

水利施工土石方开挖边坡稳定性控制技术

刘治民

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810007

【摘要】：水利施工土石方开挖对边坡稳定性要求较高，地质结构、地下水、开挖方式及支护措施均会影响边坡安全。围绕边坡失稳成因、稳定性控制要点和施工技术措施展开分析，重点探讨分层分段开挖、坡面防护、截排水处理、监测预警及应急加固等技术路径，提出全过程控制思路，为提升水利工程土石方开挖安全性、减少边坡变形与滑塌风险提供参考。

【关键词】：水利施工；土石方开挖；边坡稳定性；支护技术；监测预警

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.014

引言

水利工程土石方开挖具有规模大、工序多、环境复杂等特点，边坡稳定性直接关系施工安全与工程质量。受地质结构、开挖扰动、地下水、降雨冲刷及支护滞后等因素影响，边坡易出现变形、裂缝、滑塌等问题。围绕边坡稳定性控制技术开展分析，有助于明确风险来源，优化施工组织、支护排水和监测预警措施，提升水利施工安全管理水平。

1 水利土石方开挖边坡稳定控制的工程基础

1.1 地质条件识别与坡体结构判定

水利施工土石方开挖前，地质条件识别是边坡稳定控制的基础环节，其准确性直接影响坡率设计、开挖顺序和支护方式选择。施工区域常见岩土体包括黏性土、砂卵石层、强风化岩层、软弱夹层及破碎岩体，不同地层的抗剪强度、压缩性、渗透性和遇水软化程度存在明显差异。地质识别应围绕岩土类型、层间接触关系、节理裂隙发育程度、断层破碎带分布、软弱结构面倾向与边坡临空面的组合关系展开。若软弱夹层倾向坡外，开挖后容易沿层面产生滑移；若岩体裂隙密集且充填泥质物，坡体整体性会降低，局部掉块和浅层坍塌风险增大。坡体结构判定不能仅依靠单一勘察资料，还应结合钻探、原位测试、现场揭露面观察和施工期复核资料进行综合分析。开挖过程中暴露出的岩层产状、裂隙宽度、渗水点和风化界线，应及时与设计阶段资料比对，发现地质条件变化时需调整坡率、平台宽度和支护参数。对于高边坡、深基坑及临近水体的开挖部位，应重点识别潜在滑动面的位置和贯通可能性，明确坡体是以整体滑移、局部剥落还是浅层冲刷破坏为主，为后续稳定计算和施工控制提供依据。

1.2 开挖扰动下边坡受力变化

土石方开挖会改变原有坡体的应力平衡状态，坡脚卸荷、坡面临空和施工荷载共同作用后，边坡内部应力会重新分布。未开挖前，岩土体处于相对稳定的自重应力状态，开挖形成自由面后，坡体侧向约束减弱，坡脚支撑能力下降，临空面附近容易出现拉应力集中和剪应力增大。当开挖深度较大或坡率偏陡时，坡顶区域可能产生张拉裂缝，坡脚部位则容易形成剪切

变形带，二者发展到一定程度后会诱发滑移破坏^[1]。机械开挖、爆破振动和运输车辆反复碾压也会加剧坡体扰动，特别是在强风化岩层和松散堆积层中，振动作用会削弱颗粒间咬合力，使局部土体产生松弛、掉落或塑性变形。开挖组织方式对受力变化影响明显，若一次性开挖高度过大，坡体释放应力速度过快，支护结构难以及时发挥约束作用；若未设置合理施工平台，坡面排险、支护施工和监测布点均会受到限制。分层分段开挖可使坡体逐步卸荷，减少突发性变形风险，并为锚杆、挂网喷护、抗滑桩等措施提供施工时间。边坡稳定控制应关注开挖面暴露时间，软弱岩土体长时间裸露后受风化、干湿循环和降雨影响，强度会继续下降，因此开挖、修坡、支护和监测需要形成连续作业关系，避免扰动累积扩大。

1.3 地下水与降雨对坡体安全的影响

地下水和降雨是水利施工边坡失稳的重要诱发因素，尤其在河道治理、水库枢纽、渠道开挖和泵站基坑等工程中，坡体往往受地下水位变化、地表径流冲刷和施工排水条件影响。地下水进入坡体后会增加岩土体含水率，使黏性土软化、砂性土抗剪强度降低，并在孔隙中形成水压力，削弱有效应力。当坡体内存在裂隙、软弱夹层或透水砂层时，地下水会沿优势通道渗流，造成局部淘蚀、管涌或坡面渗水，进而破坏坡体结构完整性。降雨对边坡的影响具有突发性和持续性，短时强降雨会在坡顶形成集中径流，冲刷坡面细颗粒，扩大裂缝和冲沟；连续降雨会使坡体入渗深度增加，潜在滑动面附近水压力上升，边坡安全储备降低。施工期间若截水沟、排水沟、集水井和坡面泄水孔布置不合理，雨水容易汇集在坡顶、平台或坡脚位置，造成坡脚浸泡和局部坍塌。水利工程开挖边坡应根据场地汇水面积、地下水埋深、岩土渗透系数和季节降雨特征设置排水系统，坡顶截水需阻断外来径流，坡面排水需减少冲刷路径，坡脚排水需防止积水反压。对渗水明显的坡段，应结合盲沟、泄水孔、反滤层和临时抽排措施降低水压力，并通过雨前检查、雨中巡查和雨后复测掌握坡体变形变化。

2 边坡稳定控制中的薄弱环节与技术优化

2.1 勘察参数偏差引发的控制偏差

勘察参数是边坡稳定计算和施工控制方案制定的重要依据,若岩土物理力学指标取值偏离实际情况,容易导致开挖坡率、支护强度和排水措施出现控制偏差。水利施工场地通常具有地层变化快、含水条件复杂、局部软弱夹层隐蔽性强等特点,有限钻孔资料难以完全反映坡体空间变化。若仅依据少量取样试验确定黏聚力、内摩擦角、天然重度、渗透系数等参数,可能低估软弱带分布范围,也可能高估岩土体抗剪能力。参数偏差在施工阶段会转化为具体风险,如设计坡率偏陡、平台宽度不足、支护结构锚固长度偏短、排水能力与实际汇水量不匹配等。开挖揭露后,应将现场岩土状态、裂隙密度、含水变化、坡面掉块情况与原勘察成果进行复核,必要时补充轻型动力触探、现场剪切试验、岩体完整性判别和渗水量观测。对于参数离散性较大的区域,不宜采用单一平均值控制,应结合不利组合进行稳定验算,预留安全储备。施工单位还应建立地质反馈机制,将开挖面实际情况及时传递至设计和监理环节,使边坡控制方案能够随地质条件变化进行修正,避免参数误差持续影响后续施工。

2.2 分层分段开挖与坡率控制优化

分层分段开挖能够降低土石方开挖对边坡整体稳定性的集中扰动,是水利工程边坡控制中较为常用的施工组织方式。开挖高度、分段长度、施工平台宽度和坡率设置应依据岩土类别、边坡高度、支护方式及机械作业半径综合确定。对于松散土层和强风化岩层,单层开挖高度不宜过大,应通过台阶式推进减少坡面暴露面积,避免上部荷载快速释放造成局部坍塌^[2]。对于岩体较完整但节理发育的坡段,可结合节理倾向调整坡面角度,使开挖面尽量避开不利结构面组合。坡率控制不能仅满足设计图纸尺寸,还应根据现场修坡质量进行动态校核,机械开挖后残留的凸起、欠挖和超挖部位会改变局部受力状态,需通过人工修整或小型设备精修保持坡面顺直。分段施工应避免形成高差过大的临时陡坎,开挖推进方向宜与排水、支护和运输组织相协调,保证已开挖坡面能够及时封闭或加固。平台设置应兼顾卸荷、施工通行、排水沟布置和监测点安装需求,平台过窄会削弱缓冲作用,平台积水则会增加坡体浸润风险。通过分层控制深度、分段限制长度、坡率动态调整 and 平台功能完善,可使开挖过程由一次性削坡转变为可控推进过程。

2.3 支护排水监测协同控制

边坡稳定控制不能依赖单一支护措施,支护、排水和监测需要形成协同关系,才能适应水利土石方开挖过程中地质条件和外部环境的变化。支护结构主要承担约束坡体变形、增强浅层稳定和防止局部破坏的作用,常用方式包括锚杆、锚索、喷射混凝土、挂网防护、格构梁、抗滑桩及坡脚挡墙等。支护类

型应与坡体破坏模式相匹配,浅层松散剥落可采用挂网喷护和锚杆加固,深层滑移风险较高的坡段则需提高锚固深度或设置抗滑结构。排水系统应与支护同步实施,坡顶截水沟可减少外部径流进入开挖区,坡面排水槽可引导雨水有序下泄,泄水孔和盲沟可降低坡体内部水压力,坡脚集水井和抽排设备可避免积水浸泡支护基础。监测工作应覆盖位移、裂缝、沉降、地下水位和支护受力等内容,监测点布置需兼顾坡顶、坡面平台、坡脚和重点变形区。数据采集后应设置预警阈值,发现位移速率增大、裂缝扩展、渗水量突增或支护构件异常受力时,应及时采取卸载、补强、截排水加密或暂停开挖等措施。支护提供结构约束,排水降低水力作用,监测识别风险变化,三者配合能够提升边坡控制的连续性和针对性。

3 边坡稳定控制成效与后续完善路径

3.1 典型水利工程边坡控制应用

典型水利工程土石方开挖常集中在渠道扩挖、泵站基坑、闸坝基础、库岸整治和河道岸坡治理等部位,边坡控制应用需要结合工程功能、施工空间和运行水位变化进行安排。以渠道开挖为例,边坡线形较长,沿线地层差异明显,施工控制重点在于分区划定稳定等级,对软弱土层、填筑交界区和临水坡段采取差异化措施。泵站和闸坝基坑开挖深度较大,周边往往布置施工道路、材料堆场和临时排水设施,边坡控制应限制坡顶附加荷载,避免大型机械长时间靠近临边作业。库岸整治工程受水位涨落影响明显,施工期间需考虑临时开挖坡面与后期水流冲刷之间的关系,坡脚部位通常需要设置块石护脚、混凝土护坡或生态护岸结构。河道岸坡治理则应关注水流冲刷、岸坡淘刷和坡面裸露问题,施工中可将削坡减载、坡面防护和坡脚固结结合使用。典型工程应用中,边坡控制不宜采用统一化模式,应根据开挖位置、土石组成、坡高条件和水力影响确定技术组合。施工方案还需与工期安排衔接,汛期前完成关键坡段防护,雨季施工时压缩裸坡暴露时间,临水作业区设置临时围挡和导排设施,使边坡控制与水利工程施工环境相适应。

3.2 变形监测数据与安全效果评价

边坡安全效果评价应建立在连续监测数据和现场状态记录基础上,单次检查难以反映坡体变形发展的全过程。监测内容通常包括坡顶水平位移、坡面沉降、深部位移、裂缝宽度、地下水位、支护结构应力和降雨量等指标,不同指标能够反映不同层面的安全状态。水平位移可判断坡体是否存在向临空面移动趋势,沉降变化可识别坡顶松弛或局部压缩现象,深部位移数据能够判断潜在滑动面是否形成,裂缝监测可反映浅层变形扩展情况。评价过程中,应关注监测数值与变化速率的同步关系,仅数值较小但增长速度持续加快时,仍可能存在失稳风险。安全效果评价还应结合施工阶段进行划分,开挖初期主要观察卸荷变形,支护完成后重点判断变形是否收敛,降雨后需

复核地下水位和裂缝变化^[3-5]。对于采用锚杆、喷护、抗滑桩等措施的坡段,可通过支护应力变化、坡面开裂情况和位移收敛时间判断加固效果。若监测数据趋于平稳,裂缝未继续扩展,坡脚未出现鼓胀或渗水突增,说明控制措施能够满足当前施工条件。若出现位移突增、裂缝贯通、坡面掉块频繁等异常表现,应将监测结果转化为施工调整依据,采取暂停开挖、削坡减载、补充支护或强化排水等措施。

3.3 智能监测和绿色防护融合发展

水利施工边坡控制正在由经验判断向数字化、智能化和生态化方向延伸,智能监测与绿色防护的融合能够提升边坡管理精度和工程环境协调性。智能监测方面,可利用自动化测斜仪、GNSS 位移监测、裂缝计、雨量计、渗压计和视频识别设备构建监测网络,对边坡变形、水位变化和降雨过程进行实时采集。数据平台可将位移速率、累计变形量、降雨强度和地下水位变化进行关联分析,形成分级预警信息,减少人工巡查滞后造成的风险遗漏。对于高边坡和临水危险区域,无人机巡检可快速

获取坡面裂缝、冲沟、掉块和植被破坏情况,三维建模技术可辅助识别坡面形态变化。绿色防护方面,水利边坡治理不应只依赖硬质结构,还可根据坡面稳定程度选用植草护坡、生态袋、三维植被网、格宾石笼和生态混凝土等方式,兼顾防冲刷、保水固土和景观恢复。对于受水流冲刷较强的坡脚,可采用柔性护脚与植物护坡组合,既提高抗冲能力,又减少大面积硬化对水生态环境的影响。智能监测提供风险识别和控制反馈,绿色防护改善坡面长期稳定条件,两类技术融合后可形成施工期安全控制与运行期生态维护相衔接的边坡治理模式。

4 结语

水利施工土石方开挖边坡稳定性控制应贯穿勘察、开挖、支护、排水和监测全过程。精准识别地质条件、优化分层分段施工、完善支护排水体系、强化变形监测与预警,可有效降低边坡滑塌、变形和冲刷风险。智能监测技术与绿色防护措施的融合,有助于提升边坡控制精度和长期运行稳定性,为水利工程安全施工与质量提升提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 李翔晖,周坤峰.水利工程施工中土石方开挖技术与安全措施研究[J].水上安全,2025,(12):184-186.
- [2] 李克华.水利施工中的土石坝施工技术[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.2025:231-233.
- [3] 刘鹏.水利工程中土石围堰设计及实施要点[J].山西建筑,2025,51(12):186-188+192.
- [4] 柏淑霞,郭瑜瑜.水利水电工程中土石方施工技术要点分析[J].水上安全,2025,(8):196-198.
- [5] 陆林林.水利工程施工中的土石方开挖与边坡稳定控制研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第六届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.2025:195-197.