

边坡支护工程稳定性分析与防护

常云云 曹 浩

陕西煤业化工建设(集团)有限公司路桥分公司 陕西 西安 710021

摘 要: 边坡稳定是岩土工程安全运营的核心前提,边坡失稳易引发工程事故,威胁人员与财产安全。本文系统分析边坡滑移破坏模式、稳定性影响因素,涵盖地质水文条件、开挖卸荷及外部荷载等关键方面,阐述极限平衡法、数值模拟等稳定性分析方法,详解挡土墙、锚杆锚索、抗滑桩等支护结构的设计与施工要点,提出坡面地下排水、植被生态防护及位移监测预警等综合防护措施。通过梳理分析与技术整合,完善边坡稳定性分析与防护体系,解决边坡失稳防控中的关键技术问题,为边坡支护工程设计、施工及防护提供技术支撑,保障边坡工程长期稳定。

关键词: 边坡支护;稳定性分析;支护结构;综合防护

引言: 边坡工程广泛分布于公路、铁路、水利等各类岩土工程中,其稳定性直接关系工程整体质量与安全。随着工程建设向山区延伸,复杂地质条件下的边坡失稳问题日益突出,地质水文、开挖作业等因素均可能诱发边坡滑移、坍塌等灾害,影响工程正常推进与长期运营。当前边坡支护工程中,仍存在分析方法选用不当、支护结构设计不合理、防护措施不到位等问题,导致边坡失稳隐患难以有效管控。梳理边坡破坏机理与影响因素,优化稳定性分析方法,完善支护施工与综合防护技术,对提升边坡工程稳定性、防范安全事故具有重要意义。

1 边坡破坏机理与稳定性影响因素

1.1 边坡滑移破坏模式分类

边坡滑移破坏遵循剪切主导的力学规律,依据滑面形态与岩体结构特征可划分多种典型类型。平面滑动多出现于岩质边坡,沿单一贯通节理或软弱结构面发育,滑面平直且倾角介于边坡角与内摩擦角之间。圆弧滑动常见于均质土坡或强风化岩体边坡,滑面呈弧形曲面,破坏过程伴随土体渐进剪切变形^[1]。楔体滑动由两组及以上结构面交切形成,多发生于节理发育的坚硬岩体,失稳时楔形体沿交线方向滑移。倾倒破坏多见于陡倾层状岩体,岩层在自重应力作用下发生弯曲折断,进而引发坡体坍塌。

1.2 地质条件与水文因素对稳定性的影响

地质条件构成边坡稳定的内在基础,地层岩性决定岩土体抗剪强度与变形特性,坚硬完整岩体抗风化能力强,破碎松散堆积体或含软弱夹层岩体易形成滑移带。地质构造控制结构面发育规律,断裂带、节理密集

带及层面产状直接影响坡体应力分布,顺层边坡稳定性显著低于反倾边坡。水文因素为边坡失稳的关键触发条件,降雨入渗提升土体饱和度,降低颗粒间有效应力与抗剪强度。地下水渗流产生动水压力,软化岩土界面并润滑滑移面,加速软弱夹层泥化进程。库水位波动改变坡体渗流场,水位骤降时渗透压力增大,诱发岸坡浅层滑移。地质与水文因素耦合作用,形成边坡失稳的内在诱因与外部驱动力。

1.3 开挖卸荷与外部荷载作用机制

开挖卸荷打破坡体原始应力平衡,临空面形成后岩体产生回弹变形,内部原有裂隙扩展并生成新的卸荷裂隙。应力重分布导致坡脚应力集中,软弱部位率先发生塑性变形,逐步形成贯通剪切带。卸荷损伤累积降低岩体弹性模量与黏聚力,加剧结构面松弛程度,促使坡体向临空方向持续变形。外部荷载作用改变坡体应力状态,坡顶堆载增大下滑驱动力,提升滑移面剪切应力水平。工程爆破与机械振动产生循环动荷载,扰动岩土体结构,诱发裂隙扩展贯通。地震作用传递瞬时惯性力,破坏坡体原有平衡状态,触发大规模滑移破坏。开挖卸荷弱化坡体自身强度,外部荷载加剧应力失衡,二者共同推动边坡渐进失稳。

2 边坡稳定性分析方法

2.1 极限平衡法计算原理与适用条件

极限平衡法以岩土体极限平衡理论为核心支撑,计算逻辑围绕边坡潜在滑移面的受力状态展开。该方法先假定边坡沿某一预设滑移面发生剪切失稳,拆解滑移体受力组成后建立力的平衡方程,进而推导边坡稳定性计算式^[2]。计算过程中需合理简化岩土体力学特性,弱化

滑移体内部应力应变的相互影响,重点聚焦滑移面处抗剪强度与剪切应力的平衡关系,简化计算复杂度的同时提升效率。常用计算模型涵盖瑞典条分法、毕肖普条分法与杨布法,各类模型在条块划分、应力计算精度及抗剪强度参数选取上各有侧重。瑞典条分法简化条块间受力,不考虑水平作用力,计算简洁但精度有限,适用于均质土坡及小型边坡初步分析。毕肖普条分法纳入条块间水平作用力,通过迭代计算优化精度,可用于非均质土坡及含软弱夹层边坡计算。杨布法优化条块间应力传递计算模式,完善应力分析体系,适用于地形复杂、滑移面多样的边坡分析。

2.2 数值模拟分析与应力场演化规律

数值模拟分析以连续介质力学理论为基础,通过离散化技术将边坡岩土体分割为若干有限单元,借助专业数值软件求解岩土体内部应力、应变及位移的分布与变化规律。常用数值方法包括有限元法、离散元法和边界元法,每种方法基于不同力学假设,适配不同类型边坡分析需求。有限元法适用于均质连续岩土体边坡,可精准模拟应力场、应变场动态演化,捕捉岩土体从弹性变形向塑性破坏的过渡过程。离散元法针对非连续岩体边坡设计,能模拟节理裂隙发育岩体的块体运动与相互作用,揭示边坡失稳的动态机制。边界元法通过求解边界积分方程简化计算、减少工作量,适用于大型边坡及深部岩体应力分析。边坡应力场演化有明确规律,开挖形成临空面后,周边岩土体应力释放形成应力降低区,坡脚及内部因应力重分布形成集中区。开挖深度增加会加剧应力集中,软弱夹层处应力最先达到抗剪强度极限,逐步形成贯通剪切滑移带,最终导致坡体应力失衡引发失稳。

2.3 稳定性安全系数确定与判据分析

稳定性安全系数是量化边坡稳定程度的核心指标,定义为滑移面提供的抗剪强度与承受的剪切应力的比值,数值高低直接体现边坡抵御失稳破坏的能力。安全系数确定需综合岩土体力学参数、潜在滑移面形态及外部荷载条件,通过理论计算与室内试验数据结合获取,确保结果可靠。岩土体力学参数需通过室内直剪、三轴压缩等专业试验测定,严格控制误差,避免参数偏差导致计算失真。常用确定方法有极限平衡法计算、数值模拟反演及工程经验类比,三种方法相互补充验证,提升结果准确性。判据分析围绕安全系数划分稳定等级,安全系数大于1.3时边坡处于稳定状态,滑移面剪切应力小于抗剪强度,坡体无明显变形。安全系数在1.1至1.3之间为欠稳定状态,需采取防护加固措施控制变形、防范

风险。安全系数小于1.1时边坡处于不稳定状态,剪切应力超过抗剪强度,易发生瞬时滑移破坏。判据划分需结合工程重要性,交通枢纽、建筑周边等关键区域可适当提高安全系数控制标准。

3 边坡支护结构设计与施工

3.1 挡土墙支护结构设计与施工要点

挡土墙支护结构设计核心是平衡边坡侧向土压力,保障自身抗倾覆、抗滑移能力,设计需结合岩土体力学特性与地形条件选取合理结构形式^[3]。设计过程中需核算土压力大小,结合地基承载力确定墙体截面尺寸与埋置深度,墙背坡度需适配边坡受力特点,仰斜墙背适用于路堑及平坦地段,俯斜墙背多用于路堤及路肩部位。施工要点聚焦基础处理与墙体砌筑,基础需置于稳定地层,土质地基埋深需满足冻胀与冲刷防护要求,基石地基需清除风化层并嵌入稳定岩层。砌筑需控制材料强度与灰缝厚度,分层砌筑并同步夯实,设置合理排水设施,避免墙后积水软化岩土体、加剧墙体受力。施工中需控制墙体垂直度与平整度,及时处理基底不均匀沉降,确保墙体与地基结合紧密。

3.2 锚杆与锚索支护结构施工工艺

锚杆与锚索支护通过将锚固段嵌入边坡稳定岩体,传递坡体应力以提升稳定性,施工工艺需遵循岩体适配与锚固可靠的原则。施工起始于钻孔作业,需根据岩体硬度选取适配钻头,控制钻孔深度、直径与倾角,钻孔完成后清理孔内岩粉与杂物,避免影响锚固效果。锚固剂选用需契合岩体特性,安装时按凝胶速度合理放置,搅拌过程严格控制时间,确保锚固剂充分固化。锚杆与锚索安装需推送至孔底,预紧力矩与锚固力需达到设计标准,外露长度控制在规范范围内。张拉作业需分级进行,逐步施加预应力,张拉完成后及时锁定,防止预应力损失,施工后需检查锚固可靠性,排查松动与脱锚隐患。

3.3 抗滑桩支护结构设计与施工技术

抗滑桩支护设计核心是抵御边坡滑移推力,需通过核算滑坡推力确定桩位、截面尺寸与锚固深度,确保桩体嵌入滑面以下稳定地层。设计需考量桩体内力分布,优化截面形式以提升抗剪抗弯能力,锚拉式抗滑桩可减小桩身弯矩、优化造价。施工技术重点在于成孔与混凝土浇筑,成孔需根据地质条件选取适配工艺,避免孔壁坍塌,成孔后清理孔底沉渣。钢筋骨架安装需精准定位,混凝土浇筑需连续进行,振捣密实防止蜂窝麻面。施工过程中监测桩体垂直度与位移,及时调整施工参

数,浇筑完成后进行养护,确保桩体强度达标,保障桩体与周边岩土体协同受力,发挥抗滑支护效能。

4 边坡综合防护技术与措施

4.1 坡面排水与地下排水防护系统

坡面排水与地下排水防护系统是控制边坡水害、保障坡体稳定的关键技术措施,核心目标是快速排出坡体表面及内部积水,削弱水分对岩土体的软化作用,降低孔隙水压力引发的失稳风险^[4]。坡面排水系统布设需结合边坡坡度、汇水量及岩土体透水性,坡顶需布设截水沟,拦截坡外汇水及坡面径流,避免雨水直接冲刷坡面造成水土流失或岩土体软化。坡面按地形走势布设排水沟,根据坡度确定沟道比降与流速,合理选择土质、衬砌或浆砌石等沟道类型,确保排水通畅且不冲刷沟壁。地下排水系统针对坡体内部地下水治理设计,地下水量较小时布设反滤层,选用级配合理的砂石材料,防止细颗粒流失堵塞排水通道;地下水量较大时设置排水盲沟或排水孔,精准布设间距与深度,加速地下水排出,有效降低坡体内部孔隙水压力。排水系统施工需注重沟道衔接精度,反滤层铺设严格遵循规范要求,确保层次分明、过滤效果达标,避免出现堵塞导致排水失效,兼顾排水效率与坡体结构完整性,为边坡稳定筑牢水防护屏障。

4.2 植被护坡与生态防护技术

植被护坡与生态防护技术依托植物生长特性,实现边坡稳定与生态修复的双重目标,遵循因地制宜、适地适树的核心原则,契合岩土工程生态化发展趋势。植被选择优先采用适应边坡区域气候、土壤条件的乡土树种和草种,兼顾固土能力与生长速度,优先选用根系发达、耐旱耐贫瘠的品种。岩质边坡需先清理坡面浮土与松动岩体,布设种植穴并覆盖改良客土,改善土壤肥力与保水能力,为植被生长提供良好基础条件。常用技术包括生态喷播、植生袋铺设、土工格室固土等,岩质陡坡可采用挂网喷播技术,将草种、基材、粘结剂按比例混合,均匀喷播至坡面形成致密防护层,提升坡面整体性。植被生长过程中,发达根系可穿插于岩土体缝隙,提升土壤剪切力与黏附力,增强坡面抗冲刷能力;枝叶能有效截留降雨、减缓地表径流,减少坡面水土流失,

同时改善边坡周边环境,实现工程防护与生态修复的有机融合,提升边坡防护的长效性。

4.3 边坡位移监测与动态预警机制

边坡位移监测与动态预警机制是防范边坡失稳、降低安全风险的前置保障,核心是实时捕捉坡体变形特征,及时识别失稳隐患并发出预警信号。监测系统布设需覆盖边坡关键部位,包括坡顶、坡脚及潜在滑动区域,合理布设位移观测桩、测缝计、倾角计等监测设备,定期采集位移、倾角等相关数据,持续跟踪坡体变形趋势。监测频率需结合边坡稳定状态灵活调整,坡体变形活跃阶段适当加密监测频次,确保监测数据能真实、及时反映坡体变形情况,避免遗漏关键变形信息。动态预警机制需结合边坡工程等级与地质条件,设定合理预警阈值,依据位移速率与累积位移量划分不同预警等级,建立完善的数据传输与反馈流程。当监测数据超出预设阈值时,及时启动预警响应,快速推送预警信息,同步落实针对性防控措施,遏制坡体变形加剧。监测与预警工作协同推进,及时整理分析监测数据,预判坡体失稳风险,为边坡防护措施调整与优化提供科学依据,保障边坡长期稳定。

结束语

边坡支护工程稳定性分析与防护是一项系统性工程,需贯穿工程设计、施工及运维全过程。从边坡破坏机理出发,明确地质水文、开挖卸荷等因素的影响机制,选用适配的稳定性分析方法,能精准识别失稳隐患。合理设计挡土墙、锚杆锚索等支护结构,落实坡面地下排水、植被防护及位移监测预警等综合措施,可有效提升边坡抗失稳能力,遏制边坡灾害发生。

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] 贾起超,郝喆,孙杰等.不同修复工况下破损山体公路边坡稳定性评价[J].环境科学导刊,2023,42(05):68-73.
- [3] 李承霖.水利工程施工中边坡开挖支护技术应用与稳定性控制[J].全面腐蚀控制,2026,40(1):80-82.
- [4] 杨诗雷.高回填土基坑边坡稳定性与支护技术分析[J].建材发展导向,2026,24(6):58-60.