

复杂地质条件下灌注桩成孔质量常见问题处理研究

全 宏

重庆市綦江区园区建设管理所, 重庆 401420

[摘要] 灌注桩凭借承载力高、适应性强的优势广泛应用于建筑与桥梁基础工程, 在岩溶、软土、砂卵石等复杂地质环境施工时, 成孔阶段易出现塌孔、缩径、孔斜、沉渣超标、漏浆等病害, 直接影响桩基承载力与结构安全。本文梳理复杂地质条件下灌注桩成孔主要质量缺陷, 提出针对性预防与分级处置措施, 构建全过程质量管控要点, 可为复杂场地桩基施工质量管控提供实践参考。

[关键词] 复杂地质; 灌注桩; 成孔质量; 问题处理

DOI: 10.64635/ja.2026.1535

中图分类号: TU753.3

文献标识码: A

Research on Treatment of Common Problems in Borehole Formation Quality of Cast-in-Place Piles under Complex Geological Conditions

Quan Hong

Park Construction Management Office of Qijiang District, Chongqing, Chongqing 401420, China

Abstract: Cast-in-place piles are widely used in building and bridge foundation engineering due to their advantages of high bearing capacity and strong adaptability. During construction in complex geological environments such as karst, soft soil, and sand-gravel strata, quality defects such as borehole collapse, diameter reduction, borehole deviation, excessive sediment thickness, and slurry leakage are prone to occur during the borehole formation stage, directly affecting pile foundation bearing capacity and structural safety. This paper reviews the main quality defects in borehole formation of cast-in-place piles under complex geological conditions, proposes targeted prevention and graded treatment measures, and constructs key points for whole-process quality control. The study can provide practical reference for quality control of pile foundation construction in complex sites.

Keywords: complex geology; cast-in-place pile; borehole formation quality; problem treatment

引言

灌注桩属于隐蔽地下工程, 成孔质量是桩基施工的核心环节。在岩溶、软土、破碎岩层、砂卵石等复杂地质区域, 地层分布不均、地下水活跃、存在孤石溶洞, 成孔施工风险显著提升, 塌孔、孔斜、沉渣过厚等质量问题频发, 若处置不当会造成桩身缺陷、承载力不足, 引发后期沉降隐患。现有施工中部分项目对复杂地层预判不足, 工艺参数照搬常规地质, 缺陷出现后处置方式粗放, 易造成返工、工期延误与成本增加。基于此, 本文针对复杂地质条件下灌注桩成孔常见质量问题开展研究, 分析成因并给出可行的预防与处理方案, 提升桩基成孔施工的可靠性。

1 复杂地质条件下灌注桩成孔主要质量问题及成因分析

1.1 孔壁坍塌(塌孔)

塌孔是复杂地质桩基施工中最频发、危害最大的成孔病害, 多集中发生在松散饱和砂层、流塑状淤泥层、岩溶破碎裂隙地层以及砂卵石夹层地带, 可分为局部小范围塌孔、孔壁大面积坍塌、孔口塌陷三类形

态, 严重时会引发埋钻、断桩、地面沉降等重大施工事故。塌孔直观表现为孔内泥浆液面快速异常下降、孔口持续冒泡、钻机钻进阻力突然减小, 严重工况下孔口周边土体开裂塌陷。

成因方面可分为地质内因与施工外因两类。地质内因: 复杂软土地层土体孔隙大、含水率极高、结构性差, 无天然自稳能力; 砂卵石地层颗粒粘结力极低, 地下水渗流作用下颗粒极易流失; 岩溶地层裂隙发育, 地层整体性被破坏, 孔壁土体破碎松散。施工外因: 现场泥浆配比不匹配复杂地层工况, 泥浆比重、黏度、胶体率不达标, 无法在孔壁形成致密防水泥皮, 难以抵抗侧向土压力与水压力; 护筒埋设深度不足、底部封堵不严, 地下水沿护筒外围渗入孔内, 冲刷扰动孔壁土体; 施工人员盲目追求施工进度, 钻进速度过快、提钻落钻操作粗暴, 剧烈扰动原本脆弱的孔壁结构; 成孔完成后静置等待钢筋笼安装、混凝土浇筑的时间过长, 孔壁长期暴露在空气与地下水中, 应力释放后出现失稳坍塌; 钢筋笼吊装下放过程垂直度偏差大、晃动幅度明显,

直接碰撞刮擦孔壁，诱发局部坍塌病害。

1.2 缩径（缩孔）

缩径指桩孔成型后局部或整体孔径小于设计规范尺寸，是高塑性黏土、膨胀土、淤泥质软土地层的典型质量问题。缩径缺陷会直接导致钢筋笼下放受阻、桩身有效截面不足，造成桩基竖向承载力、抗拔承载力不满足设计要求，同时会增加后续清孔、浇筑施工难度，极易引发断桩、夹渣等次生质量问题。

其核心成因具有极强的地质特殊性，复杂软塑、流塑地层黏土矿物含量高，遇水极易吸水膨胀、软化流变，成孔后孔壁土体失去原有侧向约束，在自身膨胀应力和地下水压力作用下向孔内挤压收缩。同时，施工工艺管控不当会加剧缩径问题：泥浆护壁性能薄弱，无法有效平衡土体侧向膨胀压力；钻进参数不合理，高压快速钻进会挤压孔壁软土，造成土体塑性变形残留；地下水持续渗流软化孔壁土体，进一步降低土体刚度与稳定性。此外，长期施工磨损导致钻头直径减小，未及时检修更换，也会造成成孔孔径偏小，形成假性缩径，极易与地质性缩径混淆，影响质量判定与处置^[1]。

1.3 桩孔偏斜（孔斜）

孔斜即桩孔垂直度偏差超出规范允许限值，在软硬交替岩层、倾斜岩面、孤石发育地层、岩溶起伏地层中最为常见。规范要求灌注桩成孔垂直度偏差一般不大于 1%，孔斜超标会造成桩身弯曲、钢筋笼偏心就位，桩基受力状态紊乱，大幅降低结构承载稳定性，严重时会导致桩基报废、重新成孔，造成极大的经济与工期损失。

地质层面，复杂地层岩面起伏不平、存在倾斜岩层与大小不一孤石，钻头接触地层时受力不对称，单侧阻力过大极易发生侧向偏移；软硬交替地层承载力差异悬殊，钻头容易向软土层一侧滑移倾斜。施工层面，钻机进场就位后场地未压实整平、支座垫实不牢固，施工震动引发机身不均匀沉降，导致钻杆初始垂直度偏差；老旧施工设备钻杆弯曲、刚度不足、接头磨损松动，钻进过程摆动幅度大，无法保证直线钻进；施工人员未根据复杂地层动态调整钻进参数，遇硬岩、孤石仍采用高压快钻模式，加剧孔斜偏移；同时施工现场缺乏全过程垂直度监测，仅依靠终孔一次性检测，无法及时发现、纠正轻微偏斜，最终导致偏差持续累积超标。

1.4 孔底沉渣厚度超标

孔底沉渣是终孔后残留的岩屑、土渣、卵石碎屑

等杂物，沉渣厚度超标是制约桩基端承力的关键问题，在破碎岩层、砂卵石地层、裂隙发育岩溶地层中清孔难度极大。过厚的孔底沉渣会形成软弱垫层，大幅降低桩端地基承载力，导致桩基后期不均匀沉降、结构开裂，是桩基工程验收的重点管控指标^[2]。

复杂地质工况下沉渣超标诱因复杂且具有叠加性：破碎岩层、风化岩层钻进会产生大量细小粉状岩屑，常规泥浆携渣能力有限，细小颗粒悬浮难度大，极易快速沉淀；砂卵石地层颗粒密度大、自重高，泥浆循环无法完全带出大粒径钻渣；施工清孔工艺选择不合理、清孔时长不足、泥浆循环流量过低，无法彻底置换孔底浑浊泥浆与沉渣；二次清孔完成后，受现场工序衔接、材料进场、设备调试影响，静置等待混凝土浇筑时间过长，悬浮岩屑二次沉降堆积；地下水流动、裂隙渗水会扰动孔底，带动周边松散土体、碎屑汇入孔底，造成沉渣二次增厚。同时，部分施工班组为压缩工期，简化清孔流程、省略沉渣复测工序，也是沉渣超标的人为主要原因。

1.5 溶洞地层漏浆、卡钻

岩溶地质是灌注桩施工难度最大的复杂工况，地层溶洞、溶槽、裂隙纵横连通，地下水水系发达，成孔施工极易发生漏浆、卡钻、埋钻等突发事件，且病害发展速度快、处置难度大、连锁风险高。施工中泥浆快速流失、孔内水头骤降，会瞬间丧失护壁能力，短时间内诱发大面积塌孔、地表塌陷。

地质成因主要为溶洞空腔、贯通裂隙无充填或半充填，形成泥浆渗漏通道，泥浆在水压差作用下快速外泄流失；溶洞内部充填淤泥、松散碎石，钻进扰动后充填物失稳垮塌，堵塞孔道引发卡钻。施工原因为：前期地质勘察深度不足，未探明隐蔽小型溶洞、竖向裂隙，施工无针对性防控方案；穿越溶洞地层时钻进速度过快，未提前调整泥浆与施工参数；遇到突发漏浆险情时应急处置不及时、措施不到位，错失地层稳定窗口期；钻具选型与岩溶地层不匹配，钻头尺寸不合理、钻杆稳定性差，极易卡在溶洞变径位置与裂隙凹槽内，形成卡钻故障。

2 复杂地质条件下成孔质量问题预防措施

预防优先、源头管控是复杂地质桩基施工的核心原则，相较于缺陷事后处置，前期预判、过程管控能够极大降低病害发生率，节约施工成本、缩短工期。结合复杂地质各类病害诱因，从前期勘察、设备筹备、过程施工、工序管控全流程制定精细化预防体系，全方位规避成孔质量风险。

2.1 施工前期地质研判与方案优化

正式开工前,技术人员需全面研读工程地质勘察报告、水文地质资料,精准划分施工场地地层分区,重点标记软土分布区、砂卵石富集区、岩溶溶洞发育区、斜岩孤石集中区,明确各区域地层厚度、土体参数、地下水位、裂隙连通情况、溶洞充填状态^[3]。针对勘察报告中地质不明、数据空白的高危区域,必须开展超前补充钻探,加密勘探点位,精准探明地下隐蔽不良地质体,杜绝盲目施工。

基于地质研判结果,编制针对性专项施工方案与应急处置预案,摒弃常规地层标准化施工工艺,对不同复杂地层差异化制定钻进速度、泥浆参数、清孔方式、护筒埋设标准。同时开展全员专项技术交底,将复杂地质施工重难点、风险点位、操作规范、禁止行为落实到班组与个人,让施工人员充分掌握不良地层施工特性,从人为层面规避操作失误引发的质量缺陷。

2.2 护筒与泥浆系统质量管控

护筒是保障孔口稳定、维持孔内水头压力、防止地表水倒灌的核心设施,复杂地质必须提升护筒施工标准。软土、砂卵石、岩溶松散地层需加大护筒埋设深度,穿透松散不稳定土层,嵌入密实稳定岩层或硬土层不少于 50cm;护筒选用厚度、刚度达标钢制护筒,避免施工变形;护筒外围选用优质黏土分层回填、分层夯实,封堵所有渗漏通道,杜绝地下水与泥浆渗漏。施工全程保证护筒高出地面 30cm 以上,维持孔内泥浆液面高于地下水位 1.5~2.0m,利用静水压力牢牢稳固孔壁^[4]。

泥浆是成孔护壁、携渣、防渗的核心材料,必须因地配浆、动态调浆,杜绝统一配比施工。黏性土地层土体稳定性较好,泥浆比重控制在 1.1~1.2,黏度 18~22s 即可满足施工需求;砂卵石、岩溶破碎、富水地层孔壁稳定性极差,需提升泥浆性能,比重调整至 1.2~1.4,黏度 22~28s,适当添加膨润土、纯碱改善泥浆胶体率与稳定性,形成致密厚实泥皮。施工现场设置专用泥浆池、沉淀池,定时检测泥浆比重、黏度、含砂率、胶体率,及时置换老化、失效泥浆,保证全程泥浆性能稳定,适配复杂地层施工需求。

2.3 钻进工艺精细化控制

钻机进场后必须平整压实施工场地,采用水平仪校准钻机机身,保证钻机底座水平、钻架垂直,垫实加固支座,杜绝施工震动沉降引发孔斜。施工前全面检修设备,更换磨损弯曲钻杆、老旧钻头,保证钻具

刚度与精度达标。

严格执行分层差异化钻进工艺:软土、淤泥等软弱地层采用低速、轻压、慢进的施工方式,减小钻头对孔壁土体的扰动,防止土体流变坍塌与缩径;砂卵石地层匀速中速钻进,保证泥浆持续循环,及时带出卵石碎屑,避免钻渣堆积;斜岩、孤石、硬岩地层采用低冲程、慢转速冲击钻进,平衡钻头受力,杜绝侧向滑移偏斜;穿越溶洞裂隙地层时放缓钻进速度,全程监测泥浆液面变化,一旦出现液面波动立即停钻排查。

建立全过程垂直度动态监测制度,每钻进 2m 深度进行一次垂直度检测,发现微小偏差立即纠孔纠偏,杜绝偏差累积。同时严格控制成孔静置时间,成孔完成后快速衔接钢筋笼下放与混凝土浇筑工序,最大程度缩短孔壁暴露时间,降低失稳风险^[5]。

2.4 清孔工序质量控制

根据地层特性差异化选用清孔工艺,软土、一般土层优先采用正循环清孔,操作简便、护壁效果好;破碎岩层、砂卵石、沉渣量大的复杂地层选用反循环清孔工艺,利用高压负压快速带出大粒径、高密度钻渣,清孔效率与质量更高。

严格把控清孔时长与泥浆置换标准,一次清孔在终孔后立即开展,彻底清除悬浮粗渣;钢筋笼、导管安装完成后必须进行二次清孔,置换孔内浑浊泥浆,直至孔底沉渣厚度、泥浆指标满足规范要求。清孔完成后及时复测沉渣厚度,端承桩沉渣厚度不得大于 50mm,摩擦桩不得大于 100mm。同时严控工序间隔时间,二次清孔结束后 30 分钟内启动混凝土灌注,杜绝悬浮钻渣二次沉淀,从工艺层面杜绝沉渣超标问题。

3 成孔全过程质量管控保障措施

3.1 强化现场技术交底与人员管控

复杂地质桩基施工专业性、风险性极高,施工人员操作水平直接决定成孔质量。项目需针对软土、砂卵石、岩溶等不同复杂地质,开展分层级、常态化专项技术交底,详细讲解各类地层施工工艺、风险隐患、操作禁忌、缺陷处置流程。落实岗位责任制,明确技术员、施工员、班组长、操作人员的岗位职责,关键工序实行专人旁站监督,对泥浆调配、钻进参数、清孔质量、成孔检测全程记录存档,杜绝违规操作、粗放施工。定期开展技能培训与实操演练,提升作业人员应对突发质量病害的处置能力,夯实现场施工管理

基础。

3.2 完善成孔检测体系

建立“过程检测+终孔验收”双重检测机制，实现成孔质量全方位管控。钻进过程中常态化检测泥浆指标、孔深、垂直度，动态调整施工参数；成孔完成后，采用专业成孔检测仪对孔径、孔深、垂直度、孔底沉渣厚度四项核心指标进行全面检测验收，所有指标必须满足《建筑桩基技术规范》（JGJ94-2008）要求。检测数据真实留存，不合格桩孔严禁进入钢筋笼下放、混凝土浇筑工序，必须整改复验合格后方可推进后续施工，从验收端口杜绝质量隐患遗留。

3.3 建立缺陷应急处置机制

项目部结合场地地质特点，编制专项成孔质量应急处置方案，明确塌孔、漏浆、卡钻、沉渣超标等突发问题的处置流程、责任人员、物资设备。施工现场常备黏土、片石、水泥、膨润土、备用钻具、应急泥浆设备等物资，保障突发险情可快速处置。建立现场实时巡查制度，施工人员全程监测孔内泥浆状态、钻机运行工况、孔口地表变化，做到早发现、早停钻、早处置，将微小质量隐患扼杀在萌芽状态，避免小缺陷演变为重大质量安全事故。

4 结论

在岩溶、软土、砂卵石等复杂地质条件下，灌注桩成孔施工受地层稳定性差、地下水活跃、岩层构造复杂等因素制约，塌孔、缩径、孔斜、沉渣超标、溶洞漏浆等质量问题高发频发，且各类病害相互关

联、极易连锁发生，严重影响桩基工程整体施工质量。各类成孔质量缺陷的产生，是复杂地质先天缺陷与施工工艺管控不当、预判不足、处置不规范共同作用的结果。

为有效控制成孔质量病害，施工全过程必须坚持“预防为主、防治结合、分级处置、全程管控”的原则。施工前期精准研判复杂地质条件，优化专项施工方案；施工过程差异化调控泥浆性能、钻进工艺、清孔工序，落实精细化管控；出现质量缺陷后根据病害等级科学处置，杜绝盲目返工与隐患遗留，同时依托完善的人员、检测、应急保障机制，全面提升复杂地质灌注桩成孔施工的稳定性和规范性。

【参考文献】

[1] 李向鹏. 复杂地质条件下钻孔灌注桩成孔质量控制技术研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39(08): 142-147.

[2] 郑献强. 复杂地层条件下钻孔灌注桩成孔施工关键技术应用研究 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2024, 51(02): 78-83.

[3] 黄哲, 裴俊勇. 岩溶地区钻孔灌注桩成孔病害与分级处置技术 [J]. 福建建筑, 2024(05): 86-90.

[4] 吴建国. 复杂土层旋挖灌注桩成孔质量管控实践研究 [J]. 工程管理学报, 2025, 39(01): 110-115.

[5] 王磊. 富水砂卵石地层灌注桩成孔缺陷防治及施工优化 [J]. 施工技术, 2024, 53(16): 92-96.

作者简介: 全宏 (1988.12—), 男, 汉族, 重庆綦江, 本科, 中级职称, 土木工程。