条件下能成功建成,是深入而精细的地质勘察研究成果的充分体现。

徐瑞春

2008年10月

第一章 绪 言	(1)
第一节 清江流域资源及其开发概况.....	(1)
第二节 工程建设意义.....	(2)
第三节 勘测设计过程.....	(4)
第四节 工程概况及主要工程地质问题.....	(8)
第二章 区域地壳稳定性与地震活动性	(13)
第一节 区域地质建造概述	(13)
第二节 区域构造格架	(14)
第三节 地壳结构和深部构造	(15)
第四节 区域构造运动的演化进程	(20)
第五节 新构造运动	(21)
第六节 主要断层及其活动性分析	(36)
第七节 地震活动和地震危险性分析	(40)
第八节 水库诱发地震评价	(48)
第三章 库岸稳定性研究	(51)
第一节 库岸工程地质分段及评价	(51)
第二节 库岸不良物理地质体研究	(72)
第三节 库首重点滑坡对工程的影响性分析	(81)
第四节 典型滑坡形成机制分析	(88)
第五节 水库影响区.....	(103)
第四章 坝区工程地质条件	(107)
第一节 河谷地貌.....	(107)
第二节 地层岩性.....	(107)
第三节 沉积环境与沉积相.....	(111)
第四节 地质构造.....	(117)
第五节 风 化.....	(150)
第六节 物理地质现象.....	(152)
第七节 岩溶与水文地质.....	(169)
第八节 岩石(体)的物理力学性质与岩体质量.....	(196)
第九节 地应力.....	(210)
第五章 坝址区环境地质问题研究	(218)
第一节 马崖高边坡.....	(218)
第二节 大岩端滑坡.....	(230)
第三节 马岩湾滑坡.....	(250)

第四节	台子上滑坡·····	(262)
第六章	主要建筑物工程地质条件及评价·····	(273)
第一节	混凝土面板堆石坝·····	(273)
第二节	地下电站·····	(302)
第三节	溢洪道与防淘墙·····	(325)
第四节	放空洞·····	(340)
第五节	防渗帷幕·····	(350)
第六节	导流洞·····	(361)
第七章	天然建筑材料·····	(374)
第一节	料场选择原则·····	(374)
第二节	桥沟、公山包料场基本地质概况·····	(375)
第三节	桥沟、公山包技术质量指标及评价·····	(377)
第四节	料场可开采储量评价·····	(381)
第五节	建筑物开挖料利用研究·····	(385)
主要参考文献	·····	(395)

绪 言

第一节 清江流域资源及其开发概况

清江是长江出三峡以后的第一条大支流,发源于湖北省利川市齐岳山的龙洞沟,自西向东,横贯鄂西南,经利川市、恩施市、鹤峰、宣恩、来凤、建始、巴东、五峰、长阳等县市,于宜都市入长江,全长 423km,总落差 1 430m,流域面积 17 000km²。流域地处长江中游暴雨区,多年平均降雨量 1 400mm/a,多年平均流量 440m³/s,年迳流量 135 亿 m³,单位面积的产水量相当于三峡以上单位面积产水量的 2 倍,流域内水力资源丰富。

流域内矿产达 24 种之多,其中铁、磷、硒矿为国家级或世界级的矿产。沿江风景秀丽,清江流域绿色覆盖面积属全国较大的流域之一,在清江上游利川市内还保存有 3 000 多棵水杉,被誉为世界《水杉公园》,水杉是侏罗纪时期的树种,它繁衍生息已有一亿两千万年以上的历史,被称为世界珍宝,五峰土家族自治县境内的白溢岩峰高程 2 320.3m,为清江流域的最高峰,其腰部的洞穴系统中每年盛暑季节会结冰而成稀世绝景——“暑天冰雪”,为世界级的奇观。流域内 70% 为石灰岩分布区,岩溶地貌十分壮观,是我国重要的岩溶地貌、岩溶地质的研究摇篮。中国最大的洞穴系——腾龙洞就位于清江,已勘测的长度为 39km,预计总长度可达 70km 以上,该洞目前世界性排位是第 25 位,如探完 70km,则进入世界排名前 20 名(目前美国的猛犸洞处于世界第一位,总长 530km,洞穴系统投影到地面占地面积约 150km²,探测了 100 余年)。在中上游地段有数座岩溶湖可供观赏,已开发的旅游洞就有 10 余个,如腾龙洞、玉龙洞、龙麟宫洞、落仙洞、黄金洞、神孔洞、海螺洞、巴王洞、青鱼洞、双龙洞、长生洞等。天柱山、武落钟离山、半峡被誉为清江三大风景点,以它独特的人文风情与自然风貌融为一体,又称为清江风光的三大支柱。平洛峡、巴山峡、半峡以其独特的雕塑造型成为长江大三峡旅游风光的卫星峡光风景区。清江风光与三峡、神农架、武当山并列为湖北四大名胜风景区。此外清江流域还有良好的气候条件,不仅有著名的火烧坪高山蔬菜基地,又非常适宜茶叶、柑橘的生长。以上统称清江流域的四大资源,即水利、矿产、旅游及气候资源等。

这样富饶美丽的清江人们称她为袖珍流域,意思是说她流域面积不大,但资源富饶,自然景色美丽,清江之美美在山,清江之清清在水,清江之奇奇在洞;又地处我国腹原之地,有着良好的开发条件。

清江水资源开发具有发电、航运、防洪、水产、旅游等综合效益,开发条件十分优越,80% 以上的水力资源集中在恩施市以下的干流河段。开发重点是清江干流恩施以下的三级开发方案,如图 1-1 所示。自下而上定为:

高坝洲水利枢纽(设计蓄水位 80m);
隔河岩水利枢纽(设计蓄水位 200m);
水布垭水利枢纽(设计蓄水位 400m);

现在,清江的开发形势很好,隔河岩、高坝洲工程已经竣工,水布垭工程已接近尾声,清江梯级滚动开发已接近完成。

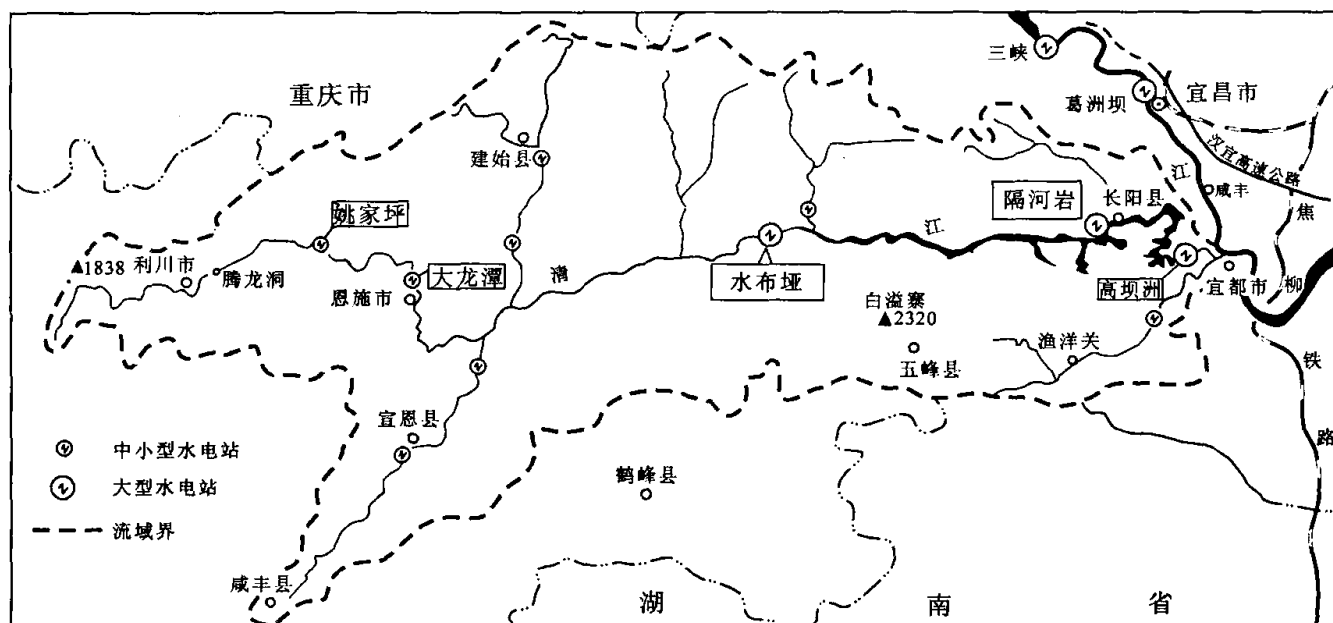


图 1-1 清江流域水利水电工程开发图

在清江水利水电开发的流域规划方面,除上述三个干流上的国家级工程外,对清江上游及 25 条支流也进行了规划。如清江干流上游河段还有姚家坪水电站(坝高 187m 的面板堆石坝,装机 200MW,拟建);大龙潭水电站(坝高 53m 的砼重力坝,装机 36MW,完建),该工程用了多年的时间解决了水库渗漏和坝址渗漏问题;忠建河上的龙洞水电站(完建);洞湾水电站;马水河上的晓溪口水电站;老渡口水电站(装机 80MW);黑碳河、白碳河两河流域联合开发的马渡河水电站(在建)及两河口水电站;招徕河的敝河溪水电站(完建);渔洋河上的香客岩水电站(已建)、熊渡水电站(已建)等等。此外,渔洋河上游柴埠溪旅游风景区拟建一个高 70m 的大坝水库。

从理论上讲,干流上电站的水资源是来自外围的支流,如果把支流的水在汇入干流前先利用一次,水电资源就可增加一倍,尽管这是理论值,但这些支流的电力开发大都成了清江流域各县市经济发展新的增长点。流域规划研究清江干支流共有大、中、小型 500 余座水电站,由此可见清江的水利水电事业是光辉灿烂的。

第二节 工程建设意义

水布垭水利枢纽是清江中下游干流三级梯级开发方案的最上一级工程,也是清江流域综合利用开发的龙头工程。它的主要任务是发电、防洪并兼顾其他。

1. 综合效益显著

(1)发电。水布垭水库正常蓄水位 400m,坝址汇流面积 10 860km²,相应库容 43.12 亿 m³;死水位 350m,调节库容 23.83 亿 m³,是一座具有多年调节性能的水库。水布垭电站保证出力 310MW,装机容量 1 840MW,多年平均年发电量 39.2 亿 kW·h,是湖北省和华中地区不可多得的调峰调频水电站。电站建成后可使下游隔河岩、高坝洲两个水电站增加保证出力 70MW,增加年发电量 2.37 亿 kW·h,三个梯级电站总保证出力为 628.8MW,总装机容量为 3 292MW,总年发电量为 80.95 亿 kW·h。由于隔河岩水电站具有年调节性能,水布垭电站具有多年调节性能,因此水布垭电站建成后,清江三个梯级水电站可在 2010—2015 年担负华中电网 7%~9%的调峰任务,成为华中电网清洁、可靠的调峰调频电源基地。本工程在仅考虑发电效益的条件下,其单独测算的上网电价低于电站投产发电时的目标电价;水布垭电站与隔河岩电站、高坝洲电站捆在一起测算的上网电价低于届时华中电网的平均上网电价,且具有较强的市场竞争能力。

水布垭电站建成后可以和系统中其他大型水电站进行补偿调节,可获得如下效益:①可使华中电网总弃水损失电量减少近 17 亿 kW·h,其中可减少三峡电站弃水损失电量约 12 亿 kW·h;②通过华中系统的水电群的联合调度及补偿调节,可增加清江梯级电站枯水期(12~3 月)的发电出力和发电量;③利用水布垭电站与三峡电站联合调度运行,减少三峡电站枯水期出力和下泄流量变化的速率,改善三峡枢纽下游的航运条件。

(2)防洪。水布垭水库最高洪水位(万年一遇)404m,防洪限制水位 391.8m,防洪库容 7.68 亿 m³,其中正常蓄水位 400m 至防洪限制水位之间的 5 亿 m³防洪库容是为长江荆江河段的防洪需要而设置的。

水布垭工程的防洪效益主要体现在两方面:其一,水布垭水库与隔河岩水库的联合调度可使清江下游的长阳县和宜都市的防洪标准提高到 20~50 年一遇;其二,水布垭工程建成后,梯级水库预留的 10 亿 m³防洪库容(其中,隔河岩水库已预留 5 亿 m³)可对荆江河段洪水进行控制,其作用是:①对清江洪水进行控制,有利于三峡水库的防洪控制运用;②可提高荆江河段的防洪标准;③三峡工程建成后,荆江地区发生百年一遇以上洪水时仍需分洪,此时水布垭水库预留 5 亿 m³防洪库容可推迟分洪时间,为抗洪抢险及生命财产转移赢得时间;④可减少城陵矶地区的分洪量和分洪损失;⑤三峡工程建成后,如遇 1998 年持续性洪水,虽可控制城陵矶莲花塘水位不超过 34.4m,沙市水位不超过 44.5m,但长江中下游水位仍然较高,清江梯级水库 10 亿 m³防洪库容发挥作用后,进一步减轻了中下游防洪的压力。

隔河岩工程自 1993 年建成发电以来,收到了巨大的经济和社会效益。隔河岩水库未建前,1969 年清江发生了百年一遇的洪水,长阳县城以及沿江两岸遭到了十分严重的洪水袭击,损失惨重;1997 年清江又发生了 150 年一遇的特大洪水,但由于隔河岩水库的调蓄,这一特大洪水平稳地通过长阳县城及其沿江河段,未造成任何损失。特别是 1998 年长江发生了流域性的持续大洪水,清江的洪水多次与长江干流洪峰相遇,由于对隔河岩水库调蓄的科学论证与调度使隔河岩水库超高 4m 蓄水,成功地使清江与长江干流洪峰错开通过荆江河段,避免了使用要承担重大损失的荆江分洪区。为此,湖北省特别嘉奖了隔河岩工程。如果整个流域梯级开发完成,在防洪方面将会发挥更大的作用。

(3)航运。水布垭水库形成后,干、支流深水河道长度约 200km,可促进库周地方航运及旅游事业的发展。

(4)其他。清江是湖北省四大旅游胜地之一。水布垭工程上游旅游资源丰富,较著名的风

景区有利川县的四季云海、鄂西林海、腾龙洞风景区、龙洞飞瀑、向月亭和都镇湾土家族发源地等,下游附近有半峡风光和盐池温泉等,加上水库的形成,大坝拦江形成高峡平湖,青山碧水相映,构成清江独特的自然景观。清江梯级水库建成后,水上交通给旅游带来便利条件,旅游事业发展的前景十分广阔。

水布垭水库正常蓄水位 400m 时,水面面积约 64km²。由于清江地处山区,库周无大的工矿企业废气污水的污染,清澈、优质的库水为发展水产养殖业提供了良好的条件。

2. 推进恩施地区的国民经济发展

恩施土家族、苗族自治州位于鄂西南,是湖北省最贫困落后的地区之一。恩施地区虽然矿产和优质土特产等资源丰富,但建国近 50 年来该地区的国民经济发展与湖北省其他地区相比,一直处于较落后的地位,其原因之一是,该地区除 318 国道通往宜昌和外省外,其他均为州、县级公路,交通十分不便(特别是冻雪季节);其二是没有一个能带动相关产业发展的大型工矿企业。因此,水布垭工程的建设,不仅在建设期能立杆见影地带动坝址区的经济发展,吸纳部分农村劳动力和下岗待业的职工,而且工程对外交通改扩建和新建的公路、码头也可部分改善附近地区的交通条件。工程建成后,可促进库区地方航运、旅游和水产养殖业的发展,此外,地方税收也为该地区的财政注入可观的收入。

3. 具备兴建的有利条件

(1)输电线路短。水布垭电站送电湖北和华中电网,从坝址到宜昌 500kV 变电站直线距离仅 140km。

(2)对外交通运输较方便。318 公路旁榔坪镇到坝址 30km 公路,改扩建部分地方公路段,即可满足工程对外交通运输的需要。

(3)水库淹没区搬迁人口相对较少。库区移民无需外迁,均可在本县(市)内安置,并且种植业安置移民人数达 95%以上。水库淹没区与工程所在地同属恩施州政府管辖区,有利于州政府统一领导和协调库区移民的安置工作,保证工程顺利地按计划建成。

(4)电站建成后上网电价低于华中电网平均上网电价,更低于目标电价,其电价不仅能为市场接受,且具竞争优势。

第三节 勘测设计过程

一、流域规划

长江水利委员会(以下简称长江委)从 1954 年开始对清江流域的综合利用与开发进行了研究,于 1964 年提出了《清江流域规划报告》。1986 年又在 1964 年规划的基础上,对清江流域水资源的综合利用规划进行了修改补充,提出了《清江流域规划补充报告》,推荐恩施以下清江干流最上一级以水布垭坝址为代表的三级梯级开发方案。1993 年底,长江水利委员会在上述两个报告的基础上,结合流域水资源开发的现状,对流域规划进行了补充修订,提出了《清江流域规划报告(1993 年修订)》。该报告于 1994 年 1 月通过审查,主要审查意见是:“同意报告根据水资源综合利用和防治水害的原则,结合地区开发利用的要求,确定该河段的开发任务为发电、防洪、航运和兼顾其他”,“同意报告推荐的该河段采用水布垭/半峡、隔河岩与高坝洲三级开发方案,并继兴建隔河岩和高坝洲水电站之后连续兴建水布垭/半峡水电站”,湖北省人民

政府以鄂政办发[1994]128号文批复“原则同意清江流域规划报告(1993年修订)审查意见”。

关于清江流域上游的规划,恩施自治州水电局于1992年提出《清江上游干流补充规划报告》,并经湖北省水利厅审查同意(鄂水电[93]490号)。此外,恩施自治州水电局先后于1990年和1993年提出清江主要支流马水河和忠建河的流域规划报告,也经湖北省水利厅审查同意(鄂水电[90]637号和鄂水电[1993]601号)。

二、预可行性研究

水布垭水利枢纽预可行性研究阶段的地质勘察工作于1993年正式开展,1993年底,电力部关于调整水电工程设计阶段的通知(电计[1993]567号)下达后,长江委按新的设计阶段划分,即按“增加预可行性研究阶段”,“将原可行性研究和初步设计两阶段合并,统称为可行性研究阶段”,并以《水利水电工程初步设计报告编制规程》(DL5021—93)为准编制可行性研究报告。

1994年3月4~5日在武汉市清江公司、长江水利委员会和咨询公司召开了第一次建设、设计、监理三方联席工作会议,就水布垭/半峡水利枢纽前期工作计划及监理等问题达成协议。

1994年3月,长江委提出《清江水布垭/半峡水利枢纽可行性研究渔峡口和招徕河水文站基本资料复核报告》和《清江水布垭/半峡水利枢纽可行性研究水文气象报告(中间成果)》,并于3月31~4月1日在武汉召开水文气象报告中间成果讨论会,会议形成了纪要(水规设[1994]0017号文)。

长江水源保护研究所于1994年3月提出《水布垭/半峡水利枢纽环境影响评价工作大纲》,7月7日由国家环保局主持进行了审查。

1994年10月长江委提出《湖北省清江水布垭水利枢纽预可行性研究报告》,同年底原水利水电规划设计总院会同湖北省计委在武汉主持召开审查会议,提出了审查意见。长江委根据审查意见提出补充报告,总院修改了部分审查意见后,电力工业部批复“同意该审查意见”(电水规[1995]254号文),审查同意初拟水布垭水利枢纽正常高水位400m和电站总装机容量1600MW的工程规模方案。

三、可行性研究坝址选择

在流域规划阶段,关于水布垭梯级的工程位置除以水布垭坝址为代表进行研究外,还研究过半峡坝址。半峡坝址位于长阳县,位于水布垭坝址下游约10km处。在编制预可行性研究报告的同时,开展了坝址比选专题的研究。由于两个坝址的坝高均高达230~240m,地质条件均较复杂,因此坝址比选的勘设工作一直受到电力工业部主管部门的高度重视,曾两次发文(水规设[1994]第0037号和电计[1994]397号)要求长江委认真做好选坝阶段的勘察设计工作,指出“水布垭(半峡)水利枢纽工程规模大,且工程地质条件复杂,无论是在水布垭建当地材料坝,还是在半峡建混凝土坝,其坝高均达240m左右,其所遇到的工程技术问题技术难度大,因此,须慎重对待”。“为优选出技术稳妥可靠、经济合理可行、工程效益好的坝址,对两个坝址的勘测设计及试验工作应达到同等深度,对重大的关键技术问题要有一定论证和初步结论,以便客观、慎重地进行两个坝址的比选”。

按照上述指示,长江委在坝址比选阶段进行了大量地质勘探和科学试验研究工作,先后就坝址比选的重大技术问题邀请了全国著名专家进行专题讨论。

1994年4月长江委提出《柳山河间地块岩溶渗漏地质专题论证报告》,5月24~30日由清

江公司主持召开了柳山河间地块岩溶渗漏地质勘测成果审查会。主要审查意见是：“长江委为查明河间地块渗漏问题，采用了多种手段，进行了一定数量的地勘、试验工作；对河间地块的地质结构及岩溶渗漏提出了较为清晰的格局，具备采取封堵措施的条件；对河间地块背斜西区地段提出的防渗封堵范围、初拟的防渗线路大致位置、初估的防渗封堵面积是合适的”。“鉴于本阶段地勘工作有限，建议对背斜东区地段的防渗还需予以注意。在选坝阶段框估工程量时留有一些余度”。

1994年8月，长江委对选坝报告的中间成果进行了审查，清江公司领导和咨询公司专家应邀参加。水利水电规划设计总院在听取咨询公司的汇报后，以水规设[1994]第0037号文，要求长江委在选坝报告中须重点补充研究8个问题。按照总院要求，长江委又补充了大量的勘测设计和科学试验工作。

1995年2月，由清江公司主持，召开了“湖北省清江水布垭/半峡水利枢纽选坝阶段地质专题技术讨论会”，历时11天，邀请全国地质、水工、施工和科研20位专家。专家组讨论的主要意见是：“地勘工作基本达到选坝阶段要求”，“水布垭、半峡两坝址分别具备修建高土石坝和高砼拱坝的工程地质条件”。“滑坡问题不影响水布垭坝址的成立”，“庙王沟碎石土料场及龙王冲风化页岩料在质量上和数量上都能基本满足水布垭高土石坝防渗墙的要求”。“同意1994年5月柳山河间地块岩溶渗漏地质勘探成果审查会专家组讨论意见”。

1995年6月10~12日，长江委对选坝报告进行了自审，邀请了清江水电总公司和咨询公司以及长江委技术委员会的专家参加。会后，根据自审意见和咨询公司专家意见又补充和修改了报告的部分内容，于1995年6月提出《湖北省清江水布垭水利枢纽可行性研究坝址选择报告》，约100万字，包括2本图册共65张图纸、地质专题报告、科学试验研究报告、工程文件、水布垭坝址近坝岸坡稳定及涌浪初步分析报告。

1995年9月18日至29日，电力工业部水电水利规划设计管理局会同湖北省计委在武汉市主持召开了《湖北清江水布垭水利枢纽可行性研究坝址选择报告》审查会议。参加会议的有20个单位的专家和代表共140余人。会议审查通过了《湖北省清江水布垭水利枢纽可行性研究坝址选择报告》，同意长江委推荐的水布垭坝址为选定坝址。同年11月和12月，电力工业部以电水规[1995]627号文、湖北省人民政府以鄂政函[1995]113号文批复“同意该审查意见”。

在可行性研究坝址选择阶段，地质上就水布垭、半峡两坝址的地质条件进行了较广泛的研究与论证，从环境地质、水库渗漏、坝址防渗、建坝岩体、成洞条件、天然建筑材料等方面对两坝址进行了分析与比较，并得出了“两个坝址均可建坝。水布垭坝址以建当地材料坝为宜，半峡坝址是建薄拱坝的好坝址。但从两坝址综合地质条件看，半峡坝址较好，水布垭坝址较差”的结论。并明确指出水布垭坝址的主要工程地质问题是环境地质问题、地下洞群中软岩的稳定问题、坝址防渗问题与心墙坝防渗料来自何方？在枢纽建筑布置方面水布垭坝址也没有半峡坝址那么明了简单，必将增加前期勘察工作的难度。但从发展地区经济、利用大型工程建设的契机改变鄂西“老、少、边、穷”地区的经济落后面貌及有利于工程早日顺利建成出发，最终推荐并选定了水布垭坝址。

四、可行性研究

选定水布垭坝址后，从1996年开始，按照《水利水电工程初步设计报告编制规程（DL5021—93）》，全面展开水布垭水利枢纽可行性研究的勘测设计和科研工作。对水布垭工

程可研报告编制的主要要求是:①水布垭工程坝高达 230m,地质条件复杂,心墙堆石坝和砼面板堆石坝两种坝型方案应做到同等深度;②在可研报告编制过程中需对 9 个重大技术问题提出专题报告;③由咨询公司对水布垭工程可研报告实行全过程的设计监理;④报告于 1998 年 9 月提交;⑤按照 ISO9001 标准实施质量保证。

1. 水文及地质勘察工作

(1)水文气象资料。清江流域内现有 7 个气象站,近 70 个雨量站和 8 个水文站。水布垭坝址上游 890m、下游 1 490m 处各设有 1 组水尺,于 1989 年 1 月开始观测水位。半峡坝址上游 3 610m、下游 340m 以及原招徕河水文站址于 1993 年 5 月各设置 1 组水尺。清江公司于 1994 年在半峡坝址下游设置了王家渡专用水文站,1996 年在水布垭坝址下游设立水布垭水文站,同时撤消王家渡水文站。

水布垭工程水文计算分析依据站是渔峡口水文站,位于坝址下游 17.5km,还有距坝址下游约 10km 的泗渡河支流上的招徕河水文站(距河口 2.5km,1984 年撤销)。坝址迳流和洪水计算依据站是渔峡口和招徕河水文站,降水是 40 余站的面上资料,气象分析依据站是长阳县气象站,泥沙初步分析依据站是恩施和长阳水文站。坝址迳流系列 30 年(1965—1994 年),洪水系列 33 年(1965—1997 年)。清江历史洪水野外调查 10 余次,调查河段 218 处,指认洪迹 1 100 余个。

预可研阶段对各坝址年月迳流、设计洪水、施工洪水、水位流量关系曲线、渔峡口站泥沙进行了分析计算,于 1994 年 3 月提出《水文气象报告(中间成果)》。水利水电规划设计总院于同年 3 月底主持讨论并形成会议纪要。长江委根据纪要作了补充工作,于 1994 年完成预可研阶段的水文分析工作。

可研阶段,除在预可研阶段水文资料基础上延长了迳流和洪水系列外,还对马水河、野三河两支流洪水水面线和“97.7”大洪水水面线及历史洪水水面线进行了调查测量。在水文分析方面,除根据延长的系列对坝址设计洪水、施工洪水,年、月迳流、泥沙和水位流量关系等方面的分析进行复核外,增加了入库洪水、可能最大洪水两个专题的分析研究和“97.7”洪水的调查分析。在大量调查、分析计算的基础上,长江委先后于 1997 年 5 月和 1998 年 3 月提出《可能最大洪水估算专题报告》和《清江中游“97.7”暴雨洪水调查分析报告》、《入库洪水专题报告》和《水文气象专题报告》,于同年 5 月由电力工业部水电水利规划设计管理局主持,审查通过了《水文气象专题报告》。

(2)地形地质资料。在预可研阶段以前,水布垭工程只有 1/10 000 地形图和工程地质测绘图,几乎没有钻孔和平洞勘探资料。从 1993 年预可研开始到 1998 年 8 月止,水布垭梯级工程共完成 1:5 000~1:10 000 比例的地形测量 117km²,1:1 000~1:2 000 比例的坝区地形图 30.63km²;1:5 000~1:10 000 比例的工程地质测绘图 1 046.17km²,1:1 000~1:2 000 比例的坝区工程地质图 44.52km²。完成地质勘探工作量有:机钻孔 470 个,总进尺 38 183.83m;勘探平洞 59 个,总进尺 9 133.26m;勘探竖井 8 个,总进尺 284.3m;手钻孔 195 个,总进尺 534.1m;坑槽探共挖方 19 547.2m³。完成坝址区岩石物理力学室内试验 954 组(其中水布垭坝址 943 组)、现场原位试验 90 组(其中水布垭坝址 39 组)。除上述之外,还进行了大量物理勘探工作和地质科研工作。

由于水布垭工程坝高 230m 左右,地质条件,特别是环境地质条件复杂(库首 3 个滑坡、坝区 3 个滑坡和高达 250~300m、岸剪裂隙发育的高陡岩坡),加上两种不同坝型,致使选定水布垭坝址(1995 年 10 月)后实际的勘探工作量较之部颁初设阶段勘探定额工作量和 1996 年 2

月清江公司与长江委签订的勘设合同中规定的勘探工作量增加甚多。

(3)其他资料。为了较准确地确定水库淹没实物指标,除用 1:10 000 地形图外,长江委还委托有关部门用红外遥感技术施测了水布垭库区 1:10 000 航空摄影照片。为了进行水库回水和泥沙淤积计算,以及入库设计洪水动库容调洪演算,先后两次对坝址以上干支流河道共进行了约 100 个大断面测量。

2. 设计工作

选定水布垭坝址后,可行性研究阶段的设计工作是按照勘设合同和建设、设计、监理三方协议以专题研究的方式层层深入展开的。长江委先后提交 16 项专题报告,250 万余字,图册 6 册共 165 张图纸。上述专题报告提交后,有的经过上级主管部门主持的审查、中间审查或讨论,有的由清江公司邀请国内有关专家进行讨论,有的经咨询公司进行设计监理后提出设计监理报告(共 18 份)。根据上述专题报告的审查、专家讨论和设计监理意见,长江委进行了大量修改和补充设计研究工作,在此基础上,按照初步设计报告编制规程(DL5021—93)内容与要求编制出可行性研究报告。

3. 科研工作

选定水布垭坝址后,为配合设计论证工作,针对工程特性和在水工、岩基、土工、材料等方面需要解决的重大技术问题,开展了大量科学试验和计算分析研究工作。长江科学院为设计科研共提出 18 份科学试验研究报告和 8 份计算分析研究报告。此外,长江委还委托清华、河海、武水等大学对心墙堆石坝和砼面板堆石坝、地下洞室群和马崖高边坡的稳定、应力变形分析等课题进行了研究。

清江公司对水布垭工程的前期设计工作十分重视,为配合和协助进行可行性研究,委托电力部水电水利规划设计管理局主持,组织清华、河海、武水等高等院校,中南、昆明、华东等勘测设计院、水利水电科学研究院,长江科学院等单位对 230m 级高土石坝的关键技术问题进行了科技攻关。清江公司还组织长江委、中南院和施工单位在现场进行心墙坝防渗料和砼面板坝堆石料的大型爆破和辗压试验。各单位就五个课题共提出 11 项报告,并经过电力工业部水规总院组织的专家组鉴定,其中有些研究成果获得了国内领先和国际先进的评价。这些研究成果大部分均被吸纳在水布垭工程可行性研究报告之中。

国家计委十分重视和支持水布垭工程项目,已将 200m 级高砼面板堆石坝列入国家“九五”攻关课题,并由电力部组织实施。

4. 技术合作

清江公司先后与加拿大 CIPM 公司、巴西 COPEL 公司进行国际技术合作和组织赴巴西考察砼面板堆石坝的成功经验。加拿大 CIPM 公司于 1993 年 12 月提交了水布垭工程的预可行性研究报告,巴西 COPEL 公司于 1997 年 12 月提交了对水布垭砼面板堆石坝的堆石料特性及砼面板堆石坝分区、接缝及止水材料和面板砼技术三个专题研究的技术咨询报告。此外,还邀请了世界著名的砼面板堆石坝专家库克、英里等人对水布垭砼面板堆石坝进行了技术咨询。

第四节 工程概况及主要工程地质问题

整个清江流域没有火成岩、变质岩和火山岩,全部为沉积岩,并且是软硬相间,岩体结构复杂,出现大量的不利地质结构的高边坡,剪切带问题相当普遍,石灰岩出露面积占流域面积的