

复杂地质条件下公路边坡设计与动态支护施工关键技术

史乃伟 耿凯放*

中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津 300000

摘要: 复杂地质条件下的公路边坡设计与动态支护施工对公路安全至关重要。本文探讨了复杂地质条件对公路边坡设计的影响,包括地质构造、岩土体性质差异和地下水作用。阐述了设计关键技术,如地质勘察与数据分析、边坡稳定性分析、设计方法与优化。介绍了动态支护施工关键技术,包括施工准备与监测系统建立、支护结构施工、动态调整与应急响应、施工质量控制与验收,为复杂地质条件下公路边坡工程提供参考。

关键词: 复杂地质条件;公路边坡设计;动态支护施工;关键技术

引言

水利水电工程多处于山区,地形复杂,地质情况多变,工程进场公路或场内公路的建设相对困难。在复杂地质条件下,公路边坡的设计与施工面临诸多挑战。复杂的地质构造、岩土体性质的差异以及地下水的作用等,都可能对边坡的稳定性产生不利影响,进而威胁公路的安全运营。因此,深入研究复杂地质条件下公路边坡设计与动态支护施工关键技术,具有重要的现实意义。

1 复杂地质条件对公路边坡设计的影响

1.1 地质构造因素

复杂地质构造是影响公路边坡设计的重要因素,其中断层、褶皱、节理等地质现象对边坡稳定性的影响尤为突出。断层的存在会严重破坏岩体的完整性,岩体被断层切割后,其连续性被打破,原本完整的结构面变得破碎,这使得边坡的稳定性大幅降低^[1]。在设计过程中,必须充分考虑断层的走向、倾角以及破碎带的宽度。断层走向与边坡走向的关系决定了边坡是否会沿断层面发生滑动。若两者走向相近,边坡失稳的风险将显著增加。倾角则影响着下滑力的大小,倾角越大,下滑力越强,边坡越不稳定。破碎带宽度也是一个关键因素,较宽的破碎带意味着岩体更加破碎,抗剪强度更低,设计时需要采取更有效的加固措施。褶皱会使岩层产生弯曲变形,导致岩层内部不同部位的应力状态发生明显变化。在褶皱的核部,岩层受到挤压,应力集中,容易出现破碎和变形;而在翼部,岩层则受到拉伸,可能会产生裂隙。这种应力分布的不均匀性会影响边坡的稳定性。设计时需要分析褶皱的形态和规模,确定应力集中区域,并采取相应的防护措施,如增加支护结构或优化边坡坡率。节理发育的岩体,其抗剪强度会显著降低。

通讯作者: 耿凯放,男,研究方向 公路边坡稳定性 学历,本科,1433765866@qq.com

节理为岩体的滑动提供了潜在的面,边坡容易沿节理面发生滑动。设计时要详细分析节理的产状,包括走向、倾向和倾角,以及节理的间距。节理产状决定了边坡可能的滑动方向,而节理间距则影响着岩体的破碎程度。对于节理密集发育的区域,需要采取加密支护或加固岩体的措施,以提高边坡的稳定性。

1.2 岩土体性质差异

不同岩土体的物理力学性质存在很大差异,这对公路边坡设计有着重要影响。岩石边坡通常具有较高的强度和硬度,但当存在软弱夹层时,其稳定性会受到严重影响。软弱夹层的抗剪强度较低,在边坡受力时容易成为滑动面。设计时需要准确测定岩石的密度、强度等参数,以及软弱夹层的位置、厚度和性质。根据这些信息,合理确定边坡的坡率和支护方式,确保边坡在各种工况下的稳定性。土质边坡的土抗剪强度较低,在雨水冲刷、地震等作用容易发生滑坡、坍塌等灾害。设计时要准确测定土的密度、含水量、抗剪强度等参数。根据土的性质和边坡高度,选择合适的边坡坡率和防护措施,如植草防护、砌石防护等,以增强边坡的稳定性。

1.3 地下水作用

地下水对边坡稳定性的影响十分显著。地下水位上升会增加岩土体的重度,同时降低其抗剪强度,还会产生静水压力和动水压力,这些因素都可能导致边坡失稳。设计时要充分考虑地下水的补给、径流和排泄条件,分析其对边坡稳定性的影响程度,并采取合理的排水措施,如设置排水沟、盲沟等,降低地下水位,减少地下水对边坡的不利影响。

2 复杂地质条件下公路边坡设计关键技术

2.1 地质勘察与数据分析

地质勘察是复杂地质条件下公路边坡设计的基础。通过详细的地质勘察,可获取边坡区域的地质构造、岩

土体性质、地下水分布等信息。勘察过程中,可采用钻探、物探、遥感等技术手段。例如,在某山区高速公路建设中,通过钻探获取了不同深度岩土体的物理力学参数,包括密度、含水率、抗压强度、抗剪强度等;利用物探技术识别地下潜在断层和软弱夹层的位置;借助遥感技术绘制边坡区域的地形地貌图,为后续设计提供全面准确的数据支持。数据分析是地质勘察的重要环节^[2]。对勘察数据进行分析,可识别边坡的主要地质特征和潜在风险点。通过分析岩土体的物理力学参数,评估其强度和变形特性;分析地下水的分布和动态变化,评估其对边坡稳定性的影响。例如,可以在某公路边坡设计中,通过对岩土体抗剪强度参数的分析,发现部分区域存在软弱夹层,其抗剪强度较低,在边坡开挖过程中可能发生滑动,为后续设计提供了重要依据。

2.2 边坡稳定性分析

边坡稳定性分析是复杂地质条件下公路边坡设计的核心内容。常用的分析方法包括极限平衡法和数值模拟法。极限平衡法如Bishop法、Janbu法等,通过计算边坡的安全系数来评估其稳定性。该方法简单易用,但无法考虑应力路径和岩体本构关系,在处理复杂地质条件下的边坡稳定性问题时,误差可能较大。数值模拟法如有限元法(FEM)、离散元法(DEM)等,能够模拟复杂边界条件,如水位波动、地震作用等,更准确地评估边坡的稳定性。例如,在某水电站大坝边坡设计中,采用FLAC3D数值模拟软件,模拟了边坡在不同工况下的应力、应变和位移分布,识别出潜在的危险区域,为设计提供了科学依据。对于复杂地质条件下的边坡,还需考虑多物理场耦合分析。温度-应力场耦合分析可考虑温度变化对岩土体力学性质的影响,如冻融循环对岩体强度的影响;渗流-应力场耦合分析可考虑地下水位变化对岩土体应力状态的影响,如水位上升引起的渗透变形;损伤-力学场耦合分析可考虑岩土体损伤对力学性质的影响,如节理软化引起的强度降低。多场耦合分析能够更准确地模拟边坡的变形和破坏过程,为边坡设计提供更可靠的依据。

2.3 设计方法与优化

在复杂地质条件下,公路边坡设计需采用动态调整方法。通过施工期实时监测数据(如位移、孔隙水压力)反馈,修正设计参数。例如,在降雨频繁区域,建立地下水动态模型,预判暴雨工况下边坡渗流场变化,及时加固潜在失稳区域。从宏观地形单元到微观岩土结构,需采用多尺度分析方法。宏观上利用遥感与GIS技术识别区域滑坡隐患;微观上通过室内试验(如三轴剪切

试验)确定岩土体强度参数,并结合数值模拟验证局部加固措施的有效性。例如,在某山区公路边坡设计中,先利用遥感技术识别出边坡区域存在多处潜在滑坡隐患点,再通过室内试验获取岩土体的强度参数,最后采用数值模拟方法对不同加固方案进行验证,选择最优方案^[3]。针对复杂地质特点,还需综合运用多种技术手段提升设计精度与工程可靠性。采用三维激光扫描与无人机航测技术,快速获取边坡表面形态数据,构建厘米级精度的数字高程模型(DEM),识别裂缝、错台等变形迹象;利用地质雷达与跨孔CT探测技术,查明地下一定范围内软弱夹层、溶洞的空间分布,为支护结构设计提供依据。

3 复杂地质条件下公路边坡动态支护施工关键技术

3.1 施工准备与监测系统建立

在复杂地质条件下开展公路边坡动态支护施工,充分的施工准备与完善的监测系统建立是保障工程顺利推进与安全实施的关键前提。施工前,要精心做好各项准备工作。制定详尽且完善的施工组织设计,清晰明确施工流程,精准界定质量控制要点,以此确保工程建设的安全性有章可循。组织施工人员进行专业技术培训,通过系统学习,让他们深入了解复杂地质条件下边坡支护施工的独特特点与严格要求,熟练掌握相关施工技术和安全操作规程,提升施工人员的专业素养与安全意识。同时,对施工设备进行全面调试与细致检查,保证设备性能处于良好状态,能够充分满足施工的实际需求。建立完善的监测系统是动态支护施工的重中之重。在边坡潜在破裂区,科学合理地安装GNSS位移监测站、倾角计与渗压计等监测设备,实现对边坡位移、倾斜以及地下水位变化等情况的实时精准监测。根据不同的施工阶段和天气条件,灵活调整采样频率,例如在雨季,适当增加采样频率,以获取更及时准确的数据。此外,构建高效的数据传输和处理系统,确保监测数据能够迅速传输至监控中心,经过专业分析处理后,为施工决策提供坚实可靠的依据。

3.2 支护结构施工

在复杂地质条件下开展公路边坡支护结构施工,精准选择适配的施工方法至关重要,需紧密结合不同地质条件与设计的要求。针对土质边坡,常采用微型桩群与土工格栅加筋层等支护结构。微型桩施工时,要严格把控钻孔精度,保证孔径、孔深等参数符合设计标准,同时注重注浆质量,确保浆液充分填充,以此保障微型桩具备足够的承载能力。土工格栅加筋层施工时,务必保证土工格栅铺设平整,严格控制搭接长度,使其与土体紧密结合、有效相互作用,增强边坡稳定性。对于岩质

边坡, 预应力锚索框架梁是常用支护结构。在陡峭岩质边坡中, 锚索需穿越潜在滑动面一定长度, 保证锚固效果。钻孔采用跟管钻进工艺, 防止塌孔; 注浆体强度必须满足设计要求。框架梁施工时, 要确保钢筋连接牢固、混凝土浇筑密实, 使其有效传递锚索拉力, 提升边坡整体稳定性^[4]。施工过程中, 要遵循“自上而下、分级开挖”原则, 合理控制单级坡高, 根据岩土类型调整坡率。每级平台宽度满足设计要求并设置截水沟, 防止地表水冲刷。同时, 强化施工现场安全管理, 设置醒目的安全警示标志, 为施工人员配备齐全的安全防护用品, 保障施工安全。

3.3 动态调整与应急响应

根据监测数据和施工实际情况, 对支护施工进行动态调整是复杂地质条件下公路边坡动态支护施工的重要环节。当监测数据显示边坡位移、倾斜或地下水位变化超过预警值时, 应及时分析原因, 采取相应的调整措施。例如, 若发现边坡位移速率加快, 可能是由于地下水位上升导致土体软化, 此时可采取降低地下水位的措施, 如增设排水孔等。建立应急响应机制也是保障施工安全的重要措施。制定应急预案, 明确应急响应流程和责任分工。当发生边坡失稳等紧急情况时, 能够迅速启动应急预案, 采取有效的应急措施, 如疏散人员、设置警戒线、进行加固处理等, 最大限度地减少损失。同时, 定期对应急预案进行演练和评估, 不断完善应急响应机制, 提高应对突发事件的能力。

3.4 施工质量控制与验收

施工质量控制是确保复杂地质条件下公路边坡动态支护施工质量的关键。建立质量管理体系, 明确质量目标和质量责任, 加强对施工过程的质量控制。在原材料采购方面, 严格把关材料质量, 确保所使用的材料符

合设计要求和相关标准。在施工工艺方面, 严格按照施工规范和设计要求进行施工, 加强对关键工序的质量控制, 如锚索钻孔、注浆、框架梁钢筋连接等。施工验收是保证工程质量的最后一道关卡。按照相关标准和规范的要求, 对支护工程进行全面验收。验收内容包括支护结构的质量、边坡的稳定性、监测系统的运行情况等。对验收中发现问题, 及时要求施工单位进行整改, 确保工程质量符合要求^[5]。同时, 整理和归档施工过程中的各种资料, 为工程的后期维护和管理提供依据。

结语

复杂地质条件下的公路边坡设计与动态支护施工是一项复杂且系统的工作。从设计阶段的全面勘察、精准分析到施工阶段的精心准备、科学施工以及动态调整与质量控制, 每一个环节都紧密相连、缺一不可。只有充分认识复杂地质条件的影响, 运用先进的技术和科学的管理方法, 才能确保公路边坡的稳定性, 保障公路的安全畅通, 为交通运输事业的发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 邢顺伟. 复杂地质条件下建筑基坑支护绿色施工工艺探究[J]. 现代工业工程, 2026(2): 68-70.
- [2] 侯航舰. 复杂地质基坑支护设计及安全性研究[J]. 工程建设与设计, 2025(17): 27-30.
- [3] 沈向秀. 公路隧道监控量测及超前支护施工技术措施[J]. 散装水泥, 2025(6): 126-128.
- [4] 宋耀. 高海拔公路路基高边坡开挖与支护技术应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(15): 65-68.
- [5] 张雪, 李欢, 陈俊晖, 万兆洋, 李猛. 水利工程深基坑开挖施工中的边坡稳定性控制技术研究[J]. 漫科学(下旬刊), 2025(11): 76-78.