

# Numerical Simulation Research on the Collaborative Work of Transmission Line Foundation and Ground

Xiang Li

China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830013, China

## Abstract

The geological conditions along the transmission lines are complex and diverse, covering special geological environments such as coastal soft soil, mountainous rocks, mined-out areas in mining zones, and erosion areas along the Yangtze River. In these complex environments, the properties of the foundation soil are highly variable and are easily affected by factors such as fluctuations in groundwater, erosion by river water, and construction of adjacent projects, further intensifying the complexity of the collaborative work between the foundation and the ground. For instance, the soil in coastal soft soil areas is characterized by low strength, high compressibility and strong rheological properties, which can easily lead to excessive settlement of the foundation. Surface deformation in the goaf of the mining area can cause the foundation to tilt and disrupt the force balance of the tower leg members. Soil extraction construction near transmission towers may change the stress field of the foundation and induce foundation instability. This paper takes numerical simulation as the core research method, systematically expounds the key technical points of the collaborative work between the foundation and the subground of transmission lines, and deeply analyzes the deformation laws, stress distribution characteristics and collaborative working mechanisms of the foundation and the subground under different working conditions.

## Keywords

Transmission Line foundation Foundation; Collaborative work; Numerical simulation FLAC3D;” Deformation characteristics

## 输电线路基础与地基协同工作的数值模拟研究

李翔

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 830013

## 摘要

输电线路沿线地质条件复杂多样, 涵盖沿海软土、山区岩石、矿区采空区、长江沿岸冲刷区等特殊地质环境。在这些复杂环境中, 地基土体性质多变, 且易受地下水波动、江水冲刷、邻近工程施工等因素影响, 进一步加剧了基础与地基协同工作的复杂性。例如, 沿海软土地区土体具有强度低、压缩性高、流变性强的特点, 易导致基础产生过大沉降; 矿区采空区地表变形会引发基础倾斜, 破坏塔腿杆件受力平衡; 邻近输电杆塔取土施工则可能改变地基应力场, 诱发基础失稳。本文以数值模拟为核心研究手段, 系统阐述输电线路基础与地基协同工作的关键技术要点, 深入分析不同工况下基础与地基的变形规律、应力分布特征及协同工作机制。

## 关键词

输电线路基础; 地基; 协同工作; 数值模拟; FLAC3D; 变形特性

## 1 引言

随着经济的快速发展, 能源需求持续增长, 特高压输电工程作为能源大规模远距离传输的核心载体, 在国家能源安全保障体系中占据关键地位。数值模拟技术凭借其可重复性、低成本、能模拟复杂工况的优势, 已成为研究基础与地基协同工作特性的重要手段。通过建立精准的数值模型, 可定量分析不同地质条件、荷载工况及工程措施下基础与地基的相互作用规律, 为基础设计优化、风险预判及加固方案制定提供科学依据。因此, 开展输电线路基础与地基协同工作

的数值模拟研究, 对于保障输电线路安全稳定运行、降低工程建设与维护成本、推动岩土工程与输电工程交叉领域的技术发展具有重要的理论意义与工程应用价值。

## 2 输电线路基础与地基协同工作技术支撑

### 2.1 协同工作核心内涵

输电线路基础与地基的协同工作是指基础与地基土体在外部荷载作用下, 通过相互作用实现应力传递与变形协调的过程。其核心特征表现为: ①变形协调性, 基础与地基土体的位移相互约束, 避免产生过大相对位移; ②应力传递合理性, 荷载通过基础与地基的接触界面有效传递, 确保应力分布均匀, 不出现局部应力集中现象; ③工作状态稳定性, 在设计荷载与极端工况下, 基础与地基共同承担荷载, 维持

【作者简介】李翔(1990-), 男, 中国甘肃人, 硕士, 工程师, 从事输电线路结构研究。

整体稳定。

基础与地基的协同工作效果主要受基础类型、土体性质、荷载特性及环境条件等因素影响。不同基础类型的协同工作机制存在显著差异：扩展基础通过基底与土体的接触传递荷载，协同变形主要表现为基底沉降与土体压缩的协调；桩基础则通过桩侧摩阻力与桩端阻力传递荷载，协同变形体现为桩身变形与桩周土位移的耦合。

## 2.2 输电线路基础类型及受力特征

根据 DL/T 5219-2023《架空输电线路基础设计规程》，输电线路基础主要包括扩展基础、掏挖基础、桩基础、岩石嵌固基础、螺旋锚基础等类型。其中，桩基础因承载力高、适应性强，被广泛应用于复杂地质条件下的输电线路工程，尤其是沿海软土、山区陡坡等区域。

输电线路基础的受力特征具有显著的行业特殊性：

①承受拉压交变荷载，在风荷载、覆冰荷载作用下，塔腿基础可能交替承受上拔力与下压力；②水平荷载作用显著，风荷载、地震荷载易引发基础水平位移与转角；③荷载分布不均匀，转角塔、终端塔的基础荷载存在明显的不对称性。以 220kV 耐张转角塔为例，其基础常采用 4 个桩基础，上拔荷载可达 1000kN，下压荷载可达 1200kN，且 4 个基础的顶面荷载差异显著，最大可达 3440kN，最小仅 1240kN。

## 2.3 土体本构模型与力学参数

土体本构模型是描述土体应力-应变关系的核心工具，直接影响数值模拟结果的准确性。在输电线路基础与地基协同工作模拟中，常用的土体本构模型为摩尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 弹塑性模型，该模型参数易于获取，能较好地模拟土体的剪切破坏特性，适用于砂土、粉质黏土等常见土层。其核心参数包括黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\phi$ 、变形模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  及重度  $\gamma$  等，不同土层的参数差异显著，具体取值需结合地质勘察资料确定<sup>[1]</sup>。

表 1 列出了典型土层的力学参数范围，基于现有工程实测数据整理得出：

土层类型	黏聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 $\phi$ (°)	变形模量 $E$ (MPa)	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
砂土	20-40	28-35	80-120	0.25-0.35	19-22
沿海软土	5-15	10-20	5-20	0.35-0.45	16-18
粉质黏土	30-60	20-28	20-60	0.30-0.40	18-20

# 3 输电线路基础与地基协同工作数值模拟方法

## 3.1 数值模拟软件选择

结合输电线路基础与地基协同工作的模拟需求，本文选用 FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D) 软件进行数值模拟。该软件基于有限差分法，具有强大的非线性分析能力，能有效模拟土体的塑性变形、大位移及接触问题，适用于基础-地基相互作用的动态过程模拟，如邻近取土、荷载变化等工况下的协同响应分析。此外，

ABAQUS、ANSYS 等有限元软件也可用于此类研究，其中 ABAQUS 在复杂本构模型模拟与结构细节分析方面具有优势，ANSYS 则适用于多物理场耦合分析。

## 3.2 数值模型构建关键步骤

### 3.2.1 几何建模与网格划分

几何建模需根据工程实际情况，合理简化模型边界，确保模拟区域能完整反映基础与地基的相互作用范围。通常，模型水平范围取基础最大尺寸的 5-10 倍，竖向范围取基础埋深的 3-5 倍，以避免边界效应对模拟结果的影响。例如，在 220kV 输电杆塔邻近取土工程模拟中，模型尺寸设定为长 100m × 宽 100m × 高 12m，加固区尺寸为 42m × 42m × 12m，既能覆盖取土影响范围，又能保证计算效率。

网格划分采用非结构化网格，基础及邻近地基区域需加密网格，提高计算精度，远离基础的区域可适当疏化网格，降低计算成本。对于桩基础，桩体与桩周土的网格需精准匹配，确保接触界面的应力传递模拟准确。网格质量需满足要求，避免出现畸形网格，影响计算收敛性。

### 3.2.2 参数选取与本构模型设定

模型参数选取需严格遵循地质勘察报告，结合室内试验数据与工程经验确定。基础材料通常采用线弹性模型，混凝土的弹性模量取 30GPa，泊松比取 0.2，重度取 25kN/m<sup>3</sup>；钢材的弹性模量取 206GPa，泊松比取 0.3。土体采用摩尔-库仑弹塑性模型，参数参考表 1 及具体工程地质资料，例如沿海软土地区土体的黏聚力可取 8kPa，内摩擦角取 15°，变形模量取 10MPa，泊松比取 0.4，重度取 17kN/m<sup>3</sup>。

### 3.2.3 边界条件与荷载施加

边界条件设定需模拟地基的实际约束状态：模型底部采用固定约束，限制竖向位移；四周采用水平约束，限制水平位移；顶部为自由面，无约束。对于地下水影响，可通过设置孔隙水压力或采用有效应力法进行模拟。

荷载施加需结合输电线路基础的受力特征，包括竖向荷载 (上拔、下压)、水平荷载 (风荷载、地震荷载) 及弯矩等。荷载取值需参考设计规范与工程实际，例如 220kV 耐张转角塔基础的上拔荷载取 1000kN，下压荷载取 1200kN，4 个基础的顶面荷载按实际受力分布施加，分别为 2240kN、1240kN、2240kN、3440kN。对于动态荷载如地震荷载，需采用时程分析法，输入相应的地震波进行模拟。

### 3.2.4 模拟结果分析指标

基础与地基协同工作的模拟结果分析主要关注以下指标：①基础变形指标，包括竖向沉降、水平位移及转角，需控制在设计允许范围内，例如 DL/T 5219-2023 规范规定，输电线路基础的最大沉降量不宜超过 50mm，水平位移不宜超过 30mm；②应力分布指标，包括基础基底应力、桩身轴力、桩侧摩阻力及地基土体的应力分布，需避免出现局部应力集中导致的破坏；③稳定性指标，通过计算安全系数评估基础与地基的整体稳定性，确保在极端工况下仍能维持稳定<sup>[2]</sup>。

## 4 输电线路基础设计优化建议

基于上述多工况数值模拟结果,结合不同地质条件下基础-地基协同工作规律,提出以下输电线路基础设计优化建议:

### 4.1 采动区基础设计

重点关注拉伸区基础变形控制,可通过增大基础截面惯性矩(如采用加厚底板、增设加劲肋)、提高基础弹性模量(选用高强度混凝土)和减小基础根开等措施,降低基础水平变形和倾斜变形。同时,应加强采动区地表变形监测,建立变形预警机制,及时采取加固措施。

### 4.2 冻土区桩基础设计

根据地基土类型和冻结温度合理确定桩型和桩长。在砾砂等优质冻土地基中,可适当减小桩径和桩长;在粉质黏土等软弱冻土地基中,应增大桩长以保证足够的抗拔承载力。此外,可在桩周设置隔离层,减少切向冻胀力对桩体的作用。

### 4.3 沿海软土地区基础设计

采用“垫层加固+土体注浆”联合加固方案。选用级配砂石垫层,厚度控制在0.8-1.2m,提高地基承载力;对基础周边软土进行注浆加固,注浆压力控制在1.5-2.0MPa,注浆范围为基础外侧3-5m,改善土体力学性能。同时,基础设计应考虑台风荷载的放大效应,增大基础埋深,设置抗侧移支撑。

### 4.4 砂土地区基础设计

优先选用四锚承台螺旋锚群基础,优化锚栓布置方式和锚固深度。锚栓锚固深度应不小于2.5m,锚栓间距控制在1.0-1.5m,确保锚群协同工作。对于重要输电线路塔基,可采用螺旋锚群与混凝土承台组合基础,进一步提高承载性能和稳定性。

## 5 220kV 输电杆塔邻近取土工程模拟

### 5.1 工程概况

该工程位于淮安新港三期工程区域,涉及11基220kV输电杆塔,计划在杆塔周边取土,取土深度达6m。选取其中1基耐张转角塔为研究对象,该杆塔采用4个独立承台灌注桩基础,承台尺寸为长4m×宽3.86m×高0.8m,桩直径0.8m,桩长12m。场地土层为砂土结构,力学参数为:黏聚力36kPa,内摩擦角 $32^\circ$ ,变形模量96MPa,泊松比0.3,重度 $21.85\text{kN/m}^3$ 。为保障施工安全,拟定在基础外侧15m范围打设钢板桩加固,钢板桩深度12m。

### 5.2 模拟方案设计

采用FLAC3D软件建立三维数值模型,模型尺寸为 $100\text{m}\times 100\text{m}\times 12\text{m}$ ,网格划分采用非结构化网格,基础及加固区网格加密。基础材料为混凝土,采用线弹性模型;土体采用摩尔-库仑弹塑性模型;钢板桩采用线弹性模型,弹性模量206GPa,泊松比0.3,重度 $78.5\text{kN/m}^3$ 。

设置4个模拟工况:工况1为加固前开挖深度3m;工况2为加固前开挖深度6m;工况3为加固前开挖深度9m;

工况4为加固后开挖深度6m。荷载施加考虑转角塔荷载不对称性,上拔荷载1000kN,下压荷载1200kN,按实际分布施加于4个基础顶面<sup>[3]</sup>。

## 5.3 模拟结果分析

### 5.3.1 基础位移分析

不同工况下基础最大位移数据如表2所示。由表可知,加固前随着开挖深度增加,基础最大位移显著增大,开挖深度3m时最大位移0.43mm,6m时增至1.24mm,9m时达2.98mm,且位移分布从“中间大、两边小”逐渐转变为“下压基础位移大、上拔基础位移小”,表明下压基础在开挖过程中处于薄弱状态。加固后开挖深度6m时,基础最大位移降至0.43mm,与加固前3m开挖深度的位移相当,说明钢板桩加固能有效抑制基础变形,加固效果显著。

表2 基础位移分析

工况	开挖深度 (m)	加固措施	基础最大位移 (mm)	位移变化趋势
1	3	无	0.43	中间大、两边小
2	6	无	1.24	下压基础位移主导
3	9	无	2.98	下压基础位移显著增大
4	6	钢板桩加固	0.43	均匀分布,位移极小

### 5.3.2 应力分布分析

加固前开挖深度6m时,基础基底最大压应力达1.8MPa,超过土体承载力特征值1.2MPa,存在局部剪切破坏风险;钢板桩加固后,基底最大压应力降至1.0MPa,应力分布均匀,有效降低了局部应力集中程度。钢板桩承担了约30%的水平荷载,显著减小了地基土体的受力负担,提升了整体稳定性<sup>[4]</sup>。

## 6 结论

数值模拟技术可有效揭示输电线路基础与地基的协同工作规律,FLAC3D软件结合摩尔-库仑模型适用于常见地质条件下的基础-地基协同工作模拟,模型参数选取与边界条件设置是保证模拟准确性的关键。未来可引入更精准的土体本构模型,如修正剑桥模型、邓肯-张模型等,考虑土体的非线性与流变性,提升长期变形模拟的准确性。探索智能化数值模拟方法,结合机器学习技术,实现模型参数的自动优化与模拟结果的智能预测,提高研究效率与工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 王笑天,韩惠丞,黄文超,等. 输电线路工程深基坑基础施工技术探讨[J].中国设备工程,2025,(23):215-217.
- [2] 郭春晓,王绍辉,金晓唐,等. 刚性台阶基础在输电线路绿色建造中的作用[J].农村电气化,2025,(11):76-79.
- [3] 宁朋朋,周楠,吴雄雄,等. 预制装配扩展基础在输电线路的模块化小型化研究[J].科学技术创新,2025,(21):158-161.
- [4] 叶德来,姜宏玺,陈相家,等. 新能源及输电线路螺旋锚基础设计研究[J].电力勘测设计,2025,(10):73-80.