

# 复杂地质条件下桩基础施工技术 with 风险应对策略

陈 超

新疆北新国际工程建设有限责任公司南非事业部 新疆 乌鲁木齐 830002

**摘 要:** 桩基础是建筑工程中广泛采用的基础形式,在复杂地质条件下的施工面临诸多技术挑战和安全风险。本文系统分析了岩溶地区、软土地层、断层破碎带和深厚砂层等典型复杂地质条件下桩基础施工的主要技术难点,包括钻孔偏斜、孔壁坍塌、混凝土充盈系数异常和桩端承载力不足等问题。针对上述技术难题,本文总结了旋挖成孔、泥浆护壁、后注浆加固、钢护筒跟进等关键施工技术的适用条件和技术要点。同时,从施工前地质勘察、过程质量监控和风险预警体系构建等方面提出了系统性的风险应对策略。研究表明,科学的施工方案设计和严格的过程管控是确保复杂地质条件下桩基础施工质量安全的关键。桩基工程质量的优劣直接关系到建筑物的安全稳定和使用寿命。

**关键词:** 桩基础;复杂地质;施工技术;风险控制;旋挖成孔

## 引言

随着我国城市化进程的加速推进和基础设施建设的持续深入,建筑工程面临的地质条件日趋复杂。岩溶发育区、深厚软土层、断层破碎带等不良地质区域的基础施工,对桩基础的设计和施工提出了更高的技术要求。桩基础作为将上部结构荷载传递至深层稳定土层或基岩的核心基础形式,其施工质量直接关系到建筑物的整体安全和使用寿命。然而,在复杂地质条件下,桩基础施工过程中常出现钻孔偏斜、孔壁失稳、混凝土离析、桩身缺陷等一系列质量问题,严重时甚至导致桩基报废和工程返工,造成巨大的经济损失和工期延误。因此,深入研究复杂地质条件下桩基础施工的关键技术,建立系统化的风险识别与应对机制,对于保障建筑工程质量安全具有重要的理论价值和现实意义。施工过程中应做好详细的技术交底和安全教育工作。

## 1 复杂地质条件下桩基础施工的主要技术难点

### 1.1 岩溶地区桩基施工的特殊性

岩溶地区由于地下溶洞、溶蚀裂隙和暗河等地质构造的广泛发育,桩基施工面临钻孔过程中遇到溶洞导致钻具坠落、泥浆漏失和孔壁坍塌等突出风险。溶洞的空间分布具有高度不规则性,常规地质勘察手段难以全面揭示其规模和走向,给桩基选型和施工方案设计带来了极大的不确定性。当桩端需要穿过溶洞进入稳定基岩时,桩端持力层的可靠性评价尤为困难。此外,溶洞内充填物的力学性质差异较大,部分充填物在钻孔扰动后可能发生软化或塌陷,进一步增加了成孔和成桩的质量控制难度。针对岩溶地区的特殊施工条件,工程实践中发展出了多种有效的应对措施。常用的方法包括回填片石黏土法、钢护筒穿越法和注浆封堵法等<sup>[1]</sup>。回填片石黏土法

适用于规模较小的溶洞,通过反复回填和冲击钻进使片石和黏土形成稳定的护壁层。钢护筒穿越法则适用于多层溶洞或溶洞规模较大的情况,通过下放长钢护筒直接穿越溶洞段,为后续钻进和混凝土灌注提供可靠的隔离保护。注浆封堵法利用水泥浆或化学浆液填充溶洞空腔和裂隙,提高地层的整体稳定性和防渗能力。建立完善的质量追溯机制,确保每一道工序可查可溯。

### 1.2 软土地层中桩基施工的技术挑战

深厚软土层具有含水率高、压缩性大、承载力低和灵敏度高工程特性,在桩基施工过程中容易引发孔壁缩径、钻孔偏斜和孔底沉渣过厚等问题。软土的触变性使得成孔后孔壁稳定性迅速下降,护壁泥浆的密度和粘度需要精确控制。在静压管桩施工中,软土层容易产生挤土效应,导致已施工桩体发生上浮或偏位。此外,软土层中桩基的负摩阻力问题也不容忽视,大面积堆载或地下水位下降引起的软土固结沉降会对桩身产生向下的附加荷载,影响桩基的承载力和使用安全。针对软土地层的施工难题,工程实践中采取了多种技术措施加以应对。在钻孔灌注桩施工中,采用加长护筒穿透软土层可以有效防止孔口坍塌和缩径。对于灵敏度极高的软黏土,应严格控制钻进速度,减少对孔壁的扰动。在静压管桩施工中,合理安排沉桩顺序和沉桩速率,必要时设置防挤土沟和应力释放孔,降低挤土效应的不利影响。对于负摩阻力问题,可在桩身中性点以上范围涂覆减摩涂层,或在中性点位置设置隔离套管,有效降低负摩阻力对桩基承载力的削弱作用。

### 1.3 断层破碎带及深厚砂层的施工风险

断层破碎带岩体完整性差,裂隙发育密集,钻孔过程中钻头磨损严重且容易发生卡钻和掉钻事故。破碎带

中地下水的活动较为活跃,可能引发涌水涌砂等突发状况,危及施工安全。深厚砂层中桩基施工的主要风险在于砂层的松散性和高渗透性,钻孔过程中容易发生流砂现象,导致护壁失效和孔壁坍塌。在砂层中进行水下混凝土灌注时,混凝土与孔壁之间的摩擦力不足,充盈系数难以控制,桩身质量缺陷的发生概率显著增加。在断层破碎带施工中,常采用跟管钻进工艺和注浆预加固技术相结合的方式保障成孔安全。跟管钻进通过边钻进边下套管的方式,实现对破碎地层的有效支撑和隔离。注浆预加固则在钻孔前对破碎带进行注浆处理,提高地层的整体性和自稳能力<sup>[2]</sup>。在砂层施工中,可采用反循环清孔工艺有效清除孔底沉渣,保证成桩质量。对于超长桩和大直径桩,应充分考虑施工设备的作业能力和场地条件,合理选择成孔工艺和施工参数,确保施工安全和质量可控。实际工程中应结合具体地质条件和施工环境,灵活调整技术方案和施工参数,确保工程质量和安全。

## 2 关键施工技术与工艺要点

### 2.1 旋挖钻机成孔技术的应用

旋挖钻机具有成孔效率高、环保性能好和地层适应性强的优势,已成为复杂地质条件下桩基施工的首选设备。在岩溶地区,采用旋挖钻机配合钢护筒跟进工艺,可以有效防止溶洞段孔壁坍塌和泥浆漏失。在软土地层中,通过合理控制钻进速度和提钻节奏,配合高质量的泥浆护壁体系,能够显著提高成孔质量和施工效率。对于坚硬岩层和卵砾石层,可更换不同类型的钻头进行组合钻进,实现高效破岩和快速成孔。旋挖钻机配备的电子监控系统可以实时记录钻进参数,为判断地层变化和调整施工方案提供依据。近年来,旋挖钻机的技术性能不断提升,整机扭矩和钻进深度显著增大,在超高层建筑和大型桥梁工程的桩基施工中得到广泛应用。智能化旋挖钻机配备了自动定位、自动调垂和远程监控等功能,大幅提升了成孔精度和施工效率。在硬岩地层中,采用截齿筒钻配合牙轮钻头的组合钻进方式,可以有效提高破岩效率并降低钻头损耗。旋挖钻机的模块化设计也使得设备运输和转场更加便捷,适合城市密集区域和工期紧张的工程项目。

### 2.2 泥浆护壁与孔壁稳定控制

泥浆护壁是维持钻孔稳定性的核心技术手段。在复杂地质条件下,泥浆的性能参数需要根据地层特性进行动态调整。在砂层和破碎带中,应适当提高泥浆的密度和粘度,增强护壁效果。在岩溶地区,为防止泥浆漏失,可掺入锯末、草纤维等堵漏材料。膨润土泥浆和聚合物泥浆各有优缺点,在实际工程中常采用复合泥浆体系,

兼顾护壁性能和经济性。此外,泥浆的循环净化系统也至关重要,及时清除泥浆中的钻屑和砂粒,维持泥浆的稳定性,延长其使用寿命。泥浆的质量控制是桩基施工中容易被忽视但又极为关键的环节。施工现场应配备泥浆性能检测仪,定期检测泥浆的密度、粘度、含砂率和失水量等核心指标。在成孔过程中,应根据地层变化及时调整泥浆参数,确保孔壁始终处于稳定状态。对于深大直径桩基,泥浆的循环量和净化处理能力需要特别重视,建议配备大容量的泥浆池和高效的除砂除泥设备。在环保要求严格的地区,应采用封闭式泥浆循环系统,减少泥浆排放对周边环境的影响。施工单位应建立完善的施工质量管理体系,落实各项质量控制措施。

### 2.3 后注浆技术在桩基承载力提升中的应用

后注浆技术通过在桩端和桩侧预设注浆管路,成桩后对桩底沉渣和桩侧泥皮进行高压注浆加固,能够显著提升桩基的承载力和减少沉降。在复杂地质条件下,后注浆技术可以有效弥补由于地层条件不佳导致的桩端承载力不足问题。桩端后注浆通过浆液对桩底沉渣的置换和压密,以及浆液向周围土层的渗透和劈裂,在桩端形成加固区,大幅提高桩端阻力。桩侧后注浆则通过浆液对桩侧泥皮的置换和加固,增强桩侧摩擦阻力的发挥。注浆参数的设计需要综合考虑地层条件、桩径和承载力要求等因素<sup>[3]</sup>。工程实践表明,采用后注浆技术的桩基承载力可提升百分之三十至百分之八十,经济效益十分显著。注浆材料通常以水泥为主剂,根据地层条件可适当掺入粉煤灰、膨润土和外加剂。注浆压力和注浆量是控制注浆效果的关键参数,应根据桩端持力层的渗透性和桩径大小合理确定。注浆过程中应实时监测注浆压力和流量的变化,发现异常情况及时调整施工参数。注浆完成后,应通过静载荷试验对比注浆前后的承载力变化,验证注浆效果。

## 3 施工风险应对策略与质量控制措施

### 3.1 施工前的精细化地质勘察

充分翔实的地质资料是制定合理施工方案的前提。在复杂地质区域,应采用多种勘察手段相结合的方式,包括钻探取芯、标准贯入试验、静力触探和地球物理勘探等,全面查明场地地层结构、岩溶发育特征和地下水分布规律。对于岩溶地区,建议采用跨孔电磁波层析成像技术,精确探测溶洞的空间分布。勘察孔的间距应根据地质复杂程度合理确定,在地层变化剧烈的地段应适当加密,确保地质资料的代表性。勘察成果应及时反馈给设计和施工团队,作为桩基选型和施工方案优化的重要依据。在勘察成果的整理和表达方面,应编制详细的工

程地质剖面图和桩基施工建议书,明确标注各桩位处的不良地质分布和施工注意事项。对于地质条件特别复杂的桩位,建议进行一桩一勘的补充勘察,为单桩设计和施工提供精确的地质依据。勘察阶段还应密切关注地下水的类型、水位变化规律和腐蚀性评价,为泥浆配制方案的确定和桩身材料的选用提供参考。充分的地质准备工作能够有效降低施工阶段的不可预见风险,避免因地质条件不明导致的工程变更和返工损失。

### 3.2 施工过程的实时监测与质量控制

在桩基施工过程中,应建立全面的质量监控体系。成孔阶段重点监测钻孔垂直度、孔径变化和孔底沉渣厚度等关键指标。采用超声波孔径仪和孔斜仪进行成孔质量检测,及时发现并纠正钻孔偏斜问题。混凝土灌注阶段重点控制导管埋深、混凝土上升速度和灌注连续性。采用低应变反射波法和高应变法对成桩质量进行检测,识别桩身缺陷的类型和位置。对于重要工程,应进行静载荷试验验证桩基承载力是否满足设计要求<sup>[4]</sup>。随着信息技术的发展,桩基施工的质量监控手段日益丰富和智能化。超声波成孔质量检测仪可以精确测量孔径、孔斜和孔底沉渣等指标,为施工人员提供及时的质量反馈。钢筋笼安装采用定位导向装置,确保钢筋笼居中放置,保护层厚度均匀一致。水下混凝土灌注采用溜槽和储料斗配合的方式,保证首批混凝土能够形成有效的隔水栓,避免导管进水和混凝土离析。灌注全过程应连续进行,严禁中途停顿。

### 3.3 风险预警与应急响应机制构建

施工企业应建立桩基施工风险分级管控制度,根据地质复杂程度和施工难度确定风险等级。对高风险施工环节实行旁站监理和重点巡查制度。建立施工现场实时数据采集和传输系统,将钻进参数、泥浆性能和混凝土灌注数据实时上传至监控平台,实现远程监控和智能预

警。针对可能发生的突发事件,如涌水涌砂、钻孔坍塌和设备故障等,制定详细的应急预案并组织定期演练,确保在紧急情况下能够快速响应、科学处置。在信息化建设方面,推广使用桩基施工信息化管理平台,将地质勘察数据、施工方案、质量检测报告和监测数据统一整合,实现信息的共享和可追溯。利用大数据分析技术,对不同地质条件下的桩基施工数据进行统计分析,总结质量控制的关键影响因素和最佳施工参数组合,为后续类似工程提供经验借鉴和技术参考。定期组织施工技术交流和案例分享活动,提升项目团队的整体技术水平。

## 4 结语

复杂地质条件下的桩基础施工是一项技术密集型和风险较高的工程活动,需要在充分掌握场地地质条件的基础上,科学选择施工工艺,科学合理地配置施工资源,严格落实施工过程的质量控制和安全管控措施。旋挖成孔、泥浆护壁和后注浆等关键技术的合理运用,能够有效克服复杂地质条件带来的施工障碍。精细化地质勘察、全过程全过程质量监控和全面系统化风险预警机制的建立,则为桩基施工质量安全提供了坚实的技术保障和管理支撑。未来,随着智能化施工装备和BIM技术的推广应用,复杂地质条件下桩基础施工的技术水平和管理效能将得到进一步提升,并切实为工程建设保驾护航。

## 参考文献

- [1]张忠苗.桩基工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2]刘金砺,高文生.建筑桩基工程技术进展与工程应用[J].建筑结构,2021,51(14):1-10.
- [3]王卫东,李永辉.软土地区桩基础工程实践与技术创新[J].岩土工程学报,2023,45(6):1089-1102.
- [4]李国强,王卫华.复杂地质条件下超长灌注桩施工质量控制研究[J].建筑结构,2022,52(10):88-95.