

# 水利工程施工中高边坡稳定控制技术研究

杨永铭

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 水利工程建设常面临复杂地质条件下高边坡开挖与加固的严峻挑战, 高边坡的稳定性直接关系到工程安全、施工进度及长期运行可靠。因此, 对其稳定控制技术进行系统性研究具有至关重要的现实意义。本研究聚焦高边坡失稳机理与控制策略, 旨在探索科学有效的分析方法和加固技术, 为提升水利工程施工安全水平与风险防控能力提供有益参考。

**关键词** 水利工程施工; 高边坡; 稳定控制技术

**中图分类号**: TV5

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.016

## 0 引言

随着我国大型水利工程向复杂地形地质区域延伸, 高边坡稳定问题日益凸显, 成为制约工程顺利推进的核心技术难题之一。传统的经验性控制手段已难以满足现代工程对安全与效率的更高要求。因此, 深入探究高边坡在施工扰动下的动态响应规律, 并集成创新监测技术与智能控制方法, 对于实现安全、经济、高效的边坡治理, 保障水利工程全生命周期安全具有紧迫而深远的战略价值。

## 1 高边坡稳定控制的重要性

### 1.1 保障工程施工安全与进度

高边坡处于水利工程施工的开挖或填筑阶段时, 岩土体原有应力遭到破坏, 高边坡易出现滑坡、崩塌失稳现象。一旦出现失稳现象将损坏设备、阻断施工区、造成人员伤亡事故、影响工期和造成严重的直接经济损失。在施工中通过实施稳定控制技术提前加强稳定、排水, 减小施工期中的风险, 保证各个施工单项工程按计划推进, 为全部水利枢纽工程的顺利进展提供前期保障。

### 1.2 维护工程运行期结构安全

水利工程投入运行后, 高边坡长期承受水压力、渗透力及自重荷载的耦合作用, 若施工阶段未做好稳定控制, 运行期可能因库水位变化、雨水入渗等触发深层滑动。这类失稳会直接威胁大坝、溢洪道、引水渠等主体结构的安全, 甚至引发溃坝等重大灾害。施工期的稳定控制是源头性防线, 能减少运行期维护成本, 延长工程寿命, 保障下游人民生命财产与区域生态安全<sup>[1]</sup>。

### 1.3 支撑区域生态与经济社会稳定

高边坡多位于山区河谷, 其失稳不仅破坏工程本身, 还会引发水土流失、河道淤塞、农田掩埋等次生灾害, 影响区域生态平衡与农业生产。水利工程作为区域发展的重要基础设施, 施工期的高边坡稳定控制能避免此类连锁反应, 保护水土资源与生态环境, 维护库区移民安置区及下游居民的生产生活秩序, 为区域经济社会可持续发展提供可靠的水利支撑。

## 2 水利工程施工中高边坡稳定的影响因素分析

### 2.1 地质条件复杂性与隐蔽性

高边坡所在区域的地质条件往往具有高度复杂性, 岩土体类型多样, 软硬夹层、断层破碎带分布不均, 这些隐患在施工前难以完全探明。部分区域存在古滑坡体或强烈风化带, 岩体完整性差, 自稳能力弱。施工开挖打破了原有平衡状态, 使隐伏的软弱结构面暴露, 易成为滑动通道。若前期勘察精度不足, 对这些地质风险认识不清, 就可能在施工中突发失稳, 给工程带来严重安全隐患。

### 2.2 水文作用诱发坡体软化

施工期与运行期的水文作用是高边坡失稳的重要诱因。降雨入渗使坡体含水量增加, 岩土体强度显著降低, 尤其对粉质黏土、风化岩层影响明显。库区水位变动或地下水位上升, 会产生浮托力和动水压力, 改变坡体应力场。部分工程排水系统设计不合理, 截水沟、排水孔堵塞或数量不足, 导致渗水无法及时排出, 长期浸泡使坡脚软化, 抗剪强度下降, 最终诱发滑坡或坍塌。

**作者简介**: 杨永铭 (1996-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程。

### 2.3 施工扰动与工艺不当

施工过程中的机械开挖、爆破作业、堆载加载等会直接扰动坡体。超挖、欠挖或分层厚度过大,破坏了坡体的自然休止角;爆破产生的振动波会损伤岩体结构,形成松动圈。施工材料堆放位置不当,在坡顶或坡面附近集中堆载,会增加附加下滑力。此外,支护措施滞后于开挖进度,或锚杆、抗滑桩施工质量不达标,使坡体在尚未形成有效支挡时就已失稳,增加了风险发生的概率。

## 3 高边坡稳定控制关键技术

### 3.1 锚固支护技术

锚固支护技术是水利工程中高边坡稳定控制的手段之一,通常是通过预应力锚杆、锚索等将不稳定坡体与深层相对稳定的岩土体相连而成为整体,施工时首先要考虑地质条件确认潜在滑裂层面,再按照设置角度钻孔,清孔后下挂钢筋或钢绞线,注浆固定,对于破碎地层还要考虑跟管钻进等工艺确保成孔质量。张拉锁定时的预应力值要严格控制,确保预应力能抵抗下滑力。锚固支护可大幅提高坡体抗剪强度,限制变形发展,尤其对于岩质高边坡,处理施工质量时须尤其注意,注意对锚固系统采取有效防腐、耐久性能的处理措施,防止因变锈、膨胀、浆体老化而支护体失去支撑力,还要将锚固的预应力动态地受注浆体的变化进行调整,保证长期的稳定等<sup>[2]</sup>。

### 3.2 抗滑桩技术

抗滑桩通过在坡体滑动方向设置大型桩体,直接阻挡滑体位移,是治理深层滑动的有效手段。桩体通常深入稳定地层一定深度,依靠自身刚度与锚固力抵抗滑动力。施工需先进行桩位放样与孔口加固,再采用人工挖孔或机械成孔,遇流砂、涌水等不良地质时需采取降水或护壁措施。钢筋笼制作与安装需严格符合设计要求,混凝土浇筑应连续进行以保证密实度。抗滑桩的优势在于承载力高、适应性强,可用于多种岩土组合边坡。但其施工周期长、成本高,且对桩身完整性要求严格,需加强成孔质量检测与桩身无损探伤,防止因缩径、断桩等问题削弱支护效果<sup>[3]</sup>。

### 3.3 挡土墙技术

挡土墙通过自身重量或结构强度抵抗坡体侧向压力,常用于浅层或坡脚防护。常见类型包括重力式、衡重式、悬臂式等,需根据边坡高度、地基承载力及材料来源选择。施工时需先平整基底,确保承载力满足设计要求,再进行墙体砌筑或浇筑。重力式挡土墙靠圬工自身重量保证自身稳定,砌筑砂浆要塞实、沉降缝要设置合理;钢筋混凝土挡土墙支模、绑钢筋要压实,保证尺寸等。挡土墙施工方便、见效快,占地大,

而且又长时间承受水的压力而开裂、倾倒,所以挡土墙要配备一种好的排水设施,防止墙背积水冲刷土基<sup>[4]</sup>。

### 3.4 坡面防护技术

坡面防护是避免坡面表层岩土风化剥落及冲刷破坏,分为工程防护与生态防护两种形式。工程防护的方法有喷混凝土、浆砌石护面、土工格栅护坡等,对坡面进行封闭,可以隔绝雨水和大气对岩土体的影响,保持其强度。喷混凝土的作法需要控制速凝剂用量、喷射厚度和厚度都要控制好,保证喷浆与坡面粘结牢固;土工格栅要求铺设时张拉展平平整,不要褶皱折曲,影响加筋效果。生态防护通过植被护坡,种植一些根系发达的草本、灌木或草袋栽种防护,铺设三维网垫等,起到护坡固土与生态修复<sup>[5]</sup>。生态防护比较环保,固土作用初期弱些,一般需工程保护措施配合使用,暴雨地表径流量大的还要配套临时雨水预排水措施防止植被冲刷、流失。

### 3.5 排水防渗技术

排水防渗才是解决高边坡水害最可靠的途径,通过截断和疏导地表水和地下水,排出孔隙水。地表排水有截水沟、急流槽、平台排水沟等,边坡开挖前需提前做好地表排水,使雨水远离坡面。地下排水可为仰斜式排水孔、深层排水隧洞、土工布反滤层等,及时排出漏水和承压水。水库边坡还要做防渗帷幕或高压旋喷桩,防止库水灌入坡体。排孔施工时需避免排孔角度、深度、间距偏差,确保能排水;防渗帷幕要做灌浆结石率、渗透系数检测。排水系统的通畅关乎于坡体稳定,排水堵塞或疏漏都会使水压突然蹿高造成失稳事端<sup>[6]</sup>。

## 4 技术应用优化策略

### 4.1 基于地质条件的技术精准选型

高边坡稳定控制技术的选择应首先以详实的地质勘察成果为依据,避免一刀切式应用。对于岩体完整、节理发育的硬质边坡,应优先采用锚固支护与抗滑桩组合,利用结构力学原理直接锁固滑体;对于松散堆积体或土质边坡,则应侧重坡面防护与排水系统,辅以轻型挡土墙。需建立地质参数与技术方案的对应矩阵,明确不同岩土组合下的最优解,防止技术错配导致资源浪费或控制失效。通过精准选型,可使各项技术措施与坡体特性高度契合,从源头上提升控制效果的稳定性与经济性。

### 4.2 多技术协同的集成化应用

单一技术往往难以应对高边坡复杂的失稳模式,需推动多技术协同的集成化应用。例如:在强风化岩质边坡,可将锚固支护、坡面喷护与深层排水系统结合,形成“内固外封、阻水减载”的综合体系。施工顺序上应遵循“先排水、后支护、再防护”的原则,确保

各技术措施发挥叠加效应而非相互干扰。需制定技术接口标准,明确不同工艺的衔接要求,如锚杆钻孔与排水孔布设的空间避让规则,避免施工冲突。集成化应用能覆盖从内部应力调整到外部侵蚀防护的全链条,显著提升系统抗风险能力。

#### 4.3 施工工艺的精细化管控

技术效果的发挥程度依赖施工工艺的精细化执行。需建立从材料进场检验到工序验收的全过程质量控制体系,如锚杆注浆水灰比、抗滑桩混凝土坍落度、喷混凝土厚度的实时监测。针对复杂地质段,应制定专项施工方案,如破碎带注浆加固、富水区管井降水等,并加强施工过程旁站监督。推行首件工程认可制,通过样板引路统一操作标准,减少人为误差。同时,应利用数字化施工设备,如自动张拉锚索、智能喷浆机,提高工艺精度,确保每一项技术措施都能达到设计预期的力学与耐久性能。

#### 4.4 监测反馈的动态优化机制

建立监测数据与工程措施动态反馈机制,是实现技术持续优化关键。需将自动化监测系统的实时数据接入管理平台,通过数值模型反演分析坡体稳定性状态,及时评估现有控制措施的有效性。当监测值接近预警阈值时,应迅速启动预案,如增加临时支撑、补打排水孔或调整开挖步序。这种以数据驱动的优化模式,能变被动应对为主动调控,避免小问题积累成重大事故。同时,应定期复盘监测数据与工程效果,修正设计参数与施工工艺,形成“监测—分析—调整—验证”的闭环管理,持续提升高边坡控制水平。

### 5 未来发展趋势

#### 5.1 智能化监测与预警深度融合

未来高边坡稳定控制将更多地依靠智能传感技术和人工智能技术的互动。新型光纤光栅、微机电传感器等设备进行位移、应力、渗压等参数的密集、连续监测,并将监测数据通过物联网传送到云平台上,借助机器学习手段自动识别边坡变形特点、判断变形风险,可实现由“被人控”向“人控机”的转变。智能化在于提高信息利用率和决策执行的效率,通过边缘计算和数字“孪生”等技术,可以有效地在虚拟模型中同步反映高边坡的状态,在设计和施工方面提出决策依据。全天候、高速率的感监测模式,可极大地缩短人巡时的盲区 and 滞后性,为保障高边坡安全提供坚强科技之盾。

#### 5.2 绿色低碳防护技术广泛应用

在生态文明背景下,高边坡防护向绿色低碳发展,传统的刚性措施所占比重将越来越低,将更多应用以植被建设为主体的生态防护技术。如培育适于干旱、

瘠薄环境的植物物种及微生物固土物种与技术,配以三维网垫、植生袋等构建工程辅助措施可使坡面快速复绿并长期稳定。绿色建材应用如再生混凝土、生物基土工材料等应用,对施工现场碳排放、污染物排放皆有很大缓解作用。未来的防护理念是不仅力学稳定,还重建生态系统服务理念,重视生态过程、保持水土、丰富生物多样性、美化景观效果的实现统一,最终体现水利工程高边坡是一个人与自然和谐共生绿色界面。

#### 5.3 多学科交叉融合的技术创新

解决高边坡稳定难题将越来越靠跨学科的碰撞与融合。地质学、岩土力学、信息科学、生态学等相关知识和方法将融入高边坡稳定控制思想和方法之中,产生新理论、新技术。如利用大数据探寻历史失稳案例,数值模拟来寻找高边坡合理支护参数;或是利用仿生学原理模拟植物根状结构、动物巢状结构而研发新的辅助和加固材料。但不是仅限于技术层面,也不仅限于管理模式层面,如系统工程的学科理念带来的综合设计、动态风险管理等。互相关注将无限制拓展人们的学科视野,以跨学科研究形式来寻找应对复杂地质条件高边坡稳定这一难题的全新统一综合的解决方案。

### 6 结束语

水利高边坡的稳定控制是一项复杂的综合性工程科学命题。对失稳机理的认知深化、防控技术的持续创新,不仅能为工程实践提供系统应对方案,还能推动现行设计与施工规范的迭代完善。未来,主动与智能感知、精确控制智能技术将逐渐成为高边坡稳定控制的研究与发展主流,为水利基建的安全与长久治本提供更加强大的保障与技术支撑,这也需要不断加强地质、力学、材料、信息等科学的交叉、融合与创新研究,通过智能化、绿色化发展技术观念来引领新技术的创新,不断提高我国高边坡灾害防控综合治理现代化水平和保障安全能力。

#### 参考文献:

- [1] 辛华伟.影响水利工程边坡稳定的因素及处理措施[J].科技资讯,2022,20(16):65-67.
- [2] 胡韩臣,赵成南,易思远.水利工程中高边坡加固与治理措施[J].中国高新科技,2022(11):149-151.
- [3] 刘尚武.影响水利工程边坡稳定的因素及处理方法[J].内蒙古水利,2021(10):49-51.
- [4] 吴贵军.水利工程高边坡勘察设计质量控制措施[J].四川建材,2021,47(04):81-82.
- [5] 狄瑞.水利工程高边坡勘察设计质量控制管理[J].水利技术监督,2020(04):21-22,198.
- [6] 康佳辉.反倾高边坡破坏模式及稳定性影响因素分析[D].成都:西华大学,2020.