

隧道复杂地质环境下的岩土工程勘察与评价研究

钱伊默

云南省交通规划设计研究院股份有限公司 云南昆明 650011

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14652

[摘要] 本文围绕隧道工程中复杂地质环境下的岩土工程勘察与评价展开研究。针对高地应力区、活动断裂带、软弱围岩及岩溶发育区等多种不良地质条件，系统分析了各类复杂地质环境的特点及其对隧道施工的影响。探讨了岩土工程勘察技术与手段，包括传统钻探、原位测试及地球物理方法，介绍了三维地质建模、无人机遥感和人工智能辅助分析等新技术的应用。通过参数评价与风险识别，提出科学合理的评价方法和风险预警措施，为隧道施工安全提供技术保障。

[关键词] 隧道；复杂地质；岩土工程；勘察评价

1. 引言

随着基础设施建设的不断推进，隧道工程在交通、水利和矿业领域的应用日益广泛。然而，隧道施工往往面临复杂多变的地质环境，如高地应力、断层破碎带及岩溶发育等，这些复杂地质条件对工程安全和施工难度提出了严峻挑战。本文旨在系统研究复杂地质环境下的岩土工程勘察技术及评价方法，探索有效的风险控制措施，促进隧道工程的安全稳定发展。

2. 复杂地质环境的分类与特点

2.1 复杂地质环境的定义与分类

2.1.1 高地应力区

高地应力区是指隧道所处围岩中原始地应力水平较高的地质环境，常见于深埋隧道、构造压缩带或地壳稳定性差的区域。在这种环境下，围岩承受巨大应力，极易诱发岩爆、片帮、底鼓等地质灾害，严重威胁隧道施工的安全性^[1]。高地应力还会导致围岩在开挖扰动后迅速失稳，施工变形显著，传统的支护手段往往难以满足控制要求。

2.1.2 活动断裂带

活动断裂带是地质构造运动仍在进行或近期活动频繁的断层区域，其典型特征包括破碎带宽、岩体节理发育、地震活动性强等。在隧道穿越这类地质时，围岩的整体稳定性差，容易发生错动、错位甚至断裂滑移，对结构安全构成严重威胁。

2.1.3 软弱围岩及不良地质体

软弱围岩主要指结构松散、强度低、变形大且工程性质差的岩土体，如膨胀土、强风化泥岩、粉质黏土等；不良地质体则包括滑坡堆积体、断层破碎带、煤层等。这类地质条件下，隧道开挖易引发围岩坍塌、塑性流动、拱顶下沉等问题，对支护结构设计提出极高要求。

2.1.4 岩溶发育区、涌水突泥区域等

岩溶发育区通常分布在石灰岩或白云岩地层中，发育有溶洞、暗河、落水洞等复杂地质构造。这些溶蚀空间不仅使围岩稳定性差，而且极易在施工过程中引发坍塌、突水事故。涌水突泥区域则多见于饱和软土层或透水性强的砂卵石层，一旦遇到高水压或扰动，容易发生突发性涌水、涌泥灾害。

2.2 不同复杂地质条件对隧道施工的影响

2.2.1 稳定性问题

复杂地质条件最直接的影响是围岩和结构的稳定性问题。在高地应力区，岩体容易发生岩爆、掉块或构造应力释放所致的大变形，极大威胁施工安全；而在软弱围岩或断层带中，岩土体整体性差、承载力低，开挖扰动易引发坍塌、滑移、拱顶下沉等失稳现象。在岩溶区或突水突泥地段，围岩局部溶蚀形成空洞，若识别不清或处理不当，也极易造成结构塌陷和隧道变形。

2.2.2 支护设计难度

在复杂地质环境中，传统的支护设计往往难以满足结构与围岩的协调变形要求。高地应力区域需设置高强度、高延性的支护体系以应对潜在的瞬间失稳；软弱围岩则需要及时封闭和二次支护，以限制过大变形和围岩蠕变；而断层破碎带或涌水段还需考虑止水、防渗及结构错动对衬砌的影响。地质条件的空间变化性强，使得同一隧道断面可能面临不同的设计需求，增加了支护结构类型与参数确定的难度^[2]。

2.2.3 勘察精度要求提高

复杂地质条件下，地质变化迅速且空间分布不规则，给隧道施工带来了高度不确定性，这就对前期勘察工作提出了更高的精度和完整性要求。常规布孔方式和浅层探测手段往往难以满足识别隐伏断层、岩溶空腔或地下水通道的需要。

必须采用多种手段综合探测,如钻探联合地球物理勘探、三维地质建模、TSP超前预报等,以全面获取地质结构、围岩性质、水文条件等信息。

3. 岩土工程勘察技术与手段

3.1 勘察阶段划分

通常岩土工程勘察分为初步勘察、详细勘察和施工勘察三个阶段。初步勘察的目的是了解区域地质概况、识别潜在地质风险,辅助工程选址与比选;详细勘察阶段则需在初步成果基础上进行加密布点,获取精确的地层分布、岩土参数、水文地质条件等,为隧道设计提供可靠依据;而施工勘察则贯穿隧道建设全过程,包括洞口揭露勘察、超前地质预报、变形监测等,其任务是动态识别前方地质变化、指导施工工艺调整,确保施工安全。

3.2 常用勘察方法

3.2.1 工程地质测绘

工程地质测绘是岩土工程勘察的基础工作,其目标是通过地对地表及浅层地质现象的观察与记录,了解区域地质结构、地层分布、构造活动和地质灾害隐患。在复杂地质条件下,测绘内容需更为详尽,包括岩性变化、节理裂隙、断层展布、岩溶发育特征及地表水体等,同时应结合遥感影像、地形分析与地质图编制成果,实现宏观判断与微观验证的有机结合。对断裂构造和不良地质体的精确识别,常依赖野外露头分析、剖面调查和岩体质量分级评价,为后续钻探设计和参数推断提供决策依据。

3.2.2 钻探与取样技术

钻探是获取地下岩土信息最直接、最可靠的手段,尤其在岩溶、软弱围岩或断裂带等复杂地段,其作用尤为关键。通过合理布孔布点,钻探不仅可以揭示地下地层的结构和厚度,还能采集原状样、扰动样及岩芯,用于实验室力学试验、矿物成分分析、含水性检测等。在复杂地质环境中,应采用定向钻、岩心全取式钻探等高精度技术,同时对钻探过程中的孔斜、掉芯、水突等现象进行详细记录。

3.2.3 原位测试

原位测试是在现场对岩土体进行直接加载或扰动,以测定其物理力学性能的技术手段。常用原位测试方法包括标准贯入试验(SPT)、静力触探(CPT)、十字板剪切试验、压力计测试(PMT)、地基承载力测试等。这些测试可获得原位条件下的抗剪强度、变形模量、孔隙比等关键参数,有效弥补实验室试验中因扰动而产生的数据偏差^[3]。在软弱土层、填

土区或高地下水位区域,原位测试对于掌握地基承载能力、沉降特性和稳定性评估具有重要价值。

3.2.4 地球物理勘探方法

地球物理勘探是利用物理场在地质体中传播特性的差异,反演地下结构和岩性特征的一种非开挖探测技术。在隧道复杂地质条件下,地球物理勘探能有效弥补钻探布孔不足、提高勘察覆盖范围。常用方法包括地震折射波法、电阻率成像法、地质雷达(GPR)、瞬变电磁法(TEM)等。特别是在岩溶探测、隐伏断层识别、地下水富集区判断中,这些方法展现出良好的探测精度与效率。

3.3 新技术应用

3.3.1 三维地质建模与信息化勘察

三维地质建模技术是近年来岩土工程勘察领域的重要突破,尤其在复杂地质条件下,三维可视化模型可以直观反映地下地质构造、地层分布和不良地质体的空间关系。通过整合钻探数据、地质测绘成果、地球物理勘探结果等多源信息,构建出精准、动态的地下结构模型,有助于实现对地质信息的立体化理解和时空统一表达。信息化勘察则是将BIM、GIS等平台引入勘察管理流程,实现数据的数字化采集、共享与更新,大大提升了勘察工作的效率和管理水平。

3.3.2 无人机遥感与激光扫描

在初期地形测绘与高陡边坡勘察中,无人机遥感与激光扫描(LiDAR)技术展示出明显优势。通过无人机搭载高清相机或激光雷达,可快速获取高分辨率的地形图、正射影像和三维点云数据,实现大范围、高精度的地质信息采集,尤其适用于地形复杂、人员难以到达的山区、峡谷、滑坡体等区域。激光扫描技术还可用于对隧道开挖面和支护结构的变形监测,实现施工过程中地质变化的实时反馈。在岩溶地区或断层出露带,无人机遥感结合影像识别算法,可快速识别溶蚀地貌、断裂迹线和地表水体,为后续布点和探测提供依据,显著提高勘察工作的全面性与安全性。

3.3.3 地质大数据与人工智能辅助分析

随着隧道工程勘察数据体量的迅速增长,传统数据处理方法已难以满足对大规模、多维度信息的挖掘与利用。地质大数据技术的引入,使得勘察过程中形成的钻孔资料、测试数据、物探结果、监测信息等可以进行集中管理、关联分析和可视化处理。人工智能技术,尤其是机器学习与深度学习算法的应用,正在改变岩土参数预测、风险识别和地质模型更新的传统方式。例如,通过训练分类模型,可以自动识别

岩性边界、断层发育区或软弱围岩分布;通过数据挖掘可揭示地下水活动与地层结构之间的耦合关系,提高对突水突泥风险的预测能力^[4]。

4. 岩土工程参数评价与风险分析

4.1 参数评价方法

4.1.1 土体力学参数评价

在复杂地质环境下,土体力学参数的准确性直接影响隧道设计的合理性与施工安全。常用的参数包括内摩擦角、黏聚力、弹性模量、孔隙比和渗透系数等。这些参数既可通过室内试验获取,如三轴剪切试验、固结试验,也可结合原位测试结果,如标准贯入试验(SPT)、静力触探(CPT)等进行校核与修正。在评价过程中应考虑土体的天然结构性、水敏感性及其扰动影响,同时根据不同土层的均匀性和可代表性进行分类处理。对于岩溶区或含水层等特殊地段,还需引入渗透参数和水力性质的耦合分析,以保障设计参数的科学性和适应性。

4.1.2 岩体分级系统

岩体分级是对围岩工程特性进行定量评价的关键手段,常用系统包括RMR(岩体质量评级)、Q系统以及中国的BQS(基本质量分级)等。这些分级体系综合考虑岩性、节理特征、地下水情况及岩体完整性等因素,对岩体的稳定性与支护需求进行定量描述。RMR系统广泛用于初步支护设计,而Q系统则更适用于地下洞室的围岩分类与支护参数选定。分级过程中需结合钻探岩芯、现场测绘和原位测试结果进行综合判断,并结合实际工程经验进行适当修正,从而提高分级的适用性和预测能力,尤其在岩体条件变化剧烈的复杂地质区域更显重要。

4.2 风险识别与分类

4.2.1 地质灾害风险

在隧道穿越复杂地质环境过程中,地质灾害风险是最主要的安全隐患之一,常见的灾害类型包括岩溶塌陷、突水突泥、软弱围岩失稳、岩爆及断层错动等。这些灾害往往具有突发性、不可预见性强、破坏性大的特点,对施工进度和结构安全造成严重威胁。尤其是在岩溶发育区或活动断裂带中,地质结构复杂、水文条件活跃,使得灾害识别难度加大。

4.2.2 工程风险评估方法

工程风险评估是对可能影响隧道建设质量与安全的不确定因素进行定量或定性分析的过程。常用方法包括层次分析法(AHP)、模糊综合评价法、灰色系统理论、概率统计

分析法等。这些方法可用于对不同风险源的影响程度和发生概率进行综合判断,从而划分风险等级,提出针对性的控制策略。在复杂地质条件下,工程风险评估还应结合施工阶段监测数据,建立动态风险评估模型,实现对风险变化趋势的实时掌控。

4.3 地质预测与预警技术

4.3.1 超前地质预报

通过对隧道掘进方向一定距离范围内的地质条件进行探测,可以提前掌握断层、破碎带、软弱围岩、涌水等潜在风险,为施工方案调整和安全防护提供科学依据。超前预报通常结合钻探、地球物理探测及智能监测技术,实现多参数、多尺度的综合识别^[5]。随着技术进步,实时预警系统逐步建立,使施工单位能动态响应地质变化,降低因未知地质带来的安全隐患和经济损失。

4.3.2 地质雷达、TSP、地震波CT等技术

地质雷达(GPR)、透射式地震波法(TSP)和地震波CT成像技术是复杂地质环境下常用的高精度探测手段。地质雷达利用高频电磁波探测地下介质反射信号,适合识别浅层隐伏断层、裂隙和空洞结构;TSP通过透射地震波的传播特性,能够揭示岩体内部的破碎带和弱面位置;地震波CT则利用多角度、多路径地震波数据,重建地下岩体的速度结构,实现三维断层和异常体的高分辨率成像。

5. 结论

本文对隧道复杂地质环境下岩土工程勘察与评价进行了深入探讨,明确了高地应力区、断层带及软弱围岩等复杂地质条件对施工稳定性和支护设计的显著影响。结合传统与新兴勘察技术,构建了多维度、动态化的地质信息获取体系,提高了勘察精度和预警能力。研究为隧道工程设计和施工提供了理论依据和技术支持,有助于保障工程安全,推动复杂地质环境下隧道工程技术的提升。

[参考文献]

- [1]杨长民.隧道复杂地质环境下的岩土工程勘察与评价研究[J].世界有色金属,2020(8):259-260.
- [2]项京.隧道复杂地质环境下的岩土工程勘察与评价研究[J].世界有色金属,2021(1):205-206.
- [3]赵硕,余永康.复杂地质条件下城市隧道工程勘察方法及综合应用[J].科技创新,2023(11):155-158.
- [4]王宁.地铁隧道穿越岩性复杂地段岩土工程勘察方法研究[J].工程建设与设计,2022(17):192-194.