

高边坡支护技术在山区水利枢纽工程中的应用探析

金坤兵 王安亭

长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430000

摘 要: 为有效解决山区水利高边坡的失稳隐患,保障枢纽工程整体结构安全,各类高边坡支护技术被广泛应用于工程建设当中。本文以山区水利枢纽高边坡为研究对象,系统分析山区高边坡的工程特性、主要破坏形式及核心失稳影响因素,梳理边坡支护设计的基本原则与关键设计要点,明确支护方案选型标准及特殊工况下的优化策略。

关键词: 高边坡; 支护技术; 水利枢纽; 边坡失稳

引言

山区地形起伏大、地质构造复杂,搞水利工程必然要挖出大量人工高边坡。跟普通土建边坡比,山区水利高边坡不光要应对地质条件,还得同时扛住山地气候和库区水环境的多重影响,稳定控制难度更大,对支护设计、施工工艺和工况适配性都更挑剔。

1 山区水利枢纽高边坡工程特性及病害分析

1.1 山区水利枢纽高边坡工程特点

(1) 地质条件上,山区山体岩层结构复杂,岩土体性质差别大。风化岩层厚度不均匀,岩体破碎、节理裂隙发育,部分地段还夹着软弱夹层和破碎带。地层分布没有固定规律,软硬岩层交替出现,岩体的整体完整性和稳定性偏差。长期的地质构造运动在山体内部留了不少构造应力,开挖卸荷之后应力重新分布,岩土体的承载能力进一步被弱化,给边坡变形破坏提供了条件。(2) 水文环境是影响山区水利高边坡稳定的关键因素之一。工程区域挨着河道和库区,地表水径流丰富,降雨集中、雨量大,雨水不断冲刷坡面,还往岩体内部渗。地下水的渗透作用会持续软化软弱岩土体,降低抗剪强度,同时产生渗透压力,不断破坏边坡内部的结构平衡^[1]。库区蓄水和水位周期性涨落,又让边坡岩土体长期干湿交替,岩体风化和结构松散的问题进一步加剧。(3) 施工环境上,山区水利枢纽施工现场偏远,交通条件有限,大型施工设备进场和作业都受很大限制。施工场地窄小零散,没有足够的平整作业区域,搞不了规模化、标准化的施工。山区气候也不稳定,阴雨、大风这些恶劣天气不少,有效施工工期被压缩得厉害。复杂的现场环境,不光让边坡开挖和支护施工难度加大,对施工工艺、现场管控和作业安全也提出了更高的要求。

1.2 高边坡失稳破坏主要形式

(1) 滑坡,是高边坡最常见的失稳类型,多发生在土质边坡或者破碎的岩质边坡里。边坡内部的岩土体被渗水软化,加上应力不断调整,整体抗滑能力持续往下掉。下滑力超过岩土体自身的抗滑阻力之后,坡体就会沿着内部软弱结构面整体滑移。这种破坏形式发展相对慢,前期有一些变形征兆,一旦破坏,会形成规模比较大的滑动体,对水利边坡的整体结构稳定性造成持续性影响。(2) 崩塌,主要发生在岩体坚硬、坡面陡峭的高边坡区域。边坡表层的岩体长期风化、雨水侵蚀,裂隙慢慢扩张,岩体松动。在没什么明显滑移预兆的情况下,松动的岩体突然脱离母体,直接坠落、翻滚下来。这种破坏突发性极强,破坏速度快,很难提前判断,对坡面支护结构和下方的工程设施冲击很大。(3) 溜塌,多出现在土质松散、含水率高的边坡表层。山区下过雨之后,表层松散土体吸水饱和,土体结构快速溃散。土体不会整体滑动,而是以流动、溜动的形式顺着坡面慢慢坍塌下移^[2]。这种破坏集中在边坡浅层,单次规模不大,但容易反复发生,不断侵蚀坡面结构,让边坡破损越来越严重。(4) 倾覆破坏,一般发生在存在直立节理的岩质边坡里。柱状岩体受开挖卸荷、雨水渗入的影响,底部支撑结构逐渐弱化。岩体在自身重力和侧向应力的作用下,绕着底部支点转动倾倒。这类破坏整体性很强,一旦发生,局部边坡结构直接损毁,对水利边坡的运行安全威胁很大。

1.3 边坡失稳核心影响因素

(1) 降雨,是诱发边坡浅层破坏和整体失稳的重要外部因素。山区降雨持续时间不定,雨水直接冲刷裸露的边坡坡面,把表层松散土体带走。大量雨水持续往边坡内部渗,逐步填充岩体和土体的孔隙。这一来,

坡体自重增加了,原本的受力平衡状态被改变,岩土体的固结强度持续下降,边坡整体稳定性明显跟着往下走。(2)地下水动态变化对边坡稳定性的负面影响,长期存在,还不容易察觉。埋在边坡内部的地下水持续浸润周边的岩土体,不断软化软弱夹层,弱化岩土颗粒之间的粘结力。地下水流动的时候还产生持续的渗透作用,慢慢把土体内部的细小颗粒掏空,边坡内部结构逐渐变得疏松空洞。长期积累下来,边坡滑移和坍塌的问题就冒出来了。(3)工程开挖,是人为改变边坡稳定状态的关键因素。水利枢纽施工过程中山体开挖,直接破除原有山体的自然支撑结构,原始应力分布状态被改变。开挖形成的临空面让边坡岩体出现卸荷裂隙,裂隙随着时间的推移不断扩张延伸,山体长期形成的力学平衡被打破,边坡变形失稳的概率大幅提升。

2 山区水利枢纽高边坡支护的应用

2.1 工程设计基本原则

(1)安全性是边坡支护设计的核心底线,也是所有设计工作的首要前提。水利枢纽属于永久性重点水利工程,边坡支护结构需要长期抵御山体形变,雨水冲刷以及水位变动带来的各类外力作用。设计过程中需要充分考虑山区复杂地质条件下的边坡应力变化,预留充足的安全储备空间。设计工作需要规避各类潜在失稳风险,有效防范边坡滑移、崩塌等安全问题,保障水利枢纽主体结构稳定,同时为现场施工和后期运营管护提供可靠的安全保障。(2)适配性原则要求支护设计贴合山区水利边坡的真实工况。不同区域的边坡在岩土结构,坡度高差,水文条件上存在明显差异,不存在通用的支护设计方案。设计人员需要结合边坡实际地质特性和周边环境条件,匹配对应的支护形式与结构参数。充分适配山区施工条件和水利工程特殊的浸水工况,杜绝设计方案与现场实际脱节的问题,让支护结构可以最大程度发挥防护作用。(3)生态性是现代水利工程建设的重要准则,也是边坡设计的重要内容。传统刚性支护模式容易破坏山体原有植被和自然地貌,造成区域生态失衡^[3]。现阶段的支护设计会兼顾防护功能与生态修复需求,尽量减少对山体原生环境的破坏。通过优化结构形式,预留植被生长空间,逐步恢复边坡植被覆盖,实现边坡防护与山地自然生态的和谐统一。(4)经济性原则追求工程投入与使用效益的平衡最优。设计工作不能盲目堆砌施工材料和工艺,需要在满足安全、耐久、生态等核心要求的基础上,合理优化设计方案。科学控制施工成本,精简施工工序,避免资源浪费和过度建设。在保障工程质量的前提下,有效压缩建设投资和后期运维成

本,提升工程整体经济效益。

2.2 边坡勘察与稳定性验算要点

(1)边坡勘察,先得把场地基础地质条件摸清楚。覆盖层多厚、岩体风化到什么程度、内部裂隙发育情况怎么样,这些都得系统查明。山体内部的软弱夹层、破碎带分布范围和发育深度也要详细排查,把地层结构的分布规律弄明白。水利工程环境特殊,勘察还得重点检测区域地下水的埋藏深度、径流规律和渗透特性,明确地表水和地下水对边坡岩土体的影响程度,把边坡岩土体的物理力学参数全面收集到位,给稳定性验算提供真实可靠的数据支撑。(2)静态地质勘察之外,还得结合山区气候和水利工程运行特点搞动态勘察。区域降雨特征、库区水位涨跌幅度、地质构造运动痕迹,这些都要重点记录下来,综合分析各类外界因素对边坡结构的长期影响。边坡周边的地形变化和原始应力状态也要排查,精准定位边坡潜在的滑移面和薄弱区域,别因为勘察数据不全留下设计漏洞。(3)稳定性验算,是判定边坡安全状态、确定支护方案的关键环节。验算工作得贴合山区水利边坡的复杂工况来开展,依托勘察获取的岩土参数,结合边坡实际坡度、高差、岩土自重、地下水压力这些指标,综合计算边坡整体的抗滑稳定性和抗倾覆稳定性。(4)验算还得充分考虑各类不利工况的叠加影响,暴雨浸透、水位骤降、应力卸荷这些极端场景下的边坡受力状态都要模拟到,别只算单一工况导致结果偏差。严格遵循水利工程边坡设计规范,精准核算边坡安全系数,跟规范标准比对,判定边坡稳不稳定。稳定性不达标的,通过验算数据精准定位薄弱环节,给后续支护方案选型和结构参数优化提供精准的数据支撑,保证边坡支护设计科学合理。

2.3 支护方案选型依据

(1)地质条件,是支护方案选型最基础的核心依据,直接决定支护结构用什么形式、受力怎么布置。不同岩土体的结构强度、风化程度、裂隙发育状态,对支护体系的承载能力要求不一样^[4]。整体性好的完整岩体和松散破碎的风化土层,能适配的支护方式差别很大。边坡内部软弱结构面的分布情况,也会影响边坡的潜在破坏模式。选型过程得充分贴合地质特征,别因为支护形式不匹配引发坡体滑移和结构失效。(2)边坡高度,是定支护等级和结构规格的重要参考。低缓边坡整体自重应力小,形变风险相对低,常规轻型支护手段就能满足防护需求。高陡边坡应力分布层次更复杂,坡体自重荷载大,卸荷形变范围广,潜在的失稳规模也更大。不同高度的边坡,得合理区分支护强度和结构层级,高度

越高的,越需要搭配稳定性更强、受力性能更好的复合支护体系,防护可靠性才有保障。(3)水位影响,是水利边坡跟普通山体边坡不一样的地方。水利枢纽边坡长期挨着库区水体,持续受水体浸泡、水流冲刷和周期性水位涨落影响。浸水区域的岩土体强度不断衰减,土体松散程度持续加剧。选型过程得充分考虑干湿交替和渗透压力的负面作用,优先选抗冲刷、耐浸泡、防水性能好的支护形式,别让普通支护结构在水环境里快速老化破损,保证长期水环境下的支护稳定性。(4)现场施工条件是支护方案能不能落地的现实前提。山区施工场地普遍窄小,交通不便,大型机械设备的作业空间有限。山区气候条件也不稳定,有效施工工期比较紧。选型得贴合现场施工环境,既要考虑能不能做,也要考虑做起来顺不顺手,优先选工序合理、适合山地狭小作业场景的支护工艺。

2.4 水利工程特殊工况优化

(1)汛期水位涨落是水利边坡最典型的动态工况,也是边坡失稳的重要诱因。汛期库区水位会出现快速升降的变化,边坡岩土体内部孔隙水压力会随之频繁波动。水位快速下降时,边坡内部积水无法及时排出,会形成较大的渗透压力,容易带动土体颗粒流失,造成边坡内部结构松动^[5]。在工况优化过程中,需要重点强化坡面排水体系建设,改善水体渗透路径,缓解水位变动带来的渗透破坏,避免坡体出现渐进式变形损伤。(2)长期浸水工况会持续弱化边坡岩土与支护结构的整体性能。临水区域的边坡岩土体长期被水体包裹浸润,自身抗剪强度会逐步降低,土体粘结性能持续变差。普通支护材料长期浸水容易出现腐蚀、老化和强度衰减的问题。对应的优化工作需要侧重提升支护结构的防水抗浸能力,选用耐水稳定性更强的施工材料,优化结构整体防护性能,减少水体对支护体系和边坡岩土的持续侵蚀

作用。(3)高寒山区普遍存在的冻融环境,会对边坡支护结构造成反复性物理破坏。低温状态下,边坡岩土孔隙和支护结构缝隙中的水分会结冰膨胀,对周边结构产生挤压作用力。气温回升后冰层消融,结构内部会出现空隙和微裂隙。反复的冻融循环会不断扩大结构裂隙,造成表层脱落、结构松散等问题。工况优化需要充分考虑低温环境的破坏特性,提升结构抗冻性能,增强支护整体抗疲劳破坏的能力,保障边坡在四季温差变化下的结构稳定。

结语

综上所述,高边坡支护技术的合理选用和科学优化,直接关系到山区水利边坡的变形控制、失稳灾害防范和水利枢纽长期稳定运行。实际工程中,得把地质条件、边坡高度、水文特征、施工条件都考虑进去做针对性设计,同时做好特殊工况的专项优化,支护结构的防护效果和服役年限才能最大限度地提上去。

参考文献

- [1] 王天星.高边坡开挖与防护施工技术在水利枢纽工程中的应用[J/OL]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026,(5):033-036.
- [2] 陆佳,徐镇扬,花叶琦,等.高边坡开挖支护技术在水利水电工程中的应用研究[J]. 水上安全,2026,(1):43-45.
- [3] 周挺.高边坡支护技术在山地水利工程施工中的应用效果分析[J/OL]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026,(4):029-032.
- [4] 孙晓曼.水利枢纽工程中高边坡稳定与加固施工技术研究[J/OL]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026,(1):143-146.
- [5] 冉光利.高边坡锚固—喷射混凝土支护协同施工技术在水利溢洪道中的应用研究[J/OL]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026,(1):131-134.