

高陡边坡潜在崩塌体结构特征及稳定性评价方法

盛海峰

勤工建设集团有限公司, 浙江 杭州 311200

[摘要]高陡边坡潜在崩塌体往往是地质构造、风化作用及外部扰动等因素协同作用的产物,呈现出结构繁杂、失稳隐匿性高的特性,极大威胁到工程建设及运营的安全,确切鉴别崩塌体结构特征,科学评估其稳固性,是强化边坡灾害防控水平的要害,采取现场调查、结构分析和数值模拟等手段的综合运用方式,可精准辨别潜在崩塌体且完成风险判定,为边坡治理给予技术辅佐,有着良好的工程应用价值及推广空间。

[关键词]高陡边坡;潜在崩塌体;结构特征;稳定性评价;数值模拟

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16457

中图分类号: P642

文献标识码: A

Structural Characteristics and Stability Evaluation Method of Potential Landslide Mass on High and Steep Slopes

SHENG Haifeng

Qingong Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311200, China

Abstract: Potential landslide bodies on high and steep slopes are often the product of the synergistic effects of geological structures, weathering, and external disturbances, presenting complex structures and high instability concealment, which greatly threaten the safety of engineering construction and operation. Accurately identifying the structural characteristics of landslide bodies and scientifically evaluating their stability is the key to strengthening the level of slope disaster prevention and control. The comprehensive application of on-site investigation, structural analysis, and numerical simulation can accurately identify potential landslide bodies and complete risk assessment, providing technical assistance for slope treatment, and has good engineering application value and promotion space.

Keywords: high and steep slopes; potential landslide mass; structural features; stability evaluation; numerical simulation

引言

交通、水利、矿山等工程区域中高陡边坡广泛分布着,受地质构造、风化作用及人为活动破坏影响,极易生成潜在崩塌的岩体,让工程安全与人员生命面临威胁,现阶段相关研究在识别技术、结构面参数解析与失稳机制研究方面取得一定进展,然而稳定性评价仍然存在方法单一、适应性能差等问题,以遥感技术、地质勘查及数值模拟相融合,创建多源信息融合的结构分析及稳定性评定体系,有利于提升高陡边坡灾害预测及治理能力。

1 潜在崩塌体的识别与分布特征

1.1 潜在崩塌体识别标准与分类方法

开展边坡稳定性分析,前提是要准确识别潜在崩塌体,其识别手段主要有地形地貌识别、工程地质综合鉴别以及多源信息融合技术,地形地貌识别法主要是对遥感影像和数字高程模型(DEM)进行解译,判别断崖、滑移痕迹、陡坎这类典型地貌特征,可初步判断潜在的不稳定地带。工程地质综合判别法则整合地层岩性、结构面特质、水文地质情形及人类工程活动等要素,借助调查分析跟专家经验判定相协同的办法,划分潜在的崩塌体,伴随技术革新的步伐,采用遥感影像、三维激光扫描(LiDAR)与无人机电测绘等手段进行高精度识别已成普遍现象,达成了对边

坡微小形变、结构裂隙还有表层扰动特征的自动提取与识别,有效增进了识别的精准度和工作效率。

1.2 高陡边坡崩塌体的形成机制

高陡边坡潜在崩塌体的形成机制显现出复杂多样的状况,关键受控于地质构造、风化破碎作用,还有地震、降雨等外部诱因,诸如断层、节理、褶皱的地质构造,在岩体中构建出天然的弱面,为滑移破裂营造了力学范畴的薄弱地带,于长期自然演化进程中,风化破碎作用改变了岩体结构的完整程度,造成岩石强度减弱,继而形成疏松又不稳定的崩塌岩体,降雨入渗会引起孔隙水压力攀升,造成结构面抗剪强度下降,地震依靠振动加速了裂隙的拓展和结构的扰动,极有机会诱发瞬间崩塌,上述因素一般以复合作用形式展现,共同作用影响边坡的稳定情形。

1.3 潜在崩塌体的空间分布规律

地貌类型、地质结构及工程活动与潜在崩塌体空间分布紧密相连,处在山地丘陵、峡谷陡坡等地貌单元之间,基于坡角大,岩性表现为破碎状态,崩塌体的分布十分密集,以交通沿线、库岸边坡及矿区露天开采区为典型的高风险区域,中上部坡段为崩塌体主要集中处,受地形高差及重力作用方面的影响;就水平方向上的分布而言,沿着断裂带、层间软弱面和边坡开挖带,呈带状或者斑块状聚集成

布开来,按照典型工程区域实例的统计分析说明,潜在崩塌体在结构复杂、岩性急剧变化及扰动强烈的区域更集中,呈现显著的地带分布规律与工程敏感属性,这些分布规律对灾害预警及防控区域的划分有着极为重要的指导价值。

2 崩塌体结构特征分析

2.1 结构面的几何特性

结构面几何形态在很大程度上对崩塌体稳定性起控制作用,含有节理裂隙走向、所呈倾角、间距状况等参数,岩体的完整性及其潜在滑动方向由这些几何特征决定,尤其当处于高陡边坡的时候,节理面在空间上的组合往往会生成不利于稳定的破裂面。节理走向与边坡坡面间夹角越趋相近,其失稳的潜在风险越高,结构面交汇状况也对崩塌模式起到关键影响,典型例子里,楔形体往往是由两组倾向汇聚的节理面构成的,受重力影响,沿交线方向极易丧失稳定性,交错组合的多组节理或许会形成孤立块体,存在滚落、滑移的潜在风险,结构面空间上的组合样式,抉择了潜在崩塌体的几何轮廓和破裂的路径,作为结构稳定性分析的关键基础。

2.2 结构面力学属性与弱面识别

结构面力学性质直接影响其抗剪强度和对潜在滑移的把控能力,诸如摩擦系数、黏聚力、剪切强度等是常见参数,经由现场剪切试验、实验室岩样测试也或反演分析取得,因长期处于风化、水化及剪切作用中,也许会产生强度减小的软弱夹层及劣化条区,就像泥化层、页岩层抑或断层泥带,这些区域往往呈现出高含水量、低强度以及高压缩性的特点,成为左右崩塌体稳定性的关键薄弱之处,借助岩芯观察、钻探揭露以及地球物理手段来辅助辨认这些弱面,可以增进潜在崩塌体稳定性评估的精确性,防止常规判别方法产生的识别遗漏。

2.3 潜在崩塌体结构类型划分

就结构面组合样式和岩体结构特性而言,潜在崩塌体可归类为块体状、层状、楔状三种典型类型,块体状结构多存在于节理发育、交错密集的岩体里面,易造就孤立存在的滑移块体,其失稳形式主要是滑移、翻倒及滚落;层状结构体现出顺层岩体、沉积岩中软硬交替出现的结构,呈现明显的剪切以及沿层滑移特性;两组或多组交汇节理交汇后构成了楔状结构的楔体,在重力的作用下沿交线方向出现滑移,各结构类型的破坏模式差异显著可见,需根据具体几何形态及力学条件开展分类鉴别与稳定性分析,结构类型的划分可促进对崩塌体成因的明晰,同时为制订具有针对性的治理手段提供了支撑。

3 高陡边坡稳定性影响因素分析

3.1 自然因素分析

持续或突发的多种自然因素作用影响高陡边坡的稳定性,而降雨、地震以及风化作用的影响尤为显著,作为诱发边坡失稳的常见外在因素,降雨入渗位列其中,大量

雨水渗进坡体以后,不仅可加大岩体孔隙水压力,弱化结构面的抗剪能力,也有可能性引发裂隙扩展及浅表土层软化,进而让整体稳定性出现下滑。作为突发性极为强烈、破坏力极大的因素,可依靠振动扰动快速激发岩体内能的释放,诱发结构面错移、节理张开以及坡体整体的滑动,尤其在节理充分发育、结构呈松散状态的区域,这种瞬间的效应极易触发坡体的崩塌失稳,作为长期自然演化进程的风化剥蚀作用,会逐步削弱岩石的强度,催生风化带与松散的层面,引起结构面的形变与黏结性能的退变,最终积累为触发滑坡、崩塌的风险源头。

3.2 工程扰动因素分析

工程活动会因人为因素,对高陡边坡结构稳定性造成改变,尤其在基础设施建设紧凑的地区,这种表现愈发突出,边坡开挖的时候,往往会伴随大量卸荷扰动,原应力平衡状态被冲破,引发坡体结构松弛与位移集聚,若在开挖角度、深度和支护节奏方面控制不合理,容易引发滑动、崩落等现象。因道路及隧道施工而产生的振动与掏空效应,也会引起岩体内部节理结构的扰动,引起裂隙张开、结构面的剪切强度减弱,破坏整体的连贯状态,即使爆破作业能提高施工效率,但产生的高频震动波在短时间内可造成节理扩展、岩体裂解,甚至引发潜在滑动面瞬间失去稳定,工程扰动因素不但造成边坡物理形态变化,还破坏其结构完整性,进一步加剧了结构应力失衡与破坏扩展势头,施工设计当中必须高度重视。

3.3 结构-应力协同机制

从本质上说,边坡稳定性是岩体结构和应力场相互作用的产物,应力传递路径的走向由岩体结构决定,各异的结构组合形式催生应力集中或衰减的区域,若节理面走向与应力主方向呈现一致,结构面较易充当应力释放的地带,出现滑裂及剪切破坏情形。面对复杂的地质环境时,较易出现局部应力的集中区,就像结构面交汇的位置点、软弱夹层的边界等,极易成为失稳的起始开端,多类应力源同时施加效力,似地应力、开挖扰动应力与地震动力共同叠加起来,会激起耦合作用显现,极大地降低了岩体的整体稳固性,结构系统跟应力耦合机制方面的分析,有益于把握边坡从稳定转变为失稳的演化路线,为后续的精准确判与有效控制提供理论支撑,统筹权衡自然、工程及结构因子的共同作用,是开展边坡稳定性评价的核心要点。

4 潜在崩塌体稳定性评价方法

4.1 经验判别法

经验判别法因操作简便、反应迅速,广泛用于工程中的边坡稳定性初判。常见方法有RMR、Q系统和Bieniawski判别法,主要依据节理密度、岩体完整性、地下水情况及结构面条件进行定性和半定量分析,尤其在勘察资料不足时,该法能提供有价值的参考方向。其侧重于地质经验积累,结合现场裂隙状态、坡面变形、滑带泥及软弱带走向

等信息进行判断。尽管结果存在主观性与不确定性,但在边坡众多、工期紧张的工程中具有重要的实用价值,可初步筛选潜在崩塌体。

4.2 极限平衡与力学模型法

极限平衡分析(LEA)方法成为边坡稳定性评价的经典理论依托,设想滑体达到极限平衡之态,构建力学模型以分析滑体在重力、抗剪力与外荷载施加下的稳定性,诸如瑞典条分法、Bishop法、Janbu法等为常用模型,该方法能较精准地算出安全方面的系数,确定潜在滑动面的位置及其形态,尤其对层状岩体、顺层边坡结构具有适用性。除进行整体稳定分析以外,运动学视角下的岩体块体稳定性分析同样是关键内容之一,着重分析各类结构体(如块体、楔体、板体)在节理管控之下的位移态势、滑移路径与破坏形式,该法基于结构面参数,适用于地质信息完整区,通过构建模型评估边坡对自然与工程扰动的响应,支撑设计治理。

4.3 数值模拟与智能化方法

伴着计算技术与人工智能的发展,数值模拟与智能化方法渐渐成为边坡稳定性评价的关键趋势,基于有限差分(FLAC3D)、离散元(UDEC)等相关软件平台,能对复杂地质结构、应力变化及破坏演化进程进行模拟,达成对潜在崩塌体的动态化分析。这类方法能顾及结构面非线性特性、多应力场耦合、地下水流动等多样的影响因素,拥有较高精度与良好的可视化呈现能力,凭借多场耦合分析操作,还可预计裂隙扩展、滑裂面发展及变形区的演变进程,揭示潜藏的失稳原理,借助支持向量机(SVM)、随机森林(RF)等机器学习算法构建起的边坡风险预测模型,也愈发被重视起来。多源数据融合技术结合遥感、激光点云与传感监测,构建边坡稳定性综合评价体系,融合传统力学与数据驱动方法,提升预测精度与管理效率,已成复杂边坡智能化分析趋势。

5 应用实例分析与方法验证

5.1 典型工程案例选取与背景介绍

将四川雅安至康定高速公路某段边坡当作典型工程案例,开展潜在崩塌体结构的分析与稳定性评价验证,该路段途经龙门山断裂带地质繁杂的区域,以震旦系变质岩、二叠系砂岩与页岩互层为主构成地层,可见多组构造裂隙发育之象,岩体风化现象十分显著。基于多年降雨以及震后扰动影响,在边坡中部存在着多个潜在崩塌体,部分地段能看到明显的裂隙张开以及轻微变形迹象,体现了高陡边坡的典型特质,按照前期勘察资料及遥感解译的相关结果,选定一段高度约76米、坡度近乎75°的边坡区域作为分析目标。

5.2 结构特征识别与稳定性分析过程

借助无人机三维激光扫描与现场测绘相结合之法,构建起高精度数字地形模型与结构面分布图示,辨识出主控

节理群体走向为N40°E,倾角近似60°,有一组与它近乎垂直的剪切裂隙相伴,依照识别得到的结果,采用FLAC3D搭建三维数值模型,对自然工况以及极端降雨条件下边坡的响应状况展开模拟。同时把极限平衡法跟块体运动学分析法结合起来,计求出潜在滑移体的安全系数,然后评估结构面存在的联动滑移风险,采用引入岩体质量指标(RMR)、剪切强度折减法(SSR)和设定变形监测阈值的方式,把边坡稳定性等级加以量化,由此把风险等级分作中等偏高,推荐采用介入手段。

5.3 评价结果验证与安全建议

把评价结果与近两载现场监测数据做对比确认,囊括边坡位移监测、裂缝张开速率的相关情况及地下水水位变动,显示出模型预测区域跟实测不稳定点高度一致,误差维持在5%以内,证实此方法的有效性与精度可靠,就分析得到的结果而言,推出锚杆加固与钢筋网喷护相组合的支护规划,在节理关键交汇处安装锁脚锚索,加大整体抗滑力度,还建议在雨季前后加强对监测频率的把控,投放地表裂缝位移监测探头,实施动态性预警工作,以本案例为基础构建的分析方法对类似高陡岩质边坡有良好适应性,能为西南山区高速公路及水电工程提供可套用的技术模式与治理办法。

6 结语

由于结构复杂、致灾隐蔽性突出,高陡边坡潜在崩塌体,给工程安全构成极大威胁,借助对其结构特征做系统剖析,知晓了节理几何参数、力学属性及其类型划分的关键作用,把经验判别、力学模型跟智能化手段相联合,构建出融合多方法的稳定性评判体系,实际案例的验证结果显示,该方法具备较强的适用性以及工程指导意义,往后需提升多时相监测技术与人工智能在边坡预警中的融合应用程度,强化对崩塌灾害智能识别与动态评估水平。

[参考文献]

- [1]朱磊.近水平岩层高陡边坡崩塌机理及风险评价方法研究[D].西安:长安大学,2021.
 - [2]赖渊平,于正兴.尾矿坝渗流对露天采场高陡边坡稳定性影响分析[J].矿产勘查,2024,15(1):36-42.
 - [3]刘惠洋,张东亮,李光,等.复杂断层构造高陡边坡稳定性计算分析[J].有色金属(矿山部分),2025,77(1):38-44.
 - [4]周创兵,姜清辉,姚池,等.水利水电工程高陡边坡变形与稳定性研究进展及挑战[J].水力发电学报,2025,44(1):1-17.
 - [5]王东红.软弱夹层对高陡边坡稳定性的影响及勘察方法优化[J].工程机械与维修,2025(2):79-81.
- 作者简介:盛海峰(1976.11—),工作单位:勤工建设集团有限公司。