

# 锦屏一级水电站大坝左岸高边坡安全开挖技术

乔介平<sup>1</sup>, 殷本林<sup>2</sup>

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 2 中国水利水电第七工程局有限公司 第二分局, 四川 成都 611730)

**摘要:** 锦屏一级水电站复杂高陡边坡开挖施工期的安全稳定是水电工程界罕见的世界级难题。创新地采取了结构面(断层)置换锚固、控制性分级开挖支护和分级预警等动态施工技术, 有效地解决了复杂高陡边坡工程开挖期的安全稳定问题。

**关键词:** 高边坡; 稳定控制; 复杂地质条件; 安全开挖技术; 锦屏一级水电站

**中图分类号:** TV52; TV7; TV57

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2013)01-0029-07

## 1 概述

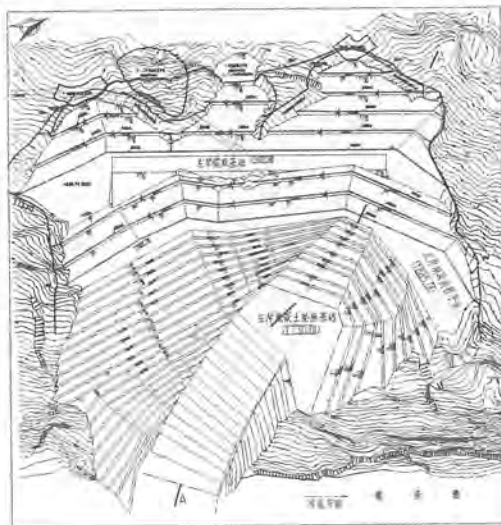
锦屏一级水电站大坝左岸复杂的地质条件给边坡开挖带来了前所未有的难度和挑战, 其地质条件之复杂、锚固工程规模之大、复杂程度之高为国内外水电工程所罕见。锦屏一级水电站大坝左岸边坡岩体受地质构造作用影响强烈, 岩体内断层、层间挤压错动带、节理裂隙发育, 左坝肩及抗力体范围内发育有  $f_5$ 、 $f_8$ 、 $f_{42}$ , 断层及煌斑岩脉、深部裂缝。如何保证边坡开挖施工期的安全稳定问题是工程面临的重大难题之一。

从分析施工期影响边坡稳定因素入手, 制定了边坡稳定控制对策, 创新地采取了结构面断层置换锚固、控制性分级开挖支护和分级预警等动

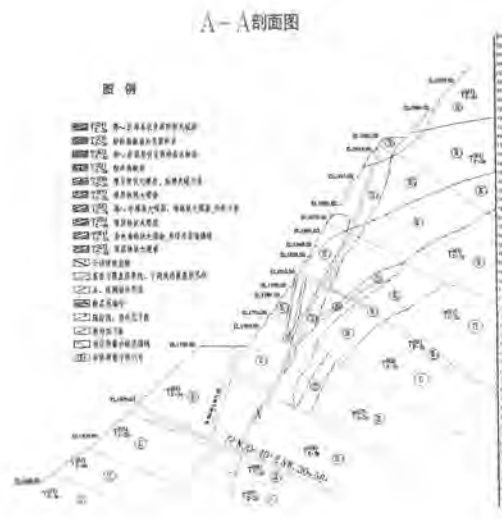
态施工技术, 有效地解决了复杂地质条件下高陡边坡开挖安全稳定问题。所取得的技术成果和经验, 可为国内类似高拱坝施工提供借鉴和指导。

## 2 工程基本情况

锦屏一级水电站拱坝坝高 305 m, 为世界第一高拱坝, 坝址区为典型的深切河谷, 左岸坝肩自然边坡坡高超过 1 000 m, 开挖后坝肩从 2 120 m 高程至 1 580 m 高程形成 540 m 的高边坡, 开挖方量达 550 万  $m^3$ 。左岸开挖边坡的岩性主要为大理岩, 该边坡断层、裂缝发育, 地质条件复杂, 是目前水电工程开挖高度最高、规模最大、稳定条件最差的边坡之一。大坝左岸边坡开挖设计情况见图 1。



左岸边坡开挖平面布置图



左岸边坡剖面图

图1 锦屏一级水电站左岸边坡开挖设计图

### 2.1 地貌与岩性特征

左岸坝肩及高程1885 m以上的边坡为典型的反向坡,岩层走向与谷坡走向基本一致,倾向坡里。高程1800 m以上由砂板岩组成;高程1800 m以下由大理岩组成。在微地貌上,高程1750 m以上梁沟相间,Ⅱ、Ⅴ勘探线为相对突出的山梁,其间为槽谷状地形。

### 2.2 主要结构面工程地质特征

左岸坝肩及高程1885 m以上边坡岩体中发育的断层有 $f_5$ 、 $f_8$ 、 $f_{42-9}$ 等,这些结构面延伸长度大,具有一定宽度的破碎带和影响带,带内物质力学性质差,往往构成控制边坡变形和滑动破坏的边界。左岸边坡开挖揭露的主要结构面见图2。对锦屏一级水电站大坝左岸高边坡影响最大的主要断层和结构面有:

(1)  $f_5$  断层:贯穿分布于左坝肩岩体内,在砂板岩中破碎带宽度一般为4~8 m;在大理岩中,破碎带一般宽1~3 m,沿断面局部有2~3 cm的

断层泥。

(2)  $f_8$  断层:位于 $f_5$  断层外侧,基本平行 $f_5$  断层延伸,由构造角砾岩、糜棱岩、断层泥组成。在砂板岩中, $f_5$ 、 $f_8$  断层之间形成了宽10~20 m的破碎带和影响带,构成了控制左岸坝肩边坡岩体变形拉裂和可能失稳破坏的重要切割边界。

(3)  $f_{42-9}$  断层:产状近EW S $\angle$ 40°~60°,该方向断层集中发育在砂板岩中,成组出现,其中 $f_{42-9}$  断层规模相对较大,破碎带宽度一般为20~40 cm,局部可达100 cm,主要由散体结构的岩屑、角砾及泥质物质组成。该组断层倾向上游偏坡外,构成了控制坡体变形失稳的主要地质边界。

(4) 煌斑岩脉(X):一般宽约2~3 m,产状N60°~80°E SE $\angle$ 70°~80°。在构造改变过程中与围岩接触面多发育成小断层,因此,陡倾坡外的煌斑岩脉构成了控制边坡变形稳定的重要地质边界。

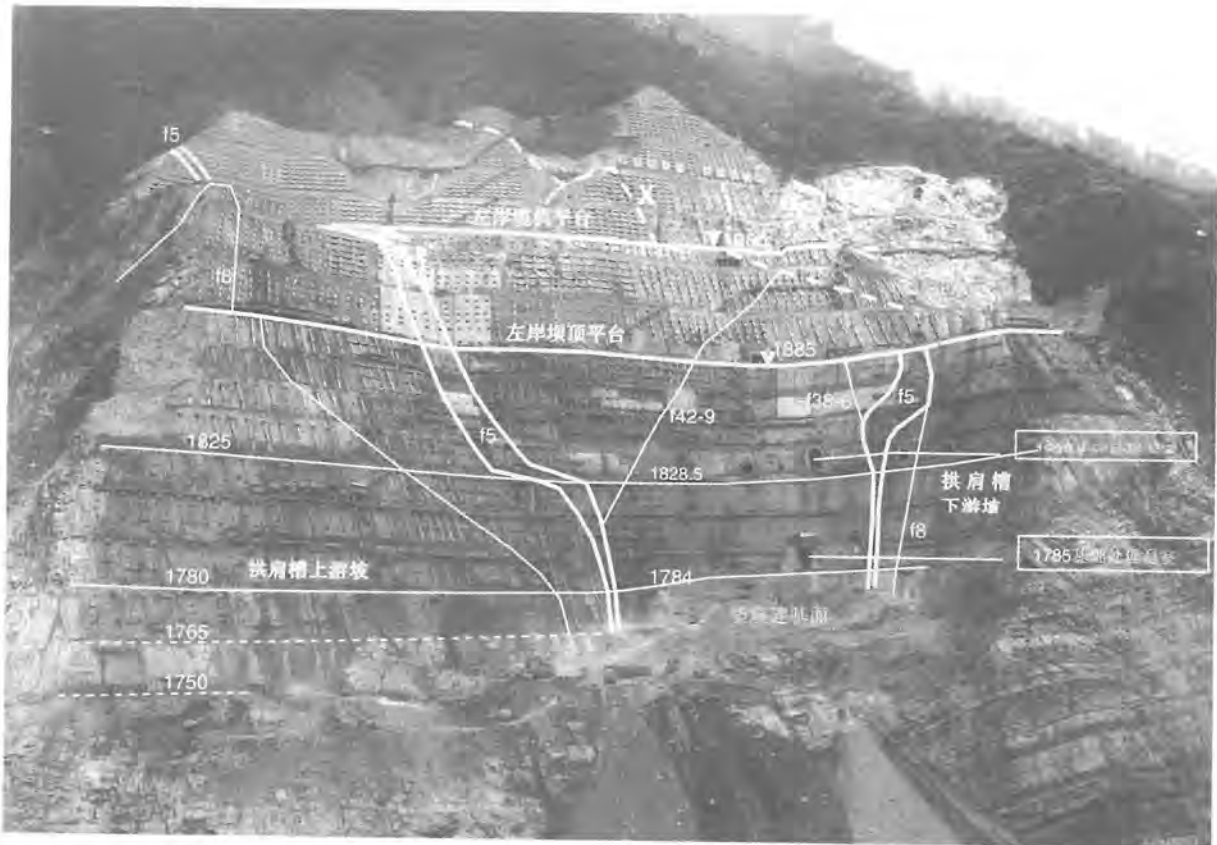


图2 左岸边坡开挖揭露的主要结构面示意图

### 3 对影响工程安全稳定的关键因素进行分析

(1) 通过地质评价并采用多种方法进行分析论证后认为:左岸坝肩天然边坡是基本稳定的;

(2) 对左岸边坡整体稳定性起控制作用的主要结构面为 $f_5$ 、 $f_8$ 、 $f_{42-9}$  断层、X 煌斑岩脉及深部裂缝等特定结构面。上述结构面空间组合可形成多

种滑移模式,其中拱肩槽开挖后出露的 $f_{42-9}$ 断层是控制左岸拱肩槽开挖边坡整体稳定性的关键因素。

(3) 对施工期的稳定性分析结果表明:左岸边坡在高程2110 m至1885 m的开挖阶段,为边坡减载的过程,边坡稳定性有一定提高。在高程1885 m至以下的开挖阶段,由于潜在滑体前沿剪出口的阻滑区岩体被挖除,开挖边坡的稳定性明显降低。最终经采用综合加固措施,即锚索+锚固洞+抗剪洞+随机锚杆的加固处理,提高了边坡的稳定性,达到了设计要求。

(4) 左岸高程1960 m以上边坡为倾倒变形岩体。受倾倒变形岩体的影响,该区域已经形成了由陡倾拉裂面构成的后缘面,稳定控制模式为剪断倾倒破坏岩体的滑动破坏。

(5) 根据边坡开挖施工动态反馈分析成果得知,当边坡开挖至高程1885 m时,高程1885 m平台岩体在开挖卸载作用下向临空面卸荷回弹,高程1885 m上部岩体沿已有的断层、岩脉以及多条深部裂缝产生松弛或张开并产生往下的剪切滑移变形。由于开挖边坡高度较高,岩体开挖卸荷作用较强烈,卸荷范围较大,需重点对 $f_{42-9}$ 断层的加固方案和时机进行重点研究。

(6) 潜在失稳块体组合多,潜在滑出面密集,分布平面和高程范围大,在空间上具有很强的复杂性。从开挖过程稳定性分析成果可以看出,锦屏一级水电站大坝左岸边坡开挖过程中潜在失稳的块体主要分布在高程1750 m以上,以潜在滑出面密集,基本覆盖了高程1750 m以上的整个边坡。

(7) 随着开挖的不断进行,潜在失稳块体不断变化,呈现出随开挖时间的动态变化。随着开挖和支护措施的不断进行,最危险局部块体逐渐变化,从最初的最危险块体 $f_8+$ 层面到开挖至高程1885 m时的 $f_5+$ 层面,最后到开挖支护完成时的 $f_5+f_8+$ 层面组合危险块体。可以说,局部块体稳定性问题在不断地变化,因此,要特别注意对可能出现的边坡局部稳定性问题进行及时处理。

(8) 降雨对边坡稳定的影响比较明显。在降雨入渗的作用下,边坡内部的孔隙水压力增大,同时断层结构面抗剪强度降低,造成局部块体的稳

定性显著下降。特别是在暴雨工况下,边坡的安全系数下降非常迅速。

#### 4 对边坡开挖稳定控制采取的施工对策

从锦屏一级水电站左岸边坡的工程地质条件、可能变形的失稳模式和施工期稳定性分析成果可以看出:左岸高边坡的稳定性问题复杂,潜在失稳块体分布多且影响范围广,随着开挖施工的进行,潜在失稳块体不断变化。

(1) 通过勘探及施工开挖揭露以及稳定分析成果得知:左岸坝肩边坡的可能失稳模式主要是由煌斑岩脉、 $f_{42-9}$ 断层、 $SL_{44-1}$ 深部裂隙等边界组成的控制性“大块体”整体滑动问题; $f_{42-9}$ 、 $SL_{44-1}$ 上盘岩体内与其平行的其它结构面形成相对较小的块体的局部滑动问题以及由随机裂隙组成的“小块体”滑动问题。根据岩体失稳的不同特征和分析成果,在 $f_{42-9}$ 断层上设置了抗剪洞以增加抗滑力,以系统锚杆和锚索为主对局部结构面组合的小型块体进行加固。

(2) 为了保证开挖开口线以上的边坡稳定和开口线以下边坡的施工安全,先安排进行开口线以外的边坡处理和加固施工,采取清除危石、挖前锚喷、浆砌石挡护、钢栏、柔性防护网(如钢丝网)等处理措施。

(3) 针对锦屏一级水电站左岸边坡工程的地质条件、边坡稳定性及加固措施要求,借鉴和吸取国内外类似工程的成功施工经验,形成了一套本工程切实可行的各类边坡开挖支护的施工程序和相应的施工措施。

对于高边坡的开挖支护施工,严格控制开挖爆破,加强支护措施,尤其是对边坡开口线下部的3~4层台阶的开挖支护施工。

对于大坝坝肩及缆机平台边坡的开挖及支护,施工单位采用“随机支护→锚索→系统锚喷支护”的施工顺序,各层的开挖支护应遵循:首先,将每层工作面出现的危石及时清除干净,并配置性能好、效率高的钻锚设备,对不稳定岩体采用蹬渣作业进行随机支护;其次,在每层梯段出渣完成后,优先安排工作面锚索施工,施工预案可以考虑滞后开挖面一个梯段;最后进行系统支护,预案可考虑滞后开挖面两个梯段。

(4) 鉴于爆破能量、结构的响应程度对爆破的振动标准都会产生影响,且爆破振动在一定的



高程范围存在放大效应,因此,有必要开展现场爆破试验,制定合理的爆破振动控制标准和爆破振动控制措施。

(5) 加强边坡工程施工期的安全监测工作,同时,应重视施工期工作面的巡视检查(特别是在雨季施工),尤其是对左岸坝肩  $f_{42-9}$  的安全监测工作,以便及早发现边坡开挖施工中的安全隐患并及时进行加固处理。开展施工期的爆破振动跟踪监测工作,及时反馈信息,优化调整爆破设计。

## 5 复杂地质条件下的边坡开挖动态施工技术

### 5.1 结构面(断层)置换锚固

(1) 主要结构面  $f_{42-9}$  断层的置换锚固。

$f_{42-9}$  断层的加固措施为抗剪洞置换加固。顺  $f_{42-9}$  走向布置抗剪洞,对  $f_{42-9}$  断层进行置换处理,增加结构面的抗剪作用。抗剪洞布置在高程 1 883 m、1 860 m 及 1 834 m 三个高程,均采用 9 m × 10 m 的断面。抗剪洞及键槽周围设置一定深度的固结灌浆(图 3)。

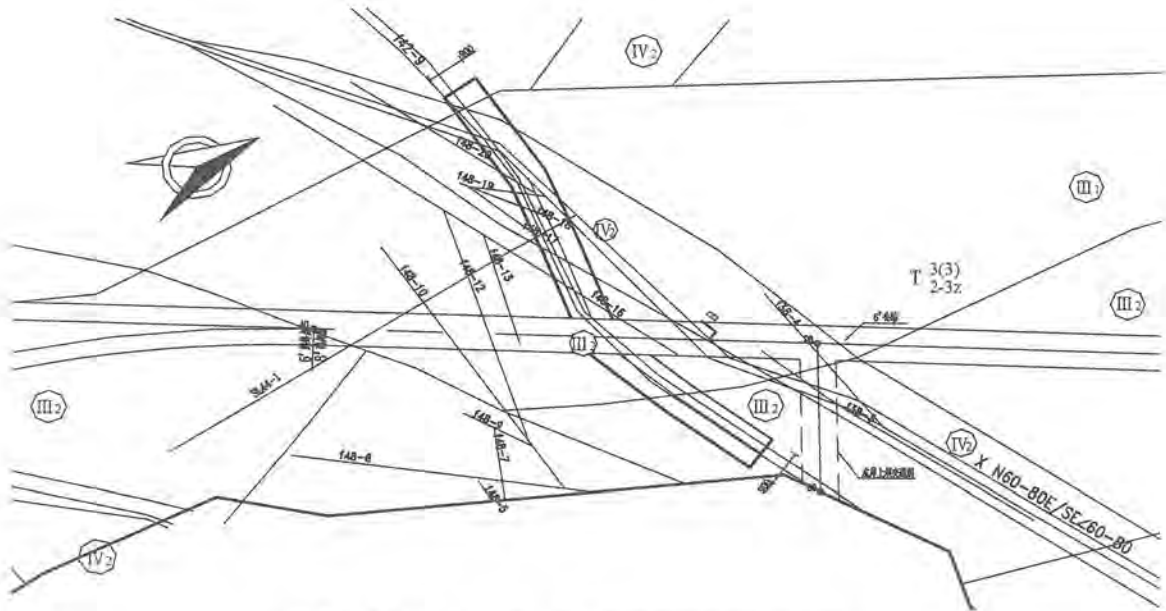


图3 1 883 m 高程  $f_{42-9}$  断层抗剪洞平面布置示意图

(2) 主要结构面  $f_5$  断层的置换锚固。

左岸垫座后坡的  $f_5$  断层位于永久边坡相交面,对其采取开挖、支护、混凝土回填和灌浆方式进行处理,处理高程范围为 1 885 ~ 1 850 m,处理宽度 3 ~ 10 m,深 5 ~ 8 m 垫座后坡  $f_5$  断层置换情况见图 4。

(3) 主要结构面  $f_2$  断层的置换锚固。

大坝左岸建基面  $f_2$  断层及挤压带处理范围位于左岸拱肩槽。处理方式采用开挖刻槽、混凝土置换,处理高程范围为 1 647 ~ 1 686.37 m,开挖刻槽宽度为 13.5 ~ 16 m。

(4) 结构面(断层)处理效果。

结合边坡开挖过程中断层处理的实际进展情况,在边坡开挖至 1 885 m 高程时,对左岸边坡的整体稳定性及时进行了数值模拟分析,对主要边坡稳定性进行了复核,对所完成的主要结构面

(断层)置换锚固后边坡开挖过程中的稳定性状况进行了反馈分析。

经计算,对结构面(断层)采取置换锚固处理后,大坝左岸边坡块体的稳定性计算结果见表 1。

表 1 断层置换和加固后边坡块体稳定性计算结果表

滑块	加固前安全系数	加固后安全系数
滑动模式 1	1.032	2.103
滑动模式 2	0.986	2.312

### 5.2 控制性分级开挖支护

#### 5.2.1 开挖及支护程序

(1) 边坡开挖支护的总体程序。

场地清理→边坡开挖→坡面清理→地质编录→坡面锚喷支护→坡面排水孔。开挖边坡的支护在分层开挖中逐层进行。

(2) 开挖分层高度控制。

大坝左岸边坡高程 1 885 ~ 1 730 m 区间每层开挖高度为 7.5 m, 高程 1 730 m 以下边坡开挖

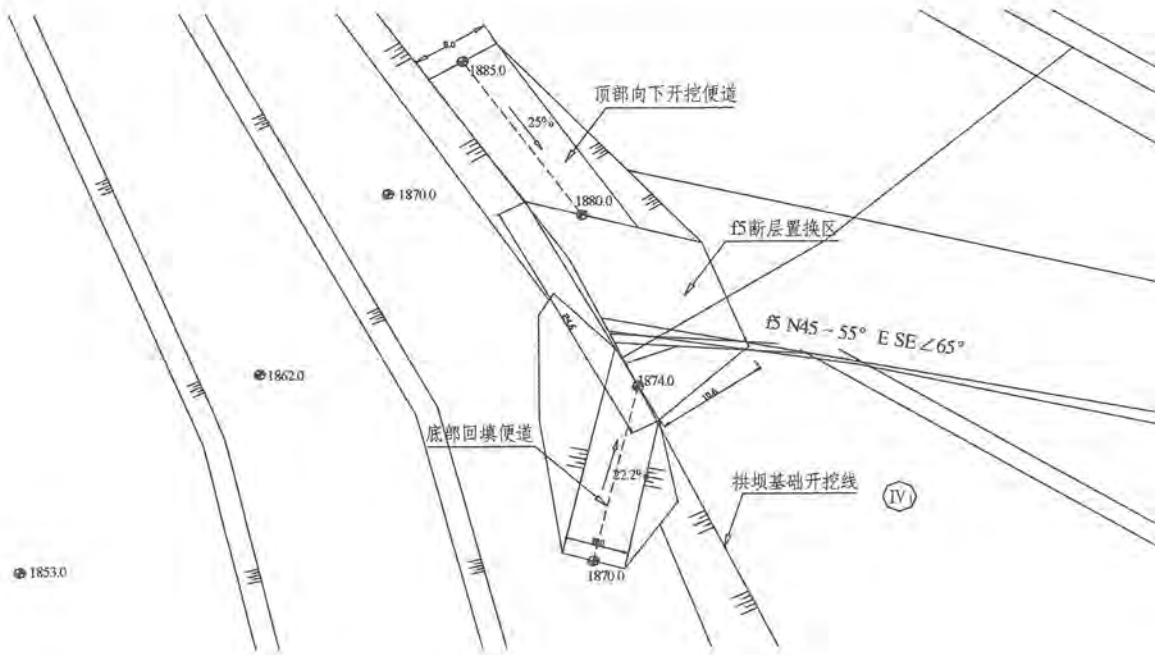


图 4 左岸垫座后坡 f<sub>5</sub> 断层置换平面位置图

表 2 左岸边坡开挖锚索支护与开挖高程对应关系表

开挖步	开挖高程	锚索大面支护高程	开挖与锚索大面支护相对高差 /m		
			I 区	II 区	III 区
1	左岸边坡开挖至 1 855 m	I 区支护至 1 915 m, II 区支护至 1 915 m, III 区支护至 1 885 m	30	30	30
2	I 区开挖至 1 795 m, II、III 区开挖至 1 810 m	I 区支护至 1 825 m, II 区支护至 1 825 m, III 区支护至 1 825 m	30	15	15
3	左岸边坡开挖至 1 750 m	I 区支护至 1 765 m, II 区支护至 1 780 m, III 区支护至 1 780 m	15	30	30
4	左岸边坡开挖至 1 720 m	I 区支护至 1 735 m, II 区支护至 1 750 m, III 区支护至 1 750 m	15	30	30
5	左岸边坡开挖至 1 690 m	I 区支护至 1 705 m, II 区支护至 1 720 m, III 区支护至 1 720 m	15	30	30
6	左岸边坡开挖至 1 660 m	I 区支护至 1 675 m, II 区支护至 1 690 m, III 区支护至 1 690 m	15	30	30
7	左岸边坡开挖至 1 630 m	I 区支护至 1 645 m, II 区支护至 1 660 m, III 区支护至 1 660 m	15	30	30
8	左岸边坡开挖至 1 600 m	I 区支护至 1 615 m, II 区支护至 1 630 m, III 区支护至 1 630 m	15	30	30
9	左岸边坡开挖至 1 580 m	I 区支护至 1 600 m, II 区支护至 1 615 m, III 区支护至 1 615 m	20	35	35
平均			19	29	29

每层开挖高度为 10 ~ 15 m。

(3) 支护与开挖面高差控制。

边坡高程 1 885 ~ 1 730 m 区间的系统支护(除锚索)与开挖工作面高差不大于 7.5 m, 预应力锚索与开挖工作面高差不大于 15 m, 高程 1 730 m 以下边坡系统支护(除锚索)与开挖工作

面高差不大于 15 m, 预应力锚索与开挖工作面高差不大于 30 m。

(4) 边坡开挖坡与洞的施工程序。

在大坝左岸边坡开挖中, 优先采用先洞后坡的施工程序。开挖中遇到出露洞室时, 优先对洞室进行开挖、支护、衬砌及回填灌浆。

### 5.2.2 控制性分级开挖支护动态过程

针对边坡开挖施工的实际情况,在现场施工过程中,将大面的锚索支护与开挖面的高差大体控制在30 m左右。

我们对左岸边坡开挖和支护过程进行了统计,按照9个开挖程序统计的大面锚索支护与开挖高程的对应关系如表2所示。各施工区开挖与大面锚索支护的相对高差平均值分别为25 m、32 m和29 m,平均高差约29 m;在各施工区开挖过程中,锚索大面支护一般滞后15~30 m,极少数局部区域超过30 m。

### 5.2.3 控制性分级开挖支护效果

(1) 边坡大面锚索支护与开挖面维持30 m左右高差;从多角度、多途径开展工作,总结并得出了适合锦屏一级水电站左岸边坡复杂地质条件下深孔、大吨位预应力锚索快速施工工艺和方法,进而保证了支护及时跟进。

(2) 根据开挖边坡可能的滑坡破坏模式进行了动态分析,组织优势资源,开展了有针对性的重点支护加固。例如,针对某一高程范围局部块体楔形体破坏的2级破坏模式,根据分级支护措施要求,采取液压锚固钻机在施工平台上逐层进行锚索孔造孔作业,并组织轻型锚固钻机对楔形体分布区域进行重点的锚索支护作业,该高程范围其他区域的锚索支护可以略为放缓,以保证边坡的局部稳定和正常下挖。

(3) 根据对破坏模式进行的动态分析,对不同区域出现的各类破坏模式在工程措施上要区别对待。在1 885 m高程以上,以2级破坏模式为

主,采取了针对块体失稳的锚索支护措施;而在1 885 m高程以下,以3~4级破坏模式为主,注重了喷锚支护的及时性,并且针对断层出露部位,注意及时封闭和采取特殊的开挖方式;在边坡开口线边缘,危岩体倾倒滑塌破坏模式居多,此时,组织人员设备及时进行清除,以消除安全隐患。

在锦屏一级水电站左岸边坡开挖施工过程中,施工单位结合认真细致的现场地质工作,建立了畅通、快速的信息反馈机制,制定了从整体到局部,再到重点的多层次边坡分级支护方案,保证了边坡施工期的整体和局部稳定,同时,边坡开挖程序的优化也在很大程度上加快了施工进度。

### 5.3 分级预警动态控制

笔者根据多点位移计监测到的变形数据,对边坡变形与开挖过程的关系进行了分析,并通过深部监测数据,选取PD42平洞内谷幅测点的累积变形数据,就开挖过程对边坡变形的影响进行了分析。

谷幅监测PD42~PD21测线各测段变形过程曲线见图5。PD42平洞0+78范围内的谷幅测点变形主要反映了边坡开挖后岩体产生横河向的卸荷变形,与开挖过程线有较好的相关性。在2007年10月5日~12月31日期间,施工Ⅲ区的开挖基本处于停滞状态,开挖方量很小,因此,谷幅测点PD42-2的变形很小,监测值为1.76 mm。2008年1月份以后,边坡开挖强度加大。由于开挖的扰动,岩体产生了卸荷变形,测点变形继续增加。

多点位移计、谷幅监测反映的边坡浅表部和

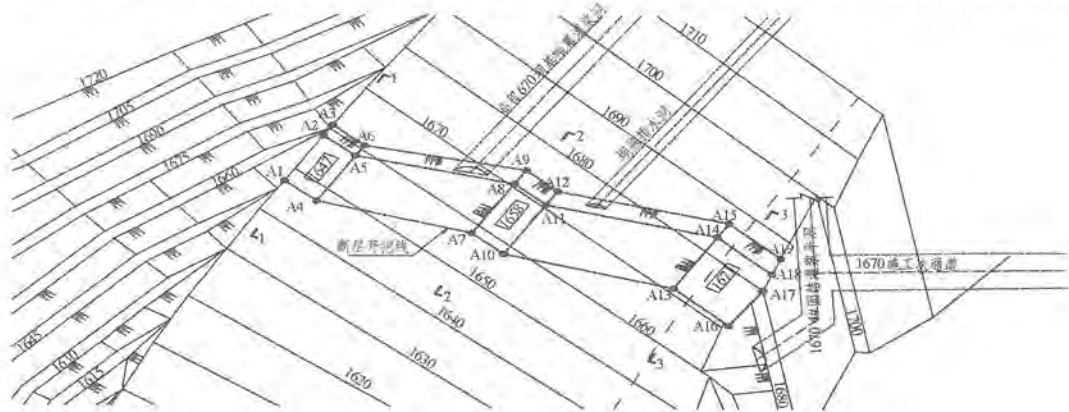


图5 谷幅监测PD42~PD21测线各测段变形过程曲线

深部变形数据表明:(1) 边坡变形与开挖过程有着密切的联系。当开挖强度较大时,边坡变形量

的增加明显;而当开挖停滞时,特定区域内的边坡变形会显著减小。(2) 支护措施的及时跟进对边坡变形的控制作用也非常明显。当开挖边坡采取锚索等支护措施后,相应的上部多点位移计测点的变形数据增长幅度会放缓。

因此,当边坡变形出现异常、变形速率明显加快时,可以采取停止开挖、及时加强支护的措施。

根据锦屏一级水电站左岸边坡实际开挖过程

表 3 锦屏一级水电站左岸边坡开挖施工建议警戒等级及判定指标表

警戒等级	变形速率	相应工程措施
未发警戒	<0.1 mm/d	绿灯:继续按施工方案正常开挖和支护
一级警戒	0.1 mm/d	黄灯:施工开挖可继续,但需加强监测并适当放缓开挖速度,及时跟进支护或适当加强支护,待变形速率减小时再正常施工
二级警戒	0.2 mm/d	红灯:停工,加强支护,直至监测确定变形速率实质性减小时方可复工

通过对锦屏一级水电站左岸高边坡施工过程中存在的安全稳定性问题进行分析,采用结构面(断层)置换锚固、控制性分级开挖支护和分级预警等动态施工技术并确保了左岸边坡安全稳定并得到了以下主要结论:

(1) 左岸边坡主要结构面(断层)性状差,产生破坏的后果极其严重。综合考虑了施工期的边坡稳定与左岸整体边坡稳定性的关系,采取了布置抗剪洞、断层置换等抗滑稳定措施,通过数据演算和监测,证明该方案有效地改善了左岸边坡在施工期的安全稳定条件。

(2) 根据开挖揭示的工程地质情况和边坡可能的潜移破坏模式分析,制定了锦屏一级水电站大坝左岸边坡开挖施工过程中的稳定性分级控制工程措施。在开挖过程中,对所涉及的可能失稳的部位,开展了有针对性的重点支护,实施了“整体、局部、重点部位”相协调的高边坡“多层次分级、多形式组合”的支护方案,锦屏一级水电站大

中出现的边坡变形速率变化规律以及测值水平,在该工程中采取了如表 3 所示的警戒级别进行指标判定和预警,再将其实际运用于锦屏一级水电站边坡开挖过程中,共计发出二级警戒 8 次,一级警戒 10 次。我们特别针对锦屏一级水电站边坡特点,对潜在局部不稳定块体和雨季开挖施工进行了重点分析和预警工作。

6 结 语

坝左岸边坡开挖的实践证明:采取控制性分级开挖支护,有效地解决了潜在失稳岩体造成的边坡稳定影响。

(3) 根据对锦屏一级水电站大坝左岸边坡实际开挖过程中出现的边坡变形速率的变化规律进行分析,采取了三级警戒等级划分与指标判定和预警,并将其实际运用在左岸边坡开挖支护过程中,共发出二级警戒 8 次,一级警戒 10 次,有效地提高了边坡开挖失稳风险的防控水平,保证了左岸边坡施工的安全稳定。

参考文献:

[1] 胡厚田. 边坡地质灾害的预测预报[M]. 成都:西南交通大学出版社,2001.

作者简介:

乔介平(1974-),男,安徽安庆人,高级工程师,学士,从事水电工程施工技术与项目管理工作;

殷本林(1979-),男,四川郫县人,工程师,从事水电工程施工技术与管理工作.

(责任编辑:胡友权)

(上接第 16 页)

5 施工成果评述

本次施工共完成锚索施工 244 束,下设索体总长 11 000 余 m。在对前期试验施工时的部分不合格孔处理完成后,经统计,所有孔均能达到设计张拉力和设计锁定吨位,锁定损失率在设计要求范围内,施工质量满足设计要求。施工后的监测结果表明:锚索预应力损失在设计允许范围内。

本工程是在复杂地质条件下的深厚覆盖层内

进行锚索施工,遇到了一些在常规的锚索工程中鲜见的施工技术问题。通过本工程的成功实践和探索,拓展了预应力锚索的应用范围,为类似工程积累了经验。

作者简介:

丁海龙(1980-),男,宁夏银川人,项目总工程师,工程师,学士,从事水电工程基础处理工作.

(责任编辑:胡友权)