

公路工程中的边坡稳定分析与加固技术

张涵静 程 梁

内乡县公路事业发展中心 河南 南阳 474350

摘要：公路工程中边坡的稳定性至关重要，关乎公路整体安全与使用寿命。本文围绕公路边坡稳定分析与加固技术展开论述，先是阐述了其稳定分析的基本理论，介绍了定性、定量、非确定以及物理模型和现场监测等多种分析方法。接着剖析影响边坡稳定性的诸多因素，涵盖地质构造、地形条件、水文地质、地震作用及人类活动等方面。还详细探讨了如排水固

关键词：公路工程；边坡；稳定分析；加固技术

引言：在公路工程建设不断推进的背景下，边坡稳定性问题愈发凸显。公路穿越不同的地形地貌，遭遇复杂的地质与环境条件，边坡一旦失稳，不仅会导致公路路面损坏、交通中断，甚至可能引发严重的地质灾害，威胁周边居民生命财产安全。因此，深入研究公路工程中的边坡稳定分析与加固技术意义重大。本文旨在梳理相关理论、分析影响因素以及介绍加固技术等内容，为公路边坡的合理设计、有效施工与安全维护提供有力支撑。

1 公路边坡稳定分析的基本理论

公路边坡稳定分析的基本理论建立在对边坡土体或岩体力学行为的研究之上。首先，基于岩土力学原理，明确边坡土体或岩体所受的重力、摩擦力、黏聚力以及外部荷载等力的相互作用关系。例如，在极限平衡理论中，假定边坡处于极限平衡状态，通过分析潜在滑动面上的抗滑力与滑动力来确定安全系数，当安全系数小于1时，边坡可能失稳，考虑岩土体的本构关系，即应力与应变之间的内在联系，不同的岩土体具有各异的弹性、塑性和黏性特性，这会显著影响边坡的变形与稳定。再者，渗流理论在边坡稳定分析中也不可或缺，地下水的渗流会产生动水压力，改变岩土体的有效应力状态，进而影响边坡稳定性。综合运用这些理论，能够对公路边坡在不同工况下的稳定性进行系统分析与评估，为后续的设计与加固措施制定提供科学依据^[1]。

2 影响公路边坡稳定性的因素

2.1 地质构造

地质构造对公路边坡稳定性影响显著。断层的存在破坏了岩土体的完整性，使边坡岩体破碎，抗剪强度降低，沿断层带易发生滑动。褶皱会改变岩层的产状，尤其是向斜轴部岩层受挤压破碎，背斜顶部受张力裂隙发育，都为边坡失稳提供了潜在滑动面。节理和裂隙的分布与走向决定了边坡的破坏模式，当节理裂隙与边坡面

组合不利时，如顺坡向节理，在雨水等因素作用下，可能导致岩块沿节理面滑落，严重威胁边坡的整体稳定。

2.2 地形条件

坡度越陡，边坡土体或岩体的下滑力越大，稳定性越差。高陡边坡在重力作用下，岩土体更容易发生剪切破坏和倾倒。坡高增加时，底部岩土体承受的压力增大，对其强度要求更高，否则易因承载不足而失稳。此外，坡面形态也有影响，凹凸不平的坡面使雨水汇集，增加局部冲刷力，而山谷、山脊等特殊地形部位，由于地质应力集中或汇水条件特殊，边坡稳定性面临更大挑战。

2.3 水文地质特征

水文地质特征对公路边坡稳定性有着复杂而重要的影响。地下水的水位变化会改变岩土体的有效应力，水位上升时，孔隙水压力增大，有效应力减小，岩土体抗剪强度降低。渗流作用产生的动水压力，若方向与边坡滑动方向一致，会推动岩土体下滑，地下水可能对岩土体产生化学溶蚀作用，如在石灰岩地区，地下水溶解岩石中的碳酸钙，使岩体结构变松散，孔隙增大，降低岩体强度，最终导致边坡失稳，尤其在长期饱水状态下，岩土体的力学性质会进一步恶化^[2]。

2.4 地震作用

地震作用是公路边坡稳定性的突发威胁因素。地震产生的地震波会使边坡岩土体瞬间承受巨大的惯性力，其方向、大小和作用时间复杂多变。水平地震力可能导致边坡沿潜在滑动面发生剪切滑动，垂直地震力则改变岩土体的自重应力分布，使原本稳定的结构失衡。对于高陡边坡和松散岩土体边坡，地震引发的震动更容易破坏其内部结构，使岩土体颗粒间的黏聚力和摩擦力减小，产生裂缝、崩塌甚至大规模滑坡现象，且地震后因岩土体结构破坏而留下长期的边坡稳定隐患。

2.5 人类活动

人类活动对公路边坡稳定性产生了诸多不良影响。不合理的工程开挖,如过度切坡或开挖顺序不当,破坏了原有的岩土体平衡,使边坡变陡、临空面增大,抗滑力减小。在边坡附近堆载弃土、建筑材料等,增加了边坡的附加荷载,加大了下滑力。不规范的爆破作业,强烈的震动使边坡岩土体产生裂隙,降低了其完整性和强度。此外,灌溉、排水系统设置不合理,导致地下水水位异常变化或坡面水流冲刷加剧,都可能诱发边坡失稳,给公路工程带来安全隐患。

3 边坡稳定分析方法

3.1 定性分析方法

定性分析方法主要依据工程经验与地质条件直观判断边坡稳定性。工程地质类比法是常用手段,通过对比分析相似地质条件、边坡形态与已有的稳定或失稳边坡案例,预估当前边坡状态。例如,若新边坡与某已知稳定边坡在岩性、构造、坡度等方面相近,则可能具有相似稳定性。地质素描法通过绘制边坡地质剖面图,展示地层岩性、节理裂隙等分布,分析其对边坡稳定性的影响。经验丰富的工程师可据此识别潜在滑动面与不稳定区域。定性分析方法的优点是简便快速,能在早期阶段对边坡稳定性有大致判断,为后续详细分析提供方向;缺点是主观性强,准确性依赖于人员经验与知识水平,难以精确量化边坡稳定程度,对于复杂地质条件或新型边坡结构适用性有限。

3.2 定量分析方法

定量分析方法旨在通过数值计算精确评估边坡稳定性。极限平衡法是经典的定量分析手段,如瑞典条分法、毕肖普条分法等,它假定边坡沿潜在滑动面处于极限平衡状态,将滑体分成若干土条,分析作用于土条上的力,通过计算抗滑力与滑动力之比得出安全系数。当安全系数大于规定值时,边坡稳定。数值分析法如有限元法、有限差分法等则利用计算机模拟,考虑岩土体的非线性特性、复杂边界条件与多种因素耦合作用,能更真实地反映边坡应力-应变场,预测潜在破坏区域与模式。定量分析方法优点是结果精确,能为工程设计提供量化依据;缺点是计算复杂,需准确的岩土体参数,且对某些复杂地质力学现象模拟仍存在局限性,参数选取不当可能导致结果偏差较大。

3.3 非确定分析方法

非确定分析方法主要针对边坡稳定性分析中存在的确定性因素展开研究。由于岩土体性质的空间变异性、测量误差以及对地质环境认识的不完全性,传统确定性分析方法可能存在不足。概率分析法是常用的非确

定分析手段之一,它将边坡岩土体参数视为随机变量,如内摩擦角、黏聚力等,通过大量样本统计分析确定其概率分布函数,然后基于概率理论计算边坡失稳概率。模糊综合评价法考虑到评价因素的模糊性,例如对边坡稳定性的评价等级“稳定”“较稳定”“不稳定”等具有模糊边界,通过模糊变换将多因素评价结果综合起来确定边坡的稳定性隶属度。

3.4 物理模型和现场监测分析方法

物理模型分析方法通过构建缩小比例的边坡模型进行试验研究。室内模型试验可在可控条件下模拟边坡的受力、渗流等情况,观察边坡的变形破坏过程,获取如滑动面位置、破坏形态等直观信息,为理论分析和数值模拟提供验证依据。例如,在相似材料模拟试验中,选用与原型相似的材料按照一定比例制作模型,模拟不同工况下边坡的响应。现场监测分析方法则是在实际边坡上设置监测仪器,如位移计、压力传感器、渗压计等,实时监测边坡的位移、应力、地下水位等参数变化。通过长期监测数据的分析,可以掌握边坡的动态变化特征,及时发现潜在危险。

4 边坡加固技术

4.1 排水固结法

排水固结法是通过改善边坡土体的排水条件,加速土体固结,从而提高其强度和稳定性。该方法主要包含水平排水和垂直排水系统。水平排水通常采用砂垫层,铺设在边坡坡脚或坡面上,使土体中的孔隙水能够顺利排出。垂直排水则多运用砂井、塑料排水板等设施,它们插入土体深处,缩短排水路径,加快排水速度。在施工过程中,先铺设砂垫层,然后按照设计间距和深度打设垂直排水体。随着孔隙水的排出,土体体积减小,有效应力增加,抗剪强度得以提升。排水固结法适用于饱和和软黏土边坡,对于新填筑的土体边坡效果尤为显著。其优点在于能够从根本上改善土体性质,成本相对较低;然而,排水固结过程耗时较长,需要持续的监测与维护,并且对于渗透性极低的土体,其排水效果可能有限,在地下水位较高且补给丰富的区域,还需结合其他止水措施才能更好地发挥作用^[1]。

4.2 预应力锚索加固

预应力锚索加固是一种主动加固边坡的有效技术。它主要由锚索、锚具和锚固段组成。锚索通常采用高强度钢绞线,一端固定在稳定地层中的锚固段,通过钻孔、注浆将其与周围岩土体紧密结合,另一端连接到边坡坡面或结构物上,并施加预应力。在边坡未发生明显变形前,预应力锚索就能够主动提供一个与潜在滑动力

方向相反的拉力,从而增加边坡的抗滑力,改善岩土体的应力状态,有效限制边坡的变形与位移。该方法适用于高陡边坡、存在较大潜在滑动力的边坡以及需要快速提高稳定性的边坡工程。其优势在于加固效果显著,能主动受力,适应性强,可根据边坡具体情况灵活调整锚索长度、预应力大小等参数;不过,其施工工艺较为复杂,需要专业的施工队伍和设备,如锚索张拉设备等,并且锚索的防腐要求较高,否则长期处于岩土体环境中的锚索容易发生锈蚀,降低加固效果,增加维护成本。

4.3 注浆加固

注浆加固是将水泥浆、化学浆液等注入边坡岩土体的裂隙、孔隙中,以提高岩土体的强度和整体性。对于破碎岩体,注浆能够填充裂隙,将松散的岩块胶结成整体,增强其抗剪强度;对于土体,可改善其物理力学性质,增加黏聚力和内摩擦角。施工时,先根据岩土体的特性和加固要求选择合适的注浆材料和注浆工艺,确定注浆孔的位置、间距、深度等参数,然后通过钻孔将浆液注入。浆液在压力作用下渗透到岩土体的空隙中,凝固后形成结石体,起到加固作用。注浆加固适用于裂隙发育的岩体边坡、松散土体边坡以及因风化、溶蚀等原因导致强度降低的边坡。其优点是能够有效改善岩土体的内部结构,提高其强度指标,且对边坡外观影响较小;但注浆效果受岩土体渗透性、浆液配比、注浆压力等多种因素影响,若控制不当,可能出现注浆不饱满、浆液流失等问题,同时,注浆材料的选择需要考虑环境因素,如化学浆液可能对地下水环境产生污染,在使用时需谨慎评估。

4.4 挂网锚喷加固

首先,在边坡坡面上钻孔安装锚杆,锚杆深入稳定岩土体,为坡面提供锚固力。然后铺设钢筋网,钢筋网与锚杆连接形成整体结构,增强坡面的抗拉能力。最后喷射混凝土,混凝土覆盖在钢筋网上,形成一层具有一定强度和厚度的防护层。喷射混凝土能够防止坡面岩土体受风化、雨水冲刷等作用而破坏,同时将锚杆和钢筋网包裹其中,共同承担边坡的荷载,提高边坡的稳定性。这种加固方法适用于风化严重的岩石边坡、较破碎的土质边坡以及有浅层滑动隐患的边坡。其优点是施工速度较快,能快速形成防护结构,增强坡面的抗冲刷和抗风化能力,且加固效果较为明显;缺点是喷射混凝土

的质量控制较为关键,如混凝土的配合比、喷射厚度、喷射角度等都会影响加固效果,若混凝土出现空鼓、开裂等问题,会降低防护层的耐久性和有效性,此外,钢筋网的防腐处理也需要重视,以延长其使用寿命。

4.5 抗滑桩加固

抗滑桩加固是在边坡滑体下部或潜在滑动面附近设置桩体,依靠桩身与周围岩土体的相互作用来抵抗边坡的滑动。抗滑桩一般采用钢筋混凝土桩或钢桩,其截面形状有圆形、方形等。施工时,通过机械成孔或人工挖孔的方式将桩体嵌入稳定地层一定深度,桩身穿越滑体部分与滑体相互作用,当边坡发生滑动时,滑体对桩身产生侧向推力,桩身通过自身的抗弯、抗剪能力以及桩周岩土体的侧向阻力来平衡滑动力,从而阻止滑体的进一步滑动。抗滑桩适用于深层滑坡治理、大型边坡加固以及滑坡推力较大的情况。其优点是加固效果可靠,承载能力大,能够有效控制边坡的深层滑动,且对边坡的整体扰动较小,可以在边坡变形过程中进行施工;缺点是造价较高,施工技术要求高,需要大型施工设备和专业施工队伍,如钻孔机械、混凝土浇筑设备等,并且在设计过程中需要精确计算桩的间距、直径、长度、配筋等参数,否则可能影响加固效果或造成资源浪费。

结束语

公路工程中的边坡稳定分析与加固技术是确保公路安全畅通的关键所在。通过深入探究边坡稳定的多种分析方法,如定性、定量等各类手段,以及全面了解影响边坡稳定的地质、水文、地震等复杂因素,为精准评估边坡状态奠定了基础。排水固结、预应力锚索等加固技术的有效应用,则为边坡的稳固提供了切实保障。未来,随着科技的持续进步与工程经验的不断积累,边坡稳定分析与加固技术必将更加完善高效,有力推动公路工程建设朝着更安全、更持久的方向稳步迈进。

参考文献

- [1]张钢成.公路工程中的边坡稳定分析与加固技术[J].佳木斯职业学院学报,2019,(05):491-492
- [2]陈浩明,吴华艺.公路工程中的边坡稳定分析与加固技术[J].城市道桥与防洪,2019,(04):176-177+184+18.
- [3]刘珍.公路工程中的边坡稳定分析与加固技术[J].科技视界,2019,(28):287-288.