

岩溶发育区桥梁桩基穿越溶洞施工控制技术

杜见坤

湖北交投建设集团有限公司 湖北 武汉 430000

【摘要】：依托干线公路桥梁勘察与施工资料，针对岩溶发育区桩基穿越溶洞易出现塌孔、漏浆等病害开展研究。先梳理场区岩溶地质发育特征，构建溶洞桩基病害分级管控体系，配套形成塌孔变形控制、地下水漏涌防控、多层溶洞超前预处理三类主动施工技术。现场应用数据表明，整套工艺可将桩孔变形控制在 50mm 以内，有效降低岩溶桩基施工安全隐患，可为同类岩溶桥梁桩基工程提供实操参考。数据来源：项目岩土勘察报告、专项施工方案

【关键词】：岩溶地层；桥梁桩基；溶洞施工控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.057

引言

当前岩溶区域桥梁建设规模持续扩大，多层溶洞、地下径流等不良地质大幅提升桩基成桩施工难度，常规钻孔工艺极易诱发塌孔、桩身夹泥等质量缺陷。现有研究多侧重单一溶洞处置手段，缺少成套主动控制体系。本文结合实体公路桥梁工程，从地质分析、风险管控、现场施工技术三方面开展系统研究，提出适配多层溶洞工况的成套施工控制方法，解决岩溶桩基穿越溶洞的现场实操难题。

1 工程概况与岩溶地质环境分析

研究基础取自干线公路桥梁岩土工程勘察成果，项目场区整体属于强岩溶发育灰岩地层。全场布置 132 个勘探钻孔，溶洞揭露比例达到 64%，溶洞竖向分布区间处于 13m 至 46m 范围，与桩基设计施工深度形成重叠。场地地表覆盖层厚度介于 11m~17m，以软塑粉质黏土为主，下部基岩发育大量贯通性溶蚀裂隙，地层结构包含空溶洞与黏土充填溶洞两种典型形态，场区稳定地下水位埋深 6.8m。项目桩基设计孔径 1.8m，场地单桩成孔平均深度 52m，桩基施工作业需连续穿过多层溶洞空腔^[1]。溶洞顶板厚度集中在 0.4m 至 1.5m，岩体完整性系数仅 0.32，天然自稳性能较差。桩基钻进作业产生的施工扰动，会改变岩溶地层地下水原有渗流路径，引发桩孔塌孔、泥浆渗漏、桩身夹泥等病害问题。岩溶地层空间分布的不均匀特性，让常规桩基施工工艺无法适配复杂溶洞工况，也是制约成桩质量、诱发施工安全问题的核心地质因素。

2 岩溶发育区桥梁桩基穿溶洞病害风险管控

结合桥梁施工前期专项风险评估成果，可梳理岩溶桩基施工病害的形成与发展规律。溶洞顶板在钻进荷载与地下水渗流耦合作用下，易产生张拉裂隙并持续扩张。现场同类工程病害统计数据显示，岩溶桩基施工过程中塌孔、漏浆问题发生占比分别为 57%、31%，两类常见病害会造成桩身垂直度偏差超出

1/150 的规范限值。依托钻孔三维地质剖面成果完成场地风险分级识别，选取 0.5m 溶洞顶板厚度、42%充填体液限作为核心分级阈值，将施工区域划分为三级风险区段，高风险区域多集中在多层连通溶洞发育位置。

3 岩溶发育区桥梁桩基溶洞穿越成桩主动控制技术

图为岩溶桩基溶洞成套主动控制施工总体工艺流程，完整覆盖超前探测、溶洞预处理、差异化孔壁稳定控制全工序。

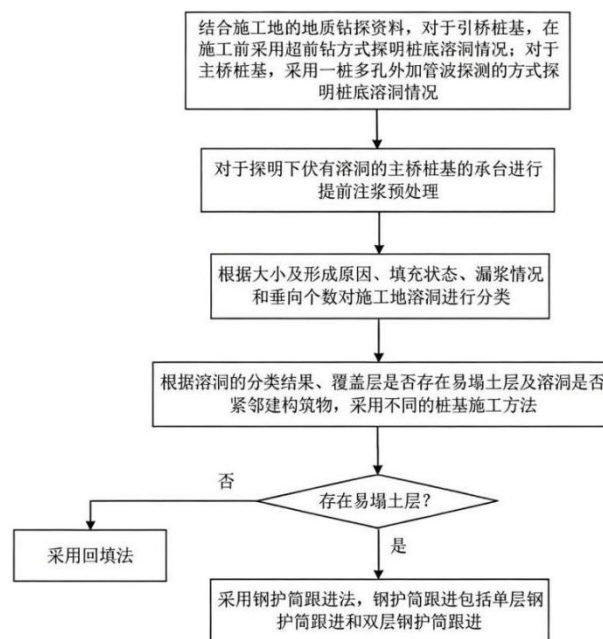


图1 岩溶发育区桥梁桩基穿越溶洞成套主动控制施工工艺流程

3.1 溶洞充填/空溶洞桩孔塌孔变形控制技术

空溶洞无填充介质、充填溶洞土体承载力不足，两类工况均易引发桩孔孔壁失稳塌落。现场采用分级填料回填加固搭配低速稳钻的作业方式，实现桩孔变形的主动管控，各项工艺参

数均取自项目岩溶桩基专项施工方案。钻进作业揭露单层高度不足 2m 的小型空溶洞时,直接投放 20mm 至 50mm 级配碎石与袋装黏土混合材料封堵溶洞空腔,单次填料厚度固定为 1.2m,材料静置稳压 4h 后,使用直径 1.8m 钻头低速扫孔、分层压实。钻机钻进速度控制在 0.6m/h 以内,减少机械施工扰动对溶洞临时封堵结构的破坏^[2]。软黏土充填溶洞孔壁土体压缩模量仅 3.6MPa,泥浆侧压力作用下容易出现孔径缩径、孔壁塌落现象。

施工环节可将泥浆比重调整至 1.25、黏度调整至 28s,充填溶洞区段增设 3m 长度钢护筒跟进防护结构,护筒底部嵌入完整灰岩基岩 0.8m,阻断充填土体坍塌脱落的通道。多层叠加溶洞区段采用分层回填、循环扫孔的施工模式,每层填料压实完成后及时检测孔径偏差,桩孔变形量严格控制在 50mm 允许范围内。介质填充优化、钻进速率调控、临时围护加固多手段结合,抑制桩孔径向变形问题。孔内成像设备全程记录孔壁完整状态,孔壁局部剥落厚度连续达到 30mm 时,立即暂停钻进作业,补充加固材料完成封堵,规避大面积塌孔问题产生。

3.2 岩溶地下水突涌、漏浆防控控稳技术

岩溶地层贯通裂隙与地下径流通道会快速带走泥浆,引发孔内水头骤降,破坏孔壁受力平衡引发失稳问题,整套控稳处置技术依托场区水文地质专项勘查数据优化成型。成孔作业前期,沿桩基施工轴线布设 40m 深度观测孔,长期监测地下水位动态变化,将水位日波动幅度超过 1.2m 的区域划定为地下水活跃区段。现场提前制备高抗渗堵漏泥浆,浆液中掺入 8% 比例锯末与 5% 比例棉絮纤维,强化裂隙封堵效果。钻进作业期间配套 25m³/h 额定流量自动补浆系统,保障孔内泥浆液面始终高于场区稳定地下水位 2.0m 以上,稳定的静水压力可平衡岩溶地层外侧渗透水压。

施工揭露连通型溶洞出现漏浆问题时,及时投放袋装水泥黏土混合材料,单次投放总量 1.5t,材料静置固结 6h 后恢复钻进作业。涌水量超 10m³/h 的强透水溶洞,增设孔内注浆止

渗工序,0.8 水灰比水泥浆液以 0.3MPa 低压压力灌注,填充岩体内部渗流裂隙。泥浆池液位、孔内水头、泥浆比重三类核心数据保持常态化采集,每 30min 完成一次数据记录,泥浆单次损耗量超过 0.8m³ 时,启动分级堵漏处置流程。

3.3 多层溶洞超前预处理与超前支护控制技术

竖向多层溶洞顶板岩体完整性系数偏低,直接开展钻进作业极易诱发顶板垮塌病害,超前处置工艺参数参照项目溶洞预处理专项技术交底执行。桩基正式开孔前,采用 110mm 直径地质钻机在桩周布设 6 个超前探测孔,探测深度超出桩基设计孔底 3m,精准探明场区溶洞层数、单层竖向高度、顶板厚度等三维空间地质参数。顶板厚度不足 0.5m 的薄顶溶洞,采用地面袖阀管超前注浆预处理工艺,注浆孔布设间距 0.8m,注浆压力稳定维持 0.25MPa,浆液扩散半径不低于 1.0m,固结成型的溶洞顶板可形成连续承载结构。

预处理作业完成后,下放分段加长钢护筒作为永久超前支护结构,单节护筒长度 4m,节间采用焊接密封处理,护筒贯穿各层溶洞结构并嵌入下部完整基岩 1.0m,隔绝溶洞松散介质、地下水对桩孔结构的持续侵蚀作用。竖向总高度超 5m 的巨型多层溶洞,通过探测孔向溶洞空腔填充碎石黏土混合料,分层夯实后再分段下放护筒,杜绝护筒悬空引发的结构失稳。混凝土浇筑阶段护筒保持原位,待混凝土养护强度达到设计强度 75% 后分段拆除护筒。超前探测、注浆预加固、钢护筒全程支护的成套作业流程,可提前消解多层溶洞顶板垮塌、孔壁脱落风险,实现桩基穿越多层溶洞施工全过程的主动安全管控^[3]。

4 结语

本文结合干线公路桥梁实体工程,明确岩溶场区桩基溶洞施工核心地质风险,构建覆盖风险预判、动态监测的病害管控流程,配套形成分层回填稳孔、堵漏稳压、超前注浆支护三类主动控制技术。整套工艺参数均可落地实施,能够有效抑制溶洞段桩孔变形与地下水渗漏,提升岩溶桩基成桩合格率,可为岩溶区域同类桥梁桩基穿越溶洞施工提供完整技术借鉴。

参考文献:

- [1] 江小波.岩溶地层条件下旋挖钻技术在桥梁桩基施工中的应用[J].四川水泥,2025(6):195-197.
- [2] 李康,王健.岩溶及深厚软土区桥梁桩基施工与控制关键技术研究[J].建筑机械,2025(8):257-261.
- [3] 何中豪,邓力,祝明鑫,李昌达,丁刻.岩溶地区大型溶洞桩基施工要点及质量控制措施研究[J].工程建设与设计,2025(22):202-204.