

影响水利工程边坡稳定的因素及处理措施

李旭耀 殷少飞

湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司 湖北 武汉 430070

摘要：水利工程边坡稳定至关重要，本文剖析多类影响因素，地质方面包括岩土体性质与构造，水文涵盖地下水与降雨地表水，工程涉及设计施工，环境有地震与风化作用，人为包含加载卸载与植被破坏。针对这些影响因素，结合计算模型判断，提出处理措施，如挡土墙、抗滑桩、锚杆锚索及排水辅助措施等加固技术，还有监测预警及工程管理维护举措，旨在为水利工程边坡稳定保障提供全面理论与实践参考，促进水利工程安全高效运行。

关键词：影响水利工程；边坡稳定；因素；处理措施

引言：水利工程在水资源利用等多方面意义非凡，而边坡稳定是其关键环节。近年来，水利工程建设规模扩大，边坡失稳事故却时有发生，引发工程失效、人员伤亡与环境破坏等严重后果。国内外学者虽在边坡稳定性研究有诸多成果，但仍有不足。本研究采用文献调研、实地考察等方法，深入探究影响边坡稳定因素并提出处理措施，为水利工程边坡稳定研究与实践提供助力。

1 边坡在水利工程中的重要性

水利工程中的边坡作为整个工程结构的重要组成部分，其稳定性直接关系到水利设施的正常运行以及周边人员和财产的安全。据相关统计，在水利水电工程建设中，坍塌事故是常见的重大安全事故类型之一，而边坡失稳导致的坍塌事故在水利工程安全生产事故中的占比约为[20%-30%]左右。一旦边坡发生失稳现象，可能引发山体滑坡、坍塌等地质灾害，不仅会对水利工程建筑物本身造成严重破坏，如大坝、渠道等设施的损坏，导致水利功能丧失，还可能威胁到下游居民的生命和财产安全，引发洪水泛滥等次生灾害，造成巨大的经济损失和社会影响。因此，确保边坡在水利工程中的稳定性是工程建设与运营过程中的关键环节^[1]。

2 影响水利工程边坡稳定的因素

2.1 地质因素

2.1.1 岩土体性质

土体方面，颗粒大小、形状与级配决定其孔隙结构，进而影响渗透性与抗剪强度。粘性土的粘聚力是维持边坡稳定的重要因素，而砂土的内摩擦角则起关键作用。含水量增加会使土体变软，抗剪强度降低。对于岩体，岩石种类不同，强度差异大，如花岗岩强度高，页岩则相对较低。节理裂隙发育程度影响岩体完整性，裂隙多则易风化、渗水，降低岩体强度与稳定性，使边坡更易发生滑动、崩塌等破坏。

2.1.2 地质构造

褶皱构造使岩层弯曲变形，在褶皱轴部岩石破碎、应力集中，边坡开挖后易失稳。断层破坏了岩体的连续性和完整性，断层带附近岩石破碎、强度低，且常伴有地下水活动，极大地削弱了边坡的稳定性。节理裂隙的存在为地下水运移提供通道，增加岩体的透水性，同时在风化作用下，裂隙不断扩展，使岩体逐渐解体，降低其抗滑能力，在重力与其他外力作用下，边坡沿节理面滑动的可能性增大。

2.2 水文因素

2.2.1 地下水作用

地下水对水利工程边坡稳定有着复杂而关键的影响。其水位变化会改变边坡岩土体所受的应力状态，水位上升时，岩土体受到的浮托力增大，有效应力减小，抗剪强度随之降低。同时，地下水的渗流会在岩土体中产生渗透压力，当渗透压力方向与重力方向一致时，会增大边坡下滑力。而且，地下水可能携带一些化学成分，对岩土体产生溶蚀、软化等化学作用，长期作用下会使岩土体结构变得疏松，强度大幅下降，严重削弱边坡的稳定性，增加滑坡、坍塌等地质灾害发生的风险。

2.2.2 降雨与地表水冲刷

降雨过程中，雨水入渗会使边坡土体含水量增加，一方面导致土体自重增大，下滑力增加；另一方面，水的润滑作用会降低土体颗粒间的内摩擦力和粘聚力，从而降低土体抗剪强度。强降雨或长时间降雨时，这种影响更为显著，易引发边坡失稳。地表水在坡面上形成径流，会产生冲刷力，不断侵蚀坡面土体，带走细小颗粒，使坡面逐渐变得凹凸不平，破坏坡面土体结构完整性，降低其抗滑能力，严重时甚至会形成冲沟，加剧边坡失稳的可能性，甚至引发泥石流等灾害。

2.3 工程因素

2.3.1 工程设计不合理

工程设计不合理是导致水利工程边坡不稳定的重要诱因。若边坡坡度设计过陡,岩土体的下滑力会显著增大,超出其抗滑极限,极易引发边坡失稳。排水系统设计欠缺考虑,如排水管道管径过小、布局不合理或缺乏有效的截水沟、排水沟等,会使地下水和地表水无法及时排出,导致边坡长期处于饱水状态,岩土体抗剪强度大幅降低。防护结构设计失误,例如挡土墙高度、厚度不足,护坡形式与边坡实际情况不匹配,不能有效抵挡岩土体的下滑力,无法为边坡提供足够的支撑与防护,从而增加了边坡失稳的风险,威胁水利工程整体安全。

2.3.2 施工质量与方法不当

在施工中,若爆破施工未精准控制炸药用量和爆破方式,会强烈扰动边坡岩土体,破坏其原有结构,使岩体破碎、土体松散,抗滑能力急剧下降。开挖顺序不合理,如无序地大面积开挖,造成边坡临空面过大且暴露时间过长,在重力和其他外力作用下,边坡极易失稳。填方工程里,填土压实度未达标准要求,填土土体疏松,孔隙率大,在后续使用过程中会因自重固结产生较大沉降变形,引发边坡滑动。

2.4 环境因素

2.4.1 地震作用

地震发生时,地震波迅速传播,使边坡岩土体承受强烈的惯性力,打破原有的力学平衡状态,促使边坡产生振动和位移,地震引发的地震动水压力作用于饱水的岩土体,增加了下滑力;地震动土压力也会改变岩土体的应力分布,导致局部应力集中。这些力的综合作用可能引发边坡的滑坡、崩塌等灾害,尤其对于高陡边坡和地质条件复杂的区域,地震可能瞬间破坏边坡结构,对水利设施造成严重损害,甚至引发连锁反应,威胁周边区域的安全与稳定,导致巨大的经济损失和人员伤亡^[2]。

$$\text{公式: 安全系数 } F_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\theta_i}} \left(\frac{C_{il} \cos \theta_i + W_i \sin \theta_i}{W_i \cos \theta_i + \frac{1}{F_s} \sum_{j=1}^{i-1} W_j \sin(\theta_j - \theta_i)} \right)}, \text{ 其中 } m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \varphi_i}{F_s}.$$

3.2 数值算法

3.2.1 有限元法 (FEM)

简单原理:把边坡想象成由很多小的单元组成的。就好像用很多小积木拼成了一个边坡的形状。每个小单元都有自己的特性,比如它能承受多大的力才会变形。然后通过计算机模拟计算,分析在各种力(比如土的自重、水压力等)的共同作用下,这些小单元会怎么变形,整个边坡的应力和变形情况是怎样的,从而判断边

2.4.2 风化作用

风化作用是影响水利工程边坡稳定的长期因素,物理风化过程中,昼夜温差、冻融循环等使岩石反复胀缩,产生裂隙并逐渐扩大,导致岩石破碎、剥落,降低岩体的完整性和强度。化学风化则是岩石中的矿物与水、氧气、二氧化碳等发生化学反应,形成新的矿物,改变岩石的化学成分和结构,使其变软、变疏松,例如石灰岩的溶蚀现象。生物风化方面,植物根系生长在岩石裂隙中,随着根系生长加粗,对岩石产生挤压,加速岩石的破裂,微生物活动也会对岩土体产生一定的分解作用。

3 水利工程边坡稳定计算模型

3.1 极限平衡法

3.1.1 瑞典条分法

简单原理:把边坡土体分成很多垂直的小土条,就像把一个大蛋糕切成很多小条一样。然后只看每个小土条自己的重量(下滑力),还有它和下面接触的地方(滑动面)能产生的摩擦力和粘聚力(抗滑力)。把所有小土条的下滑力加起来,抗滑力也加起来,用抗滑力的总和除以下滑力的总和,得到的就是安全系数。如果安全系数大于1,就说明边坡比较稳定。

$$\text{公式: } F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{il} + \tan \varphi_i W_i \cos \theta_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \text{ 安全系数。这里}$$

是 c_i 土条滑动面上的粘聚力(可以理解为土颗粒之间粘在一起的力量), l_i 是滑动面长度, φ_i 是内摩擦角(土颗粒之间摩擦的一个角度相关的参数), W_i 是土条重量, θ_i 是滑动面和水平面的夹角, n 是土条的数量。

3.1.2 毕肖普条分法

简单原理:和瑞典条分法有点像,也是把边坡分成小土条。但是它考虑了土条之间的相互挤压的力,这样更符合实际情况。它通过更复杂的计算来求安全系数。

坡是不是稳定。

3.2.2 离散元法 (DEM)

简单原理:把边坡看成是由好多小颗粒组成的。这些小颗粒就像沙子一样。小颗粒之间会互相接触、碰撞、摩擦。通过计算机模拟这些小颗粒在重力、外力等作用下的运动情况,来看看边坡会不会塌,也就是判断它的稳定性。比如,如果小颗粒开始大量地往下滑,那就说明边坡不稳定了^[3]。

4 水利工程边坡稳定的处理措施

4.1 边坡加固技术及辅助措施

4.1.1 挡土墙

挡土墙是常用的边坡加固结构,重力式挡土墙依靠自身重力维持稳定,材料多为混凝土或石块,适用于高度较低、地基较好的边坡。悬臂式挡土墙由立壁、墙趾板和墙踵板组成,利用墙身自重和踵板上的填土重抵抗土压力,能在较狭窄空间使用。扶壁式挡土墙则在悬臂式基础上增设扶壁,增强墙体刚度与稳定性,适用于较高较陡边坡。设计挡土墙时,需精准计算土压力,确定合理的墙身尺寸、基础埋深等参数,确保其能有效抵挡边坡土体的下滑力,保障边坡安全。

4.1.2 抗滑桩

抗滑桩是深入边坡稳定地层的桩体结构。其通过桩身与周围岩土体的相互作用,将边坡下滑力传递至稳定地层,从而稳定边坡。桩径、桩长和桩间距依据边坡地质条件、下滑力大小等确定。在软岩或土层中,常采用钻孔灌注桩;在硬岩中,可采用人工挖孔桩。抗滑桩施工时,需确保桩孔垂直,钢筋笼安装准确,混凝土浇筑质量可靠。它具有施工相对简便、对边坡扰动小、加固效果明显等优点,能有效控制边坡的大变形滑动,在处理大型滑坡和高陡边坡不稳定问题中应用广泛。

4.1.3 锚杆与锚索支护

锚杆一端锚固在稳定岩体中,另一端与边坡岩土体相连,通过摩擦力和粘结力限制岩土体变形与滑动。锚索则由高强钢丝或钢绞线制成,能施加更大预应力。其工作原理是主动提供锚固力,提高岩土体的抗滑和抗拉能力,增强边坡整体稳定性。在设计时,要根据岩土体性质确定锚固长度、预应力大小和间距等参数。施工时,需保证钻孔质量、锚杆锚索安装精度以及预应力施加准确,广泛应用于各类岩质和土质边坡加固,有效提高边坡的自稳能力,防止浅层和深层滑动破坏^[4]。

4.1.4 排水措施

水利工程中,地表排水方面,其原理是迅速排除雨水等地表水,阻止其软化岩土体及增加孔隙水压力,以保障边坡稳定。设施布置上,一般在坡顶外一定距离设截水沟拦截水流,坡面或坡脚设排水沟将水导向安全处。如某山区工程,坡顶截水沟深0.5米、宽0.4米,坡面排水沟间距5米,有效防冲刷。地下排水则是为降低地下水位,减少对边坡稳定的威胁。通过排水孔、廊道等措

施,依据岩土体渗透系数等精准确定孔间距、深度和孔径。像某水利枢纽岩质边坡,按勘察数据设间距3米、深20米的排水孔,降低水位,增强了边坡稳定性。

4.2 边坡监测与预警

4.2.1 监测内容与方法

边坡监测内容涵盖多方面物理量。位移监测包括水平与垂直位移,可通过全站仪、GPS等设备精准测量,反映边坡整体移动趋势。沉降监测利用水准仪测定特定点高程变化,了解土体压实或地基沉降情况。倾斜监测借助测斜仪掌握边坡倾斜程度与方向变化。地下水位监测依靠水位计,明确其波动对边坡稳定性的影响。

4.2.2 预警指标与系统建立

预警指标是判断边坡稳定性的关键依据。位移速率超过一定数值,如连续多日位移速率加速且达到警戒值,表明边坡可能失稳。位移累计量过大,突破预设阈值,也预示危险。地下水位变化速率异常,短时间内大幅上升或下降,影响岩土体应力状态,同样是预警信号。预警系统基于监测数据构建,通过数据采集模块收集各监测点信息,经传输网络送至数据处理中心。

结束语

在水利工程领域,边坡稳定是关乎工程安全与效益的核心要素。通过对影响边坡稳定的地质、水文、工程、环境和人为等多方面因素深入剖析,我们明晰了问题的复杂性与多样性。相应地,一系列处理措施如加固技术、监测预警及计算模型等应运而生。然而,随着水利工程建设持续推进与环境变化的不确定性,边坡稳定研究仍任重道远。未来需不断探索创新,综合多学科知识与先进技术,进一步提升边坡稳定性保障水平,为水利工程的可持续发展筑牢根基。

参考文献

- [1]杜艳军.影响水利工程边坡稳定的因素及处理措施分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024,73(9):265-268.
- [2]李春辉,刘天鹏,水利工程边坡稳定性评估与加固技术研究[J].水利学报,2024,55(3):287-294.
- [3]姜龙,孙建会,王万顺,智能监测技术在水利工程边坡稳定性管理中的应用[J].土木工程学报,2024,57(4):102-108.
- [4]孙友良,气候变化对水利工程边坡稳定性的影响研究[J].环境科学与技术,2024,47(6):123-129.