

某岩溶山区风电进场路边坡滑坡成因勘察及防控措施

杨相如

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014

[摘要]我国湖南、贵州、广西以及云南西南地区的喀斯特地貌区,地质结构复杂,再加上山地施工开挖、极端暴雨天气的多重影响,风电项目进场道路的边坡经常出现滑坡、反复塌滑的问题,也给后期运维安全带来极大隐患。文章结合现行的行业技术标准和现场原位监测的真实数据,深入分析导致边坡滑坡的地质、施工、天气三大核心诱因,详细梳理空地一体化勘察技术的实操流程和核心优势。针对不同灾害风险等级、不同岩溶发育程度的边坡,制定了差异化治理方案,有效解决了某风电场边坡支护方案适配性差、施工临时道路防护不到位、边坡反复滑坡塌滑等问题,以供参考。

[关键词]岩溶山区;风电进场路;边坡滑坡;地质勘察;失稳成因;防控措施

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20073

中图分类号: TV697.2

文献标识码: A

Investigation and Prevention Measures for Landslide Formation on the Slope of the Wind Power Access Road in a Karst Mountainous Area

YANG Xiangru

PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan, 410014, China

Abstract: In the karst landform areas of Hunan, Guizhou, Guangxi and southwest Yunnan in China, the geological structure is complex. In addition to the multiple impacts of mountain construction and excavation and extreme rainstorm weather, the slope of the access road for wind power projects often suffers from landslides and repeated collapses, which also brings great hidden dangers to the later operation and maintenance safety. The article combines current industry technical standards and real data from on-site in-situ monitoring to deeply analyze the three core causes of slope landslides: geology, construction, and weather. It also provides a detailed overview of the practical process and core advantages of the integrated exploration technology of air, space, and earth. Differentiated treatment plans have been developed for slopes with different levels of disaster risk and karst development, effectively solving problems such as poor adaptability of slope support schemes, inadequate protection of temporary construction roads, and repeated landslides and collapses of slopes in a certain wind farm for reference.

Keywords: karst mountainous areas; wind power access route; slope landslide; geological survey; cause of instability; prevention and control measures

引言

在双碳发展目标推动下,国内陆上风电建设重点转移到湖南、贵州、广西、云南西南一带的岩溶山区。这片区域风力资源充足,2021—2026年间新建山地风电装机总量突破1200万kW,目前在建和计划落地的风电场超过80座,大规模集中开发已经成了普遍情况^[1]。广西某风电场机位零散、地势起伏大,配套进场道路约38.5km,大多顺着山脊、陡坡开凿修建。受场址地形地貌限制,高度在8m~60m的陡峭山坡上的挖方边坡占比超过60%。部分边坡发生滑塌,部分路段甚至发生反复滑坡现象。道路施工改变了山体原有的应力分布,切断地下水排泄通道,

破坏山体的稳定状态。岩溶发育的喀斯特地貌区多分布有溶洞、土洞、断层破碎带,溶沟溶槽中还可能存在软弱夹层,雨季持续降雨时易滑塌^[2]。风电场道路大多按等级外临时道路施工,道路的排水、边坡防护设施施工滞后,道路既要承受施工重型车辆碾压,又易受到地表水的冲刷,导致雨季滑坡事故频繁出现,极大影响风电项目施工进度和后续运维期间人员和设备的安全。

1 岩溶山区风电进场路工程地质特征

1.1 喀斯特地貌区工程地质条件复杂

岩溶山区山体长期受环境的影响,水溶蚀、风化、淋滤作用明显,地表覆盖层以残坡积黏土、粉质黏土、碎石

土为主,覆盖层厚度变化较大^[3]。本风电场位于广西河池地区,工程地质调查和钻探成果显示,进场道路边坡覆盖层厚度区间为 0.5~12m,局部溶槽、溶沟区域覆盖层厚度可达 15m 以上,山脊、陡崖区域覆盖层不足 1m。覆盖层为红黏土,土中裂隙发育、黏聚力低,受当地气候影响,干湿循环效应显著,雨水可沿土中裂隙快速下渗,导致土体抗剪强度大幅衰减。覆盖层下部的石灰岩、白云岩、泥灰岩岩体受岩溶和构造作用局部碎裂严重,完整性差,软硬交替分布,基岩面起伏剧烈、接触面粗糙且普遍富集泥质软弱夹层,为边坡滑动提供了天然滑移面。

1.2 岩溶缺陷网状隐蔽发育

岩溶发育区软弱结构面和软夹层多呈网状、多层、隐蔽式发育。三维地质探测数据表明,风电进场路边坡范围内,小型溶蚀裂隙、溶槽发育密度达 8~15 条/100m,土洞、小型溶洞发育率达 32%,且多埋藏于覆盖层下部与基岩浅层,常规地表工程地质调绘难以识别。此类隐蔽岩溶缺陷会破坏岩体完整性,形成岩土体薄弱区,同时成为雨水入渗、地下水运移的天然通道,大幅降低道路边坡的整体稳定性^[4]。

1.3 水文地质条件复杂多变

岩溶山区地下水系统极为复杂,存在地表径流、浅层孔隙水、深层岩溶裂隙水、溶洞管道水多重水系连通特征。降雨后雨水可通过地表裂隙、土洞、溶洞快速下渗,在基覆界面、软弱夹层处汇集滞留,形成长期渗流软化作用。同时,岩溶地下水具有动态变化快、水压波动大的特点,雨季水位骤升骤降,会对边坡岩土体产生渗透压力、浮托力,破坏岩土体结构平衡,是边坡瞬时失稳的核心水文诱因。

1.4 边坡开挖扰动强度大

风电进场道路为适配风机大件运输需求,受地形地貌限制,局部采用大开挖、高切坡施工方式,最大开挖高度可达 60m,边坡坡度普遍设置为 1:0.75~1:0.50,高陡边坡占比高。多点、碎片化的开挖方式会彻底扰动原有山体应力场,造成边坡临空面裸露、岩体卸荷松弛、裂隙扩张,加剧岩溶岩土体的失稳,大幅提升滑坡风险。同时,临时道路施工普遍存在开挖弃土就近堆放、边坡坡体超载,排水不畅等问题,进一步加重边坡荷载压力。

1.5 气象触发条件极端频发

工程区属于亚热带季风气候,2024—2026 年区域极端暴雨天气频次显著提升,雨季短时强降雨、连续阴雨天气多发,单场暴雨降雨量可达 80mm~150mm。岩溶岩土体渗透特性强,短时强降雨会快速引发边坡土体饱和软化、孔隙水压力骤增,是诱发边坡滑坡、塌方的直接外部触发

因素。据相关灾害统计数据,岩溶区风电场道路边坡 90% 以上的失稳灾害均发生在雨季降雨过程及雨后 72 小时内。

2 岩溶山区风电进场路边坡滑坡详细成因分析

2.1 内在地质主控成因

岩溶山体经长期水岩、风化淋滤作用,基岩顶面发育 0.3~2.0m 泥质软弱夹层,多为饱和软黏土,强度低、遇水泥化。边坡开挖破坏原有应力平衡,该夹层为主控滑移面,在自重、雨水软化、地下水浮托力叠加下强度持续衰减,易沿基覆界面整体滑动,是岩溶风电边坡主要失稳形式。道路开挖卸荷打破岩溶空洞应力平衡,上部岩土体失支引发垮塌塌陷,空洞存水持续软化围岩,险情突发风险高。区内残坡积土松散、力学指标差,干湿循环易破损;下部溶蚀基岩极破碎,承载力弱,边坡稳定差异大,薄弱段易先行失稳。

2.2 工程人为扰动诱因

风电进场道路边坡滑坡隐患由勘察、开挖、防排水、大件运输多重因素叠加形成。前期勘察存在重场站、轻支路的误区,临时道路勘察流程简化,仅依靠地表调绘与少量钻孔,难以识别土洞、溶洞、软弱夹层等隐蔽病害。施工阶段为压缩成本、赶工期,普遍存在超挖、陡挖、顺坡开挖等违规操作,坡率过陡、临空面偏高,山体原有应力平衡被打破,坡顶弃土堆载进一步增大下滑荷载。同时道路多采用简易甚至无防护结构,截排水系统残缺、断面偏小易淤堵,雨水沿裂隙与岩溶通道下渗软化滑带土体。加之塔筒、叶片等大件重载车辆反复通行,振动持续扩张岩土裂隙、降低土体抗剪强度,诱发岩溶上部土体沉降,多重作用共同埋下边坡失稳滑坡隐患^[5]。

2.3 气象水文触发外因

西南岩溶山区汛期多连续阴雨与短时强降雨,雨水持续入渗令边坡覆盖层土体迅速饱和,土体自重增大、抗剪强度骤降;水分渗入基覆界面软弱夹层使其泥化软化,滑移面抗滑力持续减弱,边坡稳定系数快速走低。同时降雨抬升岩溶地下水位,渗透、静水及浮托力抵消岩土体自重抗滑效应;地下水退落时渗流带走细颗粒,诱发潜蚀、管涌,扩大土体孔隙、疏松内部结构,双重作用共同破坏边坡平衡,待稳定系数达临界值便发生滑坡、塌陷。

2.4 滑坡失稳演化机理

基于 PowerGeo 三维地质数值模拟与 FLAC3D 稳定性分析结果,岩溶风电进场路边坡滑坡失稳全过程可分为四个阶段。第一阶段为初始孕育阶段,山体原生岩溶缺陷、软弱夹层构成不稳定基础,无明显变形;第二阶段为扰动松弛阶段,道路开挖卸荷、施工堆载、车辆振动引发边坡

应力重分布,产生浅表张拉裂隙,岩体开始松弛;第三阶段为渗流软化阶段,降雨入渗、地下水运移软化滑带土体,裂隙持续扩展、贯通,边坡出现微小位移变形;第四阶段为整体失稳阶段,岩土体抗剪强度不足以抵抗下滑力,边坡发生局部垮塌或整体滑动,形成滑坡灾害。

3 岩溶边坡滑坡精准勘察技术体系

搭建空天地一体化岩溶边坡隐患排查防控技术体系,实现边坡风险全方位、精准化排查辨识。依托无人机和高分辨率卫星遥感技术,从宏观层面排查全线山体地形、裂缝、滑坡痕迹等问题,通过对比时序影像研判山体变形趋势,初步划定风险边坡区段,有效缩小勘察范围、彻底消除排查盲区。在此基础上开展地面精细化地质核查,摸清岩土体状态、岩溶结构、裂隙、地下水等地质情况,核对边坡施工、防护、排水等工程细节,总结隐患滋生和发展规律。针对地下隐蔽岩溶缺陷,融合高密度电法、地质雷达、声波探测三种物探技术,互补提升探测精准度,将隐患漏判率控制在8%以内。通过钻孔取样、原位测试获取岩土体力学参数和地下水变化数据,整合多类数据搭建三维地质模型,结合数值模拟精准判定边坡稳定性与风险等级。配套布设智能监测系统,全天不间断采集数据,可提前72小时预警边坡失稳风险,提供预警准确率。

4 岩溶山区风电进场路边坡分级防控治理措施

4.1 前期主动预防管控

4.1.1 优化道路选线与开挖方案

在风电进场道路设计阶段,依托三维地质勘察成果,优先避让岩溶强发育区、大型溶洞群、软弱夹层集中区、老旧滑坡体、地下水富集区等高危区域。无法避让时,优化线路走向,降低边坡开挖高度与坡度,采用分级放坡、台阶式开挖方案,严禁超挖、陡挖、顺坡开挖。严格控制施工堆载,禁止在坡顶、坡肩堆放弃土与施工材料,从源头减少山体应力扰动与边坡荷载压力。同时,针对临时支道提升勘察设计标准,杜绝简化设计、无防护设计问题。

4.1.2 完善系统性截排水工程

水是岩溶边坡失稳的核心触发因素,排水治理是防控滑坡的关键措施。构建“地表截排+地下导排+裂隙封堵”三位一体排水体系。边坡坡顶设置封闭式截水沟,拦截山体上游地表径流;边坡分级设置泄水孔、横向排水沟,快速排出坡面雨水与浅层渗水;坡脚设置排水沟、集水井,汇总排出全线积水。对边坡浅表裂隙、溶蚀孔洞采用水泥砂浆封堵,防止雨水下渗;对地下岩溶管道、渗水通道设置导排盲沟、透水层,疏导地下水,避免水分滞留软化滑带。所有排水设施加大断面尺寸、设置防渗层,适配岩溶

区域大暴雨工况,定期疏通养护,杜绝淤积堵塞。

4.2 分级分类工程治理

低风险稳定边坡(稳定系数 ≥ 1.2)岩溶发育微弱、岩土体完整性较好、无明显变形隐患,以防护、排水、生态修复为主。采用喷播植草、三维网植草、灌木混种等生态防护方式,覆盖裸露坡面,防止雨水冲刷、风化侵蚀;完善配套截排水设施,定期开展隐患排查,无需设置刚性支护结构。兼顾工程安全与生态环保,适配风电项目绿色发展理念。稳定系数1.0~1.2的中风险欠稳边坡,大多只会出现轻微土体移位、局部开裂,还有少量零散岩溶孔洞问题,遇上雨水冲刷容易小块土体塌落,治理选用方格框架锚杆加固搭配局部补强、植被护坡的综合手段:坡面整体打方格框架锚杆,把表层松散土石牢牢固定;遇到岩溶沟槽、空洞和土质软弱夹层,换填密实材料再注浆填充加固;框架格子里栽种草本绿植,硬支护和生态绿化同步落地,限制边坡继续变形。稳定系数不足1.0的高风险失稳边坡,会出现大面积土体明显滑移、贯穿性大裂缝,还伴生大型岩溶破碎结构,随时有整体滑坡风险,需要全方位深度强化整治:浅层滑动区域铺设锚索框架、锚杆格构并挂网喷射混凝土;如果滑动面埋深较大,顺着土层与岩层分界面增设抗滑桩、微型桩,直接切断土体滑动通道;岩溶破碎区域采用高压注浆,把松散岩体胶结密实、堵住渗水通道;已经发生滑塌的边坡先清理松散土体、修整坡面,同步做好加固结构和截排水设施,从根源杜绝滑坡险情。

4.3 岩溶专项加固技术

4.3.1 岩溶空洞注浆固结技术

针对边坡内部隐蔽土洞、溶洞、破碎带,采用水泥-水玻璃双液高压注浆技术,通过注浆管向地下缺陷区域灌注浆液,浆液填充空洞、渗透裂隙、胶结松散岩土体,固化后形成完整、密实的岩土体结构,彻底解决空洞塌陷、渗流软化问题。根据类似工程项目实施后的数据显示,该技术可使岩溶破碎带岩土体承载力提升2~3倍,渗透系数降低一个数量级,大幅提升边坡整体稳定性。

4.3.2 基覆界面滑带加固技术

针对基覆界面软弱夹层滑移隐患,采用微型桩+注浆联合加固方式,穿透覆盖层与软弱夹层,锚固至完整基岩,有效约束夹层变形、阻断滑移通道;同步对夹层区域注浆改良,提升软弱土体抗剪强度,从根源上解决沿界面滑动的核心问题,适配岩溶边坡最主要的失稳模式。

4.4 智能监测与长效运维

借助空天地一体化智能监测平台,对治理完工的高、

中风险边坡进行长周期的动态监控,实时收集边坡位移、裂缝发展、地下水压力、降雨量等各类数据,建好配套台账并搭建变形预警机制。同时安排人员定期现场巡查,发现支护破损、排水堵塞、坡面破损等问题第一时间处理。按永久道路、临时道路分别建立分层养护管理资料,汛期增加监测频次、强化管控力度,避免边坡二次滑坡,确保进场道路能长期安全顺畅通行。

5 结论

岩溶山区风电进场路边坡滑坡由地质、施工、气象多因素耦合引发,基覆界面软弱夹层滑移、隐蔽岩溶塌陷为核心内因,道路开挖、勘察防护不足、车辆重载是工程诱因,极端降雨为直接触发条件。空天地多源融合勘察能精准识别岩溶隐蔽隐患,三维地质建模与数值模拟可定量评价边坡稳定,采用分级分类、攻防一体防控模式,可从源头遏制滑坡,避免边坡反复失稳。

[参考文献]

- [1]郝才刚,付明宏.贵州荔波县某滑坡成因及其工程治理措施分析[J].地下水,2026,48(2):190-192.
- [2]彭灿.风电塔施工对山体产生的影响及水土保持施工措施探究[J].新型工业化,2021,11(11):147-148.
- [3]单治钢,孙淼军,王振红,等.中国地质学会.2021年全国工程地质学术年会论文集[C].北京:科学出版社,2021.
- [4]郭轲轶.煤矿采动区风电场风机选址方法研究[J].矿山测量,2021,49(1):1-5.
- [5]保靖琨,钱乔富.大理巍山风电场工程建设地质灾害危险性分析及防治措施[J].中国水运(下半月),2020,20(10):258-260.

作者简介:杨相如(1986—),男,湖北荆门人,毕业于武汉理工大学,工程师,主要从事公路、新能源工程地质勘察、市政房建岩土工程勘察工作。