

岩土勘察中边坡稳定性分析与评价

刘存辉 王 仁

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530007

摘 要: 随着工程建设规模持续拓展与复杂度攀升,岩土勘察工作愈发关键。本文聚焦岩土勘察中的边坡稳定性分析与评价。首先阐述边坡稳定性的基本概念与重要性,接着介绍传统分析方法、数值分析法、不确定性分析法及现代分析方法。随后分析影响边坡稳定性的地质条件、岩土体性质等主要因素。最后探讨其发展趋势,包括智能化与自动化、多源数据融合等,旨在为边坡稳定性研究与实践提供全面参考。

关键词: 岩土勘察; 边坡稳定性; 分析; 评价

引言: 在岩土工程领域,边坡稳定性分析与评价是至关重要的环节。边坡作为自然或人工形成的斜坡,其稳定性直接关系到工程建设安全、生态环境稳定以及人民生命财产安全。一旦边坡失稳,可能引发滑坡、崩塌等地质灾害,造成巨大损失。随着工程建设规模不断扩大,所面临的边坡问题日益复杂。因此,深入开展边坡稳定性分析与评价研究,准确判断边坡稳定状态,采取合理有效的防治措施,已成为岩土勘察工作中的重要任务,对保障工程顺利实施和可持续发展意义重大。

1 边坡稳定性的基本概念与重要性

1.1 边坡稳定性的定义

边坡稳定性是指边坡在各种自然因素与人为因素作用下,保持其原有平衡状态,不发生滑动、崩塌等破坏变形的能力。它涵盖了边坡岩土体内部的应力应变关系、结构面特征以及整体力学平衡状态等多方面内容。边坡稳定性并非绝对不变,而是处于一种动态平衡中,会随时间、环境条件改变而变化。判断边坡是否稳定,通常依据其安全系数,即边坡抗滑力与下滑力的比值,当安全系数大于一定标准值时,认为边坡处于稳定状态,反之则可能面临失稳风险,需及时采取措施保障安全^[1]。

1.2 边坡稳定性的重要性

边坡稳定性至关重要,关乎众多领域的安全与发展。在工程建设方面,如公路、铁路、水利等,稳定的边坡是工程顺利实施和长期运营的基础,失稳会导致道路中断、水库溃坝等严重事故,造成巨大经济损失和人员伤亡。在矿山开采中,边坡稳定关系到矿工生命安全和开采效率,滑坡等灾害会破坏采矿设施,影响生产进度。

2 边坡稳定性分析方法

2.1 传统分析方法

(1) 极限平衡法。极限平衡法是边坡稳定性分析的核心传统方法,基于静力平衡原理,通过分析滑体沿滑

在滑动面的受力状态,计算抗滑力与下滑力的比值来评价稳定性。其核心假设包括将滑体视为刚体、滑动面应力均匀分布,并采用条分法简化计算。经典方法包括毕肖普法、简布法及萨尔玛法。该方法模型简单、计算高效,但未考虑土体应力-应变关系,需依赖经验假设滑动面形状。尽管存在局限性,其物理意义明确、规范指导性强,仍是工程实践中应用最广泛的方法。(2) 工程地质类比法。工程地质类比法属于定性分析方法,通过将待研究边坡与已研究或具有经验的边坡进行对比,综合地层岩性、地质构造、地形地貌等因素,评价其稳定性并提出合理坡高和坡角。该方法包括历史分析法、因素类比法、类型比较法等,优点是能快速综合多因素作出初步判断,尤其适用于地质条件复杂、勘测初期资料缺乏的场景。但其依赖经验性强,类比条件因地而异,需丰富实践经验的地质工作者操作,且缺乏定量标准,通常作为其他方法的补充或前期筛选工具。

2.2 数值分析法

(1) 有限元法。有限元法是边坡稳定性数值分析的经典方法,其核心思想是将连续的边坡介质离散为有限个单元,通过节点连接形成计算网格。每个单元内假设位移或应力呈简单函数分布,利用变分原理或加权余量法建立整体平衡方程,求解得到边坡的应力、应变及位移场。该方法能精确模拟复杂地质条件和边界条件,分析边坡在静力、动力或渗流耦合作用下的变形破坏过程。但有限元法对网格质量敏感,大变形问题易出现网格畸变,且需结合强度折减法等后处理技术计算安全系数,计算成本较高。(2) 有限差分法。有限差分法通过差分方程近似替代微分方程,将边坡稳定性问题转化为代数方程组求解。该方法直接对空间和时间进行离散,利用节点间的差分格式表达导数,适用于动态问题和瞬态渗流分析。以FLAC3D为代表,有限差分法采用显式

时间积分, 无需形成整体刚度矩阵, 能高效处理大变形和非线性问题, 模拟边坡渐进破坏过程。但其对复杂几何边界的适应性较弱, 网格划分需人工干预, 且隐式格式的稳定性需严格控制时间步长。(3) 离散元法。离散元法将边坡岩土体视为由离散块体组成的集合, 块体间通过接触面传递力与位移, 允许块体发生平移、旋转甚至分离, 适用于分析节理裂隙发育的块状岩质边坡或松散堆积体。该方法能直接模拟边坡失稳过程中的块体运动、碰撞和破碎, 揭示滑动面形成与扩展的动态机制。以PFC、UDEC等软件为代表, 离散元法在处理大位移、非连续变形问题时具有独特优势, 但计算效率受块体数量和接触关系复杂度影响显著, 且需通过标定试验确定微观参数, 对使用者经验要求较高。

2.3 不确定性分析法

(1) 可靠度分析法。可靠度分析法基于概率统计理论, 将边坡稳定性视为随机变量, 通过分析岩土参数(如黏聚力、内摩擦角)、荷载等的不确定性, 量化边坡失稳概率。该方法通过构建功能函数(安全系数表达式), 采用蒙特卡洛模拟、一次二阶矩法等计算可靠度指标或失效概率, 弥补了传统方法忽视参数变异性导致的风险低估问题。其优势在于能提供定量风险评估, 适用于复杂地质条件或高风险工程, 但需大量统计数据支撑参数概率分布, 且计算成本较高。目前, 可靠度分析已成为边坡稳定性评价的重要补充, 尤其在规范中逐步纳入其设计标准。(2) 模糊数学法。模糊数学法通过引入隶属度函数描述边坡稳定性状态的模糊性(如“稳定”“基本稳定”“不稳定”的过渡性), 利用模糊综合评判或模糊聚类分析处理多因素耦合作用下的不确定性。该方法适用于地质条件复杂、信息不完备或评价指标难以精确量化的场景, 如岩体结构面产状、地下水状态等模糊因素的评估。其核心在于构建合理的模糊评判模型和权重分配体系, 但主观性较强, 需结合专家经验或历史数据校准。模糊数学法为边坡稳定性分析提供了从定性到定量的过渡框架, 尤其在初步设计阶段具有实用价值。

2.4 现代分析方法

(1) 人工智能与机器学习技术。人工智能与机器学习技术通过构建数据驱动模型, 突破传统方法对物理机制和复杂参数的依赖。支持向量机、神经网络、随机森林等算法可挖掘边坡稳定性与地质条件、监测数据间的非线性关系, 实现快速预测与分类。例如, 利用历史滑坡数据训练模型, 可评估新边坡的失稳风险; 结合实时监测数据, 机器学习能动态修正预测结果, 提升时效

性。其优势在于处理高维、非结构化数据的能力, 但需大量标注数据支撑模型训练, 且模型可解释性较弱。目前, 该技术已成为边坡稳定性分析的重要补充, 尤其在数据丰富场景下展现出高效性。(2) 边坡监测与预警系统。边坡监测与预警系统通过集成传感器网络与物联网技术, 实时采集边坡变形、应力、地下水等关键参数, 结合数据分析模型判断稳定性状态。系统可自动触发多级预警, 为应急处置提供时间窗口。例如, 基于北斗/GNSS的高精度监测能捕捉毫米级位移, 云计算平台实现数据远程传输与智能分析。其核心价值在于将静态分析转化为动态风险管理, 但需解决传感器耐久性、数据干扰等问题。目前, 该系统已广泛应用于交通、矿山等领域, 成为边坡安全保障的关键技术^[2]。

3 影响边坡稳定性的主要因素

3.1 地质条件

地质条件是边坡稳定性的基础控制因素。地层岩性直接影响岩土体强度, 如坚硬岩体(花岗岩)抗风化能力强, 而软弱岩体(泥岩)易风化剥落; 沉积岩的层理、片岩的片理等结构面方向与边坡坡向的组合关系, 可能形成潜在滑动面。地质构造活动(如断层、褶皱)会破坏岩体完整性, 降低其抗剪强度, 尤其在构造破碎带附近, 边坡更易失稳。

3.2 岩土体性质

岩土体性质是边坡稳定性的内在决定因素。物理性质方面, 岩土体的密度、孔隙率影响其自重应力, 高孔隙率可能导致渗透性增强, 加剧地下水作用; 力学性质中, 抗剪强度(黏聚力、内摩擦角)是核心指标, 软黏土或风化岩体的低强度易导致滑动。结构特征上, 岩体的节理裂隙发育程度、土体的颗粒级配及胶结状态, 均会改变其整体性。准确测定岩土体参数是稳定性分析的关键。

3.3 地下水作用

地下水是边坡失稳的常见诱因。静水压力通过增加滑体重量和孔隙水压力, 降低有效应力, 从而削弱抗滑力; 动水压力(渗流力)在地下水流动时对岩土体产生拖拽作用, 可能引发管涌或流土破坏。此外, 地下水化学作用(如软化、溶蚀)会降低岩土体强度, 例如泥岩遇水膨胀崩解, 砂岩被地下水溶蚀后孔隙率增大。

3.4 外部荷载

外部荷载是边坡稳定性的动态影响因素。自然荷载包括地震力、冰雪堆积等, 地震产生的惯性力可能使边坡超过极限平衡状态, 而冰雪融化会增加滑体重量并软化岩土体。人工荷载如建筑物基础压力、堆料荷载等,

会改变边坡应力分布,尤其在坡顶加载可能引发张拉裂缝,为地下水渗入提供通道。此外,交通荷载(如车辆振动)的长期作用可能导致岩土体疲劳破坏,降低边坡稳定性。

3.5 人类活动

人类活动是边坡失稳的重要人为诱因。工程开挖(如公路切坡、矿山开采)会破坏原有应力平衡,形成高陡边坡,增加失稳风险;填筑工程(如堤坝、路基)若压实不足或排水不畅,可能引发沉降或滑动。爆破振动会加剧岩体裂隙扩展,降低结构面强度;植被破坏则削弱了根系的加固作用,同时增加地表径流对坡面的冲刷。此外,地下水过度开采导致水位下降,可能引发地面沉降,间接影响边坡稳定性。

4 边坡稳定性分析与评价的发展趋势

4.1 智能化与自动化

随着人工智能技术的突破,边坡稳定性分析正迈向智能化与自动化。机器学习算法(如深度神经网络、强化学习)可自动挖掘海量监测数据与稳定性之间的复杂关系,实现动态预测与智能预警;自动化监测设备(如无人机、智能传感器)结合物联网技术,能实时采集多参数数据并自动传输至云端平台,减少人工干预。未来,基于数字孪生的边坡智能系统将集成分析、预警与决策功能,通过自学习优化模型参数,显著提升评价效率与准确性,推动边坡管理从被动响应向主动防控转型。

4.2 多源数据融合

多源数据融合成为提升边坡评价精度的关键。传统方法依赖单一数据源(如地质勘察或监测数据),而现代技术整合了遥感影像(InSAR、LiDAR)、地质雷达、钻孔数据、物联网监测等多维度信息,通过数据同化或机器学习融合技术,构建高分辨率三维地质模型。例如,InSAR技术可捕捉毫米级地表位移,结合地下水位监测数据,能更精准地揭示边坡变形机制。多源数据融合不仅弥补了单一数据的局限性,还为复杂地质条件下的稳定性分析提供了更全面的依据,推动评价方法向量化、可视化方向发展。

4.3 精细化评价

精细化评价聚焦于边坡失稳过程的微观机制与空间

异质性。基于离散元法(DEM)或物质点法(MPM)的数值模拟,可再现岩土体颗粒运动、裂隙扩展等细节,揭示滑动面形成的动态过程;高精度地质建模技术(如三维激光扫描)能刻画边坡微地形与结构面空间分布,为局部稳定性分析提供依据。此外,考虑岩土体参数空间变异性的随机有限元法,可量化局部失稳对整体稳定性的影响。精细化评价有助于识别高风险区域,为针对性治理措施(如锚固、排水)提供科学支撑。

4.4 综合评价与风险管理

综合评价与风险管理强调从单一稳定性分析向全生命周期风险管控转变。通过集成地质条件、环境因素、人类活动等多尺度信息,构建边坡风险评价指标体系,结合可靠度理论或模糊综合评判,量化失稳概率与后果严重性,实现风险分级管理。同时,动态风险评估模型可结合实时监测数据,更新风险状态并触发预警,指导应急决策。此外,基于BIM(建筑信息模型)的边坡全生命周期管理平台,可整合设计、施工、运维阶段数据,优化风险防控策略。综合评价与风险管理将推动边坡工程向安全、经济、可持续方向协同发展^[3]。

结束语

岩土勘察中的边坡稳定性分析与评价是保障工程建设安全与可持续发展的核心环节。随着地质条件复杂化、工程规模扩大化以及气候变化影响加剧,传统分析方法正与智能化、多源数据融合、精细化建模等新技术深度融合,推动评价从静态定性向动态定量转型。未来,需进一步强化多学科交叉创新,完善全生命周期风险管理体系,提升对极端事件(如强降雨、地震)的应对能力。同时,加强勘察-设计-施工-监测协同联动,推动技术标准与规范迭代升级,方能科学指导边坡工程实践,为交通、能源、水利等领域的安全建设筑牢根基。

参考文献

- [1]范吉龙.岩土工程勘察在高边坡工程中的应用[J].江西建材,2021(09):78-79.
- [2]张雷.设计边坡支护工程常见的岩土工程勘察问题分析[J].西部资源,2021(04):45-46+49.
- [3]刘阳,郑亚娣,陈帅强.边坡支护工程设计的岩土工程勘察研究[J].智能城市,2021,7(11):155-156.