

两河口水电站库区岩石高边坡开挖卸载支护技术研究

姜炳松¹, 谷再兴^{2*}, 巫 钺³, 李燕鹏⁴, 岳 帅²

¹雅砻江流域水电开发有限公司两河口建设管理局, 四川 成都

²雅砻江流域水电开发有限公司两河口抽水蓄能建设管理局, 四川 成都

³雅砻江流域水电开发有限公司两河口水力发电厂, 四川 成都

⁴雅砻江流域水电开发有限公司新能源管理局, 四川 成都

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年3月23日; 发布日期: 2025年4月7日

摘 要

高边坡具有高度大、边坡陡、失稳危害大等特点, 加之水电站库区地质条件一般比较复杂, 岩石高边坡的稳定性随着电站蓄水会发生一定程度的变化, 甚至会产生滑坡、坍塌等地质灾害, 严重影响电站蓄水进度和库区百姓的生命财产安全, 因此从安全的角度出发, 对高边坡开展稳定性研究, 具有一定的现实价值和理论意义。本文以两河口水电站鲜水河库区扎拖特大桥左岸高边坡为研究对象, 首先对扎拖左岸开展三维激光扫描, 后根据边坡失稳特点对扎拖特大桥左岸开展爆破开挖卸载及支护施工。结果表明, 对于不稳定的边坡, 根据其潜在失稳区域和岩体特性, 对其采取三维扫描技术分析、动态设计、分层开挖与实施安全监测相结合的方法可有效控制边坡变形。可供类似工程参考。

关键词

两河口水电站, 三维扫描技术, 安全监测, 高边坡开挖, 卸载支护

Research on the Excavation, Unloading and Support Technology of the High Rock Slope in the Reservoir Area of Lianghekou Hydropower Station

Bingsong Jiang¹, Zaixing Gu^{2*}, Cheng Wu³, Yanpeng Li⁴, Shuai Yue²

¹Lianghekou Construction Administration Bureau of Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 姜炳松, 谷再兴, 巫钺, 李燕鹏, 岳帅. 两河口水电站库区岩石高边坡开挖卸载支护技术研究[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 597-606. DOI: 10.12677/hjce.2025.144065

²Lianghekou Pumped Storage Construction Administration Bureau of Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan

³Lianghekou Hydropower Plant of Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan

⁴New Energy Administration Bureau of Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Mar. 23rd, 2025; published: Apr. 7th, 2025

Abstract

High slopes are characterized by great height, steepness, and significant hazards in case of instability. Moreover, the geological conditions in the reservoir area of hydropower stations are generally complex. The stability of high rock slopes will change to a certain extent with the impoundment of the power station, and geological disasters such as landslides and collapses may even occur, which seriously affect the impoundment progress of the power station and the safety of the lives and properties of the people in the reservoir area. Therefore, from the perspective of safety, conducting research on the stability of high slopes has certain practical value and theoretical significance. This paper takes the high slope on the left bank of the Zhatuot Bridge in the Xianshui River reservoir area of the Lianghekou Hydropower Station as the research object. Firstly, 3D laser scanning is carried out on the left bank of Zhatuot. Then, according to the characteristics of slope instability, blasting excavation, unloading, and support construction are carried out on the left bank of the Zhatuot Bridge. The results show that for unstable slopes, according to their potential unstable areas and rock mass characteristics, the combination of 3D scanning technology analysis, dynamic design, layered excavation, and implementation of safety monitoring can effectively control slope deformation. This can provide a reference for similar projects.

Keywords

Lianghekou Hydropower Station, 3D Scanning Technology, Safety Monitoring, High Slope Excavation, Unloading and Support

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 研究背景及意义

在岩土工程或工程地质(地质工程)研究领域,所谓边坡一般指自然斜坡、河流水岸坡、台塬塬边、崩滑流堆积体、以及人工边坡(交通道路、露天采矿、建筑场地与基础工程等所形成)等坡体形态的总称。高边坡指土质边坡高度大于 20 m、小于 100 m 或者岩质边坡高度大于 30 m、小于 100 m。在水电工程建设中,岩石高边坡的开挖与支护是极为关键的环节。岩石高边坡的稳定性直接关乎水电工程的整体安全与稳定运行[1]。若岩石高边坡的开挖与支护处理不当,可能引发滑坡、坍塌等严重地质灾害。这些灾害不仅会对工程本身造成毁灭性的破坏,导致巨大的经济损失,还可能对周边的生态环境和居民生命财产安全构成严重威胁。对高边坡稳定性及支护治理措施的研究是我国水电库区工程领域的热点和难点,到目前为止,很多研究人员进行了岩质边坡稳定性研究和探讨,但是还有很多问题需要解决。

1.2. 国内外研究现状

在岩石高边坡开挖支护领域，国内外学者和工程技术人员进行了大量的研究与实践，取得了丰硕的成果。

国外在该领域的研究起步较早，发展较为成熟。在开挖技术方面，美国、日本等国家广泛应用先进的爆破技术，如预裂爆破、光面爆破等，并通过数值模拟软件对爆破过程进行精确模拟，以优化爆破参数，减少对边坡岩体的扰动[2]。在支护技术上，他们研发了多种新型支护材料和结构，如高强度锚索、自钻式锚杆等，这些材料和结构具有更好的力学性能和耐久性，能够有效提高边坡的稳定性。在监测技术方面，欧美国家普遍采用先进的自动化监测系统，实时监测边坡的变形、应力等参数，及时发现潜在的安全隐患。

国内对于岩石高边坡开挖支护的研究也取得了显著的进展。在开挖方法上，我国结合工程实际，不断创新和改进爆破技术，提出了如微差挤压爆破、缓冲爆破等技术，在确保开挖效率的同时，最大程度地保护了边坡岩体的完整性。在支护技术研究中，我国研发了一系列适合国内地质条件的支护结构和方法，如喷锚支护、土钉墙支护等，这些技术在实际工程中得到了广泛应用，并取得了良好的效果。近年来，随着数值计算方法和计算机技术的飞速发展，我国在岩石高边坡稳定性分析方面取得了重大突破，通过有限元、离散元等数值模拟方法，能够更加准确地预测边坡在不同工况下的稳定性，为工程设计和施工提供了有力的理论支持[3]。

尽管国内外在岩石高边坡开挖支护方面取得了众多成果，但仍存在一些不足之处和待拓展的方向。在理论研究方面，目前对于复杂地质条件下岩石高边坡的力学行为和破坏机制的认识还不够深入，现有的理论模型和计算方法在某些情况下难以准确描述边坡的实际情况，需要进一步加强基础理论研究，完善理论体系。在技术应用方面，虽然已经开发了多种开挖和支护技术，但在实际工程中，如何根据具体的工程地质条件和施工要求，合理选择和优化技术方案，仍然是一个亟待解决的问题。在监测技术方面，虽然已经实现了对边坡变形、应力等参数的实时监测，但对于监测数据的分析和处理能力还有待提高，如何从海量的监测数据中提取有价值的信息，及时准确地判断边坡的稳定性，是未来研究的重点之一[4]。此外，随着环保意识的不断增强，如何在岩石高边坡开挖支护过程中，实现经济效益、社会效益和环境效益的有机统一，也是需要进一步研究和探索的方向。

1.3. 研究工程概况

两河口水电站系雅砻江干流中游规划建设 7 座梯级电站中的第一级，是中游装机规模最大的水电站，是当前已建和在建的世界第三高坝，最大坝高 295 米，是中国藏区综合规模最大的水电站工程。水库正常蓄水位 2865 米，总库容 107.67 亿立方米，调节库容 65.6 亿立方米，I 等大(一)型水库，具有多年调节能力，电站装机容量 3000 兆瓦。其中鲜水河库区位于鲜水河大断裂带，受 2022 年“95”泸定地震及两河口水电站三期蓄水等影响，鲜水河库区扎拖特大桥左岸高边坡发生变形垮塌。

2. 三维扫描监测

2.1. 扫描设备

Table 1. Main technical parameters of the VZ-400i 3D laser scanner
表 1. VZ-400i 三维激光扫描仪主要技术参数

项目	技术指标
空间位置精度	3 mm@50 m 5 mm@100 m
重复精度	3 mm

续表

最大测距	800 m
垂直扫描角度	100° (+60°/-40°)
水平扫描角度	360°

本次三维激光扫描采用奥地利 RIEGL 激光系统公司生产的 VZ-400i 型激光扫描仪，其生产的 VZ-400i 三维激光扫描仪主要技术参数见表 1。

2.2. 扫描方法

以扎拖特大桥监测基点 TN3、TN4 作为扫描站点的基准点，结合现场布设加密扫描站点，按由远到近对目标进行多次多角度的扫描，最后将各站数据在 RIEGL 激光系统仪后处理软件中进行拼接得到最终点云数据。将不同期的点云数据进行构面之后进行比较得出边坡的位移量，加密扫描站的施测方法为：全站仪架设在 TN4，后视 TN3，以导线测量的方式对加密扫描站点进行测量，测回数及限差见表 2，表 3。

Table 2. Requirements for the allowable error of horizontal angle observation at encrypted sites

表 2. 加密站点水平角观测限差要求

项目	限差
测回数	3
半测回归零差	12″
同一测回 2C 互差	18″
同一方向值各测回互差	12″

Table 3. Vertical angle observation limit requirements for encrypted sites

表 3. 加密站点垂直角观测限差要求

项目	限差
测回数	2
指标差较差	10″
测回间较差	10″

2.3. 数据获取

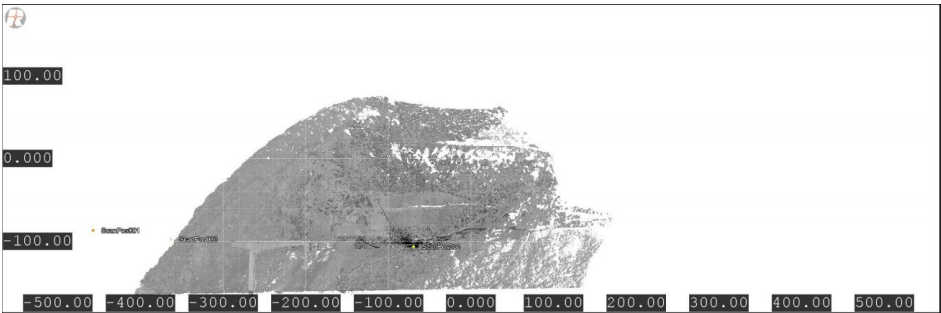


Figure 1. Monochrome preview diagram of the scanning result data

图 1. 扫描成果数据单色预览图

以间隔一周的周期对扎拖高边坡左岸进行两次扫描，共得到两期数据。经数据处理，拼接，裁剪得到点云数据，单色预览图见图 1，真彩色见图 2。

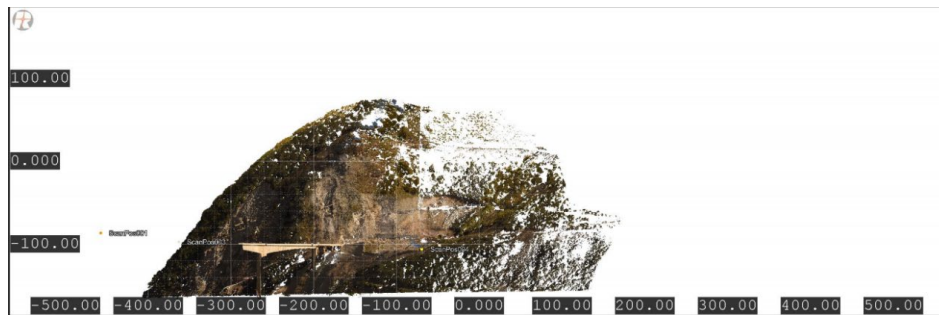


Figure 2. True color preview diagram of the scanning result data
图 2. 扫描成果数据真彩色预览图

根据点云构建曲面模型，再将两期曲面模型叠加进行分析比对。曲面模型预览图如图 3，图 4。

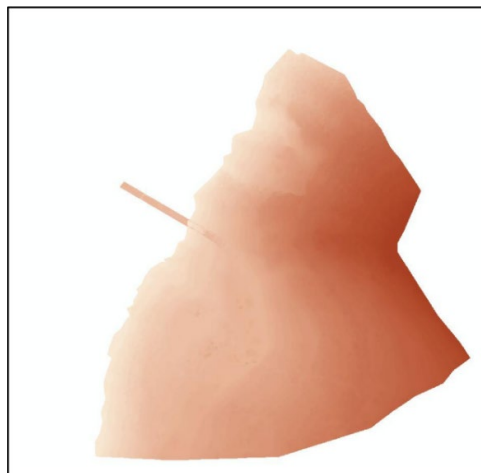


Figure 3. Surface model based on point cloud, Phase I
图 3. 基于点云的曲面模型，第一期

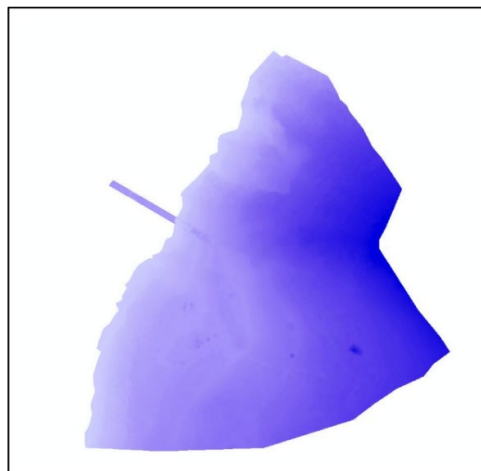


Figure 4. Surface model based on point cloud, Phase II
图 4. 基于点云的曲面模型，第二期

2.4. 数据分析

将两期边坡数据三维模型进行比较，对两个曲面模型做减法分析：以第一次曲面模型为参考数据，用第二次曲面模型减去第一次曲面模型，根据差值量级大小的不同赋予比较图不同颜色，紫色区域为低，绿色区域为高，淡黄色区域则差异很小，模型比较结果如图 5 所示。

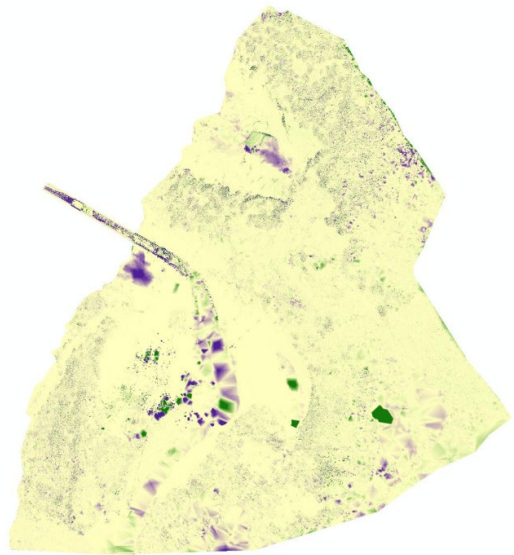


Figure 5. Comparison results of the surface models
图 5. 曲面模型比较结果

经曲面模型对比，确定左岸边坡有两处塌方(紫色区域)，见图 6：区域 1 位于上游 110 m~170 m，高程 2835 m~2935 m，塌方面积约 3000 m²，塌方量 2000 m³；区域 2 位于下游 5 m~35 m，高程 2833 m~2865 m，塌方面积约 800 m²，塌方量约 2500 m³。

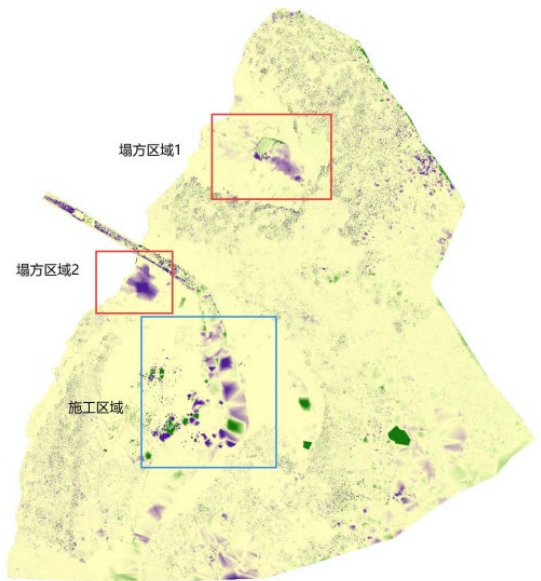


Figure 6. Schematic diagram of the collapsed area
图 6. 塌方区域示意图

2.5. 数据监测

为比对两期数据的位移量，在曲面模型上布设监测断面，从上游至下游塌方区域之外的位置布设 7 条监测断面，断面位置如图 7。

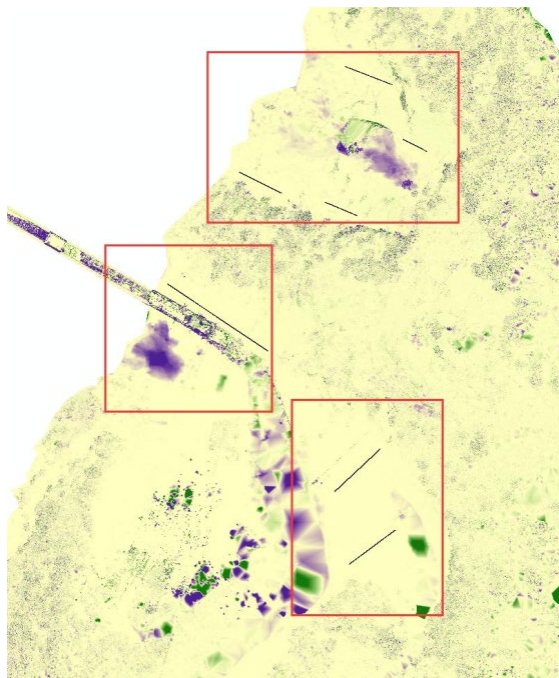
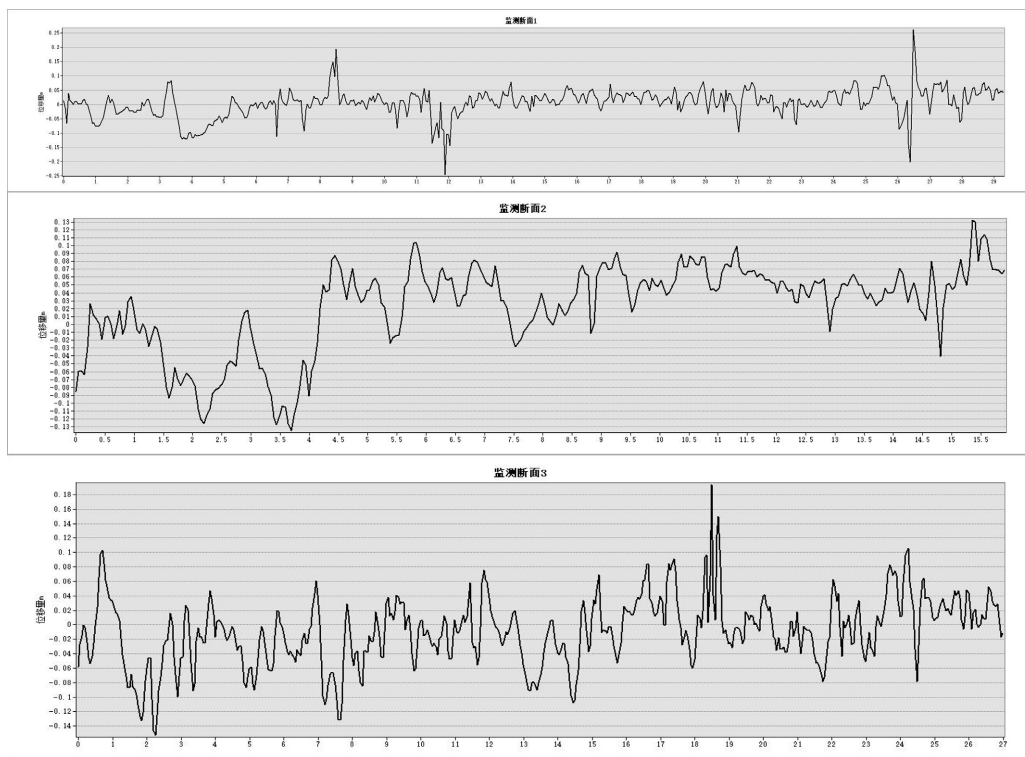


Figure 7. Schematic diagram of the layout of monitoring sections

图 7. 监测断面布置示意图



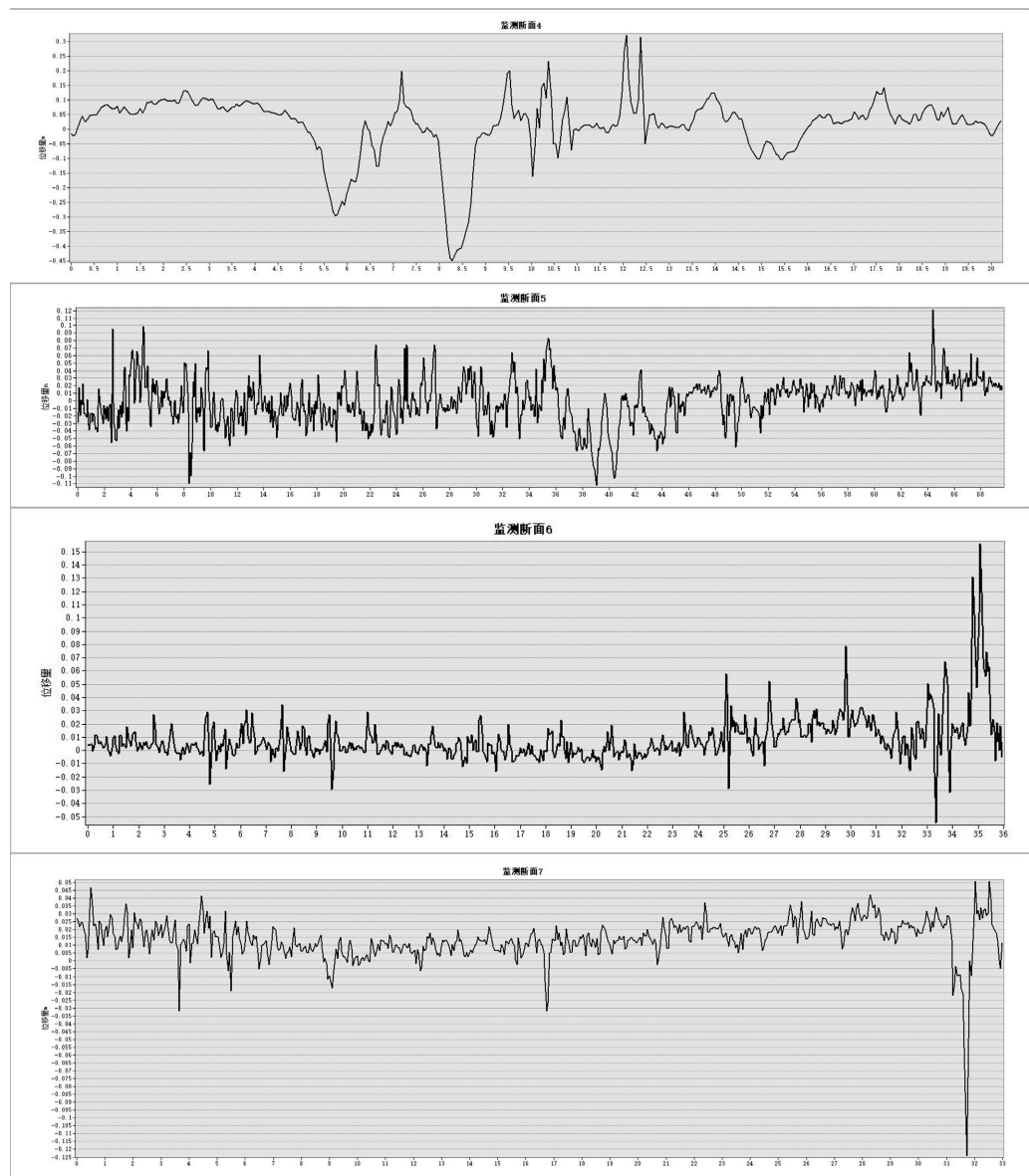


Figure 8. Data of the monitoring section
图 8. 监测断面数据

监测断面数据如图 8，通过监测断面可以看出，排除噪点之后，两期数据的相对变化量大部分在 ± 3 cm 之内，由于激光扫描的为边坡表面地表，有杂草、尘土等干扰因素存在，气象条件的改变会对扫描结果产生影响，综合扫描距离，点云拼接误差，曲面拟合误差等判断，两期数据之间有小幅位移。

3. 高边坡开挖卸载技术

3.1. 施工准备

两河口水电站鲜水河库区位于山区，坡度高，开挖卸载及支护工程量较大，开发深度也较大，而现场施工道路狭窄，大型施工设备在现场难以使用，施工困难。同时现场高边坡施工存在交叉施工等问题，容易影响施工质量。该水电工程库区岩石高边坡的地质条件复杂，地层岩性、地质构造和水文地质条件相互作用，给边坡的稳定性带来了极大的挑战，在开挖和支护过程中，必须充分考虑这些因素，采取合

理的工程措施,确保边坡的稳定。因此根据现场实际地质条件和开挖揭露条件动态调整设计及施工方案,从而确保施工安全有序推进。

3.2. 岩石边坡开挖技术

本次开挖扎拖左岸出露基岩岩性为三叠系新都桥组下段板岩夹变质砂岩,结构面较发育,岩体卸荷强烈;岸坡下游侧为扎拖古滑坡体,上游侧为基岩岸坡,地形坡度较陡,左岸桥位位于上游侧基岩岸坡。2022年9月,受“9·5”泸定地震、两河口水电站第三阶段蓄水、持续降雨等多重因素影响,扎拖特大桥左岸岸坡发生变形垮塌。本次爆破开挖对周边岩体扰动大,且边坡下方有特大桥梁一座,爆破钻孔需精细化控制。根据现场实际地质条件,本文基于两河口水电站鲜水河库区具体工程条件进行研究,左岸开挖边坡142 m,分9级开挖,每层开挖高度15 m,马道平台宽度5 m,兼做施工通道及排水。对开挖需保护保留岩体完整性的区域采用预裂爆破技术,钻孔直径取85 mm,间距0.8 m,线装药密度400 g/m,预裂孔先于主爆孔起爆,时差100 ms。对边坡轮廓面成型区域采用光面爆破技术,钻孔直径60 mm,间距0.8 m,线装药密度300 g/m,光爆孔最后起爆,时差50 ms。对岩体破碎及不宜爆破区域采用机械开挖法,中硬岩用液压破碎锤开挖,软岩及风化岩用铰挖机。

开挖顺序上,采用了自上而下分层开挖和分段跳槽开挖相结合的方式。首先,根据边坡的高度和岩石特性,将边坡划分为9个分层,从边坡顶部开始,逐层进行开挖。在每一层的开挖过程中,又将边坡沿纵向划分为若干个分段,每个分段长度为15 m,间隔开挖各个分段。在开挖第一段时,先使用挖掘机将表层的土方清理掉。然后,采用爆破开挖岩石,为了保护边坡岩体的完整性,在靠近边坡轮廓线的区域采用预裂爆破技术,在主爆区采用多排孔微差爆破技术。在第一段的开挖和支护完成后,再开挖第三段,以此类推。在开挖过程中,加强对边坡的监测,通过布置位移计、应力计和测斜仪等监测仪器,实时掌握边坡的变形和应力情况。

4. 边坡支护技术分析

4.1. 支护技术分类与原理

在水电建设的岩石高边坡工程中,支护技术种类繁多,其中锚杆支护和锚索支护是两种应用广泛且至关重要的支护方式,它们各自凭借独特的工作原理,在增强边坡稳定性方面发挥着关键作用[5]。

锚杆支护是通过将锚杆锚入围岩内部,使锚杆与围岩形成一个整体,共同承受外力作用,从而达到稳定边坡的目的。首先是悬吊作用,对于存在软弱岩层的边坡,锚杆将软弱岩层悬挂在上方坚固稳定的岩层上,防止软弱岩层因自身重力而发生滑落[6]。其次是组合梁作用,在层状岩层的边坡中,通过锚入一系列的锚杆,将锚杆长度以内的薄层岩石锚成岩石组合梁,提高了岩层的抗弯能力和承载能力。此外,锚杆还具有围岩补强作用,巷道周围打锚杆后,部分岩石恢复了三轴受力状态,增大了自身强度,同时锚杆增加了岩层弱面的剪断阻力,使边坡周边围岩不易破坏和失稳。

锚索支护则是利用高强度钢绞线作为锚索,通过施加预应力,将锚索固定在岩石中,从而提高边坡的稳定性。锚索由锚头、自由段和锚固段三部分组成。锚固段是锚索与岩体的连接部分,通过注浆与岩体紧密结合在一起,形成可靠的锚固,为锚索提供稳定的锚固力。自由段是连接锚头和锚固段的中间部分,它具有足够的柔性和抗剪强度,以抵抗在各种环境下的拉伸和弯曲,在锚索受到拉力时,自由段能够有效地传递拉力,使锚固段更好地发挥作用。锚头则与锚索承载体连接,并通过承载体将锚索拉力传递到岩体,是施加预应力和锁定锚索的关键部位。在施工过程中,通过张拉设备对锚索施加预应力,使锚索对边坡岩体产生主动的约束作用,增加了岩体的摩擦力和粘聚力,从而提高了边坡的稳定性。

4.2. 边坡支护技术

两河口水电站鲜水河库区扎拖左岸高边坡开挖揭示岩体破碎, 马道难以成型, 施工过程中存在马道垮塌的安全风险, 首先对马道增设锁口锚杆进行加固处理, 具体为在 1 至 4 级马道岩体破碎段增设一排 $\Phi 28$ 竖向锁口砂浆锚杆, 实施位置为距马道外侧 0.5 m 处, 锚杆长度 $L=6$ m, 间距 2 m; 马道铺设 $\Phi 6$ 钢筋网并与上下级边坡连接以形成整体, 间排距 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, 喷砼厚度 8 cm; 于马道下坡面增设一排 $\Phi 28$ 砂浆锚杆, 实施位置为距马道下部 0.5 m 处, 锚杆长度 $L=6$ m, 间距 2 m, 与增设的竖向锁口锚杆呈梅花形交错布设。

浅层支护后边坡外观监测变形速率显示仍未趋于稳定, 后结合边坡地质编录及钻孔成像等资料对边坡稳定性进行了复核, 为保证临时边坡的整体稳定, 决定对第三级、五级及七级边坡新增锚索框格梁进行深层加固支护。其中每级边坡分别增设三排十列锚索框格梁, 合计 90 根锚索。三级边坡锚索实施边界距马道平直段下游侧终点 15 m, 五级边坡、七级边坡实施边界距离分别为 20 m、23 m, 每级边坡最下排锚索距坡底 4 m。锚索设计张拉力为 1000 kN, 长度 $L=50$ m, 其中锚固段长度为 8 m, 倾角为 25° , 孔内灌注 M40 水泥浆。

深层支护施工完成后, 棱镜外观监测数据显示边坡变形速率由原 1.6 mm/d 下降至 0.1 mm/d, 边坡变形逐渐趋于稳定。

5. 结语

综上所述, 对扎拖左岸高边坡进行三维扫描技术分析和安全数据监测实践研究后, 充分了解其变形位移情况, 根据变形位移情况开展左岸高边坡边坡卸载及锚索加固措施, 可为电站后续蓄水和库区安全稳定安全保障, 此边坡分析研究方法可供类似工程经验借鉴。

参考文献

- [1] 黄健, 程鹏, 郑小贺, 等. 岩石高边坡稳定性并行计算及其应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(5): 81-84.
- [2] 钟冬望, 吴亮, 陈浩. 爆炸荷载下岩质边坡动力特性试验及数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2964-2971.
- [3] 袁欢. 水利工程施工中的边坡开挖及防护技术[J]. 水上安全, 2024(3): 160-162.
- [4] 郝泽维. 水利水电工程边坡开挖支护施工要点[J]. 中国电力企业管理, 2024(3): 94-96.
- [5] 付桂生, 张弦. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用分析[J]. 四川水利, 2023, 44(5): 116-118.
- [6] 林军伟, 祁雪珍, 程延峰. 水利水电工程边坡开挖支护技术研究[J]. 内蒙古水利, 2023(8): 43-44.