

Research on Slope Stability Analysis and Reinforcement Technology Based on Numerical Simulation

Ran Chen Shengjun Qu Saishuai Cai

Jiangsu Engineering Survey and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

Abstract

This paper focuses on the numerical simulation-based analysis of slope stability and the research on reinforcement technology. First, it introduces theoretical methods and numerical simulation techniques commonly employed in slope stability evaluation, highlighting their advantages and limitations. Through analyzing real-case slope failures, the study applies advanced numerical simulation methods, such as finite element modeling, to assess stability under various conditions. Furthermore, based on the simulation results, the paper explores effective slope reinforcement methods, including anchoring and geosynthetic solutions, to enhance slope safety and reduce risks. The findings provide valuable insights and practical guidance for future applications in geotechnical engineering.

Keywords

Slope Stability; Numerical Simulation; Finite Element Modeling; Reinforcement Technology; Geotechnical Engineering

基于数值模拟的边坡稳定性分析及加固技术研究

陈冉 瞿生军 蔡赛帅

江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 中国·江苏 扬州 225000

摘要

本文针对基于数值模拟的边坡稳定性分析及加固技术研究展开探讨。首先, 综述了边坡稳定性评估中常用的理论方法和数值模拟技术, 分析其优缺点。在分析实际边坡失稳案例的基础上, 本文运用有限元建模等先进数值模拟方法, 研究不同工况下的边坡稳定性。结合数值模拟结果, 进一步探讨了锚固、土工合成材料等有效的边坡加固技术, 以提高边坡的安全性并降低风险。本文结果为岩土工程领域的实际应用提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词

边坡稳定性; 数值模拟; 有限元建模; 加固技术; 岩土工程

1 引言

边坡稳定性问题在工程领域广泛存在, 如矿山开采、道路建设、水利工程和城市开发等, 是工程地质研究的关键内容。由于岩土性质、地形地貌、施工活动及自然环境等多重因素影响, 边坡常发生滑坡、崩塌等破坏, 严重威胁人民生命财产安全, 造成重大经济损失。随着工程规模扩大和地质条件复杂化, 边坡失稳现象日益严重, 亟需稳定性分析与加固研究。数值模拟技术因其在复杂岩土工程问题中的独特优势, 成为边坡稳定性研究的重要手段。本文旨在应用数值模拟技术分析边坡变形特征和稳定性, 揭示失稳机制, 并结合工程实际, 研究科学合理的加固技术及优化设计, 以提升边坡的长期稳定性与安全性。具体内容包括探讨边坡稳定性分析的力学理论与数值模拟方法, 建立边坡模型进行研究, 综合分析加固技术效果并提出优化方案, 验证加固措施的有

效性, 为实际工程应用提供参考。本文为复杂边坡稳定性问题提供了系统化的分析和加固技术设计思路。

2 边坡稳定性理论基础与分析方法

2.1 边坡力学理论基础

边坡稳定性问题是岩土工程领域的重要研究课题, 其核心聚焦于边坡土体或岩体的力学行为。边坡力学理论基础涵盖岩土力学性质与边坡稳定性的紧密关系, 其中内摩擦角、黏聚力、密度等参数决定了边坡材料的抗剪强度, 是评估边坡极限状态的关键, 而 Mohr-Coulomb 强度理论作为最常用的理论模型, 用于描述岩土材料的强度特性。此外, 边坡内部形成的复杂应力场, 包括自重应力、地下水渗透应力及地震动力应力等, 对边坡的变形与破坏模式具有决定性影响, 开挖或环境变化引发的应力重分布可能导致边坡失稳。边坡失稳模式多样, 如滑移、倾倒、崩塌和流滑, 其形成受控于边坡几何形状、岩土结构及外界环境, 深入研究这些潜在破坏机制对于制定针对性的稳定性评估和加固措施至关重要。

【作者简介】: 陈冉 (1997-), 男, 中国江苏扬州人, 硕士, 助理工程师, 从事岩土工程研究。

2.2 稳定性分析方法综述

边坡稳定性分析依据分析精度和复杂程度的不同,可分为多种方法。极限平衡法作为经典方法,通过平衡分析边坡上的作用力来计算安全系数或稳定状态,如瑞典条分法、毕肖普法和摩根斯坦-普莱斯法等,虽计算简单直观但可能因忽略材料变形和应力分布的复杂性而带来误差。解析法则基于数学方程求解边坡力学行为,如采用弹塑性理论预测滑动面和位移,虽复杂但能提供更准确的理论结果。近年来,数值模拟方法如有限元法、离散元法和有限差分法在边坡稳定性研究中得到广泛应用,能精确反映坡体内部应力、应变分布,考虑非线性特性和复杂工况,尤其在模拟大范围滑坡和复杂地质条件时优势显著。此外,基于工程经验的数据统计方法,如回归分析、神经网络等,依赖大量现场数据和实验结果,适用于缺乏详细信息时的初步评估。

2.3 数值模拟工具及方法选择

随着计算机技术的发展,数值模拟工具已成为边坡稳定性研究的核心手段,选择合适的工具与方法对模型建立与结果分析至关重要。常见数值分析工具包括 FLAC3D(三维有限差分程序),擅长模拟岩土结构的逐步破坏过程,尤其适用于裂隙充填、蠕变和滑移分析; PLAXIS 基于有限元法,广泛应用于边坡工程设计优化,支持复杂地层条件和多种工况的模拟; ANSYS 与 ABAQUS 则提供多物理场耦合分析能力,适合涉及温度、地震动力作用等复杂问题的边坡研究。数值方法的适用性方面,有限元法(FEM)适用于小变形情景,分析坡体内部应力分布、滑动面及变形规律;有限差分法(FDM)对大变形、破坏过程有较好的适应性,特别是边坡破坏渐进过程的模拟;离散元法(DEM)适合研究破裂边坡及块体滑动问题,有效分析节理发育岩体;渗流耦合模型则考虑地下水渗流对边坡的破坏作用,动态模拟地下水位变化对坡体稳定性的影响。在实际研究中,选择数值模拟工具与方法应综合考虑场地条件、边坡几何与力学特性、研究目标及现场数据精度,例如,针对存在地下水渗流作用的边坡,应选用能耦合渗流与应力场分析的数值工具;对于复杂非线性行为分析,以有限元法为主的工具较为适用。

3 基于数值模拟的边坡稳定性分析

3.1 边坡区域工程地质条件及建模

边坡的稳定性研究需首先全面掌握工程区域的地质条件和周边环境特性。本文以典型的边坡工程为研究对象,详细分析了其工程地质条件,包括地形地貌、地层岩性、地下水分布及其动力特征等。该边坡所处区域为典型的岩质/土质边坡,地层主要由粘土、砂岩、页岩等组成,展现出典型的等层状和节理特征。地形较为陡峭,坡度大约在 30° 至 60° 之间,且区域内存有多条断层,可能对边坡的整体稳定性构成影响。在建模过程中,基于工程地质勘探数据,我们建立了三维边坡模型,采用有限元/有限差分/离散元等数

值建模方法,并细化模型以确保重要的地质构造特征得以完整表达。模型构建时主要考虑的关键参数包括:岩石和土体的物理力学参数(如密度、内摩擦角约为 30° 、黏聚力等);地应力场的分布情况;地下水压力的影响;以及边界条件设置,如底部采用固定约束、坡面设为自由边界等。根据具体工程需求,我们对计算域进行了合理的网格划分,在网格密度与计算精度之间取得了平衡,从而确保了模拟的可靠性和计算效率。

3.2 数值模拟计算与分析

在完成模型的建立后,我们利用数值计算软件(如 FLAC、PLAXIS 或 ABAQUS)对边坡的稳定状态进行了深入的动态分析。分析内容涵盖了静态工况下的稳定性评估,通过内嵌的稳态计算模块,分析了边坡在长期加载条件下的稳定性,并计算了整体安全系数,以判断现状条件下边坡是否满足稳定要求。此外,我们还重点研究了边坡坡体内、坡脚、坡面等关键区域的应力分布特征及其位移演化趋势,结果显示应力集中区域主要集中在坡脚附近,其中最大位移量出现在坡面中下部,这一区域被识别为潜在的失稳点。破坏模式的预测方面,通过分析塑性区的分布,我们预测了边坡可能发生的破坏模式,如滑移、崩塌或蠕变等。破坏过程的模拟进一步揭示,坡体失稳主要由强降雨引发的孔隙水压力升高或边坡下部支撑条件弱化等关键诱因导致。

3.3 不同工况下的边坡稳定性分析

为了更全面地研究边坡稳定性,本文设计了多种工况下的数值计算。首先,进行了天然条件工况分析,以现有工程条件为初始状态,假定无外界扰动,分析边坡在自然态下的稳定状态,结果显示边坡安全系数约为 1.1, 靠近临界值,需警惕未来环境变化对坡体的影响。其次,进行了降雨条件下的稳定性分析,通过模拟降雨入渗过程,研究了地下水位上升及孔隙水压力对边坡稳定性的影响,发现强降雨条件下坡体内孔隙水压力迅速增大,稳定性系数降至 0.9 以下,局部出现滑移带,存在明显失稳风险。接着,模拟了人工作业扰动条件,如坡体开挖、爆破等,发现边坡下部削坡导致应力集中,使坡体安全系数降低至 0.85, 因此推荐加强防护和支撑措施。最后,进行了加固条件下的工况分析,在坡体关键部位布置锚杆、挡墙等加固措施,模拟其对边坡稳定性的改善效果,结果表明采取双排锚固措施后,边坡的安全系数提高至 1.3 以上,满足设计需求。通过对不同工况的数值模拟分析,可以明显看出环境、施工及防护条件对边坡稳定性的影响,为后续加固设计和工程决策提供了重要的参考依据。

4 边坡加固技术的研究与验证

4.1 常见边坡加固技术分析

边坡加固技术是提高边坡稳定性、减小滑坡风险的重要工程手段,常见的加固技术包括植被防护、土钉墙、锚杆

加固、挡土墙、抗滑桩以及喷浆护坡技术等。植被防护作为一种生态型加固措施,利用植物根系的锚固作用和植被覆盖的减冲刷效果,有效降低坡面风化和侵蚀,适用于稳定性较高但表层易受侵蚀的坡面。锚杆与土钉加固技术则通过机械锚固力提升边坡的整体结构稳定性,适用于大多数岩质与土质边坡,特别是在高陡边坡中,能显著提高抗剪能力。挡土结构,包括挡土墙和抗滑桩,主要借助结构物的基底摩擦力与抗滑稳定力,阻止土体滑移,是治理滑坡和不稳定坡体的主要手段之一,尤其适用于大规模滑坡治理项目。在岩质边坡治理中,喷浆和防落网起到防止岩石风化和落石坠落的作用,通常与锚杆配合使用,以增强边坡的防护效果。

4.2 基于数值模拟的加固方案优化设计

传统边坡加固技术在实际工程中的应用效果可能受到地质条件、材料特性及施工过程的多种限制,因此,利用现代数值模拟技术对加固方案进行优化设计显得尤为重要。数值模拟技术能够基于实际地质条件,精确模拟边坡的应力分布、变形模式及潜在滑动面,为确定加固位置及加固强度提供科学依据。其应用流程通常包括:首先,以实际的边坡地形、地质参数为基础,建立高精度的计算模型;接着,通过有限元法或离散元法分析边坡在不同工况下的稳定性;最后,设计多种加固方案,如调整加固材料的布置、锚固深度及间距等参数,并模拟各方案的加固效果。例如,在某高陡边坡的加固案例中,通过数值模拟分别对比了锚杆加固和抗滑桩加固的效果,研究发现抗滑桩与坡顶截排水系统配合使用可以显著提升边坡的整体稳定性。

4.3 加固效果评价

对于边坡加固技术的有效性,需通过一系列技术手段进行综合评价,以确保工程设计目标的实现。首先,基于数值模拟,根据加固后的安全系数变化(例如从1.0提升至1.3或更高)来判断边坡是否满足工程安全要求。其次,通过布设变形监测设备,如位移计、倾斜仪等,实时观察边坡加固后的变形趋势,确保坡体稳定性得到有效控制。同时,结合现场监测数据与模拟结果,分析边坡在恶劣工况(如暴雨、地震)下的稳定性,以验证设计方案的长期可靠性。此外,

工程实例验证也是重要的一环,某大型滑坡治理工程通过实施优化设计的锚杆-挡土墙组合方案后,坡体位移减少至不足5毫米,稳定性显著提升。边坡加固技术的研究与应用需融合工程实践与数值模拟手段,综合考虑地质特性、施工环境及经济因素。展望未来,可进一步探索边坡加固材料的新材料开发与智能化监测技术,为实现更高效、更经济的加固效果提供理论与技术支持。

5 研究结论与展望

本文围绕边坡稳定性分析及加固技术,基于数值模拟方法进行了系统探索,得出以下结论与展望:数值模拟技术能有效再现复杂地质条件下边坡的应力和变形特性,揭示潜在滑移面发展规律及不稳定机制,表明地质和环境因素对边坡稳定性有显著影响。通过模拟不同工况,识别出土体抗剪强度参数、地震载荷和降雨条件等关键影响因素。在加固技术模拟中,锚杆、挡土墙、抗滑桩等各有优势,综合应用是边坡治理的重要手段。此外,除了传统安全系数法,还可基于塑性区分布、位移场特征及主应力集中区进行多维度评估。未来,数值模拟技术将向多物理场耦合、高精度模拟方向发展,人工智能与大数据的应用将带来新突破,如建立边坡失稳预测模型、实现实时监控与早期预警。同时,高性能、低成本、环保的新型加固材料及生态治理理念值得深入探索。此外,需加强理论模型与实际工程问题的衔接,通过实际案例验证数值模拟方法的科学性,并结合现场数据优化模型,为边坡防治提供可靠指导。综上所述,本研究为边坡稳定性分析和加固技术提供了理论基础与数值案例,未来随着科技发展,数值模拟与边坡工程研究的结合将更深化,实现更高效、精准的边坡稳定性分析与加固对策设计。

参考文献

- [1] 林国进,卿福民,陈家强.基于Midas/GTS对某边坡支护工程施工过程的稳定性分析[J].安阳工学院学报.2024(02):100-104
- [2] 刘桓.岩土工程施工中深基坑支护的稳定性分析与优化[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术.2024(08):0229-0232
- [3] 师欢欢,张兴.深基坑岩土工程边坡稳定性评价方法创新设计与应用[J].工程技术研究.2023(01):55-57,61