

岩溶地区岩土工程勘察方法及工程应用

牛利辉 崔鹏伟 张尧声

中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i10.5070

[摘要] 岩溶地区岩土工程勘察需结合其复杂地质条件,采用地质测绘、物探、钻探、试验等综合方法,揭示溶洞、溶沟、土洞等不良地质体的分布特征及发育规律。通过勘察成果分析岩土体稳定性、地下水作用及地质灾害风险,为工程设计提供参数,指导地基处理、基础选型及施工方案优化,保障工程安全与经济性。

[关键词] 岩溶地区; 岩土工程勘察; 综合勘察方法; 工程应用; 地质灾害

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

Geotechnical Investigation Methods and Engineering Applications in Karst Areas

Lihui Niu Pengwei Cui Yaosheng Zhang

Shanxi Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Group

[Abstract] Geotechnical investigation in karst areas must take into account complex geological conditions and adopt comprehensive methods such as geological mapping, geophysical prospecting, drilling, and laboratory testing to reveal the distribution characteristics and development patterns of unfavorable geological features such as caves, karst grooves, and soil cavities. Based on investigation results, the stability of soil and rock masses, groundwater effects, and geological hazard risks are analyzed to provide key parameters for engineering design. These findings further guide foundation treatment, foundation type selection, and construction scheme optimization, thereby ensuring engineering safety and economic efficiency.

[Key words] Karst Area; Geotechnical Investigation; Comprehensive Investigation Methods; Engineering Application; Geological Hazards

引言

岩溶地区因可溶性岩石(如石灰岩、白云岩)在水的溶蚀作用下形成独特地质结构,其岩土体具有非均质性、不连续性及易失稳性,对工程建设构成显著挑战。岩土工程勘察作为工程建设的基础环节,需通过系统性方法查明岩溶发育特征、岩土体物理力学性质及水文地质条件,为工程选址、设计与施工提供科学依据,是规避岩溶地质风险、确保工程安全的关键技术手段。

1 岩溶地区岩土工程勘察的技术特点与难点

岩溶地区岩土工程勘察需突破常规勘察模式,重点应对三大核心问题:一是地质体的隐蔽性,溶洞、土洞等常发育于地下,地表迹象不明显,常规钻探易漏判;二是岩土体的非均质性,同一区域内岩性、岩体完整性及物理力学参数差异显著,难以通过局部数据推断整体特征;三是水文地质条件的复杂性,地下水的溶蚀作用持续改变岩溶形态,且易引发突水、管涌等灾害。因此,勘察需以“多方法协同、多尺度验证”为原则,整合地表调查与地下探测技术,实现对岩溶发育规律的精准把握。例如,通过地

质测绘识别地表溶痕、塌陷等宏观迹象,结合物探技术圈定地下异常区域,再以钻探验证异常体的具体形态与规模,形成“宏观-中观-微观”三级勘察体系。同时,需注重动态监测,考虑勘察期间地下水水位变化对岩溶稳定性的影响,避免因静态数据导致误判^[1]。

2 岩溶地区岩土工程勘察方法体系

2.1 地质测绘与调查

地质测绘是勘察的基础,通过1:500~1:2000比例尺地形地质填图,系统记录地层岩性、地质构造、岩溶形态及不良地质现象。重点调查可溶性岩层的分布范围、厚度及岩性组合,分析褶皱、断层等构造对岩溶发育的控制作用——例如,断层破碎带常成为地下水渗透通道,易形成密集溶蚀带。同时,需识别地表岩溶形态(溶沟、溶槽、石芽、落水洞等)的分布密度、规模及走向,通过统计分析推断地下岩溶的发育趋势。此外,对植被分布、土壤类型及地下水露头(如泉点、暗河出口)的调查,可辅助判断地下水径流路径及岩溶发育强度,为后续物探与钻探布点提供依据。

2. 物探技术应用

物探技术是探测地下岩溶的核心手段,具有高效、非侵入性特点,常用方法包括地震反射法、电法勘探、电磁法及钻孔CT等。地震反射法通过分析弹性波在不同岩土体中的传播速度差异,识别溶洞、土洞等低速异常体,适用于较深(30~100m)岩溶探测,分辨率可达1~5m;电法勘探(如高密度电阻率法、激发极化法)利用岩土体导电性差异,圈定高阻岩体中的低阻充水溶洞或高导土洞,对浅部(0~30m)岩溶响应敏感,且成本较低;电磁法(如地质雷达)通过高频电磁波反射信号,可精细探测地下20m内的岩溶形态,分辨率达0.1~0.5m,适用于场地平整后的精细化勘察;钻孔CT则通过孔间电磁波或声波扫描,生成三维地质图像,精准刻画钻孔间岩溶的空间分布,弥补钻探点式勘察的局限性。实际应用中需根据勘察深度、场地条件及岩溶类型选择组合方法,例如,采用“地质雷达+高密度电阻率法”探测浅部岩溶,结合地震反射法查明深部构造与岩溶发育关系^[2]。

2. 3 钻探与取样技术

钻探是验证物探异常、获取岩土体物理力学参数的直接手段,需针对岩溶地区特点优化工艺。钻探方法选择需考虑岩性与岩溶发育程度:对完整基岩采用金刚石回转钻进,获取岩芯以评价岩体完整性(如RQD值);对松散覆盖层或充填型溶洞,采用冲击回转钻进或跟管钻进,避免孔壁坍塌。钻孔布置应遵循“控制为主、验证为辅”原则,在物探异常区加密布孔,孔距根据岩溶发育密度调整(一般10~30m),且需穿透覆盖层至基岩一定深度(通常不小于5m)。取样需注重代表性,对基岩采取原状岩芯样进行室内试验,对土洞充填物及软弱夹层采取不扰动土样,测定含水率、密度、压缩模量等指标。此外,需记录钻进过程中的异常现象,如掉钻、漏浆、水位突变等,结合岩芯采取率变化判断岩溶存在与否及发育规模。

2. 4 室内试验与现场测试

室内试验重点测定岩土体物理力学性质,为工程设计提供参数。对岩石试样进行单轴抗压强度、弹性模量、泊松比测试,评价岩体承载能力;对土样进行颗粒分析、液塑限试验、直剪试验,确定土的分类及抗剪强度。针对岩溶地区特殊性,需增加特殊试验:对充填物进行渗透系数测试,评估地下水渗透能力;对岩体进行裂隙统计,计算节理密度、产状及充填特征,分析岩体完整性系数(K_v)。现场测试可采用平板载荷试验测定地基承载力,声波测试评价岩体完整性,注水试验或压水试验确定岩体渗透系数。对地下水,需测试其pH值、矿化度及侵蚀性,判断对混凝土的腐蚀性,为基础防腐设计提供依据。

3 岩溶地区岩土工程勘察成果的工程应用

3. 1 地基稳定性评价

基于勘察数据,通过定性与定量分析评估地基稳定性。定性评价结合岩溶发育程度(如溶洞大小、密度、充填情况)及岩土体完整性,划分稳定区、较稳定区与不稳定区:稳定区指岩溶不发育、岩体完整(K_v>0.75)、无软弱夹层的区域,可直接作为天然地基;较稳定区存在少量小型溶洞(直径<2m)或裂隙发育岩体

(0.5<K_v≤0.75),需采取局部处理措施;不稳定区则分布大型溶洞(直径≥2m)、土洞或断层破碎带,需进行系统性地基处理。定量评价采用极限平衡法或数值模拟,计算溶洞顶板稳定性——例如,对顶板厚度与跨度比小于0.5的裸露溶洞,需验算其抗剪与抗弯强度;对充填型溶洞,考虑充填物抗剪强度及地下水浮力对地基承载力的折减。同时,评价需考虑时间效应,预测地下水长期溶蚀可能导致的地基变形,提出稳定性监测建议^[3]。

3. 2 基础选型与优化

基础选型与优化需严格依据地基稳定性评价结果,采取差异化设计策略。在稳定区,应优先选用独立基础、条形基础等浅基础形式,通过减少开挖深度和材料用量显著降低工程造价,同时缩短施工周期。针对较稳定区,需根据溶洞埋深灵活调整方案:当溶洞埋深小于3m时,可采用刚性基础直接跨越,设计中必须验算基础底面至溶洞顶板的安全距离,通常控制在不小于1.5倍基础宽度,确保顶板承载能力满足要求;若溶洞埋深在3~10m范围,则采用桩基础,桩端需嵌入完整基岩不少于3倍桩径的深度,且应避开溶洞及裂隙发育带,通过增强桩体与基岩的嵌固作用提升基础稳定性。

对于不稳定区,需采用深基础或复合地基处理技术。当基岩埋深较大时,宜选用钻孔灌注桩,施工中需同步进行桩端注浆,通过浆液渗透填充岩体裂隙,增强桩周岩体完整性和桩端阻力;针对松散覆盖层中的土洞,可采用高压喷射注浆工艺,利用高压浆液切割搅拌土体形成连续防渗帷幕与加固体,有效控制土体变形;对大型溶洞,应先采用充填灌浆技术,灌注混凝土或水泥土等材料填充溶洞空间,待充填体达到设计强度后再施工基础,避免基础直接置于空洞上方。

基础优化设计还需结合上部结构荷载特征,例如高层建筑需采用筏板基础与桩基组合的形式,通过筏板的整体受力特性与桩基的承载能力协同工作,显著提高基础整体刚度,有效抵抗不均匀沉降,确保结构安全。通过上述分级选型与针对性优化措施,可实现地基基础设计的经济性与安全性统一。

3. 3 岩溶地质灾害防控

勘察成果应精准识别潜在地质灾害类型,主要包括溶洞塌陷、突水及管涌等,并针对性制定防控策略。针对地表塌陷风险区,需通过详细勘察明确塌陷范围及主要诱因,重点关注地下水抽采导致的水位波动和振动荷载引发的地质结构失稳。采取截排水系统控制地下水动态变化,防止水位骤升骤降加剧塌陷风险;对已形成的塌陷坑,采用分层夯实工艺进行回填处理,回填材料优先选用级配碎石土或灰土,确保压实度达到90%以上,恢复地表稳定性。

针对地下突水风险区,需结合地质雷达、地震波CT等物探手段圈定富水岩溶发育带,精确划分高风险区域。施工前布设超前钻探孔,通过水文地质试验预测涌水量及水压,采用前进式分段预注浆工艺形成止水帷幕,注浆材料选用水泥-水玻璃双液浆,确保帷幕渗透系数小于 1×10^{-6} cm/s,有效降低施工过程中突水事故发生概率。

对于土洞发育区,需通过钻探和原位测试评估土洞规模、埋深及扩展趋势,建立地质雷达定期监测机制,监测频率不低于每月1次。对判定为活动性的土洞,采用袖阀管注浆技术进行加固处理,注浆压力控制在0.5-1.0 MPa,填充内部空隙并形成结石体,提高土体密实度和承载能力,防止土洞进一步发展引发塌陷。

此外,必须制定完善的施工期应急预案,配备大功率排水设备(排水能力不小于预测最大涌水量的1.5倍)和自动化监测系统,实时监控地下水水位变化(监测精度 ± 2 cm)、土体位移(精度 ± 0.1 mm)及结构变形情况。设置三级预警机制,当监测数据超出预警阈值时,立即启动应急响应,采取停工撤离、反压回填等处置措施,确保施工安全^[4]。

3.4 地下工程勘察与设计应用

在岩溶地区进行地下工程(如隧道、地下管线)勘察时,必须将岩溶对施工安全的影响作为核心关注点。对于隧道勘察,首要任务是准确查明掌子面前方的溶洞分布情况。这需要运用先进的超前地质预报技术,像地质雷达和超前钻探等,并且每循环的预报距离应控制在5至10米。通过这些技术手段,能够精准判断溶洞与隧道的相对位置关系,具体包括顶部、侧壁和底部等不同位置。

当溶洞位于隧道顶部时,要对顶板的稳定性进行严格验算。若存在不稳定因素,必要时需采取管棚支护或者注浆加固等措施,以保障隧道顶部结构的安全。要是溶洞处于侧壁位置,需着重评估围岩的稳定性,根据评估结果增加锚杆支护或者采用喷射混凝土支护,从而增强侧壁的承载能力。而一旦遇到溶洞充水的情况,必须提前进行排水减压工作,以此避免突水事故的发生,确保施工过程的安全。

对于地下管线勘察,精确测定管线路由上的岩溶位置是关键环节。针对埋深较浅的溶洞,适宜采用开挖换填的处理方式,通过填充合适的材料来消除隐患;对于深埋的溶洞,则可考虑采用套管保护或者管线绕行的方案。通过这些针对性的处理措施,能够有效确保地下管线敷设完成后实现长期安全运行,减少因

岩溶问题引发的管线故障。

3.5 勘察数据的数字化与动态更新

依托勘察数据构建三维地质模型,实现工程应用的可视化与动态管理。通过CAD、GIS或BIM技术,整合地质测绘、物探、钻探数据,建立包含地层、构造、岩溶、地下水等要素的三维模型,直观展示地下空间分布特征,辅助设计人员优化基础布置与施工方案。同时,建立勘察数据库,存储岩土体参数、试验成果及监测数据,结合工程施工反馈进行动态更新,例如,根据桩基施工中揭露的实际岩溶情况,修正原勘察模型中的溶洞分布参数,为后续工程提供更精准的地质依据。数字化应用还可支持多专业协同,使勘察、设计、施工单位共享地质信息,减少信息传递误差,提高工程建设效率^[5]。

4 结束语

岩溶地区岩土工程勘察,需构建综合方法体系,将地质测绘、物探、钻探及试验技术融合,以揭示复杂地质的内在规律。勘察成果应用于地基稳定性评价、基础选型、灾害防控和地下工程设计时,要借助定性定量分析、数字化技术科学决策。未来,还应发展高精度探测技术(如无人机航测等)与智能化分析方法,提升勘察效率精度,保障工程建设安全、经济、可持续。

[参考文献]

- [1]颜宇琪,陈炳松.岩溶地区岩土工程勘察施工技术分析[J].中国科技期刊数据库工业 A,2026(2):087-090.
- [2]鲍鑫鑫.岩溶地区岩土工程勘察技术要点分析[J].工程建设与设计,2025(4):28-30.
- [3]黄浩,毛龙栋.武汉岩溶地区岩土工程勘察方法及实例评价[J].江西建材,2025(7):196-198.
- [4]麦友胜.岩溶地区岩土工程勘察中需要注意的问题及应对方法研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(1):171-174.
- [5]梁力.岩土工程勘察钻探技术在岩溶地区的实际应用分析[J].中国厨卫,2025,24(12):139-141.