

探讨水工高边坡支护结构选型及稳定性研究

顾滨 李欢

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i6.7026

[摘要] 水工高边坡的稳定与安全是大型水利水电工程建设及长期运行的生命线,而近年来我国水利事业迅猛发展,工程建设中所遇高边坡问题越来越复杂,坡高陡峻,因此对支护结构的科学选型及稳定性保障提出了新的、更高的要求。文章梳理了水工高边坡工程中常用的支护结构类型,讨论支护结构选型的三大经典方法:传统工程类比与经验分析法、基于力学计算的极限平衡及数值模拟法,以及现代多准则模糊决策理论法,引出选型决策从定性走向定量、从单一目标转向多目标综合权衡的发展趋势。为此提出设计理论优化与精细化分析、新材料新工艺集成应用、全生命周期智能化监测及动态调控核心策略。

[关键词] 水工高边坡; 支护结构; 结构选型; 稳定性分析; 预应力锚索

中图分类号: U213.1+3 **文献标识码:** A

Discussion on the selection and stability of supporting structure of hydraulic high slope

Bin Gu Huan Li

Northeast Water Resources Survey, Design and Research Co., Ltd.

[Abstract] The stability and safety of high hydraulic slopes are crucial for the construction and long-term operation of large-scale water conservancy and hydropower projects. In recent years, with the rapid development of China's water conservancy industry, the challenges posed by high slopes in engineering projects have become increasingly complex, characterized by greater slope heights and steeper gradients. This has led to new and higher requirements for the scientific selection of support structures and their stability assurance. This paper outlines the common types of support structures used in high hydraulic slope projects and discusses three classic methods for selecting support structures: traditional engineering analogy and empirical analysis, limit equilibrium and numerical simulation based on mechanical calculations, and modern multi-criteria fuzzy decision-making theories. It highlights the trend towards a shift from qualitative to quantitative decision-making and from single-objective to multi-objective comprehensive evaluation in support structure selection. To address these challenges, the paper proposes key strategies including optimized design theories and detailed analyses, integrated use of new materials and technologies, intelligent monitoring throughout the entire life cycle, and dynamic regulation mechanisms.

[Key words] High hydraulic slopes; Support structures; Structure selection; Stability analysis; Prestressed anchor cables

引言

进入“十四五”规划后期及“十五五”规划新阶段,我国正在有计划地推进一批重大水利水电工程建设,这是优化能源结构、实现“双碳”目标的重要举措,也符合构建现代化水网体系、保障国家长治久安的总体需要。因此,水利工程的规模、技术难度、工程复杂性都在提高,尤其是西部山区地形地质条件极为复杂,高大陡峭边坡的开挖及治理已成为工程建设中的核心技术难题。水工高边坡失稳将危及工程主体结构安全,易引发

滑坡、塌方等次生灾害,经济损失巨大,人民生命安全亦受到直接威胁。

虽然“十四五”规划及其它国家顶层设计文件,没有就水工高边坡支护技术作出专门论述,但是国家对基础设施建设质量、工程安全生产、绿色可持续发展的总体要求已然为该领域的发展指明了宏观方向。《水利水电工程边坡设计规范》(SL386-2007)等行业技术标准因此成为边坡工程设计的重要依据。但随着新理论、新技术的不断涌现和工程实践的深化,现有规范在应对极

端地质条件、考虑多场耦合效应等方面也显现出局限性,业界对规范的修订与完善呼声日高。文章重点梳理当前水工高边坡支护结构的主要类型,分析其选型方法论的演进,并探讨提升结构稳定性的前沿策略,以期对相关工程实践与技术发展提供理论参考。

1 水工高边坡支护结构类型

1.1 锚杆/锚索支护系统

锚杆及锚索支护属于典型的主动支护体系,其基本原理是把受拉杆体(锚杆或锚索)锚固于边坡内稳定岩土体之中,对坡体施加预应力或被动约束力,由此提高坡体的整体性及抗剪能力。因此,普通砂浆锚杆一般用于节理裂隙发育的岩质边坡或稳定性要求不高的土质边坡。而预应力锚索则能够提供强大的主动锚固力,通过张拉锁定后,能有效抑制边坡的变形和潜在滑移,将荷载传递至深部稳定地层,因此特别适用于高陡岩质边坡、大型滑坡体治理以及需要严格控制变形的永久性边坡工程。

1.2 挡土墙结构

挡土墙是经典的被动式支护结构,其根本原理是以墙体自重(重力式挡墙)或结构的抗弯、抗剪能力(悬臂式、扶壁式挡墙)来平衡墙后土体的侧向压力,因而能保证边坡稳定。重力式挡墙结构简单,施工方便,耐久性良好,适用于边坡高度不大、地基承载力较好的场合。悬臂式和扶壁式挡墙均为钢筋混凝土结构,通过巧妙设计截面形式,在减轻自重的同时最大限度地提高了抗倾覆、抗滑移能力,更宜于较高的边坡。在水利工程中,挡土墙常用于河道护岸、堤坝坡脚支护、引水渠边坡以及库区局部塌岸治理等场景,其主要作用是为坡脚提供有力的支撑,防止坡体整体滑动。

1.3 桩板墙与排桩支护

桩板墙或排桩支护是在边坡开挖线附近布置一排或数排密排桩(一般为钻孔灌注桩或预制桩),形成连续或半连续的地下挡土结构,用桩体本身的抗弯刚度及嵌固作用直接承担土压力、稳定边坡,桩体之间可采用挡土板连接(即桩板墙),也可不连接(即排桩)。为了提高承载能力,排桩结构常与锚索等其他支护形式合理结合,形成锚拉排桩墙。由于其刚度大、整体性好,又能深入稳定地层,此种支护形式适用于开挖深度大、地质条件软弱、地下水丰富或周边环境要求高的高边坡及深基坑工程。在水工建设中,船闸高边坡、坝肩开挖边坡等部位都极其适合采用排桩支护。

1.4 喷锚网联合支护

喷锚网联合支护是一种广泛应用于岩土边坡浅层加固和表面防护的复合支护体系。它通常由系统布置的砂浆锚杆、覆盖于坡面的钢筋网(或钢丝网)以及喷射混凝土面层三部分组成。其作用机理是:锚杆将松动的表层岩土体锚固于稳定基岩上;钢筋网将分散的锚杆连接成一个整体,并约束网格内的岩土体;喷射混凝土面层则封闭坡面,防止岩体风化、剥落和雨水入渗,同时将锚杆和钢筋网的作用整合起来,形成一个具有相当刚度和强度的薄壳结构。该技术具有施工快捷、机械化程度高、成本相

对低廉、能紧密贴合不规则坡面等优点,在水利工程的隧洞口边坡、坝肩开挖临时边坡以及风化岩石边坡的防护中应用极为普遍。

1.5 格构梁支护

格构梁支护是采用钢筋混凝土现浇或预制构件,在边坡表面形成一个相互连接的框架(格构)体系,用以约束坡面土体或碎裂岩体。格构内部可以回填土进行植被绿化,形成生态护坡。格构梁通常与锚杆或锚索联合使用,通过锚固作用将格构梁体系牢牢固定在坡体上,形成一个半刚性的整体护面结构。

2 水工高边坡支护结构选型方法

2.1 工程类比与经验分析法

工程类比与经验分析法是工程选型中最传统、基础的方法,即以设计工程师所掌握的专业知识、工程经验及类似地质条件、工程规模下已有的成功案例为基本依据,因此其决策过程本质上是定性的:工程师先对边坡高度、坡度、岩土体性质、结构面特征、地下水状态、工程重要性等级因素作分析,从常见支护结构库中选取若干可行的初步方案予以比选。具体而言,坚硬完整的岩质高边坡宜优先采用预应力锚索,松散土质边坡一般采用挡土墙或放坡处理。该方法的优点是直观、简便,对地质条件简单、工程经验充足的常规边坡项目,能快速、可靠地给出合理选型。但选型结果不可避免地带有强烈的主观色彩,高度依赖个人经验,故对于地质条件极其复杂、没有先例可循的新建重大工程,该方法所得结果的可靠性大打折扣,若运用不当还可能造成方案过于保守或埋藏安全隐患。

2.2 极限平衡与数值模拟法

这是一种基于岩土力学理论的定量分析方法,是现代边坡工程设计的核心。先建立力学模型,对各支护方案下的边坡稳定性做量化计算并据此选型。该方法主要包含两个层面:一是极限平衡法(LEM),如瑞典条分法、毕肖普法(Bishop)、简布法(Janbu)等,即先合理假设潜在滑动面的形状,再分析坡体处于极限平衡状态时的受力情况,然后求取安全系数,进而评判边坡稳定性。极限平衡法计算简单,物理概念清楚,在工程界已有极广的应用。第二是数值模拟方法,即有限元法(FEM)、离散元法(DEM)和有限差分法(FDM),结合MidasGTS、FLAC3D、3DEC等专业软件,数值模拟能建立精细化的二维或三维地质模型,考虑岩土体复杂的本构关系(弹塑性、应变软化)、地质结构面的影响、开挖及支护施工过程,以及渗流场与应力场的耦合作用,因此能呈现不同支护方案下边坡的应力分布、位移变形场、塑性区演化规律,也由此准确计算安全系数,合理预测边坡破坏模式及支护结构的内力响应。

2.3 多准则模糊决策理论法

由于工程项目对综合效益的追求不断提高,因此支护结构选型已经从单纯的技术安全问题发展为技术、经济、环境、社会诸种因素交织在一起的复杂决策问题,故而多准则决策理论很自然地成为解决此类问题的有力工具。具体而言,先系统、有层次地建立评价指标体系,把决策目标分解为安全性、经济性、

施工可行性、耐久性及环境影响诸种可量化的准则,再用层次分析法(AHP)或熵权法确定各评价指标的合理权重,客观反映各因素的相对重要性,继而用模糊综合评价、TOPSIS法或集对分析等数学方法对各支护方案进行量化评分、优劣排序,最终自然、妥帖地给出综合效益最优的推荐方案。

3 提升水工高边坡支护结构稳定性策略

3.1 设计理论优化与精细化分析

提升稳定性的首要策略是深化和优化设计理论,实现从传统保守的“安全系数”设计向基于性能和可靠度的精细化设计的转变。因此首先要超越简单的极限平衡分析,主动采用先进的数值模拟技术,建立能准确反映复杂地质结构、岩土体非线性特性及水-力耦合效应的三维精细化模型,对边坡从开挖、支护到长期运营全过程都进行动态仿真分析。厘清边坡内部应力路径的演化规律、潜在破坏机制以及支护结构与岩土体的协同作用机理,进而做到支护参数的精细化优化,避免设计不足或过度设计。在此基础上引入“动态设计”或“信息反馈设计”理念:在施工过程中根据现场实测的位移、应力等数据,调整后继续支护方案,让设计与工程实际高度契合,达到安全与经济的最佳平衡。

3.2 新材料、新工艺的集成应用

技术进步为提高支护结构性能提供物质基础,采用新材料、新工艺是提高稳定性的直接有效手段。具体而言,在材料上大力推广高强度、高韧性、耐腐蚀的新型锚固材料,如高强度精轧螺纹钢、环氧涂层钢绞线、玻璃纤维或碳纤维筋材(FRP),切实提高支护体系的承载能力及耐久性。同时,要研发并应用力学性能更优良的喷射混凝土、自密实混凝土及环保型注浆材料,让支护结构本身具备更高品质、更长寿命的特性。在工艺上要推行精细化爆破或静态破碎等低损伤开挖技术,最大限度地减少对坡体原岩的扰动,从源头保护边坡的自身稳定性。把生态工程技术(BET)集成进去,将传统的“灰色”工程支护与植被恢复等“绿色”措施有机结合:格构梁内植草、采用植被混凝土护坡,利用植物根系的固土、加筋作用,形成一个真正能自我修复、与环境互为补充、彼此促进的复合生态支护系统,能实现边坡长期、可靠、可持续的稳定。

3.3 全生命周期智能化监测与动态调控

传统人工、定期巡检的方式已经不能很好地满足现代高边坡安全管理的需要,建立一套覆盖全生命周期的智能化监测与预警系统是保障长期稳定性的关键策略。该策略的核心是以物联网、大数据、人工智能等现代信息技术为支撑,对边坡状态做

到实时、连续、自动化监测。在边坡关键部位布设高精度GPS、自动化全站仪(测量机器人)、光纤光栅传感器、地声监测设备、InSAR遥感等多种传感器,构建起“空-天-地”一体化的立体监测网络。各传感器所采集的海量数据实时传入云平台,再借助所建的数字孪生模型及智能分析算法,判断边坡变形趋势、内部应力状态、整体稳定性,从“被动响应”转向“主动预警”。该智能监测系统可与动态调控措施无缝衔接:当监测数据表明某预应力锚索应力有明显损失时,系统自动报警并直接给出应力补偿或加固的操作建议,因而能对支护体系性能做到精细化、前瞻性的动态维护。

4 结束语

水工高边坡的支护与稳定是现代水利水电工程建设中一项充满挑战性的系统工程。文章明确了当前主流的支护结构类型及其适用性,揭示了结构选型方法从经验化向科学化、系统化演进的清晰脉络。面对日益复杂的工程环境和更高的安全要求,单一的支护技术或选型方法已难以应对。未来的发展方向必然是走向一种综合性的解决方案:即在设计阶段,采用精细化的数值模拟与多准则决策理论相结合的方法,制定出技术最优、经济合理的支护方案;在施工与材料上,积极拥抱技术创新,集成应用高性能材料与低扰动工艺;在长期运维中,全面部署智能化监测预警系统,实现对边坡健康状态的全生命周期管理和动态调控。

[参考文献]

- [1]赵明.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].城市建设理论研究(电子版),2026,(05):199-201.
- [2]牟江亭,周长新,闫庆尧.土岩复合地层接触面倾角对边坡支护桩位移与稳定性的影响[J].四川水泥,2026,(02):68-70.
- [3]张芳丽.基于BIM的土木工程项目边坡支护施工体系优化措施[J].建材发展导向,2026,24(03):124-126.
- [4]董雪珍.基于边坡支护技术的水工环地质灾害治理要点分析[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(03):318-320.
- [5]欧阳斌峰,肖琦瑞.基于边坡支护技术的水工环地质灾害治理要点分析[J].农业灾害研究,2024,14(11):263-265.
- [6]骆连强,孙玉龙.浅议水工高危边坡支护方案的选定[J].河北水利,2013,(04):32.

作者简介:

顾滨(1983—),男,汉族,上海市浦东新区人,大学本科,职称:高级工程师,研究方向:水利(或水利水电)工程结构设计。