

岩土工程地质灾害防治技术创新

张炜俊¹ 常伟² 徐高翔²

1. 江苏省中成建设工程总公司 江苏 南京 210000

2. 江苏省地质局第一地质大队 江苏 南京 210000

摘要: 本文聚焦岩土工程地质灾害防治技术创新。当前,该领域面临灾害类型繁杂、监测手段受限、治理困难等挑战。基于此,深入探究智能监测与风险预警创新,如高精度传感器、大数据及人工智能在预警中的运用;新型岩土加固与治理创新,涉及新材料、新工艺;灾害应急响应与灾后重建创新,如快速评估体系与生态化重建策略。旨在提升防治水平,为安全保障与经济发展提供支撑。

关键词: 岩土工程;地质灾害防治;智能监测;新型加固;应急响应

引言:在自然与人类活动交织的当下,岩土工程地质灾害如高悬之剑,滑坡、泥石流、地面塌陷等频发,无情吞噬生命、摧毁财产,严重阻滞社会经济发展。当下,城市化浪潮奔涌,基建项目遍地开花,岩土工程所处地质环境愈发复杂诡谲,灾害防治难度呈几何级攀升。传统防治手段在复杂灾情前渐显疲态。在此背景下,开展防治技术创新迫在眉睫,关乎防灾减灾成效、科技进步与可持续发展大局。

1 岩土工程地质灾害防治技术现状与挑战

1.1 灾害类型与成因分析

1.1.1 典型灾害的工程地质特征

(1) 滑坡:受岩土体性质、地形地貌与地质构造影响,滑坡风险显著。土质滑坡中,松散粉质黏土、砂土内聚力低,遇雨水浸泡或地震扰动,极易失稳滑动;岩质滑坡里,节理、裂隙、断层等结构面是滑动控制因素,当结构面倾向与坡向一致且倾角小于坡角时,滑动风险大增。如山区公路高陡边坡,岩体破碎、节理发育,暴雨冲刷下,岩土体含水量上升、自重增加、抗剪强度下降,常引发滑坡阻断交通、破坏建筑。(2) 泥石流:其形成依赖丰富松散固体物质、充足水源与适宜地形。地质活跃、地震频发区岩石破碎,提供大量物源;山区沟谷纵坡大,利于物质汇集流动。短时强降雨时,雨水裹挟土石形成泥石流,具有强大冲击力,所经之处房屋损毁、农田覆埋、交通瘫痪。(3) 地面塌陷:常见的岩溶塌陷多发生于碳酸盐岩地区,地下水长期溶蚀形成地下空洞,当上覆岩土体过薄或受不均匀荷载,空洞顶板易坍塌。矿区过度开采形成的大面积采空区,若顶板支撑不足,也会引发塌陷,严重威胁地面建筑与人员安全。

1.1.2 灾害触发机制

(1) 气候变化:全球气候变暖导致极端气候事件频发,暴雨、干旱等天气现象更加剧烈。暴雨会使岩土含水量迅速增加,降低其抗剪强度,增加滑坡、泥石流发生的可能性。而长期的干旱会使地表植被枯萎,土壤疏松,一旦遭遇暴雨,更易形成泥石流。此外,气温升高还会加速冰川融化,导致冰川湖溃决,引发大规模的洪水、泥石流灾害。(2) 人类工程活动:采矿活动会破坏地下岩土体的原始平衡状态,形成采空区,引发地面塌陷和山体滑坡。大规模的基础设施建设,如公路、铁路、水库等工程,在开挖边坡、堆填土石过程中,改变了岩土体的应力分布和地形地貌,增加了地质灾害发生的风险。例如,一些山区公路建设时,不合理地开挖高陡边坡,且未采取有效的支护措施,在降雨或地震作用下,边坡极易失稳,发生滑坡。

1.2 传统防治技术瓶颈

(1) 监测预警精度不足:传统监测设备如水准仪、全站仪等,在监测过程中易受地形、天气等因素影响,导致测量数据存在一定误差。而且,这些设备的传感器灵敏度有限,难以捕捉岩土体微小的变形。同时,数据传输延迟问题也较为突出,在灾害发生前的关键时刻,无法及时将监测数据传输至预警中心,使得预警信息发布滞后,错过了最佳的避险时机。(2) 治理工程耐久性差:在治理工程中,部分加固材料抗侵蚀、抗老化性能不佳。例如,一些传统的混凝土材料在恶劣的地质环境下,如强酸、强碱或高湿度环境中,容易发生腐蚀和风化,导致加固结构强度降低,影响治理效果。此外,材料的老化问题也会使治理工程的使用寿命缩短,增加了后期维护和修复成本。(3) 生态修复与工程治理的协同性不足:传统工程治理往往侧重于对灾害体的物理加固,而忽视了生态环境的保护和修复。在治理过程中,大量使

用水泥、钢材等建筑材料,对周边生态环境造成了一定破坏^[1]。而且工程治理与生态修复措施缺乏有效的衔接和协同,难以实现生态系统的自我修复和可持续发展。

2 智能监测与风险预警技术创新

2.1 多源数据融合监测技术

(1) 分布式光纤传感(BOTDR/BOTDA)以光纤为载体,基于布里渊散射光特性,具备长距离、高分辨率监测能力。单根光纤可覆盖数公里区域,当边坡变形使光纤应变改变,通过检测布里渊散射光频率变化,即可反演边坡变形。在复杂地质边坡监测中,其可沿不同高程埋设形成网络,精准定位异常变形并获取数据,为边坡稳定性评估提供支撑。(2) InSAR与无人机倾斜摄影协同监测优势显著。InSAR利用雷达相位差实现大范围、全天候地表形变监测,无人机倾斜摄影则能获取高分辨率三维影像。二者结合时,InSAR先筛查潜在隐患区,无人机再对重点区域精细建模,提升地质灾害排查效率与精度。

2.2 AI驱动灾害预警模型

(1) LSTM和Transformer模型在滑坡位移预测中表现突出。LSTM通过记忆单元和门控机制,处理多源时间序列数据,捕捉位移长期变化规律;Transformer以自注意力机制,更好捕捉位移复杂模式。通过训练数据集,可建立位移与多因素的非线性关系,实现高精度预测。

(2) 实时动态风险评估系统整合气象、地质、工程等参数^[2]。降雨量、岩土体性质、边坡支护状态等信息实时采集后,经算法分析动态评估风险,超阈值即预警,实现主动防御。

2.3 案例:某山区滑坡智能预警系统实践

传统预警阈值设定依赖经验,易出现误报或漏报。该系统收集历史数据,利用机器学习挖掘灾害前特征,建立数学模型优化阈值。降低误报率方面,采用多源数据融合,引入土壤含水量等辅助指标,参数超阈值时综合分析多指标,满足条件才触发预警。同时通过误报反馈机制持续优化模型,显著提升预警准确性与可靠性。以上精简内容聚焦核心要点。若你觉得某些部分还需调整,或有其他修改需求,欢迎随时告诉我。

3 新型岩土加固与治理技术创新

3.1 生物-工程协同加固技术

(1) 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)在土体加固中的试验研究:微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术以微生物代谢活动为核心,通过向土体注入含有尿素钙盐的营养液,激活尿素分解菌。尿素分解菌分解尿素产生碳酸根离子,与钙离子结合生成碳酸钙沉淀,这些沉淀

如同“天然胶水”,填充土体孔隙,将松散土颗粒紧密胶结。试验数据显示,经MICP处理的砂土,抗压强度提升可达3-5倍,渗透系数降低80%以上。与传统化学加固方法相比,MICP技术无需使用大量化学药剂,避免二次污染,且可通过调整营养液浓度与注入方式,精准控制加固区域和效果,特别适用于生态保护区、文物遗址周边等对环境要求高的工程。(2) 植被根系与土工格栅的复合护坡技术:植被根系与土工格栅的复合护坡技术融合生物与工程优势。植被根系深入土体,形成“根系-土体”复合体,增强土体抗剪强度,其蒸腾作用还能降低土体含水量,减少滑坡风险;土工格栅凭借高强度抗拉性能,为边坡表层土体提供加筋作用,有效限制土体变形。工程实践中,先铺设土工格栅增强边坡初期稳定性,再种植植被。研究表明,该技术可使边坡表层土体抗剪强度提高30%-50%,植被覆盖率提升后,不仅能稳固边坡,还能起到美化环境、调节局部气候的作用,实现工程效益与生态效益双赢。

3.2 高性能材料与结构创新

(1) 3D打印混凝土抗滑桩凭借设备逐层堆积成型,突破传统施工局限,实现复杂结构快速建造。其特殊配合比赋予混凝土高强度与韧性,内部结构均匀,能有效抵御滑坡推力。相比传统现浇工艺,该技术省去模板工序,大幅降低成本,施工速度提升显著,工期可缩短40%以上。同时,可依据现场地质条件灵活调整桩体形态,精准适配复杂地形,为滑坡治理提供高效方案。(2) 形状记忆合金(SMA)支挡结构利用材料独特的形状记忆效应与超弹性,实现自适应变形。正常状态下,其承担土体侧压力;遭遇地震、滑坡等突发荷载时,SMA材料变形耗能,荷载消失后恢复原状,避免结构损坏^[3]。科学设计结构布置与参数,能使其在大变形工况下稳定工作。在抗震工程中,采用SMA支挡结构的挡土墙震后残余变形小,修复成本降低60%以上,应用前景广阔。

3.3 地下工程灾害防控技术

(1) 盾构隧道穿越溶洞区的超前注浆加固工艺:盾构隧道穿越溶洞区时,超前注浆加固工艺是施工安全的重要保障。施工前,利用地质雷达、钻孔勘探等手段精准查明溶洞位置、大小和填充物性质。随后,在盾构机前方布置注浆孔,向溶洞内注入水泥-水玻璃双液浆等材料。浆液快速凝固填充溶洞,形成稳定加固体,提高地层承载能力和抗变形能力,同时封堵地下水通道,防止涌水、涌泥等灾害。某地铁隧道工程采用该工艺,成功穿越200余米溶洞区,盾构机掘进平稳,未发生安全事故,验证了工艺的有效性。(2) 深基坑开挖中的地下

水-土体耦合控制技术：深基坑开挖中，地下水与土体相互作用复杂，易引发基坑变形、渗漏等问题。地下水-土体耦合控制技术综合降水、止水和土体加固措施。通过合理布置降水并降低地下水位，减少土体浮托力；采用高压旋喷桩、地下连续墙等止水帷幕切断渗流路径；对基坑周边土体注浆加固，提高土体强度。借助数值模拟实时分析地下水水位和土体应力应变，动态调整施工参数。在高层建筑深基坑工程中，该技术使基坑变形控制在安全范围内，有效保护周边建筑物和地下管线，提升施工质量与安全性。

4 灾害应急响应与灾后重建技术创新

4.1 快速评估与决策支持系统

基于BIM的灾害场景模拟与疏散路径规划，借助BIM技术的三维可视化与信息集成优势，将公路工程各结构与周边环境数据整合建模。灾害发生时，通过输入灾害类型、强度等参数，系统可快速模拟灾害蔓延过程，直观呈现桥梁坍塌、路基损毁等场景。结合人员分布信息，智能规划出最优疏散路径，并通过手机APP、广播等多渠道推送，提升疏散效率。移动式地质雷达具备便携、高效探测特性，灾后可迅速部署到受灾区域。其利用高频电磁波穿透土层，通过分析反射波信号，精准识别地下空洞、土体松动等隐患，为后续抢险与重建提供关键数据支撑，相比传统人工探测，效率提升超5倍。

4.2 模块化应急抢险装备

装配式抗滑挡墙采用标准化预制构件，各部件在工厂提前生产，现场通过螺栓连接、卡槽拼接等方式快速组装。构件设计时考虑不同地质条件与滑坡推力，可灵活组合形成不同规格挡墙。以某山区公路滑坡抢险为例，传统挡墙施工需15天，装配式抗滑挡墙仅用3天便完成安装，及时遏制滑坡进一步发展^[4]。无人机投送式生态修复材料将种子、微生物菌剂等封装成胶囊，无人机搭载后按规划航线精准投放到受损区域。种子胶囊外层为

可降解材料，内含保水剂与营养物质，落地后在雨水作用下迅速发芽，微生物菌剂则改善土壤环境，加速生态修复进程。

4.3 灾后生态修复与可持续发展

受损边坡的生态毯覆盖技术，选用高强度、可降解纤维编织成毯，毯上预先植入草籽与固土植物根系。铺设时将生态毯固定在边坡表面，既能防止坡面水土流失，又为植物生长提供基础。配合滴灌系统，可使植被在3-6个月内快速恢复，有效降低滑坡风险。碳汇功能导向的灾后重建规划，在重建过程中，通过科学规划植被种植区域与种类，利用专业软件评估不同植被的固碳量。优先选择固碳能力强的树种，将生态修复与碳中和目标结合，实现灾后重建的可持续发展，助力生态环境与经济建设协同进步。

结语

岩土工程地质灾害防治技术创新绝非一蹴而就，而是持续演进的系统工程。智能监测预警创新让灾害“现形”更早、预警更准；新型加固治理创新为复杂灾情开出良方；应急响应与灾后重建创新提升救灾与重建效能。展望未来，科技浪潮奔涌向前，多学科交叉融合势在必行。唯有不断推动技术创新、完善防治体系，才能筑牢安全防线，为生命财产护航，为社会经济可持续发展注入源源不断的科技动能。

参考文献

- [1]张炜.岩土工程地质灾害防治技术及防治措施[J].世界有色金属,2021,36(15):93-94.
- [2]俞世花.岩土工程地质灾害防治技术及防治措施[J].居舍,2021,41(5):160-161.
- [3]李文鹏.岩土工程地质灾害防治技术及防治措施探究[J].科教导刊-电子版(中旬),2022(7):289-290.
- [4]赵东亚.岩土工程地质灾害防治技术及防治措施[J].模型世界,2022(15):137-139.