

# 桥梁桩基成孔施工中塌孔问题的成因识别与处置方法

蒲得龙

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210046

**【摘要】**：塌孔是桥梁桩基成孔施工中影响工程质量与进度的关键隐患，其成因与地质条件、施工工艺、泥浆性能等多因素相关。精准识别塌孔成因并采取针对性处置措施，是保障桩基施工安全的核心。本文通过分析塌孔形成的核心影响因素，提出科学的成因识别路径与分级处置方案，为桥梁桩基成孔施工中塌孔问题的防控提供实践参考，助力提升桩基施工的可靠性与工程整体质量。

**【关键词】**：桥梁桩基；成孔施工；塌孔成因；处置方法；施工防控

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.006

## 引言

塌孔问题的突发会直接导致桩基成孔受阻、孔壁失稳，不仅增加施工成本，还可能引发安全风险，严重制约桥梁工程整体建设效率。桩基作为桥梁结构的关键承载部分，其成孔质量直接决定桥梁长期使用的安全性与耐久性。因此，深入剖析塌孔问题的诱发机制，精准定位核心成因，进而构建基于风险分级的处置体系，是解决施工难题的关键。基于施工实践中的常见问题，结合地质勘察与施工技术要点，聚焦塌孔成因的系统性识别与处置措施的实操性，为后续施工环节提供可操作的技术指引，推动桥梁桩基施工技术的标准化与优化完善。

## 1 桥梁桩基成孔塌孔的核心成因解析

(1) 地质条件先天缺陷引发的塌孔因素：地质条件是影响桩基成孔稳定性的关键内因。松散砂层与粉土层黏聚力弱、自稳性差，成孔后侧向应力释放，在地下水的潜蚀作用下易发生渐进式坍塌；岩溶发育区因溶洞、溶隙导致地层不连续，钻孔触及后应力重分布，易引发突发性孔壁失稳；强风化或全风化岩层结构破碎、胶结性差，受施工扰动易产生应力集中而剥落。地下水位高、水力梯度大或存在承压水时，渗透压力显著降低土体有效应力与抗剪强度，进一步加剧塌孔风险。此类地质缺陷所致的塌孔，具有隐蔽性与变异性，需在施工前重点识别与评估<sup>[1]</sup>。(2) 施工工艺不当导致的塌孔问题：施工工艺失当是引发塌孔的重要人为因素。钻机选型不当导致钻压、转速与地层力学特性不匹配，钻进过程易失衡；进尺过快会形成较大抽吸负压并过度扰动土体，过慢则延长孔壁临空时间，均加剧土体强度衰减。钻具同心度偏差或导向不佳会引发孔壁周期性撞击，造成局部应力集中与结构损伤。清孔不彻底使孔底沉渣堆积，改变孔端应力状态；泥浆置换不当则会冲刷破坏孔周土体原生结构。成孔后工序衔接延误，孔壁长期暴露于外界环境，土

体经历干湿循环与孔隙水压力变化，粘结力持续降低，最终诱发塌孔。(3) 泥浆性能失衡诱发的塌孔隐患：泥浆性能直接关系孔壁稳定。比重不足则静液压力难以平衡地层侧压与地下水压力，易引发渗透变形与颗粒流失。黏度及动切力偏低时，携渣能力下降，孔底易形成虚垫层，且难以形成致密泥皮，护壁效果减弱。含砂量过高会增大塑性粘度、加速钻具磨损，并破坏泥皮完整性，导致滤失过快，孔壁土体因失水产生收缩裂缝。pH值异常会影响黏土颗粒分散稳定性，削弱胶体保护作用。此外，泥浆体系老化、固相污染累积且未及时净化处理，将导致性能全面劣化，最终丧失护壁能力。

## 2 塌孔成因的精准识别路径构建

(1) 基于地质勘察的前期预判识别：前期地质勘察是量化评估塌孔风险的基础环节，通过集成钻探、物探（如地质雷达、跨孔CT）及室内土工试验所获得的详细勘察资料，可构建三维地质模型，初步识别潜在塌孔成因。勘察过程中需精准探明施工区域的三维地层分布与力学参数空间变异性，包括各土层的物理力学指标（如 $c$ 、 $\phi$ 值）、密实度、渗透系数等，以及岩层的RQD值、裂隙发育密度与贯通性、岩溶空间形态与充填物性质等信息，据此进行数值模拟或经验类比，判断高风险地段；同时需定量分析地下水渗流场及其与地层的相互作用，评估因地下水作用可能引发的塌孔概率与规模。结合勘察数据，可采用模糊综合评判或风险矩阵法对施工区域进行塌孔风险分级，输出风险区划图，为差异化施工方案制定提供科学依据，从源头主动防控因地质信息不确定性导致的塌孔隐患。(2) 施工过程中的实时监测识别：施工过程中的多源信息实时监测是实现塌孔风险动态预警、精准识别成因的关键手段。通过在钻孔周边布置智能测斜仪、分布式光纤传感系统，或采用声波孔壁监测技术，实时监测孔壁径向位移场与应变场，若出现位

移时空演化模式异常（如突变、加速），可结合算法初步判定失稳前兆与可能诱因；同时集成监测钻孔过程中的多维钻进参数（如扭矩、钻压、转速），构建钻进响应模型，若钻进过程中参数响应曲线出现异常波动或偏离基准模式，可能反演出地层变化、孔壁坍塌等工况。通过在线泥浆性能监测仪实时观察泥浆的密度、粘度、含砂率及电阻率等性能变化，若监测数据流出现趋势性劣化或突变，可能是孔壁失稳进程的伴生信号。融合地质模型、实时监测数据与钻进响应信息，可构建塌孔风险动态识别系统，实现成因的快速锁定与风险预警。（3）塌孔现象的特征分析识别：当塌孔发生后，可通过其特征反演成因。轻微塌孔表现为泥浆液面线性缓降、含砂量略增、孔口出现细纹，多与泥浆性能波动或浅层土体松弛有关。中度塌孔则呈现液面阶梯状或加速下降、返渣粒径增大、钻具受阻明显，常因施工参数与地层不匹配或局部地质缺陷被激发所致。严重塌孔时，孔口周边土体产生环状裂缝或整体下沉，伴随钻机偏移、地面冒浆或涌水，通常由揭露大型溶洞等不良地质体，或发生严重施工工艺偏差引发。结合塌孔发生时的工况与地层深度进行回溯分析，可建立“特征-工况-地层”关联图谱，从而精准判定主导成因<sup>[2]</sup>。

### 3 塌孔问题的分级处置技术方案

（1）轻微塌孔的现场应急处置措施：轻微塌孔发生后，需立即停钻并维持钻具在孔底一定高度空转，防止塌孔范围进一步扩大。首先使用便携式泥浆测试仪对泥浆性能进行快速检测，根据检测结果精确计算外加剂掺量，通过加入优质钠基膨润土、CMC 增粘剂等调整泥浆性能，目标是将比重提高 0.1-0.2，漏斗粘度提升至 25-30s，增强其动态携渣与造壁能力；同时采用“低转速、小泵量”的方式循环泥浆，将孔内松散塌落物悬浮并缓慢带出。若孔壁局部出现渗漏或小范围剥落，可向孔内分次投入掺有纤维材料的黏土球，利用钻具挤压搅拌形成泥塞，挤入并胶结松动区域。处置过程中需加密监测频率（如每 15 分钟一次），确保处置效果。恢复施工后首阶段（如 3-5 米）需采用保守钻进参数，减少对孔壁的扰动。（2）中度塌孔的修复加固处置方法：中度塌孔处置需评估塌方体规模与性质后，优先清理孔内塌落物，根据塌落物粒径选择砂石泵或反循环钻机进行高效清除，若塌落物胶结或粒径较大，可采用潜孔锤结合分层清理的方式。清理至稳定面后，对损伤区孔壁进行加固处理。对于具有一定渗透性的不稳定地层，可采用袖阀管压密注浆或双液速凝注浆，以孔心为轴对称布孔，注入水灰比

0.5-0.6 的水泥浆或化学浆液，浆液扩散半径需通过试验确定，旨在形成复合加固体；若孔壁坍塌段较长或呈断续分布，可采用振动下沉钢护筒或跟进套管的方法，护筒/套管直径需大于设计孔径，并确保其底口嵌入稳定地层不少于 2 米。加固完成后，必须采用超声波孔壁检测仪检测孔壁完整性，合格后重新配制高性能泥浆（如聚合物泥浆），再谨慎恢复成孔作业。（3）严重塌孔的返工重建处置路径：严重塌孔后，需经技术经济综合比选，决定对原孔位采取返工重建措施。首先划定安全作业区，对塌孔区域进行分区彻底清理，必要时可采用旋喷桩对塌陷区周边进行临时固化；随后开展专项补勘，重点查明塌陷影响范围内的地层结构变异、地下水通道等，并基于新勘察数据进行边坡稳定性与成孔可行性复核，从根本上修正原施工方案，可能涉及变更桩型（如改为嵌岩桩）、调整桩位或采用全套管钻进等根本性工艺变更<sup>[3]</sup>。根据优化比选后的施工方案，精确测设新孔位，并建立新旧孔位施工影响的隔离措施（如设置应力释放孔或隔离桩）；新孔施工过程中，需实施“一桩一策”的精细化管理，采用智能钻进系统与自动化监测平台，实现施工全过程可视化与可控化。如图 1：



图 1 桥梁桩基成孔施工中严重塌孔现场

### 4 塌孔问题的施工过程防控策略

（1）地质适应性施工方案优化：基于精细化地质勘察资料，构建地质适应性施工技术体系，实现施工方案与地质条件的精准匹配。对于松散砂层、粉土层，采用“慢速钻进+分段成孔+高黏度泥浆”组合工艺，钻进速度控制在 0.5-1m/h，每钻进 3m 进行一次泥浆稳压，泥浆比重提升至 1.15-1.20、黏度 22-25s；对于岩溶发育地层，提前采用注浆填充（溶洞体积>10m<sup>3</sup>时采用 C15 混凝土填充）或埋设长护筒跨越（护筒长度≥溶洞高度+2m）的方式处理，确保成孔稳定性；对于强风化岩层，选用牙轮钻头，控制钻进速度≤1.2m/h、

钻具扭矩 $\leq 300\text{kN}\cdot\text{m}$ ，避免钻具对岩体的过度冲击。建立地层动态识别机制，钻进过程中每2m采集岩样进行力学性能测试，实时调整施工参数，确保施工方案始终适配地质条件，从源头降低塌孔风险。（2）施工工艺规范化控制措施：强化施工工艺的全过程管控，规范各环节操作流程。钻机安装需找平找正、固定牢固，通过水平仪校准确保机身平稳，钻杆垂直度偏差严格控制在规范允许范围内，防止钻进时钻具大幅摆动撞击孔壁<sup>[4]</sup>。钻孔时依据地层硬度动态调整钻进速度，松软地层放缓速率、坚硬地层稳步推进，避免盲目提速造成孔壁扰动，确保孔壁平整光滑；清孔采用二次清孔工艺，第一次清孔后静置30分钟以上，待孔底沉渣充分沉淀，再进行第二次清孔，彻底清除沉渣，清孔完成后1小时内启动钢筋笼安装与混凝土浇筑，最大程度缩短孔壁暴露时间。同时定期开展施工人员技术培训与实操考核，强化规范操作意识，减少人为失误引发的塌孔风险。（3）泥浆性能动态调控方法：建立泥浆性能动态监测与调控机制，确保泥浆始终处于最佳工作状态。施工前根据地质条件确定泥浆的初始配比，施工过程中定期检测泥浆的比重、黏度、含砂量、pH值等性能指标，频率不低于每2小时一次，若发现指标偏离设计要求，及时调整；对于钻进过程中泥浆损耗较大的情况，及时补充新鲜泥浆，并根据孔内情况调整外加剂用量，维持泥浆性能稳定；采用泥浆净化设备对循环使用的泥浆进行过滤净化，去除泥浆中的岩渣和杂质，降低含砂量，延长泥浆使用寿命。通过动态调控泥浆性能，确保其始终具备良好的护壁、携渣能力，为成孔安全提供保障。

## 5 塌孔处置与防控的实践应用要点

（1）施工前准备阶段的防控重点：施工前准备阶段需做好全方位防控工作，为后续施工筑牢基础。组织专业技术人员对地质勘察资料进行深入分析，明确施工区域的塌孔风险点，制定专项防控方案和应急预案；对施工设备进行全面检查和调试，确保钻机、泥浆泵、监测仪器等设备性能完好，满足施工要求；根

据施工方案准备充足的施工材料，包括优质膨润土、水泥、外加剂等，确保泥浆配比和加固材料的质量；对施工场地进行平整压实，合理布置泥浆池、沉淀池等设施，确保施工场地排水畅通，避免因场地积水影响施工或引发孔壁失稳。（2）施工实施阶段的处置执行要求：施工实施阶段需严格执行处置与防控措施，确保各项要求落实到位。按照优化后的施工方案组织施工，严禁违规操作，施工人员需严格遵守操作规程，加强对各施工环节的自检自查<sup>[5]</sup>。监测人员需坚守岗位，及时记录监测数据，若发现异常情况，第一时间发出预警信号，并协助技术人员分析原因、制定处置措施；处置塌孔问题时，需严格按照分级处置方案执行，确保处置流程规范、措施有效，避免因处置不当扩大事故影响；施工过程中加强各部门协调配合，形成防控合力，确保施工安全有序进行。（3）施工验收阶段的质量把控要点：施工验收阶段需强化质量把控，确保桩基成孔质量符合设计要求。对成孔的孔径、孔深、垂直度、沉渣厚度等指标进行全面检测，采用专业检测设备进行实测实量，确保检测数据准确可靠；检查泥浆性能检测记录、施工日志、监测数据等资料，核实施工过程是否符合规范要求，处置措施是否有效；对验收中发现的质量问题，及时下达整改通知，明确整改要求和期限，整改完成后重新进行验收，直至合格。通过严格的验收把控，确保桩基成孔质量达标，为后续钢筋笼安装和混凝土浇筑奠定良好基础，保障桥梁工程整体质量。

## 6 结语

桥梁桩基成孔施工中的塌孔问题成因复杂，涉及地质、工艺与泥浆等多方面因素。通过构建精准的成因识别路径与分级处置方案，并实施全过程的科学防控策略，可有效提升成孔施工的可靠性与安全性。未来，随着智能监测技术与自适应施工工艺的发展，塌孔风险防控将更加精细化与智能化，从而为桥梁工程质量的整体提升提供坚实保障。

## 参考文献：

- [1] 欧阳鹏. 滑坡巨厚覆盖层下桥梁桩基旋挖成孔技术分析[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(16): 47-49.
- [2] 杜娜娜. 桥梁桩基旋挖钻施工技术探讨[J]. 交通世界, 2025, (Z2): 166-168.
- [3] 叶俊豪. 桥梁桩基工程中旋挖钻成孔技术研究[J]. 交通世界, 2024, (31): 159-161.
- [4] 王书强. 公路桥梁桩基工程中的旋挖钻成孔施工技术[J]. 运输经理世界, 2024, (28): 77-79.
- [5] 汤鑫. 桥梁桩基施工阶段旋挖钻成孔技术[J]. 汽车周刊, 2024, (09): 249-251.