

复杂地形地质条件下岩土工程 勘察技术应用研究

任延民, 边洋洋

(辽宁省第六地质大队有限责任公司, 辽宁 大连 116200)

摘要 岩土工程勘察是工程规划、设计、建设的前提和基础性工作, 为项目的顺利开展提供了坚实的基础。本文阐述了岩土工程勘察的核心技术, 重点分析了复杂条件下勘察点位布设、岩土参数获取、特殊岩土识别等难点, 针对数据精度、分析评估质量、特殊地质条件和规范性等问题, 提出了从准备阶段、制度、技术、人员设备四个方面提升勘察技术水平的建议, 旨在为提高复杂地形地质条件下岩土工程勘察质量和效率提供参考, 从而保障工程建设安全, 推动行业技术进步与发展。

关键词 岩土工程勘察; 复杂地形地质; 工程地质测绘; 钻探; 原位测试

中图分类号: P64

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.039

0 引言

岩土工程勘察是土木工程建设的基础, 通过勘察查明场地地质条件, 为设计、施工和运营提供地质依据。随着基础设施建设向山区、高原、滨海等复杂地形地质区域延伸, 勘察面临诸多挑战。这些区域地形起伏大、地质构造复杂、不良地质现象发育, 传统勘察技术存在精度不足、周期长、成本高等问题。因此, 研究和应用先进的岩土工程勘察技术, 提高勘察质量和效率, 保障工程建设安全, 具有重要的现实意义和工程价值。这对于国家的基础设施发展至关重要。

1 岩土工程勘察核心技术

1.1 工程地质测绘

工程地质测绘采用高精度测量技术(如 GPS-RTK, 精度达厘米级)获取地形数据, 构建数字高程模型(DEM, 网格精度优于 5 m)。地质露头调查重点关注岩层产状(倾向、倾角, 测量精度 $\pm 1^\circ$)、结构面特征(间距、粗糙度 JRC、充填物类型及宽度)。断层调查确定断层性质(正、逆、平移)、断距(精度厘米级)、破碎带宽度。不良地质现象调查量化滑坡体体积、岩溶发育指数(单位面积溶洞数量)。水文地质调查确定地下水类型、水位埋深(精度 0.1 m)、渗透系数(通过抽水试验, 精度 10^{-4} cm/s 或 10^{-5} cm/s 等, 视具体情况而定)^[1]。

1.2 钻探与取样

钻探采用回转式钻机(如 XY-1 型, 钻孔直径 75 ~ 110 mm), 根据地层条件调整钻进参数(钻压、转速)。取样遵循《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019),

对软土采用薄壁取土器(内径 70 mm, 壁厚 1 mm)获取 I 级原状样(扰动比 ≤ 0.1)。对砂土采用标准贯入器(锤重 63.5 kg, 落距 76 cm)进行取样并记录标准贯入击数 $N_{63.5}$ 值。钻孔编录详细记录岩性、颜色、湿度、风化程度, 绘制钻孔柱状图(比例尺 1:100 或 1:200), 地下水位记录精度至 0.01 m^[2]。

1.3 原位测试

原位测试采用高精度传感器和自动化数据采集系统。标准贯入试验(SPT)记录每击入 30 cm 的锤击数 $N_{63.5}$ 。静力触探试验(CPT)采用双桥探头(锥尖阻力 q_c , 侧壁摩阻力 f_s , 孔隙水压力 u_z , 测量精度 ± 0.1 MPa), 根据经验公式估算土层参数。十字板剪切试验(VST)测量软土不排水抗剪强度 c_u (精度 ± 1 kPa)。旁压试验(PMT)获取土体的初始水平应力 h_0 、静止侧压力系数 K_0 、变形模量 E_{PMT} 。波速测试(如 P-S 悬挂法)测量岩土体剪切波速 V_s (精度 ± 1 m/s)^[3]。

1.4 室内试验

室内试验严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)进行。物理性质试验测定土的天然含水量 w (精度 $\pm 0.1\%$)、密度 ρ (精度 ± 0.01 g/cm³)、比重 G_s 、液限 w_L 、塑限 w_p 、塑性指数 I_p 、颗粒级配参数(D_{10} , D_{30} , D_{60} , C_u , C_c)。力学性质试验包括无侧限抗压强度试验(测定 q_u , 精度 ± 1 kPa)、固结试验(测定压缩系数 a_v , 压缩指数 C_c , 回弹指数 C_s)、三轴压缩试验(测定有效内摩擦角 ϕ' , 有效黏聚力 c' , 精度 $\pm 0.1^\circ$ 和 ± 1 kPa)、直剪试验(测定峰值抗剪强度 τ_r , 残余抗剪强度 τ_r)。渗透试验测定渗透系数 k (精

度 10^{-5} cm/s 或 10^{-6} cm/s 等, 视具体情况而定)。

2 复杂地形地质条件下岩土工程勘察

2.1 勘察点位布设

在复杂地形地质条件下, 传统网格法布孔难以兼顾效率与精度。采用地质统计学方法, 基于变异函数分析岩土参数空间变异性, 优化钻孔间距。利用 GIS 技术, 叠加地形坡度图(坡度分级 $< 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 30^\circ$ 、 $> 30^\circ$)、地质构造图(断层影响带宽度, 如 50 m、100 m)和不良地质现象分布图(滑坡体影响范围), 划分勘察区。在关键部位(如滑坡后缘、断层附近)加密布孔, 孔距可缩小至 10 ~ 20 m。对于地形起伏大的区域, 采用无人机航测获取高分辨率 DEM(格网精度 < 1 m), 辅助确定钻孔位置, 确保勘探线能有效控制地层岩性变化和主要工程地质问题。利用 GPS-RTK 进行钻孔定位, 平面坐标和高程测量精度达到厘米级, 确保勘察成果的准确性和可靠性^[4]。

2.2 岩土参数获取

复杂地形地质条件下, 岩土参数空间变异性大, 需采用多种手段综合获取。钻探取样获取原状土样, 进行室内试验测定物理力学参数(如天然含水量 w 、密度 ρ 、比重 G_s 、压缩模量 E_s 、抗剪强度参数 c' 和 ϕ')。对于特殊岩土, 如高液限黏土 ($w_L > 50\%$), 开展固结试验获取压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 。原位测试中, 静力触探(CPT)连续获取锥尖阻力 q_{c} 、侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 , 用于划分土层和评估强度。对于软弱夹层(如淤泥质土, 厚度 < 1 m), 采用十字板剪切试验(VST)测定不排水抗剪强度 c_u 。对于深部岩体, 采用旁压试验(PMT)获取初始水平应力 σ_{h0} 、静止侧压力系数 K_0 和变形模量 E_{PMT} 。综合室内试验和原位测试结果, 进行统计分析, 确定岩土参数的代表值和变异系数(C_v , 通常在 0.1 ~ 0.3 之间)^[5]。

2.3 特殊岩土的识别

复杂地形地质条件下常发育特殊岩土, 需针对性识别。对于高寒地区, 通过地温监测(测温孔深度可达 20 m)和钻孔取样观察, 识别冻土层(年平均地温 $\leq 0^\circ\text{C}$)及其类型(多年冻土、季节性冻土)。对于膨胀土, 通过室内自由膨胀率试验(膨胀率 $> 40\%$ 为膨胀土)和膨胀力试验, 判定其膨胀潜势等级。对于盐渍土, 通过化学分析测定土中可溶盐含量(如 SO_4^{2-} 、 Cl^- , 含量 $> 0.3\%$ 为盐渍土), 评估其盐胀性和腐蚀性。对于黄土, 通过钻孔取样观察其大孔隙结构、湿陷性系数 δ_s (湿陷系数 ≥ 0.015 为湿陷性黄土)判定其湿陷等级。对于软土(如淤泥、淤泥质土), 通过静力触探试验(CPT)的锥尖阻力 q_c (通常 < 1 MPa)和十字板剪切试验(VST)的不排水抗剪强度 c_u (通常 < 20 kPa)进行识别。综合多种勘察手段, 准确识别特殊岩土的类

型和工程特性。

3 复杂地形地质条件下岩土工程勘察技术应用中的问题

3.1 数据精度问题

数据精度问题直接影响勘察成果的可靠性。地形测量中, 应采用高精度 GPS-RTK 或全站仪, 确保平面坐标和高程测量误差符合《工程测量标准》(GB 50026-2020)要求。钻孔定位应采用 GPS-RTK, 平面位置偏差 ≤ 5 cm, 高程偏差 ≤ 3 cm。水位观测应采用自动水位计, 观测精度达到 1 mm, 并进行系统误差校正。取样应严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)执行, 确保原状土样扰动比满足规范要求, 软土取样扰动比应 < 0.1 。室内试验应采用符合国家计量标准的仪器设备, 并定期进行检定, 确保试验结果的准确性和可比性, 各项指标测试精度需达到规范规定的等级。试验数据处理应采用合理的统计方法, 剔除异常值。

3.2 分析评估质量问题

分析评估质量是勘察成果应用的关键。地质模型建立应综合利用钻探、物探、测绘等多源数据, 采用三维地质建模软件(如 GOCAD、Surpac)构建精细化模型, 模型分辨率应满足工程设计要求。岩土参数选取应基于室内试验和原位测试结果, 结合工程经验和地区经验值, 采用统计分析方法确定参数的代表值和变异系数, 并进行敏感性分析。工程地质问题评价应全面考虑场地地质条件、工程类型和荷载特点, 识别潜在的地质风险, 如滑坡、岩溶、软土等, 并进行稳定性分析和定量评估, 评估方法应符合相关规范(如《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011)的要求, 给出明确的工程建议。

3.3 特殊地质条件考虑不足

特殊地质条件下的勘察应充分考虑其特殊性。《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118-2011)要求查明多年冻土的分布范围、厚度、地温、含冰量等。《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112-2013)要求进行膨胀土的自由膨胀率、膨胀力等试验, 判定其膨胀潜势等级。《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025-2018)要求进行黄土的湿陷性试验, 确定其湿陷等级。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)对软土地区桩基设计有详细规定。勘察中应严格执行相关规范, 采用针对性的勘察方法和试验手段, 获取准确的岩土参数, 为工程设计提供可靠依据, 避免因特殊地质条件考虑不足导致工程事故或质量问题。

3.4 规范性问题

勘察工作应严格遵守现行国家、行业和地方标准规范。《工程勘察通用规范》(GB 55017-2021)、《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2009)是岩土工程勘察的基本依据。勘察方案应符合规范要求, 勘察方法、勘察工作量、勘察精度应满足工程需要。勘察报告应内容完整、数据准确、结论明确, 并按照规范格式编制。

勘察单位应具备相应的资质等级, 勘察人员应具备相应的专业技术资格。勘察成果应经过严格的质量审查和验收程序。对于规范中未明确的问题, 应进行专题研究或专家论证, 确保勘察工作的科学性和合理性。加强勘察市场监管, 杜绝违反规范的行为。

4 提升复杂地形地质条件下岩土工程勘察技术的建议

4.1 准备阶段

准备阶段的技术工作至关重要。首先, 开展全面的资料收集, 包括 1:50 000 或更大比例尺的区域地质图、水文地质图、地形图, 以及以往工程的勘察报告、施工记录等。利用高分辨率遥感影像(如亚米级卫星影像)进行地貌解译, 初步识别滑坡、崩塌等地质灾害隐患。开展详细的现场踏勘, 采用地质罗盘、GPS 等工具, 对露头岩性、地质构造、不良地质现象进行详细调查, 记录岩层产状(倾向、倾角, 测量精度 $\pm 1^\circ$)、结构面特征(间距、粗糙度 JRC、充填物)等。基于收集的资料和踏勘结果, 进行工程地质分析, 初步划分工程地质单元, 预测可能存在的工程地质问题。然后, 根据工程特点、场地复杂程度和相关规范(如《岩土工程勘察规范》GB 50021-2009), 编制详细的勘察技术方案, 明确勘察目的、勘察方法(如综合勘探、钻探、物探、原位测试、室内试验等)、勘察工作量(钻孔数量、间距、深度)、技术要求(取样质量、试验精度)和质量保证措施。

4.2 制度层面

制度层面的技术保障是关键。建立完善的勘察质量管理体系, 依据 ISO 9001 等质量管理标准, 制定勘察作业指导书, 明确各环节的技术要求和责任人。推行勘察信息化管理, 利用 BIM 技术建立三维地质模型, 实现勘察数据的共享和协同工作。加强勘察过程的质量监控, 实行三级审查制度(项目负责人、技术负责人、总工程师), 对勘察方案、原始记录、试验数据、勘察报告进行严格审查。建立勘察成果验收制度, 由建设单位、设计单位、监理单位和勘察单位共同参与, 对勘察成果的完整性、准确性、可靠性进行全面评估。完善勘察责任追究制度, 对因勘察失误导致的工程质量问题, 依法追究相关责任人的责任。积极推动勘察行业的技术进步, 鼓励勘察单位采用新技术、新方法、新设备, 提高勘察技术水平。

4.3 技术层面

技术层面的提升是核心。推广应用地球物理勘探技术, 如高密度电阻率法(测量精度可达毫欧级)、地震映像法(分辨率可达米级)、探地雷达(探测深度可达数十米)等, 查明地下隐伏构造、岩溶、软弱夹层等。应用无人机航测技术, 获取高分辨率正射影像图(DOM, 地面分辨率优于 5 cm)和数字高程模型(DEM, 格网精度优于 10 cm), 进行地形地貌分析和不良地

质现象识别。发展三维地质建模技术, 利用 GOCAD、Leapfrog 等软件, 整合钻探、物探、测试等多源数据, 构建精细化三维地质模型, 实现地质体的可视化和属性分析。推广应用高精度原位测试技术, 如静力触探(CPT)获取锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 , 旁压试验(PMT)获取土体的变形模量 EPMT 和静止侧压力系数 K_0 。研发特殊岩土勘察技术, 如冻土的温度监测、膨胀土的膨胀力测试、黄土的湿陷性试验等。

4.4 人员和设备

人员和设备是技术实施的保障。加强勘察人员的专业技术培训, 重点培养掌握地球物理勘探、三维地质建模、原位测试等新技术的人才。建立合理的勘察团队结构, 配备具有丰富经验的注册岩土工程师、高级工程师等技术骨干, 以及熟练掌握各种勘察设备操作的技能人员。引进先进的勘察设备, 如全液压钻机(钻孔深度可达数百米)、静力触探车(可进行连续测试)、多功能原位测试仪(可进行多种原位测试)、高精度 GPS-RTK(定位精度达厘米级)、无人机航测系统(搭载高分辨率相机和激光雷达)等。建立完善的设备维护保养制度, 定期对设备进行检定和校准, 确保设备处于良好的工作状态。加强实验室建设, 配备先进的土工试验仪器, 如三轴仪(可进行多种应力路径试验)、固结仪(可进行分级加荷试验)、直剪仪(可进行快速剪切试验)等, 满足各种岩土参数测试的需求。

5 结束语

复杂地形地质条件下的岩土工程勘察对技术要求更高。本文梳理了岩土工程勘察核心技术, 分析了技术应用挑战与问题, 并提出提升建议。未来, 应推动勘察技术创新, 融合地球物理勘探、遥感、无人机、三维建模、大数据等先进技术, 强化特殊岩土勘察, 提升数据精度与分析质量。通过完善规范、加强监管、培养人才、更新设备, 全面提升勘察水平, 为保障复杂环境下重大工程建设的安全、可靠与可持续发展提供坚实的技术支撑, 推动行业健康发展。

参考文献:

- [1] 吕玲, 唐正. “1+X”证书背景下校企双元育人人才培养模式探究[J]. 现代商贸工业, 2025(06):114-117.
- [2] 刘亚群, 张振霞, 陈良辉, 等. 产业学院课程思政体系的有效构建与实施策略探索[J]. 现代商贸工业, 2025(06):10-14.
- [3] 黄致勇. 校企共育视角下“双师课堂”教学模式探究:以新能源汽车技术专业课程为例[J]. 现代商贸工业, 2025(06):98-100.
- [4] 刘野, 陈福炯. 校企协同育人视角下跨境电商专业人才培养模式研究[J]. 商场现代化, 2025(05):66-68.
- [5] 郝彩云. 校企合作培养经管人才实践能力研究[J]. 中国管理信息化, 2025, 28(04):215-217.