

巴塘水电站边坡锚索预应力损失原因分析

肖仕进, 马继峰, 范正春

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 成都 610036)

摘要: 预应力锚索是由锚头、高强钢丝或高强钢绞线和锚固件组成、通过对高强钢丝或钢绞线施加预应力对被锚固体提供主动支护抗力的锚固结构^[1]。印度尼西亚巴塘水电站的开挖边坡高达 200 多 m, 为了保证边坡稳定, 对边坡进行了预应力锚索支护, 但该工程的锚索预应力整体表现为衰减损失。对锚索预应力损失产生的原因进行了研究, 阐述了对引起锚索预应力损失的各种因素进行的相关分析, 结合其他监测成果找出了引起预应力衰减的主要原因, 其结果已得到相互验证。

关键词: 巴塘水电站; 锚索预应力; 损失; 原因; 监测

中图分类号: TV7; TV52; TV223.3

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)03-0044-03

Analysis on the Causes of Prestressed Loss of Slope Anchor Cables in Batang Toru Hydropower Project

XIAO Shijin, MA Jifeng, FAN Zhengchun

((Sinohydro Bureau 10 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610036)

Abstract: Prestressed anchor cables are anchoring structures composed of anchor heads, high-strength steel wires or high-strength steel strands and anchors. By applying prestress to high-strength steel wires or steel strands, active support and resistance are provided to the anchored body. The excavation slope of Batang Toru Hydropower Project in Indonesia is more than 200 meters high. In order to ensure the stability of the slope, prestressed anchor cables were used to support the slope. The overall performance of the anchor cable prestress in this project was attenuation loss. In order to study the reasons for the anchor cable prestress loss, this article analyzes the various factors causing the anchor cable prestress loss, and combines other monitoring results to obtain the factors causing the prestress attenuation. For the main reason, the results have been mutually verified.

Keywords: Batang Toru Hydropower Project; Anchor cable prestress; Loss; Cause; Monitoring

1 概述

巴塘水电站位于印度尼西亚北苏门答腊省南部的巴丹托鲁河中下游, 装机容量为 4×127.5 MW, 总装机容量为 510 MW, 多年平均发电量为 $2\,228.14$ GW·h, 为印度尼西亚在建的最大水电站, 建成后可有效缓解该国电力供应紧张局面, 堪称印度尼西亚的“三峡工程”。该电站的坝顶高程为 436.00 m, 坡顶高程约为 567.00 m, 其边坡的开挖从坡顶削至坝基(坝基高程为 362.00 m)高达 200 多 m 且坡度较陡。为了较好地了解开挖后的边坡变形情况及锚索和锚杆对边坡的锚固效果, 分析开挖边坡的稳定情况, 项目部在坝肩以上的开挖边坡分两个断面布置了监测仪器, 对边坡的变形、支护锚杆应力、预应力锚索进行监测。

该电站左岸坝肩边坡布设的监测仪器种类为

多点位移计、锚杆应力计和锚索测力计。其中 1—1 断面分别在 451.00、481.00、511.00 m 高程处各布置了 1 套多点位移计和 1 支锚杆应力计; 在 445.00、490.00 m 高程处各布置了 1 台 1 000 kN 锚索测力计; 2—2 断面分别在 451.00、481.00 m 高程处各布置了 1 套多点位移计和 1 支锚杆应力计; 在 445.00、490.00 m 高程处各布置了 1 台 1 000 kN 级锚索测力计, 共布置多点位移计 5 套, 锚杆应力计 5 支, 锚索测力计 4 台。

2 锚索监测成果

大坝左岸坝肩边坡共安装了 4 台锚索测力计, 其设计编号分别为 TAD1—1~TAD1—2 和 TAD2—1~TAD2—2, 参照相关规范^[2]要求整理整编出监测成果。锚索测力计的监测成果见表 1, 左岸边坡锚索预应力变化过程见图 1。

从以上监测成果可以看出: 边坡锚索的设计

收稿日期: 2024-02-10

表 1 锚索测力计监测成果表

仪器编号	高程 /m	锁定日期	锁定荷载 /kN	最大荷载 /kN	最小荷载 /kN	变幅 /kN	当前荷载 /kN	损失率 /%
TAD1-1	445.07	20230323	1 065.4	1 078.8	998.5	80.3	1 013.4	4.9
TAD1-2	490.30	20220925	993.0	993.0	899.7	93.2	908.4	8.5
TAD2-1	445.18	20230322	1 059.6	1 061.6	998.0	63.5	1 013.4	4.4
TAD2-2	490.20	20220924	1 078.8	1 078.8	951.3	127.4	959.8	11.0

注:当前荷载小于锁定荷载,即荷载损失量为正,荷载损失率即为正。

荷载损失率= $\frac{\text{荷载损失量}}{\text{锁定荷载}} \times 100\% = \frac{\text{锁定荷载}-\text{当前(观测时)荷载}}{\text{锁定荷载}} \times 100\%$

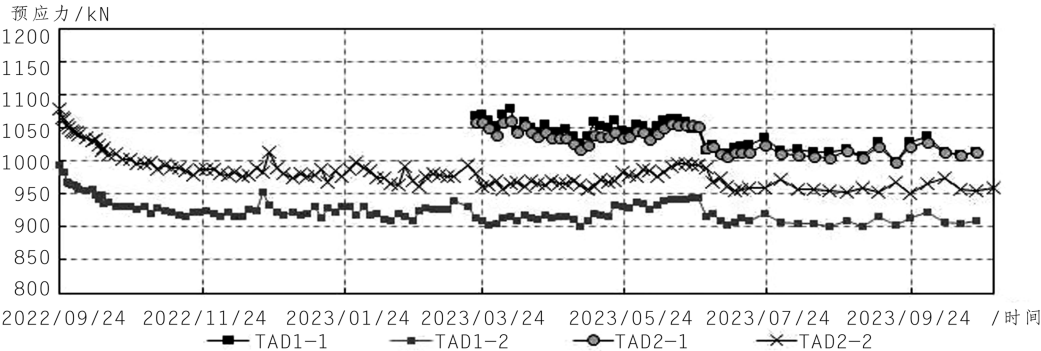


图 1 左岸边坡锚索预应力变化过程线图

荷载为 1 000 kN,锁定荷载在 993.0~1 078.8 kN 之间,平均锁定荷载为 1 049.2 kN,满足相关规范规定锁定应力不小于设计值 90%的要求。锚索锁定后其预应力变化不大,荷载变幅最大为 127.4 kN,当前的预应力(对应表 1 中的当前荷载)在 908.4~1 013.4 kN 之间,现存的平均锚固力为 973.75 kN,占设计荷载的 97.4%。锚索预应力整体有所衰减,平均损失率为 7.2%,仅 445 m 高程的 TAD1-1 和 TAD2-1 锚索损失率相对较小,其平均荷载损失率为 4.65%;而 490 m 高程的 TAD1-2 和 TAD2-2 锚索损失率相对稍大,平均损失率为 9.25%。其中 490.2 m 高程处的 TAD2-2 荷载损失量最大,为 119.0 kN,荷载损失率为 11.0%。但所有锚索测力计荷载均在设计荷载 1 000 kN 的 0.8~1.1 倍之间,锚索荷载属于正常范围。

由于锚索预应力整体发生了衰减损失,特别是荷载损失率最大为 TAD2-2,在此对锚索预应力损失产生的原因进行了分析。

3 造成锚索预应力损失的原因分析

3.1 材料因素

根据以往的经验,灌浆材料、钢绞线及墩头混凝土是产生预应力损失的主要因素。鉴于灌浆浆液材料种类很多,包括水泥浆、黏土浆、水泥砂浆、水玻璃(硅酸钠)类、丙烯酸盐类或环氧树脂类、甲

基丙烯酸酯类和聚氨酯类等多相复合结构,浆液的特点决定了灌浆材料的非均质性和物理性态的复杂性;又因预应力锚索长期处于受荷状态,钢绞线将会因材质自身的松弛而导致其预应力损失。由于锚头一般固定在混凝土土墩上,而墩头本身特别是在其早期具有收缩、蠕变的性质,且其受到预压应力后也会产生一定量的压缩变形,进而引起预应力损失。

3.2 施工及张拉过程

预应力锚索施工操作的规范性对锚索预应力损失有直接影响,其张拉过程中的预应力损失主要由预应力锚索与孔壁的摩擦和张拉千斤顶的摩阻力大小决定^[3]。孔斜偏差越大,锚索与孔壁的摩擦力越大,预应力损失越大;若钻孔平直,锚索安装后不接触孔壁,则其损失很小或不产生预应力损失。在孔斜偏差一定的条件下,锚索张拉荷载越大,预应力损失越大;而因张拉千斤顶的摩擦损失很小,其可以用超张拉进行消除。此外,预紧效果是否能够满足每根钢绞线同步受力,张拉过程中的加载速率、持荷时间、卸载速率是否能够满足相关规范及设计要求都会对锚索预应力的损失大小有直接的影响。

3.3 卸载锁定

锚索张拉程序完成后,张拉千斤顶卸荷时其仅靠工作锚板锁定锚索。锁定时,所安装的锚具

夹片会随钢绞线往锥孔内回缩而夹紧钢绞线以达到锁定的目的,此时钢丝或钢绞线均会产生一定量的回缩,并且在钢绞线回缩的过程将导致一定的锁定预应力损失^[4]。回缩量的大小决定了锚索预应力损失的大小。锚索锁定后,其回缩量的大小与锚夹具的设备和制造工艺有关,其可以通过检测设备测量得到并可以通过超张拉施工工艺和补偿张拉进行补偿。该工程卸载锁定的损失和张拉千斤顶的摩擦损失都是通过超张拉和补偿张拉进行弥补的,其锁定损失荷载为 97.2~206.1 kN,平均损失为 146.5 kN,平均损失率为 10%。

3.4 岩土体变形

岩土体在预应力锚索作用下会产生压缩变形,且该变形非常缓慢和微小,即徐变和蠕变。蠕变主要发生在应力集中区,即靠近自由段区域与锚头以下的锚固结构表面。徐变的速率和蠕变的大小主要与岩土体的岩性有关,岩性好,其压缩量小,徐变速率快,蠕变量小;岩性差,岩体之间存在软弱带、土体夹层等,其压缩量就大,蠕变量大,徐变速率缓,岩土体会向坡内压缩,钢绞线会发生松弛是预应力发生损失的重要因素之一。

3.5 群锚效应

预应力锚索主要是通过预应力钢绞线具有的较高的抗拉强度和一定程度的抗剪能力加固土体的,同时其还利用所施加的预应力锁紧松动的岩体以提高其摩擦阻力。而施加在锚索上的预应力荷载则通过锚固段传递给下伏的稳定岩体,群锚效应即是通过稳定岩体内的应力场叠加产生影响。任何部位的预应力锚索加固措施的实施都不可能仅用一根锚索,也就是说,任何预应力锚索加固措施都或多或少地存在群锚效应。然而,预应力锚索群锚效应的大小都会受到多个因素影响,这些影响因素主要包括:锚索群的数量和布置方式、锚索的预应力大小和传力路径、土体的性质和变形特征及周围环境等。

3.6 周围环境的影响

边坡开挖产生的爆破振动和冲击效应会引起预应力损失,且该损失量较之长期静荷载作用引起的预应力损失量大得多^[5]。该工程锚索荷载在监测过程中发生的微小波动的主要原因也是因为边坡开挖爆破振动影响所致。对于节理、裂隙较为发育、渗透系数较大的岩土体,降雨会使裂隙被

渗水充填后产生湿胀后引起锚固应力的增加,随着裂隙水、孔隙水的消散,所增加的锚固预应力也会消散而发生预应力损失,导致其基本回到降雨前的预应力水平;岩体温度升高亦会导致锚固力增加,降温则使岩体收缩而导致其锚固力减小。同时,温度的变化亦会引起钢绞线变形而导致锚索预应力的变化。

3.7 其他因素

锚索张拉过程中的现场监测成果表明:锚索测力计受力不均会引起锚索预应力的损失。另外,墩头混凝土浇筑及锚垫板的平整度、夹片与钢绞线的咬合程度、灌浆质量等都会引起锚索预应力的损失。

4 相关分析

笔者对位于 490.20 m 高程处荷载损失率最大的锚索测力计 TAD2-2 附近的多点位移计和锚杆应力计取得的监测成果进行了分析并得出以下结论:

(1)锚索张拉锁定后,受岩体徐变和蠕变的影响,岩体呈微小的轴向压缩,其最大压缩量达 0.6 mm;之后,由于多点位移计和锚索测力计的位置相对较远,受锚索张拉锁定锚固影响减弱后岩土体产生回弹、岩土体轴向受压变小,最终表现为稳定、无变形。

(2)锚索张拉前,锚杆应力的变化主要受注浆后温度的影响。锚索张拉锁定后受岩体徐变和蠕变的影响岩体呈微小的轴向压缩,锚杆表现为压应力,其最大压应力达 13.6 MPa;之后,由于锚杆应力计的位置和锚索测力计的位置相对较远,受锚索张拉锁定锚固影响减弱后岩土体产生回弹,锚杆所受到的压应力减小并逐渐表现为微小的受拉状态,最终应力变化趋于收敛。

(3)从施工情况看,TAD2-2 所处位置的高程为 490.20 m,该部位锚索张拉施工时其以下边坡已开挖至 450.00 m 高程左右,应力释放及应力重分布已基本完成,其边坡向外变形趋势较大的阶段已过;从地形地貌及地质条件看,TAD2-2 附近有一冲沟,且在其钻孔过程中发现岩性较差,因此,在锚索张拉过程中存在岩土体受挤压缓慢变形的徐变趋势和向冲沟处的变形趋势,而造成徐变引起钢绞线松弛的可能性较大;从监测成

(下转第 61 页)

现局部矿化、腐岩层出现夹层和砾石(含砾率高),使得原矿石品位分布情况复杂多变,所采出的矿石品位处于一个不断变化的过程。(2)采运工艺中混入的褐铁矿会极大程度地影响到镍矿的品位。褐铁矿含水率通常在 35%以上,其含有的黏土矿物吸附在镍镁矿物颗粒之间,加之堆场因重力和降雨混入的上层或夹层中的低镍褐铁矿对中高品位镍矿的综合品位会造成较大的影响。(3)采矿过程中的机械设备操作手和地质取样人员以及矿山的综合管理也是一个极大的影响因素。作业人员对技术交底不熟悉,取样和挑选矿石作业不标准,主观和经验意识强而取样工作不到位,以上主观因素都会造成品位的贫化。

对此,需要在生产过程中加强地质探矿和取样工作,在保证矿体边界精确的前提下精细取样,为采矿设计提供高质量的地质资料是降低采矿贫化率和损失率指标的重要保证;加强生产现场的管理,将现场地质人员责任划分清楚,落实工作面的开采情况,以取样结果判定现场品位分布,及时圈定作业范围并在现场做好标记;提升管理水

(上接第 46 页)

果看,荷载降低速率较快的时间段主要发生在张拉施工时间段及施工后 1 个月内,一个月后趋于稳定,目前荷载损失率基本稳定在 11%。

5 结 语

锚索锚固锁定后,锚固预应力的变化大致可分为三个阶段:第一阶段,由于锚索钢绞线松弛、岩土体受压缩发生徐变、流变、蠕变及群锚效应等导致锚索预应力快速损失;第二阶段,由于岩土体内部应力调整及重分布、压缩回弹等因素导致预应力发生波动;第三阶段分边坡稳定和不稳定两种情况,若边坡岩性较好,岩体完整,变形收敛,边坡稳定,则预应力趋于平稳变化;若边坡岩性较差,岩体裂隙发育,边坡不稳定,朝坡外位移趋势明显,则预应力将持续增大。分析认为:该工程符合三阶段规律,只是第三阶段属于边坡稳定情况。

研究表明:该工程边坡当前的荷载整体小于锁定荷载,主要为锚索卸压锁定钢绞线回缩、锚固体发生徐变、钢绞线松弛和群锚效应等引起的锚索预应力减小。目前锚索预应力没有增大的趋

势,培养当地的专业地质人员,将品位控制流程和技术方案严格交底、严格执行,降低主观因素影响;培养专业设备操作手,配合取样人员精细作业以降低镍矿的贫化率和损失率。

参考文献:

[1] 杨明德,杨玉华.印度尼西亚苏拉威西岛-北马露姑群岛区域地质构造背景及其对蛇绿岩、红土型镍矿规模的控制[J].矿产与地质,2015,29(6):722-725,739.

[2] 韩其仁.红土型镍矿控矿因素及勘查技术方法[J].世界有色金属,2017,32(19):119,121.

[3] 付伟,牛虎杰,陈远荣,等.超基性岩红土风化壳中镍的表生富集规律及矿化结构研究——以印尼苏拉威西岛Kolonodale矿区为例[J].矿床地质,2012,31(2):229-240.

[4] 彭万坤,何灿.印尼北科纳威镍矿区D块段红土型镍矿矿体地质特征及探采浅析[J].世界有色金属,2016,31(4):91-93.

[5] 李纪玉,陈广宁,刘福安,张忠辉.采矿损失贫化管理的探讨[J].黄金,2006,27(6):24-26.

作者简介:

刘 李(1984-),男,陕西商洛人,副高级工程师,一级建造师,从事矿业工程施工技术与管理工作。

(编辑:李燕辉)

势,其变化过程基本保持平稳收敛,表明边坡没有向坡外临空面位移的趋势,这一点经与附近多点位移计、锚杆应力计取得的监测成果相互印证,其预应力的微小波动主要受坝基开挖爆破的影响,符合相关变化规律,边坡趋于稳定。

参考文献:

[1] 水电水利工程边坡施工技术规范:DL/T 5255-2010[S].

[2] 水电工程边坡安全监测技术规范:DL/T 5796-2019[S].

[3] 温彦良,常来山,张治强.锚索预应力损失变化规律的数值试验研究[J].中国矿业,2010,19(10):91-100.

[4] 朱哈迓,孙红月,汪会帮,等.边坡加固锚索预应力变化规律分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2756-2760.

[5] 张立刚.边坡加固锚索预应力损失因素与实例分析[J].山西建筑,2010,36(8):114-116.

作者简介:

肖仕进(1989-),男,贵州普安人,一级建造师,工程师,学士,从事建筑工程安全监测与施工技术工作;

马继峰(1987-),男,甘肃岷县人,工程师,从事基础处理施工技术与管理工作;

范正春(1974-),男,重庆忠县人,副高级工程师,从事建筑工程施工技术与管理工

(编辑:李燕辉)