

水利工程地质灾害防治与风险评估

杨新爱

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 河北 石家庄 050085

摘要：水利工程建设对于国家的经济发展和社会稳定具有举足轻重的意义，但问题是，在工程建设及运营过程中，地质灾害成为了不容忽视的重大威胁。基于此，本文深入剖析了水利工程中常见的地质灾害类型，如滑坡、泥石流等，并详细阐述了这些地质灾害的形成机制和影响因素。针对水利工程地质灾害风险评估，综合运用层次分析法、模糊综合评价法等多种方法，构建了科学、系统的风险评估指标体系，以实现地质灾害风险的准确评估。同时，从工程措施和非工程措施两个维度出发，提出了一系列切实可行的防治措施，旨在有效降低地质灾害对水利工程的危害，保障水利工程的安全稳定运行，为水利事业的可持续发展提供坚实的理论支持和实践指导。

关键词：水利工程；地质灾害防治；风险评估

引言：水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，在水资源调配、防洪、灌溉、发电等方面发挥着关键作用。但与此同时，水利工程的建设和运营往往会对地质环境产生显著影响，增加地质灾害发生的风险。地质灾害一旦发生，不仅会对水利工程设施造成严重破坏，影响工程效益的发挥，还可能威胁到周边地区居民的生命财产安全，对生态环境造成长期的负面影响。因此，深入研究水利工程地质灾害的防治与风险评估，对于保障水利工程的安全稳定运行、促进经济社会的可持续发展具有重要的现实意义。

1 水利工程地质灾害类型及形成机制

1.1 常见地质灾害类型

1.1.1 滑坡

滑坡是水利工程中较为常见的地质灾害之一，指斜坡上的岩土体在重力作用下，沿着一定的软弱面或软弱带，整体地或分散地顺坡向下滑动的自然现象。在水利工程建设区域，尤其是水库周边、大坝边坡等位置，由于工程活动改变了原有地形地貌和岩土体的应力状态，加之降雨、地下水活动等因素的影响，滑坡发生的概率相对较高。

1.1.2 泥石流

泥石流是一种含有大量泥沙、石块等固体物质的特殊洪流，具有突发性强、破坏力大的特点。水利工程多建于山区，山区地形起伏大，岩石破碎，且在暴雨等极端天气条件下，大量松散固体物质与水流混合，极易形成泥石流^[1]。泥石流不只是会冲毁水利工程设施，如渠道、桥梁等，还可能掩埋下游农田、村庄，造成严重的生命与财产损失。

1.1.3 崩塌

崩塌是指陡峻山坡上的岩土体在重力作用下，突然脱离母体，发生倾倒、崩落的现象。对于水利工程而言，开挖边坡、水库蓄水导致库岸水位变化等因素，都可能使岩土体的稳定性降低，引发崩塌。崩塌落石可能直接砸毁工程设施，堵塞河道，对水利工程安全运行构成威胁。

1.1.4 岩溶塌陷

岩溶塌陷是指在岩溶地区，由于地下溶洞或土洞的顶板因自然或人为因素失去平衡而产生的塌陷现象。水利工程建设中，如果工程区域存在岩溶发育，水库蓄水后，水压变化、地下水动力条件改变等可能导致岩溶塌陷的发生。另一方面，岩溶塌陷会破坏工程基础，影响工程的正常使用。

1.2 地质灾害形成机制分析

1.2.1 地形地貌因素

水利工程建设区域的地形地貌对地质灾害的发生具有重要影响。山区地形起伏大，坡度陡，岩土体在重力作用下稳定性较差，容易发生滑坡、崩塌等地质灾害。除此之外，地形的汇水条件也会影响泥石流的形成，在地形低洼、沟谷发育的地区，一旦遭遇强降雨，水流迅速汇聚，容易携带大量泥沙、石块形成泥石流。

1.2.2 岩土体性质

岩土体的物理力学性质是决定地质灾害发生与否的关键因素之一。如，岩石的硬度、完整性、抗风化能力等都会影响其稳定性。软弱岩石或破碎岩石在受到外力作用时，更容易发生变形和破坏。土体的颗粒组成、含水量、抗剪强度等性质也对滑坡、泥石流等地质灾害的形成有重要影响。

1.2.3 水文地质条件

水文地质条件在水利工程地质灾害形成过程中起着重要作用。地下水的存在会彻底改变岩土体的物理力学性质,增加岩土体的重量,降低其抗剪强度。水库蓄水后,地下水位上升,使库岸岩土体处于饱水状态,有效应力减小,稳定性降低,容易引发滑坡、崩塌等地质灾害。更糟糕的是,地下水的渗流作用还可能导致岩土体的潜蚀、管涌等现象,进一步破坏岩土体的结构,增加地质灾害发生的可能性。

1.2.4 工程活动影响

水利工程建设和运营过程中的各种活动,如大坝施工、渠道开挖、水库蓄水等,都会对地质环境产生影响,从而增加地质灾害发生的风险^[2]。大坝施工过程中,开挖边坡会改变岩土体的原始应力状态,形成新的临空面,如果支护措施不当,容易引发滑坡、崩塌。水库蓄水后,水位的周期性变化会对库岸产生浸泡、冲刷等作用,导致库岸岩土体的稳定性下降。此外,工程爆破、机械振动等活动也可能对周边岩土体造成扰动,降低其稳定性。

2 水利工程地质灾害风险评估方法

2.1 风险评估指标体系构建

2.1.1 选取评估指标的原则

构建水利工程地质灾害风险评估指标体系时,应遵循科学性、系统性、代表性、可操作性等原则。其中,科学性原则要求指标体系能够准确反映地质灾害风险的本质特征和内在规律;系统性原则要求指标体系涵盖影响地质灾害风险的各个方面因素,形成一个有机的整体;代表性原则要求选取的指标能够突出对地质灾害风险有重要影响的关键因素;而可操作性原则要求指标数据易于获取和计算,便于在实际工程中应用。

2.1.2 具体评估指标

根据水利工程地质灾害的形成机制和影响因素,选取以下主要评估指标:地形坡度、岩土体类型、地下水水位变化、地震动峰值加速度、工程开挖深度、水库水位变幅等。第一,地形坡度反映了岩土体在重力作用下的稳定性。第二,岩土体类型决定了岩土体的物理力学性质。第三,地下水水位变化和水库水位变幅会影响岩土体的含水量和有效应力。第四,地震动峰值加速度考虑了地震对地质灾害的诱发作用。第五,工程开挖深度则体现了工程活动对地质环境的扰动程度。

2.2 常用风险评估方法

2.2.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是一种将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行

定性和定量分析的决策方法。在水利工程地质灾害风险评估中,首先将地质灾害风险评估问题分解为目标层(地质灾害风险评估)、准则层(如地形地貌、岩土体性质、水文地质条件、工程活动等影响因素)和指标层(具体评估指标)。然后通过专家打分等方式确定各层次元素之间的相对重要性权重,最后综合计算得出地质灾害风险的综合评估值。

2.2.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法,适用于解决评价指标难以精确量化的问题。针对水利工程地质灾害风险评估来说,应先确定评价因素集(即评估指标体系)和评价等级集(如低风险、较低风险、中等风险、较高风险、高风险)。后根据专家经验或实测数据确定各评价因素对不同评价等级的隶属度,构建模糊关系矩阵。再结合层次分析法确定的各评价因素权重,通过模糊合成运算得到地质灾害风险的综合评价结果。

2.2.3 灰色关联分析法

灰色关联分析法是一种多因素统计分析方法,它以各因素的样本数据为依据,用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序。在水利工程地质灾害风险评估中,将地质灾害风险作为参考序列,各评估指标作为比较序列。通过计算各比较序列与参考序列的灰色关联度,确定各评估指标对地质灾害风险的影响程度,从而对地质灾害风险进行评估。

3 水利工程地质灾害防治措施

3.1 工程措施

3.1.1 边坡防护工程

第一,重力式挡土墙依靠自身重量抵抗岩土体下滑力,常采用浆砌石或混凝土结构,适用于浅层滑动且墙高较低的边坡。设计时需精确计算土压力,确保墙体抗滑、抗倾覆稳定性满足要求。第二,锚杆与锚索加固技术通过将受拉杆件锚固于稳定岩土层,利用锚固力提高边坡抗滑能力,前者适用于岩质边坡,后者常用于深层滑动的高陡边坡^[3]。施工时需控制钻孔角度、深度及注浆质量,保证锚固效果。第三,坡面防护方面,混凝土护坡砖可有效抵御雨水冲刷,其连锁结构增强整体稳定性;植被防护通过植物根系固土和蒸腾作用,降低岩土体含水量,提升边坡抗侵蚀能力,且兼具生态修复功能。对于土质边坡,可采用三维植被网与草籽结合的方式,加速植被生长;岩质边坡则可运用客土喷播技术,为植物生长创造条件。

3.1.2 排水工程

总所周知,排水系统是降低岩土体含水量、提升稳定性的关键所在。因此,地表排水工程中,截水沟应设置于边坡顶部,拦截并引排山坡上方地表水,防止其流入工程区域;排水沟沿坡面或渠道布置,将区域内雨水迅速排出。需要注意的是,设计时需依据汇水面积、降雨量计算断面尺寸,确保排水能力满足要求。地下排水工程方面,排水孔通过钻孔穿透含水层,将地下水引入集水廊道或排水沟,适用于降低局部地下水位;排水廊道则可在较大范围内疏排地下水,常用于大坝坝基或高边坡治理。

3.1.3 地基处理工程

对于岩溶塌陷隐患地基,灌浆法通过高压注浆填充溶洞、裂隙,形成结石体提高地基承载力与整体性。根据溶洞规模、填充物性质,可选择水泥-水玻璃双液浆、化学浆液等材料,采用分段注浆、重复注浆工艺确保填充效果。软土地基处理中,换填法将软土挖除后换填碎石、灰土等强度较高材料,适用于浅层软土;堆载预压法通过在地基上堆置重物,加速土体排水固结,提高强度,需控制加载速率与预压时间;深层搅拌法利用搅拌机械将水泥等固化剂与软土强制拌和,形成柱状加固体,增强地基承载力与稳定性,施工时需保证搅拌深度、均匀性及固化剂掺入量。

3.2 非工程措施

3.2.1 监测预警系统建立

在水利工程区域,位移监测仪通过全站仪、GNSS接收机或光纤光栅传感器,实时获取边坡、坝体等部位的三维位移数据;雨量计采用翻斗式、虹吸式等设备,精确计量降雨量;地下水位监测仪利用压力传感器或雷达水位计,动态监测水位变化。这些传感器采集的数据通过4G/5G、光纤等网络传输至数据中心,借助云计算平台进行存储与分析。基于机器学习算法,系统可对历史数据与实时数据进行模式识别,建立灾害预测模型。

3.2.2 制定应急预案

应急预案需涵盖组织架构、响应流程与资源保障等内容。应急组织机构通常包括指挥组、抢险救援组、医疗救护组、后勤保障组等,明确各部门职责与人员分工。应急响应程序分为预警发布、启动响应、现场处置、应急结束等阶段,规定不同灾害等级对应的响应级别与行动方案^[4]。抢险救援措施需针对滑坡、泥石流等不同灾害类型制定,如滑坡发生时的人员疏散路线规划、

滑坡体加固方案;泥石流灾害的拦挡坝启动机制等。人员疏散方案需考虑工程周边居民分布,确定安全避难场所与疏散路线,并通过标识牌、宣传手册等方式告知公众。物资保障方面,建立应急物资储备库,储备抢险设备、生活物资、医疗用品等,并定期更新补充。定期开展应急演练,模拟真实灾害场景,检验预案可行性,提高人员应急处置与协同配合能力,确保在灾害发生时能快速、有序开展救援工作。

3.2.3 加强地质勘察与研究

在水利工程规划设计前期,地质勘察需采用工程地质测绘、钻探、物探等多种手段。工程地质测绘通过实地调查,绘制地质图,了解地形地貌、地层岩性、地质构造等基本信息;钻探获取岩芯样本,分析岩土体物理力学性质;物探利用地震波、电磁波等技术探测地下地质结构。勘察过程中,需重点查明断层、岩溶、软弱夹层等不良地质现象的分布与特征。对于大型水利工程,可开展专项地质勘察,如高边坡稳定性勘察、水库诱发地震监测等。在研究层面,鼓励科研机构与高校针对地质灾害形成机理开展研究,探索降雨-渗流-滑坡、库水波动-岸坡失稳等耦合作用机制。

结语:水利工程地质灾害防治与风险评估是一项系统性、综合性的工程,直接影响着水利工程的安全运行与区域可持续发展。面对复杂多变的地质条件与工程环境,精准识别灾害风险、科学制定防治策略是行业发展的必然要求。通过工程措施与非工程措施的协同发力,能够有效降低地质灾害威胁,保障水利设施的安全性、可靠性。未来,随着新技术、新理论的不断涌现,需进一步深化地质灾害形成机理研究,推动监测预警智能化、防治技术标准化发展,构建更完善的风险防控体系,为水利工程建设与运行筑牢安全屏障,助力国家水利事业高质量发展。

参考文献

- [1]邓良武.水利工程中的工程地质和水文地质勘查工作探析[J].低碳世界,2024,14(04):109-111.
- [2]李杰.水库水利工程地质灾害防治技术及措施[J].农业灾害研究,2023,13(07):287-289.
- [3]李洋.水利工程地质灾害防治技术研究[J].中国高新科技,2023(02):140-141+144.
- [4]李强.水库水利工程地质灾害防治技术及措施[J].农业灾害研究,2022(11):129-131.