

# Force Characteristics and Design Optimization of Transmission Line Foundation Structures in Permafrost Areas

Dun Chong

China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830063, China

## Abstract

Permafrost is widely distributed in China. During the implementation of energy strategies such as “West-to-East Power Transmission”, a large number of transmission lines need to pass through permafrost areas. The frost heaving, thawing and temperature sensitivity of permafrost can easily cause foundation tilting and cracking, with faults accounting for more than 35%, seriously threatening the safety of the power grid. This paper takes the transmission line foundation in permafrost areas as the research object, analyzes the particularity of the permafrost environment and the deficiencies of the existing design methods, and then deeply explores the action mechanisms of frost heaving force and thawing force, as well as the coupling force law of frost heaving force - horizontal wind load - vertical load. It clarifies the influence of internal factors such as permafrost type and material properties, and external and construction factors on the force of the foundation. Propose solutions from four dimensions: optimization design principles, basic selection, size structure, and protective measures. The research aims to provide theoretical support for the design of transmission line foundations in permafrost areas, and enhance the freeze-thaw resistance and long-term stability of the foundations.

## Keywords

Permafrost region Transmission lines; Basic structure

## 冻土地区输电线路基础结构受力特性与设计优化

崇敦

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 830063

## 摘要

我国冻土分布广泛,“西电东送”等能源战略推进中,大量输电线路需穿越冻土区域,而冻土的冻胀性、融沉性及温度敏感性易导致基础倾斜、开裂,故障占比超35%,严重威胁电网安全。本文以冻土地区输电线路基础为研究对象,分析冻土环境特殊性及其现有设计方法的不足,随后深入探究冻胀力、融沉力的作用机制及冻胀力-水平风荷载-竖向荷载的耦合受力规律,明确内在如冻土类型、材料性能,外在及施工因素对基础受力的影响,从优化设计原则、基础选型、尺寸结构及防护措施四维度提出解决方案。研究旨在为冻土地区输电线路基础设计提供理论支撑,提升基础抗冻融能力与长期稳定性。

## 关键词

冻土地区; 输电线路; 基础结构

## 1 引言

随着我国能源互联网建设的持续推进,输电线路作为能源传输的核心载体,需跨越青藏高原、东北大兴安岭等广袤冻土区域。冻土作为特殊工程介质,其物理力学性质随温度变化呈现显著差异。温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,土中水分冻结体积膨胀产生冻胀力,温度回升至 $0^{\circ}\text{C}$ 以上时,冻土融化引发体积收缩与融沉,这种“冻胀-融沉”循环使输电线路基础长期处于复杂受力状态。研究表明,高海拔冻土地区早期输电线路因冻融导致的基础故障占总故障数的35%以上,不仅增加运维成本,还可能引发线路停运等安全事故<sup>[1]</sup>。当前,

针对冻土地区输电线路基础的研究虽已取得一定成果,但在冻融循环长期效应、季节与多年冻土交界区设计方法等方面仍存在不足。基于此,本文从冻土环境特殊性出发,分析基础结构受力特性,提出针对性设计优化策略,以期为冻土地区输电线路工程建设提供科学指导。

## 2 冻土地区输电线路基础结构设计现状

### 2.1 冻土环境特殊性分析

冻土环境的特殊性主要体现在其独特的物理力学特性与动态变化规律上。冻土具有显著的温度敏感性,抗压强度、弹性模量随温度波动剧烈,当温度从 $-15^{\circ}\text{C}$ 升至 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 时,多年冻土抗压强度可从 $5\text{MPa}$ 降至 $1.5\text{MPa}$ 以下,直接改变基础周边土体的承载能力。冻胀性是冻土的核心特性之一,土中孔隙水在冻结过程中体积膨胀率约9%,若膨胀受

【作者简介】崇敦(1986-),男,中国甘肃人,硕士,高级工程师,从事输电结构研究。

到基础约束,会产生沿基础侧壁向上的冻胀力,且冻胀力大小与土的含水量、干密度密切相关,青藏高原粉质黏土冻土的最大冻胀力可达150kPa,远高于砂质冻土的30-50kPa。此外,冻土融化时会发生融沉,土颗粒在孔隙水排出后重新排列,导致体积收缩,多年冻土中含冰量超过30%时,融沉量可达10-20cm,远超输电线路基础允许沉降量。同时,冻土区多伴随昼夜温差大、季节冻融循环频繁的气候特点,进一步加剧了冻土性质的动态变化,为基础结构设计带来严峻挑战。

## 2.2 现有设计方法与规范

目前,我国冻土地区输电线路基础设计主要依据《冻土地区输电线路设计规范》(DL/T5364-2018),该规范明确了冻土分类、基础选型原则及力学参数计算方法,设计思路以冻土力学特性为核心,通过现场勘察获取冻土含冰量、冻融深度等参数,结合基础受力模型计算承载力与变形量。国外方面,美国在阿拉斯加输油管道工程中形成了基于热管技术的冻土基础设计体系,苏联早期构建了冻土冻胀力计算模型,为全球冻土工程设计提供了参考<sup>[2]</sup>。现有设计方法多基于静态冻土参数开展计算,例如采用冻结期或融化期的单一力学指标评估基础性能,但对冻融循环长期作用下冻土参数的衰减规律考虑不足,且针对季节冻土与多年冻土交界区的设计方法较为欠缺,规范中部分力学参数仅适用于特定冻土类型,在复杂冻土环境下的适用性有待提升。现有设计对水平风荷载与冻胀力、融沉力的耦合作用模拟不够精准,难以全面反映基础的实际受力状态。

## 3 冻土地区输电线路基础结构受力特性分析

### 3.1 冻胀力与融沉力分析

冻胀力与融沉力是决定冻土地区基础受力状态的核心动力,二者的动态变化直接影响基础的稳定性<sup>[3]</sup>。冻胀力的产生源于冻土冻结过程中的水分迁移与体积膨胀。在温度降低时,土中自由水先冻结形成冰晶体,后续未冻水向冰晶体迁移并冻结,导致土体体积膨胀,若基础对这种膨胀产生约束,便会在基础侧壁与基底形成冻胀力,冻胀力的分布呈现“侧壁为主、基底为辅”的特点,且随冻结速率加快,水分迁移不充分会导致冻胀力降低,而含水量超过塑限、干密度增大时,冻胀力显著提升。融沉力则产生于冻土融化阶段,冻土融化后冰晶体转化为孔隙水,土颗粒失去冰的胶结作用后重新排列,孔隙体积增大,在基础竖向荷载作用下,土体发生压缩变形并产生向下的融沉附加力,融沉力大小与冻土含冰量呈正相关,饱冰冻土的融沉力可使基础产生超过15cm的附加沉降。在冻融循环中,冻结期冻胀力主导基础受力,可能导致基础上拔或侧壁挤压破坏,融化期融沉力主导,易引发基础沉降或不均匀变形,二者的反复作用会加剧基础结构的疲劳损伤。

### 3.2 荷载组合作用下的基础受力

冻土地区输电线路基础需承受冻胀力、融沉附加力、

水平风荷载及竖向荷载的组合作用,各荷载的耦合效应显著改变基础的力学响应。在冻结期,冻胀力使基础与周边冻土紧密结合,基础侧壁水平摩阻力大幅提升,此时水平风荷载作用下基础的水平位移较小,但当风荷载产生的拉力超过基础抗拔力时,冻胀力反而会加剧基础上拔风险,形成“冻胀-风载”恶性循环。在融化期,冻土融沉导致基础侧壁摩阻力降至30kPa以下,水平风荷载易引发基础水平位移增大,同时融沉附加力与竖向荷载叠加,会加速基础沉降,当竖向荷载超过融沉后土的承载力时,基础易出现不均匀变形,进一步降低其整体稳定性。通过ANSYS冻土力学模块模拟发现,冻胀力与水平风荷载耦合作用时,基础最大拉应力较单一荷载作用下提升40%,而融沉力与竖向荷载耦合时,基础沉降量较单一荷载作用下增加60%,可见荷载组合对基础受力的影响并非简单叠加,需在设计中重点考虑其协同效应。

### 3.3 影响基础受力特性的因素

冻土地区基础受力特性受内在、外在及施工三类因素共同影响,各因素通过改变冻土状态或基础自身性能作用于受力过程。内在因素中,冻土类型与含冰量是核心。季节冻土因冻融循环频繁,基础受力呈现周期性波动,而多年冻土的稳定性较好,但高含冰量多年冻土的融沉风险更高,土颗粒级配也会影响受力,粉质黏土因保水性强,冻胀力与融沉力均大于砂质土。基础材料性能同样关键,混凝土抗冻等级不足会导致冻融循环中出现开裂,降低基础整体刚度,环氧涂层钢筋的防腐性能则直接影响基础的耐久性,进而改变长期受力状态。外在因素方面,气候条件起主导作用,温度变化速率越快,冻土力学参数波动越剧烈,基础受力越不稳定;降水量过大易增加冻土含水量,加剧冻胀与融沉效应。水平风荷载的大小与方向会改变基础的水平受力分布,极端风荷载可能引发基础倾覆。施工因素中,冻土开挖过程中的扰动会破坏土的原始结构,降低土体承载力,回填土压实度不足则会增大冻融过程中的体积变化,进一步影响基础受力,这些因素的综合作用使得冻土地区基础受力特性更为复杂,需在设计与施工中统筹考虑。

## 4 冻土地区输电线路基础结构设计优化策略

### 4.1 优化设计原则

冻土地区输电线路基础优化设计需遵循安全性、经济性、适应性、耐久性与生态性五大原则,且各原则需相互协调,形成科学的设计体系。安全性原则为核心,要求基础设计满足冻融循环长期作用下的承载力与变形要求,确保基础在极端气候条件下不发生倾斜、开裂或失效。经济性原则要求在保证安全的前提下,通过优化基础类型与尺寸,降低工程造价与运维成本,避免过度设计。适应性原则强调基础设计需匹配冻土类型与工程条件,因地制宜选择基础形式。耐久性原则要求选用抗冻融、防腐性能优异的材料,延长基础使用寿命。生态性原则需减少工程对冻土环境的扰动,采用环保施工工艺,避免破坏地表植被,维持冻土热平衡,

确保工程建设与生态保护协同发展,这些原则共同构成了冻土地区基础优化设计的指导框架,为后续具体优化措施提供依据。

#### 4.2 基础类型选择优化

基础类型选择优化需以冻土类型、含冰量及工程条件为依据,通过对比各类基础的性能与适用场景,实现精准匹配。对于季节冻土区,低含冰量区域优先选用掏挖式基础,该基础施工便捷且成本较低,通过优化埋深即可满足受力要求。高含冰量季节冻土区因冻胀力较大,需选用深埋式基础,利用其埋深超冻融层的优势,减少冻胀力对基础的影响。在多年冻土区,低含冰量区域可选用短桩基础,兼顾承载力与经济性;高含冰量多年冻土区融沉风险高,需选用热管-桩复合基础,通过热管主动降温维持桩周冻土稳定,抑制融沉效应。对于季节冻土与多年冻土交界区,因冻融环境复杂,推荐采用掏挖-保温复合基础,结合掏挖式基础的便捷性与保温层的控温效果,提升基础适应性。基础类型选择还需考虑地形条件,复杂地形区域优先选用施工难度低的掏挖式基础,平坦区域可根据冻土条件选用深埋式或桩基础,通过这种针对性的选型优化,可在保证基础稳定性的同时,提升工程经济性与施工效率。

#### 4.3 基础尺寸与结构优化

基础尺寸与结构优化需结合基础类型的受力特点,通过调整关键参数与改进结构形式,提升抗冻融能力。对于掏挖式基础,尺寸优化重点在于埋深与直径。季节冻土区埋深需超过冻融层10~20cm,如东北季节冻土区冻融层深1.8m时,基础埋深取2.0m;冻胀力较大区域可将基础直径从1.0m增至1.2m,提升侧壁摩阻力30%。同时采用底部扩底设计,扩底直径为基础直径的1.5倍,增强竖向抗拔承载力。结构优化方面,可在基础侧壁设置2-3层聚乙烯薄膜滑动层减少冻胀力传递效率40%。深埋式基础需优化活动层段结构,采用梯形截面降低活动层冻胀对基础的侧向挤压。桩基础的尺寸优化核心是桩长与截面,桩长需超过冻融界面3~5m,确保桩底位于稳定冻土区,在冻融界面上下各1.0m范围内增设间距100mm的螺旋筋,提升桩身抗弯强度25%,桩底采用扩底设计使竖向承载力增幅达50%。

#### 4.4 防护措施优化

防护措施优化需整合主动防护、被动防护、防腐防护与监测防护技术,构建全方位的防护体系,从源头降低冻土

冻融对基础的影响。主动防护技术以调控冻土温度为核心,在桩基础内部设置直径80mm、长度6~8m的热管,管内充注氨或二氧化碳工质,冬季通过相变吸热导出冻土热量,夏季阻止外部热量传入,使桩周冻土温度稳定在-2℃以下,融沉量控制在2mm以内。在基础周边设置直径150mm、埋深2.0m的通风管,冬季利用冷空气对流降温,夏季关闭通风口,辅助维持冻土稳定。被动防护技术通过改善基础周边环境减少冻融效应,在基础周边5m范围内铺设坡度1:1.5的碎石护坡,减少地表积水渗入,降低冻土含水量10%~15%;在基础上方种植青藏苔草等耐寒植被,减少地表温度波动;基础周边铺设100mm厚聚氨酯保温板稳定冻融界面。防腐防护方面,采用环氧涂层钢筋或在混凝土表面涂刷1.5mm厚聚脲防腐层,降低钢筋腐蚀速率80%以上。监测防护技术通过布置温度传感器与位移传感器,实时采集冻土温度与基础变形数据,数据无线传输至监控平台,当冻土温度接近0℃或基础位移超限时启动预警,及时采取加固措施,通过多维度防护措施的协同作用,全面提升基础的长期稳定性。

### 5 结语

本文围绕冻土地区输电线路基础结构的核心需求展开研究,通过剖析冻土温度敏感性、冻胀融沉性的本质特性,厘清了其对基础受力状态的约束机制,同时量化了冻胀力-水平风荷载、融沉力-竖向荷载的耦合效应,明确了冻土类型、气候条件、施工扰动等因素对基础稳定性的综合影响,并据此构建了“选型适配-参数优化-多维防护”的设计优化体系,为冻土区基础工程提供了可落地的技术方案。未来可聚焦模型参数校准、低碳耐寒材料研发及物联网监测技术融合,持续完善设计理论,推动冻土地区输电线路基础工程向精准化、长效化方向发展,为保障我国冻土区域能源传输网络的稳定运行提供更坚实的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 林新.浅谈高海拔冻土地区输电线路基础设计[J].低碳世界,2019,9(1):44-45.
- [2] 由崇.输电线路杆塔结构抗风性能分析及改进技术研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(1):172-175.
- [3] 李升.输电线路钢管杆结构优化设计研究[J].现代工程科技,2024,3(10):9-12.