

复杂地质条件下岩壁吊车梁破坏机理及 长期稳定运行研究

韩国君¹, 秦洋²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司叶巴滩分公司, 四川 甘孜 627153;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:叶巴滩水电站地下洞群处于极高地应力与复杂结构面共存的不利条件,岩壁吊车梁在开挖过程中出现较严重的破坏现象,基于现场实际破坏现象、微震监测数据、物探检测等成果,深入分析了岩壁吊车梁的破坏机理,提出针对性的动态优化设计措施,并利用仿真分析软件开展了桥机荷载作用下的运行安全性计算,结果表明:通过增设的钢筋混凝土扶壁墙,可以满足岩壁吊车梁长期安全运行。

关键词:复杂地质;岩壁吊车梁;破坏机理;稳定运行

中图分类号:TV741;[P545]

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)02-0006-08

Research on Failure Mechanism and Long-term Stable Operation of rock-bolted crane girder under Complex Geological Conditions

HAN Guojun¹, QIN Yang²

(1. Yebatan Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower

Development Co., Ltd., Ganzi Sichuan 627153;

2. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

Abstract:The underground caverns of Yebatan Hydropower Station are under joint adverse effect of extremely high stress and complex structural planes. In response to failure phenomenon of rock-bolted crane girder during the excavation, based on actual failure phenomena on site, microseismic monitoring data, geophysical detection and other results, failure mechanism of rock-bolted crane girder is analyzed in depth, and targeted dynamic optimization design measures are proposed, simulation analysis software is used to calculate the operational safety of the bridge crane under load. The results show that the addition of reinforced concrete buttress walls can meet the long-term safe operation of rock-bolted crane girder.

Keywords:Complex geology; rock-bolted crane girder; Failure mechanism; Stable operation

0 前言

叶巴滩水电站位于四川白玉县与西藏贡觉县境内的金沙江干流上,地下厂房水平埋深 270~480 m,垂直埋深 240~460 m,主厂房尺寸 268.0 m×28.5 m×67.1m^[1]。叶巴滩水电站地下洞群处于极高地应力与复杂结构面的共同不利作用。地下厂区实测地应力显示,初始最大地应力 37.57 MPa,围岩强度应力比较低,约 1.5~3.0,地下厂房洞室群处于高~极高应力区;根据开挖揭示情况,地下厂房洞室群主要存在以下几类结构面发育 f_{91} 、 f_{90} 、 f_9 、 f_{89} 、 f_{85} 、 f_{87} 等 36 条断层。在极高地应力与复杂结构面的共同不利条件下,地

下厂房围岩的破坏机理较为复杂,施工期地下厂房不同部位出现了不同类型的破坏现象,需有计划的开展机理分析并制定针对性的围岩稳定控制措施。

叶巴滩厂房上、下游岩壁吊车梁平台高程为 2 713.50 m,位于(厂横)0+059.00~0+183.00 m 之间,于 2021 年 8 月开始开挖,2021 年 12 月开挖完成,2022 年 7 月至 2022 年 9 月完成岩壁吊车梁座壁修复及梁体混凝土浇筑。2023 年 4 月,在 VIII~IX 层开挖期间,岩壁吊车梁混凝土出现开裂现象。在 2023 年 4 月至 2023 年 10 月,厂房后续下卧开挖过程中裂缝进一步发展,因此岩壁吊车梁的破坏机理与控制技术需开展重点研究,前

收稿日期:2024-01-02

人对此方向开展了相关研究。潘建立特大断面地下厂房、洞库中岩壁吊车梁的岩台开挖、锚杆及混凝土施工的成功做法,并指出了岩壁吊车梁施工中的岩板开挖分层高度、岩台开挖保护层厚度、岩壁吊车梁岩台的开挖等关键技术^[2];余健对清原抽水蓄能电站岩壁吊车梁岩台爆破开挖、锚杆安装及混凝土施工等质量工艺开展了相关研究,其成果为国内地下厂房岩壁吊车梁施工提供了工程实例和技术经验^[3];王小威针对地下厂房岩壁吊车梁与围岩接触问题,分别构建模拟岩壁吊车梁与围岩接触面非线性特征的有限元数学模型和力学模型,为地下厂房岩壁吊车梁稳定分析提供了一种有效的有限元分析方法^[4];周建平论述了大朝山地下厂房岩壁吊车梁的保护层开挖、锚杆施工和混凝土浇筑等关键施工技术,对相关的键技术问题展开了研究^[5];刘文采用有限差分法模拟地下厂房的开挖、加固和岩壁吊车梁的建造及运行状态,重点分析主厂房围岩与支护及岩锚壁车梁的变形及受力状态^[6];陈强采用模糊理论与灰色关联理论相结合的方法建立了相关的分析理论模型,运用该理论对岩壁吊车梁稳定性的影响

因素进行了分析^[7]。

根据前人的研究可以看出,研究的侧重点基本理论施工技术等方面,较少从现场破坏的实际情况开展反馈分析,以动态优化前期所提出的设计措施,并对后期岩壁吊车梁运行的稳定性开展系统研究。基于此,笔者根据叶巴滩水电站地下厂房岩壁吊车梁的现场实际破坏现象,并结合计算分析手段开展相关破坏机理分析,提出针对性的动态优化设计措施,并对动态设计优化后的岩壁吊车梁的长期运行稳定性开展了分析。

1 岩壁吊车梁现场破坏现象

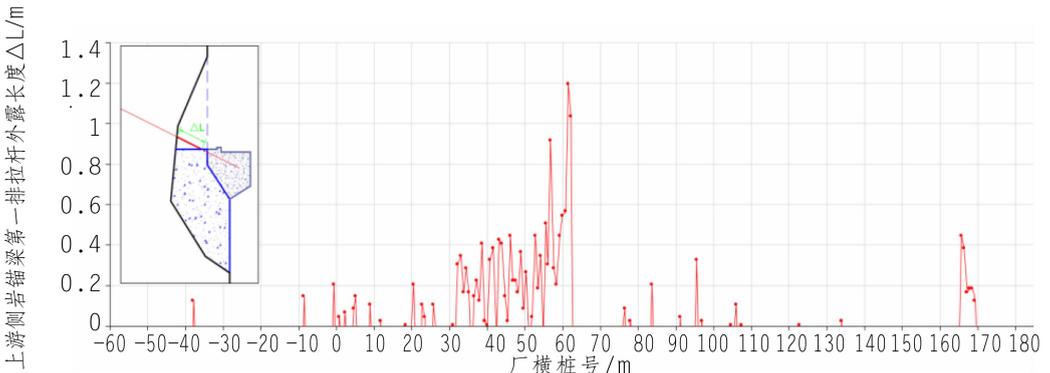
经现场多次排查,岩壁吊车梁主要有以下破坏现象。

1.1 岩壁吊车梁拉杆直接外露

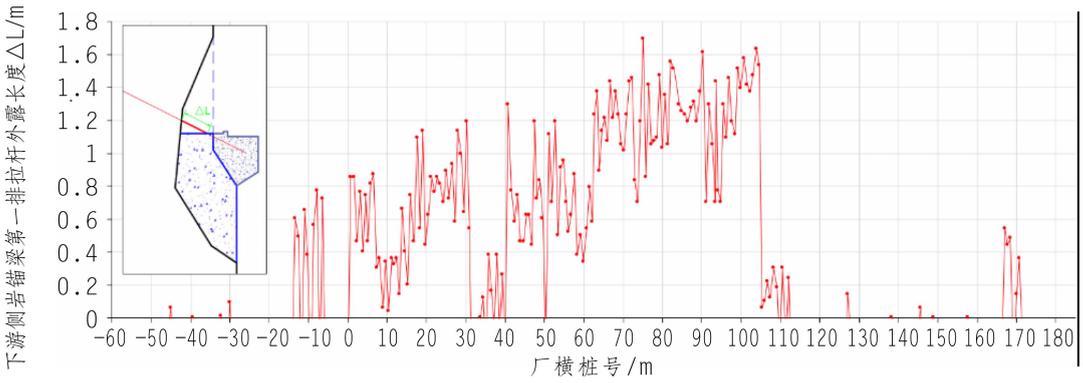
由于厂房二层开挖过程中岩石超挖较多,且未根据情况进行体型修复,导致上下游侧岩壁吊车梁,均存在第一排拉杆未入岩,在超挖部位直接暴露于空气中的情况,上游侧总计外露约64根,下游侧总计外露约160根,岩壁吊车梁拉杆直接外露见图1。岩壁吊车梁拉杆外露分布图见图2。



图1 岩壁吊车梁拉杆直接外露



(a)上游侧岩壁吊车梁第一排拉杆外露长度统计表



(b)下游侧岩壁吊车梁第一排拉杆外露长度统计表

图 2 岩壁吊车梁拉杆外露分布图

1.2 岩壁吊车梁开裂现象

厂房下游侧岩壁吊车梁几乎无大的破坏现象,裂缝多表现为相邻段梁体在结构缝部位的略微张开与错台。主厂房上游侧岩壁吊车梁及上部构造柱裂缝显著较下游侧发育。主要包括上部构造柱开裂、岩壁吊车梁/构造柱与岩壁脱开、岩壁吊车梁轨道二期坑槽外侧墙体纵向顶托、岩壁吊车梁横向裂缝等 4 种破坏型式。

①上部构造柱开裂主要范围为 2 号机组~3 号机组,其裂缝特征为:柱体裂缝主要有左右贯通柱体的竖向裂缝、沿柱体横截面的水平裂缝以及倾向洞内侧的斜向裂缝;裂缝多表现为张开裂缝、“张开+错动”裂缝;左右贯通柱体的竖向裂缝距

柱外侧临空面约 60 cm。

②岩壁吊车梁/构造柱与岩壁脱开裂缝,上游侧岩壁吊车梁在(厂横)0+45.5~0+54.3 m,以及(厂横)0+62.9~0+76.3 m 段存在岩壁吊车梁梁体与岩壁脱开的现象。其裂缝特征为:岩壁吊车梁与岩壁张开部位,其上部构造柱与岩壁面伴随张开;3 号机组段上游梁段岩壁吊车梁与岩壁张开缝向小桩号一直延伸至 2~3 号机组段上游梁段构造缝处断开。

③岩壁吊车梁轨道二期槽外墙纵向顶托破坏,其裂缝特征为:结构缝两侧相邻梁体上部轨道二期槽外侧矮墙出现挤压凸起、错台。岩壁吊车梁开裂见图 3。



(a)岩壁吊车梁与岩壁脱开

(b)轨道外墙破坏

图 3 岩壁吊车梁开裂

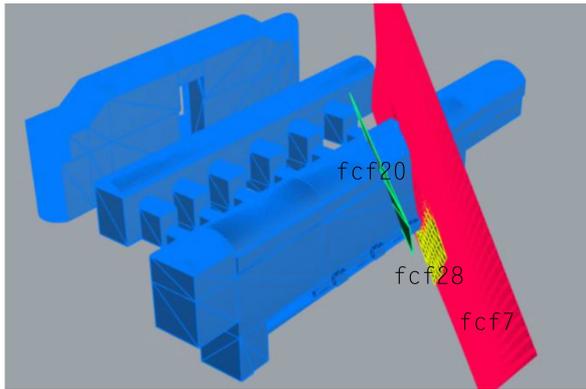
④岩壁吊车梁梁体横向裂缝

岩壁吊车梁横向裂缝宽度大多在 0.1~0.2 mm,长度延伸较短,上游侧约 15 条,下游侧约 5 条。

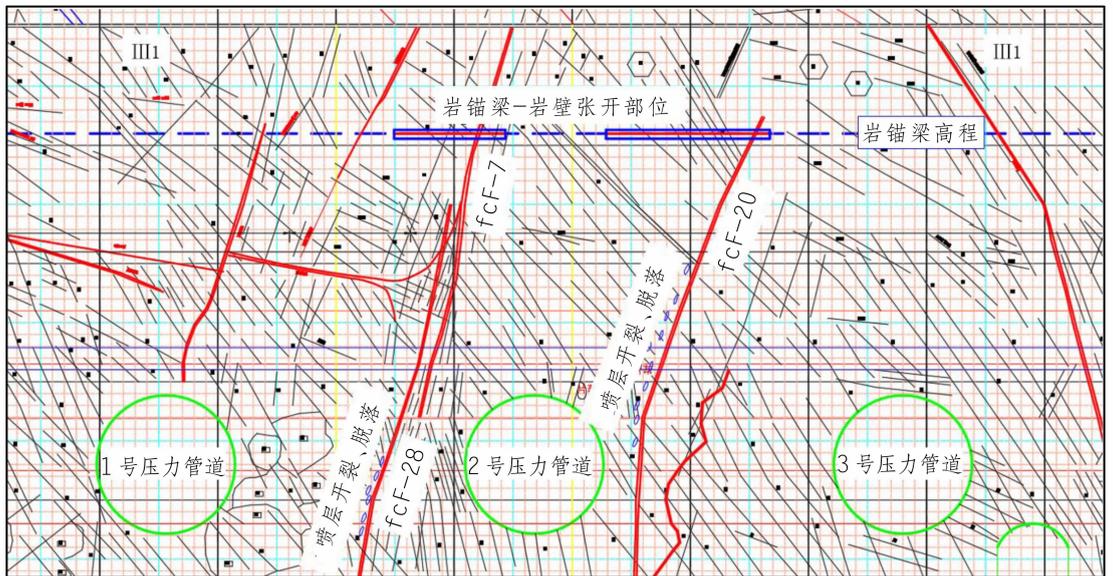
2 地质条件及现场监测数据

从开挖揭示的地质条件可知,2 号机组段上游梁段、岩壁吊车梁/构造柱与岩壁张开裂缝部位,发育有 fcf_{07} 断层;3 号机组段上游梁段、岩壁

吊车梁/构造柱与岩壁张开裂缝部位,发育有 fcf_{20} 断层; fcf_{28} 出露在厂房上游边墙中下部,产状与 fcf_{07} 基本一致、位置临近。在岩壁吊车梁浇筑后、主厂房下卧开挖过程中,上游边墙喷混沿 fcf_{28} 及 fcf_{20} 有开裂现象。在断层的上盘,一定区域范围内岩壁吊车梁与岩壁张开;在断层下盘,岩壁吊车梁与岩壁贴合未张开。主厂房上游边墙地质条件见图 4。



(a) fcf_{07} 、 fcf_{28} 、 fcf_{20} 及厂房结构三维模型



(b) 主厂房上游边墙地质编录

图 4 主厂房上游边墙地质条件

根据微震监测数据显示,高程 2 711.00 m 位置,主厂房上游厂横 0+80 附近(3 号机组中心线),微震事件较为集中,说明岩体内部微破裂较为活跃,岩体内部损伤程度较高,且破裂集中深度在距离主厂房上游边墙 10~25 m 处。另外,根据主厂房高程为 2 715.00 m 上游侧岩体质量检测孔单孔声波、全景图像测试结果及地质资料可得如下

初步结论:①主厂房高程为 2 715.00 m 上游侧岩体质量检测孔孔口低波速深度介于 2.0~3.0 m 之间。其中孔口低波速孔段岩体平均波速为 4 296 m/s,孔口低波速孔段以里(低波速孔段)岩体平均波速为 4 091 m/s;孔口低波速孔段以里(除低波速孔段外)岩体平均波速为 5 060 m/s,完整性系数为 0.71,岩体较完整。②主厂房高程

为 2 715.00 m 上游侧共 3 个岩体质量检测孔全景图像揭示, 孔口低波速孔段裂隙较发育, 岩体完整性差~较破碎; 孔口低波速孔段以里岩体整体较完整, 局部发育闭合~张开裂隙; 部分孔段裂隙较发育, 岩体完整性差。岩体质量声波测试成果曲线, 与全景图像成果之间对应关系良好。

3 岩壁吊车梁破坏机理分析

结合岩壁吊车梁及其上部构造柱开裂特征、主厂房上游边墙地质条件、主厂房上游边墙喷混凝土开裂特征、主厂房上游边墙岩壁吊车梁高程变形监测数据、微震测试成果及物探测试成果, 经分析开裂机理如下:

①在主厂房不断下卧开挖、洞周岩体应力调整过程中, 主厂房上游边墙在断层 f_{cf_7} ($f_{cf_{28}}$) 及断层 $f_{cf_{20}}$ 上下盘产生的较大不连续变形, 是诱导

岩壁吊车梁及其上部构造柱开裂破坏的最直接因素。主厂房下卧位移分布云图见图 5。

②受断层上下盘不连续变形影响, 相邻构造缝间的一段岩壁吊车梁梁体, 在断层出露部位变形较大一侧梁体随岩体同步变形; 在断层出露部位另一侧岩体位移陡减, 但梁体为刚性构件, 变形需逐渐过渡; 在断层出露部位变形较小一侧一定范围内, 梁体与岩壁变形不协调产生张开缝, 梁体与岩壁变形不协调产生张开缝, 见图 6。

③当相邻构造缝间的一段岩壁吊车梁梁体范围内, 岩体水平径向收敛变形呈现非线性变化时, 岩壁吊车梁梁体正截面将承受弯矩, 当正截面拉应力超过截面抗拉强度时, 梁体横向开裂, 正截面拉应力超过截面抗拉强度梁体横向开裂见图 7。

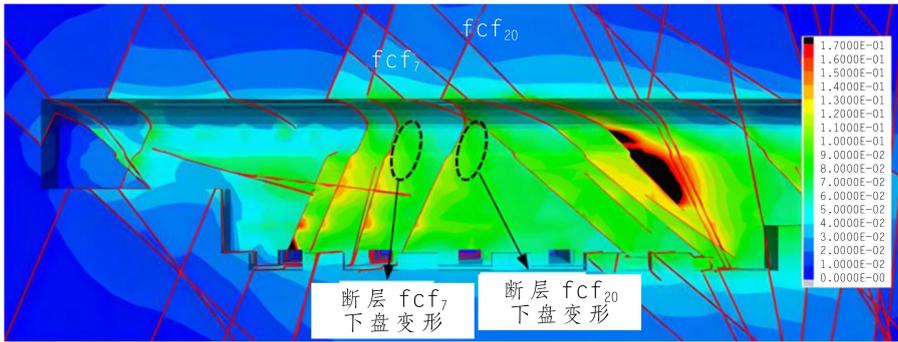


图 5 主厂房下卧位移分布云图

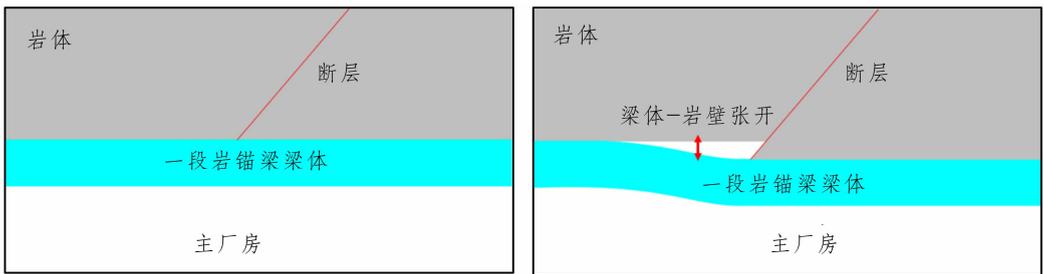


图 6 梁体与岩壁变形不协调产生张开缝

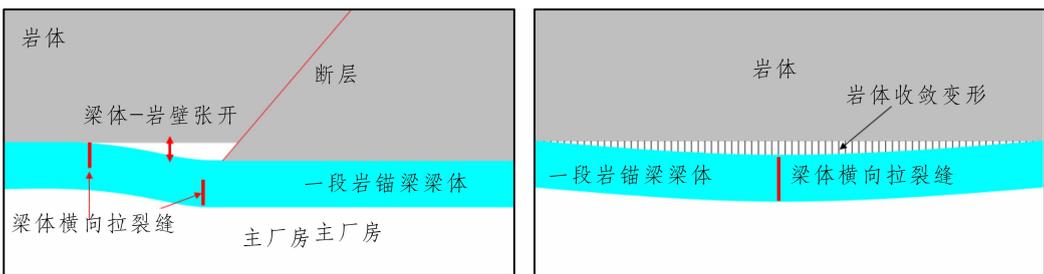


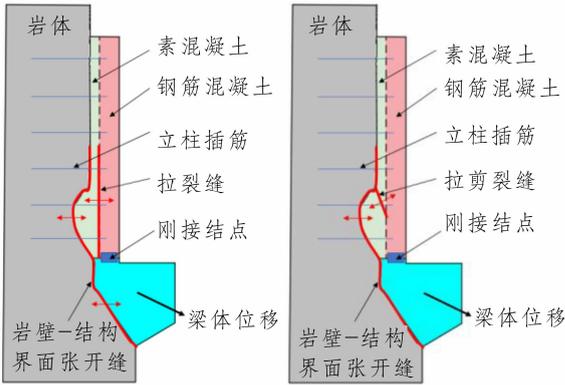
图 7 正截面拉应力超过截面抗拉强度梁体横向开裂

④地下厂房轴向与优势断层走向呈约 40° 夹角, 在厂房下卧开挖岩体应力调整过程中, 沿断层

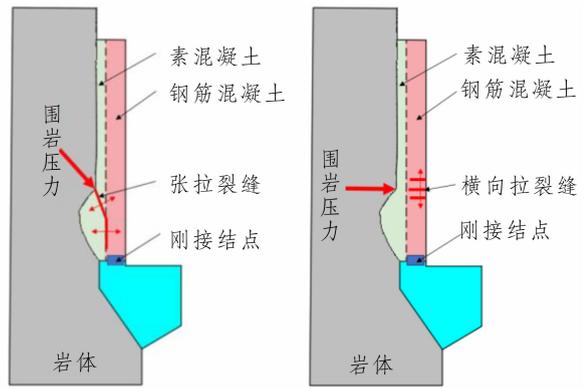
面的剪切变形会产生沿厂房轴向方向的水平分量, 当构造缝相邻两侧岩壁吊车梁梁体受各自区

域岩体变形影响水平位移不协调时,在构造缝部位相邻梁体会产生张拉/挤压。当承受挤压荷载作用时,岩台结构缝外侧矮墙(薄弱部位)出现挤压凸起、开裂;当承受张拉荷载作用时,岩台结构缝出现张开缝。同理,当构造缝相邻两侧岩壁吊车梁梁体受各自区域岩体变形影响竖向位移不协调时,在构造缝部位会相邻梁体产生错台。

⑤对于岩壁吊车梁上部构造柱,其可能承受两方面荷载:一方面由岩体变形引起的作用在“构造柱—岩壁”界面的围岩压力,另一方面由底部岩壁吊车梁变形引起的作用在“柱—梁”结点上的附加荷载。两种荷载引起的构造柱开裂模式,岩壁吊车梁梁体位移引起的构造柱开裂模式见图8,围岩压力引起的构造柱开裂模式见图9。结合实际构造柱开裂特征,分析认为该工程构造柱开裂主要由构造柱下部岩壁吊车梁梁体位移及围岩压力引起。



(a) I型开裂模式 (b) II型开裂模式
图8 岩壁吊车梁梁体位移引起的构造柱开裂模式



(a) I型开裂模式 (b) II型开裂模式
图9 围岩压力引起的构造柱开裂模式

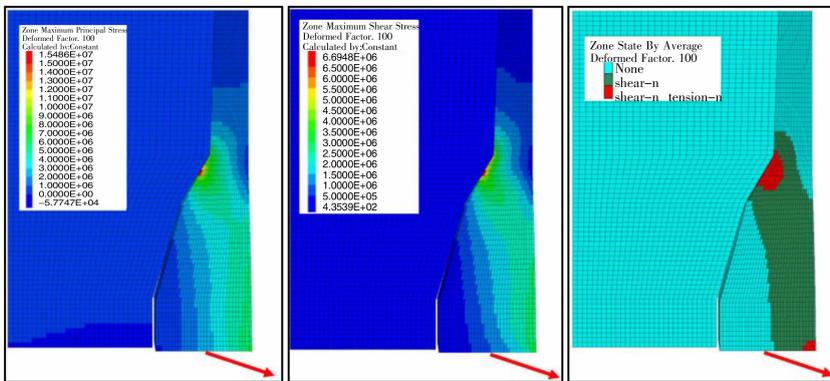
⑥针对构造柱下部岩壁吊车梁梁体位移引起的II型开裂模式,在下部梁体产生向下及向洞内的位移边界时,柱体在截面变化部位会形成拉、剪应力集中,沿斜向产生张剪裂缝。岩壁吊车梁梁体位移引起的II型开裂模式见图10。

4 处理措施及长期运行安全性评价

4.1 处理措施

根据现场现象,监测资料反映的规律,统筹考虑系统支护方案,设计开展了数值计算,并综合多种信息深入分析后,主要处理措施如下:

①对拉杆未入岩的处理。考虑拉杆受力及结构耐久性问题,为了确保安全,需对岩壁吊车梁上部因超挖影响拉杆的区域进行处理。采用混凝土C25W8F200(二)回填,回填混凝土区域增加一排预应力锚杆 $\Phi 32@1.5\text{ m}(T=120\text{ kN},L=9.0\text{ m})$,混凝土表面设置钢垫板压条,并兼做预应力锚杆



(a)最大拉应力 /pa (b)剪切应力/pa (c)剪切应力

图10 岩壁吊车梁梁体位移引起的II型开裂模式

垫板。钢垫板厚度20 mm,宽度30 cm,岩壁吊车梁拉杆未入岩处理措施见图11。

②对上游侧岩壁吊车梁增设附壁墙进行加固

处理。在2号机组段上游侧(厂横)0+031.71~0+062.89、3号机组段上游侧(厂横)0+062.91~0+094.09区域岩壁吊车梁以下、发电机层以上

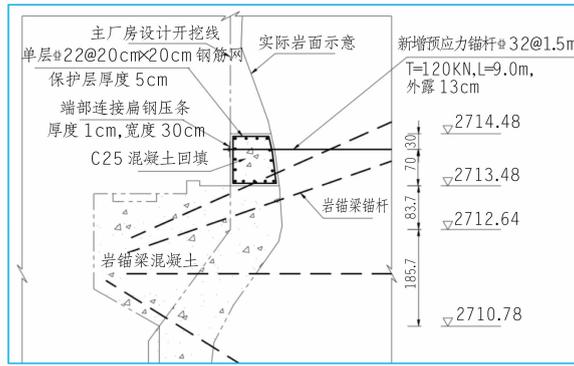


图 11 岩壁吊车梁拉杆未入岩处理措施

增加钢筋混凝土扶壁墙, 墙厚 60 cm, 根据计算结果, 扶壁墙受力钢筋采用 $\Phi 28@20$ 。

4.2 岩壁吊车梁长期运行安全性评价

(1) 拉杆入岩深度的复核。考虑岩壁吊车梁的拉杆部分外露, 后期的修复回填, 为了防止胶结材料与孔壁间、胶结材料与锚杆间发生黏结锚固破坏, 需要对拉杆伸入新鲜岩体的深度进行复核计算。经计算, 对于Ⅲ类围岩, 岩壁吊车梁深入新鲜岩体深度不小于 4.7 m。根据物探检测成果, 岩壁吊车梁总体松弛深度在 2.0~3.0 m。岩壁吊车梁深入新鲜岩体的深度最小为 5.4 m, 大于规范要求的拉杆深入新鲜岩体深度。

(2) 附壁墙计算。采用 FLAC3D 数值仿真分析软件, 构建计算分析模型, 开展运行期桥机荷载作用下结构受力计算。基于计算结果开展如下工作: ① 附壁墙抗滑稳定性分析; ② 附壁墙内力配筋计算。

① 初始计算条件

根据增设附壁墙加固处理设计方案, 计算分析模型及网格见图 12: 取单位延米进行计算分析; $F_{\text{桥机运行荷载}} = (35.81, 981.70) \text{ kN/m}$; $F_{\text{锚索等效荷载}}$ 取锚索锁定荷载对应单位延米等效荷载 ($0.7 \times 2000 \text{ kN}$ /锚索间距); 锚筋束采用 cable 结构单元模拟。在岩壁吊车梁—岩体、岩壁吊车梁—附壁墙及附壁墙—岩体间设置不连续接触界面, 界面采用接触面单元 interface 模拟, 并对界面取不同强度参数进行敏感性分析, 界面强度参数见表 1。

② 计算结果

运行期桥机荷载作用下, 运行期荷载作用下附壁墙正截面内力计算结果见表 2。

③ 附壁墙抗滑稳定性分析

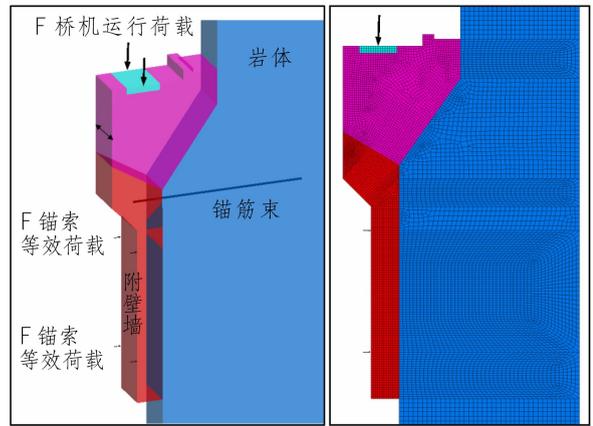


图 12 计算分析模型及网格

表 1 界面强度参数

参数 方案	面 1		面 2		面 3	
	f'_k	c'_k /(N/mm ²)	f'_k	c'_k /(N/mm ²)	f'_k	c'_k /(N/mm ²)
1	0	0	0	0		
2	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5
3	0.5	0.5	0.5	0.5		
4	0.7	0.7	0.7	0.7		

运行期荷载作用下附壁墙抗滑稳定安全系数见表 3。

④ 附壁墙内力配筋计算

运行期荷载作用下附壁墙水平正截面配筋计算结果见表 4。

综上, 桥机荷载作用下的运行安全性计算表明, 通过增设的钢筋混凝土扶壁墙, 可以满足岩壁吊车梁安全运行。

5 结论

叶巴滩水电站岩壁吊车梁在开挖过程中出现了岩壁吊车梁拉杆直接外露、岩壁吊车梁开裂等破坏现象, 根据锚梁及其上部构造柱开裂特征、主

表2 运行期荷载作用下附壁墙正截面内力计算结果

参数方案	截面1		截面2		备注
	轴力 /kN	弯矩 /(kN·m)	轴力 /kN	弯矩 /(kN·m)	
1	-743.05	416.78	-749.91	342.76	
2	-956.03	211.00	-945.47	160.57	
3	-1 014.20	182.63	-974.44	141.41	
4	-1 014.18	183.51	-974.78	142.03	

表3 运行期荷载作用下附壁墙抗滑稳定安全系数

参数方案	扶壁墙受力		f 提供抗剪 /kN	c 提供抗剪 /kN	安全系数
	fz /kN	fx /kN			
1	710.69	422.85	199.66	2 500.00	3.80
2	923.64	67.05	242.02	2 500.00	2.97
3	982.22	34.82	245.86	2 500.00	2.80
4	982.21	35.15	245.82	2 500.00	2.80

表4 运行期荷载作用下附壁墙水平正截面配筋计算

参数方案	截面1		截面2		截面配筋 /mm ²
	轴力 /kN	弯矩 /(kN·m)	轴力 /kN	弯矩 /(kN·m)	
1	-743.05	416.78	-749.91	342.76	1 466
2	-956.03	211.00	-945.47	160.57	1 200
3	-1014.20	182.63	-974.44	141.41	1 200
4	-1014.18	183.51	-974.78	142.03	1 200

厂房上游边墙地质条件、主厂房上游边墙喷混开裂特征、主厂房上游边墙岩壁吊车梁高程变形监测数据、微震测试成果及物探测试成果,对吊车梁开裂机理进行深入分析,并对吊车梁拉杆未入岩段进行处理,对岩壁吊车梁拉杆伸入新鲜岩体的深度进行复核,对岩壁吊车梁与岩壁脱开的部位设置附壁墙进行处理,岩壁吊车梁长期运行安全基本有保证。

参考文献:

[1] Xiaolong Li, Chong Zhang, Jianhua He, Xingfu Deng, Creep Mechanical Properties of Granite under Combined Axial Compression and Water Pressure and Support Characteristics of Surrounding Rock [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022; Article ID 2443561.
 [2] 潘建立. 岩壁吊车梁施工新技术[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 59-64.
 [3] 余健,刘蕊,郭鹏. 大型抽水蓄能电站地下厂房岩壁吊车梁

施工技术[J]. 东北水利水电, 2023, 41(5): 19-22, 45.
 [4] 王小威,陈俊涛,谢金元,等. 地下厂房岩壁吊车梁接触面非线性有限元模拟方法[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4): 70-77.
 [5] 周建平,张孝松,戴谦训. 大朝山水电站地下厂房岩壁吊车梁施工技术[J]. 水电站设计, 2000, 16(4): 18-22.
 [6] 刘文. 大跨度地下厂房岩壁吊车梁结构施工过程受力与变形计算和监测分析[J]. 隧道建设, 2010, 30(5): 528-534, 585.
 [7] 陈强,周先雁. 岩壁吊车梁稳定性影响因素模糊灰色关联分析模型及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 3488-3495.

作者简介:

韩国君(1983-),男,内蒙人,工程师,学士,项目部门副主任,主要从事水电站工程建设管理;
 秦洋(1994-),男,陕西渭南人,工程师,硕士,从事水电设计及岩土工程仿真分析工作。

(编辑:廖益斌)