

# 青海省水电站工程施工中预应力锚固技术的开发与应用

张光敏

(中国水利水电第四工程局 青海西宁 810006)

**摘要:** 在青海省的大型水电工程建设中,广泛开发应用预应力锚固技术,结合工程施工,在预应力锚固中的新技术探索、施工新工艺的开发、各种锚具的引进与制造等方面取得多项科技成果。这些技术成果的开发应用加快了工程进度,节省了投资,还提高了水利水电工程的科技含量,许多成果不仅在青海省龙羊峡、李家峡水电站等工程的建设 and 安全投产中产生了巨大的经济效益,也为丰富我国预应力锚固技术做出了积极贡献。

**关键词:** 预应力锚固 技术开发应用 水电工程 青海

## 1 引言

预应力技术已广泛应用于桥梁、高层建筑等领域。预应力施工技术中,已经有许多好的经验可供我们借鉴。而在青海省,主要应用在水利水电工程施工中不稳定岩体的锚固方面。本文就龙羊峡和李家峡工程中预应力锚固的应用作以简要介绍,期望为今后的预应力锚固施工提供参考。

龙羊峡水电工程建设,是在地形、地质条件十分复杂的情况下建成当时国内最高混凝土重力拱坝、最大单机容量水轮发电机组和最大库容的“三最”工程。从勘测、设计、施工、科研和机电设备及金属结构制造安装等都是依靠自己的力量完成的,这标志着我国水电建设施工技术水平已达到一个新的高度,为世界同行所瞩目。如:复杂地质情况下的地基处理和坝肩稳定加固技术、根据龙羊峡工程地质条件差及高边坡等情况研究开发《大吨位预应力岩体锚固体系施工技术》、《复杂地质条件下坝基处理及高边坡稳定加固施工技术》等一大批新技术、新材料、新工艺科研项目的积极开发研究和推广使用,达到了上世纪七十年代和八十年代的国际先进水平。

在李家峡水电站工程施工中,广大建设者们充分发挥聪明才智和创造精神,使预应力技术向水电建设中的更高水平上发展。如:岩体高边坡预应力快速锚固成套技术研究、岩质高边坡预应力锚固技术研究、高早强预应力锚索锚根胶结材

料与施工技术研究等,在水电技术中的坝工建筑、坝基处理等科学试验研究方面,均有所突破与提高,有些方面正在接近或已接近世界水平。

## 2 龙羊峡水电站工程中预应力技术

### 2.1 龙羊峡水电站底、深孔泄水道闸门铰支座大吨位预应力技术

龙羊峡水电站底、深孔泄水道闸门具有水头高,支座承受推力大的特点,底孔闸门承受的工作水头为100~127m时,承受的推力高达6420t,该推力均传至两侧混凝土闸墩上,由于推力大,已远超过普通钢筋混凝土所承受的能力,必须采用顶应力钢筋混凝土才能满足工程需要。施工中采用国际BBRV预锚体系原理,底孔、深孔支梁上备布置锚索10束,底孔两侧闸墩各布置锚索20束,共40束,深孔两侧闸墩各布置15束,共30束。这种锚固体系每束由84根 $\phi 7$ 的高强钢丝组成,要求锚束体加工精度高,工艺细,张拉设施完善,每束整体拉成。由于锚索体在加工前对各个环节都作了多次试验,且加工中认真注意质量,所以在现场张拉过程中,设计单位和施工单位研究决定每束锚固吨位由320t提高到350t。这种大幅度提高张拉吨位的结果,没有发现断丝等任何异常现象。通过实测资料分析工程质量良好,说明技术措施是正确的,闸墩受力状况符合设计要求,为大坝按期下闸蓄水和发电创造了条件,经济效益达300万元。项目获能源部电力科

技进步四等奖。

## 2.2 大吨位高标号预应力混凝土大梁的研制及其在龙羊峡水电站主厂房屋盖顶的应用

龙羊峡水电站主厂房布置在主坝下游约70m处, 厂房全长95.5m, 跨度24.5m, 高61.28m, 机组中心距23m, 厂房内安装4台320MW水轮发电机组。主厂房顶盖原设计为现场浇筑混凝土方案, 承重模板外支撑钢材用量大, 施工复杂, 上下层施工安全得不到保证。为了缩短主厂房施工工期, 设计、施工单位共同进行方案比较, 最终选用预应力大梁与现场浇筑混凝土的综合方案。该方案便于施工, 又减少钢材用量, 解决了厂房内机组安装和厂房土建施工干扰的问题, 据统计节约钢材数百吨, 提前工期2~3个月, 为确保龙羊峡水电站机组安装和两台机组1987年发电创造了条件, 经济效益达190万元。该成果应用预应力技术的特点和优势, 设计采用的混凝土标号高, 梁体尺寸断面小, 跨度大, 并布置了吨位大、锚固先进的预应力钢绞线锚索, 通过施加预应力, 使大梁造成人为的应力状态, 由它所产生的预应力抵消厂房顶外部荷载所产生的应力, 提高了梁的承载能力和抗裂能力。施工关键是500#混凝土大梁浇筑, 外部强制振捣和蒸气养护, 钢索孔预留及锚索张拉工艺, 大梁的吊装和运输等。项目于1989年奖青海省科委, 青海省科技成果。

## 2.3 龙羊峡水电站高边坡大吨位群锚施工技术

龙羊峡水电站坝址区由于断裂发育, 地质构造纵横交错, 是国内乃至世界地质情况最复杂的大型水电工程之一。\*

由于高边坡岩体的断层多, 加上坝肩山体比较单薄, 水库蓄水后地下水位抬高, 可能受到强地震、拱坝推力作用等因素的影响, 致使两岸高边坡和局部岩体有可能发生失稳, 以至严重影响大坝的安全运行。为此经多方论证和研究, 在电站高边坡的处理上, 除了采用混凝土置换、传力洞、抗剪洞、锚拉洞、锚杆及混凝土护坡外, 大量采用了大吨位预应力群锚技术进行边坡稳固, 锚固吨位从200t级至600t级, 主要是300t级, 最大孔深70m, 总锚固达350多万t m, 近300个锚固孔。实践证明, 这些锚固措施是合理的, 成功

的。是当时世界上最先进的施工技术成果, 其中有两项锚固技术获省部级科技成果奖, 填补了我国水电行业大面积大吨位预应力锚固技术的空白。

目前, 电站已安全蓄水和运行了10个年头, 大坝和边坡之所以如此安全稳定, 这与在高边坡稳固中采用大吨位预应力群锚施工技术分不开。大吨位群锚技术的成功运用, 也为此后我国从事高坝高边坡岩锚施工技术积累了宝贵的施工经验。1989年获能源部、青海省电力科技进步四等奖、省级科技成果奖。

## 2.4 YM114孔及岩锚预应力损失试验研究

通过对龙羊峡左岸YM114及其它岩锚孔多项内容大量的试验、分析、研究, 优化施工工艺, 完善监测技术, 使岩锚工程技术在理论上得以提高。在混凝土墩设置X82150反力计监测吨位, 在YM114等孔上孔口喇叭管部位每根钢绞线上粘贴应变片, 监测钢绞线张拉过程相互影响的规律。利用YM114自由段开挖的小导洞使部分钢绞线暴露的有利条件, 在其位置布设两个观测断面, 以研究钢绞线沿纵向应力分布。分别在锚根段设置5个观测断面, 各设4只小应变计, 以分析锚根应力分布等等。通过这次大规模的科研试验和分析发现:

①钢绞线与钢筋的力学性能不尽相同, 它表现出塑性变形, 所以目前利用钢绞线相对伸长值计算有效吨位的方法不尽合理。\*

②肯定了监测仪器的可靠性。

③锁定环节是导致损失的最主要因素。

④瞬时损失远大于长期损失……。

上述研究对锚束应力分布和应力损失及锚固荷载对孔口周围岩石变形的影响进行了定性或定量的分析研究。优化了锚根长度、完善修订了岩锚施工工艺及其验收的标准, 探讨了预应力锚束多方面存在应力损失的规律, 为我国预应力岩锚锚固机理、尤其是应力损失研究做出了贡献。

## 3 李家峡水利枢纽工程中的预应力锚固技术

李家峡水电站枢纽工程坝址区位于祁连地槽褶皱系的祁连中间隆起部带南侧, 岩性系由前震旦系黑云母更长质条带状混合岩、黑云母角闪斜长

片岩相间组成,基岩裸露,片理清晰,构造发育。水电站左岸坝肩山体单薄,岩体破碎,构造发育,有 $f_{18}$ 、 $f_{20}$ 、 $f_{24}$ 断层族从河床坝基到左岸坝肩约180m高差范围分布,且均为坝基岩面近似平行,对左坝肩的抗滑稳定、变形稳定及渗漏稳定有较大影响。按正常蓄水位▽2180m库水位对拱肩的推力加正常温升时拱坝对拱肩的推力考虑,左坝肩 $f_{20}$ 上盘岩体有上抬的迹象,对拱坝受力极其不利。

### 3.1 李家峡水电站左岸重力墩特大吨位锚索

1998年根据李家峡水电站坝址地质条件,坝肩和两岸边坡抗滑稳定安全储备不高,尚需进行补强加固处理的要求,决定采用大吨位锚索进行加固处理。锚索吨位分别为6000kN、8000kN、10000kN,孔深在80~100m之间,其中10000kN及8000kN 100m孔深在国内尚属首次。

在锚索大面积施工前,为给设计提供可靠的设计资料及对施工的可行性进行探讨,进行了生产性试验,研究了其关键工艺、工序及材料的施工质量控制方法,解决了特大吨位预应力锚索超长、穿束难度大、地下水中注浆等问题。此次试验的显著特点是:孔径大、精度高、孔深、成孔速度快、应力损失率较低。永存应力损失率较低,其主要原因是与承压混凝土座落在重力墩大体积混凝土上有直接关系(重力墩混凝土标号较高,比较软弱岩石松弛变形小)。另外,在整体张拉前,采用QE型200kN千斤顶,进行单根钢绞线预拉准确;整体张拉时,加荷和持荷时间控制严格,各工序综合误差较小,这也是永存力值损失率较低的一个重要因素。同时,还说明6000kN、8000kN、10000kN预应力锚固稳定,效果良好。

目前,该项研究成果已在李家峡电站重力墩进行大规模的锚索施工中运用。

### 3.2 岩质高边坡预应力锚固技术研究

岩质高边坡预应力锚固技术研究是“八五”国家重点科技攻关项目之一。由电力工业部西北勘测设计研究院主持项目的全面设计与施工,由中国水利水电第四工程局依托青海李家峡水电站承担项目的实施和分子题的攻关、开发、研究工作。该项目采用大规模系统现场原型测试试验、

室内模型试验和理论计算分析研究等手段,进行攻关研究工作。该专题研究和实施取得了提前三个月完成李家峡双曲拱坝的基础和两岸坝肩边坡开挖工期的直接经济效益,确保了边坡开挖的安全施工,保证了高达165m的双曲拱坝永久运行期的安全。在快速锚固技术与施工方面,在层状岩质高边坡施工合理顺序及综合加固处理方面,在边坡安全监测布置和实测等方面都进行了全面的研究和探讨,使高坝建设中的岩质高边坡关键技术研究提高到一个新的水平。该项目获原电力工业部科技司1997年度科技进步二等奖。\*

项目中《预应力群锚机理研究》,结合李家峡水电站左岸泄水道典型的切(横)向坡楔体滑移边坡,在国内外首次进行大规模系统的群锚机理和效应的测试试验,对预锚参数的优化和设计、施工提出了很多新概念、新方法,丰富了岩质边坡工程的理论和实践;《岩体高边坡预应力快速锚固成套技术研究》、《高早强预应力锚索锚根胶结材料与施工技术研究》等专题的研究,在材料配方、锚头、锚墩头及新的技术工艺等方面均有所突破,其技术经济价值显著。

### 3.3 60t高强预应力锚杆群锚施工技术

利用高强精轧螺纹钢筋作为预应力受拉体,给所要施加预应力的岩体及其它受力体群体施加预应力,是一种简捷、快速、轻便、灵活的预应力施工的理想材料。施工工艺一般是在岩体内部制作机械式或胶结式锚头作为一个固定受力端,在表层另制作一个刚性较好的变化受力端,在变化受力端给锚杆施加一定的拉力并设法使施加的拉力尽可能多地存留在杆体内。制作内、外锚头及锚杆材料的选择,施加拉应力和极限应力的比值的选用,为60t级预应力锚杆设计、施工的技术关键。

李家峡水电站60t级预应力锚杆设计要求内锚头灌注 $R_{28}500$  # 砂浆,外锚头为 $R_{28}300$  # 混凝土外墩,施工完毕后杆体永存吨位50~52t。实际施工中利用各种先进技术使上述指标分别达到:内锚头有压灌注 $R_{500}$  # 水泥浆(该水泥浆的收缩性小于 $R_{28}500$  # 水泥砂浆),外锚头利用早强型钢筋混凝土制作,相对减少了素混凝土受力时侧面开裂,利用超张拉工艺使永存吨位最高达

58t, 最低54t, 充分发挥了材料的性能。

通过该项目的研究和在李家峡工程上的大面积应用, 目前该项技术已完全成熟, 整体效果十分理想, 且具有施工工期短, 使用机具简便, 受环境因素、生产条件影响小等特点。1997年获青海省科委科技成果证书。

#### 4 小结

根据我国经济发展的需要, 在今后的若干年中基础设施建设必将起到举足轻重的作用, 在许多工程建设中都会涉及到预应力锚固, 而总结预应力锚固技术, 必将提高工程质量, 缩短工期, 节约投资, 产生良好的经济效益和社会效益。

预应力锚固的施工工艺含有较高专业性和技术含量, 而且具有一定的隐蔽性。要在地质条件复杂的高海拔、高寒地区实施该项技术, 从机理研究、试验、观测、施工等都是有一定难度的, 同时也是一次对新技术应用的大胆尝试。该技术

在青海的大型水电工程建设中广泛应用, 尤其是李家峡10000kN特大吨位预应力锚固的应用在国内尚属首例, 不但填补了我国在这方面的空白, 而且为我国在高坝高边坡锚固施工中积累了宝贵的施工经验。另外, 在开发应用预应力锚固技术中, 对各种锚具及其它附件的引进、研究与制造等方面也进行了大量的工作, 特别是与国内最知名的锚具开发生产厂——原柳州市建筑机械总厂(现为柳州欧维姆机械股份有限公司)进行了多次合作。2001年4月欧维姆公司的技术人员, 在青海省多家科研和施工单位进行技术交流活动, 对国内外预应力锚固技术的现状和发展、新型锚具的开发生产及前景进行了广泛交流与探讨。双方均有意向, 表示要加强在高海拔、高寒地区环境下预应力锚具的开发研究与应用等方面进行交流与合作, 共同来提高和完善我国预应力锚固技术。

(上接第30页)

固段注浆体的应力集中, 由于各受力筋自由段的长度不等, 引出了许多固有缺点:

(1) 长期工作状态下同根锚索各受力筋拉应力不相等, 当岩体位移较大时, 自由段短的钢绞线将首先断裂, 形成受力筋各个击破的恶性结果;

(2) 调整锚索的拉力时钢绞线受伤加重。要调整锚索的拉力不能用垫片法或螺纹法整体调整自由段的长度, 只能把钢绞线一根一根从锚板中拔出, 更换夹片夹持钢绞线的位置, 必然使钢绞线重复咬合, 加深刻痕;

(3) 施工操作繁琐。同根锚索钢绞线长度不等, 锚索组装完, 张拉端的每根钢绞线还必须有表示长短的牢固标记, 张拉时还必须按照钢绞线的长短依照预先设计的张拉顺序和张拉力进行张拉。

#### 6 结语

所谓锚索的永久性只能是一个相对概念, 不能理解为永远不坏。按哲学观点, 任何事物都有一个产生、发展和消亡的过程, 不可能存在永远不坏的东西。作为岩土加固手段的锚索, 没有理由要求它永远不坏, 要求了也做不到, 何况任何建筑物也都存在有效使用年限的限制。究竟锚索

的有效使用期多少年才是永久性锚索, 我们既不同意永远不坏, 也不同意某锚索规程<sup>[6]</sup>简单地以两年为界“设计使用期超过24个月的就是永久性锚索”的观点。我们认为, 只要锚索与用其加固的结构物同龄就是永久性锚索。实事求是地讲, 锚索毕竟是一项才出现几十年的年轻技术, 对它的认识也在不断深化, 目前只能根据我们的认识, 把锚索可能遭到的危害加以防范, 尽量做到在它的有效服务期内不坏。

#### 参考文献

- [1] J·C库斯里. 腐蚀原理[M]. 李启中. 第二版. 北京: 水利电力出版社, 1984
- [2] 梁炯望. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999 68-71
- [3] A·A·斯塔谢尔斯基. 钢筋的电腐蚀[M]. 北京: 冶金建筑研究总院情报室, 1983
- [4] N·N瓦西连科. 钢的应力腐蚀开裂[M]. 陈石卿. 北京: 国防工业出版社, 1983
- [5] 高大水. 岩土预应力锚索腐蚀与防腐[J]. 岩土锚固工程, 2003(1)
- [6] 中冶集团建筑研究总院. 岩土锚杆(索)技术规程[M]. 北京: 中国计划出版社, 2005
- [7] 刘玉堂, 翟金明. 常用预应力锚索的结构和特点[J]. 防护工程, 2005, 27(3): 47-57
- [8] 章建庆. 缓粘结预应力筋的研制和应用[J]. 欧维姆预应力技术, 2003(1)