

高速公路高边坡自动化监测系统工程应用

罗纳卿, 蒋铨隆

重庆科技大学建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月13日; 录用日期: 2024年4月3日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

为保障山东某高速公路沿线高边坡开挖施工安全, 对其进行了开挖过程中的自动化监测, 监测项目主要涉及边坡表面位移、裂缝宽度、降雨量、爆破震动等。监测系统设计采用测量机器人、GNSS高精度定位仪器、无线拉绳式裂缝计、翻斗式雨量计、无线崩塌计等设备, 基于自动化变形监测系统、同感云结构物健康监测管理平台和公路基础设施健康安全监测预警一体化平台, 实现了数据的实时采集与同步传输, 实现了良好动态施工, 为边坡开挖施工提供了安全保障。

关键词

高速公路, 高边坡, 开挖施工, 自动化监测系统, 工程应用

Engineering Application of Automatic Monitoring System for High Slope of Expressway

Naqing Luo, Hualong Jiang

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 13th, 2024; accepted: Apr. 3rd, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

In order to ensure the safety of high slope excavation construction along an expressway in Shandong, automated monitoring was carried out during the excavation process. The monitoring items mainly involve slope surface displacement, crack width, rainfall, blasting vibration, etc. The monitoring system design adopts measuring robots, GNSS high-precision positioning instruments, wireless rope crack gauges, tipping bucket rain gauges, wireless collapse gauges, and other equipment. Based on the automated deformation monitoring system, the same sensing cloud structure health monitoring management platform, and the integrated platform for highway infrastructure health

and safety monitoring and early warning, real-time data collection and synchronous transmission are achieved, good dynamic construction is achieved, and safety assurance is provided for slope excavation construction.

Keywords

Expressway, High Slope, Excavation Construction, Automatic Monitoring System, Engineering Application

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

边坡的稳定性受到岩土体类型、地质结构、气象水文、施工工艺等多重复杂因素综合影响,精准监测边坡数据、提前预警做出防护措施、更好地保障生命财产安全以及施工质量是一项重要且困难的工作。在技术的迭代和进步下,早期所采用的宏观地质观测法和设站观测法因局限性较强,准确性和时效性不高,并且过于依赖人力,容易受到外界条件的影响,无法实时监测和预警等因素逐渐被淘汰。采用智能化自动监测系统不受时间、气候、地形等客观条件的限制,可全天候监测实时预警,且能监测更广泛的动态数据,大大提高精准度和监测效率,提升了预警预报的准确性。

欧耀祥[1]运用徕卡 TS60 为监测自动化机器人采用极坐标的方法监测边坡变形点的三维坐标;荣美等[2]以广西某高速公路边坡为依托论述了 GNSS 自动化在线监测系统结合工程实况的定制方案,实现全天候坡表位移的监测;赵鹏涛等[3]通过 GNSS 系统在张桑高速公路某边坡自动化监测中的应用证明了 GNSS 系统能够明显监测到边坡的坡表位移,可以预知风险并传输信息,避免边坡灾害造成不必要的损失;高艺嘉[4]等以西南地区复杂地质结构为背景研究,综述了 GPS/BD 位移监测技术、无线传感器技术、雷达遥感技术的原理、优缺点、监测参数、终端设备和系统组成。

综合上述文献提供的监测案例及系统搭建思路,本项目结合结构物传感器的优势及测量机器人的优势互补,将结构物和机器人关联在同一监测平台,创建一套采集数据便捷、精度高、高自动化及多平台组合协同工作平台,更有利于危险预警,数据信息分析和处理。本文以山东某高速公路四标段 K55+062.1-K56+442.6 段边坡为例,论述如何实现自动化监测分析,对同类相似边坡自动化监测工程有参考意义。

2. 边坡概况

该边坡位于山东某高速公路四标段 K55+062.1-K56+442.6 路线东行左侧,边坡长度约 1380 m,高度约 60m,边坡坡顶标高 230m,坡底标高 175 m,边坡分为六级,一至四级边坡坡比为 1:1,在 K56+110-K56+200 路段五级边坡坡率为 1:1.5,在 K56+210~K56+325 路段五级坡率为 1:1.25,中间留出 10m 的坡率过渡段。在 K56+110~K56+325 五级边坡高度维持在 8 m 不变,六级边坡坡率为 1:25。边坡上部为原山体,下部为高速公路。一至三级边坡采用锚索格子梁(六束)加喷混植生,四级边坡采用锚杆(锚索)格子梁加喷混植生,五级边坡采用攀缘植物加主动防护网,六级边坡采用喷混植生。边坡岩土体为强风化、中风化页岩和中风化砂岩,岩体存在不稳定性,山东夏季存在强降雨情况,有滑坡风险,故需采取安全监测坡体动态,预警灾害及风险。

3. 边坡自动化监测系统设计

3.1. 监测目的

为了解滑坡的运动情况和趋势, 需要对坡面进行位移监测, 主要目的如下:

- 1) 为崩塌和滑坡的预测、评估以及治理工程提供可靠的数据和科学依据。
- 2) 为滑坡防治提供技术基础, 预测未来的变形和位移发展趋势。
- 3) 对已发生滑动破坏的边坡以及加固后的滑坡, 制定及时调整施工的组织计划, 确保施工安全性。

3.2. 方案设计原则

1) 自动化监测

该系统可以全天候 24 小时对监测数据进行自动采集、传输、存储、处理、分析和综合预警。

2) 在线分析

具有管理基础数据, 实时显示和发布各项监测内容, 制作图形报表, 分析数据, 综合预警。其中, 数据分析部分包含了各种监控内容的趋势分析、综合分析等内容。

3) 自动预警

通过软件实时在线对各个监测参数分析, 一旦监控到参数异常, 系统能够进行声光、短信、邮件等方式提醒有关人员采取措施, 预防事故发生或减少伤亡损失[5]。

3.3. 监测系统架构

岩坡顶土体位移可以采用高精度定位仪器 GNSS 和测量机器人进行测量, 两种方法都可以获取监测点的三维坐标位移。测量机器人可以测量所有测点, 范围广泛, 而 GNSS 不需要视线和受光照等条件限制, 可以进行全天候动态监测。然而, GNSS 的测量范围受限于安装测点, 这两种方法各有优势和特点, 可以共同使用, 实现全面监测。无线崩塌计通过监测岩坡震动, 及时捕捉到灾害发生前的预警信号, 用于灾害预警。在施工过程中, 如果出现裂缝, 稳定措施采取后, 可以使用拉绳式裂缝计来观察肉眼和传统测量无法准确判断的裂缝扩张变化。翻斗式雨量计可以测算降雨量, 从而分析降雨量与土体稳定数据的关系, 预警由降雨引发的泥石流和滑坡等灾害, 并实时处理监测数据, 输出分析和监测结果的报表和图形。监测系统架构图参见图 1。

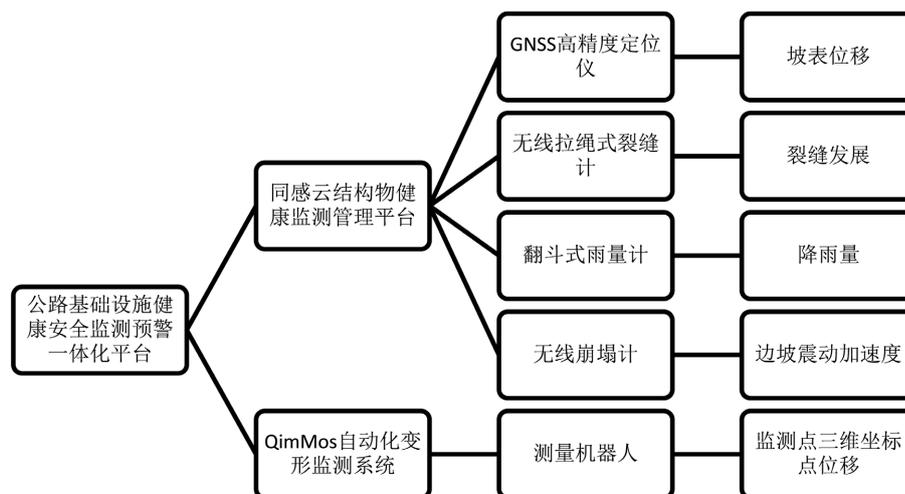


Figure 1. Monitoring system architecture diagram
图 1. 监测系统架构图

3.3.1. 监测机器人(含气象修正)

监测机器人系统由带马达驱动和自动照准功能的全站仪及气象修正器、通讯供电系统等组成。该系统能够精确自动搜索照准目标, 并获取三维坐标、距离和角度等数据。在本案例中, 我们使用了拓普康 GT1001 作为自动化全站仪, 设计了监测机器人系统, 用于边坡稳定性监测, 见图 2。观测房采用定制的彩钢板, 具有防雨和避雷功能, 并且观测房基础与观测墩相互独立, 开窗大小满足通视条件。测量机器人系统的基准点应该满足与测量机器人的通视条件, 因此应该配备大棱镜和棱镜保护罩。基准点的观测墩基础应该稳定可靠, 周围不能有遮挡或干扰; 监测点由边坡表面的测点大棱镜、监测桩和棱镜保护罩组成, 测点大棱镜安放在监测桩顶部, 并配备棱镜保护罩, 监测桩应该稳定可靠, 能够真实反映边坡表面的位移, 并且不会因为爆破振动而松动或移位。监测系统的数据传输采用 4G 无线网络传输, 并配备数据管理、分析和预警平台。



Figure 2. Monitoring robot
图 2. 监测机器人

3.3.2. GNSS 高精度定位仪器

GNSS (全球卫星导航系统或全球导航卫星系统)可以实时动态监测地球表面的空间对象, 并获取其三维坐标、速度和时间等信息, 实现连续的导航、定位和授时功能[6], 见图 3。相比传统方法, GNSS 技术具有以下优势:

- 1) GNSS 技术的监测点与基准点无需在同一点, 提供更多地址选择的灵活性。
- 2) 相较于传统方法, GNSS 技术具有更高的监测精度, 并且不易受到人为或环境等因素的影响, 使用稳定可靠。
- 3) 传统监测方法需要人工对边坡平面位移和深部位移进行监测, 工作量大且统一监测标准难以确定。而采用 GNSS 技术, 可以同时监测点的 X、Y、Z 三个方向进行监测, 减小监测时间的影响, 工作量大大减少。
- 4) GNSS 技术高效且支持实时监测。相较于传统方法, GNSS 技术可以在几分钟内完成对一条基线的监测定位工作, 并且不受时间、地点和环境的限制。在采取保护措施后, 可以实时进行边坡监测。
- 5) 随着无线传播技术的发展, GNSS 技术越来越自动化。监测人员只需要简单培训和了解基本仪器操作流程, 就可以开始工作, 节约大量时间。监测数据由相关系统自动进行统计、分析, 以报表和图形形式呈现, 监测系统实现了数据采集、传输、分析的自动化, 减少人为干预。
- 6) GNSS 技术不仅可以测量边坡的位移变形大小, 还能测量变形速度, 广泛应用于工程测量等多个领域, 具有广阔的发展前景。



Figure 3. GNSS
图 3. GNSS

3.3.3. 无线崩塌计

岩体状态的实时监测对于预防地质灾害的发生非常重要。在岩体中安装加速度传感器可以监测岩体的微动情况，通过连续实时监测加速度震动数据，可以提前发现岩体变动的迹象，以便采取相应的预警措施。当监测数据超过设定的预警阈值时，即时启动报警程序，可以迅速通知相关人员进行紧急撤离和采取必要的防灾措施，以避免人员伤亡和减小财产损失。

加速度传感器通过测量岩体产生的加速度变化来监测岩体的微动情况，通常将传感器安装在岩体表面或岩体内部的关键位置，见图 4。传感器可以实时采集岩体的加速度数据，并将数据传输到监测中心或报警系统进行分析和判断。一旦监测数据超过预设的预警阈值，即可触发报警系统，及时通知相关人员并采取相应的行动。

岩体加速度传感器的实时监测和预警系统可以提供早期预警，使相关人员能够及时采取保护措施，避免灾害事故发生。这种监测方法可以帮助提高岩体的安全性，减少地质灾害对人员和财产的危害。同时，监测数据的连续采集和分析也有助于深入了解岩体的变化规律，为灾害防治提供科学依据。



Figure 4. Wireless collapse meter
图 4. 无线崩塌计

3.3.4. 拉绳式裂缝计

拉绳式裂缝计是一种整合了直线位移传感器的设备，充分结合了角度传感器和直线位移传感器的优势，见图 5。它适用于需要大行程或者有限空间的环境，并广泛应用于各个行业的位置控制和测量。拉绳式裂缝计具有以下特点：

- 1) 远程高频监测: 拉绳式裂缝计可以进行远程监测, 可以在较远距离上实时监测裂缝的位移变化。同时, 它可以以较高的频率进行监测, 可以实时捕捉到裂缝的微小变动。
- 2) 低功耗: 拉绳式裂缝计采用低功耗设计, 可以节省能源并延长设备的使用寿命。这对于长期监测和远程监测来说非常重要。
- 3) 适应性强: 拉绳式裂缝计适应性强, 可以适应各种环境和工作条件下的安装和使用。无论是在大行程的场合还是在狭小空间中, 都可以灵活安装和使用。
- 4) 监测可靠: 拉绳式裂缝计具有较高的监测可靠性, 能够准确、稳定地监测裂缝的位移变化。它可以提供准确的数据, 辅助相关行业的位置控制和测量。



Figure 5. Pull rope crack meter
图 5. 拉绳式裂缝计

3.3.5. 翻斗式雨量计

很多滑坡灾害发生在雨季或特大降雨期间, 降雨成为滑坡的巨大诱因, 在长期干旱的天气下, 突降持续性的大暴雨会导致坡体自重快速增加, 使得土体摩擦阻力下, 平衡性遭到破坏, 导致灾害的发生, 因此关注降雨型滑坡十分必要, 降雨量成为一项关键数据。翻斗式雨量计之所以能成为现代雨量计测报的首选, 是因为它具有结构简单、性能优良稳定性好、信号易于数字化处理、价格低易维护、可靠性高等特点, 见图 6。通过分析降雨量和边坡稳定性的关系可以得出的一系列数据, 通过分析模拟, 对降雨期间边坡稳定性有更好的预警判断。



Figure 6. Tipping bucket rain gauge
图 6. 翻斗式雨量计

3.4. 监测点布设

3.4.1. 监测设备布设方案

1) 机器人观测墩的布设: 挑选一个在边坡变形体之外的某个区域, 同时该区域有地质条件良好且稳定可靠能够长期保持用于监测的点位布设。

2) 结构物监测点的布设: 应该根据实际情况和地勘资料选取有代表性的危险点位, 点位周围应无遮挡或干扰, 确保能较准确获取数据。

3) 棱镜观测点: 棱镜在各级边坡每隔 50 m 布设一个, 测点大棱镜置于监测柱顶部, 并配备棱镜保护罩, 监测柱应稳定可靠, 能真实反映边坡表面位移, 且不因爆破振动松动移位。在设置完基准点后, 要做好防护工作, 以防监测点被破坏。本工程部分监测点立面布置图如图 7 所示。

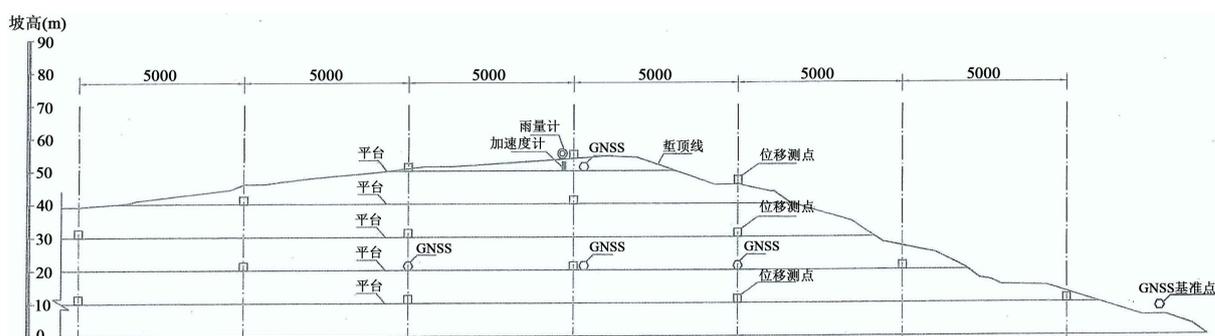


Figure 7. Monitoring facade layout

图 7. 监测点立面布置图

3.4.2. 监测点布设原则

在开展监测工作之前, 需要确定勘察与监测点的分布和仪器布设。监测点的布设一般需要遵循以下原则:

- 1) 可靠性原则: 包含监测方法、仪器、测点布置的可靠性。
- 2) 多层次原则: 采用多种手段相互补充和校核, 本项目采用结构物与机器人相结合的立体监测。
- 3) 以变形破坏分析为主的原则: 边坡位移是监测边坡变形破坏分析的基本依据和重要手段。
- 4) 关键点位置优先原则: 根据前期地勘资料和相关实验, 确定监测点的重点和敏感位置, 优先布置测点。
- 5) 整体性原则: 保证监测系统对整个边坡的覆盖。
- 6) 遵循工程原则: 监测点的布置要考虑到工程特点和工程建筑对边坡的要求。
- 7) 适用性原则: 监测方法和仪器要便于操作和分析, 力求简单易行。
- 8) 经济合理原则: 监测系统要考虑信息的丰富性和造价的合理性两方面的要求。

监测点的合理布设对于监测系统及监测操作至关重要, 是前期准备工作的重要一环, 也是后期数据采集准确性的基本保障。

4. 结语

通过对现有监测方法的梳理和技术创新的探索, 建立了涵盖 GPS 监测、接触式测量和高精度测量技术的综合监测系统。该系统不仅能够实现边坡形变等关键参数的实时监测, 而且能够通过数据融合和分析提供边坡稳定性的综合评估。结合现代信息技术, 创建了智能预警系统, 可以及时发现异常情况并进行预警。经过 300 多天的数据采集及信息实时反馈, 实现了边坡开挖及支护的动态施工监测,

有效预警提示从而避免了三起滑坡事故对坡底施工人员及施工器械的伤害, 为高速公路边坡的施工提供了有力保障。

基于本研究成果, 未来可以进一步完善并推广高边坡自动化监测系统, 将其应用于更多的高速公路工程, 使高边坡自动化监测系统在工程安全中发挥更加重要的作用, 为高速公路的施工和安全运营提供坚实支持。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新计划项目(YKJCX2220646)。

参考文献

- [1] 欧耀祥. 高速公路高边坡变形监测方法及数据处理分析[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(5): 22-23+25.
- [2] 荣美, 黎付安, 满新耀. GNSS 自动化监测系统在高速路边坡表面位移监测中的应用[J]. 西部交通科技, 2020(2): 22-26.
- [3] 赵鹏涛, 张升彪, 鲁光银. GNSS 自动化在线监测在高速公路边坡监测中的应用[J]. 中国科技信息, 2019(18): 66-68.
- [4] 高艺嘉, 潘佩珠, 任广丽. 公路边坡智能化监测预警探析[J]. 中国交通信息化, 2019(12): 110-112.
- [5] 何超红, 黎张. 威远县地质灾害自动化监测系统的应用研究[J]. 四川地质学报, 2021, 41(3): 500-503.
- [6] 刘庆虎. 某高速公路边坡地表位移监测分析研究[J]. 现代商贸工业, 2019, 40(30): 200-202.