

# 高寒高海拔牧区光伏桩基础选型与优化设计研究

黄 彬

雅砻江流域水电开发有限公司 四川成都 610000

**摘 要:** 本文以高寒高海拔牧区光伏电站项目为研究对象,系统分析了光伏桩基础的抗拔性能与优化设计方案。通过现场单桩竖向抗拔静载试验,测定不同地质分区及桩型的抗拔极限承载力与特征值,并结合地质条件进行关联分析。运用FLAC3D软件开展桩土联合作用数值模拟,建立接触模型并进行参数反演,识别关键控制参数及破坏模式。在此基础上,通过增设腹板优化钢桩桩型、改良引孔孔径,提出不同地质分区下的最小埋深建议值,为高寒高海拔地区光伏桩基础设计提供理论依据和工程参考。

**关键词:** 高寒高海拔;光伏桩基础;抗拔性能;数值模拟;桩型优化;引孔改良

## 1 研究背景

随着国家“双碳”战略的持续推进,清洁能源在我国能源结构中的比重不断提升。高寒高海拔地区日照资源充足,具备建设光伏电站的自然优势。但此类地区普遍存在地质条件复杂、气候严酷、施工难度大等问题,对光伏基础的结构设计、受力性能及施工工艺提出了更高要求。光伏电站中常用的桩基础需具备较强的抗拔能力,以确保在风荷载、雪荷载等作用下的稳定性。传统基础设计方法难以直接适用于冻土、碎石覆盖层等复杂地质区域。因此,研究适应高寒高海拔环境特征的光伏桩基础抗拔性能及优化设计方案,具有重要的工程应用价值。

## 2 光伏桩基础抗拔性能试验研究

### 2.1 现场抗拔试验

现场单桩竖向抗拔静载试验是确定单桩竖向抗拔极限承载力的直观可靠方法,通过桩身应变、位移测试测定抗拔侧阻力,以判定竖向抗拔承载力是否满足设计要求。本研究依照《JGJ106-2014建筑基桩检测技术规范》,对五个地质分区共122根试桩(圆钢管桩、H型钢桩)进行竖向抗拔静载测试。试验加载系统包括反力框架、液压千斤顶、荷载传感器等,位移监测采用高精度数显千分表。加载方式为慢速维持法,分级加载,每级为预估极限承载力的1/10,直至破坏或荷载不再显著增大,随后逐级卸载至零。承载力特征值取极限值的50%,或桩身破坏前一级荷载的低值<sup>[1]</sup>。

### 2.2 试验结果分析

参照工程地质场地精细化分区光伏桩基础地基适宜

性评价分区标准,将4个大区块的场地主要地层依据试桩桩长、单桩竖向抗拔承载力特征值、桩型以及所处地质类别进行进一步分区。以1#地块为例,桩长为1.8m、2.1m的钢管桩,在二类地质条件下的建议承载力极限值分别为3.72kN和8.38kN,属于很差区;而在一类地质条件下的建议承载力极限值为9.31kN,属于中差区<sup>[2]</sup>。通过试桩所属地质适宜性评价分区的类别以及地勘现场试验和室内试验,可获取具体试桩相应的土层地质条件及部分物理力学性质,为后续数值模拟工作提供重要参考。

## 3 桩土联合作用效应数值模拟

### 3.1 有限差分法计算原理

FLAC3D是一款广泛应用于岩土工程研究的三维有限差分软件,基于显式拉格朗日算法和混合离散分区技术,通过将地质体或结构物分解为众多小的离散元素,数值模拟求解它们之间的相互作用,能准确模拟材料的塑性破坏和流动,适用于解决复杂非线性问题。有限差分法作为求解微分方程数值解的近似方法,主要原理是对微分方程中的微分项进行直接差分近似,将其转化为代数方程组求解,实际操作中需把偏微分方程求解区域细化为有限格点数的网格,并将网格格点的每个导数转换为有限差分近似公式。在该方法中,单元间由节点联结,节点受荷载后的运动方程可写成时间步长为 $\Delta t$ 的有限差分形式,微小时段 $\Delta t$ 内,节点荷载仅影响周围若干节点,根据单元节点速度变化和 $\Delta t$ 可求出单元相对位移及应变,利用本构关系得单元应力,随时段增长过程扩展至整个计算区域,求出失衡力并重新作用于节点迭代,直至失衡力足够小或节点位移平衡。

### 3.2 桩土联合接触模型

桩土联合接触模型将地基土与光伏桩基础接触面在切平面上的变形视为二维问题,结合法线方向压缩变形规律,建立接触面土体本构模型,在 $\tau-\sigma$ 空间内呈特定矩阵关系。接触面剪切试验给出的剪应力剪切位移曲线,可将剪应力与剪应变关系转化为剪应力剪切位移关系。对于桩基础,桩土相互作用以土体受剪为主,承载力取决于土-结构接触面抗剪能力及相关参数,且土体存在损伤变形、较大变形、较小变形和无变形区域,其分布有助于解释拔桩时土体受力。宏观上,接触面分接触界面、损伤和变形区域:剪切时接触面先破坏,破坏力取决于土体与接触面相互作用,加载破坏颗粒初始排列,颗粒间存在多种摩擦和约束;损伤区域由接触面土层破坏后荷载扩展形成,超粘聚力产生裂缝,远接触面土体因非理想弹塑性而损伤或变形小;随应变增加,摩擦效应和剪应力增大,法向荷载下颗粒排列趋密,摩擦效应稳定,剪应力增长变缓。

### 3.3 桩土作用参数反演

桩土作用参数反演通过将光伏桩数值试桩结果与现场试桩对比,结合钻探取样、原位测试、反分析结果及工程经验,确认土层参数,判断高海拔牧区块碎石地层及桩土接触面参数,过程包括采集试验数据、构建力学模型、参数反演等。依据相关规范和地区经验确定桩基设计参数建议值,同时参考工程区岩土体物理力学参数、地质建议值及均化后各类地质分区地层厚度。由于场址区气候、降水、土质等条件,地基土冻胀和冻融现象不明显,可忽略其对建筑物稳定性的影响。以1#地块为典型,选取4个典型试桩试验结果建立FLAC3D模型,确定模型边界和深度范围,设定试桩相同土层物理参数和几何埋深,桩身用弹塑性模型,土体用摩尔库伦模型,接触面用无厚度interface单元,边界条件为四周和下底面位移约束、上顶面自由,在桩顶分级施加竖向应力,设监测点记录位移,对比模拟与实测结果并调整参数以保证模型正确<sup>[3]</sup>。

### 3.4 反演结果与评估

使用优化后的材料反演参数对4根典型现场抗拔试验桩进行数值模拟,得到模拟与实测的荷载位移关系、竖向位移云图及对比分析图。破坏模式分析显示,上拔荷载下,荷载经桩身传至桩周土,初期浅部土层提供摩阻力,桩身拉应力集中在上部,随荷载增加,应力向桩底扩展,土阻力逐步发挥,超过极限则破坏,破坏模式

包括桩身强度破坏和地基土强度破坏,柯拉项目试桩以桩-土接触面剪切破坏为主,部分因下部块碎石及施工问题出现复合破坏,数值模拟亦验证此结论<sup>[4]</sup>。参数反演评估表明,1号试桩的U- $\delta$ 曲线拟合度高,加载初期数值计算与试验结果吻合,后期误差因加载方式、土体固结、桩体直径变化及岩土非均质性等因素增大,但总体误差率小于20%,说明模拟效果良好,参数准确。

## 4 光伏钢桩桩型设计与优化

### 4.1 单桩抗拔影响因素分析

影响单桩竖向抗拔承载力的因素众多,包括桩周围土体的性质、抗剪强度、侧压力系数和应力历史等;桩自身的侧表面粗糙程度、截面形状、桩长、刚度和泊松比等;施工过程中的桩周土体扰动、残余应力、桩身完整性、倾斜角度等;以及成桩到试验的休止时间、桩顶加载方式、荷载维持时间、加载卸载过程等。

### 4.2 抗拔钢桩优化措施

柯拉光伏电站场址面积大,支架基础数量多,基础造价占总造价比例可观,优化基础设计、减小基桩长度对减少电站投资意义重大。基于“牧光”光伏设施的设计考虑,光伏组件距离地面最低点距离定为1.8m,光伏桩露出地表部分的长度拟定为0.3-0.8m。

为减小桩身切向冻胀力,在满足单桩抗拔承载力规范要求的同时缩短桩身入土长度,可采取优化桩型和改良引孔工艺等措施。优化桩型可通过形成底部扩大头,增加端部承载面积,提高承载力,改善受力性能。扩底抗拔桩在受上托力作用时,桩体下部侧摩阻力能充分发挥,且因泊松效应影响,桩体径向膨胀,提高桩侧摩阻力<sup>[5]</sup>。改良引孔工艺中,引孔孔径大小直接影响成孔质量、孔壁稳定性、桩身与土体间的侧摩阻力及成桩质量。

### 4.3 抗拔桩优化方案设计

优化对象为特定规格的H型钢桩,引孔深度1.5m,孔径152mm,桩基入土深度1.8m,露出地面0.4m,要求单桩竖向抗拔承载力特征值9.6kN,极限值19.2kN。

桩型优化通过在H型钢桩上、中、下部设置腹板,比较抗拔承载力确定最优部位,在最优部位等间距增设不同数量腹板,分析抗拔承载力变化趋势确定最佳数量,进而确定优化后桩型在不同地质分区满足设计要求的最小埋深。引孔孔径优化从152mm开始,逐级扩大至164mm,分析抗拔承载力变化趋势确定最佳孔径,再确定不同地质分区满足设计要求的最小埋深。

#### 4.4 钢桩桩型优化结果

增设腹板的最优部位确定结果显示,在H型钢桩底部增设腹板对提高光伏桩抗拔承载力效果最明显,建议将腹板设置在底部,且从施工角度看,不会影响孔内回填土的密实效果。

增设腹板的最佳数量确定结果表明,增设1块腹板时抗拔承载力提升最为显著,增幅达14.3%,继续增设腹板提升作用逐渐放缓,考虑购材成本和施工难度,建议增设1块腹板。

桩型优化效果分析中,将原H型钢桩优化为在距离底部0.3m处增设1块特定尺寸的腹板,在6种不同地基适宜性分区地层条件下,得到不同埋深下的抗拔承载力结果及各分区所需最浅埋深。

#### 4.5 引孔孔径改良结果

引孔孔径优化数值模拟选用不同孔径进行分析,结果显示扩大引孔孔径后,光伏桩桩身最大位移下降,桩端最大应力上升,单桩抗拔承载力均匀增长,每级增幅约6%,且增幅随孔径扩大略有减小。综合考虑,推荐引孔孔径优化为中164mm。

引孔改良效果分析得到不同埋深下的抗拔承载力结果及各分区所需最浅埋深。

#### 结论

本研究通过对高寒高海拔牧区光伏桩基础的抗拔性能试验、桩土联合作用效应数值模拟以及钢桩桩型设计与优化,得出以下结论:

①现场单桩竖向抗拔静载试验能有效确定单桩竖向抗拔极限承载力,试验结果可为后续研究提供重要参考,不同地质分区的试桩承载力存在差异。②有限差分软件FLAC3D中的interface单元可较好模拟桩土接触面上的剪

切变形破坏,场地地基土冻胀冻融影响不显著,在数值模拟中可忽略,柯拉光伏桩基础主要破坏模式为桩-土接触面剪切破坏,反演结果与现场试验结果基本吻合,得到了各材料和接触面参数指标。③对桩型进行优化设计,推荐在距离光伏桩底部0.3m处增设1块特定尺寸的腹板,抗拔承载力较优化前提升约14.3%,并给出不同分区改良桩型后的最浅埋深;对引孔孔径优化,推荐引孔大小为中164mm,抗拔承载力较改良前提升约20.9%,并给出不同分区改良引孔后的最浅埋深。优化桩型和改良引孔孔径均可提高光伏桩抗拔承载力,减小最浅埋深,但对解决施工中的斜桩、坏桩问题收效甚微,需进一步研究解决。

本研究成果可为高寒高海拔地区光伏桩基础的设计与施工提供一定的技术支持,推动新能源产业在该类地区的可持续发展。

#### 参考文献

- [1]刘冬,赵斌,万克洋,等.基于分布式光伏发电的高寒高海拔地区建筑能源系统优化设计[J/OL].洁净煤技术,1-10[2025-07-18].
- [2]张顺,丁红,刘爽,等.高寒高海拔地区漂浮式水上光伏系泊系统布置影响因素研究[J].水利水电快报,2022,43(04):84-89.
- [3]张深林,吴田军,刘正国,等.高寒高海拔地区光伏电站建设的草地生态效益评估[J/OL].草原与草坪,1-14[2025-07-18].
- [4]谭恒.高寒高海拔地区光伏电站输出功率提升实验研究[D].长沙理工大学,2022.
- [5]康子军,韩放,豆红强,等.高寒高海拔区大型光伏电站场地冻融侵蚀强度分区评价[J].自然灾害学报,2024,33(04):198-210.