

复杂地质条件下边坡岩土体稳定性分析及支护优化研究

胡兴繁

中国冶金地质总局内蒙古地质勘查院 内蒙 呼和浩特 010000

摘要: 针对复杂地质条件下边坡岩土体失稳风险高、支护方案适配性不足等问题,结合现场勘察、室内试验与工程实例,系统研究边坡岩土体特征、稳定性分析方法、失稳机理及支护优化技术。通过分类表征复杂地质特征,构建多方法融合的稳定性分析模型并验证优化,明确边坡失稳机理与典型破坏模式,提出适配复杂地质的支护技术及优化设计方法。研究表明,融合模型提升了稳定性分析精度,优化后的支护方案可实现安全性与经济性平衡,为复杂地质边坡工程设计、施工及风险防控提供可靠的技术支撑。

关键词: 复杂地质条件; 边坡岩土体; 稳定性分析; 支护优化技术

引言: 随着工程建设向复杂地质区域延伸,断层、软弱夹层等复杂地质条件导致边坡失稳事故频发,严重威胁工程安全与人员财产安全。当前传统稳定性分析方法精度不足,支护方案存在适配性差、经济性欠佳等问题,难以满足复杂地质边坡的工程需求。基于此,本文结合中国冶金地质总局内蒙古地质勘查院相关工作实践,开展复杂地质条件下边坡岩土体稳定性分析及支护优化研究,梳理地质特征、完善分析方法、优化支护方案,解决工程实际难题,推动复杂地质边坡工程技术的完善与发展。

1 复杂地质条件下边坡岩土体特征识别与分析

1.1 复杂地质条件分类与特征表征

基于现场地质勘察数据,结合区域地质背景,对边坡典型复杂地质条件进行系统分类与特征表征。主要分为断层破碎带、软弱夹层、岩溶发育区及高陡边坡四大类,明确各类地质条件的赋存特征与空间分布规律。断层破碎带多呈条带状分布,岩土体松散破碎、胶结性差,易形成地下水渗透通道;软弱夹层多为泥质、页岩等软弱岩体,厚度不均且分布零散,强度低、遇水易软化;岩溶发育区存在溶洞、溶蚀裂隙等,破坏岩土体完整性;高陡边坡几何形态特殊,应力分布集中,易发生卸荷变形。

1.2 边坡岩土体物理力学特性试验研究

针对不同复杂地质条件,设计针对性的岩土体物理力学试验方案,采用室内试验与原位测试相结合的方式开展研究。室内试验选取代表性岩土体试样,测定抗剪强度、黏聚力、内摩擦角、变形模量等参数;原位测试采用压板试验、渗透试验等方法,获取渗透系数、现场抗剪强度等真实工况下的参数。通过试验分析,建立岩土体关键物理力学参数与复杂地质条件的关联关系,明确断层破碎带、软弱夹层等地质条件对参数的影响规律,发现软弱夹层岩土体抗剪强度显著低于完整岩体,岩溶区

岩土体渗透系数明显偏高,为稳定性评价提供可靠的参数支撑。

1.3 复杂地质条件对边坡稳定性的影响机制

从岩土体结构、地下水作用、地应力分布三个核心维度,剖析复杂地质条件诱发边坡岩土体变形破坏的内生机制。复杂地质会破坏岩土体完整性,形成软弱结构面,降低整体强度;地下水在岩土体孔隙、裂隙中渗透,产生孔隙水压力,软化岩土体,加剧变形;地应力分布受地质条件影响发生畸变,高陡边坡及断层区域应力集中,易引发岩土体卸荷开裂。最终揭示复杂地质条件与边坡失稳模式的耦合作用机制,明确不同地质条件对应不同失稳类型,为后续边坡稳定性分析及支护优化提供坚实的理论依据^[1]。

2 复杂地质条件下边坡岩土体稳定性分析方法体系构建

2.1 传统稳定性分析方法适用性评价

系统梳理工程领域常用传统稳定性分析方法,明确各方法核心原理与适用条件,结合复杂地质边坡岩土体非线性、非均质、多结构面耦合的典型特征,全面评估各类方法的适用性、局限性及误差来源,为后续方法融合奠定基础。(1) 极限平衡法适用性评价:核心原理是基于岩土体极限平衡状态,通过划分滑动条块、计算抗滑力与下滑力的比值,判定边坡稳定性,常用模型包括毕肖普法、传递系数法等。其适用条件为均质或层状岩土体、滑动面明确且呈连续分布的边坡;在复杂地质条件下,局限性主要体现在未考虑岩土体非线性变形特性,假设滑动面为刚性面,忽略断层、软弱夹层等结构面对滑动面的切割作用,误差主要来源于岩土体参数取值理想化、未考虑多地质因素耦合影响。(2) 极限分析法适用性评价:以岩土体塑性极限分析理论为基础,通过设

定破坏机构、求解极限荷载,判断边坡失稳临界状态。适用条件为岩土体力学参数明确、破坏模式清晰的简单边坡;针对复杂地质边坡,局限性表现为难以精准模拟岩溶、断层破碎带等复杂地质构造的空间分布,无法反映岩土体非均质特性导致的应力应变不均匀性,误差主要来自破坏机构假设与实际失稳模式不符、未考虑地下水等环境因素的动态影响。(3)传统方法共性局限总结:各类传统方法均存在简化假设过多的问题,难以适配复杂地质边坡的非线性、非均质特征,对多地质因素耦合作用的表征能力不足,单独使用时分析精度难以满足工程实际需求。

2.2 多方法融合的稳定性分析模型构建

针对传统方法的局限性,融合数值模拟、人工智能算法与传统分析方法,构建兼顾实用性与精准性的多尺度、多因素耦合稳定性分析模型,明确模型构建核心要点,确保模型贴合复杂地质边坡工程实际。(1)模型构建思路:以传统极限平衡法为基础,利用数值模拟弥补其无法表征岩土体内部应力应变的不足,结合人工智能算法提升参数取值与模型求解的效率,形成“传统方法+数值模拟+人工智能”的融合模型,实现多尺度、多因素耦合分析。(2)模型核心参数与输入逻辑:输入参数包括岩土体物理力学参数(黏聚力、内摩擦角等)、地质条件参数(断层产状、软弱夹层厚度、岩溶分布等)、边界条件参数(坡高、坡角、地下水水位等);输入逻辑遵循“地质勘察数据→参数筛选与修正→分层输入→耦合计算”的流程,优先采用原位测试与室内试验获取的实测参数,确保参数真实性。(3)模型边界条件设定与求解策略:边界条件结合工程实际设定,滑动面边界采用实测地质数据标定,地下水边界根据渗流试验结果设定,应力边界考虑地应力与工程扰动影响;求解策略采用“分层求解、耦合验证”模式,先通过传统方法进行初步求解,再利用数值模拟(FLAC3D软件)进行精细化计算,最后通过人工智能算法(BP神经网络)对计算结果进行拟合优化,提升求解精度^[2]。

2.3 稳定性分析方法的验证与优化

选取典型复杂地质边坡工程案例,通过现场监测数据、传统方法计算结果与融合模型计算结果的对比分析,验证模型的准确性与可靠性,针对模型存在的不足进行针对性优化,完善稳定性分析方法体系。(1)典型工程案例选取:选取含断层破碎带与软弱夹层的高陡边坡案例,收集该边坡地质勘察资料、岩土体试验数据、现场监测数据(位移、应力、地下水数据),明确边坡复杂地质特征与实际失稳风险。(2)模型验证过程:分别采用

传统极限平衡法、融合分析模型进行稳定性计算,将两种方法的计算结果与现场监测数据(GNSS位移监测、土压力监测)进行对比,重点验证稳定安全系数、潜在滑动面位置的一致性,评估融合模型的准确性。(3)模型优化措施:针对验证过程中发现的误差,从三方面进行优化:一是修正岩土体参数取值,结合现场监测数据反演调整模型输入参数,提升参数与实际工况的匹配度;二是改进算法耦合逻辑,优化数值模拟与人工智能算法的结合点,减少计算误差;三是完善边界条件设定,补充断层滑移、软弱夹层软化等动态影响因素,提升模型对复杂地质条件的适配能力。

3 复杂地质条件下边坡失稳机理及破坏模式研究

3.1 复杂地质条件下边坡失稳机理

复杂地质条件下边坡失稳是多因素、多过程协同作用的结果,核心围绕岩土体强度劣化与结构面失控展开,结合地质特征明确具体机理:

(1)岩土体强度劣化机理:断层破碎带、软弱夹层等地质体自身强度低、胶结性差,受地下水渗透、降雨入渗影响,岩土体孔隙水压力升高,有效应力降低,导致黏聚力、内摩擦角等力学参数劣化,逐步丧失抗滑能力,引发失稳。(2)结构面控制机理:节理裂隙、断层等结构面构成岩土体薄弱环节,其产状与边坡几何形态不匹配时,易形成潜在滑动面,随着应力累积或外力扰动,结构面滑移面强度不足,发生滑移-拉裂失稳,这是复杂地质边坡失稳的主要机理。

3.2 复杂地质条件下边坡典型破坏模式

结合复杂地质特征,边坡失稳模式具有明显针对性,主要分为两类典型模式,具体如下:(1)滑动型破坏:最常见模式,多发生于含软弱夹层、断层破碎带的边坡,分为平面滑动、折线滑动两种,平面滑动由单一连续滑动面控制,折线滑动由多组结构面组合形成滑动面,表现为岩土体沿滑动面整体滑移。(2)崩塌倾倒型破坏:多见于高陡边坡、岩溶发育区,岩土体受节理切割呈块体状,或因岩溶空洞导致底部支撑不足,在重力、地震等外力作用下,块体发生倾倒、坠落,形成崩塌破坏,破坏过程迅速且破坏性强^[3]。

4 复杂地质条件下边坡支护技术

复杂地质条件下边坡支护需结合地质特征(断层、软弱夹层、岩溶等)、边坡失稳模式及工程实际需求,选取适配性强、施工便捷、稳定性可靠的支护技术,以下为工程中常用的实操性支护技术,兼顾针对性与实用性:(1)主动支护技术:核心是通过主动施加预应力或加固岩土体,提升边坡整体抗滑能力,适用于断层破碎带、软弱

夹层等岩土体松散的边坡。常用类型包括锚杆支护和锚索支护,锚杆支护采用高强度钢筋植入岩土体深部,与岩土体形成整体,抑制岩土体变形,施工简单、成本较低,适用于中缓坡;锚索支护通过高强度钢绞线施加预应力,锚固于稳定岩层,可有效抵抗边坡下滑力,适用于高陡边坡、大变形边坡,搭配框架梁使用可进一步提升支护效果。(2)被动支护技术:以阻挡边坡岩土体滑移、坠落为核心,适用于崩塌、倾倒型破坏边坡及岩溶发育区。主要包括抗滑桩和挡墙支护,抗滑桩采用钢筋混凝土浇筑,嵌入稳定岩层,可直接阻挡滑动体滑移,适配断层破碎带、深层滑动边坡;挡墙分为重力式、悬臂式,依靠自身重量或结构强度抵抗下滑力,适用于坡脚软弱、浅层滑动的边坡,施工便捷且适应性强。(3)组合支护技术:针对复杂地质耦合场景,单一支护技术难以满足要求,需采用多技术组合模式。常用组合形式包括喷锚支护+锚索框架梁、抗滑桩+锚索、挡墙+锚杆,喷锚支护可封闭岩土体、防止风化,搭配锚索框架梁可强化预应力作用;抗滑桩与锚索组合可兼顾深层与浅层支护,适用于高陡、多结构面复杂边坡,能有效适配各类复杂地质条件,提升支护可靠性。(4)辅助支护技术:作为核心支护的补充,提升支护体系稳定性,主要包括排水支护和注浆加固。排水支护通过设置排水孔、渗沟,降低地下水水位,减少孔隙水压力对岩土体的软化作用;注浆加固向岩土体裂隙、断层破碎带注入浆液,胶结松散岩土体,提升其强度和整体性,适配岩溶、裂隙发育边坡^[4]。

5 复杂地质条件下边坡支护方案优化设计方法

复杂地质条件下边坡支护方案优化需立足地质特征、失稳机理及工程成本,结合现有支护技术,通过科学方法实现安全性与经济性的平衡,核心优化方法贴合工程实操,具体如下:(1)基于地质条件的支护类型优化:结合断层、软弱夹层、岩溶等具体地质特征,优化支护类型选型。如断层破碎带边坡,优先优化为“注浆加固+锚

索框架梁”组合支护,替代单一锚杆支护;岩溶发育区边坡,补充排水支护优化,同步加固溶洞周边岩土体,提升支护适配性。(2)支护参数精细化优化:针对选定的支护类型,结合岩土体力学参数、边坡几何形态,优化关键参数。锚杆/锚索优化长度、间距及预应力值,抗滑桩优化截面尺寸与嵌入深度,挡墙优化墙体厚度与基础埋深,避免参数冗余或不足,确保支护效果。(3)多目标协同优化方法:兼顾稳定性、经济性与施工便捷性,通过对比不同支护方案的安全系数、造价及施工难度,采用多目标优化模型,筛选最优方案。同时结合现场监测数据,动态调整支护参数,修正优化方案,确保适配复杂地质边坡的动态变化特征^[5]。

结束语:本文围绕复杂地质条件下边坡岩土体稳定性及支护优化展开系统研究,完成了地质特征识别、稳定性分析模型构建、失稳机理剖析、支护技术梳理及优化方法提出等工作,通过实例验证了研究成果的可行性与实用性。因复杂地质条件的多样性与复杂性,后续可进一步开展多因素长期耦合作用下的支护体系稳定性研究,持续完善技术体系,为同类边坡工程提供更全面的参考。

参考文献:

- [1]赵荣亮.复杂地质条件下深基坑支护结构优化设计与稳定性分析[J].黑龙江科学,2025,16(24):152-154.
- [2]乐涛.复杂地质条件下边坡稳定性分析与支护技术[J].中国建筑金属结构,2025,24(15):163-165.
- [3]姜永庆.复杂地质条件下建筑岩土体稳定性提升的集成化技术路径研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(9):064-066.
- [4]焦卫宁,穆日盛,李征.复杂地质条件下多级高边坡组合支护方案与稳定性预测研究[J].建筑技术,2024,55(14):1697-1701.
- [5]李冬青.复杂地质条件下高陡边坡开挖支护稳定性研究[J].云南水力发电,2022,38(2):47-51.