

复杂地质条件下牵引场与张力场选址的风险及对策

王海军, 咎剑东

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 为了提升复杂地质条件下牵引场与张力场选址的安全性与工程可靠性, 本文系统分析了滑坡体、软土层、高差陡坡与不良水文等地质风险类型, 采用工程地质测绘、钻探取样与有限元模拟等方法识别风险, 结合极限平衡分析与敏感性参数扰动, 建立稳定性评价模型并提取关键控制因子, 并针对不同风险情境, 提出了源头避让、地基加固、布设优化及排水控制等多维度技术对策, 以期为促进输电线路张力系统建设提供有益参考。

关键词 复杂地质; 牵引场; 张力场选址; 风险

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.042

0 引言

在电力线路工程建设领域, 复杂地质条件频繁出现, 像山地起伏、沼泽湿地、软土分布等区域屡见不鲜。牵引场与张力场作为线路架设施工的核心场地, 选址合理与否直接关系到施工能否顺利开展。但复杂地质条件为选址工作增添了巨大挑战, 地质的不稳定可能引发场地塌陷、沉降, 危及施工设备及人员安全; 不同地质对场地承载力要求不同, 选错位置会阻碍施工正常推进。所以, 深入研究选址风险及对策十分必要。

1 复杂地质条件下牵引场与张力场选址的风险类型分析

1.1 地质不稳定体影响

滑坡、崩塌及岩溶发育区分布于山区与喀斯特地貌区域, 地质不稳定体的存在极易引发场址失稳。滑坡体覆盖层厚度多在 2~10 m 之间, 剪切带内黏聚力通常低于 15 kPa, 内摩擦角不足 20°, 地基承载力低于 80 kPa, 远低于牵引设备基础常需的 120 kPa 至 150 kPa 安全值。岩溶区域常见地下空腔、落水洞和溶蚀裂缝, 天然承载面不连续, 桩基持力层不明确, 桩基侧摩阻力难以计算。若受强降雨或地下水扰动, 潜在滑带易饱和和软化, 抗剪强度骤降, 安全系数迅速降低至 1.0 以下, 存在突发失稳的高风险。布设于此类区域的锚固基础在施工中常面临滑塌、桩倾斜、护坡变形等严重地质灾害, 导致工程中断和设备报废^[1]。

1.2 不良地层力学特性

软土、膨胀土及高液限粉土存在于冲积平原、湖积区及部分黄土高原地带, 其地层结构松散、强度低、

变形大, 基础稳定性极差。软土区域常见含水率高于 40%, 天然孔隙比大于 1.0, 压缩模量小于 2 MPa, 沉降速率快、幅度大, 牵引设备施工后 30 日内沉降量可超过 80 mm, 超过设备允许的 10 mm 控制值。膨胀土受水影响膨胀率可达 3% 以上, 干湿循环作用下地基体积变化剧烈, 诱发设备基础开裂和错台。高液限粉土在液限大于 50%、塑性指数超过 25 的情况下, 抗剪强度不足 10 kPa, 承载能力低于 60 kPa, 施工中极易出现推挤、滑移现象。未经加固的此类土层无法提供足够的稳定性和持久力, 极易导致锚固装置偏移失效, 严重影响张力平衡与导线架设精度^[2]。

1.3 地形陡峭与高差剧烈

山地和丘陵区域由于高差大、坡度陡, 场地布设极易受到地形限制, 造成施工难度显著上升。多数山区牵引场需布设在坡度 15° 至 35° 之间区域, 场地平整工程量大, 局部需要爆破整平或设挡墙稳定边坡, 增加施工周期和投资。高差超过 20 m 的场地分布导致牵引索张力不均, 垂直落差引起导线拉力差异超过 10 kN, 张力场无法实现均衡控制, 影响导线同步架设精度。机械设备在陡坡区布设需修建临时作业平台, 通常需采用混凝土预制板铺设并加装锚固件, 每百米运输道路开挖量可达 400 m³, 边坡稳定安全系数需控制在 1.3 以上。设备搬运中坡度超过 12% 的道路不利于大型卷盘、张力机等重型设备通行, 存在侧滑、翻车等高风险, 极大地制约了施工组织 and 应急响应效率。

1.4 水文与排水障碍

牵引场与张力场位于高地下水位区、强降雨带或排水不畅地段时, 极易形成施工积水和结构浸泡风险,

严重时会导致基础失稳。高地下水位区地下水埋深常小于 1.5 m, 若未设置有效排水系统, 施工基坑极易涌水, 孔隙水压力增大至 30 千帕以上, 致使地基有效应力下降超过 50%, 强度大幅衰减。降雨强度超过 50 mm 每小时时, 洼地或断陷盆地场地最大积水深度可达 40 cm, 若排水坡度小于 1.5% 或排水沟宽度不足 0.4 m, 排水能力不足将导致持续性积水, 进而造成基础土体软化和承载力降低。已建设备基础在长期浸泡条件下混凝土抗压强度下降, 钢筋锈蚀加剧, 基础沉降增加 10 mm 以上。水文障碍还影响施工工期, 设备基础施工中断时间可能延长 2 至 4 周, 造成架线进度整体滞后。

2 复杂地质条件下牵引场与张力场选址的风险识别与评估方法

2.1 地质勘察与参数获取

在复杂地质条件下, 牵引场与张力场的选址必须以详尽的地质勘察为前提, 确保场地具备足够的稳定性和承载能力。首先, 开展比例尺为 1:2 000 至 1:500 的工程地质测绘, 全面识别断裂带、滑坡体、软弱夹层、岩溶、冲沟等不良地质体, 明确地貌单元、水文地质条件和地层分布特征, 为钻探点布置提供依据。在可行选址区域, 应布设一定数量的钻孔, 深度不小于基础底面以下 5 m, 孔距一般控制在 30 ~ 50 m。重点区域还需开挖深度 2 m 以上的试坑, 观察土体分层、结构、颜色、含水状态和扰动程度, 并确认地下水位埋深及水量变化情况。

采集岩土样本后, 需进行一系列土工试验。通过三轴剪切试验获取土体的黏聚力、内摩擦角和抗剪强度, 渗透试验用于评估不同土层的排水能力, 击实试验确定最大干密度和最优含水率, 为后期地基处理和回填施工提供技术参数。对软土和高液限粉土, 还应测试其压缩模量、压缩系数及沉降性能, 判断其在施工荷载作用下的变形响应。同步开展标准贯入试验或静力触探试验, 获取贯入阻力、尖端阻力和侧摩阻力, 进一步推算地基承载力与桩基础侧摩阻力^[3]。

2.2 稳定性与适应性评价

在获取基础参数后, 应建立多因素控制的稳定性评价模型, 综合评估各备选场址的地质适应性与施工可行性。评价方法上可采用极限平衡分析、分层总和法、Bishop 法等经典边坡稳定性计算公式, 针对滑坡体或边坡选址区, 计算其抗滑安全系数:

$$K_s = \frac{T}{R}$$

其中, T 为抗滑力, R 为滑动力。若 $K_s < 1.2$,

该区域应列为禁用区。对于复杂土层结构的区域, 建议引入二维或三维有限元模拟方法, 如使用 PLAXIS 或 ABAQUS 软件构建地质模型, 模拟地应力场、水压场与结构响应。同时, 设定稳定性综合评价指标体系, 量化地形坡度 i 、地下水埋深 h_w 、地基承载力 q_u 、最大沉降量 S_{max} 、排水条件 γ 等参数, 对各场址赋分排序, 辅助选址优选。

2.3 多因素敏感性分析

在牵引场与张力场选址中, 地质条件往往具有高度不确定性, 不同参数间相互作用复杂, 必须通过多因素敏感性分析识别对场地稳定性影响最大的控制因子。分析过程基于有限元模型或简化力学模型, 分别对关键地质参数进行扰动处理, 观察其对地基承载力、安全系数和沉降量等指标的变化幅度, 从而量化其敏感性强弱。扰动幅度一般设置为 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 三个等级。

常选参数包括土层厚度、地下水位、地基模量、荷载大小、填土密实度、边坡角度等。在模型中逐一改变单一参数, 保持其余条件不变, 通过计算得出基础沉降量和稳定性安全系数的变化结果。分析表明, 地下水位变化对安全系数的影响最大, 其次是地基模量和荷载大小, 说明在施工设计中应优先关注降排水系统与地基处理工艺。具体结果如表 1 所示。

表 1 敏感性分析结果

参数名称	原始值	增加 10% 变化幅度	减少 10% 变化幅度	敏感性等级
土层厚度	8.0 m	安全系数降低 2.1%	提高 2.5%	中
地下水位埋深	1.5 m	安全系数提高 6.3%	降低 7.8%	高
地基变形模量	25 MPa	沉降量减少 5.7%	增加 6.4%	高
施工集中荷载	35 kN/m ²	安全系数降低 4.6%	提高 4.3%	中
边坡坡度	30°	安全系数降低 1.4%	提高 1.2%	低

3 复杂地质条件下牵引场与张力场选址的风险应对策略

3.1 合理规避高风险地段

选址阶段的地质风险规避策略以优先避让不良地质单元为基础, 提前识别地质灾害隐患区, 避免盲目进入高风险地段, 造成后期施工难度增大、工程质量无法保障。

首先,基于高分辨率遥感卫星影像和无人机低空航测数据,开展地貌信息解译,识别滑动痕迹、断裂延伸、冲蚀线及塌陷分布特征。遥感成果结合1:2 000或1:1 000比例尺的地形图,借助数字高程模型(DEM),分析地形坡度、坡向、地表排水路径和汇水区。针对地形坡度超过 25° 、排水不畅区、表层松散堆积物厚度大于5 m的地段,初步划定为限制开发区。

其次,组织多专业联合实地踏勘,采集代表性剖面资料,验证遥感与图上分析成果。重点踏查滑坡体边界、滑面深度与活动迹象,断裂带构造岩风化强度与宽度,冲沟水位及底部侵蚀深度,淤泥区沉积特性与含水状态。通过地质调查成果将场地划分为三类:一类为适宜建设区,二类为需专项处理的缓冲区,三类为禁止建设区。所有禁止建设区应严格禁止设备布设,缓冲区可在专项治理后按限压条件使用。该分区成果必须纳入设计图纸与施工图会审体系,并在现场通过标志桩、施工告知书等形式强制执行,落实源头避灾的管理机制^[4]。

3.2 地基加固与处理措施

针对不同地质类型采取专项加固方案:深厚软土区采用CFG桩复合地基,桩径300~500 mm,桩长8~12 m,间距1.2~1.5 m,将承载力从60 kPa提升至150 kPa以上;湿陷性黄土与粉土区域,采用 ≥ 1.5 m厚灰土换填,分层夯实(层厚 ≤ 20 cm),压实系数 ≥ 0.95 。

滑坡体及斜坡区域优先布设锚杆与抗滑桩,锚杆长度 ≥ 12 m,倾角 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$,锚固段嵌入稳定岩层,锚固力为施工最大拉力1.5倍;抗滑桩径 ≥ 1 m,桩长需穿透滑动面0.5 m以上,间距 ≤ 4 倍桩径,桩顶设钢筋混凝土盖梁。

高水位饱和土区采用堆载预压+排水板组合工艺,堆载高度 ≥ 2 m,预压 ≥ 30 天,排水板间距1.0~1.5 m。张力场锚固区采用“锚杆—C30混凝土基础”设计,基础埋深 ≥ 2.5 m,底部设抗拔肋板,整体抗拔力满足设计张力1.5倍安全系数。加固后需通过静载试验及变形监测,确认变形符合限值方可施工。

3.3 布置优化与负载调整

遵循“顺坡向、避高差、控偏载、保通行”原则,场址选在坡度 $5^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 平缓区域,避开沟谷与山脊变坡处。牵引场与张力场宜布设于导线延长线,偏离角 $\leq 15^{\circ}$;转角区域需增设导引滑轮组及侧向限位机构。

场地按承载力分区布置:重载区(张力机、卷盘车)选在 ≥ 120 kPa区域,采用混凝土条基或块基(宽 $\geq$ 设备1.2倍,埋深 ≥ 1.2 m);辅助区(轻载设备)可

设于80~120 kPa区域。设备基础需经标高校核与水平复测,确保线性一致。

导线张力系统设自动调节模块,对坡度、长度引发的张力差自动微调;张力差超10 kN时,启用差动控制器同步调节牵引速度,确保张力稳定在设计值 $\pm 10\%$ 内,避免断线或垂度偏差^[5]。

3.4 排水系统与雨季防控

构建“截、排、沉、抽”综合系统,外围截水沟设于上游,宽 ≥ 0.5 m,深 ≥ 0.6 m,边坡1:1.5~1:2;内部排水沟纵横布设,宽0.3~0.4 m,坡度 $\geq 2\%$,引流至沉淀池(每1 000 m^2 配2~3 m^3)或集水井,池底做防渗处理。

地下水位 < 1.5 m时,设间距10~15 m的轻型井点或管井,保证水位在基底以下0.5 m;砂层区铺 ≥ 20 cm厚5 mm级配碎石滤料导排。

雨季实施三级响应,日常巡查排水设施,储备抽水泵、砂袋等物资;暴雨红色预警或日降雨超50 mm时,停止浇筑与设备进场,覆盖设备并设 ≥ 30 cm高临时挡水堤。施工后模拟人工降雨测试,记录抽水时间与水位回落速率,验证排涝能力。

4 结束语

本文深入剖析了复杂地质条件下牵引场与张力场选址面临的多种风险,包括地质不稳定体、不良地层力学特性、地形及水文等多方面,并针对性地提出合理规避高风险地段、地基加固处理、布置优化与负载调整、完善排水系统等应对策略。未来,随着电力线路工程向更多复杂地质区域拓展,需持续加强选址技术研究与创新,结合新技术、新材料提升风险防控能力,保障施工安全与工程高效推进,为电力基础设施建设提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 孙军,王俊斌.复杂地形下特高压输电线路施工技术研究[J].电力设备管理,2025(01):189-191.
- [2] 张晴晴,孙晓明.220kV输电线路架线施工技术研究[J].电力设备管理,2025(04):234-236.
- [3] 沈玺.输电线路施工中的不停电跨越技术分析[J].集成电路应用,2025,42(03):184-185.
- [4] 朱俊松.特高压输电线路跨越复杂地形施工的关键技术挑战与创新解决方案[J].建设机械技术与管理,2025,38(02):142-144.
- [5] 黎向前.高压架空输电线路的张力放线施工技术[J].集成电路应用,2020,37(07):124-125.