

水工环地质条件下边坡稳定性分析评价

温晓艺

山西省地质工程勘察院有限公司 山西 太原 030024

摘要:为探究水工环多因素耦合下边坡失稳机制,保障工程边坡运营安全,本文系统分析研究区工程、水文及环境地质条件,开展岩土体力学试验确定参数,总结三类边坡变形破坏模式。结合极限平衡法与有限元数值模拟,完成多工况稳定性计算与敏感性分析,明确降雨渗流、岩土体强度及工程扰动三大主控因素,针对性提出排水、支护、生态修复及监测预警一体化防控措施,为同类边坡治理提供参考。

关键词:水工环;地质条件;边坡稳定性;分析评价

引言:边坡稳定性是水工环地质工程的核心研究内容,自然风化、降雨渗流与人工工程活动的耦合作用,极易诱发边坡滑移、崩塌等地质灾害,威胁工程建设与运营安全。现阶段多因素耦合失稳机理研究仍存在短板,评价体系针对性不足。基于此,本文依托区域水工环地质概况,开展边坡变形机理、稳定性定量评价研究,精准识别风险隐患,制定科学防控方案,为边坡安全运维与灾害防治提供技术支撑。

1 研究区水工环地质条件概况

1.1 工程地质条件分析

(1)地形地貌特征:研究区边坡以人工改造地貌为主,整体坡度不均、坡高起伏较大,原始坡面经工程开挖修整,局部坡面陡峭,存在边坡削坡、平整改造痕迹,局部土体裸露,坡面完整性被人为改变。(2)地层岩性特征:区内岩土体主要为第四系松散土体与基岩,土层分布不均,厚度差异性较大;基岩岩性稳定,岩层整体分布连续。岩土体物理力学性质存在差异,局部发育软弱夹层,结构松散,强度较低,是边坡稳定性薄弱部位。(3)地质构造条件:区域构造发育程度较弱,无大型断层穿越,岩体节理、裂隙较为发育,多为浅表风化裂隙。裂隙交错分布破坏岩体完整性,降低岩体整体强度,易导致岩体破碎、局部失稳。

1.2 水文地质条件分析

(1)地下水类型及分布:区内地下水主要为松散层孔隙水和基岩裂隙水,孔隙水赋存于表层松散土体中,埋藏较浅、分布零散;裂隙水赋存于基岩裂隙中,分布受裂隙发育程度控制,赋存不均。(2)地下水动态特征:地下水主要依靠降雨入渗补给,受降雨、库水位升降影响显著,雨季地下水径流速度加快,水位抬升;旱季水位回落,地下水多沿坡面裂隙及土层孔隙缓慢排泄。(3)地下水对边坡的作用机理:地下水渗流会增大

岩土体孔隙水压力,软化土体、弱化岩土层结构强度,同时产生动水压力,加剧岩土体颗粒流失,降低边坡整体稳定性^[1]。

1.3 环境地质条件分析

(1)气象环境条件:区域降雨充沛、温差变化明显,长期干湿交替及风化作用持续改造坡面岩土体,加剧岩土体破碎、风化剥落,弱化边坡长期稳定性。(2)人类工程活动影响:区内主要存在边坡开挖、局部堆载、人工排水等工程活动,改造了原始坡面形态与岩土体应力状态,破坏原有地质平衡,加剧边坡失稳风险。(3)不良地质现象:研究区不良地质现象以局部卸荷松弛、小型坡面崩塌为主,多集中在开挖边坡陡崖段,分布范围较小,未发育大型滑坡,整体不良地质现象发育程度较轻。

2 水工环耦合作用下边坡变形破坏机理研究

2.1 边坡岩土体力学特性试验与参数确定

(1)岩土体物理力学试验:针对研究区边坡土体与岩体开展现场取样与室内试验,系统测定岩土体天然密度、饱和含水率、黏聚力、内摩擦角及渗透系数等关键物理力学参数,全面掌握岩土体基本性能特征,为后续稳定性计算提供基础试验数据。(2)参数取值与优化:以室内试验测试结果为核心依据,结合现场工程勘察资料及行业规范参数取值标准,对试验数据进行筛选、校正与优化,剔除异常数据,确定适配研究区工程地质条件的精准力学计算参数。(3)水作用下力学参数劣化规律:通过浸水、渗流模拟试验,探究水作用下岩土体参数变化特征。结果表明,水体入渗会软化岩土体结构,导致土体抗剪强度衰减、岩体裂隙扩展,整体力学性能随含水饱和度提升呈现明显劣化趋势。

2.2 边坡常见变形破坏模式分类

(1)土质边坡破坏模式:土质边坡主要发育滑移

式、坍塌式及渐进式变形破坏。土体遇水软化后易发生圆弧滑移,临空面土体易出现局部坍塌,同时在长期水损作用下产生渐进式开裂、变形,逐步发展为整体失稳。(2)岩质边坡破坏模式:岩质边坡受结构面控制作用显著,主要存在顺层滑动、楔体失稳、倾覆破坏及裂隙贯通破坏,节理裂隙在水岩作用下持续扩展、贯通,逐步形成连续滑移通道,诱发边坡结构性破坏^[2]。(3)岩土混合边坡破坏模式:岩土混合边坡存在软硬层交互破坏、局部塌落与整体滑移耦合破坏特征,软硬岩土层力学差异较大,界面易产生应力集中,常出现表层土体塌落、深部岩体滑移的复合型失稳现象。

2.3 水工环多因素耦合破坏机理

(1)水文因素主导破坏机理:降雨入渗与库水位骤变会改变边坡内部渗流场,提升孔隙水压力、降低有效应力,同时产生动水压力冲刷岩土体,弱化结构强度,是诱发边坡失稳的核心水文诱因。(2)工程地质缺陷主导机理:边坡内部软弱夹层、发育裂隙及小型断层等地质缺陷,构成边坡潜在滑移薄弱带,在水体渗透作用下缺陷持续扩张,成为边坡失稳的主要控制性结构通道。(3)环境与工程耦合破坏机理:长期风化作用持续破碎岩土体结构,人工开挖、堆载等工程活动打破原始应力平衡,多因素叠加水岩劣化作用,加速边坡开裂、变形,大幅缩短边坡失稳进程。

3 边坡稳定性定量分析与综合评价

3.1 边坡稳定性分析方法选取

(1)传统极限平衡法:本次研究选用多种经典极限平衡法开展对比分析。瑞典条分法计算简便,适用于均质简单土质边坡;毕肖普法考虑条块间法向作用力,精度更高,多用于圆弧滑动边坡;简布法适配任意滑动面,适用非均质复杂土层边坡;摩根斯坦-普莱斯法兼顾条块切向与法向应力,可适配各类复杂边坡工况。(2)数值模拟分析法:采用有限元强度折减法开展数值分析,核心原理为逐步折减岩土体抗剪强度参数,直至边坡达到临界失稳状态,求解极限安全系数。该方法无需预设滑动面,可精准模拟边坡应力、渗流及变形场变化,能够适配研究区水工环耦合的复杂地质条件,计算结果贴合实际工况。(3)综合评价方法:结合层次分析法与模糊综合评价法构建多元评价体系,通过层次分析法量化水文、地质、工程等各影响因素权重,依托模糊综合评价法实现定性指标定量化分析,规避单一计算方法的局限性,实现边坡稳定性的科学化、系统化评价^[3]。

3.2 不同工况下边坡稳定性计算分析

(1)天然工况:在无降雨、库水位稳定的原始状态

下,边坡地下水分布稳定,岩土体强度无劣化,整体应力分布均匀。通过计算得出边坡安全系数,结果表明天然工况下边坡整体受力均衡,无明显变形失稳迹象,整体稳定性良好。(2)暴雨工况:强降雨过程中,雨水持续入渗边坡岩土体,渗流场发生显著变化,孔隙水压力升高、有效应力降低,岩土体强度劣化。结合数值计算分析边坡应力与位移变化,判定暴雨工况对边坡稳定性削弱作用显著,失稳风险明显提升。(3)水位骤变工况:库水位快速升降会引发地下水动态剧烈变化,边坡内部形成渗透压差,产生动水压力,导致岩土体颗粒流失、结构松散。工况模拟结果表明,水位骤降阶段边坡渗流作用最强,稳定性降幅最大,是边坡失稳的高危阶段^[4]。(4)工程扰动工况:边坡开挖、局部堆载等工程活动改变原始应力场与坡面形态,造成边坡局部应力集中、临空面裸露。通过稳定性计算可知,工程扰动会降低边坡安全储备,局部陡坡面存在小型塌落、滑移风险。

3.3 边坡稳定性影响因素敏感性分析

(1)单因素敏感性分析:控制单一变量开展敏感性计算,结果表明岩土体黏聚力、内摩擦角与边坡稳定性呈正相关,是提升边坡抗滑能力的核心指标;渗透系数直接控制地下水渗流速率,对水致边坡失稳的影响最为直接。(2)多因素耦合敏感性分析:水岩作用、地质结构缺陷与工程荷载多因素耦合时,各因素相互叠加、放大劣化效果,相较于单因素作用,耦合作用下边坡稳定性衰减速率更快,敏感性特征更复杂、更贴合实际工程情况。(3)主控影响因素确定:通过权重计算与敏感性对比,最终确定岩土体抗剪强度参数、降雨入渗渗流作用及人工工程扰动为制约研究区边坡稳定性的三大核心主控因素。

3.4 边坡稳定性综合评价结果

(1)稳定性等级划分:依据边坡工程相关规范,结合安全系数判定标准,将研究区边坡稳定性划分为稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定四个等级,明确各等级量化判定指标。(2)各工况稳定性综合判定:汇总四类工况计算结果,天然工况下边坡整体稳定,暴雨、水位骤变及工程扰动工况下,局部边坡转为欠稳定状态,整体边坡稳定性显著下降。(3)现存安全风险总结:研究区边坡无整体失稳风险,但局部开挖陡坡段、软弱夹层分布区域,在极端工况下易发生滑移、塌落破坏,存在一定的工程安全隐患,需针对性开展防护治理。

4 边坡防护治理措施与安全防控建议

4.1 边坡治理设计原则与思路

(1) 治理基本原则: 本次边坡治理严格遵循安全可靠、经济合理、靶向治理与生态协调的综合原则。优先保障边坡工程整体安全, 规避失稳风险, 同时兼顾工程建设经济性, 控制治理成本。在满足防护要求的基础上兼顾生态性, 减少对区域原有地貌与植被的破坏, 实现工程安全与生态保护统一。(2) 差异化治理思路: 结合前文边坡稳定性评价结果, 依据不同区段边坡的稳定等级、变形破坏模式及主控影响因素, 实行分区差异化治理。对欠稳定、高风险边坡重点加固防护, 对基本稳定边坡以防护、排水为主, 杜绝一刀切治理方式, 提升治理精准度与有效性。(3) 治理与运维协同思路: 构建工程治理、排水优化、长期监测一体化防控体系。通过专项工程措施解决边坡现存隐患, 依托排水改造弱化水致劣化作用, 搭配常态化监测运维手段, 实现短期治理加固与长期安全防控的有机结合。

4.2 针对性防护治理技术措施

(1) 排水工程措施: 以控水稳坡为核心, 布设完善的地表截排水系统, 拦截坡面雨水, 避免雨水漫流入渗。同步设置地下疏水孔、疏水层, 疏导边坡内部地下水, 降低孔隙水压力。对岩体张开裂隙进行封堵处理, 减少水体渗流通道, 从根源弱化水对边坡的破坏作用。(2) 支护加固措施: 根据边坡岩土体特征与失稳风险, 选用适配加固技术。高危边坡采用锚杆锚索联合支护, 深部锁定岩体; 坡面布设框架护坡、喷锚支护, 增强表层整体性; 坡脚薄弱区段设置挡土墙, 提升边坡整体抗滑、抗倾覆能力, 有效约束边坡变形。(3) 生态修复与改良措施: 对松散岩土体进行注浆、换填改良, 优化岩土体结构, 提升基础力学强度。同时采用植被护坡技术, 搭配乡土植被构建生态防护体系, 固结表层土体、减缓风化侵蚀, 提升边坡长期稳定性能, 美化区域生态环境^[5]。

4.3 边坡长期监测与预警体系构建

(1) 监测内容布设: 围绕边坡失稳主控因素, 重点监测坡面位移、竖向沉降、岩土体孔隙水压力及地下水水位等核心指标, 全面捕捉边坡变形与水文动态变化, 精准掌握边坡实时稳定状态。(2) 监测系统搭建: 在边坡关键风险区段布设自动化监测设备, 搭建数据实时

采集、传输、存储一体化系统, 实现监测数据全天候动态更新, 为边坡稳定性分析和风险判定提供实时数据支撑。(3) 风险预警机制: 结合规范标准与工程实际设定分级预警阈值, 搭建多级风险预警体系。针对不同预警等级制定对应的应急处置方案, 及时响应边坡异常变形、渗水等风险问题。

4.4 工程运维安全保障建议

(1) 施工期安全管控: 严格规范边坡开挖、支护施工工序, 坚持分层开挖、分层支护, 杜绝超挖、乱挖行为。强化施工质量管控, 严格核验支护材料与施工工艺, 规避施工扰动引发的临时失稳风险。(2) 运营期定期巡检: 建立常态化巡检制度, 定期排查坡面开裂、渗水、支护破损等隐患, 记录边坡运行状态, 对微小病害及时修复, 防止隐患持续扩大。(3) 极端工况应急管控: 针对暴雨、库水位骤变等极端工况, 落实专项防控措施, 提前疏通排水设施, 加强实时监测, 启动应急值守机制, 快速处置突发安全隐患, 保障边坡工程运营安全。

结束语

本文完成了水工环耦合作用下边坡稳定性的系统分析, 明确了不同工况边坡稳定状态与核心主控因素, 厘清了多因素叠加致灾机理。研究表明, 研究区边坡无整体失稳风险, 但局部陡坡与软弱夹层区段在极端工况下存在安全隐患。后续需落实差异化治理措施, 完善常态化监测预警体系, 强化施工与运维全过程管控, 持续弱化水工环劣化及工程扰动影响, 全面提升边坡长期稳定性与工程安全保障能力。

参考文献

- [1] 令狐荣霞. 水工环地质条件概述及基坑边坡稳定性分析评价[J]. 世界有色金属, 2022, 16(13): 221-224.
- [2] 曹裕荣. 基坑开挖边坡稳定性分析方法的比较研究[J]. 江苏建筑, 2024, 12(2): 86-88.
- [3] 李岩琛. 路基高边坡稳定性的影响因素及控制措施[J]. 交通世界, 2024, 7(17): 68-70.
- [4] 孙林锋. 硬质岩路堑边坡改建稳定性分析与加固设计[J]. 福建交通科技, 2024, 7(1): 19-23.
- [5] 黄华健. 高边坡条件下组合支护形式的应用与研究[J]. 建材发展导向, 2023, 21(24): 128-130.