

山区输电塔边坡成灾模式及塔基失效类型

林文华¹, 叶诚耿², 王浩²

(1. 福建仙游抽水蓄能有限公司, 福建 莆田 351267; 2. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116)

摘要: 基于山区输电塔边坡与铁塔的空间位置关系、边坡变形对铁塔的作用机制及典型失效案例的调查与分析, 厘清输电塔位边坡的4种典型成灾模式, 即: 塔基上部边坡失稳, 使铁塔因超覆荷载冲击产生倾覆; 塔基跨越不稳定边坡, 因边坡变形, 使塔基因沉降差或倾斜量偏大导致铁塔倾斜; 塔基下部边坡变形, 削弱塔基侧向约束, 诱发塔位边坡松动变形危及塔基安全; 塔基位于边坡体内, 因边坡变形破坏诱发塔基整体移位; 在此基础上, 总结提出3种塔基失效类型: 斜坡变形引起塔基沉降; 斜坡滑移诱发杆塔移位; 斜坡失稳冲击杆塔倾覆。

关键词: 输电线; 斜坡; 杆塔; 变形破坏

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)06-0050-05

Disaster Mode of Transmission Tower Slope in Mountainous Regions and Failure Type of Tower Foundation

LIN Wenhua¹, YE Chenggeng², WANG Hao²

(1. Fujian Xianyou Pumped Storage Power Co., Ltd., Putian, Fujian 351267, China;

2. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Based on the spatial location between tower foundations and slopes in the electric transmission line in mountainous regions as well as investigation and analysis of mechanism of effect of slope deformation on the tower and typical failure cases, the spatial model between tower foundation and slope is clarified as below: the impacts of the overloaded caused by the deformation or instability of the slope above the tower foundation result in the deformation and instability of tower foundation; the deformation and instability of the slope lead to the differential settlement or large lean degree, which cause the deformation and instability of tower foundation that across the unstable slope; the deformation or instability of the slope below tower foundation weaken the constraint of lateral deformation of the tower foundation, and the traction of the base slope of tower foundation caused by traction can jeopardize stability and safety of the tower foundation; the overall deformation and failure of landslide bring out displacement of the tower foundation that locate in the landslide body. Three typical failure modes of tower foundation are summarized based on the analysis of the model of transmission line slope on tower and the mechanism of deformation and failure: slope deformation cause settlement of tower foundation, slope slip lead to displacement of tower and slope instability overturn tower.

Keywords: power transmission line; slope; tower; deformation and failure

山区城镇化建设对电力供应的需求日益增强, 输电线路走廊越发紧缺, 电网运行环境日趋严峻。在山区城镇, 输电线路沿线的地形地质条件复杂, 斜坡数量巨大, 输电线路杆塔基础经常位于陡峭地形

及坡顶或坡脚等敏感位置, 由于斜坡失稳造成输电铁塔基础的沉降和倾斜的事件时有发生, 由此衍生的输电线路瘫痪将带来巨大的经济损失。因此, 研究塔基与斜坡的破坏模式及失稳机理有着重要的工

程指导意义和实践价值。

当前国内对输电铁塔稳定的研究集中于杆塔结构稳定性^[1-2],也有涉及地下开挖诱发塔基沉降并影响其稳定性的研究^[3-5],分析了塔基随地表整体下沉及地基土压缩性变化引起的不均匀沉降,危及铁塔安全稳定,甚至导致铁塔倒塌等病害模式;亦有受到冻土冻胀、融沉影响产生的铁塔桩基础冻拔^[6-8]。而对于输电线斜坡的研究主要集中于斜坡稳定性分析^[9-11],如输电杆塔基础开挖扰动斜坡自身平衡^[12-13]或岩土体堆载位置不当引起滑坡^[14]等情况,岩土体堆载于斜坡主滑段可能破坏斜坡初始极限平衡状态,另外开挖塔基的弃土未经规范处理诱发地震条件下地基土振动反应,从而对斜坡构成威胁^[15-17]。这些研究分别着眼于铁塔或斜坡的单方面稳定,而较少考虑输电线路斜坡对杆塔作用影响情况,杆塔作为赋存于斜坡体内的构筑物,对斜坡变形稳定极其敏感。故深入研究斜坡对杆塔的作用关系与斜坡作用下杆塔失效模式可提高电力人员对斜坡安全性重视,对于输电线路运行维护有现实意义。

输电线路斜坡属于电力与岩土工程交叉领域,国内外相关研究较少,或是从结构方面对杆塔变形进行解释,或是单纯视为斜坡进行处理。笔者认为对输电线路有斜坡进行分离处理有失妥当,而应先探究斜坡作用下杆塔的变形失效机理。故本文通过梳理输电线路斜坡失稳案例,基于斜坡与杆塔的空间关系建立斜坡对输电线杆塔的作用模型。通过数值模拟深入研究杆塔与斜坡的变形破坏机理,总结杆塔基础的三种失效模式,以便为输电线路杆塔斜坡的病害防治提供助力,并为输电线路塔基的建设和维护提供借鉴和参考。

1 杆塔变形对斜坡的作用模型

位于斜坡中的杆塔的稳定性的依附于斜坡的局部或整体稳定性,而且杆塔与斜坡的空间位置和相互作用又会引起附加荷载并对斜坡稳定性产生重要影响。杆塔与斜坡的空间分布有 4 种典型模型,即杆塔处于斜坡顶部、斜坡体内、斜坡底部及杆塔跨越不稳定斜坡等 4 种不同情况,采用岩土有限元软件 Phase2.0 模拟典型杆塔斜坡的变形破坏机理。

1.1 杆塔位于斜坡体内

当杆塔位于斜坡体内,伴随着斜坡的不稳定状态,杆塔将随着斜坡的整体失稳产生移位,杆塔的移动会牵引着两端的输电线,甚至导致整个输电线路的瘫痪。以三福高速公路福州南连接线 YK8 +

590—YK8 + 683.989 段右侧斜坡上发生的斜坡失稳案例说明这种破坏模式。该斜坡的全景如图 1 所示,在公路运营后由于持续降雨触发滑坡复活,斜坡变形影响区内的 1#输电铁塔和 2#输电铁塔属于福州至莆田 50 万伏超高压输电干线,其中 1#铁塔位于斜坡体内,塔基周边已产生多条裂缝,第二阶坡面坡脚鼓胀,框架横梁折断;2#铁塔位于斜坡体后缘牵引段,斜坡牵引变形可能会诱发塔基整体移位,存在安全隐患。

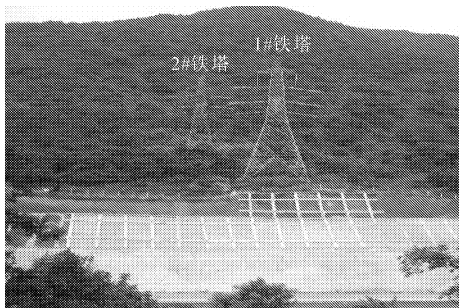


图 1 福州南连接线斜坡全景

铁塔位于丘陵山坡,场地地形总体北西侧高、南东侧低,坡度角 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$,坡向近 112° ,走向垂直高速公路。地质条件复杂,表层为花岗岩风化壳,下覆中风化闪长岩基岩。风化深度大,地下水发育,为典型二元结构边坡,如图 2 所示。

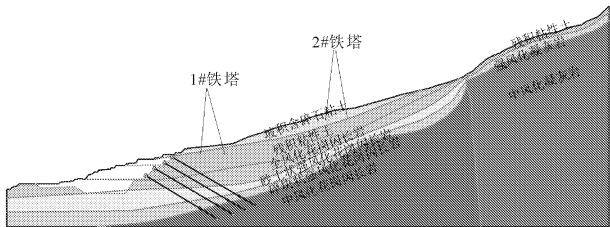


图 2 福州南连接线斜坡工程地质模型

采用 Phase2.0 软件模拟路堑开挖后斜坡变形破坏情况,图 3 即是斜坡最大剪应变云图。路堑斜坡在强降雨诱发下,坡体前缘剪应力集中,斜坡顺浅层滑动面于坡脚处剪出,现场体现为第二阶坡面鼓胀、框架横梁折断,与数值模拟情况吻合。

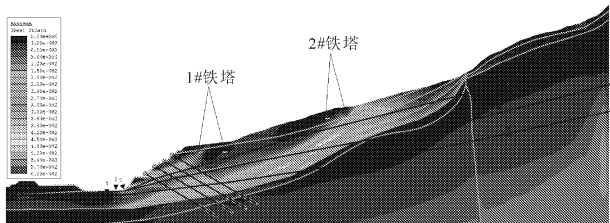


图 3 坡体最大剪应变云图

1#铁塔位于斜坡体内,随斜坡发生局部失稳滑动。杆塔将跟随斜坡体变形,杆塔靠近坡脚处,滑动面较为平缓,以水平变形为主,不均匀沉降为辅。现场可见铁塔周围产生大量裂缝,如图4所示,因斜坡运动严重影响该铁塔安全,已将其进行拆除。



图4 1#塔基周围的拉张裂缝

1.2 杆塔位于斜坡顶部

塔基位于斜坡顶部时,下部斜坡变形或失稳引起上方斜坡应力调整,坡体松弛,产生牵引破坏,威胁斜坡上部杆塔^[18]。塔基因此产生不均匀沉降,倾斜率超限会使得杆塔失稳甚至倾覆,相关规范文件对杆塔倾斜率均有要求。以上述南连接线斜坡失稳案例继续阐释这种变形机理。

由图3最大剪应变云图可看到,受暴雨影响,斜坡应变局部化,诱发斜坡深层蠕变,形成沿着强风化花岗岩闪长岩界面的潜在滑动面。主滑段缓慢变形移动,牵引后段斜坡松动变形,从而威胁后段的2#铁塔安全。该斜坡存在多级滑动面,互相影响,浅层坡体变形易诱发深部滑动面变形运动,使斜坡发生整体破坏,其剪出口应处于路堑斜坡坡脚处。现场发现坡脚处边沟挤压变形,挡墙鼓胀变形,如图5所示,可验证数值分析结果。



图5 挡墙鼓胀及边沟挤压

2#杆塔位于斜坡顶部,处于斜坡运动影响范围。2#铁塔高度小于50 m,塔基宽度约12 m,输电铁塔最大倾斜率为0.006^[19]。差异沉降倾斜度计算公式

如下:

$$\alpha = (S_A - S_B) / L \quad (1)$$

式中: α 为相对倾斜值; S_A 、 S_B 为倾斜方向上A、B两点的沉降值; L 为A、B两点之间水平距离。经换算可得到两侧塔基差异沉降量应低于7.2 cm。若斜坡不进行及时控制,2#铁塔将会随斜坡演变而破坏,故必须对斜坡进行整治。

1.3 塔基位于斜坡底部

当输电线塔基位于不稳定斜坡底部,尤其是处于潜在滑动面剪出口附近时,塔基安全由上部斜坡稳定性控制。斜坡变形失稳使滑体产生大变形并冲击杆塔,使塔基因超覆荷载作用导致失效。

深圳市龙岗区境内的110 kV宏溪ⅠⅡ线N10塔为双回路共塔,位于铜锣径水库内,西侧距简龙村最近约1.5 km,南侧距省道S356最近约600 m。

电塔位于丘坡区域,塔基置于坡度大于20°的坡体中部一个半填半挖形成的平台上。平台后部山体较高,坡体地层为强、中风化粉砂岩,其斜坡地质模型如图6所示。

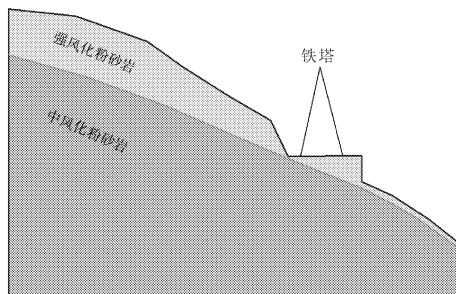


图6 N10塔工程地质模型

采用强度折减法分析该斜坡的破坏模式。塔基后方斜坡存在一条沿强风化与中风化岩层交界面的潜在滑动面,因降雨等外部因素作用诱发整体失稳,斜坡体于临空面剪出;塔基在斜坡大变形过程中受到上方坡体挤压产生倾斜,或由于滑动体的解体破坏产生冲击推覆位于半山腰台阶处的杆塔并导致整体倒塌。

1.4 杆塔跨越不稳定斜坡

在塔基跨越不稳定斜坡潜在滑动面的情况下,杆塔因丧失侧面土体支撑产生不均匀沉降,倾斜超限将引起杆塔失稳倾覆。塔基跨越不稳定边坡有三种类型,即铁塔跨越不稳定边坡顶部、侧边界和底部。由于篇幅所限,本文以铁塔跨越不稳定边坡顶部为例阐述这种成灾模式。

双永高速公路梨子岭隧道进口段仰坡的坡顶建有横切山顶的输电铁塔,该斜坡体上部为砂土状强

风化粉砂岩,下部为中风化粉砂岩,存在强风化层与基岩的界面。根据现场调查及地质勘察资料,建立图 7 的斜坡工程地质模型。

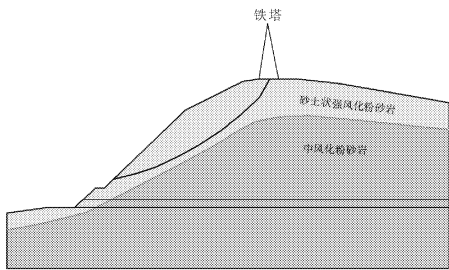


图 7 斜坡地质模型

采用有限元法分析该斜坡变形破坏模式,坡体内部剪切变形见图 8。斜坡潜在滑动面处于上部砂土状强风化层,部分依附于强、中风化基岩层界面,整体呈弧状。结合现场调查及数值模拟结果,判断该斜坡主体处于挤压蠕变阶段,即将进入缓慢滑动或时滑时停阶段。坡顶铁塔塔基处出现拉张裂缝,裂缝下错还不明显,未产生较大的变形。

由图 9 分析,随着斜坡继续变形,塔基前后两侧塔腿出现沉降差,使杆塔向斜坡一侧倾斜。斜坡后缘因开挖松动变形在铁塔基础附近产生 6 道张裂缝,主裂缝长约 20 m~30 m,宽度约 12 cm~15 cm,输电铁塔前后两侧塔腿跨越裂缝,易发生倒塌。

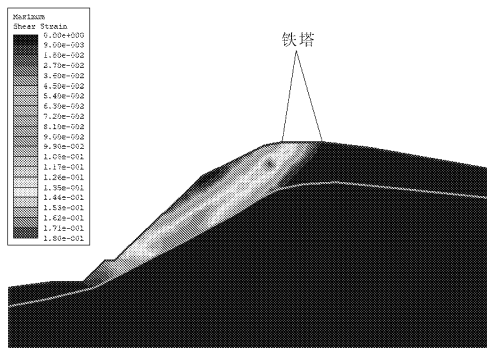


图 8 坡体最大剪应变分布云图

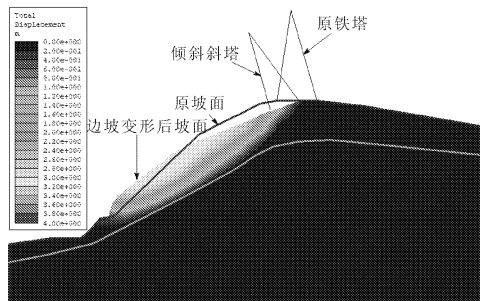


图 9 坡体总位移云图

2 斜坡地基上的杆塔基础失效类型

总结上文典型输电线路斜坡失稳案例可知,斜坡与杆塔二者之间所处空间位置产生不同的杆塔破坏模式。斜坡作用下杆塔变形破坏特征分为三种,即塔基沉降、杆塔移位以及杆塔倾覆。其变形破坏可能只包含其中一种,也可能是多种破坏模式混合。

2.1 斜坡变形导致塔基沉降

针对输电铁塔这种高宽比较大的构筑物,各塔腿沉降量存在差异将导致塔基产生不均匀沉降,在输电线路跨越斜坡时十分常见。此种破坏形式多是由于下方坡体变形削弱或解除塔基侧向约束,使得塔腿倾向临空面产生较大沉降量,另一侧塔腿沉降量较少,沉降差异量使杆塔往临空面倾斜。不均匀沉降引起塔基倾斜会使得塔基根开变化,引发应力重调整,进而威胁杆塔;塔身结构产生次应力,使塔架材料达到屈服强度,造成塔身主材变形断裂;架空地线受力最大,易拉断架空地线或地线横担。塔基倾斜后引起的应力集中会加速杆塔继续倾斜趋势,最终引起杆塔倒塌。

2.2 斜坡滑移诱发杆塔移位

杆塔移位即杆塔从固定位置整体向水平方向移动。在输电线路中,杆塔处于不稳定坡体内易引发杆塔“坐船”跟随斜坡一起滑移。此种破坏形式易对杆塔主架和导线发生破坏,杆塔移位过程中,杆塔根开亦会产生变化,杆塔杆件受到不同程度的拉伸或收缩,易使杆件弯曲变形。杆塔下部杆件受力更多,越到上部反而受力较少,故杆塔第一交叉斜杆先弯曲变形,最后导致杆塔杆件破坏;导线在杆塔移位过程中对其拖曳,随杆塔移位变大,导地线距离变化,两边导线不平衡张力亦会使杆塔倒塌,导地线也因此短路跳闸甚至断线。

2.3 斜坡滑塌冲击杆塔倾覆

杆塔倾覆即杆塔受到的倾覆力矩超过抗倾覆力矩导致的杆塔倒塌。此种破坏形式与斜坡滑动距离有较大关系,若杆塔处于斜坡滑动区域内,斜坡携带的碎屑流会对杆塔材料造成冲击。斜坡巨大推力将直接作用于塔身主材引发结构破坏,甚至断裂塔身,诱发杆塔完全倾倒,亦会牵拉导线引发导线短路甚至断线。

输电线路杆塔在斜坡作用下易诱发上述三种破坏形式,但杆塔在开挖、运行期间也会影响斜坡稳定,如杆塔开挖位置不适会诱发斜坡失稳、杆塔在风力的循环荷载作用下会扰动斜坡。但从影响效果来

说,斜坡作用于杆塔结果更加显著,对其安全产生巨大影响。综合来说二者关系应该是杆塔依附于斜坡但也对其有所影响,受斜坡稳定性控制。但以往研究关注的只是风荷载、地震力甚至雪天下导线覆冰情况下的杆塔安全,对于现今输电线路穿山越岭的形势,电力部门加大斜坡稳定性关注将是其安稳运行输电线路的重点工作。

3 结 论

基于杆塔与斜坡之间的空间相互位置,通过建立对应的空间作用模型,结合杆塔变形失稳特征与破坏机理,得到以下结论:

(1) 杆塔因处于斜坡不同位置会受到不同的影响,斜坡失稳将会对杆塔安全造成威胁。杆塔位于斜坡体内时会造成杆塔移位变形及架空导线断线;杆塔位于斜坡顶部易受斜坡牵引影响;杆塔位于斜坡底部易受斜坡冲击荷载导致杆塔倒塌;杆塔跨越不稳定斜坡易引发倾斜变形。

(2) 斜坡作用下的杆塔失效模式有三种,即塔基沉降、杆塔移位、杆塔倾覆。三种变形均会对杆塔塔身、杆塔基础、架空导线造成不同程度的影响或破坏,其中杆塔对于不均匀沉降引起的杆塔倾斜尤为敏感。

(3) 输电线路斜坡中,铁塔依附于斜坡体上,并受斜坡体稳定性控制,除滑坡以外,崩塌、落石、泥石流等多种地质灾害及其组合效应对杆塔斜坡的稳定性均有影响,应综合评价与治理,或设置足够的安全避险距离。

(4) 对于输电铁塔这类高耸结构,应加强其与斜坡整体变形的相互作用机理和倾斜变形量控制标准的研究,保障输电铁塔运营安全。

参考文献:

- [1] 林智伟. 斜插式电力铁塔基础稳定性的研究及其数值模拟[J]. 中国设备工程, 2018(2): 184-185.
- [2] 李美峰, 冯 勇, 许 泳, 等. 输电线路铁塔三维数字化建模方法研究[J]. 山东电力技术, 2019, 46(7): 18-23.
- [3] 柳剑锋. 煤矿采空区对输电线路塔基稳定性的影响[J]. 电力勘测设计, 2015(6): 22-26.
- [4] 吴朝峰, 查剑锋. 老采空区上方特高压输电线塔塔基稳定性评价方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017(S1): 402-406.
- [5] 曹新款. 采空区高压输电线路铁塔地基稳定性评价[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 59-61.
- [6] 王国尚, 俞祁浩, 郭 磊, 等. 多年冻土区输电线路冻融灾害防控研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 141-147.
- [7] 王国尚, 俞祁浩, 王仕俊. 国内外多年冻土区输电线路建设问题探讨[J]. 电力勘测设计, 2015(S1): 197-202.
- [8] 王国尚, 俞祁浩, 郭 磊, 等. 多年冻土区输电线路冻融灾害防控研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 137-143.
- [9] 林阿娜, 王 浩, 颜 斌, 等. 邻近输电塔路堑边坡失稳风险定量评估及加固工程设计优化[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 19-29.
- [10] 赵 健, 杨 立, 邓冬梅, 等. 基于 3DEC 对某输电线路新建铁塔岩质边坡的稳定性评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(2): 55-60.
- [11] 吴毅江, 陈 波, 阮 航, 等. 基于改进属性识别模型的塔基山坡稳定性评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3138-3146.
- [12] 郭春松, 孔令文, 尹 磊. 山区输电线路塔基开挖弃土边坡稳定性分析[J]. 电力勘测设计, 2017(1): 6-9.
- [13] 陈 英, 马东涛, 杨 敏. 超高压输电线路塔基滑坡灾害特征分析与治理[J]. 电力建设, 2014, 35(10): 69-73.
- [14] 樊柱军, 刘晓娟, 程东幸. 西藏藏中与昌都联网工程八宿县 10L336—10L338 段滑坡及塔基稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 55-60.
- [15] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 弃土堆填对斜坡输电塔桩基地震反应的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2277-2283.
- [16] 陈禹树, 赵其华, 陈继彬. 输电线路斜坡场地地震效应的数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 22-27, 128.
- [17] 喻豪俊, 陈继彬, 丁梓涵. 桩径对山区输电线路塔基础抗震性能影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(4): 101-106.
- [18] 王 浩, 王明哲, 陈秀晖, 等. 复杂路堑高边坡施工期多次滑动机理分析与讨论[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 14-21.
- [19] 架空送电线路基础设计技术规定: DL/T 5219—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.