

软土地基中 500 kV 输电线路钻孔灌注桩施工沉降控制措施研究

庞土伟

(中国能源建设集团广东火电工程有限公司, 广东 广州 510700)

摘要 软土地基承载力低、压缩性高, 易使 500 kV 输电线路钻孔灌注桩基础产生沉降, 威胁线路安全稳定。本文针对这一问题, 从施工前、施工过程及施工后三个阶段构建沉降控制体系。施工前开展地质勘察优化参数, 完成专项施工方案设计, 管控材料设备质量, 组织人员培训筑牢基础; 施工中实施地基预处理加固, 严控施工工艺与浇筑养护质量, 实时监测沉降并备好应急措施; 施工后落实承载力检测、长期观测、防腐加固及效果验证, 保障长效稳定。该体系旨在为软土地基输电线路基础沉降控制提供有效技术参考。

关键词 软土地基; 500 kV 输电线路; 钻孔灌注桩; 沉降控制

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.019

0 引言

500 kV 输电线路是电力系统骨干网架, 其安全稳定运行直接关系到区域电力供应可靠性。我国沿海及江河冲积平原广泛分布软土地基, 这类地基含水率高、孔隙比大、承载性能差, 在输电线路钻孔灌注桩基础荷载作用下, 易出现不均匀沉降或过量沉降, 引发杆塔倾斜、线路张力失衡等隐患。针对软土地基特性制定科学完善的沉降控制措施, 对保障 500 kV 输电线路基础稳定性至关重要。本文结合软土地基工程特点与输电线路施工要求, 系统探讨钻孔灌注桩基础沉降控制的关键技术与实施路径。

1 施工前沉降控制准备工作

1.1 软土地基地质勘察与参数优化

软土地基承载力低、压缩性高, 施工前需用钻探与物探结合的专业勘测方法, 对工程场地全方位勘察^[1]。重点查明软土层分布范围、厚度、含水率、孔隙比及承载力特征值等核心参数, 掌握地下水位埋深、水流方向及地层渗透性等水文地质条件。依托勘察数据, 结合 500 kV 输电线路钻孔灌注桩荷载要求优化地基设计参数, 明确桩长、桩径及桩间距等关键指标, 确保桩基础与软土地质条件深度匹配, 从源头降低沉降风险(见表 1)。

1.2 钻孔灌注桩施工方案专项设计

结合软土地基工程特性与 500 kV 输电线路荷载需求, 编制针对性钻孔灌注桩施工方案。方案需明确钻孔工艺选择, 软土易塌孔, 优先采用泥浆护壁成孔工艺,

表 1 软土地基加固关键技术参数

加固方法	核心控制参数	数值标准
	换填材料含泥量	≤ 5%
	分层摊铺厚度	20 ~ 30 cm
换填垫层法	分层压实度	≥ 95%
	处理后地基表层承载力	≥ 120 kPa
	换填厚度	0.8 ~ 1.5 m
	水泥强度等级	42.5 级
	水泥掺量(占软土重量)	15% ~ 20%
	钻杆转速	60 r/min
水泥搅拌桩法	钻杆提升速度	≤ 0.8 m/min
	搅拌桩直径	500 mm
	搅拌桩长度	8 ~ 12 m
	桩体 28 天无侧限抗压强度	≥ 1.5 MPa
	后期沉降控制量	≤ 20 mm

确定合理泥浆比重、黏度及含砂率控制标准。设计桩身混凝土强度等级, 精准计算混凝土配合比, 满足桩体承载力与抗变形要求。制定专项桩位布置方案, 优化桩群排列方式实现荷载均匀传递, 避免局部应力集中导致不均匀沉降, 方案需经专家组从技术、安全及经济性角度严格审核后实施。

1.3 材料与设备质量管控

施工材料质量直接影响钻孔灌注桩承载性能与沉降控制效果, 需建立全流程质量管控体系。钢筋、水泥、

砂石等主要原材料选择信誉良好、质量可靠的供应商，进场时严格核查产品合格证、检测报告，按规范抽样复检，确保钢筋抗拉强度、水泥安定性及砂石级配等指标符合设计标准。在施工设备方面，配备性能稳定的钻孔机械、混凝土搅拌机及振捣设备，钻孔机械需适应软土地层钻进，振捣设备保证振捣功率满足混凝土密实度要求。施工前对所有设备全面检测、调试与维护，确保施工中稳定运行，避免设备故障导致施工质量缺陷引发沉降问题。

1.4 施工人员技术交底与培训

软土地基施工复杂，500 kV 输电线路施工标准高，需对施工人员开展专项技术交底与培训。技术交底采用书面与现场演示结合的方式，讲解钻孔灌注桩施工工艺要点、软土地基施工注意事项、沉降控制关键环节及操作规程。重点培训泥浆制备与控制、钻孔速度调节、混凝土浇筑顺序及振捣操作等核心技能，明确施工人员岗位职责。强化安全与质量意识培训，让施工人员充分认识软土地基沉降控制的重要性，掌握常见质量问题的预防与处理方法，确保各项沉降控制措施有效落实。

2 施工过程沉降控制核心措施

2.1 软土地基预处理与加固

软土地基含水量高、孔隙比大、承载力低，在杆塔荷载作用下易产生过量沉降，施工前必须系统性预处理与加固^[2]。通过详细地质勘察明确软土层分布范围、厚度及物理力学指标，为加固方案提供依据。软土层厚度超3 m、承载力低于80 kPa的区域，优先采用换填垫层法，选用颗粒级配良好、含泥量小于5%的碎石或级配砂石作为换填材料。换填厚度根据计算确定，通常在0.8~1.5 m之间，分层摊铺厚度控制在20~30 cm，用小型压路机或平板振动器分层压实，每层压实度达95%以上，确保地基表层承载力提升至120 kPa以上。换填处理难以触及的深层软土，采用水泥搅拌桩复合地基加固技术，选用42.5级普通硅酸盐水泥，水泥掺量为软土重量的15%~20%。搅拌桩机钻杆转速控制在60 r/min，提升速度不超过0.8 m/min，确保水泥浆与软土充分混合，形成直径500 mm、长度8~12 m的搅拌桩，桩体28天无侧限抗压强度不低于1.5 MPa。通过桩体与地基土协同作用降低地基压缩性，将后期沉降量控制在20 mm以内，为钻孔灌注桩施工提供均匀稳定的地基条件。

2.2 钻孔灌注桩施工工艺参数控制

钻孔前平整场地并铺设钢垫板，确保钻机安装牢固，钻杆垂直度偏差不超过1%。钻孔速度根据软土层特

性动态调节，表层流塑状软土中采用0.3~0.5 m/min低速钻进；进入下部可塑状软土后，速度提升至0.8~1.0 m/min，避免钻进过快产生负压导致孔壁坍塌，减少对桩周土体的扰动。泥浆护壁采用膨润土、纯碱及CMC混合配置的优质泥浆，初始泥浆比重1.2~1.3，黏度18~22 s，含砂率小于4%。随钻进深度增加，每钻进5 m检测一次泥浆指标，进入砂层时提高泥浆比重至1.3~1.4，确保泥浆有效包裹孔壁、悬浮钻渣。成孔后立即用空气吸泥法第一次清孔，清除孔底沉渣，之后下放钢筋骨架和导管，完成后利用导管循环泥浆二次清孔，将孔底沉渣厚度严格控制在50 mm以内，清孔后泥浆比重降至1.1~1.2，黏度16~18 s，为混凝土浇筑创造条件。钢筋骨架安装采用十字形导向架确保居中，骨架底部与孔底间距控制在30~50 cm，通过点焊固定在导管上，防止混凝土浇筑时移位，保障桩体受力均匀。

2.3 混凝土浇筑与养护质量把控

导管法施工选用Φ250 mm无缝钢管，使用前经水密性及承压试验确保无渗漏。导管下口距孔底25~40 cm，首次浇筑采用“剪球法”，保证首批混凝土使导管埋深≥1.0 m。浇筑需连续，导管埋深控制在2~6 m，每30分钟测混凝土面高度并调整导管提升速度，避免断桩、夹泥或导管堵塞。采用C30、C35商品混凝土，坍落度180~220 mm，初凝时间≥6小时，专人检测和易性，不合格者禁用。插入式高频振捣棒振捣，间距50 cm、时长20~30秒，振捣至表面泛浆无气泡，确保桩体密实。浇筑后桩顶高出设计标高50~100 cm，初凝后剔除浮浆。按环境温度制定养护方案，夏季土工布洒水、冬季塑料薄膜+保温被覆盖，养护≥14天，保证28天强度达设计值。

2.4 施工过程实时沉降监测与调整

监测点沿输电线路杆塔基础周边每隔3 m布设一个，每个基础不少于4个，关键桩位及软土厚度突变处增设。监测点采用Φ20钢筋植入地基30 cm，顶部打磨光滑并标注编号。监测设备选用DSZ2级精密水准仪和TS02全站仪，测量精度分别达到±0.5 mm和±1 mm，确保数据准确。监测频率依施工进度调整，钻孔及混凝土浇筑等关键阶段每2小时一次，基础施工完成后每日一次，连续7天沉降稳定可调整为每3天一次，直至杆塔组立完成。监测数据及时记录整理，绘制沉降—时间曲线，通过趋势分析判断沉降发展规律。桩体内部及地基土中埋设应力传感器，实时监测桩体轴力及地基土应力变化，结合大数据分析建立沉降预测

模型。监测数据出现异常,单次沉降量大于 5 mm 或连续 3 天累计沉降量大于 10 mm 时,立即暂停相关施工,组织技术人员分析原因。钻孔扰动导致的需减缓钻进速度并加强泥浆护壁;桩体荷载不均导致的需调整桩体参数或增加桩数,确保沉降始终控制在设计允许的 30 mm 范围内。

2.5 突发沉降风险应急处置

预案明确应急组织机构、职责分工及处置流程,定期组织施工人员应急演练,提升响应能力^[3]。应急物资实行“定点存放、专人管理”,施工现场设应急物资库,储备足量沙袋、钢板、应急注浆设备、水泥、速凝剂等加固材料,以及发电机、水泵等应急设备,确保随时可用。施工中孔壁坍塌引发局部沉降,立即停止钻孔作业,撤出人员及设备,向孔内填充沙袋至坍塌位置以上 1 m,同时高压注浆向孔壁周边土体注入水泥浆,24 小时地基稳定后,重新勘察孔壁情况再恢复施工。桩体倾斜导致沉降异常,用全站仪精准测量倾斜角度,超过 1% 时立即停止浇筑,重新调整桩位或在倾斜桩周边增设补桩,补桩参数与原桩一致,保障基础整体稳定。遇暴雨、强风等恶劣天气,提前 24 小时停止施工,已开挖桩孔用钢板覆盖并加压固定,已浇筑桩体覆盖防雨布和保温被,防止天气因素扩大沉降风险。

3 施工后沉降检测与长效保障

3.1 钻孔灌注桩承载力与强度检测

施工完成后,混凝土强度达设计要求,需对钻孔灌注桩进行承载力与强度专项检测。单桩竖向承载力采用静载荷试验检测,加载方式按规范执行,确保检测结果真实反映桩体实际承载能力,满足 500 kV 输电线路荷载设计要求。桩体混凝土强度采用回弹综合法等无损检测手段全面检测,重点检查桩身、桩头及桩底等关键部位,确保强度均高于设计值。通过钻芯取样检测桩体完整性,排查断桩、夹泥等质量缺陷,检测不合格的桩体及时加固处理,确保基础承载能力达标。

3.2 长期沉降观测与数据评估

建立长期沉降观测机制,杆塔基础及周边设置永久性沉降观测点,观测周期不少于 1 年,定期记录沉降数据^[4]。观测数据系统化整理分析,结合地质条件、施工参数及荷载情况,评估沉降发展规律,判断是否存在后期不均匀沉降风险。观测数据显示沉降速率过快或累计沉降量接近设计限值时,及时预警并分析原因,采取针对性措施干预。长期观测数据的积累,可为后续同类软土地基输电线路工程的沉降控制提供参考。

3.3 基础防腐防渗与加固补强

软土地基地下水含量高,易对钻孔灌注桩基础产生腐蚀,影响稳定性并间接加剧沉降。施工后对基础全面防腐防渗处理,桩头及暴露部分喷涂防腐涂料、涂刷防锈漆,地下部分桩体包裹防腐蚀材料,设置阴极保护系统提升抗腐蚀能力。定期检查基础周边地质环境,发现地基土松动、塌陷,及时用注浆加固等方式补强,防止承载力下降引发沉降。维护基础周边排水系统,确保排水通畅,避免地下水位上升浸泡地基影响稳定性。

3.4 沉降控制效果验证与优化

施工后全面验证工程沉降控制效果,对比施工前后地质参数、施工过程监测数据及竣工后检测结果,评估沉降控制措施的有效性^[5]。结合 500 kV 输电线路运行要求,分析沉降控制是否满足线路安全稳定运行标准。针对验证中发现的问题总结经验,优化软土地基钻孔灌注桩施工的沉降控制技术方案,完善工艺参数与管控措施,为后续软土地基中高压输电线路钻孔灌注桩施工提供更科学高效的沉降控制参考。

4 结束语

软土地基 500 kV 输电线路钻孔灌注桩的沉降控制,是贯穿工程全周期的系统工程,需兼顾地质特性、施工工艺与长期运维。本文提出的“事前准备、事中控制、事后保障”三段式管控体系,通过勘察优化、方案设计、工艺把控、实时监测及长效维护等措施,有效解决了软土地基沉降难题。实践表明,该体系可从源头降低沉降风险,确保基础承载性能与稳定性。未来需结合工程实践进一步积累数据,持续优化沉降控制技术,为同类工程提供更具针对性的解决方案,助力高压输电线路工程质量提升。

参考文献:

- [1] 吴亮杰.大跨度盖板涵在软土地基上的结构设计及沉降控制方法[J].汽车周刊,2025(12):243-245.
- [2] 庄煌森.软土地区工程桩基设计与格栅水泥搅拌桩加固研究[J].四川水泥,2025(11):55-56,59.
- [3] 邓德建.就地固化技术在高速铁路软土便道地基处理中的应用[J].四川水泥,2025(11):214-216.
- [4] 贵晓伟,包华,朱博,等.雷击 500 kV 输电线路对并行埋地管道的干扰过电压特性及安全间距研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(10):21-30.
- [5] 杨继东,赵远强.国际 500 kV 输电线路工程的导线防振设计方法[J].黑龙江电力,2025,47(05):428-431,438.