

# Optimization of foundation selection and reinforcement schemes for transmission lines on soft soil foundation

Tianqi Si

China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830062, China

## Abstract

To address the issues of foundation settlement and inclination of transmission lines on soft soil foundations and ensure line safety, this paper studies the selection and reinforcement schemes of their foundations. First, clarify the selection principles of safety, economy, adaptability and environmental protection. Compare the characteristics of cast-in-place piles, extended type and large plate foundation, and distill the key points of selection that combine geological conditions, load requirements and construction conditions. Further elaborate on the necessity of reinforcement, and sort out the principles, applicable scenarios and selection basis of five commonly used reinforcement methods. In combination with the 220kV project along the southeast coast, it is determined that cast-in-place piles will be the main foundation, supplemented by high-pressure jet grouting reinforcement. Monitoring shows that after reinforcement, the average settlement rate of the foundation has dropped to 1-2mm per month, and the maximum horizontal displacement is less than 10mm, meeting the design requirements. Finally, strategies for numerical simulation optimization, application of new technologies and materials, and full life cycle cost analysis are proposed to provide a basis for similar projects.

## Keywords

Soft soil foundation Transmission lines; Reinforcement plan

## 软土地基输电线路基础选型与加固方案优化

司天琪

中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830002

## 摘要

为解决软土地基输电线路基础沉降、倾斜问题,保障线路安全,本文研究其基础选型与加固方案。先明确安全、经济、适应、环保的选型原则,对比灌注桩、扩展式、大板式基础特性,提炼结合地质条件、荷载要求与施工条件的选型要点。再阐述加固必要性,梳理五种常用加固方法的原理、适用场景及选择依据。结合东南沿海220kV工程,确定以灌注桩为主要基础,辅以高压喷射注浆加固。监测显示,加固后基础平均沉降速率降至1-2mm/月,水平位移最大量<10mm,满足设计要求。最后提出数值模拟优化、新技术新材料应用及全寿命周期成本分析的策略,为同类工程提供依据。

## 关键词

软土地基; 输电线路; 加固方案

## 1 引言

我国东南沿海、河口三角洲等区域广泛分布的软土地基,因具有高含水量、大孔隙比、低强度及高压缩性等工程特性,成为输电线路基础建设的关键制约因素。随着电力需求增长,输电线路电压等级逐步提升至220kV及以上,输送容量持续增加,对基础承载能力与稳定性的要求更为严苛。当前工程实践中,基础选型常面临“安全与成本失衡”“类型与软基特性不匹配”等问题,加固方案也存在针对性不足、后期维护成本高的局限。基于此,本文将对软土地基输电线路基础选型与加固方案优化进行相关研究。

【作者简介】司天琪(1991-),男,中国河南夏邑人,硕士,高级工程师,从事输电线路、基础工程研究。

## 2 输电线路基础选型

### 2.1 基础选型原则

输电线路基础选型为工程关键环节,需要综合多维度因素并恪守安全、经济、适应、环保四大核心原则<sup>[1]</sup>。安全性为首要准则,要求基础具备适配强度与稳定性以承载铁塔、导线及自然荷载,需要通过精确力学计算与结构设计确保承载能力冗余,同时兼顾材料耐久性以抵御长期自然侵蚀,保障设计使用年限内安全可靠。经济性原则需要在安全阈值内优化全寿命周期成本,涵盖优先选用性价比高、易获取的建材,通过设计优化减少耗材用量,以及采用简便施工形式缩短工期降本,同步依托耐久设计降低后期维护费用。适应性原则要求匹配工程区域地质条件、地形特征与气候要求。环保性原则强调施工中减少土石方开挖与植被破坏、控制噪声粉尘污染,优先采用原状土基础等低扰动工艺,兼顾

自然资源合理利用与生态平衡维护。

## 2.2 常见基础类型及特点

输电线路工程中常见灌注桩、扩展式、大板式三类基础，各有技术特性与适用场景。灌注桩基础适应复杂地质，桩径桩长可按需调整且单桩承载力高，但施工复杂易出现夹泥、断桩等质量问题，周期较长且泥浆处置不当易污染环境，适用于杆塔荷载大、地质差区域。扩展式基础通过基坑浇筑混凝土基座扩承压面积，施工简便、技术要求低，适用于地基承载力好、地下水位深、荷载小的场地，然荷载大或地基差时需增尺寸与混凝土用量以控成本，软土地基中适用性受限。大板式基础属大开挖类型，混凝土耗量低、重量轻，施工简便且立柱高度可随地设置，能配合全方位长短腿铁塔减边坡破坏，适用于地质差、平丘及高地下水水位区，但其埋深浅，承受大水平力或上拔力时稳定性较弱。

## 2.3 软土地基条件下的基础选型要点

软土地基下输电线路基础选型需统筹地质条件、荷载要求与施工条件三大核心要素。软土地基具有高含水量、大孔隙比、高压缩性及低强度特性，直接影响基础稳定性与承载能力，选型前需通过详细地质勘察明确软土层厚度、分布范围及物理力学参数。软土层较浅时，可经换填法、强夯法等浅层处理后选用扩展式基础；软土层较厚时，需采用灌注桩基础穿透软土层，将荷载传递至下部坚实土层。荷载层面，需匹配铁塔自重及风、冰、地震等外力作用，大转角塔、终端塔等荷载较大的杆塔宜选大直径灌注桩或群桩基础以满足抗拉、抗压及抗水平力需求，直线塔则可在安全阈值内择取经济型基础。施工中需应对基坑坍塌、土体扰动等难题，场地狭窄时优先选用人工挖孔灌注桩等工艺简单、设备要求低的基础，地下水位较高时需强化降水与护壁措施，同时兼顾施工对周边环境的影响，优选低扰动方案。

## 3 软土地基输电线路基础加固方案

### 3.1 常用加固方法及原理

软土地基常用五种加固方法，其核心原理、适用场景及技术特性各有侧重。高压喷射注浆法以 20-40MPa 高压射流破碎土体，与水泥浆混合形成旋喷桩等固结体，适用淤泥、砂土等多类地基，具有设备简便、成本低优势。换填垫层法挖除浅层软弱土层，换填砂、碎石等强质材料分层压实，适用浅层软基及不均地基，可提升承载力并减少沉降。强夯法通过重锤（落距 6~30m）自由落击产生冲击能密实土体，适碎石土、湿陷性黄土等，软基需要配套排水措施，施工效率高。振动密实法借振动器促土颗粒位移密实，分平板、振冲等类型，适配砂土、粉土。压力注浆法以液压注水泥浆、化学浆液等填充土体孔隙，胶结形成高强度结石体，对含空洞、裂隙的地基加固效果显著。

### 3.2 加固方案的选择依据

软土地基特性、基础类型、承载要求及经济成本是输

电线路基础加固方案选择的核心依据<sup>[2]</sup>。地基特性方面，高含水量、大孔隙比软基宜选排水固结法，如沿海地区砂井堆载预压）低强度、高灵敏度软基则适配高压喷射注浆或深层搅拌法。基础类型需与加固方法匹配，灌注桩基础可采用桩侧/桩底注浆，扩展式基础可扩底或压力注浆，大板式基础可选换填垫层或强夯法。承载要求依荷载定方法，大跨越等大荷载基础宜用群桩、沉井加固，小荷载基础可择换填、振动密实法，需要综合设计与附加荷载及长期稳定性。经济成本需对比材料、设备、人工成本<sup>[3]</sup>，如强夯法设备投入大但大面积加固单位成本低，高压喷射注浆法材料成本高，还需要考量后期维护与修复成本，以选成本效益最优方案。

## 4 案例分析

### 4.1 工程概况

某 220kV 输电线路工程位于东南沿海软土地基区，线路长 35km，为当地关键电力输送通道，设 120 基杆塔（直线塔 80 基、耐张塔 30 基、转角塔 10 基），分别承担保线路走向、抗导线张力、承转向水平力与扭转力作用。区域软土层厚 5~15m，灰黑色流塑状，含水量 50%~70%、孔隙比 1.2-1.6、压缩系数  $> 0.5\text{MPa}^{-1}$ 、地基承载力 50-80kPa，地下水位埋深 0.5~1.5m，此地质易致基础沉降、倾斜，威胁线路安全运行。

### 4.2 基础选型过程与结果

该工程基础选型前开展详细地质勘察，通过钻探、静力触探结合原位测试与室内土工试验，获取软土层厚度、物理力学性质等关键参数，为选型提供数据支撑。基于勘察结果与荷载计算，对比灌注桩、扩展式、大板式三种基础。灌注桩承载力强且能穿透软土层传力至下部坚实土层，但工艺复杂、成本高且泥浆易污染环境。扩展式施工简便，然而软基中需要增大尺寸致材料耗增、经济性差且抗沉降能力有限。大板式适配软基但埋深浅、抗水平力弱。经综合评估，确定以灌注桩为主要基础类型。耐张塔与转角塔用 1.2m 桩径、20~25m 桩长的大直径灌注桩，直线塔用 0.8m 桩径、15~20m 桩长的灌注桩，基础采用 C30 混凝土与 HRB400 钢筋，施工中严控成孔、钢筋笼安装及混凝土浇筑质量，确保符合设计要求。

### 4.3 加固方案实施与效果评估

虽已采用灌注桩基础，但鉴于软土地基的复杂性与不确定性，为进一步提升基础稳定性，对部分基础辅以高压喷射注浆法加固。灌注桩施工完成后，于基础周边按梅花形布置高压喷射注浆孔，采用三重管法施工，设定喷射压力 30-35MPa、水泥浆水灰比 0.8，通过高压射流使水泥浆与软土充分混合，形成水泥土固结体以增强地基强度与稳定性。加固实施阶段严格把控施工质量，定期检查维护注浆设备以保障正常运行，实时监测喷射压力、水泥浆流量等参数并动态调整，同时严格管控水泥浆配制过程，确保其质量符合

设计标准。为评估加固成效，于基础周边布设多组监测点，开展沉降与水平位移监测。监测数据显示，加固后1年内基础沉降显著受控，平均沉降速率由加固前的5-8mm/月降至1-2mm/月，且沉降逐渐趋于稳定，水平位移最大量<10mm，满足设计要求。综上，高压喷射注浆法对软土地基加固效果显著，有效提升了基础稳定性，为输电线路安全运行提供了可靠保障。

## 5 软土地基输电线路基础选型与加固方案的优化策略

### 5.1 基于数值模拟的方案优化

在软土地基输电线路基础选型与加固方案优化中，数值模拟技术具有核心支撑作用，依托ANSYS、ABAQUS等专业软件，可对不同方案开展精准模拟分析，为优化提供科学依据。基础选型层面，其能研究灌注桩、扩展式、大板式基础的软土地基力学性能，模拟荷载下应力分布、变形及稳定性。对灌注桩可分析桩长、桩径、桩间距对承载力的影响，优化参数组合以满足承载需求并控成本。对扩展式则模拟基底压力分布，确定合理尺寸以减材耗与施工成本。加固方案优化中，数值模拟亦价值显著。高压喷射注浆法可分析喷射压力、角度等参数对加固效果的影响，预测水泥土固结体性能以确定最优参数，强夯法能研究夯击能、次数、间距对地基密实度等的作用，指导施工参数优化。此外，其还可通过建立不同地质模型，模拟复杂地质下基础受力变形，评估方案适应性，助力选最优方案。该技术为优化提供高效准确手段，可助工程师在设计阶段优化参数，提升方案效果与经济性。

### 5.2 新技术、新材料的应用

科技迭代推动下，新型地基处理技术与高性能材料为软土地基输电线路基础优化提供新路径，具有显著应用潜力。新型技术方面，电渗固结法通过插入电极通直流电，借电渗作用加速高含水量、低渗透性软基排水固结，提升强度，适用于施工速度与加固效果要求高的场景；真空预压联合堆载预压技术融合两者优势，先以真空预压排孔隙水形成负压，再施加堆载加速固结，短时间内提升地基固结度，适配大面积软基处理。高性能材料中，纤维增强混凝土（FRC）掺钢纤维、碳纤维等，显著提升抗拉抗弯性能，增强基础耐候性与抗变形能力。耐腐蚀材料，如耐蚀钢材、专用涂层可隔绝软基中硫酸盐、氯盐等腐蚀介质，保障基础长期稳定。

形状记忆合金（SMA）依托形状记忆效应与超弹性，能自动恢复基础变形，且借阻尼性能吸收地震等动力荷载，提升线路抗灾安全性。

### 5.3 全寿命周期成本分析

全寿命周期成本分析是软土地基输电线路基础选型与加固方案中平衡经济与效益的关键，其涵盖基础建设、运营、维护至拆除各阶段费用。建设成本需要考量材料、设备、人工及临时设施费用。灌注桩因工艺复杂、材料要求高，建设成本较高；扩展式基础施工简便但软基下需要加大尺寸以满足承载要求，易增材料成本。运营成本含定期监测、维护及修复费用，软土地基稳定性差，需要更频繁开展沉降监测与状态评估，设备及人力投入增加，基础出现不均匀沉降、开裂等问题时还需计入修复成本。维护成本分日常与定期，软基基础易出问题且加固材料耐久性会影响再加固成本，导致维护成本偏高。拆除成本涉及设备租赁、人工及废弃物处置，选用可回收材料或易拆结构可减少废弃物量降本。通过该分析可全面评估方案经济性，如灌注桩虽建设成本高，但若运营维护成本低、拆除便捷，从全寿命周期看或为更优选择，最终实现安全前提下成本最优与资源合理配置。

## 6 结语

本文针对软土地基输电线路基础选型与加固方案的研究，明确了安全优先、经济适配、地质适应、环保低碳的四大选型原则，建立了基于软土层厚度、荷载类型、施工条件的选型决策逻辑，说明了高压喷射注浆法等五种加固方法的核心原理与适用边界，提出以“地基特性—基础类型—承载要求—成本效益”为核心的方案选择框架。通过东南沿海220kV工程案例，验证了灌注桩基础结合高压喷射注浆加固的技术可行性，其沉降控制效果显著，为同类工程提供了实践参考。同时提出的数值模拟优化、新技术新材料应用及全寿命周期成本分析策略，进一步提升了方案设计的科学性与经济性。

### 参考文献

- [1] 于天文,王新.输电线路软土地基基础设计分析[J].有色金属设计,2022,49(4):86-89.
- [2] 李国文,田笑,乔黎伟,薛韬.软土地区输电线路桩基优化设计[J].中国电力企业管理,2019(33):92-93.
- [3] 王丽欢,任亚宁,柴林杰,郭计元.输电线路软土地基基础方案研究[J].河北电力技术,2017,36(1):48-5057.