

岩溶地区桥梁桩基施工风险评估与处治技术

谢华昌

中恒和信信息技术有限公司 海南海口 570100

摘要: 岩溶地区桥梁桩基施工受复杂地质条件制约, 风险突出且管控难度大。主要问题表现为地质勘察精度不足导致风险识别疏漏, 桩基成孔受溶洞、岩层界面影响难度高, 以及混凝土浇筑易出现流失、缺陷等问题, 致使承载力难以保障。对此, 需通过优化勘察方案提升风险识别精度, 针对成孔难题制定专项技术措施, 并强化混凝土浇筑全流程质量控制, 构建“勘察优化-成孔管控-浇筑保障”的风险处治体系, 确保桩基施工质量与结构安全。

关键词: 岩溶地区; 桥梁桩基; 施工风险评估

引言

岩溶地区溶洞、溶沟及地下水发育, 地质条件复杂多变, 给桥梁桩基施工带来严峻挑战。桩基作为桥梁承重核心, 其施工质量直接决定结构安全与耐久性。该区域施工常面临勘察不准、成孔困难、混凝土浇筑缺陷等风险, 易引发工程事故。因此, 系统开展施工风险评估, 针对性研发并应用高效处治技术, 对规避施工隐患、保障桩基质量及桥梁工程安全具有重要现实意义。

一、岩溶地区桥梁桩基施工面临的主要问题

(一) 地质勘察精度不足, 风险识别不全面

岩溶地质具有极强的复杂性与隐蔽性, 溶洞的分布、规模、形态及填充物性质存在较大不确定性。部分工程为缩短勘察周期、降低勘察成本, 仅采用常规钻探手段, 勘察点密度不足, 难以全面反映岩溶发育情况。例如, 某桥梁工程勘察阶段仅布置少量钻孔, 未发现桩基施工区域存在的小型串珠状溶洞, 施工过程中钻孔突然坍塌, 导致钻机损坏, 延误施工进度。此外, 部分勘察单位对勘察数据的分析解读不够深入, 未能准确判断溶洞的稳定性及对桩基施工的影响, 导致风险评估结果与实际情况存在较大偏差, 无法为施工提供可靠依据。

(二) 桩基成孔难度大, 施工质量控制困难

岩溶地区地质条件的复杂性, 使得桩基成孔过程中塌孔、漏浆、卡钻、孔斜等问题频发, 施工质量控制面临极大挑战。在溶洞密集发育区域, 若溶洞顶板厚度不足1米或为风化软弱岩层, 钻孔机械产生的振动与竖向压力极易突破顶板承载极限, 引发突发性塌孔, 不仅造成钻具掩埋、工期延误, 还可能导致孔壁大面积坍塌,

增加后续处理难度。对于空溶洞或填充体为松散砂土、碎石的溶洞, 钻孔时泥浆会通过溶洞裂隙快速渗透流失, 短时间内出现孔内液面骤降, 不仅需频繁补浆影响成孔效率, 还会因泥浆护壁效果失效引发孔壁失稳。同时, 岩溶区域岩层多呈“软硬交互”分布, 钻头在硬岩段受力集中、进尺缓慢, 转入软岩段后易因阻力突变导致钻孔偏斜, 若偏差超过规范要求(通常不大于1%), 会直接降低桩基竖向承载力与抗剪性能。更值得关注的是, 部分施工单位存在“重进度、轻质量”的误区, 未根据实时地质情况调整钻孔速度(硬岩段盲目加压、软岩段过快推进), 泥浆比重控制偏离设计值(通常为1.1-1.3), 进一步加剧了成孔风险, 给桩基施工质量埋下重大隐患。^[1]

(三) 桩基混凝土浇筑易出现缺陷, 承载力难以保障

混凝土浇筑是桩基施工的关键环节, 岩溶地区特殊的地质条件易导致混凝土浇筑出现缺陷。当桩基施工区域存在溶洞时, 若未进行有效处理, 浇筑过程中混凝土易流入溶洞, 导致桩身出现断桩、缩颈等问题; 若溶洞内存在地下水, 会稀释混凝土, 降低混凝土强度, 影响桩基承载力。某桥梁工程桩基浇筑过程中, 因未发现桩底存在的隐蔽溶洞, 混凝土浇筑完成后出现明显沉降, 经检测发现桩底混凝土与地基结合不紧密, 承载力未达到设计要求, 不得不进行补桩处理。此外, 混凝土浇筑过程中若导管埋深控制不当, 易出现夹渣、离析等问题, 进一步影响桩基质量。

二、岩溶地区桥梁桩基施工风险处治策略

(一) 优化地质勘察方案, 提高风险识别精度

为全面准确掌握岩溶地质情况, 破解岩溶地质隐蔽

性与复杂性带来的勘察难题,需构建“全域覆盖、分层探测、精准解读”的综合勘察模式,将多种勘察技术有机融合,形成优势互补的勘察体系。地质勘察作为桩基施工的前置核心环节,其精度直接决定风险评估的可靠性,必须摒弃单一勘察手段的局限性,实现从宏观区域地质判断到微观溶洞特征探测的全方位覆盖。首先,开展施工区域全域地质测绘,结合卫星遥感影像与地面地质调绘,梳理区域地质构造脉络,明确岩溶发育的宏观规律与控制因素,为后续勘察划定重点区域。在此基础上,引入物探技术进行大面积初步勘察,其中地质雷达凭借高频电磁波探测优势,可快速识别地下30米范围内的溶洞、溶沟分布,分辨率达0.1米,能精准圈定岩溶发育异常区;高密度电法则通过测量地下介质电阻率差异,有效区分空溶洞与填充溶洞,尤其适用于黏性土覆盖层较厚的区域,两者配合可实现勘察效率与初步探测精度的双重提升。^[2]

当通过物探技术圈定岩溶发育可疑区域后,需针对性加密钻孔布置,将勘察点密度提升至常规区域的1.5~2倍,确保钻孔间距不超过10米,实现对可疑区域的密集覆盖。钻探过程中采用岩芯连续取样技术,严格控制岩芯采取率不低于90%,通过岩芯观察精准判断岩层岩性、溶洞顶板厚度及填充物成分——若岩芯出现破碎带或空洞痕迹,需立即记录深度并扩大钻探范围。对于钻探发现的溶洞,需详细记录其顶底板标高、横向跨度及填充情况,若为填充溶洞则取样分析填充物的密实度、含水率及承载力指标,为后续处治方案提供基础数据。针对深度超过50米的深层溶洞,常规钻探难以全面反映其内部形态,需引入声波测井与钻孔电视技术,声波测井通过分析声波在不同介质中的传播速度,判断溶洞延伸范围及围岩完整性;钻孔电视则借助高清摄像头实时传输地下影像,直观呈现溶洞内壁形态、裂隙发育情况及有无地下水活动,实现对深层溶洞的可视化探测。勘察数据的分析解读与应用同样关键,需建立标准化的岩溶地质数据库,将地质测绘、物探、钻探及测井数据分类录入,形成包含溶洞位置坐标、规模参数、地质环境等信息的三维地质模型。依托该模型采用FLAC3D等数值模拟软件,模拟桩基施工过程中溶洞顶板的应力变化规律,量化评估溶洞坍塌风险;同时结合桩基设计参数,分析不同岩溶条件对桩基承载力的影响程度,划分高、中、低三个风险等级。此外,需组织地质勘察、结构设计及施工技术人员开展联合评审,对勘

察数据与模拟结果进行交叉验证,避免因单一数据偏差导致的风险误判,最终形成详实的勘察报告,明确各桩基点位的岩溶特征及风险等级,为施工方案制定提供精准、可靠的技术依据。

(二) 针对成孔难题,制定专项施工技术措施

成孔质量是决定桩基承载性能的核心前提,岩溶地区桩基成孔过程中,塌孔、漏浆、卡钻、孔斜等问题频发,需建立“溶洞分类施策、过程动态调控”的专项技术体系,针对不同规模、填充状态的溶洞制定精准化施工方案,同时强化全过程监测与应急处置,确保成孔质量符合规范要求。^[3]

对于直径 $<1\text{m}$ 的小型溶洞,因其对成孔稳定性影响相对较小,可采用“直接钻孔+泥浆护壁强化”的一体化技术方案,但需重点把控泥浆性能参数与钻孔节奏。钻孔前需根据地质勘察报告明确溶洞分布深度,当钻头接近溶洞区域时,适当降低钻孔速度,避免冲击荷载导致溶洞顶板突发破裂。泥浆配置需采用高黏度、高比重的复合泥浆,将泥浆比重控制在 $1.2\sim 1.4\text{g}/\text{cm}^3$,黏度维持在 $25\sim 30\text{s}$,同时掺入适量膨润土与纤维素醚,增强泥浆的悬浮携渣能力与孔壁胶结效果。钻孔过程中安排专人实时观测泥浆面高度,若出现轻微漏浆现象,及时补充泥浆并适当提高泥浆比重,确保孔壁始终处于稳定状态,避免因泥浆流失导致孔壁坍塌。针对 $1\text{m}\leq\text{直径}<3\text{m}$ 的中型溶洞,其顶板承载能力有限且易出现大面积漏浆,需采用“片石黏土回填+注浆加固+二次钻孔”的组合技术。首先停止钻孔作业,清理孔内残留泥浆与岩渣,然后向孔内填入粒径 $10\sim 20\text{cm}$ 的坚硬片石与塑性黏土,片石与黏土的混合比例控制在 $3:2$,回填高度需超出溶洞顶板 50cm 以上,形成初步支撑结构。随后采用高压注浆技术进行加固处理,选用42.5级普通硅酸盐水泥配置水泥浆,水灰比控制在 $0.8\sim 1.0$,注浆压力根据溶洞填充情况设定为 $1.5\sim 2.0\text{MPa}$,通过预埋注浆管分批注浆,确保浆液充分填充溶洞空隙并与周围岩层胶结。注浆完成后需静置72小时以上,待浆液强度达到设计值的70%后,采用小直径钻头进行先导孔探测,确认加固效果达标后再进行正常钻孔作业。对于直径 $\geq 3\text{m}$ 的大型溶洞或串珠状溶洞,常规处理方式难以保障成孔安全,必须采用“钢护筒跟进+分级支护”技术。钢护筒选用厚度 $12\sim 16\text{mm}$ 的Q235钢板卷制,内径比钻孔直径大 10cm ,护筒连接采用焊接方式并做好防腐处理。当钻孔至溶洞顶板上方 1m 处时,停止钻孔并吊装第一节钢护筒,通过振动

沉管法将护筒下沉至溶洞顶板以下2m处，形成第一道刚性防护。若溶洞高度超过5m，需分段吊装钢护筒，每节护筒长度控制在3-4m，相邻护筒采用法兰连接并焊接牢固，确保护筒垂直度偏差不超过1‰。钢护筒安装完成后，向护筒与孔壁之间的空隙填入碎石与水泥浆混合物，进一步增强支护稳定性，随后再继续向下钻孔，直至达到设计孔深。钻孔全过程需配备自动化监测设备，实时采集钻孔速度、钻杆垂直度、泥浆压力等参数，当监测数据出现异常波动时，立即停止作业并分析原因。若出现孔斜问题，当倾斜度小于1%时，采用钻杆导向纠偏法调整；若倾斜度超过1%，需回填片石至倾斜位置上方1m处，重新钻孔纠偏。同时现场需储备应急物资，包括备用泥浆、片石、小型注浆设备等，针对突发塌孔、卡钻等事故制定快速处置流程，确保在最短时间内控制风险，保障成孔施工顺利推进。^[4]

（三）强化混凝土浇筑质量控制，保障桩基承载力

混凝土浇筑是岩溶地区桥梁桩基施工的“最后一道防线”，直接决定桩基承载性能与耐久性。岩溶区域的溶洞、地下水及岩层界面易引发混凝土流失、强度衰减等问题，需建立“前置管控-过程精控-后置强化”全流程体系，将技术措施贯穿浇筑全环节，确保质量达标。

浇筑前精细化准备是质量基础，核心为消除孔底隐患与优化浇筑条件。针对孔底岩渣、填充物残留问题，采用“气举反循环法”清理，直至泥浆含砂率低于2%。积水处理按需施策：深度小于30cm用海绵球配合吸水泵吸干，超30cm或持续渗漏时设临时集水井动态排水。同时二次复核溶洞区域，以孔内摄影确认填充密实度，缝隙处提前注水泥净浆封堵。设备调试与配合比优化同步推进，导管水压试验压力不低于0.6MPa，混凝土初始坍落度控制在180-220mm，扩展度不小于500mm，保障流动性与填充性。浇筑过程动态管控是防缺陷关键，需严控工艺、性能及异常处置。优先采用导管法水下浇筑，导管距孔底30-50cm，首次浇筑需确保导管埋深一次性达1.5m以上，通过“拔球法”快速封底。专人每30分钟检测混凝土坍落度与和易性，坍落度损失时规范掺减水剂调整，严禁直接加水。导管埋深实时控制在2-6m，避免夹渣或堵管。浇筑至溶洞区域时放慢速度，若混凝土面上升速度低于正常50%，暂停后用孔内声呐定位，通

过“导管提升+补注混凝土”填充后再施工。特殊溶洞区域需用“桩身强化+桩底注浆”提升承载力。钢筋笼制作时，沿桩身每2m设加强箍筋，溶洞对应位置加密螺旋箍筋；桩底预设3-4根Φ50mm注浆管并固定。混凝土强度达设计值70%（约7-10天）后开展注浆，采用42.5级早强水泥，水灰比0.5-0.6，注浆压力从0.5MPa逐步升至1.5-2.0MPa，至注浆量达标且压力稳定3分钟以上停止，完成后封堵注浆管。浇筑后养护与检测不可忽视。12小时内覆盖土工布洒水保湿，高温干燥时加覆塑料薄膜，养护不少于14天，期间禁行大型机械。养护完成后，以超声波透射法检测桩身完整性，低应变动力检测验证桩底注浆效果，确保桩基无断桩、缩颈等缺陷，承载力满足设计要求。^[5]

结语

岩溶地区桥梁桩基施工的风险管控是系统工程，勘察精度不足、成孔困难等问题直接关乎工程安全。立足施工实际，以精准勘察为前提，针对性破解成孔难题，强化混凝土浇筑全流程管控，构建“风险识别-专项处治-质量保障”的完整体系，是化解风险的关键。唯有将技术措施与现场实际深度融合，才能有效规避施工隐患，保障桩基承载性能，为岩溶地区桥梁工程的安全与耐久性提供坚实支撑。

参考文献

- [1]李拯稷, 谭木荣, 武照收, 高贯伟. 岩溶地区深厚卵石层地层中跨江桥梁桩基施工技术[J]. 工程建设与设计, 2024, (16): 212-214.
- [2]李宗卫, 史佩韶. 岩溶地区公路桥梁桩基施工技术难点与对策应用[J]. 建筑机械, 2024, (08): 97-100+107+4.
- [3]钱富林. 岩溶地区铁路桥梁桩基施工工艺[J]. 四川建材, 2024, 50(06): 123-125.
- [4]刘晓波, 李程, 王其合. 邻近既有铁路岩溶路基的新建桥施工风险评估[J]. 城市轨道交通研究, 2023, (S2): 64-69.
- [5]姚建斌. 高速公路拼宽桥梁跨岩溶区施工风险、质量及进度管理分析[J]. 科技风, 2018, (18): 107.