

地质灾害防治中的地质结构稳定性分析与加固技术

钟鹏 王宝平

青海省有色第三地质勘查院

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2315

[摘要] 本文聚焦地质灾害防治领域的关键科学问题,系统阐述地质结构稳定性分析的理论根基与加固技术路径。研究厘清不同类型地质灾害与特定地质结构失稳模式的成因关联,通过典型案例解析,验证了综合加固技术及“空—天—地”一体化监测预警体系在滑坡、泥石流及地面塌陷防治中的有效性与适配性。论文进一步指出,该领域未来发展将更依赖多源数据融合与智能分析手段,通过深化地质体多场耦合机理研究、研发新型智能加固材料与自适应结构,推动地质灾害防治向“精准识别—智能预警—主动防控—长效运维”的全链条模式发展,为提升防灾减灾能力提供系统性解决方案。

[关键词] 地质灾害防治; 地质结构稳定性分析; 加固技术; 监测预警

中图分类号: P5 文献标识码: A

Stability analysis and reinforcement technology of geological structure in geological hazard prevention and control

Peng Zhong Baoping Wang

Qinghai Provincial Third Geological Exploration Institute of Color

[Abstract] This study addresses critical scientific challenges in geological hazard prevention, systematically examining the theoretical foundations of geological structure stability analysis and reinforcement methodologies. Through analyzing typical case studies, the research clarifies the causal relationships between different types of geological hazards and specific structural instability patterns. It demonstrates the effectiveness and adaptability of integrated reinforcement technologies and the "space-air-ground" integrated monitoring and early warning system in landslide, debris flow, and ground subsidence prevention. The paper further highlights that future advancements in this field will increasingly rely on multi-source data fusion and intelligent analysis. By deepening research on multi-field coupling mechanisms of geological bodies and developing novel intelligent reinforcement materials and adaptive structures, the study promotes the evolution of geological hazard prevention into a full-chain model encompassing "precision identification, intelligent early warning, proactive prevention, and long-term operation and maintenance." This approach provides systematic solutions to enhance disaster prevention and mitigation capabilities.

[Key words] geological disaster prevention and control; geological structure stability analysis; reinforcement technology; monitoring and early warning

引言

地质灾害作为自然灾害的重要组成部分,严重威胁人类生命财产安全与工程建设安全。其发生往往与岩土体结构失稳存在直接关联,因此,深入解析地质结构稳定性并采取有效加固举措,已成为地质灾害防治的核心环节。当前,随着人类工程活动范围持续拓展,所面临的地质条件日渐复杂,传统防治手段在精准解析与长效加固方面遭遇严峻挑战。

鉴于此,本研究旨在系统梳理地质结构稳定性的分析理论与方法,深入探究与之配套的加固技术体系。通过理论阐释与典

型案例分析相结合的方式,厘清不同地质灾害类型与地质结构稳定性的内在关联,评估各类加固技术的适配性与应用效果,以期提升地质灾害防治的精准度与可靠性提供理论支撑和实践参考。

1 地质结构稳定性分析理论基础

1.1 地质结构稳定性的基本概念^[1]

地质结构稳定性是指岩土体在自然应力作用或工程扰动影响下,长期维持自身结构完整性与力学平衡状态的能力。其关键在于岩体抵御剪切滑动、塑性变形或张裂破坏的属性,而这一属

性主要由岩体内部分布的结构面(如断层、节理、裂隙等)所调控。众多实践案例显示,边坡失稳、地基滑移及洞室塌落等灾害,多数沿岩体中的软弱结构面发生,这体现了“岩体结构控制论”的主导地位。因此,稳定性分析需全面考虑结构面的空间展布、力学特性及其在应力作用下的演化规律,为后续的危害防治工作提供理论依据。

1.2地质结构稳定性的影响因素

地质结构稳定性受内外因素协同调控。内在因素起决定性基础作用,主要包括岩土体工程地质属性(如岩石强度、土体粘聚力及内摩擦角)、地质构造形态(如断层与褶皱展布)及岩体结构面特性(如节理、裂隙发育程度、产状与组合),共同构成岩土体固有稳定潜力。

外在因素为失稳诱发条件,通过改变边界条件或力学状态触发灾害。关键外因有地下水活动(软化岩土体、产生孔隙水压力)、地形地貌(如陡峻斜坡提供临空面)、地震与爆破等振动荷载,及人类工程活动(如开挖削坡、堆载、采矿)。稳定性演变本质是内外因素动态相互作用的结果。

1.3地质结构稳定性分析方法

地质结构稳定性受内外两大因素体系综合调控。内在因素构成稳定性的物质与结构基础,主要包括岩土体工程地质性质(如岩性、强度、变形模量)、地质构造(如断层、褶皱展布)及关键的岩体结构面特征(如节理、裂隙发育密度、贯通性、产状及组合形式),共同决定岩土体初始稳定潜力。

外在因素主要起诱发驱动作用,通过改变边界条件或应力状态促使失稳。典型外因有地下水活动(软化岩土、产生动水压力)、地形地貌(如陡峭临空面)、地震与爆破等振动荷载,及大规模人类工程活动(如开挖卸荷、工程堆载、地下采矿)。稳定性演变本质是内外因素动态耦合与相互作用的结果。

2 地质灾害防治中的地质结构稳定性分析

2.1地质灾害类型与地质结构稳定性的关系

不同类型的地质灾害与地质结构稳定性之间存在明确的成因对应关联。滑坡灾害往往受特定软弱结构面的控制,其滑动边界通常沿着岩土层中的节理、裂隙或层理面发育形成,稳定性的丧失直接体现为岩土体沿这些薄弱带产生剪切滑移现象。泥石流的形成则与源头区域松散堆积体的稳定状态密切相关,其启动发生依赖于大量不稳定固体物源的客观存在。地面塌陷灾害大多源于下伏隐伏岩溶的发育演化或采空区顶板结构的失稳破坏,本质上是支撑层在地质结构遭受破坏后出现的突发性垮落。因此,开展地质灾害防治工作,必须首先厘清其孕灾背景条件下特定的地质结构失稳模式。

2.2地质结构稳定性分析案例研究^[2]

青海省地质灾害多发频发,其地质结构稳定性分析具备典型示范意义。以青海八大山滑坡群稳定性研究为例,结果显示,天然状态下滑坡体处于基本稳定状态,稳定性系数高于1.10;而在暴雨工况下,滑坡稳定性系数会降至1.05左右,处于临界稳定状态。研究进一步借助极限平衡分析法与数值模拟手段,揭示出

滑体内摩擦角是影响稳定性的最敏感因子,这一结论为后续针对性加固工程设计提供了关键科学支撑。该案例直观展现了地质结构稳定性评价在实际工程中如何识别核心风险,并为防治措施的选取提供直接指导。

2.3地质结构稳定性分析的挑战与对策

当前地质结构稳定性分析面临多重挑战,主要表现为地质体具有高度非均质性与不确定性,导致关键结构面(如软弱夹层、隐蔽裂隙)的空间展布特征与力学参数难以精准获取;同时,多场耦合作用(如渗流-应力-损伤耦合)的复杂特性,也给精准模拟与预测工作带来了极大难题。

为应对上述挑战,需采取综合性对策:一方面,大力研发并融合空-天-地-一体化勘查技术,运用地质雷达、InSAR等技术手段精细识别地质结构;另一方面,积极采用多场耦合数值模拟与机器学习等先进分析方法,构建更贴合实际情况的地质力学模型,进而提升稳定性评价的精准度与预测预警水平。

2.4地质结构稳定性分析技术的发展与应用^[3]

地质结构稳定性分析技术正从传统方法朝着智能化、精细化方向发展。传统极限平衡法与数值模拟技术虽已得到广泛应用,但在复杂地质条件下,其准确性与动态适配能力存在明显不足。近年来,以深度学习为代表的驱动方法,凭借其处理非线性问题的突出优势,在安全系数预测及滑坡敏感性分析中彰显出巨大应用潜力。与此同时,空-天-地-一体化勘查技术与多场耦合数值模拟技术的有机融合,实现了对地质结构从宏观到微观的多尺度精细描绘,大幅提升了稳定性评价的精度水平,为地质灾害风险预警与防治决策制定提供了更为强劲的技术支撑。

3 地质结构加固技术

3.1地质结构加固技术概述^[4]

地质结构加固技术是对稳定性不足的岩土体,通过物理、化学或力学方法人工改善其工程性质,提高承载力、控制变形并增强长期稳定性的工程技术总称。按作用机理与处理深度,主要分为表层处理(如换土、垫层、压实)和深层处理(如桩基、注浆、锚固)两类。现代加固技术正向复合化、系统化发展,综合运用多种方法(如桩-网复合地基、锚索-格构联合支护),注重与原有地质结构协同工作,形成整体性强、适应性好的加固体系,是防治滑坡、塌陷等地质灾害的关键工程手段。

3.2传统地质结构加固技术

传统地质结构加固技术多依托力学平衡与材料置换原理,是经长期工程实践验证的成熟方法。核心手段有支挡结构(如抗滑桩、挡土墙、重力式挡墙)直接抵御滑动力;排水系统(如地表截水沟、地下排水盲沟)降低孔隙水压力、提升岩土体强度;坡面防护(如砌石护面、植草护坡)防止表层冲刷风化。这类技术原理直观、施工简便、经济性佳,广泛用于治理中浅层滑坡、加固一般边坡及地基处理,至今仍是地质灾害防治的基础性技术措施。

3.3现代地质结构加固技术

现代地质结构加固技术突破传统模式局限,呈现主动加固、材料创新与系统集成特点。核心是通过预应力锚索(杆)体系主动改善岩土体应力状态,限制有害变形;广泛应用土工合成材料(如土工格栅、土工布)实现加筋与反滤。此外,高压注浆与微型桩复合结构等技术可有效改良深层岩土体力学参数。这些技术大幅提升加固效能与可靠性,结合自动化监测实现加固效果实时反馈与动态设计,适用于大型滑坡治理、高陡边坡加固等复杂工程场景。

3.4 地质结构加固技术的选择与应用

地质结构加固技术的选择与应用是多因素系统性决策过程。核心原则是针对性与经济性统一,需结合工程地质条件、失稳机理、工程重要性及周边环境限制综合比选。具体依据滑坡规模、滑面深度、推力等确定主力加固手段(浅层失稳常用抗滑桩,深层滑坡多用预应力锚索);注重技术组合(如“抗滑桩+锚索+排水”综合体系)发挥协同效应。应用中需严格稳定性验算与动态设计,确保方案有效控制变形、恢复岩土体稳定,满足工程长期安全需求。

4 地质灾害防治中的地质结构加固技术应用案例分析

4.1 滑坡地质灾害防治案例分析

本节选取两个具有代表性的滑坡防治案例开展对比分析。第一个案例为湖北省秭归县水田坝乡黄荆树滑坡治理工程,该滑坡体规模约315万立方米,对归水公路及吒溪河航道安全构成威胁。工程采用“抗滑桩+挡土墙+地表排水+监测”的综合治理方案,通过施打40根深入地下二三十米的钢筋混凝土抗滑桩,搭配地表排水系统,从根源上实现了滑坡体的稳定。第二个案例是四川省泸州市叙永县大石镇红洞桥村大型滑坡,其总规模约500万立方米。该滑坡防治策略的核心是“空-天-地”一体化监测预警与精准避险,借助边坡雷达、激光雷达无人机等技术精准识别灾变前兆,提前组织受威胁群众转移,成功实现56户117人的避险安置。

这两个案例分别体现了以工程加固为核心的事前主动防治,与以监测预警为核心的非工程性应急避险两种典型防治模式的应用成效,为不同工况、不同防治目标下的滑坡灾害治理提供了实践借鉴。

4.2 泥石流地质灾害防治案例分析

泥石流防治集中体现了“精准预警+主动避险”这类非工程性措施在应对突发性灾害中的关键作用。湖北省十堰市郧西县上津镇刘家湾村在2025年7月9日发生的泥石流就是典型一例。该案例中,村网格员在降雨巡查期间,敏锐捕捉到山体裂缝扩大、沟谷水体浑浊等典型前兆信号,果断提前2小时组织受威胁的20户36名群众全部撤离。此后,约3万立方米的泥石流涌入居民区,导致房屋损毁,但由于转移及时,成功杜绝了人员伤亡情况。该案例充分证实,强化“群测群防”巡查排查机制以及基层责任人的临灾决策能力,在泥石流成功避险中具有决定性意义。

4.3 地面塌陷地质灾害防治案例分析

地面塌陷防治着重强调“精准识别致灾诱因,分区分类制定

对策”。以山东省汶上县采煤塌陷地综合治理工程为例,该区域因历史时期采煤活动形成大范围塌陷区域,造成土地坑洼不平、雨季积水问题突出,严重破坏了农业生产环境。当地采用的治理思路是“削高填洼、表土剥离回覆”等土地整理工程技术,同时通过动态复垦方式恢复耕地功能,最终将原本无法耕种的低洼地块改造为亩产超1300斤的高产农田。该案例清晰表明,对于采煤塌陷这类成因明确、发展进程相对缓和的地质灾害,借助系统性的土地整治与生态修复工程,能够有效恢复土地使用功能,进而实现经济效益、生态效益与社会效益的协同提升。

4.4 地质结构加固技术效果评估

地质结构加固技术的效果评估是检验防治工程成效的核心环节,需采用定量监测与定性分析相融合的方法开展系统验证。以四川省遂宁市船山区唐家乡红涪社区唐吉路滑坡应急排危工程为例,工程竣工后,技术人员通过实施锚杆拉拔试验,严格核验锚杆的锚固力与埋深是否符合设计标准,这是对加固体本身的直接质量检测。同时,依托第三方实时监测手段,对加固后坡体的位移、变形等关键稳定性指标进行持续跟踪,并与治理前的状态开展对比分析。该案例表明,一套完整的加固效果评估体系,应包含对加固构件自身工作状态的检验以及对岩土体整体稳定性的宏观监测,进而综合判定治理工程是否达成“消除隐患、保障安全”的既定目标,并为后续长期维护提供科学支撑。

5 结论与展望

综合研究表明,通过系统开展地质结构稳定性解析并针对性选用加固技术,可显著提升地质灾害防治的精准度与工程可靠性,案例分析验证了“抗滑桩+锚索”等综合措施及“空-天-地”一体化监测预警的应用成效;展望未来,地质结构稳定性分析与加固技术的应用前景广阔,其发展将更依赖多源监测数据与人工智能的深度融合,以实现灾害智能识别与动态风险评估。同时,未来研究方向应聚焦研发新型智能材料与自适应加固结构、深化地质体多场耦合机理研究、推进防治技术标准体系完善,最终构建集“精准识别、智能预警、高效加固、长效运维”于一体的地质灾害综合防治新模式。

[参考文献]

- [1] 祁生文,郑博文,郭松峰,等.一种考虑速率依赖形貌退化的结构面抗剪强度准则[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2025,194:106231.
- [2] 崔芳鹏,胡瑞林,谭儒蛟.青海八大山滑坡群形成机制及稳定性评价研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):848-857.
- [3] Deep Learning in Slope Stability Analysis: Evolution, Challenges, and Future Directions[J].Geotechnical and Geological Engineering,2025,43:460.
- [4] 熊潭清,林思,陈新辉.复合地基处理技术研究进展综述[J].人民珠江,2024(S02):121-123.

作者简介:

钟鹏(1994—),男,汉族,青海湟中人,本科,职称:助理工程师,论文方向(具体):地质灾害勘察,地质灾害防治等方向。