

简析水工高边坡支护结构选型及稳定性分析

赵胜泽

吉林省水利水电勘测设计研究院

DOI:10.32629/hwr.v10i7.7068

[摘要] 水工高边坡稳定性及支护结构选择是水利水电工程中一个重要的技术问题。文章总结了水工高边坡稳定性的常用分析方法有极限平衡法、有限元强度折减法及不同方法相互印证的综合分析法;介绍了锚杆(索)、抗滑桩、挡土墙、坡面防护等支护结构的应用场合及其选用原则。认为水工高边坡稳定性分析应该以极限平衡法为主,辅之以数值模拟的方法进行分析,支护结构的选择要考虑工程地质条件、水文条件、施工要求以及经济性等多个方面。

[关键词] 水工高边坡; 支护结构; 稳定性分析; 结构选型; 复合支护

中图分类号: U416.1+4 **文献标识码:** A

A brief analysis of the selection of support structures for high hydraulic slopes and their stability assessment

Shengze Zhao

Jilin Province Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute

[Abstract] The stability of high hydraulic slopes and the selection of support structures are important technical issues in water resources and hydropower projects. This article summarizes the common methods used for analyzing the stability of such slopes, including the limit equilibrium method, the finite element method with strength reduction, and a comprehensive analysis approach that combines various methods. It also describes the applications of support structures such as anchor rods/cables, anti-sliding piles, retaining walls, and slope protection systems, as well as the principles for selecting them. It is argued that the limit equilibrium method should be the primary tool for analyzing the stability of high hydraulic slopes, supplemented by numerical simulation techniques; when choosing support structures, various factors such as engineering geological conditions, hydrological conditions, construction requirements, and economic considerations must be taken into account.

[Key words] High hydraulic slopes; Support structures; Stability analysis; Structure selection; Composite support

引言

随着我国水利水电事业的发展,高坝大库建设越来越多,高边坡是影响工程建设速度以及工程安全的重要因素。所谓水工高边坡是在水利水电工程中开挖或者天然形成的较高并且对工程安全起重要作用的边坡,它的好坏决定着枢纽建筑物能否正常工作以及整个地区的人民生命财产是否受到威胁。

水工高边坡不同于一般工程边坡,其特点是高、陡、地质条件差,受水文条件影响较大。高边坡一般有裂隙发育、风化严重、卸荷剧烈等问题,这些问题都会对高边坡稳定造成很大影响。且水利工程边坡常常位于水库水位变化范围内,在水的作用下会使边坡更加不稳定。因此,对水工高边坡进行研究,根据实际情况采取有效的支护措施是非常必要的。

1 水工高边坡稳定性分析方法与技术路线

1.1 水工高边坡稳定性的影响因素

水工高边坡稳定受到诸多影响因素综合作用,主要有地质条件、水文条件、人为活动以及荷载作用等因素。

地质条件是影响高边坡稳定的基本因素。岩体中结构面的空间分布、规模、相互组合方式以及力学性质对边坡可能发生的垮塌形式和机理有着决定性作用。软弱结构面对高边坡安全产生不利影响,给水电站大坝带来隐患。

水文环境对水工高边坡稳定性起着重要作用,水利水电工程边坡往往受到水库水位波动以及降雨入渗的影响。渗流会造成岩土体内有效应力重新分布,减小其抗剪强度,工程扰动是造成水工高边坡失稳主要原因之一,在高边坡开挖时,由于岩体受到外力作用而发生应力重分布,使得岩体产生卸载回弹、岩体松弛、结构面张开等问题,降低高边坡的安全性;另外开挖后形成

的坡面有一定概率,成为局部结构面组合所构成的潜在不稳定楔形体。

1.2 稳定性分析的主要方法

1.2.1 极限平衡法

极限平衡法是目前边坡稳定分析中最常用的一种方法。它是建立在摩尔-库仑强度理论基础上,通过对边坡可能滑动面处所受力或者力矩进行分析求解得到边坡抗滑稳定安全系数。极限平衡法的基本原理是把滑动体分成若干部分,然后对每一块求出其下滑力以及抗滑力,最后得到整个边坡的安全系数。

极限平衡法最大的优点是概念明确、简单易懂、具有丰富的实践经验并且已被相关规范所采用,《水利水电工程边坡设计规范》(SL386-2007)中要求对不同工况或荷载效应组合下的边坡进行稳定性分析时应采取极限平衡法。同时,根据不同类别的边坡还给出了各自的抗滑稳定安全系数。

1.2.2 有限元强度折减法

有限元强度折减法是將强度折减技术与有限元数值方法结合而提出的一种边坡稳定性分析方法,在有限元计算过程中不断降低岩土体抗剪强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ)直到边坡发生极限破坏时,所对应的折减比便是边坡安全系数。

相比于极限平衡法,有限元强度折减法有以下优点:一是在计算中不需要事先给出滑动面的位置及其形状,边坡破坏是随着计算过程自动产生的;二是可以考虑岩土体的真实应力-应变关系、变形协调条件及各种复杂边界条件;三是可以得到边坡位移场、应力场和塑性区的情况,对分析边坡破坏原因很有帮助。

1.2.3 多种方法相互印证的综合分析策略

由于水工高边坡的重要性以及其本身的复杂性,在对边坡进行稳定性分析时,仅采用一种方法是很难做到全面、准确地评估边坡稳定性的,所以采用多种方法相互验证的综合分析方法是目前大多数学者所认同的一种方法。

综合分析一般思路为:首先进行充分的工程地质勘察,了解边坡岩体结构、软弱结构面位置以及地下水等情况;其次利用极限平衡法对边坡进行多个切面的整体稳定性分析,得到一个大致安全系数;在此基础上通过有限元强度折减法等数值分析手段进一步详细地研究边坡位移、应力及破坏机理等问题;最后将这两种方法所得结果相互印证,最终确定边坡是否安全。

1.3 稳定性评价标准

水工高边坡稳定性的主要判据为抗滑稳定安全系数,在《水利水电工程边坡设计规范》(SL386-2007)中要求对边坡稳定安全系数按边坡等级及使用情况考虑。该规范将边坡分为若干种类,不同类型边坡对应的稳定安全系数不同,对于非常大尺寸的边坡或是非常重要或者地质条件极其复杂情况下所遇到的问题,则需进行专门的研究与讨论才能得出结论。

在实际工程中,不同工况的安全系数有不同的规定,在正常工作状态下,对安全系数的要求较高,在短时间内的工况(例如施工期或地震工况等)下,可以降低一些安全系数的要求。

2 水工高边坡支护结构选型策略

2.1 支护结构选型的基本原则

水工高边坡支护结构选型是一个复杂问题,在此过程中应考虑以下几个方面。

安全性是第一位。支护结构要能够有效防止或减缓边坡变形发展、增强边坡稳定性,在不同工况下均能满足设计标准所规定安全度要求。安全性还体现在选择方案要有足够的理论基础及工程实践支持上。

适应性原则是指支护结构选型依据边坡地形地貌、地质条件、水文环境等因素。不同地质条件下不同类型的边坡,如岩质边坡、土质边坡、硬岩边坡、软岩边坡、干燥边坡、涉水边坡等,对支护的要求是不同的。

经济性原则是在满足安全的基础上,尽可能减少投资。支护结构的选择应有多方案的技术经济比较,在分析各种材料价格、施工费用以及养护费用等基础上选择最优方案。

2.2 主要支护结构类型及其适用条件

水工高边坡支护结构种类繁多,可按支护机理、支护结构形式等进行划分,下面针对几种较为常见的支护结构及适用范围进行阐述。

2.2.1 锚杆与预应力锚索

锚杆以及预应力锚索是水工高边坡支护中最常用的支护类型。锚杆(索)是利用拉力把荷载传至边坡较远位置稳固岩石上的装置,从而稳定边坡上部不稳固岩石。

非预应力锚杆(全长粘结型锚杆)适用变形较小各种边坡,它起着把表层不稳定岩石块体固定到较深稳定岩石上起作用,使整个边坡成为一个整体,在水利水电工程中,锚杆直径及间距选择应结合边坡形状、岩体中软弱结构面位置以及可能滑动面深度来考虑,如前坪水库溢洪道高边坡就使用10m长锚杆 $\Phi 25\text{mm}$ @3×3m对边坡进行加固处理。

预应力锚索适用范围较广,尤其是对一些需尽快稳定边坡的情况较为有利,如高陡岩质边坡以及有较大位移风险边坡等。预应力锚索是通过施加预应力使边坡获得一种抵抗滑动力,起到控制边坡变形的目的。其长度一般可超过80m,在水力发电工程中使用较多。锚固段应在中风化或微风化岩石内,以便达到良好的锚固效果。在乐昌峡水利枢纽工程中,根据各个不同边坡台级采取相应锚固方式,形成分级锚固支护结构。

2.2.2 抗滑桩

抗滑桩是防止边坡滑坡以及深层滑移的有效支挡结构。抗滑桩是通过将桩体埋置于滑动面以下的稳固岩土层中,依靠桩身本身所具有的抗弯、抗剪作用来平衡滑坡推力而起到加固边坡的作用。

抗滑桩截面应有足够的抗弯刚度,一般采用矩形或圆形,截面尺寸一般在1.5~4.0m之间;桩深根据场地情况而定,要求有1/3~1/4桩长嵌入稳定地层中并且至少有2m进入相对较硬岩石中;桩距、桩径及锚固长度等因素都会对支护起到很大作用。

抗滑桩适用于滑动面位置明确、滑坡推力大边坡治理工程,

在厚层滑坡或者深层潜在滑动面情况下,抗滑桩是较有效方法。在水利水电工程中,抗滑桩一般与其它防护措施(如锚杆、挡墙等)结合使用,构成综合防护系统。

2.2.3挡土墙

挡土墙是传统边坡支挡结构,主要有重力式挡墙、悬臂式挡墙、扶壁式挡墙以及加筋土挡墙等几种形式,不同挡土墙受力特点及变形控制均有所不同。

重力式挡墙以自身重量抵抗土压力,构造简单、施工容易,但是对地基承载力的要求较高,对于地基变形要求严格的边坡、开挖土石方危及边坡稳定性的边坡,不能使用重力式挡墙。

悬臂式及扶壁式挡墙是钢筋混凝土轻型挡墙,适用于地基承载力低、墙较高时采用;加筋土挡墙有良好变形能力、安全性好、支护结构位移和土体位移均较小,在适当情况下经济合理。

挡土墙在水利工程边坡防护中使用频繁,在水工高边坡加固中一般与其他支护方式配合使用而不会单独进行边坡支护工作。

2.2.4坡面防护

坡面防护主要有喷射混凝土、挂网喷混凝土、框格梁护坡、生态防护等。坡面防护主要是为了防止坡面岩土体风化、剥落以及雨水冲刷造成的浅表层破坏。

喷射混凝土以及挂网喷混凝土用于岩质边坡坡面防护,可以及时对坡面进行覆盖,避免岩体继续风化以及卸荷松弛。框格梁护坡(一般与锚杆或者锚索相结合)用于中低程度岩质或者土质边坡上,具有良好的坡面防护效果同时又有一定支挡能力。生态防护(例如客土喷播、植被护坡等)除了具备防护作用以外还考虑环保及美观的需求,在近年来得到越来越多重视并被广泛应用于水利工程建设中。

2.2.5排水与防渗措施

排水与防渗是水工高边坡支护结构必不可少的一部分内容。地下水渗流也是造成边坡失稳的原因,良好的排水可以有效保证边坡稳定。

坡面排水设施有截水沟、排水沟等地面排水设施,用于拦截和疏导坡面径流;坡体内排水设施有排水孔、排水隧洞、软式透水管等,用于降低坡体内地下水位以及孔隙水压力;防渗措施有坡面封闭、帷幕灌浆等,用于阻止地表水下渗。

2.3选型的影响因素分析

水工高边坡支护结构选型需要综合考虑多方面因素。

2.3.1地质条件

岩质边坡和土质边坡、硬岩和软岩、块状结构和层状结构等地质条件不同其防护要求也完全不同。对于受软弱结构面影响的边坡,需要采取预应力锚索等主动防护措施;而对于碎裂岩体边坡,则一般需要采取系统锚杆及喷混凝土联合防护方式。

2.3.2边坡高度与坡度

边坡高度以及坡度对支护结构受力大小及类型起决定作

用。超高边坡(高 $>100\text{m}$)一般需分层支护、分区处理,各层之间可有不同的支护方式。陡坡(坡比 $>1:1$)一般需较强的支挡。

2.3.3水文环境

水文条件是水工高边坡不同于一般边坡的重要方面,在处于水库水位涨落范围内的边坡,应充分考虑由于水位上升下降所造成渗流,对岩石产生软化的影响问题,排水对于这类边坡至关重要。

2.3.4工程重要性等级

确定了安全标准以及支护强度。依据《水利水电工程边坡设计规范》的不同等级边坡有不同的安全系数的要求,决定支护工程的大小及其成本高低。

2.3.5施工条件

施工条件是施工场地、施工设备以及施工季节等。高边坡施工一般受地形影响较大,大型机械设备不易进入现场,要对支护方案施工可行性进行分析。

研究从稳定性分析方法以及支护结构选型这两方面对这一问题进行详细阐述,得出如下几点结论。

第一,在进行水工高边坡稳定性研究时,应采用极限平衡法和有限元强度折减法相结合的方法进行分析。极限平衡法简单直观、便于操作,为现行设计规范所推荐一般性方法;有限元强度折减法能较好地反映岩土体应力—应变关系,对于复杂情况具有更好适用性。两者结合使用可得到更准确合理结论。

第二,水工高边坡支护结构选型要以安全可靠、适用合理、经济节约、便于施工以及动态设计为原则,在此基础上结合实际情况进行分析研究,提出多个备选方案再对比选择最优解。

3 结束语

随着我国水利水电工程建设规模越来越大、越来越复杂,在水工高边坡治理过程中所遇到的情况也会越来越复杂多变。今后需要加大对高边坡失稳机理的研究力度,开发更为准确的评价手段以及更为有效的防护措施,推广智能化监控预报技术的应用,以保障水利工程的安全运行。

【参考文献】

- [1]康赞,由利萍.水利工程边坡支护结构参数选取及稳定性分析[J].水利科技与经济,2026,32(5):83-89.
- [2]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(3):318-320.
- [3]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.
- [4]廖良健.煤系土边坡新型排水锚杆支护结构研发及其边坡稳定性研究[D].南昌工程学院,2024.
- [5]王慧敏,付珍珍,范鹏震,等.基于强度折减法的河岸边坡稳定性分析[J].低温建筑技术,2024,46(5):108-111.

作者简介:

赵胜泽(1999--),男,汉族,吉林省吉林市人,硕士研究生,助理工程师,水工结构。