

复杂地质条件下边坡稳定性分析与加固技术研究

李青炜

中冶武勘工程技术有限公司 湖北 武汉 430080

摘要: 文章围绕复杂地质条件下边坡稳定性展开研究,分析地质构造、水文条件等关键影响因素,探讨极限平衡法、有限元法等多种分析方法的原理与适用场景,介绍排水、支挡、注浆等加固技术及综合应用方案。研究旨在为保障工程建设安全、防治地质灾害提供理论与技术支持,对促进社会可持续发展具有重要意义。

关键词: 复杂地质条件;边坡稳定性;分析方法;加固技术

引言:随着工程建设向复杂地质区域拓展,边坡稳定性问题愈发突出。滑坡、坍塌等灾害不仅造成巨大经济损失,更威胁生命安全与生态环境。西南山区因地质构造复杂、降雨频繁,成为灾害高发区。因此深入剖析边坡稳定性影响因素,探索科学分析与加固技术,对提升工程安全性、实现防灾减灾目标至关重要。

1 复杂地质条件下边坡稳定性的重要性

在人类工程活动日益频繁的当下,复杂地质条件下边坡稳定性问题已成为关乎工程安全、生态环境和人民生命财产的核心议题。从交通领域的山区公路、铁路建设,到能源行业的矿山开采、水电工程,再到城市建设中的高层建筑基坑开挖,边坡的稳定性直接决定着工程的成败与运营安全。在地质构造复杂、水文条件多变的区域,边坡失稳引发的滑坡、坍塌等地质灾害不仅会导致工程设施损毁,造成巨大的经济损失,还可能阻断交通、破坏生态环境,甚至引发次生灾害,威胁周边居民的生命安全。以我国西南山区为例,受板块运动和降雨等因素影响,该区域地质条件极为复杂,是滑坡、泥石流等地质灾害的高发区。近年来,多条在建高速公路因边坡失稳导致工程延期,经济损失达数十亿元;部分山区村落因边坡崩塌灾害被迫整体搬迁^[1]。另外,边坡失稳还会对生态环境造成严重破坏,大量土石方滑落掩埋植被、堵塞河道,改变区域水文循环,加剧水土流失,影响生物多样性。因此深入研究复杂地质条件下边坡稳定性,科学分析其影响因素,合理选择分析方法与加固技术,对保障工程建设安全、促进社会可持续发展具有不可替代的现实意义。

2 复杂地质条件下边坡稳定性的影响因素分析

2.1 地质构造因素

地质构造是影响边坡稳定性的内在基础,其复杂程度直接决定边坡稳定状态。褶皱、断层、节理等构造广泛存在于边坡岩体,显著影响岩体完整性与力学性质。

褶皱使岩层弯曲,核部与转折端应力集中,岩体完整性受损、强度降低,如背斜核部岩层上拱受拉,易生裂隙,在重力与荷载下扩展,增大边坡滑动风险。断层作为不连续面,切断岩体连续性,降低抗剪强度,断层带岩体破碎、充填软弱物质,是滑动潜在通道,当断层与边坡走向、倾向相近时,极易引发滑动。节理切割岩体,削弱整体性,利于地下水渗入,进一步降低岩体强度,不同节理组合形成多样岩体结构,直接影响边坡变形与破坏模式。

2.2 水文条件因素

水文条件是影响边坡稳定性的关键动态因素。降雨是最直接的影响因素,强降雨使岩土体含水量剧增,重度和下滑力随之加大,还会降低岩土体抗剪强度,尤其对黏性土,黏聚力和内摩擦角显著减小;同时降雨产生的动水压力作用于岩土颗粒,推动边坡滑动。地下水水位升降同样重要,水位上升使岩土体饱和,有效应力减小、抗剪强度降低,在富水地层,水位季节性波动会导致边坡稳定性周期性变化。地下水的侵蚀、溶蚀作用改变岩土体理化性质,溶解可溶成分形成空洞裂隙,削弱岩体承载能力,增加边坡失稳可能。

2.3 边坡形态与尺寸因素

边坡形态与尺寸直观影响其稳定性。边坡高度越高,岩体受重力作用越大,下滑力非线性增长,而抗滑力增长缓慢,稳定性系数减小,对稳定性影响显著。边坡坡度也是关键,坡度越陡,岩土体重力沿坡面分力越大,下滑趋势增强。坡脚形态同样重要,侵蚀或开挖坡脚会削弱支撑,改变应力分布,易引发滑动。边坡的长宽尺寸也有影响,较大的尺寸在受力时易出现应力集中与不均匀变形,增加失稳风险。

2.4 外部荷载与人为因素

外部荷载和人为活动加剧边坡失稳。地震荷载是极具威胁的外部动力,地震波使岩土体振动,应力重分

布,下滑力增加,还破坏岩土体结构、降低强度,强震下易引发大规模滑坡、崩塌^[2]。人为因素影响不容忽视,工程开挖改变边坡应力平衡,不合理切坡、开挖坡脚会使应力集中、稳定性下降;填方活动增加边坡荷载,增大下滑力;水利工程的蓄水排水改变地下水位,影响边坡稳定;采矿形成的采空区会导致上覆岩体变形塌陷,引发地表边坡失稳。

3 复杂地质条件下边坡稳定性分析方法

3.1 极限平衡法

极限平衡法是边坡稳定性分析中应用最早、最为经典的方法之一,其理论基础是基于边坡岩土体处于极限平衡状态时的力学平衡条件。该方法将边坡岩土体视为刚体或刚塑性体,通过分析滑动面上的抗滑力和下滑力,计算边坡的稳定性系数。常用的极限平衡法包括瑞典条分法、毕肖普条分法、简布法等。瑞典条分法是最早提出的条分法,它将滑动土体垂直分成若干土条,不考虑土条间的作用力,通过对滑动圆心取矩建立力矩平衡方程,计算边坡稳定性系数。该方法计算简单,但由于忽略了土条间的相互作用力,计算结果相对保守。毕肖普条分法在瑞典条分法的基础上,考虑了土条间的水平作用力,通过迭代计算求解边坡稳定性系数,计算结果更为精确。简布法进一步考虑了土条间的切向作用力,能够更准确地反映边坡的实际受力状态,适用于各种复杂形状的滑动面。

3.2 有限元法与离散元法

有限元法基于弹性力学、塑性力学等理论,将边坡岩土体离散为有限个单元,通过求解单元的平衡方程,得到整个边坡的应力、应变分布。在边坡稳定性分析中,有限元法可以考虑岩土体的非线性本构关系、复杂的边界条件和荷载条件,能够准确模拟边坡在不同工况下的变形和破坏过程。离散元法则基于颗粒力学理论,将岩土体视为由大量离散颗粒组成的集合体,通过计算颗粒间的相互作用力和运动状态,模拟岩土体的力学行为。离散元法适用于分析岩土体的大变形和破坏过程,能够直观地展示边坡滑动、崩塌等现象的发展过程。与有限元法相比,离散元法更注重岩土体的离散特性和颗粒间的相互作用,在分析节理发育、破碎岩体边坡稳定性时具有独特优势。有限元法和离散元法虽然能够更准确地模拟边坡的力学行为,但计算过程复杂,对计算机性能要求较高,且模型参数的选取对计算结果影响较大,需要结合现场试验和工程经验进行合理确定。

3.3 定性分析方法

定性分析方法是基于工程地质勘察资料和工程经

验,对边坡稳定性进行直观判断和评价的方法。常用的定性分析方法包括工程地质类比法、地质分析法等。工程地质类比法是将待分析边坡与已有的、稳定性已知的边坡进行对比,通过分析两者在地质条件、边坡形态、工程活动等方面的相似性和差异性,推断待分析边坡的稳定性。该方法简单易行,但需要丰富的工程经验和大量的类比资料,准确性相对较低。地质分析法主要是通过通过对边坡的地质构造、岩土体性质、水文地质条件等进行详细的调查和分析,结合边坡的变形迹象,判断边坡的稳定性。定性分析方法虽然不能给出精确的稳定性数值,但能够快速对边坡稳定性做出初步判断,为后续的定量分析和工程处理提供依据。

3.4 综合评估方法

由于复杂地质条件下边坡稳定性受多种因素影响,单一的分析方法往往难以全面准确地评估边坡稳定性,因此综合评估方法应运而生。综合评估方法是将定性分析方法和定量分析方法相结合,充分发挥各自的优势,对边坡稳定性进行全面、客观的评价。在实际应用中,首先通过工程地质勘察和定性分析方法,对边坡的地质条件、变形特征等进行初步了解,确定边坡的主要影响因素和潜在滑动面。然后,采用极限平衡法、有限元法等定量分析方法,对边坡的稳定性进行计算和模拟,得到稳定性系数和应力应变分布等定量指标^[3]。最后,结合专家经验和工程实际,对各种分析结果进行综合分析和评价,确定边坡的稳定性等级,并提出相应的防治措施。综合评估方法能够更全面地考虑边坡稳定性的影响因素,提高评估结果的准确性和可靠性,在复杂地质条件下边坡稳定性分析中具有广泛的应用前景。

4 复杂地质条件下边坡加固技术

4.1 排水加固技术

排水加固技术是通过降低边坡岩土体中的含水量,提高岩土体强度,从而增强边坡稳定性的重要方法。该技术主要包括地表排水和地下排水两方面。地表排水措施旨在拦截和排除边坡表面的雨水,减少雨水渗入边坡内部。常见的地表排水设施有截水沟、排水沟、天沟等。截水沟一般设置在边坡顶部,用于拦截山坡上方的地表水,防止其流入边坡;排水沟则布置在边坡坡面和坡脚,将边坡表面的雨水引至排水系统。地下排水措施主要是降低地下水位,减少地下水对边坡稳定性的影响。常用的地下排水方法有盲沟排水、渗井排水、水平钻孔排水等。盲沟是一种隐蔽式排水设施,通常由透水性材料和反滤层组成,能够有效地排除地下水。渗井则是通过在边坡岩土体中设置垂直井孔,将地下水引入下

部透水层或排水系统。水平钻孔排水是在边坡体内打设水平钻孔,利用重力和水力梯度将地下水排出,降低地下水位。排水加固技术通过减少岩土体中的孔隙水压力,提高有效应力,从而增强岩土体的抗剪强度,达到加固边坡的目的。

4.2 支挡加固技术

支挡加固技术是通过设置支挡结构,直接抵抗边坡岩土体的下滑力,提高边坡稳定性的技术手段。常见的支挡结构有挡土墙、抗滑桩、预应力锚索等。挡土墙是一种传统的支挡结构,通过自身的重力和结构强度来抵抗边坡的下滑力。根据结构形式的不同,挡土墙可分为重力式挡土墙、悬臂式挡土墙、扶壁式挡土墙等。重力式挡土墙依靠自身重力保持稳定,适用于小型边坡;悬臂式挡土墙和扶壁式挡土墙则利用底板的土压力和结构的悬臂作用来抵抗下滑力,适用于较高的边坡。抗滑桩是一种深入稳定地层的柱状支挡结构,通过桩身与岩土体的相互作用,将边坡的下滑力传递到稳定地层中。抗滑桩具有施工方便、对边坡扰动小等优点,适用于各种类型的边坡。预应力锚索则是通过对锚索施加预应力,将边坡岩土体与稳定地层紧密连接在一起,提高岩土体的抗滑力。预应力锚索具有锚固力大、适应性强等特点,常用于高陡边坡和重要工程的边坡加固。

4.3 注浆加固技术

注浆加固技术是通过向边坡岩土体中注入浆液,改善岩土体的物理力学性质,提高其强度和稳定性的技术。注浆材料根据岩土体的性质和加固要求可选用水泥浆、化学浆液等。水泥浆是最常用的注浆材料,具有强度高、耐久性好等优点,适用于加固破碎岩体和砂土。化学浆液则具有流动性好、凝结速度快等特点,常用于加固软弱土体和细粒土。注浆方法主要有压密注浆、劈裂注浆、渗透注浆等。压密注浆是通过高压将浆液注入岩土体中,使岩土体受到挤压密实,提高其强度和密实度。劈裂注浆则是利用浆液的压力将岩土体劈裂,形成浆脉,从而增强岩土体的整体性和强度。渗透注浆是在低压下将浆液渗入岩土体的孔隙中,填充孔隙,提高岩

土体的抗渗性和强度。

4.4 综合加固技术

由于复杂地质条件下边坡的影响因素众多,单一的加固技术往往难以达到理想的加固效果,因此综合加固技术应运而生。综合加固技术是根据边坡的具体地质条件、变形特征和工程要求,将多种加固技术有机结合,形成一套完整的加固方案。例如,在地下水丰富、岩土体强度较低的边坡加固中,可采用排水加固技术与注浆加固技术相结合的方式^[4]。首先通过排水措施降低地下水位,减少地下水对岩土体的不利影响;然后采用注浆技术改善岩土体的物理力学性质,提高其强度。对于高陡边坡,可采用抗滑桩与预应力锚索相结合的综合加固方案,利用抗滑桩的支挡作用和预应力锚索的锚固作用,共同抵抗边坡的下滑力。综合加固技术能够充分发挥各种加固技术的优势,弥补单一技术的不足,提高边坡加固的效果和可靠性,是复杂地质条件下边坡加固的发展趋势。

结束语

本研究系统梳理了复杂地质条件下边坡稳定性的影响因素、分析方法与加固技术。但边坡问题受多因素耦合作用,未来需进一步深化多场耦合机制研究,优化分析模型与加固方案,加强监测预警技术应用,推动边坡稳定研究向智能化、精准化方向发展,更好服务于工程建设与灾害防治。

参考文献

- [1]丁旋旋.基于复杂地质条件下岩土勘察工程的策略分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术.2024(02):92-95
- [2]祁润平.复杂地质条件下基坑支护设计及其变形控制效果研究[J].粉煤灰综合利用.2024(02):92-97
- [3]杨峰.复杂地质条件下深基坑岩土边坡稳定性研究[J].能源与环保.2022(10):7-12
- [4]鲁明星,史东,车建明,等.露天开采高陡边坡稳定性在线监测系统方案设计[J].湖南有色金属,2024,40(05):5-8+83.