

边坡锚杆支护结构设计承载力计算与安全评估

宋王鹏

武汉科铁人才发展有限公司 湖北 武汉 430000

【摘要】：依托场地地质勘察资料，可有效管控边坡施工与运营阶段的安全状态，为锚杆支护设计、承载力核算及安全判定提供依据。本文围绕锚杆支护体系的构造、材料及受力核心指标，依据现行规范完成锚杆、框架结构及土结协同作用的多维度承载力验算。采用极限平衡法、拟动力法分析边坡静力与地震工况稳定性，结合智能算法搜索潜在滑面，通过可靠度理论量化边坡失稳风险。锚杆框架支护体系可有效约束土体位移、提升边坡抗滑能力，规避结构破损与边坡滑移隐患，可为同类边坡支护设计及安全管控提供可靠技术参考。

【关键词】：边坡工程；锚杆支护；承载力计算；稳定性分析；安全评估

DOI:10.12417/2811-0528.26.15.080

引言

边坡失稳滑移是岩土工程中高发的安全隐患，土体力学特性、地下水、地震荷载等客观条件会改变边坡工作状态，引发工程损毁、人员伤亡等事故，严重影响边坡工程的安全运营。锚杆框架支护具备合理受力形态与良好适配性，稳定的支护效果使其普遍应用于各类边坡加固工程。把控支护结构工作性能、规避工程风险、维持边坡长期稳定性，本文结合场地勘察资料与现行规范标准，开展锚杆支护结构参数设计、多工况承载力计算、动静力稳定性分析及安全风险评估，厘清支护结构与边坡土体的协同受力变形机制，量化结构安全储备与失稳风险，为边坡支护工程的优化设计与安全管控提供理论与技术支撑。

1 边坡锚杆支护结构设计基础参数与工程概况

1.1 边坡工程地质与水文地质条件

边坡工程地质条件决定锚杆支护受力模式与锚固性能的核心标准，土体天然重度、黏聚力、内摩擦角等物理力学参数，支撑边坡承载力核算与整体稳定性分析的基础指标。地层均匀状态、软弱夹层排布及岩体风化状况，影响锚杆锚固段受力状态与边坡整体滑移破坏形态^[1]。水文地质条件取决于地下水位埋深、土体渗流特征及水质侵蚀特性，偏高的地下水位会削弱锚固界面粘结强度，改变土体抗剪能力。长期渗水作用会侵蚀锚杆杆体与注浆结构，损耗支护体系耐久性能，工程设计依托现场勘察成果，界定土体强度参数与地下水作用边界条件。

1.2 锚杆支护结构设计基本参数

锚杆支护结构设计参数分为几何、材料及受力控制三类，各类参数相互适配，决定支护体系的受力效率与安全可靠性。几何参数包含锚杆直径、横竖间距、倾角、自由段与锚固段长度及框架尺寸，直接调控边坡土压力分配与锚杆受力状态。材

料参数涵盖杆体弹性模量、注浆体与框架混凝土强度、锚固体土体极限粘接强度，是构件承载力与传力稳定的核心保障。受力控制参数以锚杆张拉预应力、设计轴力及极限抗拔承载力为主，预应力直接影响边坡主动约束效果与地震工况下的轴力波动幅度，所有参数均需结合边坡高度、坡度及土体特性综合确定。

1.3 设计依据与规范标准

边坡锚杆支护结构设计严格依照现行国家与行业技术规范开展，涵盖边坡工程、基坑支护、结构抗震、混凝土结构等多项专项标准，界定静力与地震组合工况下的承载力计算方式、稳定性核验准则、安全系数取值标准及各类构造措施。设计工作依托场地抗震设防烈度、边坡安全等级及工程使用年限，敲定地震作用组合形式、荷载分项系数及极限状态控制指标。计算模型选用、参数取值、验算流程均贴合规范硬性要求，兼顾边坡土体非线性力学特征与锚杆框架支护结构的协同受力、协同变形工作机制。

2 边坡锚杆支护结构承载力计算

2.1 锚杆抗拉承载力计算

锚杆抗拉承载力受杆体材质强度与截面几何特性共同约束，工程设计将杆体弹性受拉视作正常工作基准状态，杆体屈服强度作为承载力计算上限数值。计算过程叠加锚杆初始张拉预应力与边坡土体变形生成的附加轴力，核算复合受力状态下的杆体拉力。地震作用下的锚杆伴随土体变形产生弹性伸长，轴力随边坡位移持续增长，抗拉承载力适配正常使用与极限承载两类极限状态标准。工程设计规避杆体屈服、颈缩、断裂等破坏现象，抗拉设计值留存充足安全储备，贴合锚固段抗拔承载力标准，避免杆体先于锚固结构发生失效破坏的情况。

2.2 锚杆锚固段抗拔承载力计算

锚杆锚固段抗拔承载力依托锚固体与周边土体的界面粘结效应形成, 极限粘接强度、锚固段有效长度及锚固体直径构成核心计算参数, 设计依照规范给定的粘结承载力公式完成承载力运算。现场注浆施工工艺影响界面粘结密实程度与整体受力表现, 二次劈裂注浆工艺能够提升土体与锚固体间的极限粘接强度。锚固段嵌入完整且稳定的地层结构, 维持抗拔阻力的稳定状态。抗拔承载力验算设置双重校核标准, 对应常规工况的长期恒定拉力与极限工况的瞬时最大拉力, 抑制锚固段整体拔出、界面脱粘开裂、注浆体破损等各类结构失效问题。

2.3 框架-锚杆体系整体承载力计算

框架-锚杆支护体系属于一体化协同受力结构, 整体承载力受框架构件性能、锚杆承载力与结构界面传力效率共同管控。边坡侧向土压力由挡土板承接, 经由框架梁柱结构传导至锚杆锚头, 荷载顺着锚杆自由段传递至锚固段, 深部稳定土体可为结构提供抗拔抗力。框架在受力阶段承受弯矩、剪力与竖向轴力, 拉伸荷载由锚杆单独承担。体系整体承载力适配土体土压力、结构自重及地震作用叠加产生的荷载效应, 规避构件应力集中、节点连接失效、传力路径中断等结构问题, 让整体结构符合变形协调与力平衡的基础力学条件。

2.4 边坡土体与支护结构相互作用承载力计算

边坡土体与支护结构相互作用承载力, 依托经典土压力理论与结构变形协调原理核算, 兼顾土体非线性力学特性与土压力空间分布不均的特征, 地震工况可纳入边坡临空面加速度放大效应^[2]。锚杆张拉预应力能够主动约束边坡土体变形, 调整土体应力场与位移场, 提升土体等效抗剪强度。土体天然抗力、支护结构约束力及界面摩擦性能共同控制复合承载力, 计算过程兼顾土压力动态变化、支护结构柔性变形及土与结构接触的非线性特征, 维持外部荷载、土体抗力与支护约束力三者的动态平衡。

3 边坡锚杆支护结构稳定性分析

3.1 基于极限平衡法的边坡稳定性计算

本次边坡稳定性计算采用极限平衡条分法构建力矩平衡方程, 潜在滑动土体被划分为竖向或水平独立条块, 土体自重力矩、地震惯性力矩、锚杆抗滑力矩及土体自身抗剪力矩均得到逐项核算, 抗滑力矩与滑动力矩的比值作为边坡稳定性系数评价指标。计算遵循圆弧滑动面基础假定, 条间作用力可依据计算需求取舍, 适配均质土层边坡与锚杆支护边坡的静力、拟静力稳定性验算场景。计算结果可与多种经典极限平衡算法交叉对比, 减少单一算法带来的计算偏差, 保障边坡稳定性评价

结果的真实度与工程应用价值。

3.2 地震作用下支护结构动力稳定性分析

地震工况下支护结构动力稳定性采用拟动力法开展分析, 纳入地震波传播规律、相位差异及边坡加速度幅值放大效应等多项动力影响因素^[3]。地震加速度数值随时间推移与边坡高度变化产生动态波动, 贴合工程实际具备的动力响应状态。支护结构动力稳定性系数伴随地震周期产生周期性变化, 地震半周期阶段的系数数值最低, 属于边坡失稳的核心控制节点。地震作用会造成锚杆轴力波动递增、框架产生整体振动变形, 动力稳定性验算需把控瞬时最小稳定性系数, 规避地震瞬时荷载超载诱发的边坡滑移、垮塌等失稳事故(见图1)。

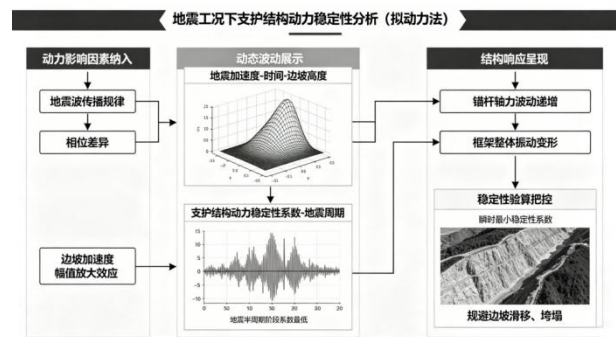


图1 地震作用下支护结构动力稳定性分析

3.3 锚杆轴力与边坡变形协同稳定性分析

锚杆轴力与边坡变形协同稳定性, 依托土体与结构变形-受力耦合机制展开分析。边坡产生轻微滑移变形时, 锚杆随之发生弹性伸长, 轴力随变形量增大呈线性递增, 形成“变形增大-轴力提升-抗滑力矩增加-边坡稳定性提升”的良性调控机制。边坡下层锚杆轴力增长速率显著高于上层锚杆, 轴力由初始预应力逐步趋近极限抗拔承载力。该协同作用可有效约束边坡变形持续发展, 抑制位移累积引发的结构性破坏, 协同稳定性分析需同步落实边坡变形限值、锚杆轴力限值双重控制标准, 保障支护体系长期稳定。

3.4 最危险滑动面搜索与稳定性系数评价

边坡最危险滑动面采用智能优化算法自动搜索确定, 无需提前预设滑面形状与位置, 可准确定位边坡真实临界滑动面, 获取最小稳定性系数。滑面的空间位置与形态特征, 受土体力学参数、锚杆布置间距、张拉预应力及地震作用等多因素共同影响。评价体系以最小动态稳定性系数为核心指标, 通过极差分析判定各参数对边坡稳定性的影响显著性^[4]。稳定性系数随地震加速度、土体强度提升而增大, 随锚杆间距扩大、预应力不足而降低, 最终以最不利工况组合下的最小系数为控制标

准,判定边坡整体稳定性能是否满足工程要求。

4 边坡锚杆支护结构安全评估

4.1 支护结构承载力安全储备评估

支护结构承载力安全储备以结构极限承载力与设计荷载效应的比值为核心评定标准,开展多维度承载力验算工作,核查锚杆抗拉承载力、锚固段抗拔承载力、框架梁抗弯抗剪承载力及支护体系整体承载性能,各项安全系数均符合现行规范限值要求。本次验算覆盖静力常规运营工况与地震组合特殊工况,考量施工现场注浆密实度差异、建材力学性能离散性、构件施工安装偏差及环境扰动等各类不确定干扰因素。把控锚杆初始预应力与极限承载力的科学配比,优化受力参数,保障支护结构长期静态荷载下的受力稳定性,抵御突发地震带来的短期动力冲击。安全储备不足的结构点位可调整锚杆布设间距、倾角等参数,搭配局部加固构造措施,提升支护体系整体承载安全冗余。

4.2 边坡稳定可靠度分析

边坡稳定可靠度分析围绕边坡土体参数的空间变异性与随机不确定性问题展开,脱离传统单一确定性验算模式,依托高精度随机场模型,模拟边坡土体黏聚力、内摩擦角等核心力学参数的空间分布与波动规律。融合极限分析上限有限元法与蒙特卡洛随机抽样法,测算边坡失稳失效概率、可靠度指标等核心参数,评判边坡整体稳定性能。验算数据显示本工程边坡稳定性系数近似服从正态分布,不同土体自相关函数对可靠度计算结果产生的影响相对有限^[5]。传统稳定系数验算方式存在局限,可靠度分析能够量化边坡风险,还原土体非均质特质与参数随机波动引发的隐性安全隐患,无需预设滑动面即可重现边坡失稳破坏完整过程,界定边坡工程风险等级,为现场安全管控提供有效数据支撑。

4.3 地震与荷载组合下安全等级评定

本次边坡安全等级评定依托地震与常规荷载组合工况,结合稳定性系数、失效概率、边坡变形限值三项核心指标完成综合研判,评定结果贴合工程实际且具备科学性。分析过程考量

不同地震加速度幅值作用下,锚杆框架支护结构的应力分布、形变位移等受力响应特征,依照工程场地抗震设防标准,确定各类荷载组合系数,划定专项抗震验算工况范围。工程实践证明,锚杆框架支护体系能够提升边坡整体刚度、抗滑移及抗倾覆性能,改善原生边坡存在的稳定性缺陷,让失稳、欠稳定的边坡岩体恢复至规范规定的安全稳定状态。安全等级适配项目既定抗震设防目标,保障边坡在日常使用工况与突发地震工况下的运行状态,规避整体失稳、坍塌等重大病害,评定结论可直接指导支护结构优化设计与抗震构造强化施工。

4.4 支护结构失效风险与安全控制指标

锚杆框架支护结构在运营过程中存在多重典型失效风险,主要包含锚固段土体剥离导致的锚杆拔出、荷载超限引发的杆体断裂、外力冲击造成的框架结构破损及参数缺陷诱发的边坡整体滑移。各类失效风险的发生概率与地震作用强度呈正相关,同时受锚杆布设间距、安装倾角、张拉预应力值及现场土体强度参数等核心因素直接影响。本工程构建标准化量化安全管控体系,将最小稳定性系数、锚杆极限轴力、坡脚水平位移、锚固段最小有效长度、锚杆最大布设间距定为五大核心安全控制指标。通过对设计验算、现场施工、后期运维监测全流程闭环管控,精准把控各项指标限值,有效规避各类结构失效风险,全方位保障边坡长期运行安全,提升支护体系的结构耐久性与长期工作可靠性。

5 结语

本文系统开展边坡锚杆支护结构的全套设计计算与安全分析工作,厘清地质参数、支护参数对结构承载力与边坡稳定性的核心影响机理。依托多维度承载力核校、动静力稳定性分析及可靠度评估,证实锚杆框架协同支护体系可良好适配静力与地震组合工况,显著增强边坡抗滑性能与结构安全冗余。同时梳理出锚杆断裂、锚固失效、边坡滑移等主要风险类型及对应的量化控制指标。本次研究完善了边坡锚杆支护的设计验算与安全评价体系,能够为同类边坡工程的设计优化、施工管控及长期运维监测提供可靠参考,切实保障边坡工程的整体安全性与服役耐久性。

参考文献:

- [1] 何峻川.某边坡锚杆支护前后稳定性数值模拟分析[J].四川水泥,2024,(09):184-185+232.
- [2] 常嘉琦.基于半监督学习的边坡锚杆支护多目标优化研究[D].石家庄铁道大学,2024.
- [3] 廖良健.煤系土边坡新型排水锚杆支护结构研发及其边坡稳定性研究[D].南昌工程学院,2024.
- [4] 黄梦馨.基于视觉偏好的乐山市绿心公园梅花大道锚杆支护边坡景观设计研究[D].四川农业大学,2024.
- [5] 张振涛.地震作用下框架预应力锚杆支护边坡的稳定性分析[D].兰州理工大学,2024.