

# 复杂岩溶地区岩土工程勘察技术与地基处理方案优化研究

邹文万

中铁隧道集团一处有限公司 重庆 400000

**摘要:** 复杂岩溶地区地质条件复杂,给岩土工程带来诸多挑战。本研究聚焦于此,先剖析岩溶发育规律与对工程的影响机制,接着优化勘察技术,如多源数据融合、构建岩溶参数定量评价模型、实现勘察成果可视化与动态更新等。同时,对常见地基处理技术适应性分析,构建多目标优化决策模型,并采用动态施工控制技术。为复杂岩溶地区岩土工程勘察与地基处理提供科学、精准且实用的方案。

**关键词:** 复杂岩溶地区;岩土工程;勘察技术;地基处理;方案优化

引言:在岩土工程建设领域,复杂岩溶地区因其独特的地质构造,成为工程推进的“拦路虎”。该地区岩溶形态多样、发育规律复杂,易引发地基失稳、突水涌砂等工程问题,严重威胁工程安全与质量。传统勘察技术难以精准揭示岩溶空间分布,地基处理方案也缺乏针对性与科学性。因此,深入开展复杂岩溶地区岩土工程勘察技术与地基处理方案优化研究,对保障工程顺利实施、提升工程建设质量具有重大现实意义。

## 1 复杂岩溶地区地质特征与工程问题分析

### 1.1 岩溶发育规律与形态分类

(1) 岩溶类型的空间分布特征。溶洞多分布于地下水位波动带及岩层破碎区域,呈层状、串珠状分布,规模差异较大,小则几厘米,大则数十米,深部溶洞多为孤立分布,浅部则相互连通。溶沟主要发育于岩层表面,呈网状、条带状延伸,分布密集且走向与岩层面、节理方向基本一致。土洞多形成于覆盖层与基岩接触部位,集中分布在地势平缓、地下水活动强烈的区域,空间分布零散但易成片发育,对浅层工程影响显著。(2) 岩溶发育的影响因素。地质构造是核心因素,断层、节理密集区岩层破碎,为地下水渗透提供通道,促进岩溶发育;岩层岩性决定岩溶发育程度,可溶性岩层(如灰岩、白云岩)更易形成岩溶。水文条件中,地下水的流速、流量及化学成分直接影响溶蚀速度,地下水位升降频繁区域岩溶形态更复杂。气候因素主要影响降水补给,多雨湿润地区降水充沛,地下水补给充足,岩溶发育更强烈,干旱地区则发育微弱。

### 1.2 岩溶对工程的影响机制

(1) 地基稳定性问题。溶洞、土洞的存在使地基承载力大幅下降,受工程荷载或地下水扰动时,易发生顶板坍塌,引发地面塌陷;岩溶发育不均导致地基岩土体性质差异较大,工程建设后易产生不均匀沉降,破坏建筑物结

构;岩层破碎区域结合地下水作用,还可能引发地基滑动,威胁工程整体安全。(2) 地下水作用。岩溶地区地下水连通性强、水压高,施工过程中若揭露地下含水层,易发生突水、涌砂灾害,淹没施工区域、延误工期;部分地下水含有腐蚀性化学成分,会侵蚀工程构筑物及钢筋,降低工程耐久性和安全性。(3) 施工风险。岩溶发育区域岩层破碎、溶洞分布不均,钻探过程中易出现卡钻、掉钻等问题,影响勘察精度;灌浆施工时,浆液易沿溶洞、裂隙大量渗漏,导致灌浆效果不佳,增加施工成本和难度,同时可能引发周边地层扰动<sup>[1]</sup>。

## 2 复杂岩溶地区岩土工程勘察技术优化研究

### 2.1 多源数据融合勘察方法

(1) 地球物理勘探技术优化。针对单一物探技术局限性,优化三种方法的联合应用方案:高密度电法用于初步排查浅层岩溶(溶沟、小型土洞),精准识别岩土体电阻率差异,划分岩溶发育区域;瞬变电磁法聚焦中深层岩溶探测,可穿透高阻岩层,清晰反映溶洞、地下暗河的空间形态及地下水分布;地质雷达用于施工前期浅层精细勘察,快速定位近地表溶洞、裂隙及岩土体破碎带。通过数据叠加分析、交叉验证,消除单一方法的误判,实现岩溶分布从浅层到深层、从宏观到微观的全面探测。(2) 钻探技术改进。针对岩溶地区钻探易卡钻、取芯率低、孔内情况不明等问题,改进钻探工艺:采用全断面取芯技术,搭配专用取芯管,减少岩芯破损,提高岩溶岩层取芯率,精准获取岩土体物理力学参数;引入孔内成像技术,实时观测孔壁岩层结构、溶洞形态及充填物特征,弥补传统钻探直观性不足的缺陷;结合随钻测量技术,同步采集钻探过程中的孔深、倾角、岩土体强度等数据,及时发现孔内异常,调整钻探方案,避免钻探事故<sup>[2]</sup>。(3) 遥感与GIS技术辅助。利用高分辨率遥感技术,捕捉区域内岩溶地貌(峰林、注

地、落水洞)的宏观分布特征,通过影像解译识别岩溶发育的宏观规律;借助GIS技术,整合遥感影像、物探、钻探等多源数据,构建区域岩溶分布数据库,运用空间分析功能,模拟岩溶发育的空间关联关系,建立区域岩溶分布模型,为勘察方案制定、工程选址提供宏观指导,降低勘察盲目性。

## 2.2 岩溶参数定量评价模型

(1)岩溶发育程度分级标准。结合工程实际需求,选取孔隙率、溶洞规模、裂隙密度、地下水埋深及岩溶发育频率等关键评价指标,明确各指标的量化标准,建立四级分级体系(极强发育、强发育、中等发育、弱发育):极强发育区孔隙率 $\geq 15\%$ ,溶洞平均直径 $\geq 5\text{m}$ ,裂隙密集且连通性好,地下水埋深浅、流速快;强发育区孔隙率 $8\%-15\%$ ,溶洞平均直径 $2-5\text{m}$ ,裂隙较密集,地下水活动较强烈;中等发育区孔隙率 $3\%-8\%$ ,溶洞平均直径 $0.5-2\text{m}$ ,裂隙分散且连通性一般,地下水活动平缓;弱发育区孔隙率 $< 3\%$ ,偶见小型溶洞或裂隙,地下水埋深大、活动微弱。通过指标加权计算、综合评分,实现岩溶发育程度的定量分级,规避定性评价的主观偏差。(2)地基稳定性评价方法。整合两种评价方法,构建全方位的地基稳定性定量评价体系:采用有限元数值模拟技术,结合勘察获取的岩土体物理力学参数,构建地基三维力学模型,模拟工程荷载作用下地基的应力分布、变形特征,预判溶洞、土洞引发的塌陷、不均匀沉降等风险,直观反映地基稳定性状态;引入可靠性分析方法,充分考虑岩溶参数的随机性和不确定性(如溶洞规模、孔隙率的波动),计算地基稳定性可靠指标,量化地基失稳概率,结合岩溶发育程度分级标准,形成“参数采集-模拟分析-可靠性评估-结论输出”的完整评价流程,提升地基稳定性评价的科学性、准确性和可靠性<sup>[3]</sup>。

## 2.3 勘察成果可视化与动态更新

(1)三维地质建模技术。整合多源勘察数据,采用BIM+GIS集成技术,构建复杂岩溶地区三维地质模型,打破传统二维勘察成果的局限性:将溶洞、溶沟、土洞等岩溶形态、岩土体分层、地下水分布、裂隙发育情况等勘察信息,精准融入三维模型中,实现勘察成果的可视化、立体化呈现;利用BIM技术的参数化、可视化优势,清晰呈现岩溶与工程构筑物的空间位置关系,为工程设计优化、施工方案制定提供直观依据,规避岩溶对工程的不利影响;结合GIS技术的空间分析、地理定位功能,实现三维地质模型与工程地理位置的精准对接,支持模型的空间查询、叠加分析,为工程选址、场地规

划提供高效支撑;同时,模型可与工程设计、施工数据对接,实现勘察、设计、施工的协同推进。(2)施工期监测数据反馈修正勘察模型。建立“勘察-施工-监测-修正”的闭环管理体系,实现勘察模型的动态更新:在工程施工期间,结合岩溶发育特征和工程需求,布设岩溶发育、地下水动态、地基沉降、岩土体位移等监测点,采用自动化监测设备,实时采集监测数据,确保数据的连续性、准确性;将施工期监测数据与初始勘察模型进行对比分析,识别模型与实际地质条件的偏差(如溶洞规模、裂隙密度、地下水分布等参数的偏差),分析偏差产生的原因(如勘察精度不足、施工扰动导致岩溶形态变化等);根据偏差分析结果,及时修正勘察模型中的岩溶参数、溶洞形态、岩土体性质等核心信息,完善三维地质模型;动态更新后的勘察模型,可实时反馈施工过程中的地质变化,为施工风险防控、施工方案调整提供实时数据支撑,同时为后续同类工程勘察提供参考,持续提升勘察技术的科学性和精准性<sup>[4]</sup>。

## 3 复杂岩溶地区地基处理方案优化与决策研究

### 3.1 常见处理技术适应性分析

(1)注浆加固。注浆加固是岩溶地区地基处理的核心技术之一,重点用于填充溶洞、裂隙,提高岩土体整体性和承载力。袖阀管注浆适用于浅层岩溶(埋深 $\leq 20\text{m}$ )、溶洞充填物为松散土体或碎石的场景,其分段注浆特性可精准控制注浆范围,避免浆液浪费,尤其适合溶沟、小型土洞密集区域的加固;双液注浆(水泥-水玻璃浆液)适用于深层岩溶、地下水流速较快( $> 3\text{m}/\text{d}$ )或需快速凝固的场景,浆液凝结时间短,可有效阻止地下水渗透,同时增强加固体早期强度,适用于突水风险较高的岩溶破碎区域。(2)桩基工程。针对岩溶地区地基承载力不足的问题,桩基工程通过将桩体嵌入完整基岩,保障工程稳定性。嵌岩桩适用于深层岩溶、溶洞规模较大且顶板薄弱的场景,设计时需确保桩端嵌入完整基岩层不少于3倍桩径,同时验算岩溶顶板抗冲切能力,规避桩端溶洞坍塌风险;后注浆桩适用于中等发育岩溶区域,通过在桩端、桩侧设置注浆管,浇筑桩体后注入浆液,填充桩体与岩土体间隙及周边小型溶洞,提升桩基侧摩阻力和端承力,抗溶蚀设计中需选用耐腐蚀浆液,同时增加桩体保护层厚度,抵御地下水侵蚀<sup>[5]</sup>。(3)跨越结构。对于岩溶发育极强、地基处理难度大、成本过高的区域,可采用跨越结构规避不良地基影响。托梁换柱适用于既有建筑地基岩溶塌陷修复或新建建筑局部岩溶发育不均的场景,选型依据为岩溶区域范围、建筑荷载大小,通过设置托梁将上部荷载传递至周边完

整地基,避免荷载作用于岩溶发育区域;拱桥结构适用于桥梁工程跨越大型溶洞、地下暗河的场景,选型需结合岩溶跨度、地形条件及通航需求,利用拱体受力特性分散荷载,无需深挖地基,减少对岩溶地层的扰动,同时保障结构抗滑移、抗倾覆能力。

### 3.2 多目标优化决策模型构建

(1) 评价指标体系。建立四级评价指标体系,明确各指标量化标准:安全性指标核心包括地基承载力、抗塌陷能力、抗渗性,采用地基稳定性可靠指标、岩溶塌陷概率量化;经济性指标涵盖处理成本、材料消耗、后期维护费用,以单位面积处理成本为核心量化参数;工期指标包括勘察工期、施工工期、验收工期,明确各阶段时间节点及延误风险;环保性指标涉及施工扬尘、废水排放、植被破坏,采用环保达标率、植被恢复率量化,确保指标全面覆盖方案决策核心要素。(2) 优化方法。结合指标体系特点,整合多种优化方法实现科学决策:层次分析法用于确定各评价指标权重,通过构建目标层、准则层、指标层的层次结构,量化各指标对决策目标的影响程度,规避主观判断偏差;模糊综合评价用于处理岩溶地质条件的不确定性,对各方案的指标满足程度进行模糊打分,实现定性定量结合的评价;多属性决策用于对多个备选方案进行综合排序,结合权重和模糊评价结果,筛选出最优地基处理方案,同时保留次优方案作为备用,提升决策的灵活性和可靠性。

### 3.3 动态施工控制技术

(1) 处理过程中的实时监测。布设全方位监测网络,针对不同处理技术设置对应监测内容:沉降监测采用水准仪、沉降计,重点监测地基及周边建筑物沉降量、沉降速率,控制日均沉降量不超过0.5mm;位移监测采用测斜仪、全站仪,监测岩土体水平位移及桩基、托梁位移,规避结构偏移风险;孔隙水压力监测采用孔隙水压力计,实时捕捉地下水压力变化,预警突水、涌砂

等突发灾害,监测数据每30分钟采集一次,确保异常情况及时发现。(2) 基于监测数据的方案动态调整机制。建立“监测-分析-评估-调整”的动态机制:对实时监测数据进行整理分析,与预设控制指标对比,评估地基处理效果及施工安全性;若出现沉降超标、位移异常或孔隙水压力突变,立即暂停施工,排查异常原因(如溶洞未充填、地下水扰动等);结合异常原因调整施工方案,如优化注浆压力、补充注浆量,调整桩基嵌入深度,或增设防护措施,调整后重新启动施工并加密监测频次;施工全过程同步更新勘察模型,将监测数据融入决策模型,为后续施工及同类工程提供数据参考,确保地基处理方案始终适配实际地质条件。

### 结束语

复杂岩溶地区岩土工程勘察与地基处理挑战重重。通过本次研究,在勘察技术上实现多源数据融合、参数定量评价及成果可视化动态更新,精准把握地质情况;地基处理方案经适应性分析与多目标优化决策,搭配动态施工控制,有效应对复杂地质难题。这不仅提升了当前工程的安全性与经济性,也为后续同类工程积累了宝贵经验,推动岩土工程领域在复杂岩溶地区的技术发展与进步。

### 参考文献

- [1]陈吉升.岩土工程勘察中存在的问题及优化措施研究[J].石材,2025,(09):64-66.
- [2]侯福昌,韦瑞福,李结全,等.岩溶地区地基基础检测及处理技术方法研究[J].城市建筑,2024,21(20):154-156.
- [3]张晖.岩溶地基岩土工程勘察及工程地基处理措施[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(20):163-165.
- [4]吴菊芬.岩溶地区岩土工程勘察及地基基础研究[J].西部探矿工程,2025,37(01):24-26.
- [5]张华.岩溶地基岩土工程勘察及地基处理方法探究[J].新疆有色金属,2024,47(06):55-56.