

基于无线传感网络的公路边坡监测及临滑预警研究

夏梁斌

(中交瑞通路桥养护科技有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 经过分析目前国内外滑坡监测现状及问题,总结了公路边坡发生滑塌的形成条件和机理,提出了基于无线传感网络的滑坡监测及临滑期预警系统架构,为公路边坡的实时监测和在线分析提供更高效、智能化解决方案;基于工程实践提出了三维激光测距收敛变形仪、高精度区域雷达定位、滑移体表层+浅层相对位移监测、滑移体下滑力分力及变形量监测等滑坡监测方法,作为对传统滑坡监测手段的有效补充。

关键词: 公路;边坡;无线传感网络;滑坡预警

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0125-04

在公路建设过程中,受自然地质及施工技术条件配套问题等影响会产生大量人工边坡,容易导致滑坡和泥石流等灾害,为公路建设和运营带来安全隐患。虽然近年来相关公路治理技术在不断进步和提高,但仍然缺乏防治公路地质灾害的有效办法,主要原因在于对公路两侧滑坡灾害监测及预警系统的研究没有跟上灾害治理技术的发展。因此,采用先进的技术手段和及时有效的预警系统加强对公路边坡的监测,最大限度地减少公路灾害,在公路建设和运营中日益重要和必要。

边坡监测方法经历了宏观地质检测法、简易观测法、仪表观测法、设站观测法、远程监测法等发展阶段,到目前为止,仍无法满足在线监测及安全预警的功能要求。电子信息技术与传感器技术的不断发展,为无线传感网络在工程实践中的应用提供了可行性。无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)由大量静止或移动的传感器节点以自组织或多跳的方式组成无线网络,在其覆盖区域内可做到信息采集、处理及传输。基于物联网的发展,无线传感网络具有成本低、自动化程度高和范围广等优点,可保证数据采集过程中公路边坡监测的准确性和实时性,有效弥补目前边坡监测手段的不足。因此,开展基于无线传感网络的边坡临滑预警系统研究很有必要。

1 边坡监测及安全预警现状

自 1963 年日本学者斋藤迪孝提出预报滑坡的

图解及经验公式以来,国内外学者提出了多种预测滑坡的统计学方法和经验公式。近年来采用人工智能理论、小波分析理论及 3S 技术(遥感技术、地理信息系统、全球定位系统)等非线性理论对边坡变形及稳定性预测的研究发展很快。郑东健等考虑温度和降雨量的影响,建立了边坡变形的多因素预测模型;香港通过抓住其滑坡都集中在暴雨期这个特点成功进行了滑坡预测预报;Tiande Miao 等假设滑坡的运动形式是连续可变的,实现了对块体高速滑坡的远程预测。但目前边坡监测中存在以下问题:1) 边坡设计、施工等与边坡监测很难做到紧密结合;2) 数据传输方式多采用电缆,造价高,维护费用高,同时易受到环境的影响;3) 测量参数单一,不能全面推测边坡的变形;4) 自动化程度低,监测方法和仪器落后。

无线传感网络将无线网络与传感器连接起来,可感知测量对象的数据变化实现实时监测,在生活、生产安全监控、环境监测和桥梁变形监测方面得到了广泛应用。国内对无线传感网络的研究较晚,但得到了越来越多的关注,清华大学、中国科学院自动化研究所等都在进行深入研究;京广高铁在公路与铁路的交界处设置基于无线传感网络的防护网,其一旦受到异物碰撞就会自动报警。目前无线传感网络研究的重点主要是如何将边坡监测数据传输和数据传输网络的应用结合起来。国内已建成的边坡监测系统多是将重点放在监测系统硬件建设和软件功能的实现上,如李卫民等采用固定式测斜仪、数据存

储控制仪和钢弦式传感器组成了高速公路高边坡安全自动化监测系统。

2 滑坡的实时在线监测

对边坡实施自动在线监测的意义在于及早对边坡变形等异常现象、潜在地质地貌条件及滑移的可能性作出预报,在条件恶化或灾害发生之前发出预警信号,以便及时采取适当的处治措施,尽量避免和减轻灾害损失。

边坡监测不同于一般建筑物的监测。无论是人工边坡还是天然边坡都一直处于渐进的变形状态,即边坡总是处于运动滑移状态,需区分正常的属于安全范围的滑移和不安全的滑移,从这个意义上来说,边坡监测比建筑物监测存在着更多的问题,通常需应用多种类型仪器来解决边坡监测中的高度不确定性问题。不仅如此,由于边坡失稳往往是一种始于微小的渐进性变化的不断累积而导致的突发性变化(失稳破坏),要求检测系统具有连续实时在线的记录功能,在大多数情况下还应具有整体安全裕度判断功能。

由于地质、水文地质条件的复杂性及边坡变形破坏的多样性、随机性和不确定性,要想准确预报滑坡的时间是非常困难的,至今还没有较成熟的能适应各种滑坡变形的预报、预警方法。鉴于滑坡预报的难度,监测传感器选型中需遵循多种类型相互印证的原则。

结合临滑期(指失稳破坏前数小时至数天)的滑坡特点,选择有利于确定两个标志着临滑阶段的关键性指标作为监测参数:1)降雨量及强度影响的水位、孔隙水压值及推断出的降雨量的临界值。2)由表面移动、滑坡体相对移动观测数据推断出的变形速率的临界值。

3 滑坡的监测方法及内容

3.1 监测方法

滑坡监测主要是对地表移动、深部应力与变形及降雨和地下水位进行连续观测。所采用的监测技术及监测仪器类型在很大程度上取决于对边坡潜在破坏模式的认识。常用的监测方法分为外观法和内观法两类。外观法以监测滑坡体的表面位移为主,其中以水电工程中的精密大地测量方法为主。内观法是将监测仪器埋入边坡内部,反映坡体内部的应力和变形变化情况。

3.2 监测项目及内容

3.2.1 降雨量及降雨强度监测

诱发滑坡的外因主要有降雨、振动、开挖及水库蓄水等,其中集中降雨为最普遍诱发因素,降雨是滑坡致灾的最主要外因。降雨对滑坡的作用是一个动态过程,大气降水注入滑体,增加岩土的水含量、增大岩土体容重、软化岩土、降低岩土的抗剪强度。渗入风化岩土体下的基岩面或断水层面而转变成润滑剂,会降低接触面的抗滑性质,进而导致滑坡。

降雨量及降雨强度采用雨量计监测,通常由常规自动雨量计改造而成,将测量频次缩短至20~60 min。

3.2.2 地下水位和孔隙水压力监测

降水渗入边坡土体内,将引起土体内含水率增大或水位升高。当滑动带处土壤的含水率增大并趋向饱和时,土壤的粘聚力和摩擦阻力均会减小,从而降低滑动带土的抗剪强度,导致滑坡。孔隙水的正压力值反映测量探头至饱和层上界限的水柱高度,负压值则反映土体内水分含量的变化规律,因而监测滑坡体特别是滑动带处的孔隙水压力变化具有十分重要的意义。

3.2.3 滑坡体的表面变形观测

在整个观测系统中,表面变形的观测具有十分重要的意义,尤其是对变形速度和加速度的观测。过去受水工建筑物观测规范的影响,过于强调基准点的绝对不变性及观测值的精度,导致土建成本高且自动化程度低,并不适合于滑坡监测,需通过分析滑坡自身独有特性确定最佳表面变形监测方案。对于公路两侧的单个隐患点,特别对于剧动式高速滑坡,可通过相对变形量及变化速率反映边坡的性态,追求实时性和相关性而不是追求绝对变形值的测量准确度。

可采用最新研发的三维激光测距仪及高精度区域雷达(见图1、图2)监测表面变形量及变形速率。

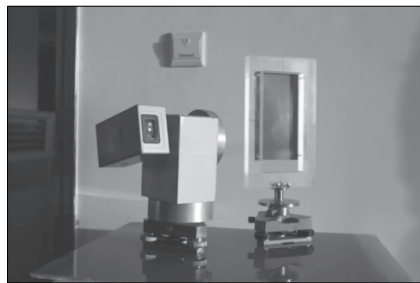


图1 三维激光测距仪及标靶

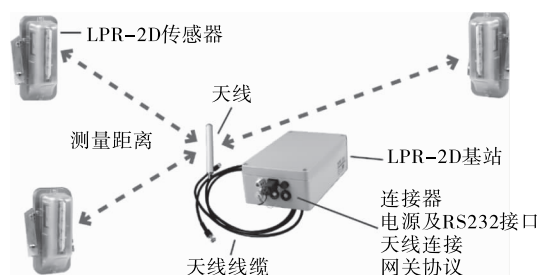


图2 高精度区域雷达定位仪示意图

这两种设备属于全天候自动化测量仪器,能有效克服GPS定位系统成本高、需人工操作的缺点。

3.2.4 滑移体地表和浅层相对位移

(1) 表面相对位移监测。使用大量低成本大地梁式倾斜仪组成纵横网格形式布置在滑移体的表面,通过倾角值间接监测梁的两端点的位移变化。

(2) 浅层相对位移监测。采用新型固定测斜仪即浅埋深的垂直链式布置方式(不必穿过滑移带)监测水平相对位移,而非传统大埋深需穿过预计滑移面的绝对水平位移监测方法。其优点:一是减少大量钻孔土建施工工程量及安装工作量,通过有效的数据分析,可分离出滑移体作为刚体的平动和转动位移量和滑移体受力变形曲线;二是避免常规固定式测斜仪在滑移体启动后错动的滑移面剪断下部仪器(通常安装在测斜管内)及电缆导致观测仪器失效,从而保证观测的连续性。

3.2.5 滑坡体的内部应力及变形

滑坡在变形破坏过程中,其内部应力会不断调整和变化,滑坡岩(土)体内部应力是对边坡变形破坏的本质反映,是一种预报参数。

对监测的边坡施加摄动力并进行反演分析来预测边坡的性态是近几年提出的,但现场经验表明,对滑坡体施加摄动力实施难度很大,而监测滑移体的下滑力分力表征滑移体的运动的方法很直观且具有代表性。采用该方法时,一是需把监测锚杆、锚索或高强度柔性杆送到滑移面的另一侧并可靠地锚固好;二是滑移体启动后,安装在滑移体上的活动端具有恒阻特性,保留适应早期大位移变形的裕量。为实现上述目标,研发一次性全套管植入式微钻机,钻孔完成后将套管留置在钻孔中,从而保证锚杆、锚索等在套管内运动的通畅,以准确指示出滑移体上的活动端相对于远端锚固点(应力影响线外)的受力及变形量。该仪器是边坡启动后连续和准确预报边坡运动的又一可靠手段。

对于滑移体内深部位移及变形,可采用传统的单点或多点位移计的方式监测。

4 基于无线传感网络的实时监测及临滑预警系统

4.1 实时监测及在线数据分析

实时监测及在线数据分析是短期及临滑期预报的基础。判断边坡有滑塌的危险并预警是一个系统工程,从成功预报的工程实例上看,无论是斋藤迪孝法还是其他公认有效的方法,其成功预报来自于两方面:1) 足够可靠的观测仪器。这是基础,可准确监测滑移体变形、应变的速度和加速度。观测数据的实时性非常重要,尤其是对于剧动式高速滑坡。2) 成功的预报理论和模型。预报是对变形、应变速度及加速度接近最大值过程的系统判断(主要是线形和阈值),基于对滑坡体岩(土)性状尤其是可能破坏形式的透彻掌握,可使预报的准确度达到数天至数小时,即实现临滑期安全预警。

4.2 系统组成和网络拓扑结构及工作方式

滑坡实时数据采集及预警系统是基于虚拟仿真服务器的分布数据采集及数据管理系统,由无线采集传输单元(WCU)、现场中继单元(FIU)及远程数据服务器(集群)组成,支持有线、无线等多种网络拓扑结构,实现监测数据的实时采集及自动处理。基础的数据采集方式是以200~300 m为一个监测子区域布置传感器和无线传输遥测单元(WMCU),将整个监测区域分散成多个监测子区域,在子区域的中心附近布置现场FIU形成子网络系统,多个子网络组成高度分散的分布式网络系统(见图3)。

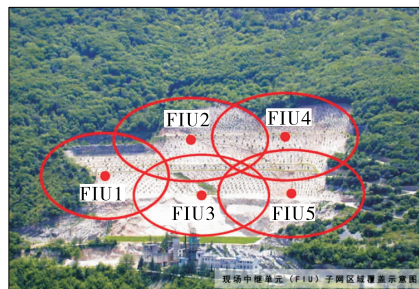


图3 节点单元(无线数据采集单元)地面模拟布置

系统工作时,监测工作站的计算机通过软件发出采集指令,指令通过移动公网发送至现场FIU,FIU再将指令发送给子区域内的所有节点单元(WMCU);WMCU收到指令后将传感器的模拟信号或频率信号变换成数字信号并通过无线网络传输

给附近的 FIU;FIU 收到附近全部 WMCU 发来的数据后,将数据打包通过移动公网发送到移动或电信的中心数据服务器集群;服务器通过宽带将数据发送到监测中心的计算机,计算机将采集的数据进行分析处理,将正常数据存入数据库,数据异常时启动专家系统对各模块的数据进行评估,经综合判断确系异常时则发出警报。

4.3 组成单元的技术指标

(1) 无线采集传输单元(WCU)。为超低功耗无线 120~433 MHz 传输模块,其技术指标如下:工作频率为 120~433 MHz;组网距离,非通视时为半径 300~500 m,通视时为半径 2 000 m;组网规模为单个汇聚节点支持 200~1 000 点;通信延迟,200 节点以下时 <10 s,1 000 节点以下时 <20 s;值守功耗为 1 mA/3.7 V;电池维护周期为 2~5 年,平均 5 min 刷新一次传感器。

(2) 现场中继单元(FIU)。工作频率为 120~433 MHz 转 2G 或 4G 公网;组网距离无限制;组网规模为汇聚节点支持 200~1 000 点,汇集节点通过 2G 或 4G 网络接入 Internet;通信延迟,200 节点以下时 <10 s,1 000 节点以下时 <20 s;整个网络所有传感器的刷新时间,200 节点以下时为 1~3 min,1 000 节点以下时为 5~10 min;值守功耗小于 20 mA/12 V;市电或太阳能电池+蓄电池供电。

(3) 远程数据服务器集群。汇总到现场的多个中继单元的监测数据流通过现场移动公网传输至指定的电信或移动的数据业务机房。进行数据服务器集群部署和数据分析处理的方式有如下 3 种:1) 在用户的办公室或数据中心建设镜像数据服务器硬件系统进行数据处理;2) 在电信或移动的机房内放置托管服务器系统,用户使用远程终端进行访问;3) 向移动运营商申请虚拟服务器,用户使用远程终端进行访问。

4.4 采用无线传感网络的优势

(1) 组网容量大,无线采集传输单元(节点单元)和中继单元的规模不受限制。

(2) 高度分散的网络特性,监测点布置灵活。

(3) 观测频次高、实时性好,数据完整性好。

(4) 采用商用虚拟服务器存储数据,成本低、可靠性高。

(5) 无通信电缆及外部供电,可大幅度减少土建工作量及传感器遭雷击的风险。

5 结语

该文提出了一种针对公路边坡单个隐患点进行实时监测的无线传感网络解决方案,其组网规模、响应时间、传输方式与公路边坡的监测规模及要求相匹配。区别于常规的有线/无线监测系统,基于无线传感网络的边坡监测和临滑预警系统具有实时在线监测的特点,通过实时数据采集和分析,可获得滑移体表面和内部的变形及运动速率,为公路边坡临滑期安全预警提供基本判据。文中提出的滑坡监测创新方法可降低系统总体实施费用和难度,但其实用性还有待于实际工程的进一步检验。

参考文献:

- [1] 唐启涛,陶滔.无线传感器网络综述[J].网络安全技术与应用,2008(2).
- [2] 郑东健,顾冲时,吴中如.边坡变形的多因素时变预测模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17).
- [3] 李悼芬,陈虹.雨水渗透与香港滑坡灾害[J].水文地质工程地质,1997,24(4).
- [4] 李爱国,岳中琦,谭国焕,等.香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5).
- [5] E W Brand, J Premchitt, H B Philipson. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, 1984.
- [6] Tiande Miao, Zhongyu Liu, Yonghong Niu, et al. A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 38(2).
- [7] 刘俊.日本铁路防灾系统对我国铁路的启示[J].铁道运输与经济,2011,33(6).
- [8] 李为民,黄志怀.粤赣高速公路高边坡安全自动化监测试验研究[J].中外公路,2006,26(2).
- [9] 方海清.高速公路路堑高边坡变形监测分析[J].公路与汽运,2015(5).
- [10] 黄兴鹄.边坡自动化监测方法:以香港为背景进行讨论[J].土工基础,2002,16(2).
- [11] 李天斌.滑坡实时跟踪预报概论[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(4).
- [12] 裴华富.高速公路高边坡 FBG 传感器监测及稳定性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [13] 魏丽,单九生,章毅之,等.暴雨型滑坡灾害形成机理及预测方法研究思路[J].江西气象科技,2005,28(3).