

复杂岩土条件下岩土工程勘察探讨

刘攀

中交第一航务工程勘察设计院有限公司 天津 300222

摘要：随着基础设施建设规模不断扩大，复杂岩土条件下的岩土工程勘察面临诸多挑战。复杂岩土涵盖软弱土、岩溶区、断裂破碎带等多种类型，具有隐蔽性强、非均质、环境干扰大等特点，导致勘察难度大增。本文构建了包含传统勘察方法优化、先进原位测试、地球物理勘探及信息化技术的综合勘察体系，同时从数据质量把控、风险识别与应对、践行绿色勘察理念等维度，提出质量与风险控制策略，助力工程顺利开展。

关键词：复杂岩土条件；岩土工程勘察；质量与风险控制

引言：在城市化进程加速与基础设施建设大规模推进的当下，岩土工程作为各类工程建设的根基，其勘察质量直接影响工程安全与经济性。然而，实际工程中常遭遇复杂岩土条件，像软弱土的高压缩性、岩溶区的溶洞隐患、断裂破碎带的透水性强等，这些特性使得传统勘察方法难以精准获取岩土信息，给工程设计、施工带来极大挑战。因此，深入探讨复杂岩土条件下的勘察技术及质量风险控制策略，具有重要的现实意义。

1 复杂岩土条件类型及勘察难点

1.1 复杂岩土条件分类

(1) 软弱土层：淤泥多分布于河流三角洲、滨海平原等区域，具有高含水量、高压缩性、低强度特点，易导致地基沉降；膨胀土含亲水性矿物，遇水膨胀、失水收缩，反复变形会破坏建筑物基础，在我国西南、中南地区广泛存在。(2) 岩溶发育区：常见于石灰岩、白云岩分布区，溶洞由地下水溶蚀形成，大小不一、形态复杂，土洞多伴随溶洞发育，易突然塌陷，给工程选址与施工带来极大风险，如我国华南、西南部分地区岩溶问题突出。(3) 断裂破碎带与节理裂隙岩体：断裂破碎带由地壳运动形成，岩体破碎、胶结差，透水性强，易引发边坡失稳、隧道涌水；节理裂隙岩体完整性差，力学性质不均，影响工程结构稳定性，在山区工程中较为常见。(4) 高填方与深厚填土区：多为人工堆积形成，填土成分复杂（含碎石、建筑垃圾等）、压实度不均，易出现不均匀沉降，如道路拓宽、场地平整工程中常见此类土层，勘察需重点关注填土厚度与密实度。(5) 特殊性土：盐渍土含易溶盐，遇水溶解易导致地基溶陷，在西北干旱地区分布较广；冻土分季节性冻土与永久冻土，冻融循环会破坏土体结构，对寒区工程影响显著。

1.2 勘察难点分析

(1) 地质条件隐蔽性与非均质性：复杂岩土体多埋

藏于地下，难以直接观察，且同一区域内岩土性质差异大，如岩溶区溶洞分布随机，仅凭少量勘察点难以全面反映真实地质情况，易遗漏隐患。(2) 原位测试数据可靠性问题：原位测试受外界环境干扰大，如软弱土层中旁压试验易因土体扰动导致数据失真，冻土区温度变化会影响载荷试验结果，难以准确获取岩土力学参数。

(3) 勘察精度与成本矛盾：提高勘察精度需增加勘察点数量、采用先进设备（如地质雷达），但会大幅提升成本；若控制成本减少勘察工作量，又会降低数据代表性，难以满足工程设计要求。(4) 环境干扰因素：地下水动态变化会改变岩土含水量与力学性质，如盐渍土区地下水上升会加剧盐溶作用；地震活动可能诱发断裂带复活、边坡滑坡，勘察时难以精准预测此类动态影响^[1]。

2 复杂岩土条件下岩土工程勘察技术体系

2.1 传统勘察方法优化

(1) 钻探工艺改进：针对松散填土、岩溶发育区易坍塌地层，传统回转钻进易引发孔壁失稳，跟管钻进通过同步跟进套管保护孔壁，有效避免塌孔、埋钻问题，尤其适用于深厚砂卵石层勘察；多级套管技术则根据地层变化灵活更换套管直径，在软硬互层地层中可减少钻进扰动，提升岩芯采取率，如在断裂破碎带勘察中，采用三级套管可将岩芯采取率从60%提升至85%以上，为岩体力学参数获取提供可靠样本。(2) 室内试验精细化：传统室内试验多采用常规压缩、直剪试验，数据精度难以满足复杂岩土工程需求。三轴剪切试验通过模拟不同围压下岩土体受力状态，可精准获取软弱土、节理岩体的抗剪强度参数，如对膨胀土进行固结不排水三轴试验，能更真实反映其在地下水作用下的力学响应；高压固结试验则针对高填方、深厚软土，通过施加超设计荷载，预测长期沉降量，为地基处理方案优化提供数据支撑，相比常规固结试验，其沉降预测误差可降低

20%~30%。

2.2 先进原位测试技术

(1) 静力触探(CPT)与动力触探(DPT)的适用性: CPT通过匀速压入探头获取锥尖阻力、侧壁摩阻力, 无需取土即可快速划分土层, 适用于均质软土、砂层, 在滨海淤泥区勘察中, 可高效圈定淤泥分布范围及厚度; DPT则通过重锤冲击探头, 适用于碎石土、风化岩层, 能反映地层密度, 如在山区填石路基勘察中, 可通过DPT锤击数判断填土压实质量, 但在软弱土层中易因探头贯入过深导致数据离散。(2) 波速测试在岩体评价中的应用: 跨孔法通过在不同钻孔中激发与接收声波, 计算岩土体波速, 适用于深层岩体完整性评价, 如在隧道勘察中, 可精准识别断裂破碎带位置, 其测试深度可达100m以上; 面波法无需钻孔, 通过地表激发面波获取波速, 适用于浅层风化层划分, 在路基勘察中可快速检测浅层软弱夹层, 但受地形干扰较大, 在复杂山区需结合钻孔数据校正^[2]。(3) 载荷试验与旁压试验的对比分析: 载荷试验通过分级施加竖向荷载, 直接获取地基承载力与变形模量, 结果直观可靠, 适用于重要建筑物地基勘察, 但试验周期长(单点需3~7天)、成本高; 旁压试验通过向孔壁施加径向压力, 适用于狭窄场地或难以进行载荷试验的地层(如岩溶区、边坡), 测试效率高, 但受孔壁扰动影响较大, 在软土区需采用预压技术减少误差, 二者结合可互补不足, 提升参数可靠性。

2.3 地球物理勘探技术

(1) 高密度电阻率法在岩溶探测中的实践: 利用不同岩土体电阻率差异, 通过密集电极阵列采集数据, 可清晰反映溶洞、土洞的低阻异常区, 在石灰岩地区勘察中, 能有效圈定直径 $\geq 2\text{m}$ 的溶洞范围, 结合钻探验证, 岩溶探测准确率可达80%以上; 相比传统电阻率法, 其数据密度提升3~5倍, 可减少漏判风险, 尤其适用于大型场馆、高速公路沿线的岩溶普查。(2) 地质雷达(GPR)在浅层障碍物识别中的优势: 通过发射高频电磁波探测地下介质界面, 分辨率高(可达厘米级)、探测速度快, 适用于浅层填土中的建筑垃圾、旧基础等障碍物识别, 在城市更新项目勘察中, 可快速定位地下管线、废弃构筑物, 避免钻探破坏; 但受电磁干扰影响, 在钢筋密集区需结合电磁定位仪使用, 且探测深度有限(一般 $\leq 5\text{m}$), 需与其他物探方法配合。(3) 地震映像法与瞬变电磁法的联合解译: 地震映像法通过接收地震反射波, 反映地层界面起伏, 适用于划分地层厚度、识别断层; 瞬变电磁法通过测量地下介质电磁响应, 擅长探测低阻体(如地下水、溶洞), 二者联合可实现“结构+物性”双重探测, 如在山

区公路勘察中, 地震映像法确定边坡地层分布, 瞬变电磁法识别地下水位及岩溶发育情况, 联合解译可将地质解释准确率提升至90%, 减少工程风险。

2.4 数值模拟与信息化技术

(1) 基于FLAC3D/PLAXIS的岩土体稳定性分析: FLAC3D采用有限差分法, 可模拟复杂岩土体大变形问题, 如高填方路基工后沉降、岩溶区基坑开挖稳定性分析, 通过输入勘察获取的力学参数, 能预测不同工况下的位移、应力分布, 为支护方案优化提供依据; PLAXIS则在软土地基处理模拟中优势显著, 可精准计算真空预压、强夯等处理后的地基承载力提升效果, 相比传统经验法, 数值模拟结果更贴合实际工程情况。(2) BIM技术在勘察数据集成中的应用: 打破传统勘察数据“碎片化”局限, 将钻探数据、原位测试结果、物探剖面图等整合为三维BIM模型, 实现数据可视化与关联查询, 如在高层建筑勘察中, 工程师可通过BIM模型直观查看不同深度地层分布、岩土参数, 同时支持与设计阶段模型衔接, 减少数据传递误差; 此外, BIM模型可实时更新勘察数据, 便于后期工程变更与运维管理, 提升勘察成果利用率^[3]。(3) 无人机倾斜摄影辅助地质填图: 通过无人机搭载多镜头相机, 获取高精度三维地形模型与影像数据, 适用于山区、大型厂区等大范围地质填图, 相比人工填图, 效率提升5~10倍, 且能覆盖人员难以到达的陡峭边坡; 在地质填图中, 可通过影像纹理、地形坡度识别地层界线、断层痕迹, 结合少量钻孔验证, 快速完成区域地质构造划分, 为后续勘察点位布置提供指导, 尤其在复杂地形条件下可大幅降低野外工作强度。

3 复杂岩土条件下岩土工程勘察质量与风险控制

3.1 勘察数据质量控制

(1) 多源数据融合与验证方法: 针对复杂岩土体勘察中钻探、原位测试、物探数据易出现矛盾的问题, 需建立多源数据交叉验证机制。例如, 将地质雷达探测的岩溶异常区与钻探岩芯对比, 若雷达显示低阻异常但钻探未揭露溶洞, 需补充跨孔法波速测试, 通过岩体波速差异验证溶洞是否存在; 在高填方区, 将静力触探获取的锥尖阻力与室内试验的压实度数据关联分析, 剔除偏离相关性阈值的数据, 确保参数一致性。同时, 采用加权融合算法, 对不同精度的数据(如钻探数据权重0.6、物探数据权重0.4)进行整合, 提升地层划分与参数计算的准确性。(2) 异常数据处理与误差修正: 勘察过程中, 受设备故障、环境干扰易产生异常数据, 需建立分级处理流程。对于明显超出合理范围的数据(如动力触探锤击数突然从20击骤降至5击), 先检查设备(如重锤

质量、落距)与操作规范性,排除人为误差;若为地质条件突变导致,需加密勘察点验证。针对系统性误差,如钻孔倾斜导致的地层厚度测量偏差,采用测斜仪校正孔斜角度,通过三角函数换算修正实际地层厚度;在冻土区,因温度变化导致的试样体积收缩,需在室内试验中采用恒温装置,结合体积变形系数对强度参数进行修正,减少误差影响^[4]。

3.2 勘察风险识别与应对

(1) 地质灾害预警指标体系构建:结合复杂岩土体特性,建立多维度预警指标。在岩溶区,将钻孔水位骤降速率(如单日降幅 $>0.5\text{m}$)、地面沉降量(累计沉降 $>10\text{mm}$)作为溶洞塌陷预警指标;在断裂破碎带,通过波速测试监测岩体完整性系数变化,当系数从0.7降至0.5以下时,发出断层活动风险预警。同时,构建实时监测系统,将预警指标与物联网传感器联动,一旦数据超标,立即触发声光报警并推送应急处置方案。(2) 勘察安全防护措施:针对不同风险场景制定专项防护方案。在松散填土区钻探时,采用跟管钻进技术,同时配备孔壁支护装置,每钻进1m检查一次孔壁稳定性,防止塌孔;在地下水位较高的淤泥区,使用泥浆护壁,控制泥浆比重在1.2~1.3之间,平衡孔壁压力。对于可能存在有毒气体(如甲烷、硫化氢)的勘察区域(如垃圾填埋场周边),先采用气体检测仪进行现场检测,若气体浓度超标,配备防毒面具与通风设备,确保作业环境有毒气体浓度低于国家标准限值;同时,现场设置急救箱与应急通道,定期开展安全演练,提升突发事件应对能力^[5]。

3.3 绿色勘察理念

(1) 减少土方开挖与植被破坏:优化勘察点位布置,采用“点线结合”模式,在满足勘察精度的前提下,减少钻孔数量,如通过地质雷达先圈定异常区域,再针对性布置钻探孔,相比传统均匀布孔减少30%~40%的土方开挖量。在山区或生态敏感区勘察时,选用小型便携式钻探设备,避免修建大型施工便道;钻孔完成后,及时采用原土

回填,恢复地表植被,选用当地原植物品种,减少外来物种入侵风险,确保生态环境恢复率达95%以上。(2) 废弃物循环利用技术:对勘察过程中产生的废弃物进行分类处理与循环利用。钻探产生的岩芯样本,除保留必要试验样本外,可破碎后用于路基填料或场地平整垫层,替代外购砂石材料;室内试验产生的废弃泥浆,通过沉淀池沉淀、压滤机脱水处理,分离出的清水可循环用于钻探护壁,干泥饼经检测合格后用于土地复垦,实现水资源与固体废弃物的双重回收利用。同时,选用环保型试验药剂,减少化学药剂对土壤与地下水的污染,推动勘察过程向低消耗、低排放转型。

结束语

复杂岩土条件下的岩土工程勘察是一项系统且艰巨的任务。本文围绕其展开探讨,构建了涵盖多种先进技术的综合勘察体系,并提出质量与风险控制的有效举措。通过这些研究与实践,能更精准地查明复杂岩土特性,为工程设计与施工提供可靠依据,降低工程风险。未来,随着科技持续进步,勘察技术将不断创新完善。我们需紧跟时代步伐,提升勘察水平,为保障各类工程建设安全、推动行业高质量发展贡献力量。

参考文献

- [1]张皓.复杂地形地质条件岩土工程勘察分析[J].门窗,2023(5):217-219.
- [2]朱仁迪,陈庆华.复杂地质下的岩土工程勘察技术的应用探讨[J].中华建设,2023(5):117-119.
- [3]危斯敏.基于复杂地形矿山地地质条件下岩土工程勘察技术的研究[J].中国金属通报,2022(24):170-172.
- [4]李左林.基于复杂地形地质条件下岩土工程勘察技术的研究[J].新疆有色金属,2023,46(03):20-21.
- [5]梁全政.岩土工程勘察技术在复杂地形地质条件下的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(01):130-132.