

桥梁桩基施工中的溶洞地基处理技术研究

文 / 欧阳坚 江西省交通设计研究院有限责任公司

廖倩 四川建筑职业技术学院（通讯作者）

明德江 四川公路桥梁建设集团有限公司

陈勉 四川公路桥梁建设集团有限公司

摘要：溶洞地基处理是桥梁桩基施工中的关键技术环节，其复杂性对施工人员设计并实施施工方案提出了极高要求。本文从溶洞的分布特点出发，分析了地基处理过程中的特点与技术要点，强调了精准匹配处理方案的重要性。在技术实施上，重点论述了结合地质条件优化桩基形式的方法，并提出科学注浆加固、动态监测施工过程的细化措施，旨在全面恢复溶洞地基承载力，长效保障施工稳定性，为复杂地基条件下的桥梁桩基施工提供实践指导。

关键词：桥梁桩基施工；溶洞；地基

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.10.051

引言

桥梁桩基施工中，溶洞地基的处理技术既需要满足短期的施工需求，更需兼顾长期的结构稳定性。而溶洞的存在显著增加了地基处理的复杂性，其空隙特性、连通性、水文条件等直接影响地基的稳定性。传统地基处理方法在应对复杂溶洞时大多存在适应性不足的问题，亟需深入探讨溶洞特性对地基行为的影响，从而构建针对性的技术体系。

一、桥梁桩基施工中的溶洞地基处理的特点

（一）地基溶洞分布复杂，精准匹配处理方案

溶洞地基的最大特点在于其分布的不可预测性，这种地质条件通常存在于岩溶地区，溶洞的形态多样，涵盖柱状、板状、不规则状等多种形状，且纵横交错、彼此连通，使得溶洞地基在承载力、沉降特性等方面表现出极大的差异性，直接影响桩基施工的安全性能^[1]。在这种情况下，施工人员精确了解溶洞的形态、分布及其具体位置成为地基处理的首要任务，不同的溶洞大小、深度以及所处位置决定了其处理方案的差异性，一些溶洞可能需要大面积填充，而另一些则仅需局部加固，这种精准匹配需要结合先进的地质探测技术，更需科学的分析判断，以确保方案既能满足地基承载要求，又不造成资源的浪费或环境破坏。精准匹配的难度在于溶洞地基的变化往往是动态的，可能受到水文条件、地应力等多种因素的影响，从而加剧了施工方案设计的复杂性。

（二）施工技术要求严格，工艺细节决定成败

溶洞地基的特殊性决定了施工技术的高要求，桥梁桩基施工过程中，溶洞的存在会显著增加施工的难度，任何技术瑕疵或工艺误差都可能对整体结构的稳定性造成威胁。由于溶洞常伴随地下水活动，其施工需要应对多变的地质条件，同时还要控制溶洞内外水压的平衡，避免地基失稳^[2]。施工技术的严格性表现在多个环节，如钻孔时需要精准控制位置，以确保与溶洞的实际位置吻合，避免错判而导致施工失败；填充和加固过程需要

确保材料均匀分布及其结构的完整性，否则会导致应力集中或局部塌陷。此外，施工中实时监测技术参数也至关重要，需要精确控制浆液注入量、压力变化、凝结时间等，以避免操作失误对地基性能产生负面影响。总体而言，溶洞地基施工的技术要求既体现在对施工设备和材料性能的高标准，也对施工人员的技术水平提出了更高的要求。

（三）承载力修复难度大，合理选用填充材料

修复溶洞地基的承载力具有显著的难度，这主要源于溶洞的空隙特性及其分布的不均匀性，溶洞的存在会导致地基承载能力的显著下降，且由于溶洞内部可能充满地下水、沉积物或其他杂质，这进一步加剧了修复的复杂性。在进行承载力恢复时，施工人员需要考虑多个因素，诸如溶洞的大小、深度及所处的岩层类型等。同时，合理选用材料是决定承载力修复效果的关键，不同的材料在填充密实度、流动性和凝固强度等方面有着显著差异，施工人员需要根据溶洞的具体情况进行科学选择。除此之外，修复难度还在于溶洞空间的形态往往是不规则的，可能存在深不可测的缝隙或复杂的多层结构，导致施工人员难以实现均匀分布填充、加固过程。而修复承载力往往伴随着调整地基变形，施工人员需要确保填充材料与溶洞周围岩土之间形成良好的结合，以最大程度恢复地基的整体性，这种复杂性使得修复溶洞地基的承载力成为桥梁桩基施工中最具挑战性的环节之一^[3]。

二、桥梁桩基施工中的溶洞地基处理的技术要点

（一）精准开展地质勘察，明确溶洞分布特性

精准的地质勘察在溶洞地基处理中要求施工人员以系统化的调查手段全面掌握地下溶洞的空间分布、形态特征、规模大小等关键信息。施工人员可高效利用钻探、地震波探测与电阻率成像等多种探测技术手段，结合区域地质资料、水文地质条件，形成多维度的数据综合。钻探工作需要严格控制钻孔深度、间距以及布孔方式，确保数据的准确性；地震波探测技术以监测不同介质对

震波的响应特征，能够快速捕捉溶洞的位置与大小；而电阻率成像技术则能够细化分析岩溶地基的空隙率、含水量等属性，为后续施工方案的制定提供精确参考，技术的组合运用能够避免单一方法可能带来的误判。

在溶洞地基处理中，施工人员往往面临多样化的现场条件。例如，在岩溶发育明显的桥梁施工中，需根据勘察成果确定每个钻孔的具体位置与目标深度，并运用探测设备实时反馈钻孔中岩层的变化情况。钻孔完成后，施工人员需分类处理孔内样品并进行测试，明确岩层性质和孔隙分布情况，以便调整后续施工策略。针对溶洞形态复杂且含水量大的地区，施工人员可以采用连续注浆工艺，根据注浆材料的扩散轨迹调整浆液注入速度，确保浆液能够完全填充溶洞的每个区域，避免形成注浆盲区。桥墩基础若处于多层溶洞区域，施工人员则需分段施工，结合逐层注浆和分层加固技术，逐步提高地基承载力。在实际施工中，施工人员还需密切关注地下水动态，可在施工现场设置监测仪器记录溶洞内外的水压变化，并结合流体力学模型动态调整施工参数，以避免因水压变化造成地基不稳。大型桥梁施工中，施工队伍通常需要利用钻孔摄像设备对注浆完成后的孔内情况进行二次评估，借助高分辨率影像验证溶洞填充的完整性，并补充加固处理可能存在的裂隙或松散岩层。

(二) 优化选择桩基形式，匹配地岩溶条件

优化桩基形式需要充分结合岩溶地基的具体条件，以实现结构的稳定性（如下表）。不同地基环境对应不同的桩基形式，施工人员在选择过程中需从地质条件、承载要求、工程环境等多方面综合考虑：对于溶洞发育

区域，确定桩基的形式需以地基稳定性为核心，经过分析溶洞的分布深度、形态结构以及其承载特性，科学选择钻孔灌注桩、端承桩或摩擦桩等方式，以满足结构的受力均匀性及其承载能力^[4]。针对复杂的多层溶洞或竖向连通溶洞，施工人员可选用嵌岩桩以增强地基的承载性能，而对于溶洞分布不连续且具有局部软弱特征的地基，长桩或组合桩基能够有效规避局部沉降带来的不均匀变形风险。技术选择需同步考量施工工艺与设备匹配性，钻孔、注浆、桩体浇筑等环节需严控误差，确保桩基与溶洞条件的高度适配。

在实际施工中，面对岩溶区域多样化的地基条件，施工人员需在完成地质勘察后，依据岩层分布和溶洞位置精准定位桩基点。钻孔施工中，需动态监测溶洞深度与孔壁稳定性，经过调整钻进设备参数，确保钻孔贯通关键岩层。施工人员在选择桩基类型时，若溶洞位于浅层且发育集中，可借助短桩承载上部结构荷载，将力传递至完整岩层；若溶洞分布于中深层区域，则需优先采用嵌岩桩，经过加长桩基深度实现结构的稳定支撑。钻孔结束后，施工人员应实时采集孔内图像数据，检验钻孔孔壁与溶洞顶板的完整性，以决定是否需额外填充处理。浇筑桩体时，施工人员需严格控制混凝土的配合比，避免浆液在溶洞裂隙中过度渗透影响桩基强度。对于承载需求较大的桥梁基础，可在单桩基础上布置桩群，并以扩展桩帽增大荷载分布范围，降低局部应力集中风险。施工完成后，施工人员依托沉降观测与应力测试设备评估桩基性能，借助调整施工参数或追加加固措施进一步优化整体稳定性。

表 1 优化选择桩基形式示意图

| 优化要点 | 内容概述 |
|------------|--------------------------------------------------------------|
| 综合分析选择桩基形式 | 根据地质条件、承载需求和工程环境，科学选择桩基类型（钻孔灌注桩、端承桩、摩擦桩、嵌岩桩等），确保结构受力均匀和地基稳定。 |
| 适配复杂溶洞特征 | 针对多层或连通溶洞，选用嵌岩桩提升承载力；对于局部软弱或不连续溶洞，采用长桩或组合桩基减少沉降差异，规避不均匀变形风险。 |
| 精准钻孔施工 | 动态监测钻孔深度与孔壁稳定性，调整钻进参数确保贯通关键岩层，并实时采集图像数据评估钻孔质量和溶洞顶板完整性。 |
| 控制浇筑质量 | 调整混凝土配合比，防止浆液过度渗透影响强度；合理规划桩体布置，通过桩群与扩展桩帽分散荷载，降低局部应力集中风险。 |
| 动态评估与加固 | 依托沉降观测与应力测试设备，评估桩基性能；必要时调整施工参数或追加加固措施，优化整体结构稳定性。 |

(三) 科学实施注浆加固，提升溶洞地基强度

科学实施注浆加固，施工人员需要精准控制施工流程及其参数，以适应溶洞地基的复杂条件，全面提升地基强度。施工人员在选择注浆材料时应以溶洞特性为依据，常用的高渗透性浆液、快凝固浆材、抗压浆料需根据地质特点及其承载需求合理搭配，施工中应采用多点、多层次的注浆方式，确保浆液能够渗透到溶洞的每一个角落，填补孔隙，形成完整的承载体系。控制注浆压力是施工中的关键环节，需调节压力均匀扩散浆液，同时避免过高压造成溶洞顶板坍塌或浆液渗漏^[5]。在此基础上，施工人员需动态监测溶洞内浆液流动情况，运用高精度传感器、实时图像捕捉技术，及时调整注浆量与注浆速度。

面对溶洞分布广泛且形态复杂的地基条件，施工人员应首先根据地质勘察数据精确确定注浆点的深度。钻孔环节需要严格控制孔径和方向，确保钻孔贯通溶洞的关键部位，同时避免扰动周围岩层的稳定性。在浆液注入过程中，施工人员需利用高压注浆泵以恒定速率输送浆液，密切关注注浆压力表和流量计的变化情况，适时调整输送速度，避免浆液过量导致渗透不均。为提高注浆效果，施工人员可在主注浆阶段之前增加预处理注浆，采用快速凝固的浆液封堵溶洞裂隙，防止后续流失注浆材料。施工人员监测浆液扩散范围需借助数字化监控设备，以实时采集溶洞内部压力变化判断浆液的覆盖范围，及时发现并补充未填充的空隙区域。注浆结束后，

施工人员应迅速对浆液固化情况进行测试，利用钻孔摄像设备检查填充物的密实度，必要时进行二次注浆加固。经过逐层检测确保溶洞地基的整体强度和均匀性，为后续桥梁桩基施工提供可靠的地基支撑体系。全过程中需反复校核施工参数，注重匹配材料性能以及精细化工艺操作，以应对复杂地质条件对注浆加固的多重要求（见下图）。

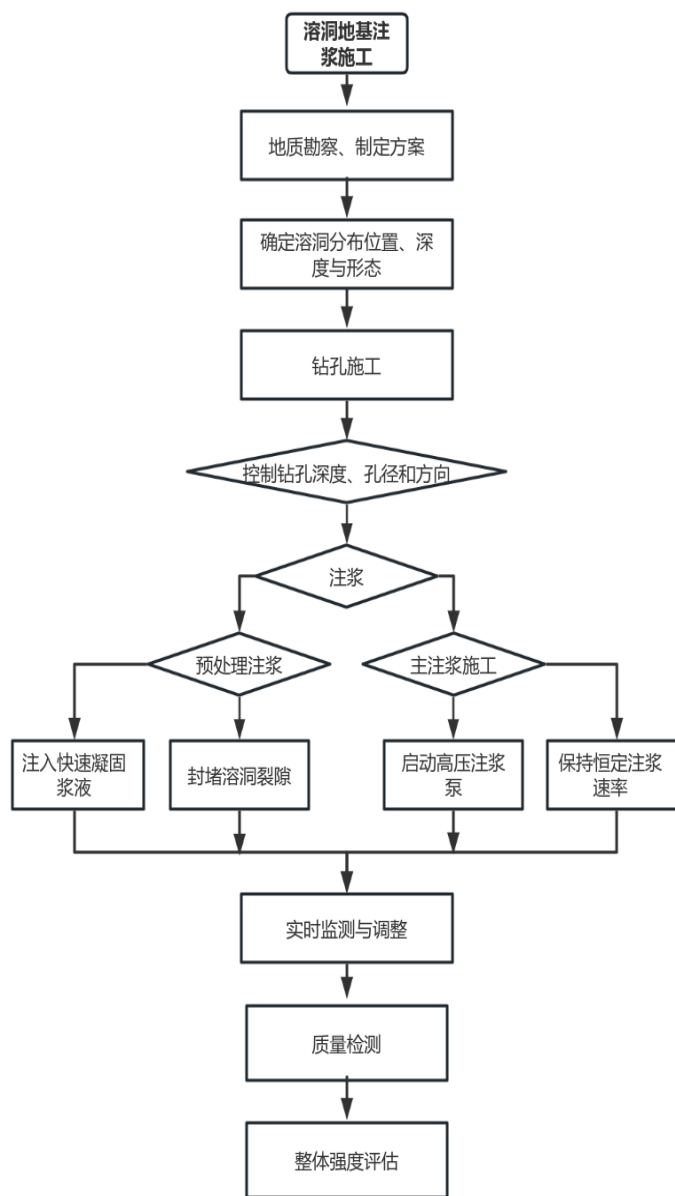


图1 溶洞地基注浆施工流程图

（四）动态监测施工过程，确保桩基安全稳定

在溶洞地基处理过程中，动态监测具有关键作用，其核心在于实时捕捉施工现场的参数变化，分析溶洞内外力学状态，确保桩基施工的稳定。施工人员在布设监测设备时应全面覆盖关键区域，包括溶洞顶板、岩土交界面以及桩基承载区，高精度位移监测仪、应力传感器和沉降观测设备等工具用于记录地基变形、受力变化、沉降速率。施工人员需同步对比监测数据

与施工进度，建立参数数据库，实时分析地基稳定性趋势与潜在风险点。同时，监测水文条件不可忽视，可安装地下水压力传感器，掌握溶洞内水压变化对注浆扩散及桩基稳定的影响，避免水动力作用引发局部失稳或桩基偏移。

在施工过程中，施工人员应按照监测设计要求分步安装监测设备，优先布设在溶洞结构变化显著、地基压力集中或地下水活动频繁的区域。监测开始后，施工人员需定期核对设备读数，检查监测仪器的灵敏度，确保数据的可靠性。在地基开挖过程中，施工人员应安装位移计、倾斜仪监测溶洞顶板的变形幅度，判断施工活动对岩层稳定性的影响，并在发现变形速率异常时迅速调整施工方案。注浆施工阶段，以压力传感器监测浆液扩散状态，结合声波反射技术实时分析填充效果，施工人员应根据监测反馈调整注浆参数，控制浆液流向与扩散范围，防止浆液渗透不足或过度扩散。桩基成型后，运用应力传感器监测桩体承载能力的变化，施工人员可依据监测数据优化桩基分布和承载配置，确保整体结构稳定。在地下水活跃的溶洞区域，施工人员需密切观察水压变化，可调整排水或封闭措施降低水压对地基的冲击力，同时利用沉降监测设备记录桩基的沉降速度，在发现沉降速率超过设计预警值时立即采取加固措施。

结语

经过整合地质勘察、优化桩基形式、注浆加固、动态监测等多方面技术要点，施工人员能够提升地基处理的稳定性，这一领域的持续发展可为复杂岩溶地貌区域的工程建设提供有力支持，同时也为提升大型基础设施的长期性能奠定了坚实基础。未来，应进一步结合先进技术手段或数字化工具，实时动态分析溶洞地基处理并进行高效精准施工，推动技术向智能化方向发展，为工程建设提供更广阔的应用前景。

参考文献

[1] 张少波, 胡长令. 岩溶地区城市轨道交通桥梁桩基施工中的溶洞处理技术 [J]. 品牌与标准化, 2023, (05): 181-183.

[2] 周雷靖, 余国兆, 林伟斌. 电厂溶洞地基处理关键技术和疑难问题分析 [J]. 南方能源建设, 2022, 9 (S1): 69-75.

[3] 崔志军. 公路桥梁桩基施工中溶洞处理技术 [J]. 交通世界, 2021, (23): 149-150.

[4] 卢光山. 岩溶地区桥梁桩基施工中的溶洞处理技术研究 [J]. 智能城市, 2021, 7 (03): 139-140.

[5] 李晓霞. 关于桥梁桩基施工中溶洞处理技术的研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43 (09): 97-98.

作者简介: 欧阳坚 (1976-12-) 男, 江西萍乡, 汉族, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 道路桥梁。

通讯作者: 廖倩 (1986-10-) 女, 汉族, 四川绵竹, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 土木工程。