

复杂工程地质库区大坝岸坡岩溶裂隙发育对坝体稳定影响

周 瑾 吉婷婷

中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津 300222

摘 要: 针对岩溶裂隙密集分布库区岸坡与坝体协同稳定问题, 梳理岩溶裂隙分层发育、多尺度渗流传导、库水干湿循环耦合劣化三类核心作用路径, 分析裂隙贯通后岸坡滑移、坝基渗漏、界面应力畸变连锁演化规律, 结合空天地深一体化智能探测、数字孪生动态仿真前沿技术, 构建裂隙-渗流-变形耦合研判体系, 提出全周期分层防渗、分布式光纤立体监测协同管控思路, 为岩溶区水利工程长期稳定运维提供新型技术支持。

关键词: 复杂工程地质; 库区大坝; 发育结构特征; 多维度耦合影响

引言

西南岩溶山区高坝库区岸坡广泛存在多尺度溶蚀裂隙网络, 蓄水后水位周期性波动持续改造岩体结构, 传统单一坝体稳定分析未纳入岸坡岩溶裂隙联动效应, 隐患识别存在滞后性。现有研究多聚焦单一滑坡或坝基渗漏独立问题, 缺少岸坡岩溶裂隙与坝体结构协同演化的系统性解析。依托数字化地质探测与动态仿真技术, 厘清裂隙发育控制下岸坡坝体耦合失稳机制, 形成适配复杂岩溶库区的稳定管控逻辑。

1 库区岸坡岩溶裂隙空间发育结构特征

岩溶裂隙形成是构造应力、地下水溶蚀、库区卸荷三重作用长期叠加的结果, 空间分布具备分层分带、条带贯通、尺度梯度差异化的固定规律, 整体构成三维连通网状地质介质体系。水平层面, 裂隙沿构造破碎带、岩层接触面呈带状集中分布, 可溶岩纯度越高的区段裂隙密度越高, 非可溶夹层形成裂隙发育阻隔界面, 分割独立渗流单元。垂直层面分为浅表卸荷裂隙、中层构造溶蚀裂隙、深部基岩原生裂隙三层结构, 浅表裂隙受库水浪蚀、干湿循环影响张开程度持续扩大, 中层裂隙兼具构造切割与水溶蚀改造双重特征, 深部裂隙闭合度高但存在隐伏贯通通道, 三层裂隙通过溶蚀孔洞形成水力连通体系^[1]。岸坡消落带是裂隙演化活跃区段, 水位升降区间内岩体反复浸润脱水, 裂隙壁面矿物持续溶蚀剥离, 原有闭合裂隙逐步张开, 新增次生微裂隙沿原有裂隙端部延伸拓展, 裂隙网络连通性随蓄水时长持续提升。不同产状裂隙对岩体完整性控制作用存在区分, 顺坡向裂隙为滑移面发育提供基础, 竖向裂隙形成垂直渗流通道, 切层裂隙分割完

整岩体形成离散岩块, 三类裂隙交叉切割大幅降低岩体整体连续度。岩溶裂隙空间分布不存在均匀发育状态, 局部密集裂隙带与完整基岩交替排布, 形成刚度差异化岩体结构, 该结构特征会持续传导至坝体接触界面, 改变荷载传递路径。当下全域裂隙精细勘察不再受单一钻孔点位探测约束, 依托超声合成孔径扫描、分布式光纤孔内检测两类技术协同作业, 同步采集裂隙开度、延展规模、空间产状等全域参数, 构建精度达厘米级的微裂隙三维模型, 完整复现裂隙网络连通结构, 支撑岩体渗流演变、应力变形传递相关分析, 补齐常规勘察难以探明地下隐蔽贯通裂隙的技术缺陷。

2 岩溶裂隙岸坡地质作用基础演化机制

2.1 岩溶裂隙岩体干湿循环劣化机理

库水位周期性涨落驱动岸坡裂隙岩体持续经历浸润、饱水、脱水完整循环流程, 劣化作用集中发生于裂隙结构面, 完整岩块本体力学指标衰减幅度远低于裂隙壁面。水体沿裂隙渗入后溶解结构面充填钙质胶结物, 充填物流失直接降低岩块间咬合作用, 单次循环即可造成裂隙面粘结能力衰减, 多周期叠加后衰减幅度呈持续累积趋势。脱水阶段裂隙内部水分蒸发, 残留可溶盐结晶膨胀, 对裂隙壁面形成径向扩张作用, 原有微裂隙沿端部进一步延伸拓展, 裂隙整体开度持续增大。消落带区段循环频次最高, 裂隙壁面长期处于矿物溶蚀与盐结晶胀缩交替作用状态, 裂隙网络连通度逐年提升, 原本独立分散的微小裂隙逐步连通形成贯通渗流通道。干湿循环不存在单向线性劣化规律, 前期以微裂隙拓展为主, 中期以贯通通道形成为核心, 后期岩体破碎带成型后变形速率大幅提升。裂隙岩体劣化不局限于岸坡表

层,贯通裂隙可将库水导入深部岩体,使地下一定深度范围岩体同步发生强度衰减,形成纵深劣化带,持续改变岸坡整体应力分布格局。

2.2 岩溶裂隙网络渗流传导演化规律

岩溶裂隙构成库区地下水完整渗流传导载体,不同尺度裂隙形成分级传导系统,表层宽大裂隙承担快速输水功能,深部微裂隙负责缓慢渗流扩散,两者通过溶蚀孔洞完成水力交换,形成多级渗流耦合体系。库区蓄水后上下游水头差沿裂隙网络形成稳定渗流场,贯通裂隙内部持续产生渗透压力,压力数值随裂隙连通范围扩大同步提升^[2]。水位抬升阶段渗流由表层向深部传导,水位下降阶段深部储存水体沿裂隙反向回流,完整周期内渗流场持续动态重构。岩体局部出现裂隙集中发育区域后会生成贯通渗流路径,水流长期冲刷裂隙内松软填充物,填充物不断被带走让渗流通道持续加宽,渗水量随之增大,形成持续发展的渗流循环。裂隙水压传递存在滞后效应,水位骤变时深部水压变动慢于浅表裂隙,滞后时间受裂隙连通状况与充填材料特性影响。渗压降低岩体有效应力,削弱裂隙抗剪强度,渗流分布决定岸坡滑移带位置,还会改变坝基渗水补给状态。

2.3 裂隙-岸坡变形协同传递路径

岩溶裂隙网络是岸坡内部变形传递的核心通道,外部荷载、渗流压力产生的变形信号优先沿贯通裂隙传递,完整基岩区段变形传导速率显著降低。顺坡向贯通裂隙成型后,岸坡上部变形可沿裂隙直接传递至坡脚坝体衔接区段,形成自上而下连续变形传导链,竖向裂隙分割岩体形成独立变形单元,单元间变形差值在裂隙界面产生集中应力。裂隙拓展过程同步改变岩体应力重分布状态,裂隙端部持续出现应力集中区域,成为次生裂隙发育起点,原有裂隙网络持续扩容。岸坡变形不会单独发展,坡脚和坝体衔接段变形能双向传递。岸坡顺着裂隙滑动会直接挤压坝侧,坝体自重与水压力形成的反向约束力又作用于岸坡裂隙岩体,二者彼此牵制构成耦合变形整体。裂隙发育情况控制变形传播范围,裂隙连通差则变形仅局限岸坡局部,裂隙全域贯通后变形会蔓延至坝基浅层,造成坝基不均沉降。水位反复升降每次带来小幅形变,长期叠加超临界值后,坡体便会快速失稳。

3 岩溶裂隙岸坡对坝体稳定多维度耦合影响

3.1 裂隙渗流诱发坝基渗漏稳定扰动

岸坡贯通岩溶裂隙形成库水向坝基深部渗透的隐蔽通道,常规坝前防渗体系仅阻断坝体正面直接渗漏,无法

法拦截经岸坡裂隙绕流至坝基底部的水体,形成侧向隐蔽渗漏路径。库水沿岸坡裂隙持续补给坝基岩体,提升坝基内部地下水水位,渗透压力作用于坝基底部接触面,降低坝体与基岩间有效接触应力,削弱坝体整体抗滑基础。裂隙集中渗流区段持续冲刷坝基表层软弱夹层,夹层细颗粒随渗流水持续流失,夹层厚度逐步缩减,局部形成架空空隙,坝基承载均匀性被打破,产生差异化沉降基础条件。不同发育等级裂隙带来渗漏扰动强度存在区分,浅层零散微裂隙仅造成微量渗漏,不会改变坝基整体应力状态;中层贯通构造裂隙可形成稳定绕流通路,渗漏流量持续处于高位;深部大型岩溶管道与裂隙组合体系会形成集中突渗通道,短时间内大量水体涌入坝基,渗透压力快速攀升,直接压缩坝体稳定储备区间。渗漏扰动具备长期渐进特征,初期渗漏流量波动幅度较小,随裂隙充填物流失,渗流通道持续拓宽,渗漏流量逐年递增,坝基渗透变形风险同步上升^[3]。岸坡裂隙渗流与坝基渗漏形成闭环水力体系,坝基渗漏水体反向抬升岸坡深部裂隙地下水水位,进一步放大岸坡滑移风险,两类隐患相互促进同步演化。传统渗漏管控仅针对坝体自身布设防渗帷幕,需依托数字化裂隙建模划定完整防渗管控边界,分层封堵岸坡各级贯通裂隙通道。

3.2 岸坡裂隙滑移引发坝体侧向荷载畸变

岩溶裂隙贯通后岸坡形成连续潜在滑移面,滑移体沿裂隙面向坡脚产生侧向推力,推力直接作用于坝体上下游侧面,改变坝体原有荷载平衡体系。完整基岩岸坡传递至坝体侧向荷载分布均匀,裂隙破碎岸坡滑移推力集中于局部接触区段,形成局部高应力荷载区域,荷载分布失衡引发坝体内部应力重构。顺层岩溶裂隙岸坡滑移推力持续稳定输出,竖向裂隙分割型岸坡推力呈分段脉冲式变化,库水位升降阶段推力数值同步波动,坝体长期承受动态交变侧向荷载。岸坡滑移变形具备渐进拓展规律,初期裂隙仅产生微量剪切位移,传递至坝体侧向荷载增量幅度较小;裂隙完全贯通后滑移位移持续放大,侧向推力同步提升,坝体侧面混凝土结构与岩体接触界面出现持续剪切作用,界面处逐步产生裂隙损伤。不同坝型受侧向滑移荷载扰动响应存在区分,重力坝依靠自身自重抵消侧向推力,裂隙岸坡持续推力会大幅压缩抗滑安全余量;轻型坝体自重储备有限,岸坡裂隙滑移产生的侧向荷载极易打破整体稳定平衡,诱发坝体倾斜位移。

3.3 裂隙岩体刚度差异造成坝基不均匀沉降

岩溶裂隙密集分布区段岩体完整性大幅下降,岩体

压缩变形指标与完整基岩形成明显梯度差值,坝体荷载作用下不同区段压缩变形量存在显著区分,直接引发坝基不均匀沉降。裂隙发育密集带岩体内部空隙占比高,受压后裂隙持续闭合压缩,沉降变形持续发展;完整基岩区段压缩变形幅度极小,两类区段相邻分布时沉降差值持续累积,坝体底部形成不均匀位移场。分层岩溶裂隙岩体沉降具备时序差异化特征,浅表裂隙先完成压缩沉降,深部贯通裂隙随荷载长期作用逐步闭合,沉降变形持续延伸至工程全运行周期。坝基不均匀沉降沿坝体纵向、横向同步扩散,沉降差值达到临界数值后,坝体内部产生附加拉应力,拉应力集中于坝体与基岩接触界面、坝体结构分缝区段,逐步催生结构性裂缝^[4]。岸坡向坝基过渡区段裂隙发育梯度变化最明显,完整岩体向破碎裂隙岩体过渡带沉降差值最大,是坝基沉降损伤高发区域。干湿循环持续拓展岸坡裂隙范围,破碎岩体分布区间逐年扩大,沉降差异区段同步延伸,坝基不均匀沉降程度随运行时长持续加剧。

3.4 多场耦合下岸坡-坝体协同失稳演化模式

岩溶裂隙作用下岸坡渗流场、变形场、应力场与坝体结构场持续耦合联动,形成分阶段递进式协同失稳演化流程,整体分为裂隙拓展蓄能、局部损伤发育、全域贯通失稳三个连续阶段。第一阶段以干湿循环、渗流冲刷驱动裂隙微拓展为主,各类场变量仅出现小幅波动,岸坡与坝体无明显宏观变形,稳定储备处于充足区间;第二阶段中层贯通裂隙成型,渗流集中通道形成,岸坡局部产生微小滑移位移,坝基渗漏、局部应力集中、小幅不均匀沉降同步显现,稳定储备持续消耗,进入欠稳定过渡状态;第三阶段深部岩溶管道与岸坡裂隙全域连通,渗流压力、侧向滑移推力同步突破临界阈值,岸坡产生宏观滑移,坝基渗漏量、沉降差值大幅攀升,坝体结构出现持续性损伤,整体稳定平衡彻底打破^[5]。多场耦合演化不存在单一主导诱因,裂隙网络是各类地质作用相互传导的媒介,渗流通过弱化裂隙结构面放大变

形,变形拓展裂隙进一步优化渗流传输通道,两类作用持续相互强化,同步向坝体传递扰动信号。极端降雨、快速水位消落会加速耦合演化进程,短时间内提升裂隙内部渗流压力,压缩各阶段演化时长,大幅缩短稳定储备消耗周期。不同空间分布裂隙主导的协同失稳模式存在区分,顺坡贯通裂隙主导滑移型协同失稳,竖向管道裂隙主导渗漏沉降型协同失稳,交叉网状裂隙诱发滑移、渗漏、沉降同步发生的复合型协同失稳。

结语

岩溶区域裂隙发育构成的完整网络,直接左右库区边坡与挡水坝体整体稳定状态,是工程管控里不可忽视的关键地质要素。渗流持续冲刷、坡体滑动作用力、岩层软硬变形差三类因素相互叠加,顺着裂隙通道持续传递,极易诱发连续失稳病害,以往只从单一角度开展稳定验算很难覆盖全部风险。依靠多手段立体勘察、数字模型多物理场模拟手段,能够精准厘清裂隙发育与受力变化规律。后续要落实分层防渗处置方案,搭建全域立体监测网络,形成适配岩溶库岸的长效动态管控机制,持续削减工程服役期间整体失稳隐患。

参考文献

- [1] 秦臻,黄波林,张鹏.基于探地雷达检测的岩溶岸坡内部宏观裂隙响应规律研究[J].工程地质学报,2021,29(3):628-639.
- [2] 徐欣,房波,吴勇进.考虑不同岩溶发育的顺向破碎岩体岸坡稳定性评价与加固[J].路基工程,2026(3):245-251.
- [3] 叶飞,钟洪星,方华超,张鑫,周华,张雨霏.岩溶对边坡岩体稳定性影响的计算分析和评价研究[J].水电能源科学,2025,43(8):69-73.
- [4] 张文兵,沈振中,陈官运,张琬琳,魏舒萌,汪千敢.岩溶发育地质条件下的库区三维渗流场分析及渗控效果评价[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):218-224+234.
- [5] 王倩,邢闯锋.岩溶区边坡稳定性多因素作用机理与防护措施[J].交通世界,2026(14):65-67.