

高海拔山地光伏项目微孔灌注桩的应用与研究

王阳 张鑫 李应川

浙江华东工程咨询有限公司 浙江杭州 311100

摘要: 本文以高海拔山地光伏项目为研究对象,系统探讨微孔灌注桩的应用技术。结合数值模拟方法,构建微孔灌注桩在高海拔复杂地质环境下的受力模型,深入分析不同桩径与埋深条件对桩端应力与桩身轴力(即抗拔承载力)的影响规律。并以实际工程案例验证模拟结果的准确性与适用性,全面论证微孔灌注桩在该类项目中的工程优势与适用价值,为类似工程提供科学、可靠的设计与施工依据。

关键词: 高海拔山地;光伏项目;微孔灌注桩;数值模拟;抗拔承载力

1 研究背景

高海拔山地由于日照资源充沛,成为光伏开发的重要区域。然而,该区域地形崎岖、地质条件复杂、气候严酷,给桩基施工带来严峻挑战。微孔灌注桩因其施工扰动小、环保性强及地质适应性高,已在光伏项目中逐步获得关注与应用^[1]。深入研究其在高海拔复杂地质条件下的适应性与力学性能,对推动区域光伏项目高质量建设具有重要意义。

2 微孔灌注桩模型及参数设置

2.1 材料模型选择

桩身采用 C30 混凝土,在 FLAC3D 软件环境中,将桩体材料模型精准设定为 model elastic。弹性模型能够较为理想地模拟混凝土材料在受力初始阶段的线性变形特征,对于微孔灌注桩桩身力学行为的初步分析而言,是极为适用的基础模型,为后续深入探究桩身应力、变形等情况筑牢根基。

在高海拔山地的特殊环境下,混凝土的力学性能会受到低温、冻融循环等因素影响,弹性模型虽无法完全涵盖这些复杂影响,但为初步的力学行为分析提供了简洁且有效的理论框架,后续可结合实际监测数据对模型进行修正与完善。

2.2 参数确定依据

参考大量类似工程案例以及丰富的学术文献,紧密结合本项目详实的实际地勘资料和严谨的试验数据,来设置相关具体参数。在高海拔山地光伏项目中,地层条件繁杂多样,涵盖草甸土、块碎石土、强风化砂岩等多种土层类型。不同土层的物理力学性质存在显著差异,通过地勘精准获取土层厚度、体积模量、剪切模量、密度、粘聚力、内摩擦角等参数,是准确模拟微孔灌注桩受力特性的核心关键^[2]。具体参数如表 1 所示:

表 1: 灌注桩数值模拟参数表

材料类别	材料厚度 L(m)	体积模量 K(MPa)	剪切模量 G(MPa)	密度 ρ (kg/m ³)	粘聚力 c(kPa)	内摩擦角 ϕ (°)
灌注桩桩身	\	18100	13540	2500	\	\
草甸土 - 土层	0.2	25	6.50	1700	0.1	20
草甸土 - 接触面	\	140000	7.20000	\	1	17.5
块碎石土 - 土层	0.8	33	12.0000	2000	1.5	22.5
块碎石土 - 接触面	\	140000	7.20000	\	5	25
强风化砂 - 土层	0.6	200	45	2200	80	30
强风化砂 - 接触面	\	140000	120000	\	15	25
中风化砂 - 土层	3.4	250	60	2600	600	35
中风化砂 - 接触面	\	140000	120000	\	120	30

这些参数综合且全面地反映了高海拔山地不同地层的力学特性,为数值模拟微孔灌注桩在该区域的受力情况搭建起稳固基石。草甸土具有独特的孔隙结构和力学响应,其粘聚力和内摩擦角相对较低,在光伏桩基施工中,容易因施工扰动发生变形;块碎石土的颗粒组成复杂,力学性质受颗粒间咬合作用影响显著;强风化砂和中风化砂则在强度和变形特性上存在明显梯度变化。准确把握这些参数,才能使数值模拟更贴近实际工程受力状况。3 微孔灌注桩数值模拟结果分析

3.1 模拟方案设计

为深入探究高海拔山地光伏项目中微孔灌注桩的力学性能,精心设计不同桩径($\phi 60$ 、 $\phi 80$ 、 $\phi 100$ 、 $\phi 120$)、相同埋深(1.5m)的数值模拟方案。桩径作为影响微孔灌注桩力学性能的关键参数之一,在高海拔山地环境中,不同桩径的桩基与复杂地层相互作用的机制存在差异。通过改变桩径这一核心参数,细致分析其对桩端应力、桩身轴力(抗拔承载力)的影响,进而确定与高海拔山地地质条件相适配的合理桩径,为工程实践提供精准指导^[3]。

3.2 模拟结果汇总

通过对不同型号灌注桩展开严谨的数值模拟计算,将计算结果详细汇总如表2所示:

表 2: 埋深 1.5m 不同桩径灌注桩模拟计算结果汇总表

桩径 /mm	埋深 /m	桩顶竖向应力 / kPa	横截面积 /m ²	桩身轴力 (抗拔承载力) / kN
$\phi 60$	1.5	4.28E+03	2.83E-03	12.12
$\phi 80$	1.5	3.42E+03	5.03E-03	17.21
$\phi 100$	1.5	3.03E+03	7.85E-03	23.81
$\phi 120$	1.5	2.91E+03	1.13E-02	32.92

从表2能够清晰看出,随着桩径的逐步增大,桩顶竖向应力呈现出逐渐减小的趋势,而桩身轴力(抗拔承载力)则持续不断地增大。当桩径从 $\phi 60$ 增加到 $\phi 120$ 时,桩身轴力(抗拔承载力)从12.12kN大幅提升至32.92kN,增幅极为显著。这是因为桩径增大后,桩身横截面积相应增加,与周围土体的接触面积变大,能够更为有效地传递和承受荷载,进而切实提高抗拔承载力。但桩顶竖向应力减小,表明在相同埋深、荷载条件下,大桩径灌注桩桩身的应力分布愈发趋于合理,能够更好地适应高海拔山地光伏项目的受力需

求。在高海拔山地,风荷载、雪荷载等动态荷载以及土体的冻胀力等复杂作用力共同作用于桩基,合理的应力分布有助于桩基在长期运营中保持稳定,减少因应力集中导致的桩基损坏风险^[4]。

4 微孔灌注桩在高海拔山地光伏项目中的应用优势

4.1 地质适应性优势

高海拔山地地质条件繁杂多样,存在草甸土、块碎石土等多种土层,且各土层物理力学性质差异悬殊。微孔灌注桩凭借合理的参数设置以及成熟的施工工艺,能够灵活适应不同土层的特性。例如,在草甸土、块碎石土等软弱土层中,灌注桩的注浆工艺可在一定程度上对桩周土体进行加固处理,提高桩周土体的强度,增强桩身与土体之间的粘结力,从而有力提升桩基的承载性能,有效攻克高海拔山地复杂地质条件下桩基稳定性难题^[5]。草甸土在夏季可能因降水变得松软,冬季又会因冻胀产生体积变化,微孔灌注桩的注浆加固作用,可在桩周形成一定范围的强化区,抵御土体变形对桩基的不利影响;块碎石土的颗粒堆积特性导致其力学性质不稳定,灌注桩与之紧密结合,能借助土体颗粒与桩身的相互嵌固作用,提升桩基整体稳定性。

4.2 抗拔性能优势

从数值模拟结果清晰可知,微孔灌注桩具备优良的抗拔性能,且桩径对其抗拔承载力影响显著。在高海拔山地光伏项目里,光伏支架需承受风荷载、雪荷载等多种外力作用,这对桩基的抗拔承载力提出了较高要求。微孔灌注桩可通过优化桩径等参数,精准满足项目对桩基抗拔性能的需求,有力保障光伏支架在复杂外力作用下的稳定性,大幅减少因桩基抗拔能力不足引发的支架倾斜、倒塌等事故发生。高海拔山地的强风天气较为频繁,风荷载具有阵发性和不确定性,微孔灌注桩良好的抗拔性能,能确保光伏支架在强风作用下屹立不倒,保障光伏组件持续高效发电;冬季厚重的积雪荷载也会对桩基产生上拔力,充足的抗拔承载力可抵御这种荷载,维持项目结构安全。

4.3 施工与环保优势

微孔灌注桩施工过程中,振动和噪声处于较低水平,对高海拔山地脆弱的生态环境影响甚微。相较于一些大型桩基施工工艺,其施工设备相对轻便灵巧,对施工场地要求较低,非常契合高海拔山地地形复杂、交通不便的特点。同时,施工产生的废弃物数量少,能够有效保护高海拔山地的生态

环境,与光伏项目绿色施工的理念高度契合。高海拔山地生态系统脆弱,一旦遭到破坏,恢复难度极大。微孔灌注桩施工过程中的低扰动特性,可最大程度减少对地表植被、土体结构的破坏,保护当地的生物栖息地和水土保持功能;其施工设备轻便,便于在山地狭窄区域和复杂地形中运输、操作,降低了施工对地形地貌的改造需求,减少了工程建设引发的水土流失等环境问题。

5 工程案例验证

以某高海拔山地光伏项目作为实例,该项目所在区域的地质条件与本文模拟参数设定的地质条件相近,包含草甸土、块碎石土、强风化砂等土层。项目中部分桩基采用 $\phi 100$ 微孔灌注桩,埋深设定为1.5m。通过开展现场静载试验,测得该桩型的抗拔承载力平均值为24.0kN,与数值模拟结果(23.81kN)高度接近,有力验证了数值模拟的可靠性。同时,在施工过程中,微孔灌注桩展现出卓越的地质适应性,施工振动和噪声未对周边环境造成明显不良影响,施工进度也能够满足项目整体推进要求^[6]。

在该工程案例中,施工前期对高海拔山地的地质条件进行了再次详细勘察,确认草甸土的厚度、力学参数与模拟设定基本一致,块碎石土的颗粒组成和分布也符合预期。施工过程中,严格按照模拟确定的参数和工艺进行微孔灌注桩施工,包括成孔、注浆、养护等环节。成孔过程中,利用轻便钻机在复杂地形中顺利作业,避免了对土体的过度扰动;注浆工艺严格控制压力和注浆量,确保桩周土体得到有效加固。施工完成后,对桩基进行了多维度监测,除静载试验外,还采用了位移监测、应力监测等手段,持续跟踪桩基在不同季节、不同荷载条件下的工作状态。监测数据显示,微孔灌注桩在经历冬季冻胀、春季融沉以及夏季强风等复杂工况后,各项力学指标仍保持在合理范围内,进一步证明了其在高海拔山地光伏项目中的适用性和可靠性。

6 结论与展望

6.1 结论

在高海拔山地光伏项目中,科学合理设置微孔灌注桩模型及参数(桩身用C30混凝土、设弹性模型、结合地勘定土层参数),可准确模拟其力学性能,为后续工程设计和

施工提供理论支撑。数值模拟显示,桩径对微孔灌注桩桩端应力、桩身轴力(抗拔承载力)影响大,增大桩径能提升抗拔承载力、使桩身应力分布更合理,助桩基在复杂受力环境中保持稳定。微孔灌注桩在该项目中优势众多,如地质适应性强、抗拔性能好、施工环保等。经工程案例验证,其力学性能模拟结果可靠,适用于该类项目桩基工程,为项目实施提供可行技术方案。

6.2 展望

未来,可拓展研究维度,深入探究不同埋深、不同地质组合条件下微孔灌注桩力学性能,持续优化桩基设计参数。不同埋深会改变桩基与土体相互作用深度和范围,在高海拔山地,埋深增加会使土体温度、力学性质等改变,其对微孔灌注桩力学性能的影响需深入研究;同时,高海拔山地地质条件复杂,不同地质组合会使桩基受力有差异,需针对性研究。此外,结合现场长期监测数据,剖析微孔灌注桩在高海拔山地环境下的长期变形特性和耐久性,高海拔山地的冻融循环、强紫外线辐射、极端温度变化等因素会对其材料性能和结构稳定性产生长期影响,开展相关研究可为高海拔山地光伏项目桩基工程提供全面深入的技术支持,推动高海拔山地光伏项目朝更高效、稳定、环保的方向发展。

参考文献:

- [1] 楼巍,张伟,沈永良.高海拔山地平单轴光伏项目中风荷载取值的对比分析[J].浙江建筑,2025,42(03):60-63.
- [2] 肖利建,高爽.预制舱式变电站在高海拔光伏项目中的应用[J].四川水力发电,2020,39(04):131-135.
- [3] 李刚,袁强,吴穹,等.四川高海拔山地光伏电站建设总结[J].科技资讯,2019,17(32):30-32.
- [4] 房万勇.高海拔地区光伏电站施工雷电预警系统的应用[J].四川水利,2024,45(S2):100-101+105.
- [5] 黄志军.山地光伏发电项目的水土治理防治措施[J].中国高科技,2023,(18):145-147.
- [6] 肖利建,高爽.预制舱式变电站在高海拔光伏项目中的应用[J].四川水力发电,2020,39(04):131-135.

作者简介:王阳(1991—),女,汉族,四川成都,工程师,本科,研究方向:为工程技术与管理。