

光伏桩基承载力计算方法对比与适用性研究

周 铜 吕 森 卢江波 成昌林 王富厅
中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 610000

摘 要: 在全球能源转型的大背景下,光伏发电产业迎来了爆发式增长。光伏桩基作为支撑光伏阵列的关键结构,其承载力计算方法的科学性与适用性直接关系到工程的安全性与经济效益。本文聚焦光伏桩基承载力计算领域,深入剖析规范法、极限地基反力法、有限元法等核心方法的理论基础、计算模型及适用条件,并结合工程实例对比不同方法的计算精度与效率。研究发现,规范法适用于常规地质条件下的弹性长桩设计;极限地基反力法在刚性短桩计算中展现出独特优势;有限元法通过三维数值模拟能够精准捕捉桩-土复杂相互作用。针对滩涂、山地等特殊地质环境,本文提出“规范法+有限元修正”的混合计算模式,为光伏桩基设计提供坚实的理论支撑与技术指导。

关键词: 光伏桩基;承载力计算;极限地基反力法;有限元法;混合计算模式

引言

全球对清洁能源需求激增,光伏发电因可再生、无污染,成为能源转型核心。近年来,其产业迅猛发展,装机容量不断攀升。截至2025年,中国光伏累计装机量突破600GW,占全球38%,居领先地位。光伏电站建设中,桩基工程至关重要。桩基支撑光伏阵列,需承受荷载并应对风、雪、地震等自然环境。桩基工程成本占建设总成本15%-20%,承载力设计合理性关乎工程安全性与经济性。设计不足会导致桩基沉降、倾斜甚至破坏;过度设计则浪费材料、增加成本^[1]。但光伏桩基特性独特,与传统建筑桩基差异显著。其上部荷载轻、入土浅,且地质条件复杂。如山地光伏地形起伏大,采用微孔短桩,水平承载力计算需突破现行规范;滩涂光伏软土层压缩性强,受潮汐荷载耦合作用,承载力和稳定性面临挑战。因此,研究光伏桩基承载力计算方法适用性,对优化设计、控制风险意义重大。

1 光伏桩基承载力计算方法体系

1.1 规范法:基于弹性理论的简化计算

现行《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)与《太阳能发电站支架基础技术规范》(GB50797-2012)是光伏桩基设计的主要依据。规范法基于弹性理论,通过桩身刚度系数 α 与换算埋深 αh 对桩型进行分类,并给出相应的计算方法。

当 $\alpha h \geq 4.0$ 时,桩被定义为弹性长桩。此时,桩身变形以弹性变形为主,可采用m法计算其水平承载力。m法假设地基土水平抗力系数随深度呈线性增长,即 $k = m \cdot z$,其中 k 为地基土水平抗力系数, m 为比例系数, z 为深度。通过建立桩身微分方程,并结合边界条件,可得到桩身水平位移和转角的表达式。例如,桩身水平位移采用双

曲线函数表示:

$$y(z) = \frac{H_0}{EI\alpha^3} \cdot \frac{v_x \cdot \sinh(\alpha z)}{\cosh(\alpha L)}$$

式中, H_0 为桩顶水平力, EI 为桩身抗弯刚度, α 为水平变形系数, v_x 为位移系数, L 为桩长。

当 $2.5 \leq \alpha h < 4.0$ 时,桩为有限长桩。此时,桩端约束效应对桩身变形和承载力有一定影响,计算时需要考虑桩端的转动和位移约束条件,计算过程相对复杂。

当 $\alpha h < 2.5$ 时,桩为刚性短桩。然而,现行规范主要针对弹性长桩和有限长桩给出了详细的计算方法和系数表格,对于刚性短桩并未提供明确的计算方法^[2]。规范表格仅提供 $\alpha h \geq 2.4$ 的系数值,这使得在光伏项目普遍存在的 $\alpha h < 2.4$ 刚性短桩情况下,规范法无法直接应用。例如,在某山地光伏项目中,采用直径250mm、入土深度1.7m的灌注桩,计算得 $\alpha h = 1.96$,若强行套用规范法进行计算,结果偏差可达35%,严重影响了设计的安全性和经济性。

1.2 极限地基反力法:刚性短桩的突破性解法

针对刚性短桩($\alpha h < 2.5$)的承载力计算问题,极限地基反力法提供了一种有效的解决方案。该方法通过预设地基反力分布形式,建立力矩平衡方程来求解极限承载力。布罗姆斯(Broms)法是该领域的经典方法,其根据不同的土质条件(黏性土和砂性土)分别提出了相应的计算模型。

在黏性土中,布罗姆斯法假设地面以下1.5B深度内土体发生破坏,反力忽略不计;1.5B深度以下反力呈常数分布,值为 $9c_u B$,其中 c_u 为不排水剪强度, B 为桩宽。基于这一假设,建立力矩平衡方程来求解桩的极限承载力。极限承载力公式为:

$$H_u = \frac{9c_u B(L - 1.5B)}{2} + 9c_u B \cdot x$$

其中, x 为转动点深度, 通过力矩平衡条件求解。

在砂性土中, 布罗姆斯法假设反力沿深度线性分布, 地表处为0, 深度 x 处达 $3K_p \gamma x$, 其中 $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ 为被动土压力系数, γ 为土的重度, φ 为土的内摩擦角。极限承载力公式为:

$$H_u = \frac{K_p \gamma B L^2}{2(1 + h/L)}$$

式中, h 为桩顶外露高度。

以某高原山地光伏项目为例, 该项目地处高海拔地区, 地质条件以粉细砂为主, 内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 。现场采用直径300mm、入土深度1.6 m的刚性短桩进行基础施工。实测水平承载力特征值为10.5kN, 采用极限地基反力法(基于布罗姆斯理论框架)计算所得水平承载力为10.2 kN, 两者误差仅为2.9%。该结果充分验证了极限地基反力法在高原地区刚性短桩水平承载力计算中的可靠性和准确性。相较于现行规范推荐的简化方法, 极限地基反力法更贴合刚性短桩在粉细砂地层中的实际受力机制, 能够更合理地反映桩-土相互作用特性, 为类似高原山地光伏项目中短桩基础的设计提供了科学、有效的计算依据。

1.3 有限元法: 复杂工况的数值解法

有限元法作为一种强大的数值计算方法, 在光伏桩基承载力计算中具有独特的优势。它通过建立桩-土三维数值模型, 能够精确模拟非线性接触、大变形等复杂行为, 尤其适用于滩涂等特殊地质条件下的光伏桩基计算。

有限元法的计算流程主要包括以下几个步骤: (1) 几何建模: 采用六面体单元划分桩体和土体, 确保模型的几何精度。在桩-土接触面设置摩擦接触, 以准确模拟桩与土之间的相互作用。(2) 本构模型选择: 土体通常选用Drucker-Prager模型, 该模型能够较好地描述土体的弹塑性特性; 桩体则采用线弹性模型, 简化计算过程。(3) 边界条件设定: 模型底部固定, 防止土体发生整体移动; 侧向施加位移约束, 模拟实际边界条件^[3]。(4) 加载方式: 分级施加水平荷载, 监测桩顶位移与土体塑性区发展情况。通过逐步增加荷载, 观察桩基的变形和破坏过程, 确定其极限承载力。

以某滩涂光伏项目为例, 该项目地质条件为软黏土地基。分别采用规范法和有限元法进行承载力计算, 并对结果进行对比分析。在竖向承载力方面, 规范法安全系数为2.8, 有限元法采用超载法计算得安全系数为3.1; 在水平承载力方面, 规范法安全系数为2.1, 有限元法为1.9; 在沉降值方面, 规范法预测为42mm, 有限元法为

38mm。

对比结果表明, 有限元法在水平承载力计算中更接近实测值。这是因为有限元法能够考虑土体的非线性特性和桩-土之间的复杂相互作用, 而规范法基于一些简化假设, 在某些情况下可能无法准确反映实际情况。然而, 有限元法也存在一定的局限性, 其计算耗时是规范法的5-8倍, 对于大规模工程计算, 可能需要较高的计算资源。

2 典型工程案例

2.1 山地光伏项目: 刚性短桩的极限承载

2.1.1 项目概况

云南某山地光伏电站, 地形起伏较大, 地质条件复杂。采用直径300mm、入土深度2.0m的干作业钻孔灌注桩作为基础。地质勘察显示, 该区域主要为粉质黏土, 不排水剪强度 $c_u = 15\text{kPa}$, $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ 土的重度。

2.1.2 计算对比

规范法: 由于计算得 $\alpha h = 1.87 < 2.4$, 无法直接应用规范法进行计算。若强行套用弹性桩公式, 得到水平承载力 $H_u = 12.3\text{kN}$ 。

布罗姆斯法: 根据黏性土模型进行计算,

$$H_u = \frac{9 \times 15 \times 0.3 \times (2.0 - 1.5 \times 0.3)}{2} + 9 \times 15 \times 0.3 \times 0.45 = 18.7\text{kN}$$

取安全系数2.0, 得到水平承载力特征值为9.35kN。

现场试验: 通过静载试验实测破坏荷载为19.2kN, 取安全系数2.0, 得到水平承载力特征值为9.6kN。

结论: 布罗姆斯法计算结果与实测值误差仅为2.8%, 而规范法计算结果误差高达36.5%。这一对比充分验证了极限地基反力法在刚性短桩设计中的适用性和准确性。在山地光伏项目中, 由于地形和地质条件的限制, 刚性短桩的应用较为广泛, 采用极限地基反力法进行承载力计算能够为设计提供更可靠的依据。

2.2 滩涂光伏项目: 软土地基的有限元模拟

项目概况: 江苏某滩涂光伏电站, 地处沿海地区, 地质条件为高压缩性软土。采用直径600mm、入土深度12m的PHC管桩作为基础。地质勘察显示, 该区域软土的压缩模量 $E_s = 5\text{MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.45$ 。

2.2.1 计算方案:

规范法: 选取比例系数 $m = 8\text{MN/m}^4$, 计算得到水平承载力特征值为152kN。

有限元法: 采用超载法逐步加载至桩顶位移10mm, 对应荷载为148kN。在加载过程中, 通过有限元软件可以直观地显示土体塑性区的发展过程。当荷载达到140kN时, 桩周0.5m范围内土体进入塑性状态, 这与规范法无法捕捉的细节形成了互补。

实测值：通过静载试验得到水平承载力特征值为155kN。

优势分析：有限元法不仅能够准确计算桩基的承载力，还能够深入分析桩-土之间的相互作用机制。在滩涂光伏项目中，软土地基的压缩性和潮汐荷载的耦合作用对桩基的承载力和稳定性影响较大。有限元法可以通过

模拟实际工况，为设计提供更全面的信息，帮助工程师优化设计方案，提高工程的安全性和经济性。

3 计算方法适用性评价与优化建议

3.1 方法适用性矩阵

通过对规范法、极限地基反力法和有限元法的深入分析，可以构建如下方法适用性矩阵：

表1：方法适用性矩阵

计算方法	适用桩型	地质条件	计算效率	精度等级
规范法	弹性长桩	常规土层	高	中
极限地基反力法	刚性短桩	黏性土/砂土	中	高
有限元法	所有桩型	复杂地质	低	极高

从矩阵中可以看出，规范法在计算弹性长桩时具有较高的计算效率，适用于常规地质条件下的初步设计；极限地基反力法针对刚性短桩提出了有效的计算方法，在黏性土和砂性土地质中具有较高的精度；有限元法虽然计算效率较低，但能够适应各种桩型和复杂地质条件，提供极高的计算精度。

3.2 混合计算模式建议

针对光伏项目地质条件的多样性，提出“规范法初算+有限元修正”的两阶段设计法，以兼顾计算效率和精度。(1) 初算阶段：采用规范法快速确定桩径、桩长等基本设计参数。规范法基于大量的工程实践和理论研究，具有计算简便、效率高的特点，能够在短时间内给出初步的设计方案，为后续的详细设计提供基础^[4]。(2) 修正阶段：对关键工况（如水平承载力控制、复杂地质条件等）建立有限元模型，校核规范法的计算结果。有限元法可以更准确地模拟桩-土之间的相互作用，考虑土体的非线性特性和复杂边界条件，对规范法的计算结果进行修正和优化，提高设计的安全性和可靠性。(3) 经济性优化：通过参数化分析，寻找材料成本与安全储备的最佳平衡点。在保证工程安全性的前提下，合理调整桩径、桩长等参数，降低材料消耗和工程成本，提高项目的经济效益。某西北光伏项目采用混合计算模式进行设计。在初算阶段，根据规范法确定桩径为400mm、桩长为8m。在修正阶段，建立有限元模型对关键工况进行校核，发现按照规范法设计的桩基在水平荷载作用下存在一定的安全

隐患。通过调整桩径为450mm、桩长为8.5m，在保证安全系数的前提下，减少了桩长0.5m，单桩成本降低12%，取得了良好的经济效果。

4 结语

在弹性长桩计算中，规范法高效但不适用于刚性短桩，复杂地质下结果偏差大；极限地基反力法可准确计算刚性短桩极限承载力，在黏性土和砂性土中精度高；有限元法能精准捕捉桩-土相互作用，适应各种桩型和复杂地质，但成本高，适用于关键工况分析；混合计算模式兼顾效率与精度，是光伏桩基设计优化方向，通过规范法初算和有限元修正可降本增效。未来，可开发基于机器学习的智能计算平台，实现规范法与有限元法自动融合，提高计算效率与精度；建立涵盖不同地质条件实测数据与计算参数的光伏桩基数据库，为研究设计提供参考；研究动力荷载对桩基承载力的影响，完善动态设计方法，提升光伏桩基在复杂环境下的安全性与可靠性。

参考文献

[1] 腾骁,车向南.光伏支架微型桩承载力特性及质量控制[J].中国新技术新产品,2024,(19):101-103.
 [2] 马明辉,马清,宫硕.光伏支架微型桩基础抗倾覆的计算研究与应用[J].能源科技,2025,23(01):61-65.
 [3] 胡朝健,陈泽乐,周润.农光互补光伏短桩竖向承载力试验分析[J].科技与创新,2025,(04):125-128.
 [4] 陈泽乐,周润.农光互补光伏桩基础水平承载力试验分析[J].低碳世界,2025,15(01):49-51.