

# 复杂地质条件下灌注桩成孔稳定性控制技术研究

黄海金

东华理工大学土木与建筑工程学院 江西 南昌 330013

**摘要:**在复杂地质条件下,灌注桩成孔稳定性受软土、砂卵石、岩溶、破碎岩及复合地层特性影响,面临缩径、塌孔等挑战。本文围绕成孔稳定性控制技术展开研究,构建了涵盖泥浆护壁、钻进工艺优化、护筒应用、孔壁加固及动态监测的技术体系,并提出了泥浆性能动态调控、钻进过程差异化控制等实施要点。还探索了智能化施工系统集成、新材料应用及绿色施工技术等创新方向,为复杂地质条件下灌注桩成孔施工提供技术支持。

**关键词:**复杂地质条件;灌注桩成孔;稳定性控制;技术体系;创新方向

**引言:**复杂地质条件广泛分布于各类工程建设区域,其独特的地层特性对灌注桩成孔稳定性构成严峻挑战。软土地层易发生塑性变形、砂卵石地层渗透性强、岩溶地层溶洞发育、破碎岩层完整性差、复合地层性质多变,均易导致成孔过程中出现缩径、塌孔、偏斜等问题,影响施工安全与工程质量。现有成孔技术难以完全适配复杂地质条件需求,亟需构建系统化的稳定性控制技术体系,通过多技术协同作用提升成孔质量,为工程建设提供可靠基础保障。

## 1 复杂地质条件分类与特性分析

### 1.1 软土地层

软土地层多分布于沿海、沿江及三角洲区域,主要由粘土粒与粉粒构成,呈现出承载力偏低、易发生塑性变形的工程特性,且土层内部渗透性存在明显差异,部分区

域渗透系数极低<sup>[1]</sup>。这类地层对外部扰动高度敏感,成孔过程中原始地应力平衡被打破,孔壁土体受径向卸荷影响易向临空面流动,加之渗透性不均导致泥浆难以形成致密泥皮,护壁效果弱化,进而引发孔壁失稳,常见缩径、塌孔等问题,直接影响成孔质量与施工安全。

### 1.2 砂卵石地层

砂卵石地层属于松散堆积地层,如图1所示。颗粒间缺乏有效黏结作用,孔隙率处于较高水平,土体渗透性强,成孔过程中极易出现泥浆渗漏现象。钻孔作业中,既要兼顾钻进进度,又需采取措施维持孔壁稳定,两者之间存在难以协调的矛盾。松散颗粒结构导致钻进过程中阻力较大,钻进效率受限,而若为加快进度提高钻进速度,又会加剧孔壁扰动,增加孔壁坍塌风险,使得钻进效率与孔壁稳定性难以兼顾。



图1 砂卵石地层

### 1.3 岩溶地层

岩溶地层受地下水长期溶蚀作用,溶洞、溶沟等地层构造广泛发育,地下水体连通性强,成孔过程中易因溶洞揭露引发突水、塌孔等安全隐患。此类地层中,隐伏溶洞分布隐蔽且形态不规则,单一勘察手段难以精准查明其分布范围、规模及填充情况,给前期探测工作带来较大困难,后续处理过程中也因地质条件不确定性,难以

制定针对性处理方案,进一步增加成孔施工难度。

### 1.4 破碎岩层

破碎岩层多受构造运动影响,节理裂隙发育密集,岩体完整性遭到严重破坏,岩块间联结作用薄弱,部分区域岩块呈松散堆积状态。成孔过程中,裂隙切割导致孔壁岩体失去有效支撑,易发生掉块现象,影响成孔连续性。同时,岩体完整性不足使得钻进过程中钻头易受

不均匀阻力影响,难以保持固定钻进方向,易出现钻进偏斜问题,增加孔位偏差控制难度。

### 1.5 复合地层

复合地层由多种不同类型地层交互叠加形成,各层岩土体工程特性差异显著,多层地质交互作用使得不同深度孔壁所受支护压力需求存在明显不同,上部地层与下部地层对支护强度的要求差异较大。成孔施工中,若采用统一密度泥浆进行护壁,难以适配各层地层的支护需求,上部地层易因泥浆压力过高产生超压现象,可能导致地层开裂、浆液漏失,下部地层则会因泥浆压力不足出现欠压问题,无法有效平衡孔壁水土压力,进而引发孔壁失稳。

## 2 成孔稳定性控制技术体系

### 2.1 泥浆护壁技术

泥浆护壁是灌注桩成孔稳定性控制的核心技术之一,核心在于通过科学调控泥浆性能保障护壁效果。需重点控制泥浆比重、黏度、含砂率及胶体率四项关键指标,根据不同地质地层特性精准调整参数,确保泥浆具备足够悬浮钻渣、平衡孔壁水土压力的能力<sup>[2]</sup>。针对复合地层地质差异显著的特点,采用分层压力梯度设计思路,依据各层岩土体渗透性、强度差异,合理设定不同深度泥浆压力,避免单一压力参数导致的支护失衡问题。同时加强泥浆循环与净化管理,通过连续循环确保泥浆流动性,及时清除循环过程中混入的钻渣,防止钻渣堆积造成泥浆性能劣化,进而弱化护壁效果。

### 2.2 钻进工艺优化

钻进工艺优化需立足地质条件适配性,合理选择钻具类型并实现参数精准匹配,常用回旋钻机、冲击钻机、牙轮钻机等,根据软土、破碎岩等不同地层特性选择适配机型,搭配相应钻压、转速参数。严格控制钻进速度与冲击频率,针对软土地层扰动敏感性强的特点,适当放缓钻进速度、降低冲击频率,减少对孔壁土体的扰动,避免孔壁失稳。配备专用导向装置与测斜技术,在钻进过程中实时把控孔位垂直度,及时发现孔斜趋势并采取调整措施,防止孔斜超标影响成孔质量与后续施工。在软土地层中,钻进速度宜控制在0.5-1m/h,冲击频率控制在10-15次/min;在破碎岩层中,钻进速度可适当提高至1-2m/h,但需根据岩石破碎程度灵活调整。

### 2.3 护筒应用技术

护筒应用需注重材料选择与规格设计的合理性,优先选用强度达标、抗变形能力强的钢护筒,根据地层埋深、地下水情况确定护筒埋深,一般护筒埋深应不小于1.5m,同时强化护筒连接部位的密封性,防止泥浆渗漏与孔口坍塌。施工过程中采用经纬仪、铅垂线等检测手

段,定期检测护筒垂直度,发现偏差及时采取纠偏方法调整,确保护筒垂直设置。针对护筒与孔壁间的空隙,采用粘土分层回填夯实的方式处理,增强护筒与孔壁的联结稳定性,避免施工过程中护筒移位、变形,保障孔口及上部孔壁稳定。

### 2.4 孔壁加固技术

孔壁加固技术需结合地层失稳风险针对性选用,针对漏浆地层采用预注浆固化技术,通过预先注入浆液填充地层孔隙,增强地层整体性与抗渗性,减少泥浆渗漏。对于易塌方地层,采用超前小导管注浆技术,通过小导管向地层注入浆液形成超前支护结构,为孔壁提供有效支撑,抑制塌方现象发生。针对软弱土层,采用膏浆加固技术进行预处理,通过膏浆填充土体孔隙、胶结土体颗粒,提升软弱土层承载力与整体性,为后续成孔施工奠定稳定基础。在漏浆地层中,预注浆的浆液扩散半径一般控制在1-2m;在易塌方地层中,超前小导管的长度宜为2-3m,间距控制在0.3-0.5m。

### 2.5 动态监测与调整技术

动态监测与调整技术是保障成孔稳定性的关键支撑,通过多点压力实时监测手段,精准掌握泥浆压力分布情况,根据监测数据优化泥浆压力参数,确保泥浆压力与孔壁水土压力平衡<sup>[3]</sup>。采用地质雷达与孔斜自动化检测技术,实时捕捉地层变化信息,及时发出地层失稳、孔斜超标等预警信号,为施工调整提供依据。基于各类监测数据,对钻进参数进行协同调整,实现钻进速度、泥浆性能、支护措施等参数的动态适配,全程保障成孔稳定性。

## 3 关键技术实施要点

### 3.1 泥浆性能动态调控

泥浆性能动态调控需紧密结合施工过程中地层变化情况,实时调整泥浆比重与黏度参数,确保泥浆护壁效果与地层条件精准适配。钻进过程中,地层岩土体特性会随深度变化呈现差异,需通过现场检测及时掌握地层参数变化,针对性调整泥浆比重与黏度,使泥浆既能有效悬浮钻渣,又能平衡孔壁水土压力,避免因参数失衡引发孔壁失稳。添加剂选择需遵循适配性原则,常用膨润土、纯碱、聚丙烯酰胺等,其中膨润土用于提升泥浆黏度与胶体率,纯碱用于调节泥浆酸碱度以优化护壁性能,聚丙烯酰胺则可增强泥浆絮凝效果,减少钻渣混入,进一步提升泥浆稳定性。

### 3.2 钻进过程控制

钻进过程控制需立足不同地层特性,采用差异化施工方式,保障成孔稳定性。软土地层扰动敏感性高,施工中需采用慢转速、低钻压、大泵量的施工方式,慢转

速与低钻压可减少孔壁土体的扰动，大泵量则能加快泥浆循环，及时带走钻渣，避免钻渣堆积影响孔壁稳定。砂卵石地层颗粒松散、易漏浆，施工中需勤提钻具检查钻头磨损情况，控制单次进尺量，同时投放黏土球填充孔隙，增强地层整体性，减少泥浆渗漏与孔壁坍塌风险。岩溶地层地质条件复杂，需重点落实溶洞填充与钢护筒跟进工艺，先对揭露的溶洞进行填充处理，再同步推进钢护筒跟进，为孔壁提供持续支撑，规避突水、塌孔隐患。

### 3.3 护筒安装与维护

护筒安装与维护是保障孔口稳定的关键，需严格控制护筒埋设深度与垂直度控制标准。护筒埋设深度需结合地层埋深、地下水水位及孔口土体稳定性确定，确保埋设深度满足支护要求，有效阻挡孔口土体坍塌。垂直度控制需贯穿安装全过程，通过专业检测手段把控安装精度，避免护筒倾斜导致后续成孔偏斜。护筒维护需重点做好顶部防水措施，通过设置防水围挡、密封处理等方式，防止地表水流入孔内，避免孔内水位骤升骤降引发泥浆性能劣化，同时减少地表水对孔口土体的冲刷，保障护筒安装稳定性。

### 3.4 孔壁变形监测

孔壁变形监测需科学设置监测频率与参数，全面捕捉孔壁变化情况，为成孔稳定性提供数据支撑。监测参数主要包括孔壁变形量与地下水水位，监测频率需结合施工进度与地层特性合理设定，钻进过程中可适当提高监测频率，确保及时发现孔壁变形异常。同时建立完善的预警机制与应急处理流程，根据监测数据设定预警阈值，当监测指标达到预警值时，立即启动应急处理流程，采取放缓钻进速度、调整泥浆参数、加强支护等措施，及时遏制孔壁变形加剧，防范孔壁坍塌等安全隐患，保障施工顺利推进。

## 4 技术集成与创新方向

### 4.1 智能化施工系统集成

智能化施工系统集成是复杂地质条件下灌注桩成孔施工的核心发展方向，核心在于打造集多功能于一体的智能钻机体系。智能钻机需深度融合地质识别、参数调整与监测三大核心功能，搭载高精度地质探测组件，实时捕捉地层岩土体特性的细微变化，依靠内置算法完成地层信息的精准识别与分析，无需人工介入即可实现参数的自适应调整。在此基础上，系统可自动匹配最优钻进参数，动态优化泥浆性能、钻进速度等关键指标，有效提升施工效率与成孔稳定性。依托大数据技术搭建的成孔稳定性预测模型，整合历史施工数据、地层基础参数、实时监测数据等多源信息，通过数据挖掘与算法分

析实现孔壁失稳风险的提前预判，为施工调整提供科学支撑，推动成孔施工向智能化、精准化升级。

### 4.2 新材料应用

新材料应用是提升成孔稳定性、优化施工效能的关键创新路径，重点围绕护壁材料与注浆剂的升级迭代展开。自修复混凝土护壁材料凭借独特微观结构，在孔壁出现微小裂缝时可自主启动修复进程，通过材料内部活性组分的化学反应填充裂缝，恢复护壁结构的完整性与承载效能，有效规避因护壁破损引发的孔壁失稳隐患。纤维增强地质聚合物注浆剂兼具高强度与优良胶结性能，通过添加纤维增强组分优化自身抗裂性与韧性，注入地层后可快速胶结岩土体颗粒，强化地层整体性与抗渗能力，适配各类复杂地层的孔壁加固需求。相较于传统注浆材料，该类注浆剂的耐久性、与地层适配性更具优势，能够显著提升孔壁加固的长效性与可靠性。

### 4.3 绿色施工技术

绿色施工技术的研发与应用顺应工程建设可持续发展理念，重点围绕泥浆资源化利用与环保型钻进设备研发推进。泥浆循环利用与废浆处理技术通过专用净化设备，对施工废浆进行分级过滤、固液分离处理，去除废浆中的钻渣与有害杂质，使处理后泥浆达到循环使用标准，既降低泥浆耗材用量，又避免废浆随意排放对周边土壤、水体造成污染。低噪音、低振动钻进设备研发聚焦施工全过程环保管控，通过优化钻机结构设计、采用新型降噪减振工艺，有效降低钻进过程中产生的噪音与振动，减少对周边土体及周边环境的干扰，同时规避振动对孔壁土体的扰动，实现绿色施工与工程质量的协同提升，契合现代工程建设的环保要求。

## 结束语

复杂地质条件下灌注桩成孔稳定性控制需综合运用泥浆护壁、工艺优化、护筒加固及动态监测等技术手段，通过参数精准调控与施工过程精细化管理，可有效应对各类地层失稳风险。智能化施工系统集成、新材料研发及绿色施工技术的创新应用，将进一步推动成孔技术向高效、环保、智能化方向发展，为复杂地质工程提供更完善的技术解决方案。

## 参考文献

- [1]王震,杨阳,肖港,等.复杂地质条件下灌注桩成孔稳定性控制技术[J].四川建材,2026,52(2):145-148.
- [2]梁洋.钻孔灌注桩在复杂地质条件下的桥梁桩基施工应用分析[J].中国水泥,2025(6):113-115.
- [3]王志宏.复杂地质条件下钻孔灌注桩永久性钢护筒施工关键技术探究[J].建材发展导向,2025,23(10):34-36.