

# 龙滩水电站通航建筑物高边坡地质灾害治理

张延昭

龙滩水电开发有限公司龙滩水力发电厂 广西南宁 530028

**[摘要]** 本文针对龙滩水电站通航建筑物开挖过程中,边坡出现不同程度的开裂变形问题,采取动态跟进、加强支护,动态监测,综合运用混凝土面板、喷混凝土、网格梁+植草、系统锚杆、预应力锚索、钢筋桩、抗滑桩等支护手段,使边坡变形和座滑体蠕动得到有效控制。

**[关键词]** 龙滩 通航 高边坡 灾害 治理

## 1 引言

龙滩水电站通航建筑物一期已开挖至 260.00 高程并完成系统治理,在二期施工过程中,尽管采取了一系列控制措施,由于典型顺层坡及坡脚破碎岩体应力释放,使得座滑体出现明显蠕动,一期边坡部分区域出现不同程度的开裂变形。针对上述情况,在进行专题研究和动态设计的基础上,加强爆破、开挖方案优化和支护工艺控制和动态支护监测,运用多项综合支护手段使边坡变形和座滑体蠕动最终得到有效治理,该方案的成功运用,对类似地质灾害治理具有较高的指导意义。

## 2 工程概况:

龙滩水电站位于红水河上游广西境内,距天峨县城15km,为 I 等大(1)型工程,工程以发电为主,兼顾防洪、航运等综合利用,500t级通航设施布置在枢纽右岸,采用两级垂直升船机提升,最大提升高度156m,两级升船机之间通过中间渠道连接,全长1800m。

## 3 工程地质条件

通航设施高边坡及座滑体位于红水河右岸下航道(航 1+016~1+080 及航 1+230~1+374 段),红光 I、II 号松散堆积体(㉔、㉕号冲沟)之间的山脊部位,两条冲沟走向一致;出露的地层为板纳组 T2b50 层粘土质板岩与钙质、泥质细砂岩互层,T2b51 层钙质、泥质细砂岩夹粘土质板岩;岩层总体产状  $N0^{\circ} \sim 10^{\circ} W$ ,  $NE \angle 35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,局部地段地层揉皱强烈。

该段边坡断裂构造发育,边坡变形特征复杂,高程 300m 以上为覆盖层、全强风化岩(土)体变形,以及由 NNE 向、NE 向断层与层间错动组合的多层棱块体变形;高程 260~300m 的边坡主要由于坡脚应力集中产生强风化岩体的卸荷变形,以及沿 EW 向陡倾角断层带的倾倒变形,下游侧坡为近顺层坡,主要表现为浅表层全强风化岩土体顺层蠕滑变形。

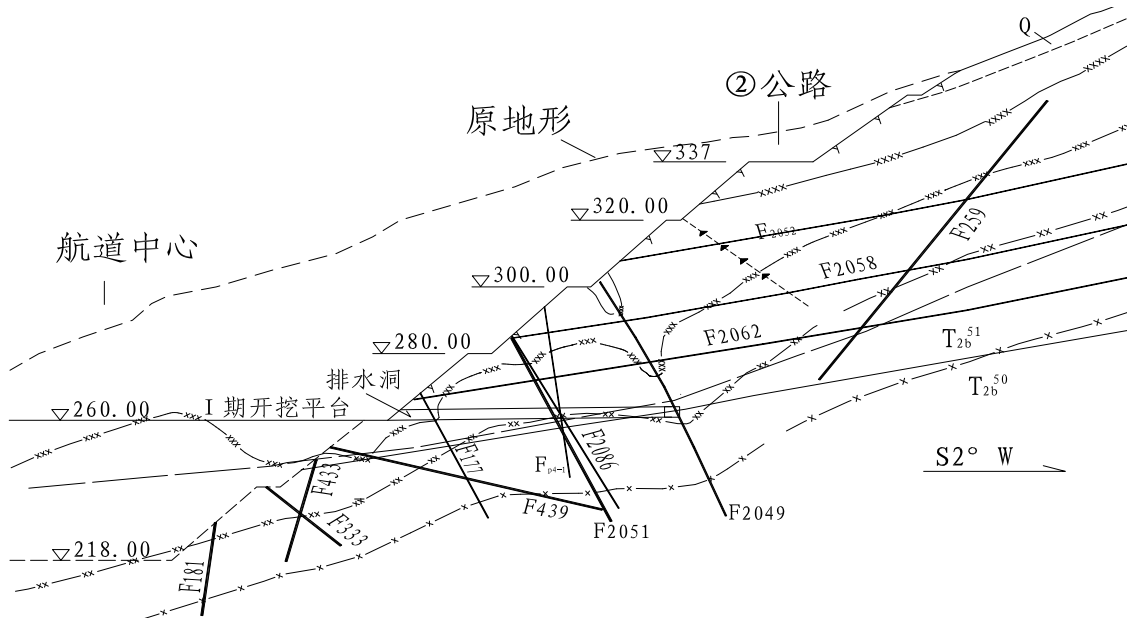


图1 航 1+270 典型剖面图

#### 4 I期工程边坡治理情况

上游引航道及上航道、中航道边坡开挖治理一期工程已经完成。观测资料显示，该段边坡变形近于正交，位移主要为河床及下游方向，裂缝发展主要延伸平行于开挖边坡走向，在高程 260m 的横向排水洞离坡面 25m 的范围内，出现错位裂缝；航 1+266 高程 340m、300m 处布设的测斜（IN2-1、IN2-2）观测结果表明，在孔深 34m 和 28m 附近有明显错动迹象；外观点和岩石多点位移计位移较大，进行系统锚固以后，变形明显收敛。

右岸航道（航 1+230~1+374 段）为高边坡，受构造和岩性等因素影响，高程 260m 以上岩体风化破碎，尤其航 1+225~航 1+330 段受 N-S、NEE 或 NWW 和层间错动 3 组结构面的切割，岩体成棱块状，结构面强度低，边坡整体稳定性安全储备较低，在专题研究计算分析的基础上，采用排水和锚固相结合的综合治理方案（图 2）。

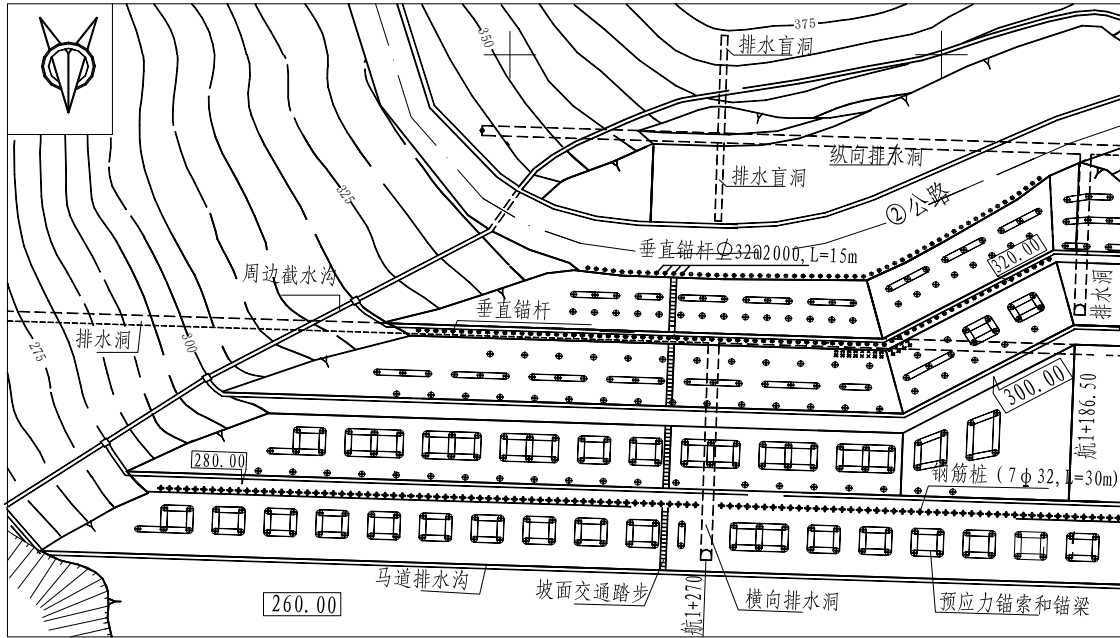


图2 一期系统支护简图

加固后边坡稳定性成果表明，一期锚固治理满足边坡整体抗滑稳定安全要求，监测资料显示，边坡处于稳定受控状态。

## 5 II期工程通航建筑物边坡开挖支护综合治理方案

### 5.1、航道边坡治理设计

2015年12月通航设施II期工程全面开工，针对右岸高边坡坡脚及座滑体脚应力过大，边坡整体性安全储备较低问题，II期开挖支护过程中，根据变形特征及动态监测结果结合开挖揭露的地质情况，进行高陡顺层边坡变形机制及治理措施专题研究，充分考虑坡脚应力对上部边坡及下游顺层边坡的影响，采取超前长锚杆、系统锚杆、钢筋桩、混凝土速喷封闭和面板混凝土防护体系，加固表层岩体，并采用预应力锚索进行深层岩体加固和提高坡脚岩体强度的综合支护方案；同时采取边坡支护动态设计及施工过程工艺控制等措施有效开展航道高边坡和座滑体边坡治理工作。

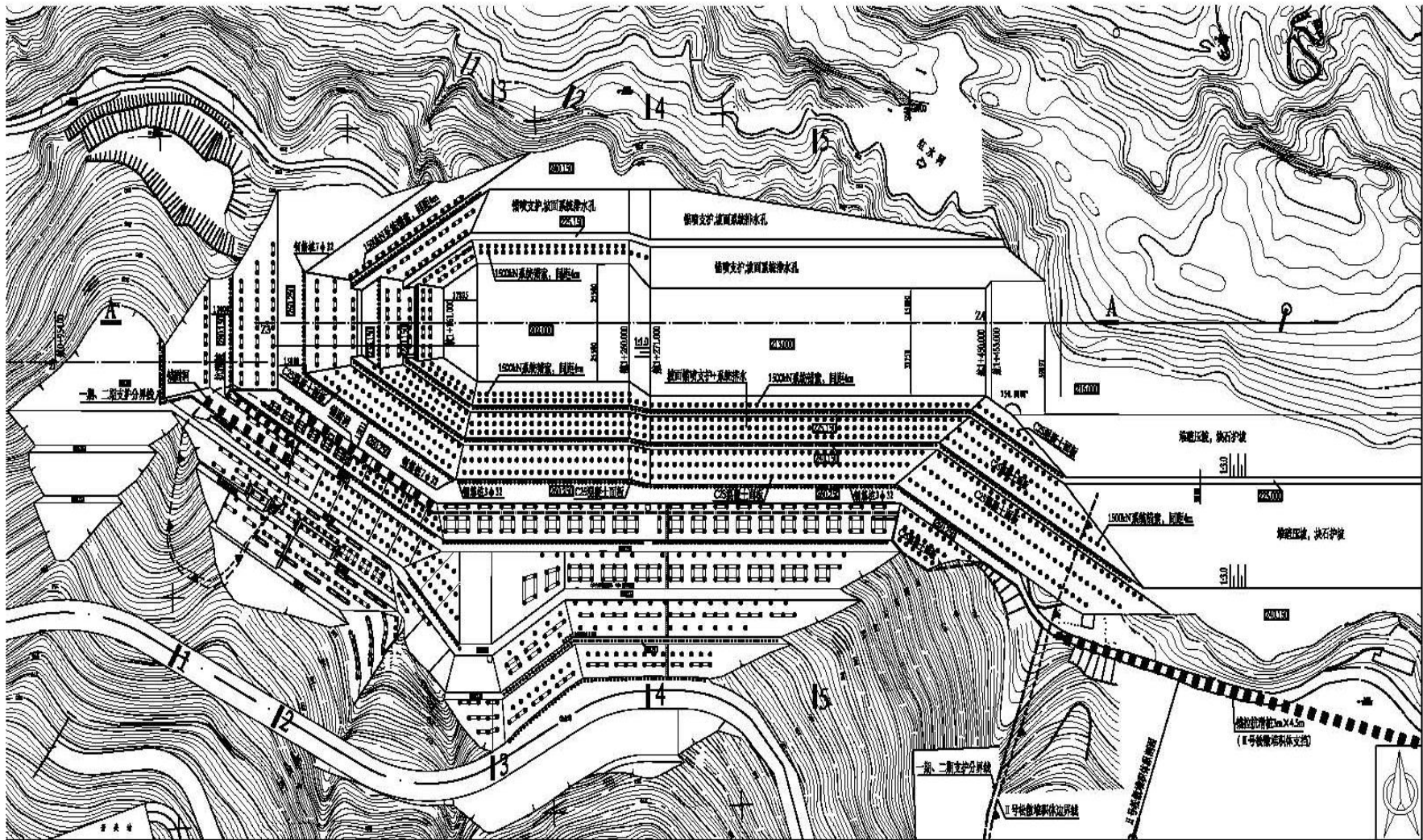


图 3 下航道二期边坡平面图

### 5.1.1 航道高边坡治理

根据边坡地质情况结合稳定分析成果，在高程 300m、280m、260m、235m 和 220m 平台距外边线 1m 处各布设一排超前钢筋桩  $7\phi 32$ ，长 25m，间距 2m；在高程 202m~220m 坡面坡腰坡顶设置 2 排 1500kN 预应力锚索以保证边坡整体稳定；高程 220m~235m 坡面、高程 235m~260m 坡面、高程 260m~280m 坡面各布置 3 排 1500kN 预应力锚索；高程 280m~300m 坡脚布置 1 排 1500kN 预应力锚索；预应力锚索平均长 40m，间距 5m。整个坡面进行系统锚喷支护，坡面系统排水孔  $\phi 56$  ( $L=5m$ )，间、排距 3m；坡脚设深排水孔  $\phi 91$  ( $L=10m$ )，间距 2m；平台采用厚 15cm C15 混凝土封闭；各级平台内侧设排水沟，开挖坡面以外距开口线 5m 左右设周边截水沟，各马道排水沟与周边截水沟相接。

第二级升船机西南侧边坡高程 280m~260m（桩号航 1+125.750~航 1+134.000 与桩号航 1+150.000~航 1+159.500）处（图 4），存在两处坡面塌滑区，为保证该区域后续边坡支护措施（混凝土面板+坡面系统锚索）的顺利施工，对该两处塌滑区缺陷进行动态支护治理，进行坡面松动块体处理，增设系统锚杆和水平向插筋。

针对下游引航道南侧航 1+340.000m~航 1+388.000m，高程 235.00m~260.00m 边坡坡度相对较陡，靠上游侧岩石条件较差的情况，为确保新增混凝土面板的稳定，采取分期分块浇筑施工方案，将“系统锚杆+系统锚索+喷混凝土”支护调整为“系统锚杆+系统锚索+混凝土面板”支护，一期面板自 280m 平台浇筑至 286m 高程，施工 283m 新增 3 束预应力锚索，待面板混凝土、外锚头混凝土、锚索注浆强度均达到设计龄期后进行锚索张拉施工；锚索张拉锁定后浇筑面板混凝土至 300m 高程，并完成 295m 新增 5 束预应力锚索的施工。

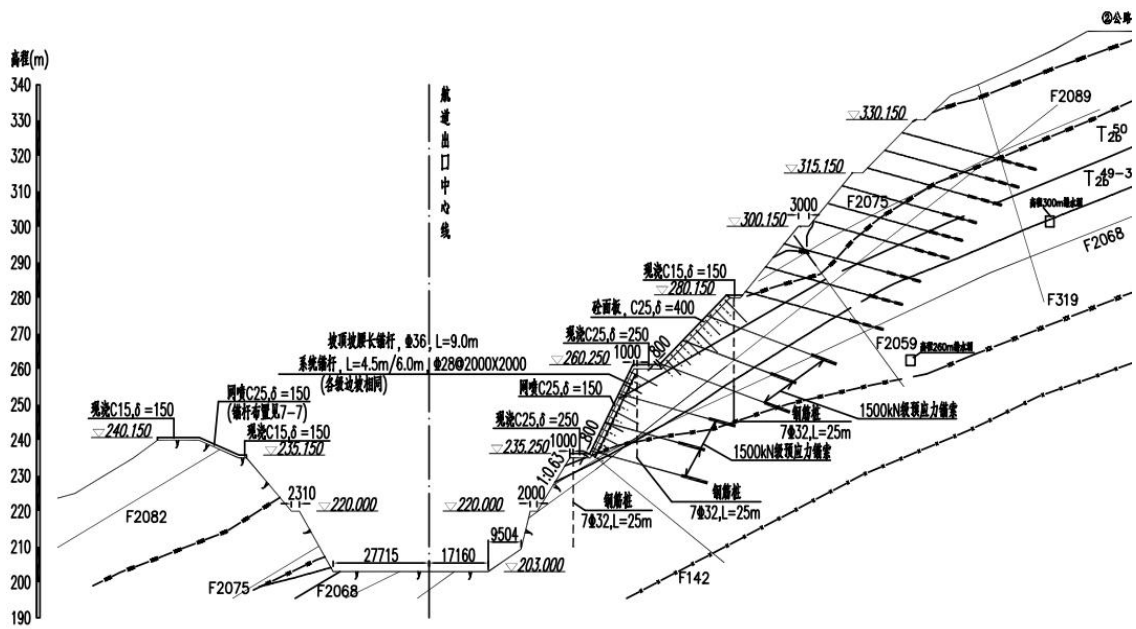


图 4 航 1+150.000 段典型剖面

### 5.1.2 座滑体治理

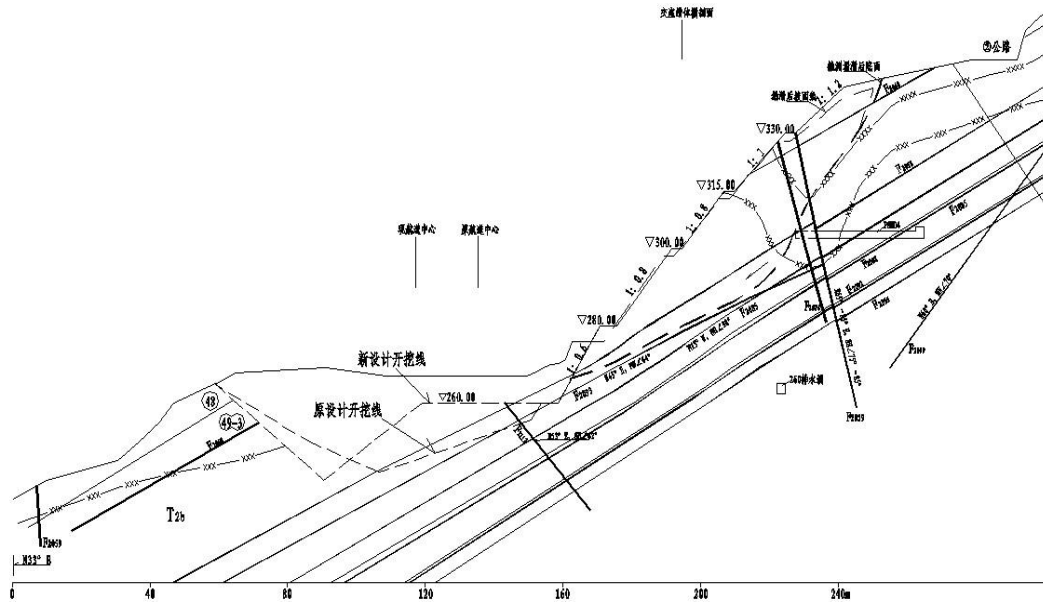


图5 航 1+016~1+080 座滑体典型剖面图

(1) 航道 N 1+016~1+080 段座滑体 (图 5), 为第二级升船机塔楼基础开挖的南侧坡, 位于 110kV 变电站和 2 号公路的下部, 坡顶距离 2 号公路外侧的水平投影距离 37m, 距离 110kV 变电站水平投影距离约 130m; 该段边坡与西侧坡呈  $120^\circ$  斜交, I 期已经完成高程 347m~280m 开挖, 开挖坡高 67m; 一期施工已发生过明显座滑变形, II 期采取在高程 285m 布置 1 排钢筋桩  $7\phi 32$ , 长 25m, 间距 2m; 在高程 280m 马道布置一排抗滑桩, 断面尺寸为  $2\text{m}\times 3\text{m}$ , 间距 6m, 桩长 25m, 抗滑桩桩顶设 1 束 1500kN 预应力锚索, 坡面高程 282m 布置一排锚固洞, 断面尺寸  $3\text{m}\times 4.5\text{m}$ , 间距 8m, 深 35m, 俯倾 15 度; 施工顺序为首先施工 285m 钢筋桩, 然后施工高程 280m 抗滑桩, 再施工高程 282m 锚固洞, 完成后方可进行二期开挖和高程 280m~240m 边坡支护。

为防止高程 260m 平台靠外侧小三角块体出现顺层滑塌, 在平台距外边线 1m 处各布设一排超前钢筋桩  $7\phi 32$ , 长 25m, 间距 2m。坡面锚喷支护、坡面排水、马道封闭和马道内侧排水沟同西侧坡设计 (图 6)。

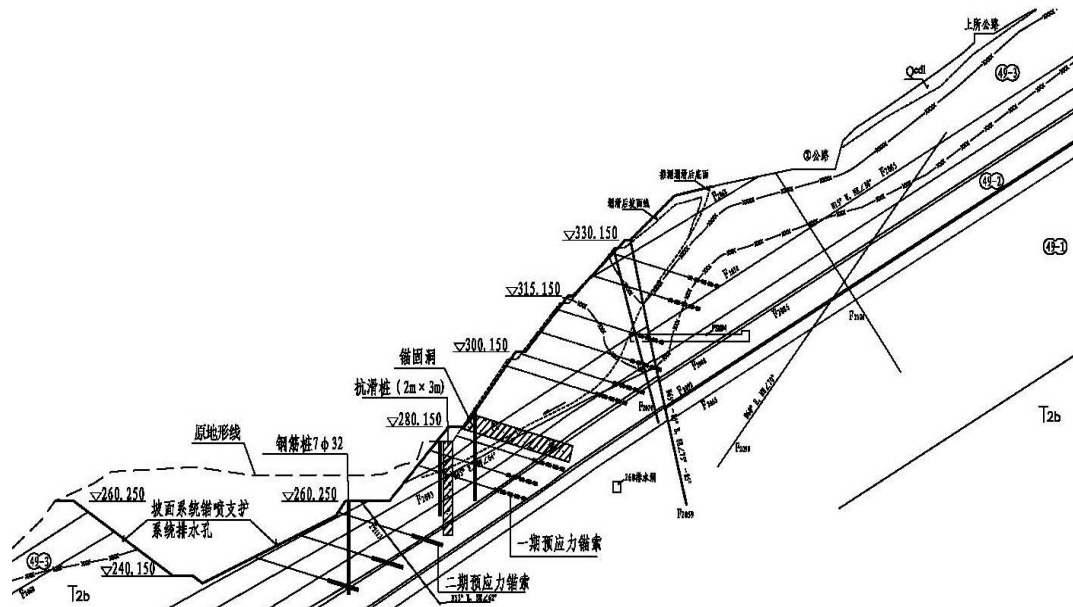


图6 座滑体纵剖面深层支护简图(1-1剖面)

II期边坡开挖走向与I期一致，高程260m平台由原来的5m加宽至13.8m；高程260m~240m间单级开挖边坡坡比分别为1:0.75和1:0.45，高程240m和225m马道宽3m。该级边坡在治理支护过程中，平台上部331.50m高程监测锚索、监测锚杆应力数据变化较大；为确保该级边坡的安全稳定，对该边坡采取了加强动态支护措施，并增设系统锚索及监测锚索；对钻孔施工过程中因含水量较高，岩石破碎且风化严重，成孔困难、塌孔严重的情况，采取了坡面系统锚索套管跟进工艺，同时将有粘结式端锚型预应力锚索调整为无粘结式端锚型预应力锚索，以保证锚索施工质量和应有的支护施工进度；并在座滑体高程330m~315m下游侧设置监测锚索，布设动态监测仪器，为避免锚索张拉过程中锚墩头发生不均匀变形，采取先施工边坡混凝土面板，再施工锚索锚墩头的措施，有效解决了汛期座滑体边坡治理施工难题，取得了较好的效果。

座滑体330.00m平台以上边坡系统锚杆施工中，遭遇座滑体底滑面堵塞，锚杆孔深部无法注浆，钻孔过程中塌孔现象严重，锚杆施工质量达不到设计要求等异常，经进一步踏勘分析，该座滑体区域为全风化破碎岩层，地质条件极差，遂采取：(1)高程330.00m~337.00m边坡全风化破碎岩层采取系统锚杆及锚索钻孔施工套管过缝工艺；(2)330.00m平台以上边坡破碎岩层坡体内距坡面3m~4m区间存在多条裂缝，锚杆注浆过程中砂浆由裂缝流失，锚杆注浆施工质量达不到设计要求，已施工完成锚杆由检测单位提供全锚杆质量检测结果，根据检测成果决定是否另外增设锚杆；(3)座滑体330.00m平台以上的正面坡(约46.50m<sup>2</sup>)边坡喷混凝土方案调整为40cm厚C25混凝土面板(图7)。



图7 座滑体高程330m300m边坡锚索布置平面图

(2) 航道 N1+080~1+158 边坡，为第二级升船机塔楼基础开挖南侧坡，位于 110kV 变电站和 2 号公路下部。坡顶距离 2 号公路外侧水平投影距离 29m，距离 110kV 变电站的水平投影距离约 100m。

二期开挖前利用高程 260m 平台沿坡脚布置一排锚固洞(断面尺寸 3m×4.5m)，洞深 35m，间距 8m；锚固洞施工完成后进行下一级边坡开挖施工；高程 240m~260m 坡面和高程 225m~240m 坡面各布置 3 排 1500kN 预应力锚索，高程 202m~225m 坡面坡腰坡顶各布置 1 排 1500kN 预应力锚索，锚索间距 4m，均长 40m。

高程 260m、240m 和 225m 马道距外边线 1m 处各布设一排超前钢筋桩 7φ32，长 25m，间距 2m；高程 240m~260m 坡面设置 40cm 厚 C25 混凝土面板，面板中布置双层双向钢筋 φ20@200mm×200mm；坡面锚喷支护、坡面排水、马道封闭和马道内侧排水沟同西侧坡设计(图 8)。

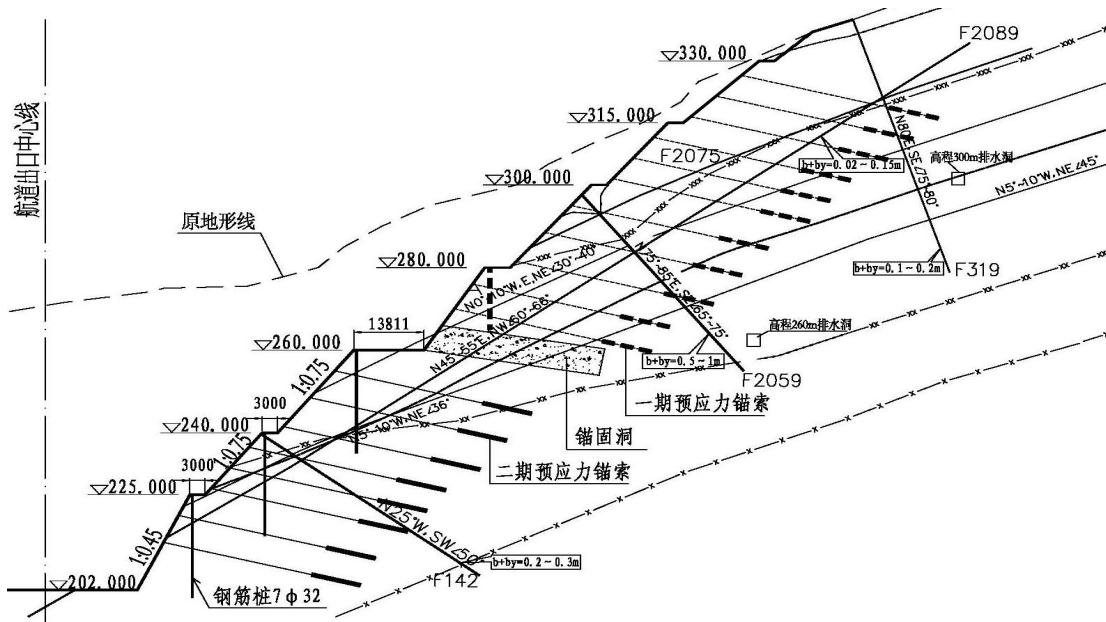


图8 航 N 1+150.000 深层支护简图 (2-2 剖面)

边坡治理过程中，全过程采用动态监控、动态设计、动态跟踪手段，一旦有变形发展、应力明显增大时，及时调整支护方案，严格按照工序施工，在上部预应力锚索张拉完成前，不得进行下部边坡开挖施工；在优化施工工艺，缩短新增锚索施工周期，尽早发挥锚索作用的同时，及时清理上游侧截水沟内弃渣，随时检查发现截水沟底部混凝土裂缝，采用水泥浆液快速封堵等措施对裂缝进行封闭，防止水流下渗；另外通过不间断锚索监测手段，密切关注高边坡、航道座滑体、2号公路及下方输电铁塔等重点区域边坡变形与裂缝发展情况，及时采取必要的预警措施，确保人员与工程安全。

## 5.2 开挖支护工艺控制措施

### 5.2.1 开挖程序控制

边坡开挖尽可能降低开挖扰动，保证边坡施工过程中的相对稳定，遵循自上而下、由外向内、从上游到下游的原则，针对坡脚应力较大，采取交替抽槽开挖、同步支护工艺，同时每个施工梯段开挖高度严格控制在9m以内，最大开挖高差不超过12m，对风化程度较高、完整性较差的边坡，开挖坡面形成后及时喷35cm厚混凝土进行保护，然后再进行系统支护，前一槽段及上一梯段加固支护未完成之前，不得开展下一槽段及下一梯段开挖工作。

### 5.2.2 爆破控制

进行专项爆破设计，保证开挖边坡整体稳定及开挖边坡的几何尺寸满足设计要求。

#### (1) 爆破方案的制定

根据工作面的不同情况，将爆破作业区分为主爆区、爆破控制 I 区和爆破控制 II 区 (图 9)。

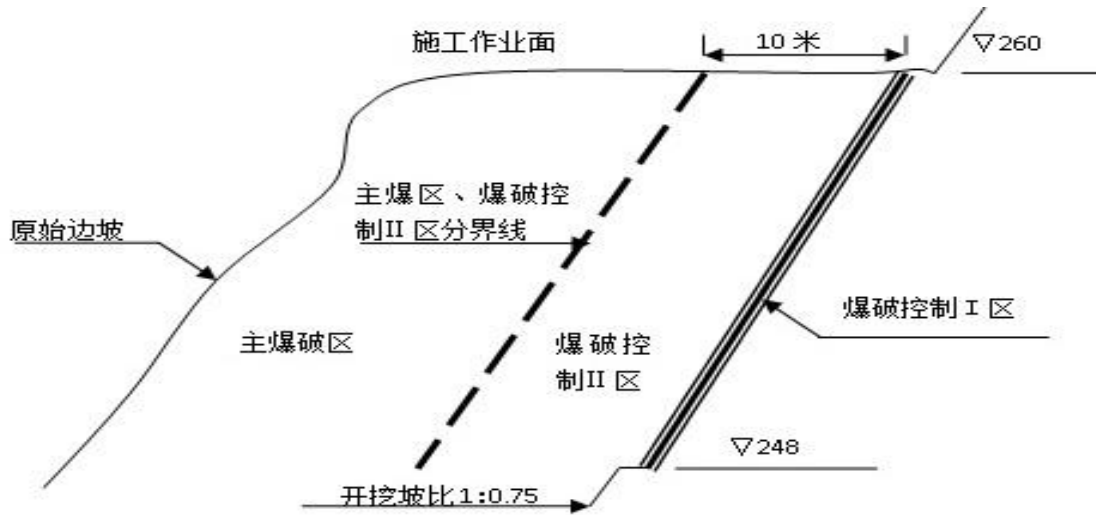


图9 爆破分区示意图

开挖轮廓线10m以外爆破区域为主爆区，采用梯段爆破。爆破参数先通过计算初步选定，再通过生产性试验最终确定，开挖施工过程中根据所揭示的地质状况再进行优化；造孔间距4m，排距3m，梅花形布孔，孔径105mm，采用最先进的混装炸药技术，控制装药量为 $0.30\sim 0.40\text{kg}/\text{m}^3$ （松动爆破），起爆网络为山形和对角线起爆网络，最大单响药量控制在300kg以内，爆破规模 $2000\text{ m}^3\sim 3000\text{ m}^3/\text{次}$ 。

爆破控制I区为采用爆破方法进行轮廓线开挖区域，为尽可能减少因爆破对未开挖岩体稳定产生不利影响，对岩石相对完整的区域，采用预裂爆破；岩石破碎的区域，采用光面爆破，线装药密度和最大单响药量随岩石风化程度变化。

爆破控制II区为爆破控制I区与主爆区之间的区域，采用控制爆破技术，紧邻预裂面布置两排缓冲孔，孔距为2m，排距为1.5m（距预裂孔）和2m，缓冲孔坡比与预裂孔一致，孔径90mm，孔深与梯段高度一致，缓冲孔采用分层装药结构，线装药密度不大于1.4kg，底部适当增加，采用山形和对角线起爆网络；外侧区域钻孔间排距 $4\times 3\text{m}$ ，孔径105mm。

## （2）爆破方案的实施及优化

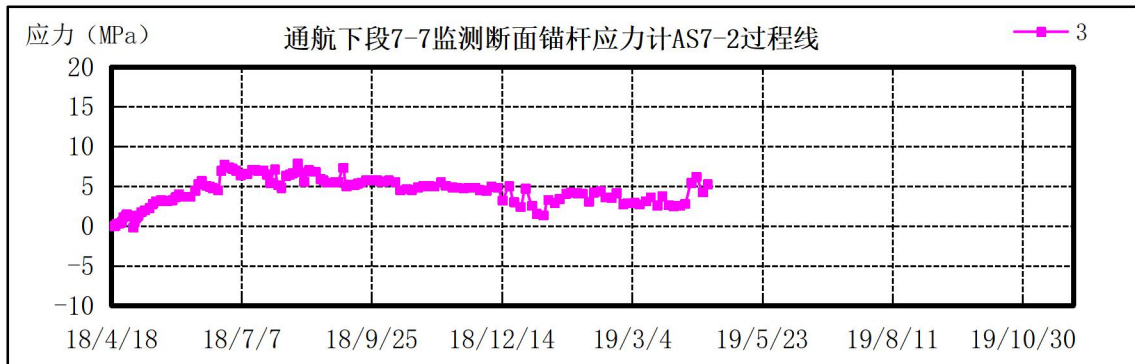
施工中采用多种方法进行轮廓线开挖控制和预裂孔造孔质量控制：①提高预裂造孔孔量角器精度和分辨率，保证钻机开孔准确性；②用型钢加工钻架固定钻机，以更好保持造孔精度；③根据不同地质情况适当调陡钻孔坡比；④采用单级坡面二次预裂方法，将每级坡面分为上、下半坡分别进行预裂施工，上半坡开口线按设计开口线底口（坡比1:1，10m高差），向内30cm（技术要求超欠挖最大限差40cm），下半坡开口外移30cm，底口按设计边线控制，中间设60cm宽的架钻平台，坡比1:0.97，开挖时中部架钻平台用手风钻削平顺。

## （3）爆破实施效果评价

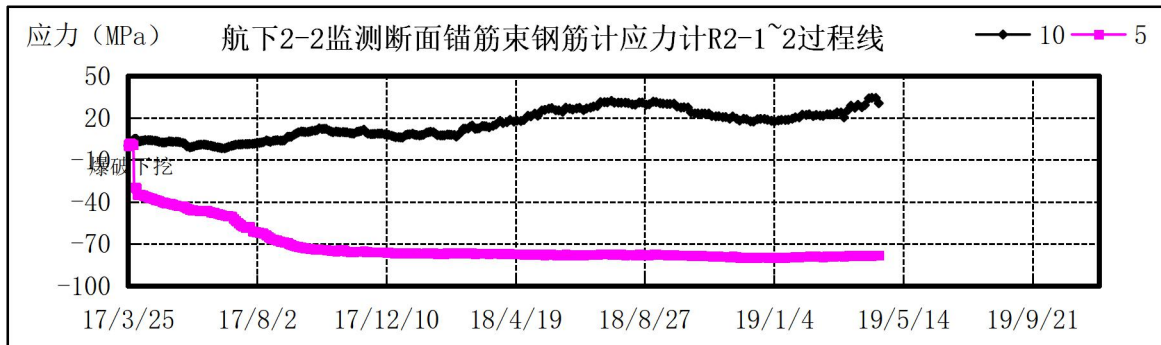
由于针对不同的地质情况及时调整爆破方案，无论强风化岩体，还是节理、裂隙较多的断层破碎带，整个壁面完整，半孔清晰，残留炮孔痕迹率均在 95%以上，残留炮孔中无爆破裂隙。监测表明，合理的爆破方案和措施优化既保证了开挖过程边坡的稳定，又满足了支护进度要求，取得了良好的实施效果。

## 6 II 期工程边坡支护综合治理措施实施效果评价

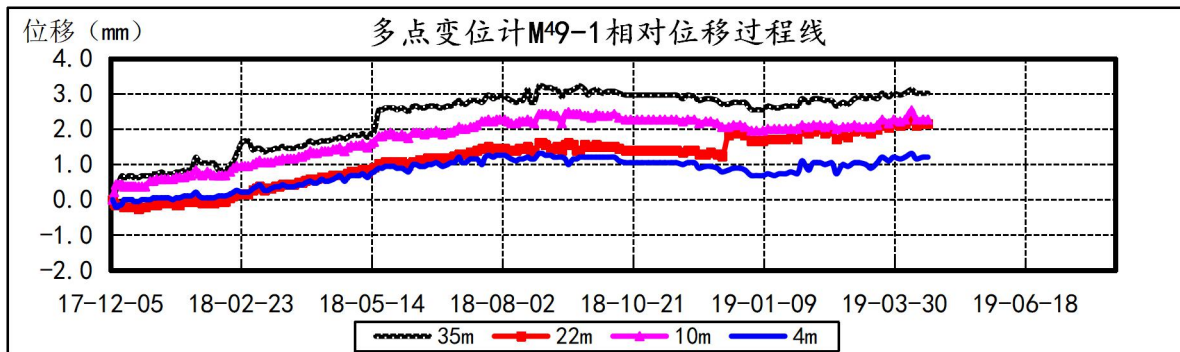
2019 年 4 月最近一期监测成果显示，II 期工程 235.00 高程以上边坡监测数据变化月变幅在 -5.85MPa~7.34MPa 之间，主要反映在 7-7 监测断面上（仪器编号 AS7-2）。



锚筋束应力计监测数据月变幅在 -0.2 MPa~4.9MPa 之间，主要反应在 2-2 监测断面上（仪器编号 R2-1）。



多点变位计测监测到的位移变化月变幅在 0.10mm~0.58mm 之间。



II期支护工程航道边坡监测成果表明,山体边坡位移、滑动下沉无明显变化,监测断面未见异常,整体处于稳定运行状态,满足安全要求。

## 7 结束语

边坡治理是一项复杂的综合治理工程,前期勘探是边坡治理的基础,合理的开挖坡型及开挖坡比,保证边坡岩体最优受力状态是维持开挖边坡长期稳定的有效措施,逐层开挖,逐层支护是工程顺利进展的重要保证;针对不同地质条件,结合现场实际情况,尽量减少对开挖坡面的扰动影响,在不断优化爆破、开挖施工方案的基础上,加强排水、超前支护及工艺优化,结合开挖揭露地质情况及施工信息反馈,运用动态设计和动态监测跟进,及时调整施工方案和支护加固措施,加强边坡施工期封闭及永久排水设施完善,是确保边坡治理工作顺利进行的关键。

龙滩水电站500t级通航设施高边坡治理已全面结束,边坡稳定,状态收敛。受贵州省主导的1000t级方案变更影响,龙滩水电站500t级通航设施暂缓施工。1000t级方案初步研究成果显示,第二级船厢室段基础深度及宽度较500t级分别增加7m和12m,在原本狭窄区域进行大规模的方案调整,将大大增加通航建筑物高边坡失稳风险与二次开挖支护安全隐患,无论对于工程设计还是施工都将是一项重大挑战。

## 参考文献

- [1] 史可军,陈卫红,龙滩水电站右岸航道出口边坡施工期安全监测[J].水力发电,2003.10
- [2] 肖峰,石青春等,红水河龙滩水电站可行性研究阶段通航建筑物专题研究报告 2014.12

## Treatment of Geological Hazards of High Slope of Navigation Buildings of Longtan Hydropower Station

Zhang Yanzhao

Longtan Hydropower Development Co., Ltd. Longtan Hydropower Plant Nanning Guangxi 530028

**Abstract:** In this paper, for the cracking and deformation of the slope of the Longtan Hydropower Station during the excavation of the navigation structure, dynamic follow-up, reinforced support, dynamic monitoring, comprehensive use of concrete panels, shotcrete, grid beam + Supporting means such as grass planting, system anchor rods, prestressed anchor cables, reinforced piles, and anti-slide piles can effectively control the deformation of the slope and the creep of the sliding body.

**Key words:** Longtan navigation high slope disaster treatment

## 作者简介

张延昭，1973.09，男，高级工程师，主要从事水利水电工程施工及管理工作。E-mail：  
381630973@qq.com

联系地址：广西壮族自治区天峨县六排镇塘英爱民路1号龙滩水电开发有限公司，张延昭，  
联系电话 18978928768