

输电线路杆塔边坡稳定性及治理措施研究

刘宇洋 孟祥杨 帅 龚晓松

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要: 输电线路杆塔边坡稳定性直接关系到电力系统的安全运行。本文系统分析了影响边坡稳定性的内在地质因素与外在环境因素,结合工程实例探讨了边坡失稳的力学机制与破坏模式。针对不同地质条件下的边坡失稳问题,提出了锚杆格构梁、抗滑桩、喷混植生等综合治理技术,并通过数值模拟验证了治理措施的有效性。研究表明,科学的地质勘察、合理的治理方案设计与动态监测预警体系的建立,是保障输电线路杆塔边坡长期稳定的关键。

关键词: 输电线路杆塔; 边坡稳定性; 治理措施

1 边坡稳定性影响因素分析

1.1 内在地质因素

岩土体物质组成作为决定边坡稳定性的物质基础,其复杂性和多样性对边坡的力学性质和行为表现有着深远影响。以西南某特高压工程为例,塔基边坡由全风化花岗岩构成,这种特殊的岩土体物质组成蕴含着独特的矿物成分。其中,石英含量高达45%,石英具有硬度大、化学性质稳定等特点,在边坡中起到一定的骨架支撑作用;长石含量为30%,长石的稳定性相对较差,在一定条件下容易发生风化分解;而黏土矿物占25%,黏土矿物具有亲水性强、遇水易膨胀软化的特性。这种成分组合使得岩体在遇水时表现出明显的软化现象,其抗剪强度指标大幅降低,内摩擦角 ϕ 从新鲜岩体的较高值降至 28° ,黏聚力 c 从较高水平降至15kPa,较新鲜岩体降低40%以上。这意味着在水分作用下,岩体内部的颗粒间连接力减弱,更容易发生滑动和变形,从而极大地威胁边坡的稳定性。地质构造特征也是影响边坡稳定性的关键内在因素。在某220kV线路塔位边坡,存在着复杂的三组节理裂隙。其中,倾向坡外的陡倾角裂隙(倾角 75°)与缓倾角层理面(倾角 15°)的组合尤为危险。这种特定的裂隙组合方式为潜在滑移面的形成提供了有利条件。在暴雨工况下,大量雨水沿着裂隙渗入坡体,增加了坡体的重量,同时降低了岩体的抗剪强度。此时,边坡的安全系数急剧降至1.02,接近失稳临界状态,随时可能发生滑坡等灾害,对线路的安全运行构成严重威胁。此外,地形地貌对边坡稳定性也有着不可忽视的影响。陡峭的山坡相较于平缓的山坡,其重力作用更为显著,坡体物质更容易受到重力的牵引而发生滑动。而且,陡峭边坡的应力分布更为复杂,在坡脚处往往会产生较大的应力集中,容易导致坡脚部位的岩土体先发生破坏,进而引发整个边坡的失稳^[1]。

1.2 外在环境因素

降雨入渗是诱发边坡失稳的主导因素之一。在华南某沿海地区,持续24小时的暴雨对边坡产生了严重影响。大量雨水迅速渗入边坡内部,使得边坡孔隙水压力急剧增加,达到原来的3倍。孔隙水压力的升高导致土体有效应力大幅降低65%,有效应力的减小使得土体颗粒之间的接触力减弱,抗剪强度显著下降。以某500kV线路塔基边坡为例,暴雨后监测数据显示,地下水位迅速上升至坡体中上部,滑带土含水率从22%急剧增至38%。随着含水率的增加,滑带土的抗剪强度指标骤降,内摩擦角 ϕ 从 32° 降至 18° ,黏聚力 c 从25kPa降至8kPa。这使得滑带土的抗滑能力大幅降低,边坡失稳的风险急剧增加。地震作用作为一种突发的、强烈的外力作用,对边坡稳定性的影响同样不可小觑。2022年泸定6.8级地震给周边地区带来了巨大的破坏,导致周边3条输电线路的21基杆塔边坡出现裂缝。其中,某550kV线路塔基边坡在地震波的作用下产生了0.3m的水平位移,坡顶出现张拉裂缝。地震波的传播使得边坡岩土体受到强烈的振动和应力变化,原本稳定的结构被破坏,岩土体内部的裂隙扩展和连接,形成了潜在的滑动面,从而引发边坡的失稳。而且,地震的持续时间、震级大小以及震中距离等因素都会对边坡的破坏程度产生不同的影响。除了降雨和地震,温度变化也会对边坡稳定性产生一定影响。在寒冷地区,冬季的低温会导致边坡岩土体中的水分结冰,体积膨胀,产生冻胀力^[2]。冻胀力会对边坡岩土体造成挤压和破坏,使岩土体产生裂缝和松动。当春季气温回升,冰体融化后,水分又会沿着裂缝渗入坡体,进一步削弱岩土体的强度。在炎热地区,高温会使岩土体中的水分蒸发,导致岩土体干裂,降低其抗剪强度。同时,温度的周期性变化还会引起岩土体的热胀冷缩,长期作用下会产生疲劳损伤,影响边坡的稳定性。

2 边坡稳定性分析方法

2.1 极限平衡法应用

极限平衡法是边坡稳定性分析中常用且成熟的方法之一。以某山区500kV线路JC30152C-45型铁塔边坡为例,采用Bishop法进行稳定性计算。该边坡高度为28m,坡比为1:1.5,岩体参数取内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$,黏聚力 $c = 20\text{kPa}$ 。在自然工况下,边坡处于相对稳定的状态,计算得到的安全系数 $F_s = 1.35$,表明边坡在当前条件下具有一定的安全储备。然而,在暴雨工况下,情况发生了显著变化。考虑动水压力的影响,采用饱和-浮容重法进行计算。动水压力是由于雨水在坡体内流动时对岩土体产生的拖曳力,它会进一步削弱边坡的稳定性。此时,安全系数 F_s 降至1.08,接近失稳的临界状态,说明暴雨对边坡稳定性的影响非常大。在地震工况下,按照水平地震系数0.2折减抗剪强度。地震作用会使岩土体的抗剪强度降低,模拟地震对边坡稳定性的影响。计算结果显示,安全系数 $F_s = 1.12$,虽然仍大于1,但也表明地震工况下边坡的稳定性受到了较大威胁。为了验证极限平衡法的计算结果,采用FLAC3D数值模拟进行对比分析。FLAC3D是一种基于连续介质力学的数值模拟软件,能够更真实地模拟边坡的应力应变状态。在暴雨工况下,数值模拟结果显示坡顶位移达12cm,与极限平衡法计算结果吻合度达92%,这充分证明了极限平衡法在边坡稳定性分析中的可靠性和准确性。

2.2 数值模拟技术

在滇西北某特高压工程中,为了深入研究塔基荷载作用下边坡的应力应变特征,采用Midas GTS NX建立三维数值模型。该模型能够更精确地模拟边坡的几何形状和边界条件,为分析提供更准确的数据支持。模型中考虑了单桩竖向荷载8000kN的作用。计算结果显示,桩基础周围应力集中系数达2.3,这表明桩基础周围是应力集中的区域,岩土体在该区域受到的应力较大,容易发生破坏。桩身上部0-5m范围内出现拉应力区,最大拉应力达0.8MPa。拉应力的出现会导致桩身混凝土开裂,影响桩的承载能力和耐久性。坡体位移场呈现“上部大、下部小”的分布特征。坡顶水平位移8.2cm,坡脚位移仅1.5cm。这种位移分布特征与边坡的应力分布和边界条件密切相关。坡顶处于自由面,受到的约束较小,位移较大;而坡脚受到地基的约束,位移相对较小。通过对比不同加固方案,发现锚杆格构梁加固可使边坡安全系数提升37%,位移减小62%。这表明锚杆格构梁加固技术能够有效地提高边坡的稳定性,减小边坡的位移,是一种可行的边坡加固方案。数值模拟技术为

边坡加固方案的设计和优化提供了重要的依据,能够帮助工程师选择最合适的加固措施,提高工程的安全性和经济性。

3 边坡治理技术体系

3.1 结构加固技术

锚杆格构梁技术是一种有效的边坡加固方法,它通过“锚固+框架”复合体系实现边坡的加固。在川藏联网工程中,采用了 $\Phi 32\text{mm}$ 螺纹钢锚杆,锚杆长度为9m,间距为 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$,与C30混凝土格构梁(截面 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$)联合支护。锚杆的作用是将不稳定的岩土体与稳定的岩层连接在一起,通过锚杆的锚固力提高岩土体的抗剪强度和整体稳定性。格构梁则起到框架支撑的作用,能够均匀地分散坡体的应力,限制岩土体的变形。监测数据显示,加固后边坡位移速率从 0.5mm/d 降至 0.08mm/d ,说明边坡的变形得到了有效控制。同时,孔隙水压力消散速度提高40%,这表明加固措施改善了坡体的排水条件,降低了水对边坡稳定性的不利影响。抗滑桩技术适用于深层滑坡治理。某500kV线路边坡采用直径2.0m、长15m的钢筋混凝土桩,桩间距5m,设置于滑面以下3m。抗滑桩通过承受滑坡体的推力,阻止滑坡体的滑动,从而保证边坡的稳定性。施工后桩身最大弯矩达 $8500\text{kN} \cdot \text{m}$,说明抗滑桩承受了较大的荷载。桩顶位移控制在15mm以内,表明抗滑桩的变形在允许范围内,能够有效地发挥加固作用。

3.2 生态修复技术

喷混植生技术是一种将生态修复与边坡加固相结合的技术,通过“基材喷射+植被恢复”实现边坡的生态加固。在贵州某220kV线路边坡治理中,采用C20混凝土基材(厚度10cm)混合当地草种(黑麦草:高羊茅=3:1),喷射后覆盖无纺布养护。基材喷射能够为植被生长提供良好的土壤环境,同时增强边坡表层土体的强度和稳定性。当地草种的选择考虑了适应性和生态协调性,能够在当地气候条件下良好生长。3个月后,植被覆盖率达85%,说明植被生长状况良好。基材抗冲刷能力提升至 $120\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,表明喷混植生技术有效地提高了边坡表层土体的抗冲刷能力,减少了水土流失。边坡表层土体抗剪强度提高30%,进一步增强了边坡的稳定性。与传统的浆砌片石护坡相比,喷混植生技术具有明显的优势。该技术成本降低25%,且与周边环境协调性显著提升。传统的浆砌片石护坡虽然能够起到一定的加固作用,但外观生硬,与自然环境不协调,而且成本较高。喷混植生技术则能够在实现边坡加固的同时,恢复边坡的生态环境,实现人与自然的和谐共生^[3]。

4 动态监测与预警体系

4.1 监测技术配置

为了实时掌握边坡的稳定状态,采用先进的监测技术对边坡进行动态监测。北斗高精度定位系统(精度 $\pm 2\text{mm}$)被用于监测边坡位移,在某特高压工程中布置12个监测点,实现三维位移实时采集。该系统能够精确测量边坡在不同方向上的位移变化,为分析边坡的稳定性提供准确的数据支持。土壤含水率监测采用FDR传感器,埋设深度分别为0.5m、1.5m、3.0m,监测频率1次/小时。FDR传感器能够快速、准确地测量土壤的含水率,通过不同深度的监测,可以了解坡体内部水分的分布和变化情况。地下水位监测采用振弦式渗压计,精度 $\pm 0.1\%\text{FS}$ 。振弦式渗压计能够实时监测地下水位的变化,为分析水对边坡稳定性的影响提供重要依据。某500kV线路监测数据显示,暴雨工况下地下水位24小时内上升4.2m,含水率增加18%,位移速率达3.2mm/d,触发黄色预警。这表明监测系统能够及时捕捉到边坡的异常变化,并根据预设的预警阈值发出预警信号,为采取相应的防范措施提供时间保障。

4.2 预警模型构建

基于模糊综合评价法建立四级预警体系,选取位移速率、含水率、地下水位等8个指标,通过层次分析法确定权重(位移速率权重0.35,含水率0.25)。模糊综合评价法能够综合考虑多个因素对边坡稳定性的影响,通过建立模糊评价矩阵和权重向量,计算出边坡的综合稳定状态。当综合评分 ≥ 85 分时启动红色预警,表明边坡处于极不稳定状态,即将发生失稳破坏,需要立即采取紧急措施进行抢险救援;60-85分为橙色预警,说明边坡稳定性受到较大威胁,需要加强监测和防范;40-60分为黄

色预警,提示边坡存在一定的安全隐患,需要密切关注其变化情况; < 40 分为绿色安全状态,表明边坡处于稳定状态,可正常进行生产和生活活动。该预警模型在2023年汛期成功预警3次边坡失稳风险,避免经济损失超5000万元。这充分证明了预警模型的有效性和可靠性,能够为边坡的安全管理提供科学依据,保障人民群众的生命财产安全。通过不断优化和完善预警模型,提高其准确性和及时性,将能够更好地应对边坡失稳等地质灾害的挑战^[4]。

结束语

输电线路杆塔边坡稳定性治理需遵循“地质勘察-稳定性评价-方案优化-动态监测”的全生命周期管理理念。未来研究应重点关注:1)极端气候条件下边坡响应机制;2)智能材料在边坡加固中的应用;3)基于数字孪生的边坡健康管理系统开发。通过技术创新与管理优化,构建“结构安全+生态友好+智能监测”的新型边坡治理体系,为电力基础设施安全运行提供技术保障。

参考文献

- [1]俞伟勇,吴朝峰,戴建华,张志亮,胡谢飞,王峰.山区输电线路杆塔边坡防护方案选择及应用[J].电力勘测设计,2020(06):67-72.
- [2]陈刚.膨胀土塔边坡滑移对输电线路杆塔稳定性的影响[J].电力安全技术,2020,22(06):23-27.
- [3]王晨,叶诚耿,刘伟,许海源,刘如海.斜坡地基上输电铁塔稳定性评价及加固设计[J].土工基础,2019,33(06):630-633.
- [4]陈滨华,王浩,戴旭明,刘丙财,周伟才.深圳地区输电线路塔边坡病害类型分析[J].电力勘测设计,2019(04):45-50.