

复杂地质条件下溶洞处理的桩基施工技术分析

张雨

中铁十六局集团第一工程有限公司，北京 101300

DOI:10.61369/ERA.2026090036

摘 要：针对复杂岩溶区桩基施工难题，系统分析了溶洞发育规律、漏浆机理及施工风险。采用钻探与物探联合探测识别溶洞空间形态并划分等级，据此提出分级处理技术：小型充填溶洞以高稠泥浆配合黏土回填，中型半充填溶洞采用预注浆，大型空溶洞及多层溶洞用钢护筒跟进，连通富水溶洞实施泄压导水与复合填料回填。同时，从泥浆护壁、钻进参数和混凝土灌注等环节强化全过程质量控制，保障成桩质量。

关 键 词：岩溶地质；溶洞探测；桩基成孔；漏浆处置；施工质量控制

Analysis of Pile Foundation Construction Technology for Caverns under Complex Geological Conditions

Zhang Yu

China Railway No.16 Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Beijing 101300

Abstract： To address the construction challenges of pile foundations in complex karst areas, the development patterns of karst caves, the leakage mechanism, and the construction risks were systematically analyzed. The spatial forms of karst caves were identified and classified through the combined use of drilling and geophysical exploration, and a hierarchical treatment technology was proposed based on this: small-sized karst caves were filled with high-viscosity mud mixed with clay for backfilling; medium-sized semi-filled karst caves were treated with pre-grouting; large-scale empty karst caves and multi-layered karst caves were protected with steel shields, and pressure relief and water drainage were implemented for connected water-rich karst caves, followed by composite filling with backfill materials. At the same time, the quality control throughout the process was strengthened in aspects such as mud wall protection, drilling parameters, and concrete pouring to ensure the quality of pile foundation construction.

Keywords： karst geology; karst cave detection; pile foundation drilling; leakage disposal; construction quality control

引言

岩溶地区桩基施工中，溶洞引发的漏浆、塌孔是影响成桩质量与施工安全的主要难题。此类地层溶洞形态多变、充填状况复杂，加之岩溶水动力条件活跃，单一处治措施往往难以应对。目前普遍存在探测手段单一、处理方案针对性不强、施工过程质量控制粗放等问题，亟须构建从探测识别、分级处置到过程管控的完整技术思路。本文结合工程实际，围绕“先探后治、分级处置、全程管控”这一主线，对不同类型溶洞的处置方案及施工控制要点展开分析，以期为类似工程提供参考。

一、岩溶区域地质、溶洞发育及成孔漏浆风险概况

（一）区域地质构造与岩溶发育规律

在这个区域之内，构造是以紧密的褶皱以及压扭性的断裂为主，核的部位岩体是破碎的。广泛分布的可溶性比较强的碳酸盐岩，在构造裂隙密集发育的部位，溶蚀的情况尤其强烈，溶洞在平面上沿着断裂带以及褶皱轴呈现出带状分布的状态，在垂向上

从浅部的溶沟向中部的水平溶洞以及深部溶蚀减弱的方向递变。在构造的交汇之处容易形成连通的溶洞群，这会增加桩基漏浆的风险。

（二）溶洞形态规模、填充状态及溶洞等级划分标准

在这个区域内的溶洞大多呈现出囊状、廊道状，洞的高度从数十厘米到十余米不等。按照充填的状态可以分为全充填、半充填以及空溶洞这三类，充填的物质是以黏土夹碎石为主。综合考

虑洞的高度、充填的程度以及连通性，把它们划分为四个等级：洞的高度0—4米的是小型充填溶洞，4至8米的是中型半充填溶洞，大于8米的是大型空溶洞，在垂向上叠置且水力联系密切的为多层连通溶洞，并以此作为后续处置的依据^[1]。

（三）岩溶水力条件引发桩基成孔漏浆作用机理

岩溶水动力的条件是造成漏浆的核心的诱因。桩孔把溶洞的顶板揭穿之后，孔内的泥浆和溶洞水体的压力失去平衡，泥浆在压差的驱动之下沿着裂隙快速地向下滑。漏浆的剧烈程度取决于溶洞的规模、裂隙的开度以及地下水流的流速。连通性良好的富水溶洞动水的条件非常强烈，不仅会大量地吞纳泥浆，还会持续地稀释浆液，导致护壁失去效果。在穿越多层溶洞的时候，上部的泥浆向深层进行补给，浆面会突然下降，非常容易发生塌孔的情况。

（四）复杂地层组合下不同等级溶洞漏浆、塌孔施工风险识别

不同等级溶洞风险差异明显：小型充填溶洞漏浆缓慢可控；中型半充填溶洞顶板击穿时泥浆面骤降，孔壁易失稳；大型空溶洞击穿后泥浆大量流失，易塌孔甚至地面塌陷。基岩破碎带与多层连通溶洞叠加时，浆液沿裂隙及洞穴系统逸散，护壁急剧恶化，塌孔可延伸至孔口，处置难度最大，需预先识别此类风险^[2]。

二、溶洞精准识别探测技术

（一）超前钻探与物探联合探测的孔位布设原则

超前钻探与物探联合进行探测的孔位布设遵循“一桩一孔、重点加密”的原则。每根桩位都布置一个先导勘探的孔，兼顾钻探取样与物探测井的需求。地质异常的区段加密布设跨孔物探的观测系统，剖面的方向垂直于主要构造的走向，确保能够有效捕捉溶洞空间展布的特征。钻探的孔位与物探的测线实行同点布设，实现钻探揭示的孔内信息与物探反演的孔间数据相互校验，为准确划分溶洞的边界提供可靠的依据。

（二）钻探取样溶洞特征判别方法

钻探取样过程中，溶洞的存在及其充填特征主要通过钻进速度突变、掉钻、冲洗液大量漏失及岩芯采取率急剧下降等现象综合判别。在钻进比较平稳遇到阻碍之后突然加速，常常是指示着钻头进入了空腔的位置，这个时候钻具自然下落的情况就是掉钻，能够根据这个来估算出溶洞净空的高度。取上来的岩芯能够非常直观地揭示出充填物的性质情况：如果是黏土、碎石角砾混合在一起的，那就是全充填的情况；如果仅仅底部有堆积物，那就是半充填的情况；如果没有见到充填物，仅仅见到溶蚀晶洞，那就是空溶洞的情况。冲洗液消耗量急剧增大且孔口不返浆，说明溶洞连通性良好，可将其作为划分溶洞等级的直接依据。

（三）物探手段溶洞空间范围探测与等级预判

物探方法是用来弥补钻探“一孔之见”这种局限的情况的，主要是采用跨孔弹性波CT以及孔内雷达联合起来进行探测。跨孔弹性波CT是利用钻孔之间波速成像的方式，低速异常区对应的是溶蚀发育的段落，根据波速反演能够圈定出溶洞大致的边界

以及高度。孔内雷达发射电磁波，遇溶洞洞壁产生强烈反射，反射能量强弱反映洞壁介质差异，据此可判断溶洞充填状况——空腔的反射信号是比较强的，全充填的反射是比较弱的。将二者数据融合后，可建立孔间二维剖面，识别溶洞连通性及多层叠置关系，再结合钻探揭示的充填物特征，可对溶洞等级做出预判，为施工方案调整提供依据。

（四）探测数据汇总及溶洞分级判定流程

探测数据汇总后，应将钻探揭示的溶洞顶底板埋深、充填物性状与物探圈定的空间形态、异常区范围进行逐孔比对，以消除单一方法的多解性。以钻探结果为准，物探资料为补充，交叉验证溶洞边界及充填程度，按分级标准综合判定溶洞等级，最终形成每桩溶洞发育剖面及风险提示，为堵漏方案选型提供直接依据。

三、溶洞分级配套成孔漏浆处理技术方案比选

（一）小型充填溶洞：高稠泥浆+黏土回填堵漏工艺

针对小型充填溶洞，采用高稠泥浆配合黏土回填的堵漏工艺。在钻进到溶洞顶板之后，先向孔内投填质量比较好的黏土块，接着注入高黏度、高切力的泥浆，让黏土在钻头冲击挤压的作用之下充塞溶蚀裂隙以及洞壁的间隙，形成致密的堵塞层^[3]。反复地进行投填以及挤密，一直到孔口稳定地返浆，通过这样的方式来阻断漏浆的通道，维持孔壁的稳定，保证正常地钻进。

（二）中型半充填溶洞：预注浆充填封堵漏浆施工方法

针对中型半充填溶洞，采用预注浆充填封堵方法。钻进至溶洞顶板上方一定距离处停钻，通过钻孔向溶洞内注入水泥-水玻璃双液浆。浆液在溶洞空腔内扩散，充填裂隙并与洞底堆积物胶结，凝固后形成具有一定强度的封堵体，截断漏浆通道。随后继续钻进穿越该溶洞段时，泥浆循环恢复稳定，从而有效避免半充填空腔引发的泥浆流失及孔壁失稳问题。

（三）大型空溶洞、多层溶洞：钢护筒跟进穿越堵漏工艺

对于大型空溶洞及多层溶洞，采用钢护筒跟进穿越工艺。钻进到溶洞顶板之后，用振动锤把钢护筒沉入到孔的里面，护筒穿过溶洞的空腔段并且嵌入到下部完整基岩达到一定的深度，形成钢质的永久的护壁。后续的钻进操作在护筒的里面进行开展，彻底隔绝开溶洞和孔内泥浆之间的联系。对于多层溶洞就逐级地把多节护筒进行下沉操作，节和节之间进行焊接并且密封处理，确保各个溶蚀段都能够被有效地隔离起来，保障成孔的安全状况。

（四）连通富水溶洞：泄压导水+复合填料回填堵漏组合技术

在连通富水溶洞处于动水的条件之下，单一的堵漏材料容易被稀释并且冲散掉，必须得采用泄压导水和复合填料回填这样的组合技术手段。首先在孔内或邻近钻孔位置实施泄压导水，降低溶洞内水头差、减缓流速。紧接着就往孔内分层地回填片石、黏土、袋装水泥等复合的填料，利用钻头进行冲挤的动作把填料挤入到溶洞的通道里面，逐步地堵塞住过水的断面。泄压孔分流水流减轻冲刷的作用，保证填料堆积得密实，最终形成稳定的止水

堵漏的物体，让泥浆循环恢复正常。

（五）各分级堵漏方案施工工期、材料成本与设备适配性综合权衡

各个分级的堵漏方案在工期、成本以及设备需求这些方面差异十分显著，在进行选择的时候需要综合地进行权衡考量。黏土回填的工艺比较简便、成本是最低的，但是仅仅只适用于小型的充填溶洞；预注浆封堵的效果是可靠的，材料成本和工期处于中间的水平；钢护筒跟进虽然施工比较快捷，但是钢材和沉入设备的投入比较大，适用于大型的空溶洞；组合堵漏技术的工序最为复杂、工期是最长的。必须要结合溶洞的等级、现场设备的条件以及综合的成本，合理地匹配处置的方案 [4]。

四、岩溶桩基成孔施工工艺优化与漏浆全过程质量控制

（一）冲孔 / 旋挖成孔泥浆护壁强化防漏浆措施

在冲孔和旋挖成孔的过程当中，泥浆护壁是防止漏浆的首要的防线。施工之前根据地质预报来优化泥浆的配比，适当地提高膨润土的掺量以及泥浆的比重，增强泥皮的致密的特性。钻进到溶蚀裂隙发育的段落的时候，往孔内补充高黏度的泥浆并且保持孔内液面高出地下水位足够的高度，利用浆液的正压来封堵细小的裂隙。旋挖钻进的时候控制提钻的速度，避免抽吸的作用破坏泥皮，全程监测泥浆的指标以及液面的变化情况，发现轻微的漏失情况就立即调整泥浆的性能。

（二）溶洞顶板穿越阶段钻进速度、钻压动态控防漏浆操作要点

溶洞顶板穿越是出现漏浆和塌孔的高风险的阶段。钻进到顶板上方大约 0.5 米的时候，应该显著地降低钻进的速度、减小钻压，改用轻压慢转的方式平稳地磨穿顶板，防止突然的冲击导致顶板大面积破碎。钻穿的瞬间密切监视泥浆的液面，一旦发现液面快速下降，立即停止钻进并且上提钻具，往孔内补充泥浆维持液柱的压力。穿越之后暂缓进尺的操作，反复地扫孔修整孔壁，等到泥浆循环稳定之后才可以恢复正常的钻进参数。

（三）混凝土灌注阶段防浆液流失、超灌量控制要点

混凝土灌注阶段，防止浆液流失和控制超灌量是确保桩身完

整性的关键环节。在进行灌注之前，应该开展二次清孔的操作，要彻底地把孔底存在的沉渣清除掉。在灌注的过程之中，要严格地对导管埋入的深度进行控制，要避免因为提升速度过快而造成断桩，或者使得混凝土和泥浆出现参混的情况。对于溶洞段而言，要适当地把导管插入的深度加大，让灌注的速度减缓下来，从而使混凝土能够平稳地将泥浆置换掉，减少浆液顺着裂隙发生流失的情况。超灌的数量要依据溶洞的规模以及充填的情况来进行预估，在灌注到设计的桩顶标高之后，要持续地对孔口混凝土面的回落情况进行监测，及时地进行补灌，以此保证有效桩的长度。

（四）突发漏浆、塌孔异常工况应急堵漏预案与二次处理策略

当突然出现漏浆或者塌孔的情况时，应该马上停止钻孔，把钻具向上提升到安全的高度，并且要快速地向孔内补充泥浆，维持孔壁的压力，防止事故进一步扩大。同时要查明漏失的层位以及严重的程度：如果是轻微的漏浆，可以提高泥浆的黏度，配合使用堵漏的材料在钻进的过程中进行封堵；如果是严重的漏浆并且伴有塌孔的情况，那么就要迅速地回填黏土片石的混合料，把坍塌段挤密。等到孔壁稳定之后重新进行扫孔，并且对原来的堵漏方案进行复审和调整，在确认处置是有效的之后才可以继续钻进，确保后续施工的安全。

五、结论

综上所述，复杂岩溶区桩基施工的核心难题在于溶洞引发的漏浆与塌孔，其处置必须建立在精准识别与合理分级的基础之上。本文构建了以“先探后治、分级处置、全程管控”为核心的技术思路：通过钻探与物探联合探测准确判定溶洞形态与等级，据此匹配黏土回填、预注浆充填、钢护筒跟进及复合堵漏等分级处理方案，并针对钻进参数、泥浆性能与混凝土灌注实施全过程动态控制。实践表明，该综合技术体系可有效解决不同等级溶洞的漏浆与孔壁失稳问题，在保障成桩质量的同时兼顾工效与成本，对同类复杂岩溶地基施工具有参考价值。

参考文献

[1] 翟向东, 黄永泉, 黄发源, 蔡雪霁, 田尔布. 复杂地质条件下溶洞处理的桩基施工技术 [J]. 常州工学院学报, 2022, 35(3): 1-5.
[2] 黄演修. 复杂地质条件下超大串珠型溶洞桩基施工工艺研究 [J]. 价值工程, 2023, 42(5): 10-14.
[3] 蓝国雄. 岩溶地质条件下的桥梁桩基施工和溶洞处理技术探讨 [J]. 珠江水运, 2024, 22(2): 20-24.
[4] 魏海波. 复杂地质条件下的桩基施工问题分析及处理措施研究 [J]. 青海交通科技, 2023, 36(4): 30-34.