

深挖路堑边坡稳定性分析及防护施工技术研究

蓝由新

中交一公局第九工程有限公司 广东 广州 510000

摘要: 随着交通基础设施建设的迅猛推进,深挖路堑工程日益增多,其边坡稳定性问题愈发凸显,成为影响工程安全与耐久性的关键因素。本文聚焦于深挖路堑边坡稳定性分析,综合运用理论计算与现场监测手段,深入剖析影响边坡稳定性的多因素耦合机制。同时,针对不同地质条件,系统研究防护施工技术的适用性与优化策略,旨在为深挖路堑边坡工程提供科学的设计依据与可靠的施工指导,保障道路运营安全。

关键词: 深挖路堑; 边坡稳定性; 防护施工技术

引言: 在交通建设规模持续扩张的当下,深挖路堑作为道路工程的关键组成部分,其边坡稳定性直接关乎工程安全与运营效益。受复杂地质条件、气候环境及施工扰动等多重因素影响,深挖路堑边坡失稳问题频发,造成严重经济损失与安全隐患。因此,深入开展边坡稳定性分析,准确识别潜在失稳模式,并研发科学有效的防护施工技术,对于提升工程建设质量、保障道路长期安全运行具有重要的现实意义与迫切性。

1 深挖路堑边坡稳定性影响因素分析

1.1 地质条件影响

(1) 岩土体类型是边坡稳定性的基础条件。土质边坡颗粒松散、黏聚力差,易受水侵蚀引发滑坡;岩质边坡稳定性依赖岩体完整性,坚硬岩体边坡稳定性较好,软质岩体则易风化剥落;混合边坡因岩土体性质差异大,界面易形成滑动面,稳定性风险更高。(2) 地质构造是关键隐患因素。断层会破坏岩体完整性,形成软弱结构面,降低抗滑能力;节理发育使岩体碎片化,增加渗水通道;软弱夹层强度极低,常成为边坡滑动的核心滑动带,显著加剧失稳风险^[1]。

1.2 工程环境因素

(1) 水文条件直接影响边坡力学性质。地下水渗透会软化岩土体、产生动水压力,提升滑动可能性;地表水冲刷会侵蚀坡脚、削弱边坡支撑力,长期作用易引发边坡坍塌。(2) 气候与地震作用加剧稳定性风险。暴雨、冻融等气候现象会反复作用于边坡,加速岩土体风化;地震产生的地震波会破坏岩土体结构,引发振动液化,诱发边坡失稳。

1.3 人为活动影响

(1) 施工开挖方式与坡率设计至关重要。无序开挖易导致边坡应力集中,引发变形;坡率设计过陡会超出岩土体承载极限,合理坡率则能有效分散应力,保障稳

定。(2) 爆破振动与机械荷载会扰动边坡。爆破产生的冲击波破坏岩体完整性,降低抗滑强度;大型机械作业产生的瞬时荷载会加剧边坡应力失衡,诱发局部失稳。

1.4 稳定性评价标准

(1) 安全系数阈值是核心评判指标。需根据岩土体类型、工程等级确定合理阈值,一般要求安全系数 ≥ 1.3 ,特殊地段需提高至1.5以上,确保边坡承载安全。(2) 变形控制标准是动态监测依据。通过监测边坡位移速率、累计位移量,设定预警值,当变形超出限值时,需及时采取加固措施,防止失稳事故发生。

2 深挖路堑边坡稳定性分析方法研究

2.1 定性分析方法

(1) 工程地质类比法是基于“相似地质条件下边坡稳定性特征相似”的核心逻辑,通过对比已建工程的边坡地质条件、失稳案例及防护效果,对拟建深挖路堑边坡稳定性进行预判。该方法需全面收集类比工程的岩土体类型、地质构造、水文条件等基础资料,明确相似性与差异性,进而推断目标边坡的稳定状态。其优势在于操作简便、效率高,适用于前期勘察阶段的初步评估,但受类比案例的代表性限制,精度相对较低,需结合其他方法验证。(2) 赤平投影法是利用赤平极射投影原理,将边坡内的地质结构面(断层、节理、软弱夹层)与坡面的空间关系投影至平面,直观判断结构面对边坡稳定性的控制作用。通过分析投影图中结构面与坡面的交线方位、倾角,可快速判定是否存在潜在滑动面及滑动方向。该方法适用于岩质边坡,能精准识别楔形体破坏、平面滑动等失稳模式的风险,但对土质边坡及复杂地质构造的适用性较弱,需结合地质勘察数据精准绘制投影图。

2.2 定量分析方法

(1) 极限平衡法是通过计算边坡在极限平衡状态下

的安全系数,定量判断稳定性,核心是假设滑动面为特定形态,将坡体划分为若干条块,通过平衡方程求解抗滑力与下滑力的比值。其中瑞典条分法假设条块间无作用力,计算简便但精度较低; Bishop法考虑条块间水平作用力,适用于圆弧滑动面,精度显著提升; Janbu法引入条块间切向作用力,可用于非圆弧滑动面及复杂边坡计算。该类方法原理清晰、计算效率高,是工程中应用最广泛的定量分析方法,但对滑动面形态假设存在局限性^[2]。(2)数值模拟方法通过构建边坡三维地质模型,模拟岩土体在复杂受力条件下的应力-应变演化过程,实现稳定性的精细化分析。有限元法(FEM)适用于连续介质岩土体,可精准计算应力分布与变形特征;离散元法(DEM)针对离散岩体,能模拟岩块滑动、碰撞等破坏过程;FLAC3D结合了有限元与离散元优势,可模拟大变形及非线性破坏特征。该方法能突破极限平衡法的假设限制,适用于复杂地质条件边坡,但对参数选取要求高,计算成本较高,需结合现场试验数据校准模型。

2.3 案例分析:某深挖路堑边坡稳定性计算

(1)模型建立与参数选取:以某山区公路深挖路堑边坡为研究对象,基于地质勘察资料,采用FLAC3D构建三维模型,模型范围覆盖边坡及周边稳定岩体,确保边界效应不影响计算结果。岩土体参数通过室内试验与现场原位测试确定,粉质黏土黏聚力 $c = 18\text{kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi = 22^\circ$,中风化砂岩弹性模量 $E = 8\text{GPa}$ 、泊松比 $\mu = 0.25$,潜在滑动面为粉质黏土软弱夹层。(2)不同工况下的稳定性计算结果对比:选取天然工况、暴雨工况(地下水水位上升2m)、地震工况(地震加速度 $0.1g$)进行计算。结果显示,天然工况下边坡安全系数1.42,处于稳定状态;暴雨工况下安全系数降至1.21,接近预警阈值,主要因地下水软化软弱夹层降低抗剪强度;地震工况下安全系数1.18,稳定性进一步降低,需采取加固措施。对比结果表明,水与地震作用显著削弱边坡稳定性,为防护方案设计提供了精准依据。

3 深挖路堑边坡失稳模式与破坏机理研究

3.1 常见失稳模式分类

(1)平面滑动多发生于岩质边坡,因边坡内存在连续的软弱结构面(如断层、软弱夹层),且结构面倾角大于坡角、小于岩土体内摩擦角,在重力或外力扰动下,岩土体沿结构面发生平行于坡面的滑动,破坏面呈平面形态,失稳过程具有突发性。(2)圆弧滑动主要见于土质边坡或破碎岩质边坡,失稳时滑动面呈圆弧状,由坡脚向上延伸。因土体颗粒间黏聚力和内摩擦力不足,无法抵抗下滑力,坡体从底部开始剪切破坏,逐渐

形成贯通的圆弧滑动面,常伴随整体下沉式滑动。(3)楔形体破坏常见于节理发育的岩质边坡,两组及以上相交的结构面将岩体切割成楔形体,当楔形体重心超出坡脚支撑范围,或受外力扰动时,楔形体沿结构面组合交线滑动失稳,破坏形式具有明显的块状特征。(4)倾倒破坏多发生在陡倾层状岩质边坡,岩体受重力作用,沿层面产生弯曲变形,随着变形累积,岩块逐渐向外倾倒、折断,最终形成连锁性破坏,常表现为坡体上部向外突出的失稳形态^[3]。

3.2 破坏机理分析

(1)应力-应变关系与破坏演化过程呈现阶段性特征:开挖初期边坡应力重分布,岩土体产生弹性应变;随开挖推进,应力集中区域出现塑性变形,形成局部剪切带;当剪切带贯通,岩土体抗滑能力丧失,应变急剧增大,进入破坏阶段,最终发生失稳滑动,整个过程是应力累积与变形发展的耦合结果。(2)水-力耦合作用是边坡失稳的关键诱因:地下水渗透使岩土体软化,降低黏聚力和内摩擦角,同时产生孔隙水压力抵消有效应力;地表水冲刷侵蚀坡脚,削弱坡体支撑力,加剧应力失衡。水的作用与岩土体力学性质劣化相互促进,形成“水力作用-力学性质下降-应力失衡-失稳”的恶性循环,显著提升失稳风险。

4 深挖路堑边坡防护施工技术研究

4.1 主动防护技术

(1)预应力锚索(杆)加固是通过施加预应力将边坡岩土体与深部稳定岩体紧密连接,利用锚索(杆)的抗拉强度抵消坡体下滑力,提升边坡整体稳定性。施工时需精准定位钻孔位置,严格控制钻孔倾角与深度,确保锚索(杆)锚固端深入稳定岩层;注浆环节采用高压注浆工艺,保证浆液饱满密实,形成可靠的锚固体系。该技术适用于岩质边坡、大变形边坡及高陡边坡加固,能有效抑制边坡塑性变形,防止滑动面扩展。(2)抗滑桩与挡土墙设计通过构建刚性支护结构阻挡坡体滑动,是深层加固的核心技术之一。抗滑桩采用钢筋混凝土浇筑,沿边坡潜在滑动面横向布置,桩身嵌入稳定岩层,通过桩体侧向抗剪能力平衡坡体推力;挡土墙根据边坡受力特征选用重力式、悬臂式或扶壁式结构,墙体材料需具备足够强度,墙后设置排水盲沟避免积水增大侧压力。二者常组合使用,适用于土质边坡、混合边坡及坡脚软弱地段防护,能有效限制坡体整体位移^[4]。(3)土钉墙与微型桩技术适用于土质边坡及破碎岩质边坡的浅层加固。土钉墙通过将土钉植入边坡岩土体,与喷射混凝土面层形成复合支护结构,利用土钉与岩土体的摩擦

力分散坡体应力；微型桩采用小直径钻孔灌注桩，施工便捷、对坡体扰动小，可快速形成支护体系，与土钉墙协同作用提升浅层稳定性。施工时需控制土钉间距与倾角，确保喷射混凝土面层厚度均匀，微型桩浇筑需保证混凝土强度与桩身垂直度。

4.2 被动防护技术

(1) 柔性防护网系统(SNS)以高强度钢丝绳网为核心，通过锚杆、支撑绳固定于边坡稳定区域，形成柔性防护体系，主要用于拦截边坡落石、崩塌体。该系统具有韧性强、缓冲性能好的特点，能有效吸收落石冲击能量，避免防护结构被破坏；施工时需精准固定锚杆位置，确保支撑绳张力达标，网体铺设需平整紧密，无松动现象。适用于岩质边坡落石防护、破碎岩体边坡防护，尤其适用于地形复杂地段。(2) 排水系统设计是通过构建截、排、导相结合的排水体系，减少水对边坡稳定性的不利影响，是被动防护的关键环节。截水沟布置于边坡顶部，拦截地表水汇入坡体；盲沟设置于边坡内部及墙后，排除地下水，降低孔隙水压力；渗井用于深层地下水引流，通过钻孔填充透水材料将深层地下水导入浅层排水系统。施工时需保证排水通道坡度合理，避免积水，管道接口密封严密，盲沟填充材料需具备良好的透水性，确保排水系统畅通高效。

4.3 生态防护技术

(1) 植被恢复与边坡绿化以生态修复为核心，通过种植适宜当地气候与土壤条件的乡土植物，利用植物根系的固土作用与茎叶的防护作用，实现边坡生态修复与稳定性提升。施工时需先对边坡坡面进行平整处理，采用客土喷播、植草砖铺设等工艺改善种植条件，选择耐旱、耐贫瘠、生长迅速的植物品种，搭配乔灌草组合提升防护效果。该技术兼具生态效益与防护功能，适用于土质边坡、缓坡及环境要求较高的路段。(2) 生物-工程复合防护技术融合了工程防护的稳定性与生态防护的可持续性，通过工程结构与植被协同作用提升防护效果。常见形式包括“锚杆框架+植被”“抗滑桩+挡墙+绿化”等，工程结构承担初期坡体稳定作用，植被生长后形成长期生态防护体系。施工时需协调工程结构施工与植被种植的时序，确保工程结构不影响植物生长，植被种植

需适配工程结构间隙，实现防护功能与生态效益的有机统一。

4.4 施工监测与动态调整

(1) 监测内容涵盖边坡位移、应力及地下水位三大核心指标。位移监测采用全站仪、无人机遥感等技术，监测边坡表面及深层位移，掌握坡体变形趋势；应力监测通过在锚索(杆)、抗滑桩等支护结构上布设应力传感器，实时监测结构受力状态；地下水位监测通过布设水位观测井，跟踪地下水动态变化。监测点需均匀布置于边坡关键区域，确保监测数据全面反映边坡稳定性状态^[5]。(2) 信息化施工与预警机制是保障防护施工安全的关键。通过建立监测数据信息化管理平台，实时汇总、分析监测数据，当数据接近预警阈值时，自动触发预警信号；结合预警结果动态调整施工方案，若出现异常变形或应力超标，立即暂停施工，采取增设支护、加强排水等应急措施。同时，建立分级预警响应机制，明确预警等级对应的处置流程，确保施工过程全程可控，有效规避失稳风险。

结束语

本文围绕深挖路堑边坡稳定性展开系统探索，在理论分析上明确了影响边坡稳定性的关键因素与作用机理，实践层面则总结出适配不同工况的防护施工技术。但边坡工程受自然环境与人为活动影响动态变化，未来需进一步融合智能监测、新型材料等技术，持续优化分析模型与施工工艺，提升边坡稳定性保障能力，为交通基础设施建设的安全与可持续发展筑牢根基。

参考文献

- [1]刘柏林.某山区铁路岩质高边坡稳定性分析和防护措施建议[J].地质装备,2022,23(03):33-37.
- [2]刘飞.路基边坡稳定性分析与防护措施研究[J].建筑理论,2025,(05):71-74.
- [3]于峰.公路施工中高边坡稳定性分析与防护措施[J].工程地质学,2025,(09):128-130.
- [4]于世卿.路基高边坡稳定性分析及防护措施[J].文化科学,2022,(04):62-65.
- [5]杨相前.坝坡的边坡稳定性分析与防护加固[J].建筑技术科学,2024,(03):50-53.