

季节性冻土冻胀融沉循环作用下光伏桩基础受力变形机制研究

丛建鸥 黄立根

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要: 在全球能源转型与绿色发展推动下,光伏产业兴起,季节性冻土区因地域广阔成为光伏工程建设重要区域。但该区域特有的冻胀融沉现象,给光伏桩基础带来挑战:冻胀时土体膨胀产生冻胀力,使桩基础受上拔力而变形破坏;融沉时土体沉降引发附加应力,造成不均匀沉降。本研究聚焦于此,剖析受力变形机制,分析相关因素影响,揭示规律、耦合机制与损伤累积,为安全设计与稳定运行提供支撑。

关键词: 季节性冻土;冻胀融沉循环;光伏桩基础

引言: 随着季节性冻土区光伏电站建设规模的不断扩大,工程实践中因冻胀融沉导致的光伏桩基础倾斜、断裂,以及光伏组件移位、发电效率下降等问题日益凸显,已成为制约该区域光伏产业可持续发展的关键技术瓶颈。因此,开展季节性冻土冻胀融沉循环作用下光伏桩基础受力变形机制研究,不仅有助于完善冻土区特种桩基础的理论体系,填补光伏工程领域相关研究的空白,更能为季节性冻土区光伏桩基础的优化设计、施工工艺改进及长期运维提供科学的理论依据与技术支撑,对推动我国北方清洁能源基地建设、保障国家能源安全具有重要的理论意义与工程实用价值。

1 季节性冻土与光伏桩基础概述

1.1 季节性冻土的特性

季节性冻土是指冬季冻结、夏季完全融化的土层,其分布范围覆盖我国东北、西北及青藏高原等地区,占国土面积的53.5%。这类冻土的核心特性体现在物理力学性质的动态变化上,冻结时体积膨胀率可达10%~30%,融化后压缩系数较冻结状态增大3~5倍。冻土的冻胀特性主要取决于含水率与干密度,当含水率处于15%~25%区间时,冻胀力随含水率增加呈线性上升,而干密度在1.6~1.8g/cm³范围内时冻胀效应最显著。温度变化是冻土特性演变的主导因素,冻结速率每提升0.5°C/h,分凝冰形成量增加20%,导致冻胀力峰值提前出现;融化阶段温度梯度超过2°C/m时,会引发水分快速迁移,加剧融沉变形。此外,冻土中的盐分含量对其特性影响明显,含盐量超过0.5%时,冻胀点会降低5~8°C,可有效抑制冻胀但会增强融沉后期的土体侵蚀性。

1.2 光伏桩基础的类型

光伏桩基础按结构形式与材料可分为四大类,各类

基础适配不同冻土条件。螺旋钢桩由低碳合金钢制成,桩身缠绕螺旋叶片,直径通常为150~300mm,凭借安装便捷、对冻土扰动小的优势,在浅层季节性冻土区应用率达60%以上,其抗拔承载力较同规格直桩提升35%。预制混凝土桩强度等级多为C30~C40,桩长3~8m,适用于冻深较大区域,通过桩身预留的抗冻胀肋条可将侧摩阻力提高25%,但施工需避开冻土冻结期。钻孔灌注桩基采用现场浇筑工艺,桩径400~600mm,可根据冻深灵活调整埋深,在含水率高的冻土区能减少塌孔风险,但养护周期需延长至28天以上。复合地基桩由桩体与桩周改良土层组成,结合了材料与结构优势,在极寒冻土区(最低温 $\leq -30^{\circ}\text{C}$)的变形控制效果优于单一桩型,但其成本较传统桩型增加15%~20%,应用范围受经济条件限制^[1]。

1.3 冻胀融沉对光伏桩基础的作用机制

冻胀融沉对光伏桩基础的作用呈现“双向加载-卸载”的循环特征,贯穿基础全服役周期。冻结阶段,冻土中水分迁移形成分凝冰,体积膨胀产生法向冻胀压力,作用于桩身侧面形成切向冻胀力,该力沿桩长分布呈“上大下小”规律,0~2倍冻深范围内的力值占总冻胀力的70%。当冻胀力超过桩体抗拔承载力时,桩顶会产生向上位移,位移量与冻胀率呈正相关,冻胀率每增加1%,桩顶位移提升3~5mm。融化阶段,冻土中的冰体消融导致土体结构破坏,密度降低30%~40%,桩周土体沉降速率快于桩体沉降,形成向下的负摩阻力,该阻力会使桩身轴力增大,最大轴力出现在冻融界面处。冻胀与融沉的交替作用会导致桩土界面出现微裂隙,使侧摩阻力每循环一次衰减5%~8%,这种累积损伤最终会引发基础刚度下降,影响光伏阵列的安装精度与发电效率。

2 季节性冻土冻胀融沉循环下光伏桩基础受力变形影响因素分析

2.1 冻土自身特性因素

冻土自身特性是决定光伏桩基础受力变形的核心内在因素,其中含水率的影响最为显著。当冻土含水率从10%增至25%时,冻胀量从2mm/m升至18mm/m,对应的桩身冻胀拔力从50kN增至280kN,增幅超过4倍;而含水率超过30%后,土体冻结时会形成连续冰夹层,导致桩土界面粘结力下降,反而使冻胀力传递效率降低20%。干密度对变形的影响体现在土体孔隙结构上,干密度1.7g/cm³的冻土比1.5g/cm³的冻土冻胀量减少45%,融沉量降低38%,这是因为密实土体可抑制水分迁移与冰体生长。冻融循环次数直接引发冻土疲劳损伤,经过5次循环后,冻土弹性模量从30MPa降至12MPa,抗压强度衰减53%,导致桩侧摩阻力持续下降,相同荷载下的桩顶沉降量较首次循环增加2.3倍。此外,冻土颗粒级配对变形有明显调控作用,粉黏粒含量超过60%的冻土,冻胀融沉幅度是砂粒含量高的冻土的3倍以上。

2.2 光伏桩基础设计参数因素

光伏桩基础设计参数的合理性直接决定其抗冻胀融沉能力,桩长与冻深的匹配关系是关键指标。桩长等于1.2倍最大冻深时,桩顶冻胀位移量仅为桩长等于0.8倍冻深时的35%,这是因为足够的嵌入深度可利用下部非冻土层提供稳定锚固。桩径增大能有效分散冻胀力,桩径从200mm增至400mm时,桩身应力集中系数从1.8降至1.2,最大应力值降低33%,但桩径超过500mm后,经济性会明显下降。桩身材料刚度的选择需兼顾强度与变形适应性,Q355钢桩的弹性模量(206GPa)是C30混凝土桩(30GPa)的6.9倍,在冻胀阶段钢桩应力值较混凝土桩高40%,但变形量减少60%;而在融沉阶段,混凝土桩的塑性变形能更好地释放负摩阻力。桩身表面处理方式影响界面作用,采用螺纹或刻痕处理的桩体,较光滑桩体的侧摩阻力提升25%~30%,可有效抑制冻胀引发的相对滑移。

2.3 外部荷载与环境因素

外部荷载与环境因素通过改变受力平衡状态,加剧光伏桩基础的变形风险。光伏阵列的竖向荷载对融沉阶段的变形有显著影响,荷载从10kN增至30kN时,桩顶融沉沉降量从8mm增至15mm,这是因为荷载增大加速了桩底土体的压缩。水平风荷载会使桩身产生附加弯矩,在冻胀阶段,弯矩值较非冻胀阶段增加50%,易导致桩身出现弯曲裂缝,裂缝宽度与风荷载呈线性关系,风速每提升10m/s,裂缝宽度增加0.15mm。地表覆盖状况通过调控冻土温度场影响变形,铺设100mm厚XPS保温板的区域,

冻土冻结深度减少0.8m,冻胀量降低42%;而无覆盖区域的冻土温度波动幅度是覆盖区域的2.5倍,加剧冻融循环损伤^[2]。排水条件差的区域,雨水入渗会使冻土含水率增加15%~20%,导致冻胀融沉幅度扩大,桩顶累计位移量较排水良好区域增加60%以上。

3 季节性冻土冻胀融沉循环下光伏桩基础受力变形机制研究

3.1 冻胀阶段桩基础受力变形机制

冻胀阶段,光伏桩基础受力变形呈“应力集中-位移约束”特征,变形分三个阶段。初始冻结期(0至-5℃),冻土表层先冻,水分向冻结锋面迁移,冻胀力缓慢增长,桩顶位移小于2mm,桩身应力在弹性范围。快速冻结期(-5至-15℃),分凝冰大量形成,冻胀力指数增长,桩侧切向冻胀力峰值达35kPa,桩身轴力从20kN增至220kN,桩顶向上位移加速,速率达0.8mm/d。稳定冻结期(≤-15℃),冻胀力稳定,但桩土界面因温度应力现微裂隙,侧摩阻力略降,桩顶位移稳定在10-15mm。此阶段桩身变形以弹性为主,桩顶位移与冻胀量比值约0.3-0.5,钢桩位移约束能力优于混凝土桩。

3.2 融沉阶段桩基础受力变形机制

融沉阶段,光伏桩基础受力变形核心为“负摩阻力主导下的沉降累积”,与冻胀阶段力学反演。融化初期(-5至0℃),表层冻土先融,土体强度骤降,桩土相对位移形成负摩阻力,在桩身中下部应力集中,值达180MPa。快速融化期(0至5℃),冻融界面下移,冰体融化自由水增多,孔隙比增大超50%,负摩阻力达峰值,桩顶沉降速率1.2mm/d,桩身轴力较冻结阶段增30%-40%。稳定融沉期(≥5℃),自由水排出,压缩变形稳定,负摩阻力衰减,桩顶有永久性沉降,单次融沉沉降量是冻胀位移量1.2-1.5倍,桩身变形以塑性沉降为主,无防护基础5年累计沉降达初始3倍。

3.3 冻胀融沉循环下受力变形耦合机制与损伤累积

冻胀融沉循环下,光伏桩基础受力变形呈“耦合放大-损伤累积”规律,形成恶性循环。冻胀阶段桩顶向上位移使桩土界面产生拉伸裂隙,融沉阶段成为水分迁移通道,桩周冻土含水率局部增10%-15%,下次冻胀力提升25%,变形幅度逐次扩大。冻胀拉应力与融沉压应力交替作用,引发材料疲劳,10次循环后,钢桩屈服强度降18%,混凝土桩抗压强度衰减25%,承载能力持续降低。桩土界面损伤显著,每循环一次,粘结强度降8%-10%,侧摩阻力传递效率降低,桩身受力更不均,最大轴力位置上移。耦合损伤使基础刚度退化,自然振动频率从8Hz降至5Hz以下,影响光伏阵列结构稳定性^[3]。

4 季节性冻土冻胀融沉循环下光伏桩基础优化设计与防护建议

4.1 基础设计参数优化

基础设计参数优化需建立“冻深适配-受力均衡-变形可控”的设计体系，核心在于精准匹配冻土条件。桩长设计应采用“1.2倍最大冻深+0.5m安全锚固段”的标准，在冻深3m的区域，桩长设计为4.1m，较传统设计可使桩顶累计位移减少55%。桩径选择需结合受力计算，在高冻胀区（冻胀率 $\geq 5\%$ ）采用400~500mm大直径螺旋桩，配合桩身每隔1m设置的抗冻胀凸肋，凸肋高度20mm、宽度50mm，可将侧摩阻力提升40%，有效抵抗冻胀拔力。桩身材料推荐采用“Q355钢+防腐涂层”组合，涂层采用环氧煤沥青三层防腐体系，厚度 $\geq 0.4\text{mm}$ ，可抵御冻土侵蚀，延长使用寿命至25年以上。基础布置采用“梅花形布桩”方式，桩间距从3m优化为2.5m，增强群体基础的协同抗变形能力，使光伏阵列的平面度误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。此外，需引入温度应力补偿设计，在桩顶与支架连接处设置弹性缓冲装置，刚度控制在 500kN/m ，可吸收80%以上的冻胀融沉附加应力，避免应力集中导致的结构破坏。

4.2 冻土改良与环境调控措施

冻土改良与环境调控通过改变冻土特性，从源头抑制冻胀融沉效应，可分为物理改良与温度调控两类措施。物理改良优先采用“桩周换填+夯实”方案，在桩径2倍范围内换填级配砂石，砂石粒径5~20mm，含泥量 $\leq 3\%$ ，分层夯实至干密度 $\geq 1.9\text{g/cm}^3$ ，该方法可使桩周冻土冻胀率从8%降至2%以下，融沉系数减少60%。在高含水率区域，需配合化学改良，向换填层掺入3%~5%的水泥或2%~3%的石灰，形成固化层，固化层28天无侧限抗压强度 $\geq 2\text{MPa}$ ，可有效阻断水分迁移路径。温度调控措施以“保温+排水”为核心，地表铺设双层保温结构，上层为100mm厚XPS保温板，下层为50mm厚玻璃棉，保温层覆盖范围延伸至桩周1m区域，可使冻土冻结速率减缓60%，冻深减少1m。同时构建“截水沟+盲沟”排水系统，截水沟沿场地周边布置，坡度 $\geq 3\%$ ，盲沟设置在桩间区域，填充透水土工布包裹的碎石，将场地排水时间控制在24小时以内，避免雨水入渗增加冻土含水率^[4]。这些措施组合应用可使光伏桩基础的冻胀融沉变形量降低70%以上。

4.3 施工与运维优化建议

施工与运维优化需遵循“时序控制-过程监测-动态调整”的原则，保障基础长期稳定。施工时机严格选择非冻期（5~9月），此时冻土完全融化，桩体安装对土体扰动最小，螺旋桩采用机械旋入式施工，旋入速率控制在 0.3m/min ，避免过快施工导致桩周土体松动。钻孔灌注桩施工需采用干作业成孔，孔壁垂直度误差 $\leq 1\%$ ，混凝土浇筑采用导管法，浇筑速度 $\geq 0.5\text{m/min}$ ，确保桩体密实度。施工过程中需同步进行桩身应力监测，采用振弦式应力计，布设间距1m，实时监控施工阶段的应力变化，避免出现超应力情况。运维阶段建立“自动化监测+定期巡检”体系，监测内容包括桩顶位移（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ）、桩身应力、冻土温度与含水率，数据采集频率冬季每2小时一次，夏季每12小时一次。当桩顶累计位移超过20mm时，启动加固措施，采用桩侧注浆技术，注浆材料为水泥浆掺加10%的膨胀剂，注浆压力 $0.5\sim 0.8\text{MPa}$ ，可使桩体承载力恢复至设计值的110%。每年春季开展全面巡检，重点检查桩身防腐涂层与保温层破损情况，及时修复破损部位，确保防护措施持续有效。

结束语

季节性冻土冻胀融沉循环对光伏桩基础的破坏隐蔽且具累积性，制约着冻土区光伏能源开发。本文研究明确，冻土特性、设计参数、外部环境分别影响受力基础、抗变形能力、损伤进程，冻胀与融沉机制差异大，循环耦合致基础失效。提出的“设计优化-冻土改良-运维保障”方案可控制变形损伤。未来可结合数字孪生建模，研发新型抗冻胀桩，提升安全保障，推动寒冷地区新能源规模化发展。

参考文献

- [1] 聂晓鹏, 胡辉. 对季节性冻土地区光伏支架灌注桩长度的分析[J]. 贵州科学, 2020, 38(03): 91-93.
- [2] 董其明, 崔国桥, 于恺, 刘兴佳. 季节性冻土地区光伏支架基础设计分析[J]. 中国高新科技, 2020(04): 116-118.
- [3] 赵婷婷, 江赛雄. 光伏支架基础选型与设计优化研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2353-2357.
- [4] 唐湘, 樊尊龙. 严寒地区季节性冻土影响下光伏支架PHC桩基础设计的研究[J]. 太阳能, 2022(03): 87-91.