

桥梁桩基础在岩溶地层的施工难点与处理方案

夏海涛

(安徽省交控建设管理有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要 岩溶地层地质条件繁杂、形态多变,在地下水长期作用下,会给桥梁桩基础作业带来诸多困扰。本文结合陆水河特大桥、中老铁路桥梁等工程案例,聚焦作业过程中地质不确定性、溶洞形态分化及地下水引发的各类难题,梳理地质钻探、物探探测与原位测试的协同勘察思路,并阐述泥浆造壁、钢护筒跟进等作业方案,明确卡钻、漏浆、埋钻等问题的处置路径,以期同类岩溶地层桥梁桩基础作业提供技术参考,进而强化作业安全性、高效性与质量管控,降低风险隐患及资金投入。

关键词 岩溶地层; 桥梁桩基础; 泥浆造壁法; 密闭压浆法

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.016

0 引言

交通基础设施逐步向复杂地质区域延伸,岩溶地层桥梁桩基础施工作业愈发常见。岩溶地层结构松散、溶洞形态多样、地下水动态起伏不定,易滋生塌孔、漏浆、卡钻等事故,干扰作业推进与质量管控,潜藏安全风险。同时,施工技术与复杂岩溶条件的适配性面临多重阻碍,需理清核心难点、完善技术策略并结合工程实例,结合多项工程实操经验,剖析作业难点、勘察路径及技术手段,为岩溶区域桥梁工程提供理论与实践双重支撑。

1 岩溶地层桥梁桩基础施工难点分析

1.1 地质条件复杂性带来的施工阻碍

岩溶地层地质条件繁杂,地层结构存在不确定性与不稳定性,不同区域岩溶发育强度、覆盖层属性差异显著,作业管控难度同步攀升。例如:中交四航局陆水河特大桥桥址区覆盖层为15~25 m砂砾层,无粘聚性、透水性佳、自稳能力弱,颗粒级配失衡易引发钻孔局部坍塌,下方溶洞与砂砾层直接贯通,构成“覆盖层—溶洞”联动风险格局,最大钻孔深度达75 m,远超常规桥梁桩基范畴,作业全程需维持孔内泥浆压力稳态,孔壁失稳极易诱发整体坍塌^[1]。中老铁路沿线桥梁岩溶发育处于中等至强烈区间,钻孔见洞率49%,岩芯破碎导致RQD值多低于30%,岩层完整性难以精准判定,部分区域分布斜面岩、凸起块石等特殊地质体,斜面岩最大倾角35°,凸起块石直径介于0.5~1.2 m,显著提升桩基钻进阻力,易造成钻头偏移,加大导向管控难度,需反复调整钻进参数,拖累作业进度。

1.2 岩溶形态多样性引发的施工难题

岩溶形态繁杂多样,作业难题同步升级,不同规模、类型与连通程度的溶洞,对作业工艺、设备甄选、质量管控的作用各不相同;多数伴随充填体滋生,给成孔及后续浇筑带来多重阻碍。例如:陆水河特大桥经超前勘察探明溶洞377处,形态涵盖孤立型、串珠型、连通型等,以串珠状垂直分布为主,最多叠加8层,单个溶洞最高22.5 m、最小0.8 m,部分呈全空状态,部分填充流塑粉质黏土或碎石,多层连通的复杂构造抬升成孔与充填难度,易诱发漏浆、塌孔问题。中老铁路桥梁岩溶形态划分为四类,高度超5 m的Ⅲ型串珠状溶洞及Ⅳ型地下水流通通道,连通性能优异、空间构造繁杂,不仅易引发塌孔,还会造成后续混凝土灌注超耗,最高超设计用量40%。醴娄高速公路湘江特大桥主墩桩基遭遇的串珠状溶洞最多8层,溶洞间连通通道狭窄,充填体稳固性欠佳,单根91.45 m深桩基受其干扰,需反复回填写复钻29次,回填材料累计达120 m³,作业耗时183天,较常规桩基施工周期超出两倍以上,大幅增加作业成本与安全风险。

2 岩溶地层地质勘察方法

2.1 地质钻探法

地质钻探法作为岩溶地层勘察核心技术,可精准捕捉溶洞区位、体量、充填物品类及岩层物理力学指标,为作业方案拟定、设备选配、风险预判提供数据支撑。勘察精准度直接决定后续作业安全性与适配性。陆水河特大桥作业前期,选用XY-4型岩芯钻机实施超前钻

作者简介:夏海涛(1993-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:道路与桥梁方向。

探, 孔间距管控在 5 ~ 8 m, 岩溶发育疑似区域加密至 3 m, 累计完成钻探孔 126 个, 明确溶洞填充物品类、洞高及连通状态, 划分全空、粉质黏土充填、碎石充填三类工况, 为钢护筒设计长度、钻进工艺参数设定提供核心支撑。长箐岩隧道勘察阶段, 钻孔 ZK1 搭载金刚石取芯钻头, 探测到 D3K413+850 桩位前方 11.8 m 处存在 2.5 m 高空洞, 洞顶岩层厚度 2.3 m, 与物探预测结果契合, 印证钻探法对小型溶洞定位及顶板厚度判定的可靠性能, 钻探需重点把控岩芯采取率, 破碎岩层采用双层岩芯管取芯技术, 搭配泥浆护芯工艺, 岩芯采取率从常规 65% 提升至 85% 以上, 保障对岩溶发育边界、岩层完整性及承载力特征的判定, 为后续作业规避重大风险。

2.2 物探探测法

物探探测法兼具大范围、非接触、高效能优势, 可快速划定岩溶异常区域, 弥补地质钻探法单点勘察、效能不足的短板, 为钻探点位优化提供方向。构建“物探圈定一钻探验证”协同勘察模式, 陆水河特大桥水上群桩作业中, 采用跨孔弹性波 CT 探测技术, 选取 10 个代表性桩位布设探测孔, 孔距控制在 2 ~ 3 m, 发射并接收弹性波信号, 分析波速变化特征, 划定岩溶发育异常区, 理清溶洞连通通道走向与宽度, 为后续钻探点位优化提供科学支撑。削减无效钻探孔数量, 勘察效能提升 30%, 该桥同步运用高密度电阻率法, 探测浅部 0 ~ 30 m 范围岩溶及土层分布状况, 电极间距 1 m, 分辨率达 0.5 m, 识别隐蔽溶沟、溶槽及砂砾层薄弱区

域, 缩小勘察盲区^[2]。物探与钻探的融合应用, 相较传统单一钻探法更具优势, 可强化岩溶勘察的全面性与精准度, 压缩勘察投入。陆水河特大桥依托该组合方法, 累计削减钻探工作量 20%, 勘察周期缩短 15 天, 为后续作业顺利开展筑牢根基。

2.3 原位测试法

原位测试法可于场地原生地质条件下直接获取地层力学指标, 规避室内试验样品扰动产生的偏差, 为勘察结果校验、施工参数设定、桩基承载力评定提供现场数据支撑, 是岩溶地层勘察的关键技术手段。陆水河特大桥在溶洞充填体区域开展标准贯入试验 (SPT), 完成 32 组测试工作, 试验深度覆盖 12 ~ 68 m, 结合不同深度充填体特性调整试验参数, 采用 63.5 kg 锤重、76 cm 落距标准, 得出充填粉质黏土标贯击数 N 值介于 8 ~ 15 击, 依托地区经验公式判定承载力特征值 120 ~ 180 kPa, 理清充填体承载能力边界, 为桩基持力层甄选提供核心支撑。中老铁路桥梁勘察阶段, 针对破碎岩层及溶洞顶板开展重型动力触探试验 (DPT), 触探深度达 75 m, 采用 100 kg 锤重、100 cm 落距试验标准, 通过锤击数变化曲线研判岩溶顶板厚度与完整性, K128+450 桩位处, DPT 试验显示顶板厚度仅 3.2 m, 锤击数骤降至 5 击以下, 判定顶板承载力不足, 及时调整桩基作业方案, 将原设计天然地基桩基改为嵌岩桩, 规避顶板坍塌隐患, 原位测试数据与钻探、物探结果相互校验, 强化勘察精准度, 为完善施工方案提供科学依据 (见表 1)。

表 1 勘察方法关键指标汇总表

勘察方法	工程案例	核心参数	提升效果
地质钻探法	陆水河特大桥	孔距 3 ~ 8 m, 采取率 ≥ 85%	采取率提升 20%+
物探探测法	陆水河特大桥	孔距 2 ~ 3 m, 分辨率 0.5 m	效率 +30%, 钻探量 -20%
原位测试法	陆水河特大桥	标贯击数 8 ~ 15 击, 承载力 120 ~ 180 kPa	误差降低 40%+
原位测试法	中老铁路桥梁	触深 75 m, 锤重 100 kg	准确率 ≥ 90%

3 岩溶地层桥梁桩基础核心施工方案

3.1 泥浆造壁法

泥浆造壁法作为岩溶地层桩基成孔基础工艺, 通过优化泥浆配比及性能指标, 在孔壁形成致密稳固泥皮, 维持孔内水压稳态, 阻隔地下水渗透与孔壁泥沙渗漏。适配岩溶地层强透水性、孔壁稳定性薄弱的特质, 陆水河特大桥针对砂砾层与溶洞贯通、透水性极强的地质状况, 经室内试验及现场试钻, 确定膨润土 +CMC+ 纯碱复合泥浆体系。管控泥浆核心指标: 比重 1.2 ~ 1.3g/cm³、黏度 22 ~ 28 s、含砂率 ≤ 2%、胶体率 ≥ 95%,

掺入 0.5% 聚丙烯酰胺强化泥浆黏结性能与护壁成效, 形成的泥皮厚度 2 ~ 3 mm, 可有效阻拦砂砾层颗粒流失。施工现场布设泥浆搅拌站及检测实验室, 每小时监测泥浆指标并及时调整配比, 破解砂砾层孔壁易坍塌难题, 该桥 32 根试验桩成孔合格率达 100%, 孔壁坍塌率控制在 0.3% 以内, 低于行业常规 3% 的风险阈值^[3]。中老铁路桥梁在破碎岩溶区域作业时优化泥浆工艺, 将胶体率提升至 95% 以上, 持续补浆使孔内水头高于地下水位 1.5 ~ 2.0 m, 形成稳定水压差, 阻隔地下水渗透, 规避泥浆渗漏引发的孔壁失稳, 为后续成孔及浇筑筑牢基础。

3.2 密闭压浆法

密闭压浆法适配溶洞充填体及岩层裂隙处置,高压作用下促使浆体充分渗透充填体孔隙与岩层裂隙,固化后形成整体稳固承载构造,强化地层承载效能。封堵渗漏路径,规避后续作业漏浆、混凝土渗漏问题。贵广高铁丹阳段桥梁作业区溶蚀裂隙密集分布,宽度 $0.1\sim 0.8\text{ mm}$,部分与地下水贯通,易造成混凝土大量渗漏,选用水泥—水玻璃双液浆压浆工艺,以P.042.5级水泥配制水泥浆,与水玻璃按1:0.5体积比混合,水玻璃模数管控在 $2.4\sim 3.0$,压浆压力调控在 $2.5\sim 3.0\text{ MPa}$,既保障浆体渗入细微裂隙,又可规避压力过高损毁岩层构造。压浆孔按 1.5 m 间距梅花形布设,累计压浆量达 $1\ 200\text{ m}^3$,压浆后取芯检测结果显示,溶洞充填体抗压强度从 0.8 MPa 攀升至 8.5 MPa ,裂隙封堵率超98%,有效填充各类裂隙,杜绝后续混凝土渗漏隐患。陆水河特大桥针对高度 $\leq 3\text{ m}$ 小型溶洞采用后压浆工艺。桩基浇筑7天后开展压浆作业,此时混凝土强度达设计强度70%,足以抵御压浆压力,压浆管延伸至溶洞区域。分级升压确保浆体充分扩散,桩基竖向承载力提升30%以上,契合设计标准。

4 施工过程中常见的问题及应对措施

4.1 卡钻问题及处理

卡钻属岩溶地层桩基作业高发故障,溶洞内凸起块石、破碎岩芯淤积、钻头嵌顿溶沟或泥浆黏度失常均可能诱发,处置核心在于规避强行提钻,防止钻头损毁、护筒形变或孔壁坍塌,需结合故障成因拟定针对性方案,兼顾问题解决与作业安全^[4]。中老铁路桥梁作业因岩溶发育繁杂,发生6起卡钻事故,4起源于破碎岩芯淤积,岩芯碎片粒径 $2\sim 10\text{ cm}$,在钻头周边堆积形成卡阻,采用“低压慢转+反向提拉”方式处置,钻机转速调控至 $5\sim 8\text{ r/min}$ 、提拉速率 0.1 m/min ,同步加大泥浆循环流量冲洗淤积区域,注入稀释泥浆将黏度从 28 s 降至 20 s ,削弱对岩芯的吸附作用,使岩芯随泥浆排出,平均处置时长控制在8小时内,孔壁保持完整状态,剩余2起为钻头嵌顿溶沟,溶沟狭窄且壁面坚硬,强行提拉易加剧钻头卡紧程度,在卡钻位置侧方布设2个注浆孔,注入水泥—水玻璃双液浆加固周边岩层,待浆体固化强度达 8 MPa 后,缓慢松动钻头并逐步提拉取出,规避孔壁坍塌风险,成孔质量不受干扰,管控钻进速率可降低卡钻概率,遇岩层突变时减速至 0.5 m/h ,每小时监测泥浆指标,及时微调黏度与比重参数^[5]。

4.2 漏浆问题及处理

漏浆为岩溶地层作业高发问题,溶洞连通性能强、岩层裂隙发育充分、孔壁泥皮破损均可诱发,按漏浆量划分为轻微漏浆($\leq 1\text{ m}^3/\text{h}$)与严重漏浆($> 5\text{ m}^3/\text{h}$)两类,需采取针对性处置手段,快速封堵漏点的同时保障孔壁稳态。陆水河特大桥作业期间累计出现28处轻微漏浆点,多集中在裂隙发育岩层区域,采用提升泥浆比重至 $1.3\sim 1.4\text{ g/cm}^3$ 、掺入0.3%锯末的方式封堵裂隙,锯末强化泥浆黏结性能,填补细微裂隙并形成致密泥皮,封堵成功率达100%,且成本低廉、耗时短,单处漏点平均处置时长仅30分钟^[6]。严重漏浆区域共计6处,最大漏浆量达 $8\text{ m}^3/\text{h}$,采用“抛填黏土+碎石混合物+压浆封堵”综合工艺,黏土与碎石体积比控制为2:1,选用塑性指数 ≥ 18 的优质黏土,碎石粒径 $5\sim 15\text{ cm}$,抛填厚度 $5\sim 8\text{ m}$ 构建临时封堵层,再以 $2.0\sim 2.5\text{ MPa}$ 压力高压压浆,注入水泥浆固化处理,将漏浆量管控在 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 以内。湘江特大桥串珠状溶洞区域提前布设预防措施,在孔周按 2 m 间距布设注浆孔,预注浆封堵溶洞通道,从源头削减漏浆事故,发生率较未预注浆区域降低75%,大幅提升作业效能。

5 结束语

在岩溶地层桥梁桩基础施工中,需综合考虑地质繁杂、形态多样及地下水作用影响。勘察精准度与施工方案适配性构成核心保障,“勘察—施工—故障处置”全流程管控模式下,结合工程实例优化勘察技术、甄选适配作业工艺,可有效规避各类安全与质量风险。泥浆造壁、钢护筒跟进等核心技术的合理应用,搭配卡钻、漏浆等常见故障的针对性处置,大幅强化作业质量与效能。未来,需深耕勘察与施工技术的融合创新,为更复杂岩溶地层桥梁桩基础作业提供可靠技术支撑。

参考文献:

- [1] 齐明山,王祥,王春凯.复杂岩溶地层盾构隧道施工变形分析[J].施工技术(中英文),2025,54(21):123-130.
- [2] 陈波,刘汉波.岩溶地层大直径钢管桩施工技术研究[J].山西建筑,2025,51(22):69-72,78.
- [3] 许增智,马如龙,薛亚东,等.岩溶地层盾构隧道下穿既有地铁隧道影响分析[J].现代隧道技术,2025,62(S1):497-505.
- [4] 崔泳炎,陈佳飞.桥梁桩基础钻孔灌注桩施工技术探讨[J].交通科技与管理,2025,06(13):93-95.
- [5] 贾凡鑫.岩溶地区公路桥梁桩基础设计浅析[J].江西建材,2025(10):201-203.
- [6] 吴晓生.公路桥梁桩基础施工中旋挖钻技术的应用分析[J].汽车周刊,2025(07):64-65.