

复杂地质条件下特高压交流线路桩基础选用的对比分析

蒋慧超

中煤长江基础建设有限公司 江苏 常州 213000

摘要: 本文聚焦特高压交流线路在复杂地质条件下桩基础的选用问题,阐述了桩基础需满足的承载能力、变形控制、耐久性 & 施工适应性等核心技术要求。以川渝特高压交流工程线路工程(包25)为例,深入剖析钻孔灌注桩、预应力混凝土管桩、挖孔灌注桩、沉管灌注桩四类常见桩基础的特性。从软土地基、岩溶地层、高烈度地震区、深厚砂层四类复杂地质场景出发,开展桩基础选用的多维度对比,为特高压交流线路工程在复杂地质区域的桩基础选型提供科学依据与实践参考。

关键词: 特高压交流线路; 复杂地质条件; 桩基础; 对比分析

1 引言

特高压交流输电作为提升电网输电能力、优化能源资源配置的关键技术,在我国能源战略布局中占据重要地位。其线路往往跨越广袤地域,途经多种复杂地质区域,如山区、丘陵、沿海滩涂、岩溶地区等。复杂地质条件对特高压交流线路桩基础的选型与设计提出了严峻挑战,基础不仅要承受杆塔自重、导线及绝缘子重量、覆冰、强风、地震等各类荷载,还需长期应对复杂地质环境下的腐蚀、变形等问题,确保线路安全稳定运行^[1]。而合理选择桩基础类型,成为保障特高压交流线路工程质量、降低建设成本、延长使用寿命的关键环节。因此,深入开展复杂地质条件下特高压交流线路桩基础选用的对比分析具有重要的工程实际意义与理论研究价值。

2 特高压交流线路桩基础的核心技术要求

2.1 承载能力要求

桩基础需同时满足竖向与水平承载双重需求。竖向承载方面,需有效传递杆塔自重、导线及绝缘子重量、覆冰荷载等竖向力,桩端必须嵌入中风化岩层、密实砂层等稳定持力层,确保桩身轴力不超过混凝土抗压强度限值,桩端反力控制在地基极限承载力范围内^[2]。而水平承载方面,桩基础需抵御强风、地震、断线等水平荷载作用,防止桩身出现水平裂缝或剪切破坏,需严格遵循相关设计规范,保证水平承载力安全系数不低于1.5。

2.2 变形控制要求

特高压线路对基础变形敏感度高,变形过大会导致导线弧垂变化、杆塔受力失衡,甚至引发线路跳闸。竖向沉降需严格把控,单桩竖向沉降量不得超过50毫米,同塔基础间沉降差需控制在20毫米以内。在设计风速(通常为30-40m/s)作用下,基础顶部水平位移需小于15毫米。而针对软土地基或深厚压缩层等特殊地质,需通

过优化桩长或采用复合地基处理等方式,将基础不均匀变形控制在允许范围,避免对线路运行造成影响^[3]。

2.3 耐久性要求

特高压线路多穿越野外复杂环境,如沿海高盐雾区、山区酸性土壤区、冻土区等,桩基础需具备长期抗侵蚀能力。混凝土强度等级需选用C30及以上,沿海地区需添加抗氯离子渗透剂,混凝土保护层厚度不小于50毫米。受力钢筋应采用HRB400E及以上抗震钢筋,表面需涂刷防腐涂料,地下水位以下桩段需增设牺牲阳极保护。而在冻土区或季节性冰冻区,混凝土抗冻等级需达到F200,确保经历200次冻融循环后无明显破坏,保障桩基础长期稳定性能。

2.4 施工适应性要求

复杂地质区域施工条件往往受限,如场地狭窄、交通不便、地下水位高等,桩基础需满足施工便捷性与安全性要求。施工设备需适配现场地形条件,山区需选用小型化钻机,沿海地区设备需具备防腐蚀能力。施工工序应尽量简化,避免复杂护壁工艺,确保常规地质条件下单桩施工周期不超过7天。同时,施工单位需规避高风险施工操作,如挖孔灌注桩需防范坍塌风险,沉管灌注桩需控制振动对周边环境的影响,施工全过程需严格遵循相关安全规范,保障施工安全与工程质量。

3 复杂地质条件下常见桩基础类型及特性分析

川渝特高压交流工程线路工程(包25)沿线以低山丘陵和山前平地地貌为主,地基土自上而下分布粉质黏土、强风化泥岩、强风化泥质砂岩、中风化泥岩、中风化泥质砂岩及中风化砂岩,部分区域存在岩层互层现象。本标段实际应用钻孔灌注桩与挖孔灌注桩两类基础,同时结合特高压工程常见桩基础形式,对钻孔灌注桩、预应力混凝土管桩、挖孔灌注桩、沉管灌注桩的特性展开分

析,明确各类基础与本标段地质条件的适配性^[4]。

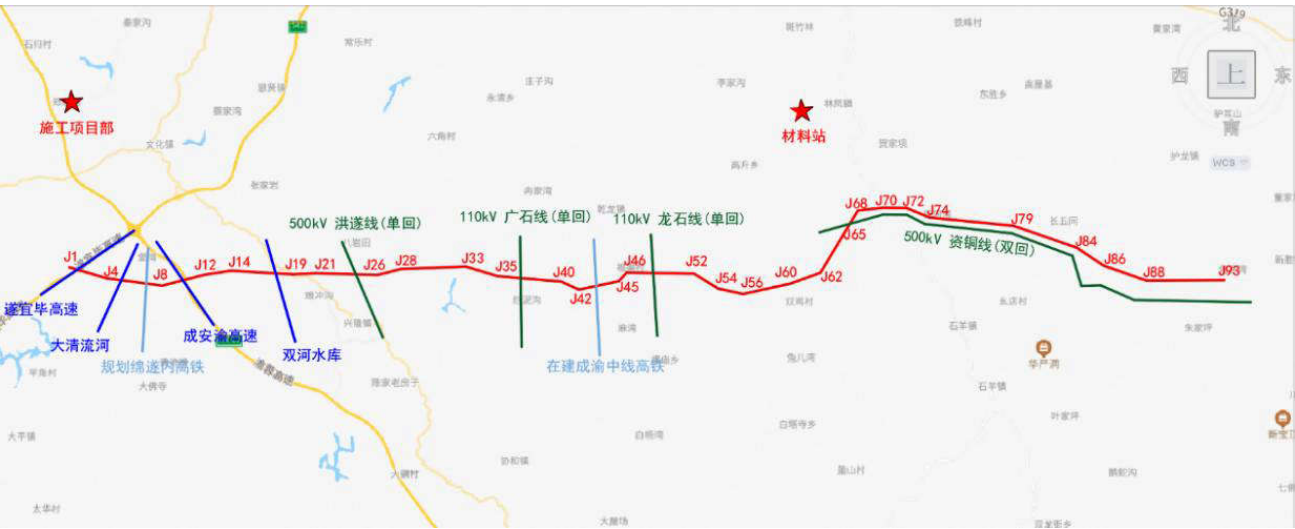


图1 川渝特高压交流工程线路工程走向图

3.1 钻孔灌注桩

钻孔灌注桩在本标段以“G”型基础标识应用,共18基,总方量为4461.61m³。施工中根据地层情况采用泥浆护壁工艺,桩径范围为0.8-2.0m,桩长随持力层深度调整。如11S020杆塔基础需穿越7m厚粉质黏土与1.8m强风化泥岩,最终嵌入8.8-15m中风化泥岩,11S036杆塔基础则直接嵌入2.4-15m中风化砂岩。

此类基础通过钻机成孔、下放钢筋笼、现场浇筑混凝土形成,桩身混凝土连续浇筑无接缝,整体性强,能有效适配本标段岩层交互的复杂地层。面对粉质黏土与风化岩层的界面变化,可通过调整钻进参数与护壁措施,避免成孔过程中出现塌孔或孔壁坍塌。且钻孔灌注桩竖向承载力主要依赖桩端阻力与桩侧摩阻力,在中风化泥岩、砂岩等稳定持力层中,单桩竖向极限承载力可满足本标段杆塔千吨级荷载需求。而钻孔灌注桩水平承载力则通过优化钢筋笼配筋率提升,能抵御低山丘陵区域的强风荷载,保障杆塔在设计风速下的稳定性。



图2 川渝特高压交流工程线路工程钻孔灌注桩现场施工图

在施工阶段,钻孔灌注桩需重点处理泥浆循环与排放及钻渣内倒与外运问题,避免污染沿线土壤与水体;同时,成孔后需及时清孔,减少孔底沉渣厚度,防止影

响基础承载性能。从本标段应用情况来看,其多适用于粉质黏土较厚、地下水位较高或岩层埋深较大的区域,如11S045杆塔基础需穿越10.2m粉质黏土,其上部土层较为稳定,采用钻孔灌注桩的干式旋挖工艺即可满足施工需要。对土层较为松散的部分塔基础,采用钻孔灌注桩的泥浆护壁工艺可有效解决成孔难题。

3.2 预应力混凝土管桩

预应力混凝土管桩通常采用工厂预制的空心圆形构件,采用先张法预应力工艺制作,桩径设定为0.4-1.2m,单节长度设定为6-15m,通过焊接接长后采用静压或锤击方式沉桩。虽本标段未实际应用此类基础,但结合沿线地质条件分析,其在山前平地区域的松散粉质黏土与薄强风化泥岩层中具备一定适配性,如11S003、11S011杆塔所在区域,粉质黏土厚度2.2-2.5m,下部为强风化泥岩,适合管桩沉桩施工。

预应力混凝土管桩混凝土强度等级需达C80及以上,其竖向承载力主要依赖桩侧摩阻力,在本标段0.3-6.1m厚的粉质黏土层中,侧摩阻力可充分发挥。但因桩身为空心结构,抗拔性能较弱,且水平承载力较低,需通过设置刚性承台或增加桩数提升水平抗剪能力,难以满足本标段转角杆塔或高呼高杆塔的复杂受力需求。此外,预应力混凝土管桩无需现场成孔,施工速度快,根据地质情况,单桩施工周期约1-5小时,且无泥浆污染,符合环保要求。但受限于沉桩工艺,其在本标段中风化泥岩、砂岩等较硬地层中适用性较差,加之场地以低山丘陵为主,无法满足设备的运行要求。如11S001杆塔基础0.9m以下中风化砂岩,管桩沉桩时易出现桩身断裂或沉桩不到位,因此仅适用于岩层埋深大于15m、上部以松散土

层为主且场地较为平坦的区域。

3.3 挖孔灌注桩

挖孔灌注桩是本标段的主流基础类型,以“W”型基础标识应用,共74基,总方量14276.55m³,桩径1.2-3.0m,桩长5-15m,采用人工或机械开挖成孔,配合混凝土护壁支护,适用于地下水位较低、岩层相对完整的区域,如11S001、11S004、11S008等杆塔所在区域,中风化岩层埋深较浅,且无明显涌水现象。

成孔过程中,挖孔灌注桩可直接观察地层变化,便于处理局部地质缺陷,如11S012杆塔基础开挖至4.3m时遇到中风化泥质砂岩,可通过人工清理孔内风化碎屑,确保桩端嵌入稳定岩层。同时,大直径桩身可配置更高配筋率(通常0.8%-1.5%),抗剪性能与整体刚度优异,能有效传递杆塔的竖向荷载与水平风荷载,尤其适用于转角杆塔,如11S004杆塔左转角8°43'01",挖孔灌注桩的高承载性能可保障杆塔受力平衡。

承载性能上,挖孔灌注桩的竖向承载力极高,单桩竖向极限承载力可达8000kN以上,在本标段中风化泥岩、砂岩地层中,桩端阻力能充分发挥,如11S005杆塔基础嵌入6.1-10m中风化泥质砂岩,长期运行中沉降量控制在允许范围内。施工阶段,其需重点防范坍塌风险,尤其是在粉质黏土较厚的区域,如11S044杆塔基础需开挖8.6m厚粉质黏土,需采用分段开挖、及时护壁的方式,同时做好降水措施,避免涌水影响成孔安全。

3.4 沉管灌注桩

沉管灌注桩通过振动或锤击方式将带桩靴的钢管沉

入地层,形成桩孔后浇筑混凝土、拔出钢管成桩,桩径0.4-0.8m,桩长8-25m。从本标段地质条件得知,其仅适用于松散粉质黏土与软塑状强风化泥岩区域,如11S055、11S069等杆塔所在区域,粉质黏土厚度1-2m,下部为强风化泥岩,但因本标段对基础承载力与稳定性要求较高,未实际采用此类基础。

且沉管灌注桩无需单独成孔,桩身与地层结合紧密,桩侧摩阻力发挥充分;但成桩质量受施工工艺影响较大。在本标段软塑状粉质黏土中,若拔管速度过快易导致桩身缩颈;在密实强风化岩层中,沉管困难易造成桩长不足,影响承载性能。承载性能方面,其竖向承载力中等(单桩竖向极限承载力1500-2500kN),水平承载力较低,难以满足本标段特高压杆塔的荷载需求。且振动沉桩可能对周边地层产生扰动,若周边存在其他杆塔基础,易引发地层沉降,增加工程风险。

由于沉管灌注桩工序简单,单桩施工周期小于1天,成本较低,但质量检测通过率较低,需增加超声波检测或低应变检测频次,确保桩身完整性,从工程经济性与安全性综合考量,其不适用于本标段地质条件。

4 复杂地质条件下桩基础选用的多维度对比分析

结合川渝特高压交流工程线路工程(包25)的地质勘察数据,沿线虽未涉及典型软土地基、岩溶地层、高烈度地震区及深厚砂层,但从特高压工程地质适配性角度出发,基于本标段地层特性(粉质黏土、风化泥岩、风化砂岩等),对四类复杂地质条件下桩基础选用展开多维度对比,为类似工程提供参考。



图3 川渝特高压交流工程线路工程地貌及地层分布示意图

4.1 软土地基

软土地基以高含水量、高压缩性、低承载力为特征,核心需求是控制基础沉降与提升竖向承载稳定性。从桩基础特性来看,钻孔灌注桩可通过加长桩身嵌入下部稳定地层,利用泥浆护壁解决软土成孔塌孔问题,承载稳定且沉降量小。而预应力混凝土管桩依赖桩侧摩阻力传递荷载,施工速度快、成本低,适用于软土厚度较

小的区域。挖孔灌注桩因软土区易涌水、开挖风险高,适用性较差;沉管灌注桩则易因软土挤压出现缩颈,承载稳定性不足。综合对比,软土地基优先选用预应力混凝土管桩(经济高效),软土较厚时选用钻孔灌注桩(承载可靠),避免选用挖孔灌注桩与沉管灌注桩。

4.2 岩溶地层

岩溶地层存在溶洞、溶沟等地质缺陷,应避免桩端

落于溶洞、确保桩身穿越溶洞时完整性。钻孔灌注桩可通过地质雷达探测溶洞位置，采用片石+水泥砂浆填充溶洞后成孔，嵌岩深度达标后承载稳定。挖孔灌注桩可人工清理溶洞内填充物，直接观察孔内地质情况，适配浅部溶洞处理。预应力混凝土管桩无法应对溶洞阻碍，易出现断桩或沉桩不到位。沉管灌注桩穿越溶洞时易偏位，施工失败率高。因此，岩溶地层以嵌岩型钻孔灌注桩为首选，浅部溶洞可选用挖孔灌注桩，禁止选用预应力混凝土管桩与沉管灌注桩。

4.3 高烈度地震区（地震烈度 ≥ 8 度）

高烈度地震区需重点提升桩基础水平抗剪能力与延性，抵御地震作用下的水平剪切力。钻孔灌注桩可通过优化钢筋笼配筋率（提升至1.2%以上）增强抗剪性能，桩身与地层结合紧密，地震响应小。由于挖孔灌注桩桩径大、配筋率高，整体刚度强，水平承载能力优异；预应力混凝土管桩因桩身接头多、脆性大，地震时易在接头处断裂；沉管灌注桩桩径小、惯性矩小，水平抗剪能力弱，难以承受强震荷载。对比来看，高烈度地震区优先选用钻孔灌注桩或挖孔灌注桩，通过结构优化提升抗震性能，避免选用预应力混凝土管桩与沉管灌注桩。

4.4 深厚砂层

深厚砂层以颗粒松散、渗透性强为特点，成孔易塌孔、沉桩易出现桩身偏移。钻孔灌注桩采用泥浆护壁可有效稳定砂层孔壁，确保成孔质量，桩端嵌入密实砂层后承载可靠；沉管灌注桩通过振动沉桩工艺使桩身与砂

层紧密结合，桩侧摩阻力充分发挥，施工效率高。而预应力混凝土管桩在深厚砂层中沉桩阻力大，易出现桩身断裂；挖孔灌注桩因砂层易涌砂，需大量降水且开挖风险高，适用性差。因此，深厚砂层优先选用钻孔灌注桩（成孔稳定）或沉管灌注桩（施工高效），根据砂层密实度调整施工工艺，不建议选用预应力混凝土管桩与挖孔灌注桩。

5 结论

复杂地质条件下特高压交流线路桩基础选用，需综合承载能力、变形控制等核心要求。钻孔灌注桩适配性广，在软土、岩溶等多地层表现佳，但需重视泥浆（钻渣）处理与清孔；预应力混凝土管桩经济高效，仅适用于软土较薄、上部为松散土层区域；挖孔灌注桩承载强，适配浅部溶洞与完整岩层，然施工风险高；沉管灌注桩成本低，却因承载与稳定性不足，适用范围窄。

参考文献

[1]秦国金,史建明.接触网供电线路钢柱及基础设计选型问题思考[J].电气化铁道,2025,36(02):59-61.
[2]王志华.加固施工技术在建筑地基基础中的应用[J].工程技术研究,2025,10(02):59-61.
[3]高云鹏.房屋建筑施工中地基基础工程的常见问题及优化策略[J].房地产世界,2024,(23):115-117.
[4]谢世林.建筑工程地基基础检测技术应用策略研究[J].现代工程科技,2024,3(19):89-92.