

大型水利枢纽工程中高边坡稳定性监测与施工控制

翟自东 韩全彬

中国南水北调集团中线有限公司河南分公司 河南 郑州 450000

摘要：本文聚焦于大型水利枢纽工程中的高边坡稳定性监测与施工控制问题。首先阐述了高边坡稳定性在水利枢纽工程中的关键意义，分析了影响高边坡稳定性的诸多因素，包括地质条件、水文因素、工程作用等。接着详细探讨了高边坡稳定性监测技术，涵盖传统监测方法与现代先进的监测手段，以及这些监测技术在工程中的应用方式和监测数据的处理分析方法。然后深入研究了施工控制策略，从施工前的规划、施工过程中的技术措施到施工后的维护管理等方面进行论述。最后通过实际工程案例，验证了高边坡稳定性监测与施工控制的有效性和重要性，旨在为大型水利枢纽工程中高边坡的安全稳定提供理论支持和实践指导。

关键词：大型水利枢纽工程；高边坡稳定性；监测技术；施工控制

1 引言

大型水利枢纽工程作为国家重要的基础设施，在防洪、灌溉、发电、供水等方面发挥着不可替代的作用。高边坡是水利枢纽工程中常见的地质结构，其稳定性直接关系到整个工程的安全与正常运行。一旦高边坡发生失稳，如滑坡、崩塌等地质灾害，不仅会导致工程设施的严重损坏，还可能引发洪水泛滥等次生灾害，对下游地区的人民生命财产安全造成巨大威胁。因此，对大型水利枢纽工程中的高边坡进行稳定性监测与施工控制具有重要的现实意义。

2 高边坡稳定性的重要意义及影响因素分析

2.1 高边坡稳定性的重要意义

高边坡的稳定性是大型水利枢纽工程建设和运营过程中的关键问题之一。在建设阶段，稳定的高边坡能够为施工提供安全的工作环境，确保施工设备和人员的安全，保证工程按计划顺利进行。在运营阶段，高边坡的稳定性直接影响到水利枢纽工程各种功能的正常发挥。例如，水库大坝两侧的高边坡若出现失稳，可能会堵塞水库泄洪通道，影响水库的调蓄能力；水电站引水隧洞进口处的高边坡失稳，可能会破坏引水设施，影响发电效率。因此，保障高边坡的稳定性是大型水利枢纽工程长期安全运行的必要条件。

2.2 影响高边坡稳定性的因素

2.2.1 地质条件

地质条件是影响高边坡稳定性的内在因素。岩土体的性质，如岩石的强度、硬度、节理裂隙发育程度，土体的颗粒组成、密实度等，都对高边坡的稳定性有重要影响。例如，在软弱岩层或松散土体中开挖形成的高边坡，其稳定性往往较差。此外，地质构造，如断层、褶

皱等，会破坏岩土体的完整性，降低其强度，增加边坡失稳的可能性。

2.2.2 水文因素

水文因素对高边坡稳定性的影响也十分显著。地下水的存在会改变岩土体的物理力学性质，降低其抗剪强度。当高边坡内部存在地下水时，水会对岩土体产生静水压力和动水压力，增加边坡的下滑力。同时，地下水的长期浸泡还会导致岩土体软化、泥化，进一步削弱其稳定性^[1]。此外，地表水的冲刷作用也会侵蚀高边坡坡脚，破坏边坡的平衡状态，引发失稳。

2.2.3 工程作用

在大型水利枢纽工程建设过程中，各种工程活动会对高边坡的稳定性产生影响。例如，开挖爆破作业会产生震动，使岩土体的结构受到破坏，降低其强度；边坡的开挖改变了原有的应力状态，使边坡岩土体中的应力重新分布，可能导致应力集中，引发边坡失稳；工程堆载，如在边坡顶部堆放建筑材料等，会增加边坡的荷载，增大下滑力，对边坡稳定性不利。

2.2.4 其他因素

除了上述因素外，还有一些其他因素也会影响高边坡的稳定性，如地震、降雨等自然灾害。地震产生的地震波会使岩土体产生惯性力，导致边坡岩土体的应力状态发生改变，可能引发滑坡等地质灾害。降雨会使地表水渗入边坡内部，增加地下水位，同时雨水对边坡表面的冲刷作用也会加剧，从而降低边坡的稳定性。

3 高边坡稳定性监测技术

3.1 传统监测方法

3.1.1 地表位移监测

地表位移监测是监测高边坡稳定性的常用方法之

一,主要包括水平位移监测和垂直位移监测。常用的监测仪器有全站仪、经纬仪、水准仪等。通过在边坡表面设置监测点,定期测量监测点的坐标变化,从而获取边坡的位移信息。地表位移监测能够直观地反映边坡的整体变形情况,对于判断边坡的稳定性具有重要意义。

3.1.2 深层位移监测

深层位移监测主要用于了解边坡内部岩土体的变形情况。常用的监测仪器是测斜仪,通过在边坡内部钻孔并埋设测斜管,将测斜仪放入测斜管中,测量不同深度处岩土体的倾斜角度变化,进而计算出岩土体的深层位移。深层位移监测可以及时发现边坡内部的潜在滑动面,为边坡稳定性分析提供重要依据。

3.1.3 地下水位监测

地下水位的变化对高边坡的稳定性有重要影响,因此地下水位监测也是高边坡稳定性监测的重要内容之一。通常采用水位计进行地下水位监测,在边坡内部设置水位观测孔,将水位计放入孔中测量地下水位的高度。通过定期监测地下水位的变化,可以了解地下水对边坡稳定性的影响程度。

3.2 现代先进监测技术

3.2.1 全球定位系统(GPS)监测技术

GPS监测技术具有高精度、全天候、实时监测等优点,在高边坡稳定性监测中得到了广泛应用。通过在边坡表面设置GPS监测点,利用GPS接收机实时接收卫星信号,获取监测点的三维坐标信息^[2]。GPS监测技术可以实现大范围、高精度的边坡位移监测,能够及时发现边坡的微小变形,为边坡稳定性预警提供有力支持。

3.2.2 光纤传感监测技术

光纤传感监测技术是一种新型的监测技术,具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高、可实现分布式监测等优点。常用的光纤传感监测技术包括光纤布拉格光栅(FBG)传感技术和分布式光纤传感技术。FBG传感技术可以通过测量光纤光栅的波长变化来感知应变和温度等物理量的变化,从而实现了对边坡变形的监测。分布式光纤传感技术则可以沿着光纤长度方向连续测量应变和温度等参数,能够获取边坡沿长度方向的变形分布信息。

3.2.3 遥感监测技术

遥感监测技术利用卫星、飞机等遥感平台获取边坡的影像信息,通过对影像信息的处理和分析,提取边坡的变形信息。常用的遥感监测技术包括合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术和光学遥感技术。InSAR技术可以通过测量不同时期雷达影像的相位差来获取地面的微小变形信息,具有高精度、大面积监测等优点。光学遥感

技术则可以通过多时相影像的对比分析,发现边坡的地表变化情况,如裂缝发育、植被破坏等。

3.3 监测数据处理与分析方法

监测数据的处理与分析是高边坡稳定性监测的重要环节,通过对监测数据的处理和分析,可以及时发现边坡的变形趋势,判断边坡的稳定性状态。常用的监测数据处理与分析方法包括数据预处理、数据滤波、变形趋势分析、稳定性评价等。数据预处理主要是对原始监测数据进行校准、修正等处理,去除数据中的误差和噪声。数据滤波则是采用滤波算法对数据进行平滑处理,提高数据的信噪比。变形趋势分析通过建立数学模型,对监测数据进行拟合和分析,预测边坡的未来变形趋势。稳定性评价则是根据变形趋势分析结果,结合边坡的工程地质条件和稳定性判别标准,对边坡的稳定性进行评价。

4 高边坡施工控制策略

4.1 施工前规划

4.1.1 详细的地质勘察

在施工前,应对高边坡所在区域进行详细的地质勘察,查明边坡的地质构造、岩土体性质、地下水情况等,为边坡的设计和施工提供准确的地质资料。地质勘察应采用多种勘察手段相结合的方法,如钻探、物探、坑探等,确保勘察结果的准确性和可靠性。

4.1.2 合理的边坡设计

根据地质勘察结果,结合工程的具体要求,进行合理的边坡设计。边坡设计应考虑边坡的稳定性、安全性、经济性等因素,确定合理的边坡坡度、开挖高度和支护结构形式。在设计过程中,应采用多种稳定性分析方法对边坡的稳定性进行计算和评价,确保边坡在各种工况下都具有足够的稳定性^[3]。

4.1.3 制定施工方案和应急预案

根据边坡设计要求,制定详细的施工方案,明确施工顺序、施工方法、施工工艺等技术要求。同时,应制定应急预案,针对可能出现的边坡失稳等突发情况,制定相应的应急措施和救援方案,确保在突发情况下能够迅速、有效地进行应对,保障人员生命安全和工程设施的安全。

4.2 施工过程中技术措施

4.2.1 开挖控制

在高边坡开挖过程中,应严格控制开挖顺序和开挖方法。一般应采用自上而下、分层分段开挖的方式,避免一次性开挖过深或过陡,减少对边坡岩土体的扰动。同时,应注意控制开挖爆破的强度和频率,采用预裂爆

破、光面爆破等控制爆破技术,减少爆破振动对边坡稳定性的影响。

4.2.2 支护施工

根据边坡的设计要求,及时进行支护施工。常用的支护方式有锚杆支护、锚索支护、混凝土喷层支护、挡土墙支护等。在支护施工过程中,应严格按照设计要求和施工规范进行操作,确保支护结构的质量和稳定性。例如,锚杆和锚索的安装角度、长度、锚固力等应符合设计要求,混凝土喷层的厚度和强度应满足规范标准^[4]。

4.2.3 排水措施

排水是高边坡施工控制的重要环节之一。在施工过程中,应设置完善的排水系统,包括地表排水和地下排水。地表排水主要通过设置截水沟、排水沟等设施,将地表水引离边坡,防止地表水对边坡的冲刷。地下排水可采用排水孔、排水盲沟等措施,降低地下水位,减少地下水对边坡稳定性的影响。

4.3 施工后维护管理

4.3.1 定期监测与检查

在高边坡施工完成后,应继续进行定期的稳定性监测和检查。监测内容包括地表位移、深层位移、地下水位等,监测频率应根据边坡的稳定性和工程的重要性确定。同时,应定期对边坡进行外观检查,观察边坡表面是否有裂缝、滑坡等异常情况,及时发现并处理潜在的安全隐患。

4.3.2 维护与修复

对于监测和检查中发现的问题,应及时进行维护和修复。例如,对于出现的裂缝,应根据裂缝的宽度和深度采取相应的处理措施,如灌浆、锚固等;对于发生局部滑坡的区域,应及时进行清理和加固处理,恢复边坡的稳定性。

4.3.3 长期稳定性评估

随着时间的推移,高边坡的稳定性可能会发生变化。因此,应定期对高边坡进行长期稳定性评估,结合监测数据和地质勘察资料,分析边坡的稳定性变化趋势,为边坡的维护和管理提供科学依据。

5 工程案例

5.1 三峡工程永久船闸高边坡

三峡工程永久船闸以170米开挖高度和12条断层带构成复杂地质环境。工程团队构建了“地表GNSS+深部测斜+微震监测”的三维监测体系,128个GNSS点实现毫米

级位移追踪,36个测斜孔捕捉岩体深层变形,8个微震台站实时感知岩体破裂信号。施工控制中,采用预裂与光面爆破组合技术,将振动速度严格控制在0.3cm/s以内,避免爆破扰动;创新“锚索-抗滑桩-排水洞”联合支护,40~60米长锚索深入稳定岩层,3米×4米抗滑桩构成刚性屏障,排水洞系统降低水压力,形成立体防护。配合云平台智能预警系统,实现分钟级风险响应。最终,施工期最大位移仅12毫米,运营期年沉降量小于2毫米,达到国际领先水平。

5.2 锦屏一级水电站拱肩槽高边坡

锦屏一级水电站拱肩槽则面临305米超高边坡与0.45低完整性岩体的极不稳定条件。工程首创“分级开挖—动态支护”工艺,每级15米开挖高度配合即时支护,将大尺度风险分解为可控小单元;引入玻璃纤维锚杆,其耐腐蚀性较钢材提升3倍,寿命延长至50年以上,大幅降低后期维护成本;采用无人机LiDAR每月进行全域扫描,±2厘米精度实现形变数据全覆盖,结合数值模拟动态调整支护参数。该方案不仅保障了安全,更节约支护成本1.2亿元,缩短工期8个月,实现了技术突破与经济效益的统一。

结语

大型水利枢纽的高边坡稳定性监测与施工控制是复杂系统工程,涉及多学科领域。其稳定性受地质、水文、工程作用等诸多因素影响。为确保稳定,需用多种监测技术实时掌握边坡变形。施工中要采取合理策略,涵盖施工前规划、施工中技术措施及施工后维护管理,保障施工安全与长期稳定。实际案例表明,科学监测与施工控制能保障高边坡稳定,为工程安全运行护航。今后应总结经验,完善相关技术,提升工程建设的安全性与可靠性。

参考文献

- [1]李兆宇.高边坡稳定分析及开挖防护监测设计[J].土工基础,2022,36(06):1006-1012.
- [2]洪祥,宋亚红.水利枢纽高边坡稳定性及加固措施分析[J].水利科技与经济,2024,30(01):58-61+66.
- [3]李小龙.水利枢纽高边坡稳定性及加固措施分析[J].陕西水利,2023,(04):118-121.
- [4]李亚斐.水利工程施工高边坡稳定性控制技术[J].中国科技信息,2025,(16):59-61.