

高压输电线路铁塔基础边坡滑塌分析及治理方法

王永博 徐安文 高乔林

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 650200

摘要：高压输电线路铁塔基础边坡滑塌受地质环境、工程因素及外部诱因共同作用影响。其滑塌表现为坡体位移、裂缝发展及基础承载力损失，严重威胁铁塔结构安全。稳定性评估运用地质类比、极限平衡及数值模拟等科学方法。治理技术体系涵盖排水工程、支挡结构及坡体加固措施，可有效控制边坡变形。该研究为输电线路安全运行提供技术支撑，具有重要工程应用价值。

关键词：高压输电线路；铁塔基础；边坡滑塌；影响因素；治理技术

引言：高压输电线路铁塔多建于山区，边坡稳定性关乎线路安全。铁塔基础边坡滑塌会威胁杆塔结构，影响电力传输。传统治理常因对滑塌特征与影响因素把握不足效果受限。本文围绕边坡滑塌的特征、危害、影响因素、分析方法及治理技术展开，为保障线路安全提供参考。

1 边坡滑塌的基本特征与危害

1.1 边坡滑塌的典型表现形式

坡体位移与裂缝发展特征体现在不同阶段的形态变化中。初期坡顶出现断续的细微裂缝，随时间推移逐渐扩展连通，长度和宽度不断增加^[1]。位移先以缓慢的速度累积，后期可能出现加速趋势，带动周边土体产生牵引变形。滑塌面的几何形态特征多样，有的呈现圆弧形，从坡脚向上弯曲延伸；有的表现为直线或折线形，受岩土体层面或软弱夹层控制。滑塌面的倾角和深度直接影响滑体的规模和滑动势能，浅层滑塌面通常较浅，涉及的土体范围有限；深层滑塌面埋藏较深，可能牵动大规模坡体。渐进式破坏与突发性破坏存在明显区别。渐进式破坏经历较长时间的变形过程，裂缝逐渐发展，位移持续累积，破坏前有较明显的前兆。突发性破坏往往发生在短时间内，受强烈外部因素触发，坡体瞬间失稳，破坏过程迅速，缺乏明显的前期征兆。

1.2 对输电线路铁塔的影响机制

基础承载力损失过程始于坡体滑动对基础的牵拉或挤压。坡体位移带动基础产生变形，使基础与周边岩土体的接触状态改变，原本的嵌固作用减弱，抵抗上部荷载的能力逐渐下降。随着滑塌加剧，基础可能部分悬空，失去足够的支撑，承载力大幅降低。塔基不均匀沉降效应源于坡体不同部位的滑动速度和位移量差异。塔基各支点沉降幅度不一致，导致杆塔产生倾斜。沉降差越大，杆塔倾斜程度越严重，影响杆塔的垂直度和结构

稳定性。杆塔结构应力重分布因塔基不均匀沉降和基础位移引发。杆塔各部件的受力状态偏离设计工况，某些部位出现应力集中。原本受力较小的构件可能承担额外荷载，长期的应力异常会导致构件疲劳，降低杆塔的整体承载能力，甚至引发结构破坏。

2 边坡稳定性影响因素分析

2.1 地质环境因素

岩土体物理力学性质直接关系边坡稳定。岩土体的密度、孔隙率、抗剪强度等特性决定其抵抗变形和滑动的能力。坚硬岩石组成的边坡抗剪强度高，不易发生滑塌；松散土体组成的边坡抗剪强度低，在外界作用下易产生位移^[2]。岩土体的颗粒级配和胶结程度也有影响，颗粒均匀且胶结差的土体易被水流渗透破坏，降低边坡稳定性。地质构造与软弱结构面是边坡失稳的重要隐患。断层、节理等构造破坏岩土体的完整性，使边坡内部形成薄弱带。软弱结构面的抗剪强度远低于周围岩土体，成为潜在的滑塌面。结构面的走向、倾角与边坡坡向组合不同，对稳定性影响各异，当结构面倾向与坡向一致且倾角较小时，易引发沿结构面的滑动。水文地质条件通过水分作用影响边坡稳定。地下水的静水压力会减小岩土体间的有效应力，降低抗剪强度。地下水的流动可能带走土体中的细颗粒，导致岩土体结构疏松。地表水体的渗透使岩土体饱和度增加，自重增大，同时弱化岩土体，削弱其力学性能，尤其在边坡表层易引发局部滑塌。

2.2 工程因素

铁塔荷载作用特点对边坡稳定有显著影响。铁塔传递的竖向荷载使基础下方岩土体受力增大，若荷载分布不均，会导致基础各部位应力差异，引发局部沉降。水平荷载随风力或不平衡张力作用于铁塔，传递至基础后对边坡产生侧向推力，改变坡体应力状态，可能诱发坡体滑动。荷载的长期作用还会使岩土体产生蠕变，积累

变形,降低边坡稳定性。基础施工扰动效应破坏边坡原有平衡。施工过程中开挖基础会移除部分岩土体,改变坡体的应力分布,使周边土体产生应力释放和变形。基坑开挖可能引发边坡表层土体坍塌,若支护不及时,会扩大扰动范围。施工时的振动也会降低岩土体的抗剪强度,尤其对松散土体影响明显,为后续边坡失稳埋下隐患。坡体开挖支护设计不当会削弱边坡稳定性。开挖坡度过陡超出岩土体自身稳定能力,易导致坡体失稳。支护结构的类型、强度和布置方式若与边坡实际情况不符,难以有效约束坡体变形。支护不及时或支护力度不足,无法抵抗坡体的下滑趋势,会使开挖后的边坡在自重作用下逐渐变形,最终可能引发滑塌。

2.3 环境诱发因素

降雨入渗软化作用是边坡失稳的常见诱因。雨水渗入坡体后,填充岩土体孔隙,增加土体自重,同时软化岩土体,降低抗剪强度。雨水在坡体内形成渗流,产生动水压力,推动坡体沿潜在滑面滑动。长时间降雨使坡体饱和度持续升高,尤其在表层土体与下部岩土体界面处易形成软弱夹层,引发表层滑塌。冻融循环影响边坡岩土体结构。冬季水分在岩土体孔隙中冻结膨胀,对孔隙壁产生压力,使岩土体产生微裂隙;春季冻结水分融化,孔隙增大,岩土体强度降低。反复冻融使岩土体逐渐破碎,完整性遭到破坏,抗剪强度持续下降,在重力作用下易发生变形。冻融循环还会加剧地下水的运动,进一步削弱边坡稳定性。地震动力响应可能触发边坡瞬间失稳。地震产生的水平和竖向振动使坡体产生惯性力,改变原有应力平衡状态。振动使岩土体孔隙水压力瞬间升高,有效应力降低,抗剪强度急剧下降。对于稳定性较差的边坡,地震荷载可能超过其抗滑能力,引发大规模滑塌。地震还可能使原有裂缝扩展,促进坡体分离,加速滑塌过程。

3 边坡稳定性分析方法

3.1 定性分析方法

工程地质类比法通过对比已有的边坡工程实例与待分析边坡的地质条件、地形特征和环境因素,判断边坡的稳定性状态。选取条件相似的边坡作为参照,分析其历史变形情况和破坏模式,推测待评估边坡可能出现的稳定问题^[3]。这种方法依赖对地质现象的直观认识,适用于初步判断边坡的稳定趋势,为后续分析提供基础方向。赤平投影分析法借助几何投影原理,将边坡岩体中的结构面和坡体边界投影到平面上,通过分析结构面的空间组合关系,判断可能发生滑动的结构面组合形式。结构面的产状和相互切割关系直接影响坡体的稳定状

态,投影分析可清晰展现这些关系对边坡滑动的潜在影响,帮助识别危险的结构面组合。破坏模式识别法基于对边坡地质结构和变形特征的观察,识别可能发生的破坏类型。根据坡体的岩土性质、结构面分布和地形形态,判断边坡属于滑移型、崩落型还是流动型破坏,每种破坏模式对应不同的变形过程和稳定特征。准确识别破坏模式有助于针对性地选择后续分析方法,把握边坡失稳的关键因素。

3.2 定量分析方法

极限平衡理论计算通过建立边坡滑动的力学模型,计算边坡在极限状态下的抗滑力与下滑力的比值,评估边坡的稳定程度。假定边坡沿某一滑面发生滑动,将滑体视为刚性体,分析其在重力、地下水压力等作用下的受力平衡状态。通过调整滑面位置和形态,找到最危险的滑动面,计算相应的稳定系数,量化边坡的稳定安全程度。数值模拟分析方法利用计算机技术构建边坡的三维力学模型,模拟坡体内部的应力分布、变形发展和破坏过程。通过输入岩土体的力学参数和边界条件,计算不同工况下边坡的位移场和应力场变化,追踪坡体从稳定到失稳的动态演化。这种方法能够展现边坡内部的细微变化,揭示稳定性变化的内在机制,适用于复杂地质条件下的边坡分析。可靠度理论评估考虑岩土体参数的不确定性和荷载的随机变化,计算边坡在给定条件下保持稳定的概率。将影响边坡稳定的各种因素视为随机变量,通过概率统计方法分析这些变量对边坡稳定性的综合影响,得出边坡失稳概率或可靠度指标。这种方法能够反映分析结果的不确定性,为工程决策提供更全面的风险信息,弥补确定性分析在处理参数变异性方面的不足。

4 边坡滑塌治理技术体系

4.1 排水工程措施

地表排水系统设计需结合边坡地形和汇水情况,合理规划排水路径。在坡顶设置截水沟,拦截坡上方的地表径流,防止水流直接冲刷坡体。沟道坡度需根据地形确定,确保水流顺畅不淤积,沟壁采用防渗处理,避免渗水渗入坡体内部^[4]。坡面上可设置排水沟,将坡面汇水引至坡脚或坡底的排水系统,沟道布置与坡体走向相协调,减少对坡面的切割破坏。排水沟转角处做成弧形,降低水流对沟壁的冲击力度,延长设施使用寿命。地下排水设施布置针对边坡内部的地下水,通过疏导降低地下水位,减少孔隙水压力。在坡体内部设置排水孔,孔眼朝向坡外下方,便于地下水排出。排水孔间距和深度根据边坡岩土体的透水性确定,透水性差的区域需加密布置。排水孔周围填充透水性材料,防止细颗粒堵塞孔

眼,确保排水通畅。对于富水地层,可在排水孔底部设置集水管,将分散的地下水汇集后集中排出。截水盲沟设置于可能产生地下水渗入的部位,如坡体与稳定岩体的接触面。盲沟采用透水性材料填筑,内部铺设排水管道,将汇集的地下水引至坡外。盲沟断面尺寸根据预计排水量确定,沟体周围铺设反滤层,阻止岩土颗粒进入沟内造成堵塞,确保长期有效发挥截水作用。盲沟顶部覆盖防渗层,防止地表水下渗进入盲沟影响其截水功能。

4.2 支挡结构体系

抗滑桩设计参数需根据边坡滑动力和地质条件确定。桩身材料需具备足够强度,抵抗滑动产生的推力。桩长应深入到稳定岩层或坚实土层中,确保桩体锚固牢固。桩间距需通过受力计算确定,间距过大可能导致桩间土体挤出,间距过小则增加工程成本。桩顶可设置连系梁,增强抗滑桩的整体刚度,共同抵抗坡体滑动。桩身侧面可设置凸榫,增加桩与周围土体的摩擦力,提升抗滑效果。挡土墙结构选型需结合边坡高度和受力情况。重力式挡土墙依靠自身重量抵抗土压力,适用于高度不大的边坡,墙体材料可采用块石或混凝土,墙背设置排水孔,排除墙后积水。悬臂式挡土墙由立壁和底板组成,通过底板上的土重来平衡土压力,适用于较高边坡,材料多为钢筋混凝土,自重较轻但受力合理。挡土墙基础需置于坚实土层上,必要时进行地基处理,防止基础沉降导致墙体开裂。锚固系统布置原则需保证足够的锚固力,将锚杆或锚索深入到稳定岩层中,通过张拉产生预应力,约束坡体变形。锚杆长度根据锚固深度和坡体厚度确定,锚固段需位于稳定岩层内,自由段则穿过滑动体。锚索布置密度需根据坡体下滑力计算,张拉应力需控制在合理范围,避免过度张拉导致坡体局部变形。锚固点设置防腐措施,防止长期暴露在空气中发生锈蚀,影响锚固性能。

4.3 坡体加固技术

注浆加固工艺通过向坡体岩土体中注入浆液,填充岩土体中的裂隙和孔隙,提高岩土体的整体性和强度。浆液材料根据岩土体性质选择,对于裂隙发育的岩体可采用水泥浆,对于松散土体可采用水泥-水玻璃双液浆。

注浆孔布置呈梅花形,孔深和间距根据加固范围确定,注浆压力需控制得当,避免压力过大造成坡体扰动。注浆过程中需观察坡体变形情况,适时调整注浆参数,确保加固效果。土钉墙加固方法通过在坡体中设置土钉,与坡面喷射混凝土面层结合,形成复合加固体系。土钉采用钢筋或钢管,植入预先钻好的孔中,通过注浆与周围岩土体粘结,土钉长度需穿过潜在滑动面,深入到稳定土层。喷射混凝土面层厚度需均匀,与土钉牢固连接,形成整体受力结构,增强坡体表层的稳定性。面层中可添加钢筋网,提高抗裂性能,防止混凝土因温度变化产生裂缝。生态护坡技术利用植被根系的固土作用和植被覆盖的防护效果,改善边坡稳定性。选择适合当地气候条件的乡土植物,采用喷播或植生袋等方式种植,形成植被覆盖层。植被生长后,根系穿插于土壤中,增强土壤的抗剪强度,茎叶覆盖坡面减少雨水冲刷。可结合土工格栅等材料,提高植被护坡的初期稳定性,实现生态保护与边坡加固的双重效果。植物种类搭配需考虑生长习性,形成常绿与落叶植物结合的群落,确保四季都能发挥防护作用。

结束语

高压输电线路铁塔基础边坡稳定性问题,需要综合考量地质条件与工程特性。通过科学分析滑塌机理,针对性采取排水、支挡等治理措施,可有效控制边坡变形。随着新材料、新工艺的应用,边坡防护技术将进一步提升。加强运行期监测维护,实现全生命周期管理,是保障输电线路长期安全的关键。

参考文献

- [1]郭翔.输电线路铁塔结构优化设计的几点思路[J].电气技术与经济,2023,(03):60-64.
- [2]陈守恒.高压输变电线路的设计与维护措施分析[J].集成电路应用,2022,39(10):69-71.
- [3]潘世佳.边坡工程地质灾害的成因分析及防治措施[J].世界有色金属,2023(5):220-222.
- [4]朱凯峰,马思远.高陡边坡治理中的结构优化与力学响应探讨[J].岩石力学与工程学报,2022,41(9):1893-1901.