

三峡库区崩滑地质灾害变形监测技术研究及应用^{*}

魏学勇 欧阳祖熙 周昊 李捷 韩文心

(中国地震局地壳应力研究所,北京 100085)

摘要 以三峡库区巫山-万州段为例,介绍了GPS在滑坡变形监测中的应用,并开展了InSAR和声发射技术在滑坡、危岩体变形监测应用的试验性研究。同时,根据实际需要,还研制了基于GPRS的地质灾害无线遥测系统,实践证明,该系统具有工程应用价值。

关键词 三峡库区;地质灾害;变形;监测技术;应用

中图分类号:P315.72

文献标识码:A

STUDY AND APPLICATION OF GEOLOGICAL HAZARD MONITORING TECHNOLOGY FOR LANDSLIDE IN THREE GORGES RESERVOIR AREA

Wei Xueyong, Ouyang Zuxi, Zhou Hao, Li Jie and Han Wenxin

(Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085)

Abstract The geological hazards, such as landslide, are widely distributed in the Three Gorges reservoir area. High precision deformation monitoring is important to the geological hazards monitoring and early-warning. Taking Wushan-Wanzhou area for example, the application of GPS to the landslide monitoring is introduced and the experimental studies of InSAR and AE technologies in landslide monitoring have been developed. The geological hazards wireless remote monitoring system based on GPRS is developed, and it is proved that this system is applicable in the engineering field.

Key words: the Three Gorges reservoir area; geological hazards; deformation; monitoring technology; application

1 前言

三峡水库是世界上特大型水利枢纽工程之一。由于该地区地质构造复杂,河溪深切,坡陡谷深,加上降水充沛,是崩滑、泥石流等地质灾害多发区^[1]。三峡水库建成后,库水位将在145~175 m之间变动,水位的骤然升降必然引起库区周边地区工程地质水文地质条件的变化,比如地下水渗流场的变化、岩土体物理力学参数的降低等,这些变化将导致原来较为稳定的边坡变得不稳定,而且还可能诱发老

滑坡重新复活。水位的波动还将引起库岸坍塌、库岸后退等问题。这些问题严重影响库区人民生命财产的安全,并关系到三峡库区经济的可持续发展和三峡工程最大效益的发挥。因此,在库区开展崩滑地质灾害变形监测及预报预警具有重要的意义。

笔者所在课题组自1998年以来一直在三峡库区巫山、奉节、万州等区县开展崩滑地质灾害监测预警工作,并根据实际需要,将一些变形监测的新技术,如InSAR干涉测量、声发射技术和自动遥测技术等引入到库区地质灾害变形监测预警中,取得了

* 收稿日期:2010-03-12

基金项目:国家“十五”科技攻关项目(2001BA604A02)

作者简介:魏学勇,男,1974年生,助理研究员,主要从事地质灾害变形机理及监测预警研究。E-mail: xiaowei8566@sina.com

重要成果。

2 GPS 大地测量技术用于滑坡变形监测

2.1 GPS 监测网布设及施测

由于 GPS 具有精度高、全天候、监测点无须通视等优点,已在地壳形变、大地测量、地质灾害监测、矿山测量等领域获得了较为广泛的应用。

开展滑坡变形 GPS 测量,首先要布设 GPS 监测网,一般按主滑动方向和滑动面布设测线,不同测线组成监测网。为掌握滑坡的整体变形态势,一般在滑坡体的前缘、抗滑段、滑动段以及后缘都要适当布点。GPS 变形监测网一般由基准网点和变形监测网点构成。基准网点用于对整个监测网提供精确的坐标,通常埋设在稳定的基岩上,或设在变形区以外,并且要求适合 GPS 观测和长期保存;变形监测网点是指位于滑坡、高边坡或建筑物及地基上的变形监测点,点位一般根据监测对象的形态特征、变形特征、周围环境等因素来确定,变形监测点与基准点组成三角测量网以监测滑坡体的变形和位移。

GPS 监测网的基准和观测图形设计对监测精度有较大的影响。对于全球性大地动力学的、地壳形变 GPS 观测网须采用国家级 GPS 基准点,对于城市或工程应用的 GPS 监测网,如果没有国家级 GPS 基准点,也可采用城市或工程用的控制点。笔者在应用 GPS 对万州、巫山等处滑坡进行变形监测时,由于当时三峡库区首级 GPS 监测网尚未建成,因此选用当地的城市控制点作为 GPS 测量的基准点(表 1)。

表 1 巫山新城区控制点(单位:m)

Tab.1 Control point coordinates in new district of Wushan county (unit:m)

控制点	X 坐标	Y 坐标	H 高程
SD05	3 439 518.499	37 393 378.095	160.812
SD13	3 439 566.471	37 394 058.747	177.521
SD06	3 441 534.780	37 392 998.052	439.497
K006	3 439 766.768	37 391 993.467	340.152
K007	3 440 166.116	37 392 272.222	383.719
K015	3 440 065.923	37 392 461.299	333.950

GPS 组网图形设计有较大灵活性,主要有点连式、边连式、环型网以及混连式。用户可以根据监测目标、精度要求、仪器类型、仪器数量选用不同的组网方案。对于滑坡变形监测,笔者认为适宜采用边连式组网方式(图 1),因为其几何强度高、具有较多

的复测边和非同步图形闭合条件,而且作业方法简单,扩展速度较快,在实际工作中获得了较多应用。

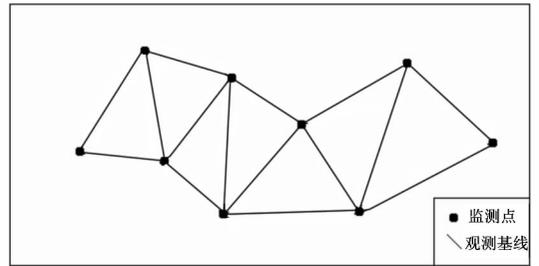


图 1 GPS 组网方式

Fig.1 Networking mode of GPS

为进一步提高 GPS 的测量精度,我们在实践中还采取了以下措施:GPS 监测网的每个基准点和变形监测点上都建有 GPS 观测墩,并设有强制对中装置;通过接收机定向(指北方向)安置以抑制天线相位中心的偏离误差;每次测量保证足够长的观测时间(一般不少于 2 个半小时);采用定机、定人、定时段进行观测。

2.2 滑坡 GPS 变形监测取得的初步成果

三峡库区由于其特定的自然地理、构造地质、水文地质条件,使该地区成为崩滑地质灾害多发区。其中,滑坡以万州、云阳、奉节和巫山等区县最为发育。据已有资料,万州城区圈定的崩滑体有 186 处,面积达 16.6 km²。目前,很多滑坡处于极限平衡状态,还有一些滑坡处于蠕滑阶段,随着库水位的不断抬升,滑坡处的地质环境不断恶化,可能导致这些滑坡变形加剧,甚至导致原来较为稳定的边坡变得不稳定。

自 1998 年以来,我们在万州市国土及移民部门合作下开展了万州区滑坡 GPS 变形监测示范研究,并把研究成果推广应用于巫山、奉节的崩滑地质灾害监测预警中,共建设 1 100 个 GPS 监测点,覆盖了近 100 处大型滑坡^[2]。图 2 为在巫山建设的 GPS 变形监测网布设图。图 3 为巫山滑坡 GPS 监测取得的初步成果。通过 GPS 变形监测,可以从整体上把握研究区滑坡灾害点的分布、变形趋势。

3 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术的应用

InSAR 具有全天时、全天候工作能力,不受天气气候和白天黑夜的影响,具有其他传统测量方法所无法比拟的空间连续覆盖、高自动化、高精度的监测地表形变的能力,已经在地壳形变测量领域获得了较多的研究和应用。我国一些学者已经把合成孔径

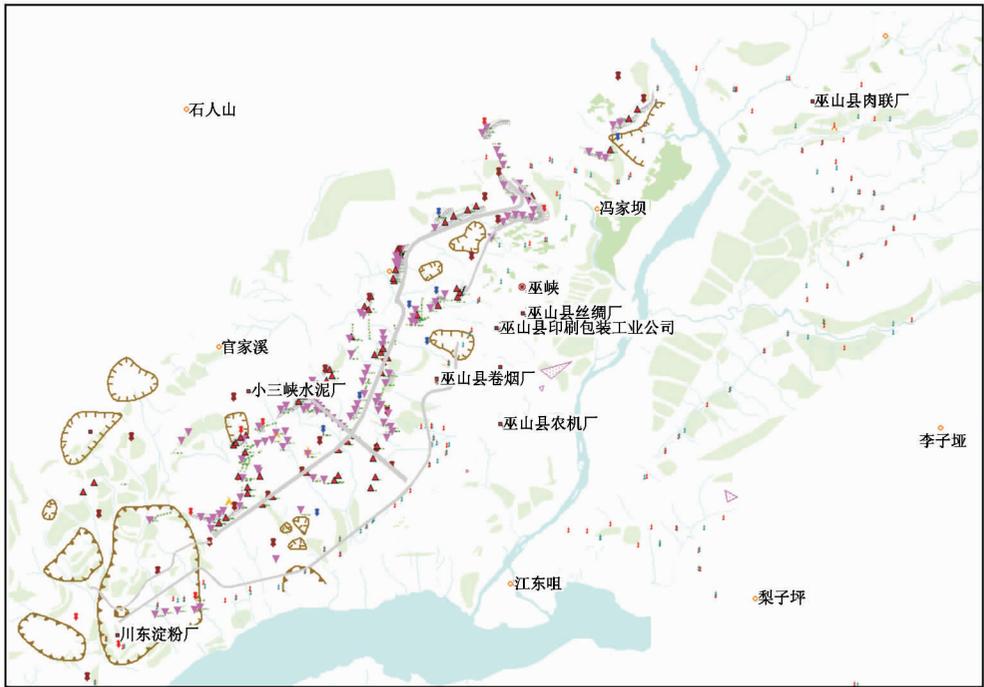


图2 滑坡变形 GPS 监测网布设

Fig. 2 GPS monitoring network for landslide deformation

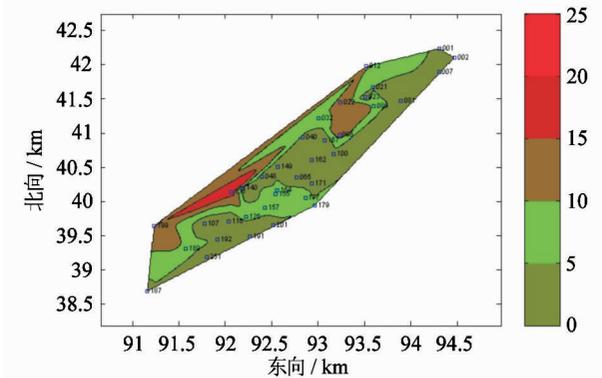


图3 滑坡变形 GPS 监测变形等值线示意图

Fig. 3 Deformation contour measured by GPS monitoring

雷达干涉技术应用于地壳形变、地震形变测量、火山监测以及地面沉降等观测方面,并取得了一些较满意的成果。研究结果也表明,InSAR 在地壳形变、滑坡灾害变形监测方面具有广阔的应用前景。

三峡地区植被茂盛,雨水充沛,地貌变动较大,不适于干涉雷达(InSAR)信号的获取,而且配准处理也比较困难。为此,我们采用角反射器技术以辅助进行 InSAR 信号处理。

角反射器是用三块三角形金属板制作的一种装置(图4),它能把照射其上的雷达波按原方向发射回去,使发射信号得到显著增强,进而在 SAR 图像上得以明确反映。角反射器具有对照方向适应性广、散射截面大、稳定性高等特点^[2-5]。

为探索角反射器干涉技术在滑坡变形监测中的

应用,中国地震局地壳应力研究所与德国地球科学研究中心和英国伦敦大学学院已就 InSAR 技术用于监测三峡工程万州库区滑坡监测开展合作,在万州和巫山等地安装了 14 个角反射器,多选在大型滑坡及稳定性较差的库岸段,以进行试验监测和研究。从 2005 年开始以一个月的周期获取 INSAR 数据,同时还联合进行 GPS 变形监测作为对比。试验证明,这些角反射器可以在三峡库区 SAR 遥感图像上被准确识别出来,通过影像数据干涉处理和修正,可以获得角反射器所在位置的相对位移。



图4 遥感角反射器安装

Fig. 4 Instation of corner reflector

4 声发射技术用于危岩变形监测

4.1 声发射技术

岩石声发射监测技术利用测定危岩、滑坡岩体

受力变形过程中所产生的微破裂信号强度、频度、信号的频谱特征及空间分布来判别岩质边坡的稳定性,最早应用于矿山应力测量,近 10 多年来逐渐被应用到崩塌、滑坡的监测中。声发射检测技术作为岩体动态监测方法具有以下特点^[6]:

1) 岩体声发射技术是一种实时动态方法,可以反映岩体稳定性的发展趋势和有效地预报岩体失稳的危险状态;

2) 声发射技术可以获取岩体临近失稳阶段的声发射值等参数,以更早地提供岩体受力损伤或破坏的信息,及时对边坡岩体出现危险状态实时监测预报。

3) 相对于当前其他检测技术而言,岩体声发射技术的单个测点监测范围更大。通常情况下,岩体声发射检测的一个测点监测范围以测点为中心,15~20 m 为半径的球体范围以内,两个测点间距可达 30 m 以上。

4) 岩体声发射技术还可以实现声发射源定位,即通过所监测到的信号推测出声发射源所在的位置。

4.2 声发射技术在万州危岩变形监测中的应用

危岩作为三峡库区主要地质灾害之一,是地层组合、地貌特征、水动力特性以及地震等因素耦合异变的结果。据不完全资料统计,三峡库区内危岩体量大,致灾几率大,仅万州城区,处于临界状态的危岩体就有 413 个,直接威胁居民 5 万多人,危岩失稳造成的直接经济损失达 30 余亿元^[7]。为尝试找到一种可靠的危岩垮塌监测预警技术,在对万州城区危岩进行工程防治的同时,我们还开展了采用声发射检测技术进行危岩实时动态监测的研究。

考虑到万州城区太白岩、天生城两地危岩灾害问题较为突出,因此,我们选用这两个区域作为研究区。在布设监测网时,首先要考虑的问题就是如何把压电传感器安装在靠近危岩最可能发生局部变形、产生裂缝的位置。经过对危岩工程治理现场的多次调研、勘察,认为将声发射信号接收探头安装在危岩锚钉的端部是合适的,并使一组十个探头形成线性阵列。信号处理及遥测仪器安放在阵列的中部,便于连接各信号接收探头,如此形成一个可对数百米区段内危岩崩塌的监测网。

声发射信号是极微弱的信号,而且常混杂着各种干扰,所以要求声发射检测仪具有高灵敏度,大动态范围,宽频谱响应和完善的数据分析处理功能。仪器由声发射换能器阵列,宽频带放大器,计算机信号处理器,无线传输单元和电源等 5 部分组成。太

白岩南坡危岩声发射遥测站在一个多月的工作期间,获取了大量的危岩声发射信号波形数据,这为深入分析危岩声发射特征以及干扰信号特征提供了第一手资料,图 5 是危岩声发射信号原始波形数据。

岩体声发射波形数据经过接收、转换和处理以后,可以从中提取一些重要的参数,如声发射总事件、大事件和频谱等。这些参数从不同角度反映了岩体破坏的标志、岩体动态变形趋势、裂缝大小和位置特征等。图 6 是声发射接收仪发送到监测预警中心的各通道的监测数据结果。

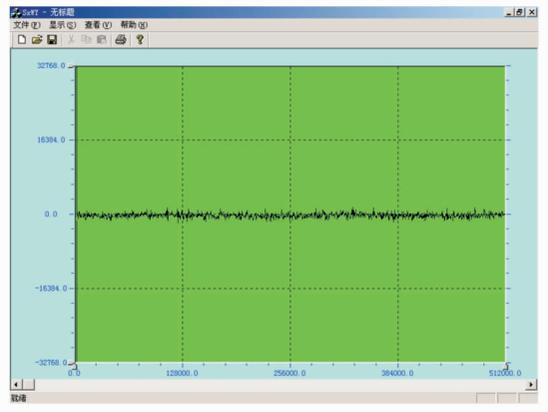


图 5 危岩声发射监测波形数据

Fig. 5 AE monitoring data of unstable rock

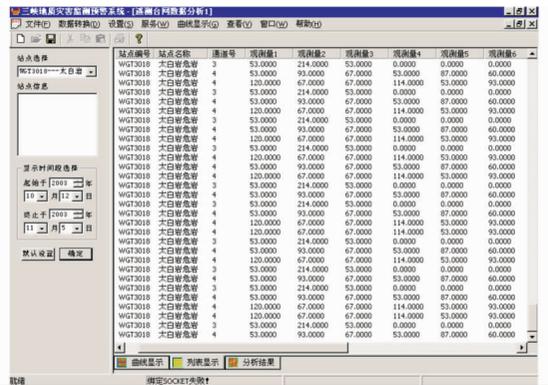


图 6 声发射数据结果

Fig. 6 Results of AE monitoring data

5 自动遥测技术在崩滑地质灾害监测中的应用

5.1 地质灾害无线遥测台网系统^[8]

地质灾害无线遥测台网是基于 GPRS 技术,在整合先进的传感器测量技术、计算机信息处理技术与通讯技术的基础上开发研制的新型遥测系统。系统主要由监测数据采集子系统,数据传输子系统,数据处理及决策支持子系统等几部分组成,系统结构框图见图 7。

1) 监测数据采集子系统

该子系统主要由各种类型的测量传感器、内置

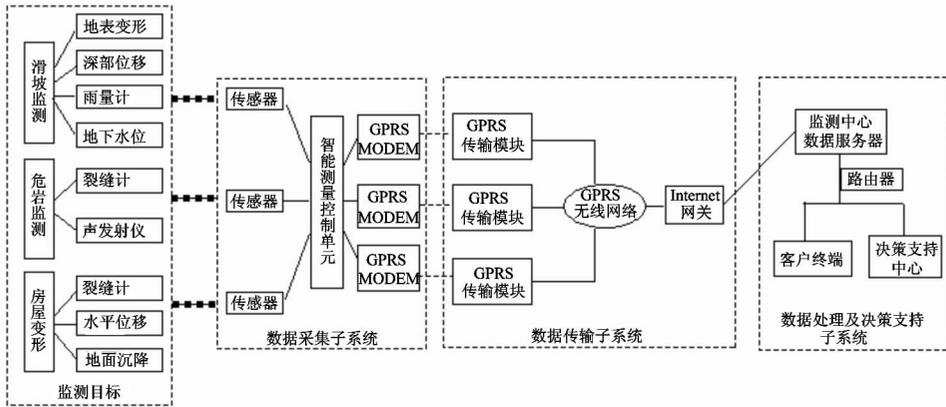


图7 地质灾害无线遥测台网系统构成示意图

Fig.7 Black diagram of the structure of tele-monitoring system of geological hazards

微型计算机的智能化测量单元、电源以及 GPRS MODEM 4 部分组成。智能化测量单元的主要功能就是对各种测量传感器的信号进行处理、放大,进行数据采集并控制 GPRS MODEM 完成数据、指令传输,这部分功能都是由内置的单片机来实现的。智能化测量单元可以接入 8 道数字量和 3 道模拟量或者 16 道数字量和 3 道模拟量,接入的传感器有钢筋应力计、锚杆(索)测力计、渗压计、井下定点倾斜仪、地表倾斜仪、激光测距仪、裂缝扩张仪、温度计、自动雨量计等十余种,可满足多种监测需要。由单片机控制 GPRS MODEM 可进行自动拨号、断线重拨以及自动恢复通讯,使 GPRS MODEM 始终附在 GPRS 网络上,随时进行数据发送和指令接收。当接收到数据中心服务器发来的控制指令时,单片机可以控制遥测子站,调整工作状态,如系统复位、改变采样频率等。

2) 监测数据传输子系统

监测预警数据传输子系统主要包含 GPRS 传输模块、GPRS 无线网络和 GPRS 网关 3 部分。GPRS 数据传输模块采用 RS232 串口与数据采集子系统连接,其类似于 GPRS 手机的数据收发集成电路模块,能够在 GPRS 网络覆盖地区以 TCP/IP 网络的方式进行数据传输。在具体实现中,GPRS 传输模块须在系统中注册为合法用户,并设置静态 IP 地址。数据采集器通过 GPRS 数据传输模块和 GPRS 网络传输到后台的数据处理服务器,同样,后台数据服务器也通过 GPRS 网络向数据采集子系统发送各种控制指令。

3) 数据处理分析与决策支持子系统

该子系统主要由数据处理服务器、客户终端、决策支持中心以及运行于服务器和客户机上的数据处理和监控软件组成。这些软件主要采用 GIS 集成技

术开发完成,包括网络数据收发、系统参数设置、数据解算以及数据发布等模块。客户终端和决策支持中心通过局域网和 Internet 网络可以和后台数据服务器连接以实现数据共享,可以进行地质灾害稳定性分析以及变形监测预报预警信息发布等。地质灾害无线遥测系统具有以下特点:(1)监测参数多,精度高,崩、滑地质灾害监测内容丰富,监测方法多样;(2)依托先进的通讯技术、便于安装维护,具有高容量、覆盖范围广、运行成本低的特点;(3)自动遥测,无人值守,能进行数据无线传输。

5.2 遥测台网在地质灾害变形监测中的应用

巫山某滑坡体位于新县城中心地带,滑坡区内高程为 278 ~ 492 m,为河谷坡地形,坡角一般为 10 ~ 30°。滑坡体为第四纪坡积物,含碎石、粉质粘土,厚度约 0 ~ 12 m,总体积约 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由于本区域为斜坡区,公路及房屋等建设需对原始斜坡进行不同程度的开挖和切坡,2001 年已发现有变形发生。地勘资料表明该滑坡周界明显,滑面渐趋形成,属推移式滑坡。为掌握滑坡的变形趋势,在能反映滑体变形特征的部位安装了 4 台遥测子站,并沿主滑方向形成一条测线(图 8、9)。

激光位移的数据表明(图 10),由于开挖边坡加大了坡角,滑坡体原有的平衡态遭到破坏,引起边坡内应力调整,出现了一个塑性蠕动区。受滑坡体上部重载荷的作用,上部土体向前挤压,滑坡体中下部向临空面的蠕滑变形非常明显,变化量约达 25mm。在滑体中部采用抗滑桩治理竣工后,位移变化明显变缓。2004 年 2 月上旬,滑坡体抗滑桩治理全部竣工后,滑坡体变化微小,这反映出抗滑治理工程对滑体起到了遏制作用。监测数据表明,该滑坡体的抗滑治理效果良好。

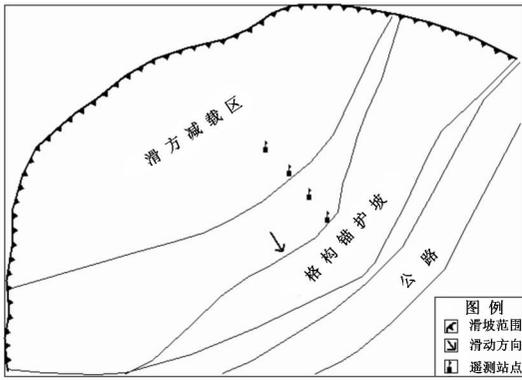


图8 遥测站点布设图

Fig. 8 Layout of tele-monitoring points



图9 遥测台网安装

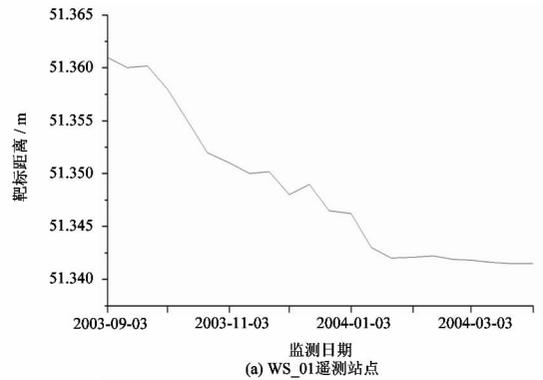
Fig. 9 Installation of remote monitoring network

6 结束语

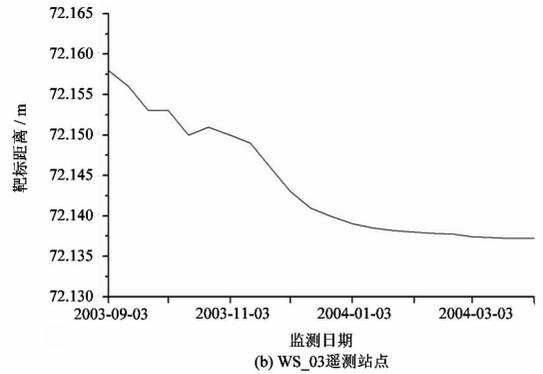
1) 三峡库区是滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害多发区,利用多种技术开展地质灾害监测预警对于保障人民生命财产和三峡工程最大经济效益的发挥具有重大意义。

2) 在采用 GPS 技术进行滑坡变形监测的同时,还对利用 InSAR、声发射技术来监测滑坡、危岩体的变形进行了试验和探索。试验结果表明,这些新的监测技术能够有效地跟踪监测滑坡、危岩体的动态变化过程,值得进一步研究推广。

3) 依据三峡库区地质灾害的实际需要,研制开发了基于 GPRS 的地质灾害无线遥测系统,该系统具有技术先进、自动遥测、精度高、测量参数丰富等特点,具有很高的工程应用价值。自动遥测技术也代表了现代测量技术发展的一个重要方向。



(a) WS_01遥测站点



(b) WS_03遥测站点

图10 遥测台网位移变化曲线

Fig. 10 Displacement curve of remote monitoring network

参 考 文 献

- 1 刘俊英. 三峡库区地质灾害浅析[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, (增刊): 165 - 168.
- 2 欧阳祖熙, 等. 基于 3S 技术和地面变形观测的三峡库区典型地段滑坡监测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 3 203 - 3 210.
- 3 薛怀平, 等. 三峡库区秭归 GPS-CR 滑坡监测网的建立[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, (增刊): 178 - 180.
- 4 王志旺, 李端有. 3S 技术在滑坡监测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 33 - 36.
- 5 陈基伟. InSAR - GPS - GIS 数据整合在地面沉降研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, (3): 87 - 91.
- 6 刘祖强, 等. 工程变形监测分析预报的理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- 7 陈洪凯, 等. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 614 - 619.
- 8 欧阳祖熙, 等. 一种新型地质灾害无线遥测台网[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 18(1): 90 - 94.