

高原地区复杂地质条件下高陡岩质边坡地质灾害勘察 设计浅析

武连福¹ 李玥蓉²

1. 西藏交通勘察设计研究院有限公司 西藏 拉萨 850000

2. 西藏自治区青藏公路事业发展和应急保障中心 青海 格尔木 816000

摘要:高原地区复杂地质条件下的高陡岩质边坡地质灾害勘察设计是保障重大工程建设安全与区域生态环境稳定的关键环节。本文以川藏公路波密至林芝段、川藏公路邦达至八宿段、昌都市贡觉县某公路等典型工程案例为依托,系统剖析地质构造、岩性特征、水文条件及气候因素对边坡稳定性的影响机制,提出基于多源数据融合的勘察技术体系与动态设计方法。通过构建三维地质模型、创新加固治理技术,形成涵盖勘察、设计、施工全周期的风险防控体系。研究表明,采用BIM+GIS技术、无人机倾斜摄影、微震监测等手段可显著提升勘察精度,结合抗滑桩-预应力锚索-排水系统协同治理方案,可有效降低地质灾害发生率。本文为高原地区重大基础设施边坡工程提供科学依据与技术支撑。

关键词:高原地区;复杂地质条件;高陡岩质边坡;地质灾害勘察设计

1 引言

高原地区作为全球地质活动最为活跃的区域之一,其高陡岩质边坡的稳定性直接关系到重大基础设施的安全运营与区域生态环境的可持续发展。以青藏高原为例,该区域平均海拔超过4000米,地质构造复杂,断裂带密集分布,岩性组合多样,加之极端气候条件与人类工程活动的叠加影响,导致边坡失稳风险显著增加。据统计,2010-2020年,川藏公路波密至林芝段沿线共发生边坡灾害事件42起,直接经济损失超过3.5亿元,其中2017年7月某隧道出口边坡垮塌导致公路中断运营,影响车辆通行超过300辆次。这些案例充分表明,传统勘察设计方法在高原复杂地质条件下已难以满足工程安全需求,亟需构建基于多源数据融合的勘察技术体系,发展动态设计方法,实现从“被动防御”向“主动防控”的转变。

2 高原地区高陡岩质边坡地质特征分析

2.1 地质构造与岩性特征

青藏高原的地层发育具有“多层叠置、多期变形”的显著特征。以川藏公路波密至林芝段某隧道出口边坡为例,该区域位于雅鲁藏布江缝合带附近,地质构造极为复杂。现场勘察发现,边坡岩体主要由三叠系曲松组砂岩、板岩互层组成,局部夹有蛇绿岩套超基性岩体。其中,砂岩的单轴抗压强度为95-115MPa,而超基性岩体由于长期风化作用,其单轴抗压强度仅为28-38MPa,且节理裂隙发育密度高达每米10-12条,远高于砂岩的3-5条/米。这种岩性组合的差异导致边坡在开挖过程中极易形成软弱结构

面,进而诱发滑坡灾害。2017年施工期间,该边坡因超基性岩体风化破碎,在降雨作用下发生局部滑坡,滑坡体积约2500m³,造成施工设备损坏和工期延误。

2.2 水文地质条件

高原地区的水文地质条件呈现“垂直分带、水平差异”的特征。以川藏公路邦达至八宿段边坡为例,该区域海拔4500米以上以冻土水为主,4500米以下则以基岩裂隙水和孔隙水为主^[1]。钻孔揭示的地下水位埋深在雨季可达7-8米,旱季则回升至3-4米,水位波动幅度达4-5米。这种剧烈的水位变化导致岩体有效应力显著降低。根据摩尔-库伦准则,当含水量增加10%时,岩体抗剪强度参数(c、φ值)平均下降20%-25%。2019年雨季,该边坡某监测点的孔隙水压力从0.3MPa骤增至0.7MPa,导致该区域岩体抗剪强度从0.9MPa降至0.6MPa,最终引发局部滑坡,滑坡体堵塞公路,中断交通。

2.3 气候与冻融作用

高原地区的气候特征表现为“低温、强辐射、大温差”。以昌都市贡觉县某公路边坡为例,该区域年均气温为-2℃至6℃,年降水量为350-750mm,但日温差可达25℃以上。这种气候条件导致岩体经历频繁的冻融循环。根据室内试验数据,经历100次冻融循环后,砂岩的波速下降率可达38%-45%,完整性系数降低至0.55-0.65。特别在季节性冻土区,冻胀力可达0.7-1.2MPa,足以使浅表层岩体产生微破裂。2020年冬季,该边坡监测发现,冻融作用导致岩体表面裂缝宽度从0.8mm扩展至3.5mm,裂缝深度从0.3m增加至1.8m,显著降低了边坡的整体稳

定性,次年春季该区域发生小规模崩塌。

3 高陡岩质边坡地质灾害勘察技术体系

3.1 多源数据融合勘察方法

在高原复杂地质条件下,单一勘察手段难以全面揭示地下隐伏结构,因此需要采用多源数据融合技术。以川藏公路波密至林芝段某隧道进口边坡勘察为例,项目团队综合运用了高密度电法、瞬变电磁法、无人机倾斜摄影和微震监测等多种技术手段。高密度电法探测结果显示,边坡内部存在4处电阻率异常区,电阻率值较完整岩体低1-2个数量级,初步判断为软弱夹层或富水带。瞬变电磁法进一步验证了这些异常区的存在,并确定了其空间分布范围。无人机倾斜摄影技术获取了边坡的厘米级精度三维实景模型,通过点云数据处理,可以识别出潜在危岩体,实时捕捉岩体破裂产生的微震事件。在监测期间,能成功预规模较大的岩体崩塌,避免人员伤亡和财产损失。

3.2 三维地质建模技术

基于GoCAD平台构建的三维地质模型,可实现地质体空间关系的可视化表达。以川藏公路邦达至八宿段某边坡为例,项目团队通过整合钻孔数据、地质剖面、物探成果等多源信息,构建了高精度的三维地质模型。模型参数包括:岩层产状为倾向220°-240°,倾角50°-65°;节理密度为5-8条/m;断层破碎带宽度为0.8-3.0m;地下水渗流场Darcy流速为 10^{-6} - 10^{-4} m/s。通过数值模拟分析,发现当边坡坡角大于65°时,安全系数将低于1.20,与现场稳定性评价结果一致。三维地质模型不仅为边坡稳定性分析提供了可靠基础,还为后续的治理设计提供了直观的参考依据。在治理方案制定过程中,通过三维模型直观展示了不同治理措施对边坡稳定性的影响,优化了治理方案。

3.3 岩土体参数测试技术

岩土体参数的准确性直接影响边坡稳定性评价的可靠性。在高原地区,由于岩体风化严重、节理发育,传统的室内试验方法往往难以获得真实的岩土体参数。因此,需要采用原位测试与室内试验相结合的方法^[2]。以昌都市贡觉县某公路边坡为例,项目团队开展了平板载荷试验、螺旋板载荷试验等原位测试,获得了地基承载力、土体侧限模量等参数。同时,通过直剪试验、三轴试验等室内试验,获取了岩体的强度参数。特别针对节理面,采用改进的直剪仪进行反复剪切试验,确定峰值强度与残余强度比值达1.7-2.2。这些参数为边坡稳定性计算提供了科学依据。在稳定性计算中,考虑了节理面的强度参数,使计算结果更接近实际情况。

4 高陡岩质边坡稳定性分析与评价

4.1 破坏模式识别

边坡破坏模式的识别是稳定性评价的基础。以川藏公路波密至林芝段某隧道出口边坡为例,项目团队通过赤平投影分析,结合现场地质调查,确定了该边坡的主要破坏模式为楔形滑动。该边坡由两组结构面切割形成楔形体,结构面产状分别为倾向230°、倾角60°和倾向320°、倾角50°。通过优势结构面组合分析,发现当两组结构面的交线倾角小于边坡角时,楔形体将沿交线滑动。计算结果表明,该楔形体的安全系数仅为1.12,处于临界状态。这一识别结果为后续的治理设计提供了明确的方向。在治理设计中,针对楔形滑动破坏模式,采取了针对性的加固措施。

4.2 稳定性计算方法

稳定性计算是评价边坡安全性的核心环节。以川藏公路邦达至八宿段某边坡为例,项目团队采用了极限平衡法和数值模拟法相结合的方法进行计算。极限平衡法采用Bishop法和Janbu法,考虑了地震力、水压力等作用。计算结果表明,当水位上升3米时,安全系数下降0.18-0.25。数值模拟法运用FLAC^{3D}建立三维数值模型,考虑了岩体的非线性本构关系。模拟结果显示,在开挖扰动下,边坡最大位移达12cm,塑性区贯通深度达8米。这两种方法的计算结果相互验证,为边坡稳定性评价提供了可靠的依据。根据计算结果,对该边坡的危险性进行了准确评估,为治理决策提供了科学支持。

4.3 风险评价与分级

风险评价与分级是制定治理措施的重要依据。以昌都市贡觉县某公路边坡为例,项目团队基于模糊综合评价法,构建了包含5个一级指标、18个二级指标的评价体系。一级指标包括地质条件、岩土体性质、水文条件、气候条件和人类活动;二级指标则包括岩层产状、节理密度、地下水位、降雨强度等。通过专家打分和权重赋值,计算了各边坡的风险指数。根据风险指数的大小,将边坡划分为低风险($RI < 0.4$)、中风险($0.4 \leq RI < 0.7$)和高风险($RI \geq 0.7$)三个等级。在该区域评价中,高风险边坡占比达28%,需优先治理。这一评价结果为治理决策提供了科学依据。根据风险分级结果,合理安排了治理资金和施工顺序。

5 高陡岩质边坡地质灾害防治设计

5.1 治理原则与目标

高原地区高陡岩质边坡的治理应遵循“以防为主、防治结合”的原则,确保治理工程的安全性、经济性和耐久性。具体目标包括:安全性方面,要求治理后的边

坡安全系数不低于1.35；经济性方面，要求单位面积治理成本不超过5000元/m²；耐久性方面，要求设计使用年限不低于50年^[3]。以川藏公路波密至林芝段某隧道进口边坡为例，该边坡高度达60米，坡角65°，岩性为砂岩夹板岩，节理发育。项目团队根据治理原则和目标，制定了“预应力锚索+抗滑桩+排水系统”的组合治理方案。

5.2 主动加固技术

主动加固技术是提高边坡稳定性的关键措施。以川藏公路波密至林芝段某隧道进口边坡为例，项目团队采用了预应力锚索和抗滑桩相结合的主动加固技术。预应力锚索采用压力分散型锚索，设计吨位为950-1150kN，锚固段长度为10-12米。在锚索施工过程中，通过张拉试验确定了最佳的张拉力和锁定值。施工后监测数据显示，边坡位移速率从5mm/d降至0.2mm/d，表明锚索加固效果显著。抗滑桩设计为矩形截面，尺寸为2.5m×3.5m，桩长为18-26米。通过桩身应力监测，发现最大弯矩达1200kN·m，需配置16Φ25主筋。抗滑桩的施工有效阻止了边坡的进一步滑动，保障了施工安全。

5.3 被动防护技术

被动防护技术是防止边坡灾害造成人员伤亡和财产损失的重要手段。以川藏公路邦达至八宿段某边坡为例，项目团队采用了柔性防护网和拦石墙相结合的被动防护技术。柔性防护网布置为RXI-080型主动防护网，系统高度为8米，破断拉力≥60kN。在某次落石事件中，该防护网成功拦截了体积达8m³的落石，最大拦截能量达600kJ^[4]。拦石墙设计为重力式拦石墙，墙高6-9米，基础埋深3-4米。通过落石冲击试验，确定墙背最大土压力达350kPa。拦石墙的施工有效保护了下方公路的安全，减少了交通事故的发生。

5.4 排水系统设计

排水系统设计是降低边坡地下水位、减少水压力的重要措施。以昌都市贡觉县某公路边坡为例，项目团队设计了地表排水和地下排水相结合的排水系统。地表排水系统包括截水沟和排水沟，沟底纵坡≥4%。在雨季期间，该排水系统有效降低了边坡表面的径流冲刷，减少了水土流失。地下排水系统采用仰斜排水孔和排水盲沟，孔径120mm，间距4-5米。监测数据显示，排水系统施工后地下水位降低了1.8-2.3米，孔隙水压力降低了50%-65%。排水系统的设计有效提高了边坡的稳定性，降低了滑坡风险。

结语

高原地区高陡岩质边坡的稳定性受地质构造、岩性特征、水文及气候等多因素耦合影响，多源数据融合勘察技术与三维地质建模有效提升了勘察精度与分析可靠性。相关方法已在川藏公路波密至林芝段等多个典型工程中得到验证。未来研究应聚焦岩体损伤演化规律，建立考虑时间效应的长期稳定性预测模型；研发具备自适应调节功能的智能支护材料；构建边坡灾害大数据平台，推动勘察设计向智能化发展，从而进一步提升灾害防控能力，保障重大基础设施建设。

参考文献

- [1]王思力,唐书伟.高陡岩质边坡地质灾害勘察设计要点及注意事项[J].新城建科技,2024,33(03):98-100.
- [2]程传智.高陡岩质边坡地质灾害的勘察设计方法探讨[J].工程与建设,2023,37(06):1704-1706.
- [3]张敬平.高陡岩质边坡地质灾害勘察设计分析[J].低碳世界,2020,10(09):50-51.
- [4]刘鹏.广连项目高陡岩质边坡地质灾害勘察设计[J].智能城市,2021,7(09):55-56.