

岩溶发育地区高速公路桥梁勘察与桩基础设计研究

黄欣

中大智能科技股份有限公司 湖南 长沙 410036

【摘要】：本研究旨在解决岩溶发育地区高速公路桥梁建设中面临的复杂地质问题，确保桥梁结构的安全性与稳定性。通过综合运用各类勘察手段，全面分析工程地质条件及水文地质条件对桥梁基础的影响。在桩基础设计方面，根据地质特征合理选择桩型，并考虑溶洞、裂隙等因素对承载力的影响进行精确计算，同时采取有效的沉降控制与构造措施。研究发现，综合勘察技术能够显著提高岩溶地区地质信息获取的精度，优化的桩基础设计方法有效提升了桥梁基础的稳定性。研究成果为岩溶发育地区高速公路桥梁的勘察与设计提供了可靠的技术支持，具有重要的工程实践指导意义。

【关键词】：岩溶发育地区，高速公路桥梁，勘察，桩基础设计

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.062

1 引言

随着我国交通基础设施建设的不断推进，尤其是在中西部山区，高速公路桥梁作为关键构造物，在促进区域经济发展中具有不可替代的作用^[1]。然而，岩溶地区的地基稳定性差、溶洞分布不均等问题显著影响了桥梁的安全性与耐久性。例如，溶洞的存在可能导致桩基承载力不足，进而引发桥梁结构失稳或沉降过大的问题^[2]。因此，针对岩溶发育地区高速公路桥梁的勘察与桩基础设计展开深入研究，不仅是解决实际工程问题的迫切需求，也是推动该领域技术发展的重要方向。

本文研究旨在通过系统分析岩溶发育地区高速公路桥梁的勘察技术与桩基础设计方法，提出一套适用于复杂地质条件的综合解决方案，为推动该领域的技术发展提供理论支持与实践指导。

2 文献综述

2.1 国内外研究进展

国内外学者近年来，随着勘察技术的进步，地球物理勘探方法（如地震勘探、电法勘探）与钻探技术相结合的应用逐渐成为主流，显著提高了岩溶地质条件识别精度^[1]。例如，师永翔^[2]通过实例验证了黏土加片石填充循环成孔法在岩溶地区钻孔灌注桩施工中的优越性，该方法能够提升成孔稳定性。此外，针对不同类型岩溶发育特征的研究也取得了重要进展，龚道平等^[3]将岩溶分为垂直岩溶与顺层面岩溶两类，并提出了针对性的勘察与设计方法，为类似工程提供了重要参考。总体而言，近年来的研究更加注重多技术融合与精细化设计，体现了该领域的技术发展趋势。

2.2 研究空白

尽管已有研究在岩溶地区桥梁勘察与桩基础设计方面取

得了一定成果，但仍存在一些亟待解决的问题。尽管已有研究在岩溶地区桥梁勘察与桩基础设计方面取得了一定成果，但仍存在一些亟待解决的问题。首先，在复杂岩溶地质条件下，现有勘察技术的精准性仍显不足，特别是在深部岩溶探测及溶洞充填物性状评价方面，尚缺乏高效可靠的手段。其次，桩基础设计方法的合理性仍有待改进，现有设计多基于经验公式或简化模型，未能充分考虑岩溶地质条件的空间变异性与不确定性。此外，针对岩溶地区特殊地质条件的智能化勘察技术与新型桩基础形式的研究尚处于起步阶段，相关理论与实践成果较为匮乏。

3 岩溶发育地区地质特征

3.1 岩溶地貌与地质构造

岩溶地貌是碳酸盐岩在地表水和地下水长期作用下形成的地貌类型，其典型特征包括峰林、溶洞、天坑等。这些地貌形态不仅反映了岩溶发育的程度，还对桥梁基础的稳定性构成潜在威胁。此外，地质构造对岩溶发育具有显著控制作用，褶皱和断层等构造活动改变了岩层的应力状态和裂隙分布，从而影响了溶蚀作用的进程。研究表明，断层带往往是岩溶发育最为强烈的区域，因为断层破碎带为地下水提供了良好的运移通道，加速了溶蚀作用的发生和发展。因此，在岩溶地区进行桥梁工程勘察时，必须充分考虑地质构造对岩溶分布的影响，以确保基础设计的科学性和安全性。相关研究指出，结合地质测绘和地球物理勘探技术，可以有效识别岩溶发育的关键区域，为后续设计提供可靠依据^[3,4]。

3.2 岩溶水文地质条件

岩溶水文地质条件是影响桥梁基础稳定性的另一重要因素，其核心在于地下水的赋存与运移特征。在岩溶地区，地下

作者简介：黄欣（1986-），男，工学学士，注册土木工程师（岩土），高级工程师，中大智能科技股份有限公司勘测院总工。研究方向为：岩土工程勘察、设计、监测及检测。

水通常以管道流和裂隙流的形式存在，其流动路径受控于溶蚀裂隙和溶洞网络的分布。这种复杂的地下水系统不仅决定了岩溶发育的空间格局，还对桥梁基础的设计和施工提出了特殊要求。

4 桥梁勘察技术与方法

4.1 工程地质测绘

工程地质测绘是岩溶地区桥梁勘察的基础工作之一，其主要任务是通过地表调查识别岩溶地貌类型、地层分布特征及其与地质构造的关系，为后续勘察工作提供宏观指导。在岩溶发育地区，工程地质测绘需重点关注峰林、溶洞、地下河等典型地貌单元的空间分布规律，并结合区域地质资料分析其对桥梁基础稳定性的潜在影响^[2]。此外，工程地质测绘还能够识别地层岩性变化、断层破碎带以及褶皱轴迹等关键地质要素，为后续地球物理勘探和钻探工作的布设提供科学依据。

4.2 地球物理勘探

地球物理勘探在岩溶地区桥梁勘察中具有重要的应用价值，其通过检测地下介质的物理性质差异来推断岩溶发育情况及地下水位分布。常用的地球物理方法包括地震勘探、电法勘探和电磁法勘探等，每种方法均具有独特的原理与适用范围。地震勘探利用人工激发的地震波在不同介质中的传播特性，能够精确探测地下界面的形态和深度，尤其适用于揭示隐伏溶洞和断裂构造的空间分布^[2]。然而，该方法在厚覆盖层或复杂地形条件下存在一定的局限性，可能需要与其他方法配合使用以提高解释精度。电法勘探则基于地下介质电性差异，通过分析电阻率或极化率的变化特征来识别岩溶发育区域和地下水赋存状态。例如，高密度电法在探测浅部溶洞和裂隙方面表现出较高的灵敏度，已被广泛应用于多个实际工程中^[1,2]。此外，电磁法勘探（如瞬变电磁法）因其高分辨率和抗干扰能力，在岩溶地区桥梁勘察中也得到了广泛应用^[3]。尽管地球物理勘探技术能够提供丰富的地下信息，但其结果通常存在多解性，因此需要结合钻探数据进行综合解释，以确保勘察成果的可靠性。

4.3 钻探

钻探是岩溶地区桥梁勘察中不可或缺的手段，其通过直接获取地下岩土样本和原位测试数据，为确定地层结构和岩溶形态提供了关键依据。在岩溶发育地区，钻探工艺的选择需充分考虑地质条件的复杂性，以防止孔壁坍塌和漏浆等现象的发生。同时，钻探过程中需严格控制取样质量，确保岩芯采取率满足规范要求，以便准确分析地层岩性、风化程度和溶蚀特征。对于溶洞发育区域，钻探还需记录溶洞的顶板厚度、底板高程以及充填物性质等关键参数，这些信息对桩基设计和施工具有重要意义。在数据分析方面，钻探成果通常与地球物理勘探结果相结合，通过对比验证提高解释精度。例如，当钻探揭示某深度存在溶洞时，可结合地震勘探资料进一步明确其空间形态

和规模。此外，钻探数据还可用于建立三维地质模型，为桥梁基础设计提供直观的地质依据。

5 桩基础设计

5.1 桩型选择

在岩溶发育地区，由于地质条件的复杂性，桩型的选择需综合考虑地层特性、溶洞分布、施工环境及经济性等因素^[5]。钻孔灌注桩因其适应性强、对复杂地质条件具有较好的穿透能力，在岩溶地区得到广泛应用^[2,6]。在存在多层溶洞或裂隙发育的地层中，钻孔灌注桩能够通过调整钻进工艺和护壁措施有效避免塌孔和漏浆问题；挖孔桩则适用于岩溶发育相对较弱、覆盖层较薄且地下水影响较小的情况，其优点在于可直接观察地质情况并进行处理，但在深厚覆盖层或富含地下水的区域施工风险较高。预制桩在岩溶地区的应用相对有限，主要因其难以适应不均匀沉降和溶洞穿越的需求，且易因地质条件变化易导致桩身断裂。此外，施工设备的可及性与施工效率也是桩型选择的重要依据。例如，在山区高速公路桥梁建设中，若场地条件限制大型机械设备进入，则挖孔桩可能更为适宜；而在平原区，若地质条件允许，钻孔灌注桩因其较高的机械化程度和高效率而成为首选。

5.2 承载力计算

岩溶地区的桩基承载力计算相较于非岩溶地区更为复杂，主要原因在于溶洞、裂隙等地质缺陷对桩侧摩阻力和桩端承载力的影响。在计算过程中，需充分考虑溶洞的位置、大小、充填物性质以及裂隙的发育程度等因素。根据以往工程经验，溶洞的存在会降低桩整体承载能力，并可能导致桩基偏心受力，从而影响整体稳定性。因此，在承载力计算中，通常采用折减系数法或经验公式法对桩端承载力进行修正，以反映溶洞对承载力的不利影响^[3]。此外，桩端承载力的计算还需考虑溶洞顶板厚度与完整性^[6]，若顶板厚度不足或存在裂隙，则需对桩端承载力进行进一步折减。

5.3 沉降控制

岩溶地区桩基沉降的产生主要源于地基不均匀性和溶洞坍塌等因素，这对桥梁结构的安全性和使用寿命构成严重威胁。对于岩溶地区，由于地质条件复杂，沉降控制标准需适当提高，以确保结构的安全性。为有效控制沉降，可采取多种措施，包括优化桩长、增加桩数以及调整桩径等。在溶洞分布密集的区域，亦可通过增设辅助桩来提高基础的整体刚度，从而减小不均匀沉降的发生概率。此外，合理布置桩位以增加群桩效应也是一种有效的沉降控制方法。同时，施工过程中还需加强对沉降的监测，及时发现并处理异常情况，以确保桥梁基础的长期稳定性。

5.4 构造措施

针对岩溶地区特殊的地质条件，在桩基础设计中需采取一

系列构造措施,以提高桩基的安全性和耐久性。其中,设置钢护筒是最常见的构造措施之一。钢护筒能够有效防止钻孔过程中因溶洞坍塌或地下水冲刷导致的孔壁失稳问题。此外,钢护筒的厚度与长度需根据地质条件进行优化设计,以确保其在复杂地质环境中的可靠性。王明政^[5]提出了一系列基于不同地质特征或工程环境特征的钢护筒设计方法,确定了钢护筒的最小厚度与合理埋深,为类似工程提供了重要参考。此外,加强钢筋笼的配置也是提高桩基抗震性能与抗剪能力的重要手段。在岩溶地区,由于地质条件的不均匀性,桩基在承受竖向荷载的同时还需抵抗较大的水平力,因此需适当增加钢筋笼的配筋率,并在关键部位设置加劲箍以提高整体刚度。

6 工程实例分析

6.1 案例概况

湖南省郴州市某地区高速公路桥梁工程位于岩溶发育地带,其建设规模包括1座拼宽主线桥、2座跨主线桥、2座匝道桥、5条匝道线路及1座收费站,桥长45~343m。桥址区涉及高速沿线长度约800m,负地形明显,地质条件复杂,岩溶现象广泛分布。其地处亚热带湿润季风性气候区,雨期绵长,地下水活动频繁且区内通过1条小河,也为岩溶的发育提供了有利条件。

6.2 勘察过程与成果

为确保桥梁基础设计的科学性与安全性,该工程采用了多种勘察技术相结合的方案。首先,通过工程地质测绘对桥址区的地貌特征与地层分布进行了详细识别,初步推断了岩溶发育的主要区域与趋势。其次,结合地球物理勘探手段(高密度电法),对地下岩溶分布进行了初步探测,揭示了多个潜在溶洞的位置与规模。在此基础上,钻探手段被用于验证物探结果的准确性,并获取详细的地层参数。钻探数据显示,桥址区内主要地层为黏土、中砂、高液限红黏土及石炭系白云质灰岩,已探明的岩溶发育深度最深达35.7m,最大溶洞高度达13.0m,岩溶漏斗最深达13.8m,且充填物以黏性土、中细砂与碎石为主,工程性质较差。

参考文献:

- [1] 陈刚,张成良,朱阳.复杂岩溶区高速公路桥梁桩基勘察设计与施工技术[J].中国高新科技,2023,21:111-113.
- [2] 师永翔.岩溶地区公路桥梁工程勘察与桥基处理研究[J].黑龙江交通科技,2021,05:104-105.
- [3] 龚道平,胡惠华,王泗等.岩溶复杂发育区公路桥梁地基适宜性分析研究——以赤石特大桥为例[J].工程勘察,2024,08:26-32、43.
- [4] 袁昊成.岩溶地区桥梁基础地质勘察与设计[J].中华建设,2020,05:74-75.
- [5] 左毅.基于岩溶复杂地质条件下的高速公路桥梁桩基施工技术分析[J].黑龙江交通科技,2021,09:256-257.
- [6] 罗公贵.岩溶发育地段高速公路桥梁桩基施工技术[J].企业科技与发展,2023,03:57-59、67.

6.3 桩基础设计方案

基于勘察成果,本工程的桩基础设计采用了钻孔灌注桩作为主要桩型,以适应复杂岩溶地质条件下的承载力需求。桩径设计为1.3~1.5m,桩长根据具体地质情况确定,一般在10~30m之间,确保桩端进入完整基岩不少于1倍桩径深度。在承载力计算中,考虑了溶洞与裂隙对桩基侧摩阻力与端承力的不利影响,采用折减系数法对传统计算公式进行修正,以提高计算结果的可靠性。此外,为控制沉降,设计中对桩长进行了优化,并在岩溶发育地段通过增加桩数的方式分散荷载,避免因地基不均匀沉降引发的结构破坏。同时,针对溶洞发育区域,设计了钢护筒穿越岩溶漏斗及溶洞顶板的构造措施,以增强桩基稳定性。

6.4 施工难点与应对措施

在施工过程中,由于桥址区岩溶发育的复杂性,遇到了多项技术难题。其中,溶洞穿越与塌孔问题尤为突出。为此,采取了灌浆处理溶洞的技术措施,通过向溶洞内填充黏土夹块石(小型溶洞)或注入水泥浆封堵空洞(大型溶洞),提高围岩稳定性,从而有效解决了塌孔问题。此外,针对钻进过程中频繁出现的卡锤现象,调整了钻进工艺,采用低速、轻压钻进方式,并结合钢护筒护壁技术,显著降低了施工风险。对于部分溶洞高度较大的区域,还采用了多级钢护筒跟进的方法,确保成孔质量与施工安全。

7 结论

(1) 本研究以岩溶发育地区高速公路桥梁的勘察与桩基础设计为核心,系统分析了复杂地质条件下桥梁工程建设的关键技术问题。

研究表明,在岩溶发育地区,桥梁勘察需注重多技术融合,以提高对溶洞分布、地层结构等关键参数的解译精度,从而有效降低施工风险。此外,针对不同类型的岩溶发育特征,进行针对性的桩基础成孔工艺设计、桩型选择、承载力计算、构造措施设置,显著提升了桩基础设计的合理性与安全性。

(3) 研究成果在实际工程中的应用也验证了其有效性^[1,2,3]。