

公路工程地质勘察中复杂地层的识别与处理技术研究

沈芳兴

四川公路桥梁建设集团有限公司勘察设计分公司 四川 成都 610041

摘要：公路是国家交通基础设施骨干，其建设质量与服役安全关乎国民经济发展和人民生命财产安全。前期地质勘察是公路工程全生命周期的“侦察兵”，其成果准确性是后续工作根本依据。但我国地质复杂，公路线路常穿越不良地质体或特殊岩土地段，这些复杂地层隐蔽性强、工程性质差，若勘察阶段未精准识别和评价，易在施工和运营阶段诱发重大工程事故，造成巨大损失。本文探讨公路工程地质勘察面对复杂地层的挑战，剖析以遥感、物探等为核心的综合勘察技术体系，阐述如何通过多源数据融合与智能判识提升识别精度，还论述了针对不同类型复杂地层的差异化处理原则与关键技术措施，为提升勘察技术水平、保障重大交通基础设施安全耐久提供支撑和指导。

关键词：公路工程；地质勘察；复杂地层；综合勘察技术；地基处理

引言

我国“交通强国”战略推进，公路网向西部山区、高原及沿海等地质复杂区域延伸。这些区域有高烈度地震等不良地质现象，公路工程地质勘察面临严峻挑战。传统单一勘察手段，无法满足对复杂地层精细刻画和准确评价的需求。复杂地层不仅物理力学性质差异大，空间展布非均质、各向异性，还对外部扰动敏感，像隐伏古河道等构成工程隐患，看似完整的岩体也可能存在滑移风险。所以，在有限周期和成本下，高效精准“透视”地下、揭示复杂地层真实面目，是公路工程地质领域亟待解决的核心问题。这需勘察者有扎实功底和经验，依托现代科技构建综合勘察与评价体系。本文将梳理复杂地层识别技术与处理策略，为工程实践提供参考。

1 公路工程中复杂地层的主要类型与工程特性

1.1 特殊性岩土及其工程问题

特殊性岩土因其独特的矿物成分、结构特征或形成环境而展现出迥异于普通土体的工程行为，在公路工程建设中构成一系列独特挑战。软土，广泛分布于滨海、湖沼及河滩地带，以其高天然含水量、大孔隙比、高压缩性和低强度为特征，导致在路堤荷载作用下产生显著且漫长的沉降过程，严重威胁路基稳定与路面平整。膨胀土则富含蒙脱石等亲水性黏土矿物，其吸水膨胀、失水收缩的反复循环特性，会引发路基边坡失稳和路面不规则开裂，对结构的长期性能构成慢性侵蚀。湿陷性黄土在西北地区尤为常见，它在天然状态下虽具一定强度，但遇水后结构骤然崩解，引发突发性的附加沉降，常导致跨越其上的桥梁墩台和路基发生灾难性的不均匀变形。此外，盐渍土的溶陷、盐胀及腐蚀性，以及多年冻土对热扰动的极端敏感性，都为公路构筑物的稳定性

和耐久性带来了严峻考验，要求勘察与设计必须予以充分考量。

1.2 不良地质现象及其风险

除特殊性岩土外，由内外动力地质作用形成的不良地质现象同样是公路工程的重大威胁。滑坡与崩塌作为斜坡失稳的两种主要形式，规模宏大且突发性强，可直接摧毁线状分布的公路设施，是山区公路选线与建设中必须规避或重点处治的对象。岩溶地貌，源于可溶性岩石的地下水溶蚀作用，其地下空洞、暗河系统隐蔽性强，易导致地基承载力不足或突发性地面塌陷，对路基和隧道工程安全构成潜在风险^[1]。人类采矿活动遗留的采空区，随着时间推移可能发生覆岩移动或垮塌，引起地表沉陷、开裂，对上方公路结构的完整性形成长期、动态的威胁。活动断裂，作为近期乃至未来仍可能错动的地质构造，其粘滑或蠕滑运动能对穿越其上的公路结构施加直接剪切力，其设防标准远高于一般地质条件。泥石流则是一种由水源激发的、含有大量固体物质的特殊洪流，其强大的冲击力能在瞬间冲毁路基、堵塞桥涵，是极具破坏力的突发性地质灾害。

2 复杂地层的综合识别与勘察技术体系

2.1 宏观区域调查与遥感解译

面对复杂的地质环境，勘察工作始于宏观层面的战略性把握。利用高分辨率卫星影像、航空照片及数字高程模型（DEM）进行专业的遥感地质解译，能够高效地勾勒出区域地质构造骨架、识别大型地貌单元（如古河道、夷平面）以及植被异常带，并初步圈定巨型滑坡、泥石流堆积扇等大型不良地质体的范围。现代遥感技术已发展至多光谱、高光谱乃至合成孔径雷达（SAR）干涉测量（InSAR）阶段。其中，InSAR技术通过分析不同

时间获取的SAR影像相位差,能够以毫米级精度监测地表的微小形变,对于早期识别缓慢蠕动的滑坡、采空区沉降等具有革命性意义。这种自上而下的调查方法,覆盖面广、效率高,为后续部署更具针对性的详细勘察工作提供了清晰的路线图,确保勘察资源能够精准投放在高风险区域,避免盲目性。

2.2 地球物理勘探(物探)

当地质问题趋于隐伏和精细化,地球物理勘探成为关键“透视眼”。高密度电法利用温纳或施伦贝谢装置,通过自动切换数百电极,快速采集二维/三维视电阻率数据,并用最小二乘反演(如RES2D/3DINV)重建地下电阻率模型,对地下水、岩溶等低阻体敏感。地质雷达(GPR)发射100MHz–2.5GHz电磁波,通过反射波走时与振幅分析,结合介电常数标定,可厘米级分辨浅部目标体的埋深与形态。地震折射/反射法以人工震源激发地震波,经检波器接收并处理(去噪、动校正、偏移等,常用SeisImager等软件),生成反映深部界面与岩性变化的地震剖面^[2]。微动探测则记录0.1–10Hz自然振动,采用SPAC或F-K法反演瑞利波频散曲线,再通过半波长法或反演获取S波速度结构,用于场地分类与地基刚度评估。

2.3 钻探、坑探与原位测试

物探成果具多解性,需钻探、坑探与原位测试提供直接验证。钻探是获取深部地层信息最可靠手段,复杂地层须采用全取芯工艺,确保岩芯采取率,并进行详细编录;配合水文观测和孔内电视成像,可直观识别裂隙与地下水动态。坑探(如探槽、探井)则用于直接揭露滑面、浅部岩溶等关键界面,提供现场观察条件。原位测试在少扰动下测定土体力学性质:静力触探(CPT/CPTU)以2cm/s速率压入锥头,实时记录锥尖阻力(q_c)、侧摩阻力(f_s)和孔隙水压力(u_2),连续生成高分辨土层剖面;旁压试验(PMT)通过径向扩张旁压器获取P-V曲线,计算旁压模量(E_m)和极限压力(P_l),用于评估地基承载力与沉降;十字板剪切试验(VST)旋转十字叶片测定软粘土的不排水抗剪强度(S_u)。

2.4 室内试验与多源数据融合分析

现场获取的样品与数据需通过室内试验和多源融合分析转化为工程参数。室内试验对岩土样进行物理、力学及特殊性质测试,提供设计所需精确指标。关键在于多源数据融合:将遥感解译、物探剖面、钻孔柱状图、原位测试曲线及室内试验结果等异构信息,整合至三维地质信息模型(3D-GIS)中,通过交叉验证提升解释可靠性。该过程常借助GOCAD、Leapfrog Geo等软件,先

构建地层分界面的三角网格(TIN)模型,再将电阻率、S波速度、标准贯入N值、压缩模量等属性作为标量或矢量场赋值到网格节点,形成兼具几何形态与物理属性的完整三维地质体。这一融合如同拼合地质拼图,最终产出全面、准确的工程地质勘察报告,为工程决策提供坚实依据。

3 复杂地层的处理原则与关键技术

3.1 软弱土地基处理技术

针对软弱土地基,处理的核心在于加速其固结过程、提高整体强度并有效控制沉降。换填垫层法通过挖除浅层软土并回填高强度、透水性好的材料,形成应力扩散和排水通道,适用于软土层较薄的情形。排水固结法则通过设置竖向排水体(如塑料排水板)结合堆载或真空预压,人为缩短排水路径,促使地基在施工前完成大部分沉降,是一种经济有效的深层处理方法。复合地基法通过在地基中设置刚度较大的增强体(如水泥搅拌桩、CFG桩),与周围土体共同承担荷载,能显著提升承载力并减小沉降,应用极为广泛^[3]。水泥土搅拌桩通过特制的深层搅拌机械,将固化剂(水泥浆或干粉)与原位软土强制搅拌,形成具有较高强度和水稳性的水泥土桩。CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)则由碎石、石屑、粉煤灰、水泥和水拌合而成,通过长螺旋钻孔管内泵压混合料成桩,其桩体强度高,与桩间土通过褥垫层形成柔性连接,共同作用效果良好。此外,采用泡沫混凝土、EPS等超轻质材料填筑路堤的轻质路堤法,从源头上减轻了对软土地基的附加应力,为控制沉降提供了创新思路。

3.2 岩溶与采空区地基处理技术

处理岩溶与采空区这类存在地下空洞的地基,关键在于查明空洞的具体位置、评估其顶板的稳定性,并采取针对性措施进行填充、跨越或加固。注浆填充法是最常用且直接的手段,通过钻孔向空洞内注入浆液,填充空腔并胶结松散物,从而恢复地基的整体性和承载能力。注浆工艺可根据地质条件选择,如对于连通性好的岩溶管道,可采用纯水泥浆进行压力灌注;对于细小裂隙,则需采用水泥-水玻璃双液浆或化学浆液(如聚氨酯)以提高可灌性。当空洞规模过大或埋深过浅,注浆效果不佳时,可采用结构跨越法,即利用梁板式基础或拱涵等结构形式,将上部荷载传递至空洞两侧稳定的地基上,巧妙地“架桥”而过。对于桥梁墩台等重要构筑物,最可靠的方案通常是采用桩基础,通过钻孔灌注桩或嵌岩桩穿透不稳定的覆盖层,将荷载安全地传递至下伏完整基岩,确保结构万无一失。在施工过程中,常辅以超前地质预报(如TSP、地质雷达)和自动化监测系

统,确保施工安全。

3.3 活动断裂带的工程对策

在活动断裂带上进行公路建设,是一项高风险的工程挑战,必须采取特殊的抗震设防策略。首要原则是在路线规划阶段尽可能绕避已知的活动断裂带,这是最根本、最安全的解决方案。若因地理或经济因素无法避让,则必须进行结构适应性设计,采用能够承受或适应断层错动的柔性结构。例如,桥梁宜采用简支梁结构,并在断层两侧预留足够宽的伸缩缝;隧道则可采用圆形断面和柔性衬砌,并在断层带设置变形缝,以吸收错动能量^[4]。具体而言,隧道衬砌可采用钢纤维混凝土或设置可压缩层,接头处采用橡胶止水带和可滑移钢板,确保在断层发生数米级错动时,结构不致完全丧失功能。此外,在工程运营期间,建立长期的地质和结构健康监测系统至关重要,通过布设GPS、InSAR、光纤光栅传感器(FBG)等,实时监控断层活动迹象,可为应急响应和维护决策提供及时、准确的信息支持。

3.4 动态设计与信息化施工

对于地质条件极其复杂、不确定性极高的路段,传统的静态设计模式已显不足。推行“动态设计、信息化施工”是应对这一挑战的有效途径。该模式强调在施工过程中,根据开挖揭露的实际地质情况,与前期勘察预测进行实时对比,并据此及时修正和完善设计方案。通过在关键部位埋设沉降板、测斜仪、孔隙水压力计等各种传感器,构建一个实时反馈系统,能够动态掌握地基的变形和应力状态。这些数据通过无线传输模块汇集到中央监控平台,利用大数据分析和机器学习算法(如支持向量机、神经网络)进行趋势预测和风险预警。例

如,通过分析孔隙水压力消散速率,可以判断排水固结效果,从而动态调整预压荷载的施加速率;通过监测边坡深层位移,可以预测滑坡失稳的临界点,及时启动应急预案。这些数据直接指导着施工工序的调整和施工速率的控制,确保整个建设过程始终处于可控、安全的状态,实现了从“纸上谈兵”到“实战应变”的转变,极大地提升了工程应对复杂地质风险的能力。

4 结语

公路工程地质勘察是一项集科学性、技术性与艺术性于一体的系统工程。在面对日益复杂的地质挑战时,唯有坚持“综合勘察、精细识别、科学处治”的理念,才能为公路工程的安全、经济与耐久奠定坚实的基础。未来,随着人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术的深度融合,公路工程地质勘察将朝着更加智能化、数字化和精准化的方向发展。通过构建基于BIM+GIS的全生命周期地质信息平台,实现勘察、设计、施工、运维各阶段数据的无缝流转与共享,将极大地提升我们对复杂地层的认知水平和应对能力,为建设世界一流水平的现代化公路网提供强有力的地质技术保障。

参考文献

- [1]李松.高速公路工程地质勘察工作要点分析[J].运输经理世界,2024,(05):43-45.
- [2]韦重彬.精细化管理在高速公路工程地质勘察中的应用[J].中国管理信息化,2023,26(23):115-118.
- [3]卢旺.公路工程地质勘察现状及对策探析[J].四川建材,2023,49(09):35-36+39.
- [4]韦添福.公路工程地质勘察与优化控制措施探究分析[J].甘肃科技,2022,38(21):75-77+126.