

Research on Collapse Risk Prevention and Pile Formation Efficiency Optimization in Pile Foundation Construction on Soft Soil Layers

Guojun Li

China Coal Jiangnan Construction Development Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510170, China

Abstract

Due to the engineering characteristics of soft ground layers, such as low strength, high compressibility, and poor permeability, pile foundation construction is highly susceptible to collapse, which seriously threatens construction safety and pile quality, and leads to low construction efficiency. This study aims to systematically analyze the intrinsic mechanisms and key influencing factors of collapse risk during pile foundation construction in soft ground layers, and on this basis, proposes a comprehensive risk prevention and control technical system. At the same time, the study integrates risk prevention and control with construction techniques and management processes to explore optimization paths for improving overall construction efficiency while ensuring pile quality, providing theoretical support and practical guidance for pile foundation projects under similar geological conditions.

Keywords

Soft ground layers; Pile foundation; Collapse risk; Risk prevention and control; Pile quality; Construction optimization

软土地层桩基础施工中塌孔风险防控与成桩效率优化研究

李国君

中煤江南建设发展集团有限公司，中国·广东广州 510170

摘要

软土地层因其强度低、压缩性高、透水性差等工程特性，在桩基础施工过程中极易引发塌孔问题，严重威胁施工安全与成桩质量，并导致施工效率低下。本文旨在系统分析软土地层桩基施工中塌孔风险的内在机理与关键影响因素，并在此基础上提出综合性的风险防控技术体系。同时，研究将风险防控与施工工艺、管理流程相结合，探索在保障成桩质量的前提下，提升整体施工效率的优化路径，以期为类似地质条件下的桩基工程提供理论依据与实践指导。

关键词

软土地层；桩基础；塌孔风险；风险防控；成桩效率；施工优化

1 引言

伴随中国城市化步伐的持续迈进，基础设施建设渐渐向地质条件复杂的区域伸展。软土地层于沿海、沿江和三角洲区域大量分布，其独特的工程性能让桩基础施工碰到严峻挑战，软土地区采用钻孔灌注桩作为常用基础形式，施工阶段塌孔现象成了常见且棘手的技术难题。塌孔直接导致混凝土超灌、桩身夹泥等质量差错，引起桩基的承载能力下滑，还极有概率引发地面下沉、周边设施毁坏等安全事故。因此，开展软土地层桩基施工塌孔风险的综合系统性防控研究工作，同时摸索成桩效率的优化途径，对保证工程稳健、提高工程质量、加快工程进程意义重大。

【作者简介】李国君（1990-），男，中国广东梅县人，本科，工程师，从事桩基础/基坑支护等施工研究。

2 软土地层塌孔风险机理与影响因素分析

2.1 软土地层工程地质特性

软土主要由粘土粒与粉粒构成，体现出高含水量、大孔隙比、低渗透系数以及高压缩性的现象，其内部结构呈现出絮凝的模样，连接强度欠佳，对外部的扰动高度敏感。在桩基成孔的过程中，原始地应力的平衡状态遭到破坏，孔壁的土体受径向卸荷影响，容易向临空面产生塑性的流动现象。基于软土渗透性低下，孔内泥浆难以有效渗透进孔壁形成致密泥皮，减少了泥浆护壁的功效，埋下了塌孔的隐患。

2.2 施工扰动对孔壁稳定性的影响

施工活动从外部直接诱发了塌孔情况。在钻孔机械旋转切削过程中，持续对孔周土体造成剪切扰动，振动沉桩设备发出的波动应力，可造成周边饱和软土液化。上下提放钻具行为会在孔内引发抽吸及活塞效应，引发孔内压力出现起伏，进而对孔壁进行冲刷破坏。成孔后若空置的时间太久，

静置过程中孔壁土体因应力释放会不断出现蠕变变形，最终引发失稳坍塌的情形。

2.3 水文地质与泥浆护壁效能的关键作用

地下水作为活跃因子影响孔壁稳定。若孔内泥浆液柱压力低于地层孔隙水的压强，地下水会朝孔内渗流，拉扯着土颗粒流出，引发潜蚀性的塌孔情形。若泥浆压力大幅升高，可能会造成地层开裂，引发浆液产生漏失^[1]。稳定孔壁的关键措施是采用泥浆护壁，其实际功效由泥浆的密度、粘度、胶体率以及泥皮形成的质量来判定。在软土地层的环境下，若泥浆配制存在问题，不能形成高质量泥皮，护壁效果会急剧下滑，难以对土压力与水压力达成有效抵御。

3 软土地层桩基施工塌孔综合性防控技术

3.1 精细化勘察与个性化泥浆配制方案

正式推进桩基工程前夕，进行全面的地质勘察是保障后续施工顺利开展的前提。勘察工作不应只依靠传统的钻孔取样手段，需综合使用诸如静力触探、十字板剪切试验、孔内波速测试等多种方法，精准探测软土的空间分布范围、层厚的变化程度、关键物理力学参数（如含水率、孔隙比、压缩模量、不排水抗剪强度）以及地下水的埋深、流向和承压的相关特点。通过全面的勘察数据，开展体现个性化的泥浆配方设计与试验，顾及软土的特性。筛选后选用钠基膨润土，通过对加水量和搅拌时间实施变动，配制成呈现高粘度、低滤失量的基础浆液。随后添入适量 CMC（羧甲基纤维素）、纯碱等处理剂，有力提高泥浆的胶体稳定性、润滑性及造壁能力。在施工开展阶段，需实时对泥浆的密度、粘度、含砂率及 pH 值等关键指标开展检测，再依照检测结果动态调整泥浆的配比，保障能在孔壁表面生成一层致密、坚韧且渗透性低的泥皮。这层泥皮可切实对土体孔隙和微裂隙进行堵塞，以此维持孔内液柱压力跟地层侧向压力的动态平衡，是防范缩径、塌孔等事故的核心环节。

3.2 优化施工工艺与强化过程控制

为最大程度减轻对软土地层的扰动，要从设备选型以及工艺参数两方面着手优化施工工艺，优先选用扭矩大、钻进平稳顺畅、取土效率出众的旋挖钻机，彻底消除冲击钻机造成的强烈振动危害。当开展钻进施工期间，要按照不同土层恰当设置并严格规范钻压和转速，让钻头匀速且缓慢钻进。不要盲目追求进尺速度让“憋钻”现象出现，防止钻头底部因排渣有阻碍形成结构松散的“渣土垫层”。该垫层会成为后续塌孔的突出隐患。处于流程控制阶段，必须保障钻机底盘扎实、桅杆垂直，全程借助仪器监测钻杆的垂直度，杜绝钻具颤动碰撞孔壁。钻具提放操作一定要让其平稳有序，要对速度实施严格控制，防止出现过度的抽吸或活塞效应^[2]。委派专人进行孔内泥浆的监测与补充事宜，保证泥浆液面高度始终平稳在地下水水位至少 2 米，以此形成足够且恒定的静水压力，防止孔壁土体出现径向形变。需合理安排

施工流程，竭力缩短成孔清孔至开启灌注下混凝土的时间间隙，全力做到“一孔成型，立即灌注”，降低孔壁无混凝土支撑的暴露时长，降低风险。

3.3 采用护壁材料与先进孔壁加固技术

在地质条件处于极度软弱且敏感阶段，抑或常规泥浆护壁方案评估后效果不理想的关键区段，需要采用更积极主动、效果强劲的孔壁加固技术。凭借它超高的刚度，直接冲破流塑状软土、松散砂层等易引发塌孔的地层，为钻孔进行全程或部分的机械支撑。此外，还有一种惯用手段是实施孔壁土体改进，通过事先设置的注浆管，把水泥浆、化学浆液（比如水玻璃）或复合浆液压灌到孔壁周围一定区域的土体中，浆液依靠渗透、劈裂、压密等效应，能实现土颗粒的胶结，切实增大土体的粘聚力 c 值和内摩擦角 φ 值，故而在钻孔周边形成一个强度明显提升的“加固圈”，共同肩负外部负载。伴随材料科技的不断发展，可挑选新型聚合物钻井液，这类材料借由长链分子结构，可在孔壁表面迅速实现吸附和桥接，制出一层带有空间网状结构的柔性薄膜。该薄膜不仅可以实现对孔壁的有效封堵，也带有一定的韧性以及自我修复机能，能明显增强对不稳定地层的护壁实力，特别契合对环保有较高要求的场地。

4 基于风险防控的成桩效率优化路径

4.1 基于信息化技术的施工动态管理与决策

引入建筑信息模型跟物联网技术，构建桩基施工信息化管理平台，意味着桩基工程施工从依靠传统经验驱动模式过渡到数据驱动模式。平台把 BIM 模型提供的精确几何信息、地质勘察数据与施工方案加以集成，同时聚合物联网传感器网络采集的实时工况数据，架构出一个虚实呼应、数据交互的数字化工作空间。处于这个空间中，管理者可以全方位、动态地把握施工进程的每一个具体细微点，为桩基工程的精细化、智能化管理搭建起坚实的技术支撑。

在实际执行阶段，在旋挖钻机、泥浆循环系统等关键设备上加装各类高精度传感器，可实时收集并传递钻进速度、钻杆扭矩、泥浆液面高度、密度、黏度等核心参数。信息化管理平台同步接纳这些接连不断的实时数据流，接着与 BIM 模型预先设置的地质分层信息、岩土力学参数进行自动比对和智能剖析，系统可借助内置的算法模型，实时检验当前钻进层位是否与模型一致，泥浆护壁效果是否契合预期要求，由此对施工状态做出精准的数字化评判。这项技术整合最大价值体现在其具有前瞻性的风险预警与决策支持能力。当系统依靠数据分析发现参数呈现异常，例如泥浆液面霍然快速下降或钻进阻力反常升高，可能是孔壁失稳、马上会出现塌孔的早期提示，系统会急忙自动开启分级预警行动，利用移动终端将警报信息及初步处理意见推送给现场技术人员。操作人员能够及时给予反应，依据数据指示及时改动泥浆性能、管控钻进速度或采取其他稳固孔壁的做法，把

风险遏制在萌芽状态。这种从“被动抢险”过渡到“主动预防”的转变，明显减少了因应对塌孔等事故造成的工期延误以及成本超支，最终实现了桩基施工流程的精准掌控与高效管理。

4.2 优化施工组织与各工序间的无缝衔接

合理规范的施工组织设计是拉动桩基工程施工效率提高、保障工程平稳推进的核心动力。这表明项目管理应跨越简单的任务分配界限，朝着对施工整个进程实施精细化、体系化的时序安排与资源统筹的方向转换。把钻孔、清孔、钢筋笼下放、混凝土灌注这些各自分开的关键工序，看成一个相互交融的有机整体，通过精确核算各工序作业时长与逻辑关系，设计起衔接紧凑的流水作业网络规程，进而最大程度去除工序间的等待间隔，实现施工流程的畅顺高效。在物料及设备的管理，有前瞻性的前期筹备是保障流水作业连贯性的关键。按照施工计划，提前在加工场把钢筋笼制作完成并验收合格，混凝土导管、隔水塞的辅助设施也应提前做好检查。采用“兵马未动，粮草先行”的方案策略，保证当前面一道工序（比如清孔）做完后，下一道工序（如下放钢筋笼）应有的全部物料可马上投入实施，杜绝已成桩孔因等候物料而长时间暴露，进而切实降低孔壁坍塌的几率，进一步直接缩短了桩基的纯施工时长。

为使效率提升的功效进一步放大，当进行大型桩基群施工时，需采用多台钻机分地带、分批次执行流水作业的组织手段，把整个施工区域划分成若干个独立的作业单元，每个单元都配备完整的作业班组跟设备，形成多个并行且相互独立的微型流水线^[3]。这种模式不仅把现场管理人员的协调压力合理分散了，让他们得以更用心于各自区域的精细管理工作，还从宏观层面促成了显著的规模效应。多套流水线同步开展，使资源统筹更具灵活伸缩性，且可有效分摊固定成本，从管理范围系统地减少了各类非生产性时间的占用量，进而极大缩短了整体单桩施工周期，极大增强项目总体的成桩效率及经济效益。

4.3 建立标准化操作规程与人员培训体系

效率的攀升并非源自偶然的经验，而是牢牢融入严谨的规范体系中。实施软土地层中的桩基修筑施工，软土本身带有的高含水量、低承载力以及容易被扰动等特点，施工过程中会碰到不少不确定情形，制定一套完整且充满高度针对性的标准化操作守则，是把不可控的现场经验转化成可控、

可多次施行的技术行为的关键。该规程需依靠大量工程实践、室内试验和数值模拟作参考，把针对此类地层已确认为最优的泥浆配比、钻进转速与压力掌控、清孔工艺准则以及钢筋笼下放注意事项等核心参数与行动。采用权威文件形式进行固定，保证每位操作者在面对类似工况的时段，施工行为皆可体现高度的规范和协调性，为工程质量与效率构建首道壁垒。

文件实际呈现的效力，最终由现场人员对其理解的深度以及执行能力确定。因此，必须增强针对现场管理人员、技术员与一线机械操作手的系统专项培训。培训内容不该只以宣读 SOP 条文为限，还需要深入解析软土地层工程地质特性、孔壁失稳（塌孔）的力学内涵以及各项防控方法（例如维持泥浆液面、控制钻进速度）背后的科学道理。运用“知其然更知其所以然”的深度培训途径，切实增进团队对潜在风险的预判和识别。一支实力强劲、熟练把握技术原理且严格遵照标准化流程的队伍，是推动施工高效又顺畅的主要动力。他们好似精密的器械，精准执行既定的防控手段，最大程度削减因操作偏差、判断错误或响应拖延等人为因素引发的孔内事故。若每个环节都能按照预定安排顺利推进，杜绝塌孔、缩径等问题造成的处理、返工乃至废桩现象，施工流程的自然连续性得到了可靠保障，从而从起始点实现了名副其实的高效率与高效益，让规范切实转变为生产力。

5 结语

软土地层桩基础施工阶段，塌孔风险防控与成桩效率优化是系统性工程。经综合分析，塌孔风险归因于软土欠佳的工程特性，且会因施工扰动及水力作用而被引发，有效的防控要把精细化勘察当作基础，选取以优质泥浆护壁为核心，耦合优化施工工艺和必要加固技术的综合手段。在未来，伴随新材料、新设备与智能建造技术持续进步，软土地层桩基施工的安全性和经济性肯定会实现进一步的提升。

参考文献

- [1] 杭红星,陈尚勇,吴成杰.新线引入既有客运专线车站软土地基加固技术[J].铁道建筑, 2024, 64(1):105-110.
- [2] 李铁,何学清,黄曜,等.钻孔灌注桩塌孔研究进展及发展趋势[J].建筑结构, 2023, 53(S02):2433-2440.
- [3] 张锦栋.深厚淤泥地层超静水压力条件下超深灌注桩施工孔壁稳定性研究张锦栋[J].市政技术, 2024, 42(1):116-123.