

桥梁桩基在岩溶地质条件下的成孔与灌注施工技术

杨佩栋

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

摘 要：岩溶地质条件下桥梁桩基施工面临地层软硬不均、溶洞发育、地下水活跃等复杂工况，成孔与灌注过程中的漏浆、塌孔、卡锤及混凝土超灌等事故频发，严重制约工程质量和进度。本文系统分析了岩溶地质的发育特征及其对桩基施工的主要风险，围绕成孔阶段的地质探测与预处理、冲钻孔工艺优化、泥浆护壁与溶洞封堵，以及灌注阶段的钢筋笼精准定位、水下混凝土密实灌注和桩身完整性保障等核心工序，论述了成套关键技术措施。研究表明，岩溶区桩基施工应遵循“先探后钻、边钻边护、灌注可控”的原则，综合运用超前钻探、预注浆和动态泥浆调控等手段，可有效规避施工风险，确保成桩质量。

关键词：桥梁桩基；岩溶地质；成孔施工；灌注施工；溶洞处理

引言

我国碳酸盐岩分布广泛，岩溶地貌在西南、华南等地发育典型。随着交通工程向复杂地质区延伸，桥梁桩基常需穿越溶洞、裂隙及破碎岩层。岩溶地层具有空洞多、基岩面起伏大、地下水活跃、充填物多变等特点，易引发钻孔偏斜、泥浆流失、孔壁坍塌及混凝土超灌甚至断桩等问题，对施工技术提出更高要求。近年来，高密度电法、地质雷达、跨孔 CT 等物探手段提升了溶洞探测精度；钢护筒跟管钻进、超前注浆、高压旋喷帷幕等工艺有效控制成孔风险；水下灌注监测技术亦持续优化。然而，岩溶发育具高度随机性与隐蔽性，单一技术难以应对所有挑战，亟需构建集勘察、防护、灌注与应急于一体的系统化施工技术体系。

1 岩溶地质特征与桩基施工风险分析

1.1 岩溶发育形态与工程分类

岩溶是可溶性岩石（以石灰岩、白云岩为主）在地下水长期溶蚀作用下形成的特殊地质现象。按形态可划分为：溶洞（洞穴型、管道型）、溶蚀裂隙（张开裂隙、溶沟溶槽）、溶蚀漏斗和地下暗河等。从桩基施工角度，可将其工程特性分为三类：填充型溶洞——洞内充填黏土、砂砾或碎石，具有一定的自稳能力但承载力差异大；空洞型溶洞——内部无填充或仅少量填充物，顶板厚度不一，钻孔穿越时易发生泥浆瞬时漏失；串珠状溶洞——多个溶洞在竖向重叠分布，形成多层空洞，使钻头反复遇空，施工难度最大。此外，基岩面的大幅

起伏导致同一桩孔内软硬交替频繁，钻头在软硬界面容易偏斜，直接影响成孔垂直度。

1.2 成孔阶段的主要施工风险

成孔是岩溶桩基施工风险最集中的环节。当钻孔揭露溶洞顶板瞬间，泥浆沿溶洞空间或联通裂隙大量流失，孔内液面急剧下降，孔壁失去泥浆柱压力支撑，极易发生坍塌。若塌体较大，可能埋钻甚至造成废孔^[1]。在串珠状溶洞地段，钻头反复穿越空区和岩层，冲击钻头易因受力不均而偏斜，钢丝绳磨损加剧，存在断绳掉锤的风险。同时，溶洞发育区往往伴随地下水强径流，地下水流动冲刷孔壁和携带泥沙，进一步恶化孔壁稳定性。若处理不当，成孔后的桩孔在放置钢筋笼期间也可能因泥浆渗漏导致缩径或塌孔，使得后续工序无法进行。

1.3 灌注阶段的主要质量隐患

灌注阶段的隐患主要集中在混凝土流失和桩身完整性两方面。当桩孔与溶洞或裂隙连通时，灌注的混凝土在压力作用下挤入溶洞空间，造成混凝土超灌量大幅增加，且超灌量难以预控。更为严重的是，若溶洞空间过大或与暗河相通，混凝土可能持续流失而无法形成有效桩体，导致断桩。此外，溶洞充填物在混凝土冲击下可能混入桩身，形成夹泥或离析缺陷。在水下混凝土灌注过程中，由于岩溶区基岩面凹凸不平，导管底口距孔底高度的控制难度增加，首灌混凝土的冲散效果可能不足，导致桩底沉渣过厚或混凝土不密实。上述隐患若在成桩后通过检测方被发现，往往难以补救，因此必须在

灌注过程中加以控制。

2 成孔阶段的关键施工技术

2.1 施工前地质勘察与溶洞探测

在常规详勘基础上,岩溶区桩位应实施逐桩超前钻探,采用 XY 型岩芯钻机在桩位中心及周边(距中心 0.5~1.0m)布设勘探孔,查明桩底以下 5~10m 范围内的溶洞分布、顶板厚度、充填性质及地下水情况。对于重要桥梁或地质特别复杂的桩位,宜补充跨孔弹性波 CT 或管波探测法,获取桩周岩体的波速成像,判识隐伏溶蚀带和破碎区间。超前钻探资料应绘制成“一桩一图”的地质剖面,标注每层岩性界面、溶洞顶底板标高和充填状态,作为成孔工艺选择和溶洞处理方案设计的直接依据。

2.2 成孔设备选型与工艺匹配

岩溶桩基成孔设备主要选用冲击钻机或旋挖钻机,两者各有适用条件。冲击钻机依靠钻头自重和冲击力破碎岩石,对硬岩和含孤石的溶洞地层适应性强,且冲击作用能一定程度挤密孔壁,在空洞型溶洞段形成孔壁稳定效应,是岩溶区最常用的成孔设备。但其工效较低,且对垂直度控制要求较高。旋挖钻机成孔速度快,在填充型溶洞和土层中优势明显,但遇大型空洞时易出现钻具突然下陷和泥浆漏失,需配套钢护筒或泥浆补充措施方可使用。工艺选择应遵循“软岩填层用旋挖、硬岩空区用冲击”的匹配原则。当桩孔穿越多个溶洞时,可考虑冲击钻与旋挖钻联合施工——上部覆盖层采用旋挖钻进,进入岩层后改用冲击钻穿越溶洞区,取各自之长。

2.3 钢护筒跟进与多层护壁技术

在常规地质中,护筒长度一般为 2~4m,但在岩溶区,特别是表层覆盖层松散或存在浅埋溶洞时,护筒需加长并采取跟进措施。护筒跟进是指随钻孔加深,通过振动锤将护筒逐节压入土层或岩层中,使护筒底部始终紧跟钻头,从而在孔口段形成刚性防护。对于深部溶洞,单层护筒无法到达,可采用“外护筒+内护筒”的多层结构,内护筒穿越溶洞段,外护筒固定于上部稳定地层。另一种护壁技术是泥浆护壁,通过高粘度、高比重泥浆在孔壁形成泥皮,堵截裂隙渗漏^[2]。在漏失严重的孔段,可掺入锯末、纸浆纤维或水泥等堵漏材料,提高泥浆的封堵能力。泥浆指标应动态调整——正常钻进时比重控制在 1.15~1.25g/cm³,穿越溶洞前提高至 1.30~1.40g/cm³,并储备足量的备用泥浆以应对突发漏失。

2.4 溶洞预处理与加固方法

当超前钻揭示溶洞规模较大(洞高>3m)或顶板厚度不足时,应在成孔前或成孔过程中实施预处理。注浆法是最常用的预处理方式:通过钻孔向溶洞内注入水泥浆或水泥-水玻璃双液浆,填充溶洞空间并固结松散充填物,提高地层完整性。注浆压力一般控制在 0.5~2.0MPa,注浆顺序由外围向中心、由下部向上部,直至吸浆量显著减小且达到设计压力。对于大型空洞或地下水丰富的溶洞,可采用高压旋喷注浆形成止水帷幕,切断地下水的补给通道。若溶洞位于桩底以下,注浆的目的在于提高桩端持力层的完整性,防止桩底沉陷。对于已填充的软塑状黏土充填溶洞,可采用“挤压+注浆”联合工法——先用冲击锤反复冲击挤压充填物使其密实,再注入水泥浆固化,形成人工持力层。预处理完成后应进行取芯检验,验证加固效果。

3 灌注施工的关键技术

3.1 终孔验收与清孔质量控制

成孔达到设计标高后,须对孔深、孔径、垂直度和孔底岩性进行严格验收。尤其要核实桩底以下一定深度内(视设计要求,通常为 3~5 倍桩径)无未处理的溶洞,确保持力层厚度满足要求。清孔是连接成孔与灌注的关键环节。岩溶区的清孔有别于普通地层——因溶洞和裂隙的存在,孔底沉渣可能来源于孔壁坍塌块体或溶洞充填物的剥落,清孔难度大。清孔应采用气举反循环工艺,利用压缩空气提升泥浆循环速度,将大颗粒钻渣携带出孔^[3]。清孔后沉渣厚度必须满足设计要求(一般摩擦桩不大于 200mm,端承桩不大于 50mm)。清孔过程中需连续补充新鲜泥浆,保持孔内水头高度,防止因循环扰动导致孔壁失稳。

3.2 钢筋笼制作与精准下放

由于岩溶区基岩面起伏,桩长可能根据实际地质情况调整,钢筋笼的分节长度应结合成孔深度和溶洞位置合理划分,避免接头处于溶洞段内。钢筋笼主筋接头应采用机械连接(直螺纹套筒)或双面搭接焊,同一截面接头面积百分率不得超过 50%。下放钢筋笼时,应使用吊车或卷扬机匀速下放,严禁猛提猛放。当钢筋笼下放遇阻时,应立即停止,查明原因——可能是孔壁缩径或塌落物堆积,此时不得强行下压,应二次清孔或扫孔后再行下放。钢筋笼定位应采用定位筋或专用定位装置,确保保护层厚度均匀,避免钢筋笼偏位导致局部保护层不足。

3.3 水下混凝土灌注工艺控制

岩溶区的灌注难度在于混凝土可能向溶洞侧向流失,导致实际灌注高度难以准确判断。为此,应选用大直径导管(内径300~350mm)并确保导管密封性,首灌混凝土量需经计算确定,保证导管底口初次埋深不小于1.0m。灌注过程中,导管埋深应控制在2~6m之间——埋深过浅易发生断桩和混浆,埋深过深则混凝土流动阻力大,导管难以拔出。对于预测可能发生混凝土流失的孔段(即溶洞段),应提前增加混凝土储备量,并在灌注至该段时适当放慢灌注速度,使混凝土有足够时间填充溶洞空隙,同时观察孔口泥浆液面变化,判断混凝土是否向溶洞逸散^[4]。若出现液面不升反降且混凝土灌注量远大于理论值时,表明发生漏失,应立即停止灌注并分析连通空间规模,酌情决定是继续灌注还是采取回填处理措施。

3.4 桩顶超灌与成桩质量保障

为保证桩顶混凝土质量,实际灌注标高应高出设计桩顶标高0.5~1.0m(岩溶区宜取较大值),待混凝土终凝后凿除超灌部分。超灌高度的作用是补偿浮浆层和离析层,确保桩顶以下混凝土的均匀性和强度满足要求。在灌注接近桩顶时,应严格控制导管提升速度,并增加混凝土坍落度检测频次(每盘检测),确保混凝土具有良好的流动性和和易性。最终灌注结束时,应确认混凝土顶面标高符合要求,且导管埋深不小于2m后方可缓慢拔出导管。拔出过程中应保持导管垂直,避免触碰钢筋笼。

4 质量检测与缺陷处理技术

4.1 成桩完整性检测方法

声波透射法是最适用于岩溶区大直径灌注桩的检测手段——在钢筋笼上预埋声测管,通过测量超声波在桩身混凝土中的传播时间、波幅和频率变化,判识桩身是否存在空洞、夹泥、离析等缺陷。该方法可覆盖全桩长,且检测结果直观可靠。对于直径较小或未埋设声测管的桩,可采用低应变反射波法进行普查,该方法效率高、成本低,但对桩头处理和检测人员经验要求较高。当声波透射法或低应变法发现异常时,应进一步采用钻芯法验证,钻取混凝土芯样观察其连续性、胶结情况和骨料分布,并对芯样进行抗压强度试验。钻芯法虽为局部抽样,但结果直观,是缺陷判定的重要依据。

4.2 常见缺陷成因分析

岩溶区灌注桩的典型缺陷包括:桩身局部夹泥——

多由混凝土灌注过程中溶洞充填物塌落混入造成,表现为声波检测中波速突变且幅度明显衰减;桩底沉渣超厚——清孔不彻底或清孔后等待时间过长导致沉渣重新沉积,端承桩尤需警惕;混凝土离析——导管理深不足或混凝土流动性差导致,缺陷多发生于导管接口附近;桩体缩径——在溶洞段因混凝土挤入溶洞后孔壁坍塌所致。分析缺陷成因时应结合施工记录(包括灌注速度、导管理深、混凝土用量和泥浆变化等)综合判断,为后续修补提供依据。

4.3 缺陷修补技术

对检测确认的缺陷桩,应视缺陷位置和严重程度采取相应措施。桩顶浮浆和浅层夹泥可通过开挖后剔凿并接桩处理。桩身中部的局部夹泥或离析段,若缺陷长度较小且位于非关键受力区,可采用高压注浆法修补——钻孔至缺陷部位,注入环氧树脂或超细水泥浆,填充空隙并提高密实度。对于桩底沉渣超厚的情况,可采用桩底后注浆技术,在桩身预留注浆管,通过高压劈裂注浆固结沉渣并改善桩端承载力。若缺陷严重且无法修补,或经承载力验算不满足要求,则须在临近位置补桩,原桩作为摩擦桩或废弃。

5 结语

岩溶地质条件下的桥梁桩基施工,其核心挑战在于地质条件的高度变异性与不可预知性。本文系统分析了溶洞、裂隙等岩溶形态对成孔和灌注工序的主要风险,并提出了涵盖超前探测、设备选型、护壁稳定、溶洞预处理、清孔控制、灌注工艺和质量检测的全过程技术体系。研究表明,成功应对岩溶区桩基施工的关键在于“探明先行、分类施策、动态控制”——充分的地质信息是决策基础,针对不同溶洞类型采取适配的成孔和灌注方案,施工过程中根据泥浆变化和混凝土用量实时调整参数。随着地质探测精度的提高和智能化施工监测手段的应用,岩溶区桩基施工的风险管控能力将持续增强。

参考文献

- [1] 龚晓南,王卫东,陈仁朋.岩溶地区桩基设计与施工技术研究进展[J].岩土工程学报,2023,45(2):211-223.
- [2] 张忠苗,杨建民,孔纲强.复杂岩溶地基中钻孔灌注桩施工风险控制[J].中国公路学报,2022,35(6):127-136.
- [3] 刘松玉,章定文,杜延军.岩溶区桩基溶洞探测与注浆加固技术[J].地下空间与工程学报,2024,20(1):89-97.
- [4] 王建华,赵春风,赵程.大直径深长桩基水下混凝土灌注质量控制[J].建筑结构学报,2023,44(5):244-252.