

常规仪器与全球定位仪相结合的 全自动化遥控边坡监测系统*

殷建华^{1,3} 丁晓利^{2,3} 杨育文^{1,2} 刘志强^{3,4} 黄丁发^{1,2,3} 陈永奇^{2,3}

(¹香港理工大学土木及结构工程系 香港) (²香港理工大学土地测量及地理资讯学系 香港)

(³香港理工大学岩土工程技术中心 香港) (⁴晃安建筑工程有限公司 香港)

摘要 介绍了一集常规仪器与精密全球定位仪器为一体的全自动化遥控边坡监测系统的开发与应用。集成的自动化边坡监测系统包括仪器选择、技术要求、仪器集成方法、监测数据处理等。最后,还介绍该系统对一松散填土边坡的监测结果。

关键词 边坡, 自动化, 边坡监测系统, 多天线 GPS, 数据库

分类号 U 655.55

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)03-0357-08

INTEGRATION OF CONVENTIONAL INSTRUMENTS AND GPS FOR REMOTE AUTOMATIC MONITORING OF SLOPES

Yin Jianhua^{1,3}, Ding Xiaoli^{2,3}, Yang Yuwen^{1,2}, Liu Zhiqiang^{3,4}, Huang Dingfa^{1,2,3}, Chen Yongqi^{2,3}

(¹Department of Civil & Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

(²Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

(³Centre for Ground Engineering and Technology, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

(⁴Fong On Construction & Engineering Co., Limited, Hong Kong, China)

Abstract This paper introduces the development and application of an integrated automatic slope monitoring system. The system combines (a) advanced conventional instruments and (b) accurate global positioning instruments. The development includes selection of all instruments, technical requirements, integration method and post-process of monitoring data, etc. This system has been installed in a real loose fill slope to verify its functions and reliability of the integrated system including remote data acquisition. Preliminary monitoring data are presented and discussed in this paper.

Keywords slope, automatic, slope monitoring system, multi-antenna GPS, database

1 前 言

监测系统在国内工程中广为应用。例如,在大坝中埋设仪器观测变形、孔隙水压力等,在边坡中设置测斜仪监测所发生的位移等。在大型工程中,

监测系统是工程建设中不可缺少的一部分。随着信息化施工的实施,人们越来越认识到监测工作的重要性。在一些小型的工程中,如深基坑的开挖,现场监测已经被用来指导施工和修正设计。

就目前监测工作中所采用的方法来看,虽然都能根据监测数据获取某一参数,如变形率,但存

2002 年 8 月 21 日收到初稿,2002 年 9 月 25 日收到修改稿,2003 年 10 月 3 日收到改定稿。

* 香港研究基金会资助项目(PolyU5090/98E, CRC4199, A/C : 3-ZB39)。

作者:殷建华 简介:男,博士,现任教授,主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail:cejhyin@polyu.edu.hk。

在一些问题,如自动化程度不高,监测过程中人为因素影响较大等。例如深基坑,为了获取某一深度的侧向变形,较常用的方法是将测斜仪放入套管中,一人提升或降下测斜仪,另一人记录下数据,然后将这些监测数据拿回去进行分析、处理,最后才能得到结果。这一方法的缺点是:(1)不能进行一天二十四小时自动监测;(2)深基坑出现危险时,无法派人在现场测量;(3)测量过程人为因素大。

本文介绍的监测系统,完全实现了监测数据的自动读取、存储和发送。一旦该系统安装完毕,它可实现一天二十四小时监测,技术人员不必亲临现场,只需在办公室打开电脑,就可以实时得到监测数据。当这些数据自动地输入数据库后,立即可以得到所需的结果。另外该系统集同轴电缆时间域反射仪(Time Domain Reflectometry-TDR)^[1,2]和精密全球定位系统(Global Positioning System-GPS)^[3]等高新技术于一体,从而使得其功能具有独特性和全面性。

2 系统的组成

系统的组成决定于所设计的系统的功能。该系统一方面可以用来监测边坡表面和土体内位移、孔隙水压力、现场雨量大小、滑裂面位置等与边坡滑动有关的重要参数;另一方面可实现全自动化的监测和数据的收集、存储、发送、分析等功能。该系统用于监测现场的仪器可分为 2 部分:(1)传感部分,用于获取某一参数值;(2)数据传输、转换部分,用于监测数据的收集、存储、远距离传输与交换。以下将对这 2 部分分别加以介绍。

2.1 传感部分

该系统中涉及 5 种类型的“传感器”: (1) 固定式测斜仪, (2) 孔隙水压仪, (3) 雨量仪, (4) TDR, (5) GPS 天线。

在以上仪器中,前面 3 种在岩土工程中广为应用。测斜仪用于监测某一深度处土体或岩体的转角,与常规方法不同的是,它直接固定于套筒中,不能上下移动。孔隙水压仪既可以埋于土体中,又可以放入预先设置的钻孔中,用于监测水压变化。雨量仪固定于监测现场的某一较高位置,获取雨量变化的数据。3 种仪器可直接连接于数据存储仪上(孔隙水压仪需经信号转换),均可实现数据的远距离传输。

同轴电缆 TDR 最早被应用于电力系统,用于确

定电缆断裂的位置,后来经过改进之后,被应用于岩土工程,用来确定岩土变形^[1],土体含水量等。该系统将 TDR 技术嵌入其中,用来确定边坡滑裂面的位置。TDR 可以作为一个独立的系统进行工作。它包括两部分:同轴电缆和信号测试仪。基本工作原理^[2]是:当 TDR 由电缆线在钻孔中埋设好了之后,测试仪沿着该电缆输入脉冲电波,假如,电缆由于某处变形而发生弯曲或卷曲,从而导致本身阻抗发生变化,当脉冲信号遇到这样的位置,就会发生反射,测试仪通过比较反射与发射信号,确定该点的反射系数。由于特定电缆信号传播的速度是已知的,测试仪记录发射时间和反射时间,据此就可以确定反射点的位置。在实际应用中,反射波的振幅像大钉状,表明电缆的受损程度、幅度越大,表明该处变形越大,从而可以确定滑裂面的位置。而在反射波中,大钉状振幅随时间改变的程度,是与变形率相关的。在该系统中所采用的 TDR100,可以同时连接 8 根电缆,在边坡中确定 8 处滑裂面的位置。同轴电缆价格便宜,在实际应用中其长度可以从几米到几百米。

GPS 已被广泛应用于定位、导航等,而在岩土工程中的应用并不多见,主要原因是其价格较高。按常规, GPS 一套仪器通常需十几万到二十几万人民币,若应用于边坡监测,该仪器只能用于一个点的观测。为了解决造价较高的问题,香港理工大学开发了有自主知识产权的多天线 GPS^[3]系统,使得一套 GPS 可以连接多个天线。目前使用的 GPS 仪器上可以连接 8 个天线,同时监测 8 个点,使得仪器造价只有同等功能常规 GPS 造价的 25%。多天线 GPS 系统由 2 个站组成:参考站和监测站。参考站由一套常规的 GPS 组成,以提高测量精度;监测站由一个特殊的开关仪控制,多个监测天线连接于此仪器上,在监测过程中,按顺序的先后次序记录下每个天线的监测数据,并存储于其中。

在本文介绍的自动化边坡监测系统中,将多天线的 GPS 融合其中, GPS 天线作为一个特殊的传感器,用来监测边坡表面的位移。大家知道,测斜仪也可监测位移,但是测斜仪只能获得某处的转角,需通过计算才能得到位移值;另外,它也无法直接得到表面位移和垂直位移的大小。GPS 则不同,它可以直接观测到边坡表面位移的大小,而且除了水平面的 2 个方向外,边坡垂直方向的下陷或隆起都可以观测到。从造价上看, GPS 也有优势:一个天线一千到两千元人民币,而监测一个钻孔的固定式

测斜仪组,其价格是 GPS 天线的几倍到几十倍(根据钻孔的深度与测斜仪的数量来确定)。

2.2 监测数据的存储与远距离发送

本文介绍的全自动化遥控边坡监测系统将所有的监测数据都存储于监测现场监测站,然后自动地或按用户的要求发送给用户。数据的取样、记录、存储、远距离发送过程,都由程序控制,实现了自动化操作。

由于多天线 GPS 每次记录、存储的数据达 1MB(由监测天线的数量和记录的间隔而定),一般的数据存储仪无法满足这种大容量的要求,因此,它的数据与其他仪器的数据必须分开存储和发送。监测现场用一个笔记本电脑与参考站相连,存储该站的数据;监测站本身有大容量的硬盘,用来存储该站的数据。两站分别与两个 MODEM 相连,使天线进入移动电话 GSM 网络,实现数据的远距离传输。

其他仪器如固定式测斜仪、TDR 等,直接和一个数据存储仪相连,其监测数据存储于该存储仪中。一个为用户开发的程序控制测斜仪等的取样率、存储间隔、数据发送、预警阈值等。该程序考虑监测现场仪器的种类、数量、数据的控制方式甚至单位转换等因素,方便了用户的操作和数据的后期处理。该程序由 PC208W 商用程序下载到数据存储仪中,存储在程序存储区,只要用户不更新,它可以一直存储于此,不管数据存储仪有无电源供应,它都不会自动消失。由于使用了可选择最终存储空间,数据存储仪最大存储容量可达 2MB(一般的只有 1MB 存储空间),有 524 288 存储位。在一般情况下使用,可以存储一个月的数据(依据监测仪等的数量)。由于该系统采用自动化的数据传输,因此不必等一个月才传输一次数据,无需考虑存储仪存储空间的大小,监测数据都不会被丢失或覆盖。一个 MODEM 与存储仪直接相连,由天线登录入移动电话 GSM 网络,实现远距离自动化数据传输。

在该系统中,除了以上所介绍的两个主要部分外,在监测现场还有能源供应、警报器以及仪器的保护等设施。若在监测现场没有交流电供应,一般可采用太阳能面板与 12V 的蓄电池相连,作为系统的能量供应。由于有很多仪器,如数据存储仪、GPS 监测站等,需要留在监测现场,因此它们需要保护装置。在国外一般采用大的钢丝笼,将仪器放入其中,固定于一铁杆上。当然,较安全的方法,可在现场修一临时的小工房,将仪器放入其中。在监测过程中,安排一人在现场值班即可确保设备安全。

3 系统的集成方法

如前所述,该监测系统中有 5 种不同的仪器:测斜仪、孔隙水压仪、雨量计、TDR、多天线 GPS。每种仪器所获得的物理参数不同,记录的数据大小不同,甚至数据的形式也不同。如何管理好这些数据,实现自动化存储和发送、数据分析等是一件富有挑战性的工作。在该系统中,笔者所采用的方法,一是仪器的集成;二是监测数据的集成。

3.1 与 TDR 集成的方法

若监测现场所有的仪器都共用一个数据存储仪,实现数据的取样、记录、存储、发送等自动化过程,这是最优方案。正如前面所述,由于和一般的数据存储仪相比较,多天线的 GPS 的数据量特别大,它只有作为一个单独的系统而存在,无法进行集成。下面介绍其余 4 种仪器的集成方法。

前面讲到,TDR 可以作为一个独立的系统工作,来确定边坡滑裂面的位置。但是,在这种情况下,技术人员必须到监测现场,进行手工操作,而无法实现自动化的数据传输。与测斜仪相比较,TDR 每次记录的数据是比较大的。例如,5 个测斜仪、1 个孔隙水压仪和雨量计等,一次记录的数据只有 12 个存储位,而 TDR 一次存储需占用 265 个存储位。为了合理使用存储空间,将 2MB 的空间分成两个区:一个存储测斜仪、孔隙水压仪等数据;另一个专门为 TDR 准备,只存储反射系数等。

当数据存储仪将存储空间分成两个区之后,TDR 直接连接于其上,它就可以与其他的 3 种仪器一起,实现监测过程的自动化。

3.2 监测数据的集成

多天线的 GPS 虽然硬件在监测现场无法与其他仪器一起同时实现数据自动化存储、发送等,但它的数据与其他仪器的数据一起同时存储于一个软件中,实现了数据后处理的系统集成。这种集成是必须的,也是极关键的。因为监测的原始数据来自不同的仪器,用户很难理解它们,也没有类似图形那样直观的表现形式。当系统中所有的监测数据在同一软件中进行处理之后,为用户提供了充分的信息,用户可以方便地获得感兴趣的结果,然后对边坡的稳定作出判断。

由于没有发现可适用于该系统的商用数据分析软件,因此,针对该系统监测数据的特点,笔者在 Microsoft ACCESS 平台上开发了 MONITORDATA

数据库。利用该数据库，用户可以实现自动下载输入的数据文件，存入数据库中。监测数据进入该数据库中，可实现计算功能，如根据测斜仪得到的转角可计算出位移；还可实现各种图形显示功能，如原始数据经过转换之后的数据显示、GPS 位移与平面移动以及沿钻孔的水平位移显示等。既可以用手工选择某一时段，也可以全过程模拟监测情况。同时，该数据库可以比较同一时段由测斜仪获得的位移和由 GPS 观测得到的位移，还可以在三维图片上由用户直接选择某一仪器，可以得到它的监测数据、计算结果(如需计算的话)，可以很方便地对监测现场边坡的实际状况进行分析，从而获得可靠的结果。

4 自动化边坡监测系统的构成

前面介绍了该系统在监测现场的组成与系统关于集成方面的技术问题。其实，在远离现场的数据处理中心，也有不可缺少的设备，那就是一台计算机与连接其上的 Modem。计算机用于监测数据管理，Modem 用于远距离数据下载。图 1 表示了整个自动化监测系统中所包含的仪器、各仪器间的关系以及监测数据的管理分析过程。图 2 为监测仪器示意图。

5 现场试验

为了验证该边坡监测系统的有效性，在香港新界香港大学嘉道理农业研究中心的一人工填土边坡上进行了试验，如图 3, 4 所示。该边坡由松散的完全风化花岗岩(CDG)材料填筑，施工过程中不夯实，最大填土高度 4.5 m，建在一倾角 12° 的山坡上，占地面积 9 m×11.7 m，上面有 9 m×4 m 的加载平台，人工填土边坡倾角为 33°。填土边坡还采用 2 排共 8 个 7 m 长的土钉加固。该填土边坡将在平台上逐步加载，直到产生滑裂面、破坏为止。

填土坡为 2001 年底修筑完成。所有的监测仪器在今年初才陆续安装。5 个测斜仪，其编号分别为 1755, 1756, 1757, 1759, 1760，安装在一个钻孔中，1755 号在最上面，1760 在最下面。一个孔隙水压仪埋在填土底部，位于原状土和填土交界面上；6.5 m 深钻孔用于埋设 TDR 电缆，在靠近填土坡 15 m 远的地方有一小工房，用于存放数据存储仪、参考站和监测站等，在其顶上，雨量仪固定在上面；3 个 GPS 天线沿同一剖面布设，编号分别为 03, 05, 08，作为监测天线；另一天线靠近小工房，作为参考天线。仪器安装如图 3 所示。

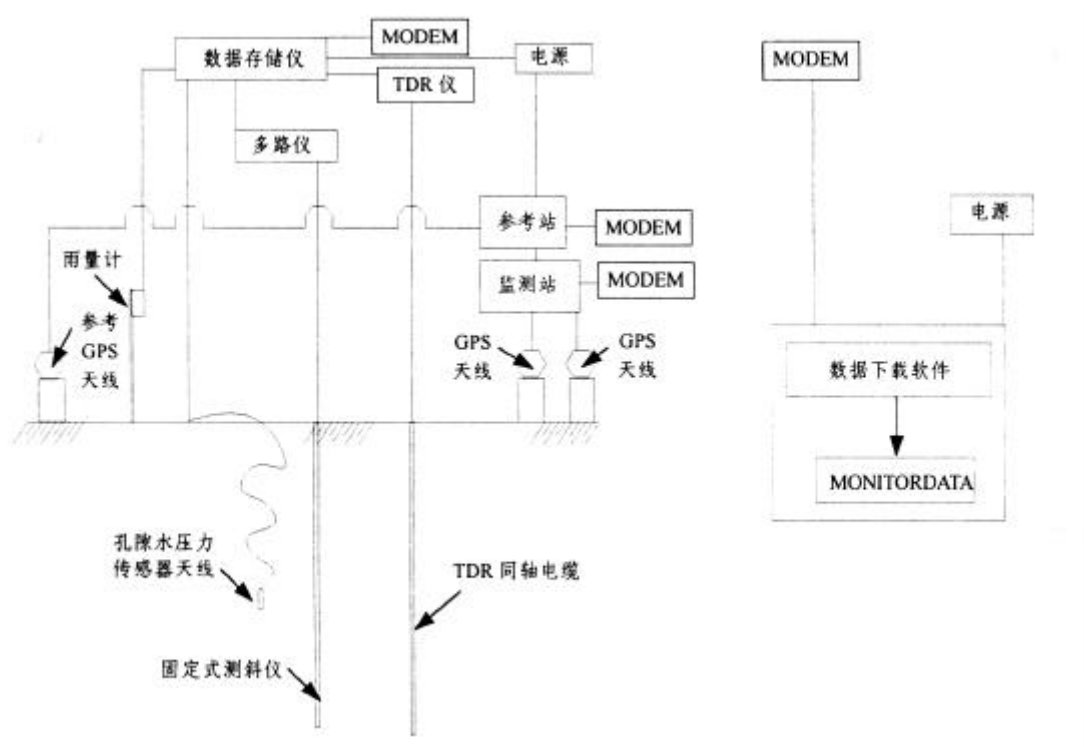


图 1 自动化监测系统的构成

Fig.1 Organization structure of the automatic integrated monitoring system

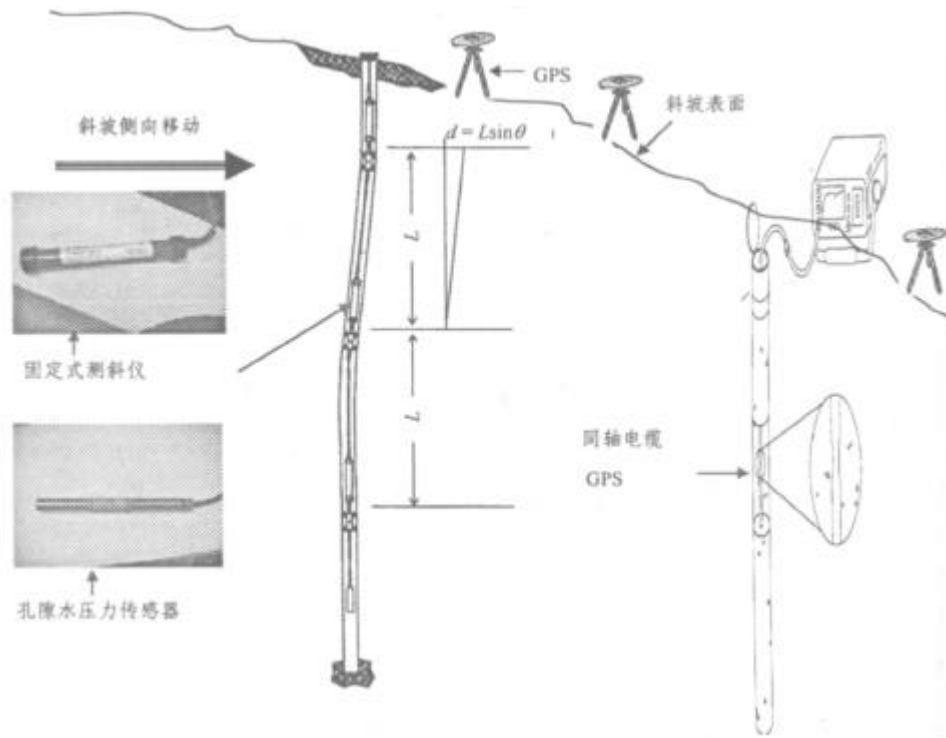


图 2 一斜坡处固定式测斜仪、孔隙水压力传感器，同轴电缆和 GPS 天线布置示意图

Fig.2 A schematic arrangement of in-place inclinometers , pore water pressure transducer , TDR and GPS antennas at a slope

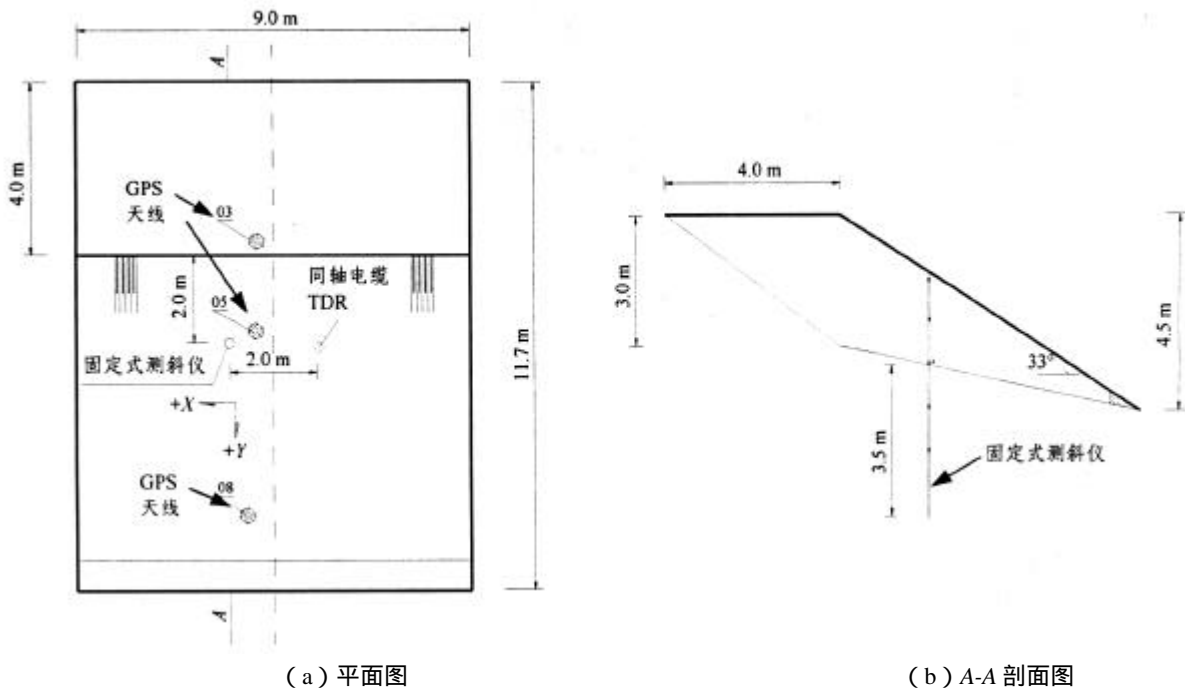
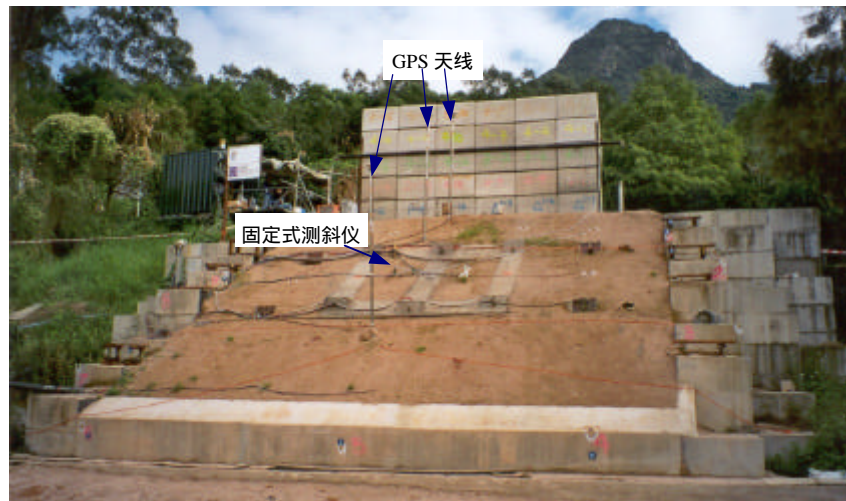


图 3 在香港新界一人工填土边坡上的全自动斜坡监测仪的布置图

Fig.3 Arrangement of sensors of the integrated slope monitoring system at a loose fill slope in the New Territories , Hong Kong

该监测系统在 2002 年 4 月底开始工作，但测斜仪等在这之前一个月已经开始运行。下面介绍加载前的监测结果。测斜仪钻孔顶点的位移(X, Y 方向)时间曲线如图 5 所示。在近 2 个月的监测中，前半个月向坡下游总位移(Y 方向)由 0 变化为 10 mm，

说明边坡处于土颗粒移动稳定和压密阶段。期间一个月位移没有变化，说明边坡沉降已基本稳定。从 5 月 14 日开始，由于下雨引起了边坡小小移动，从而产生了较大的位移，测斜仪监测数据正好反映了这种变化趋势。2002 年 5 月 21 日下午 5:00:44 向坡



(a) 坡坏前



(b) 坡坏后

图 4 在香港新界一人工填土边坡上的全自动斜坡监测仪的布置照片

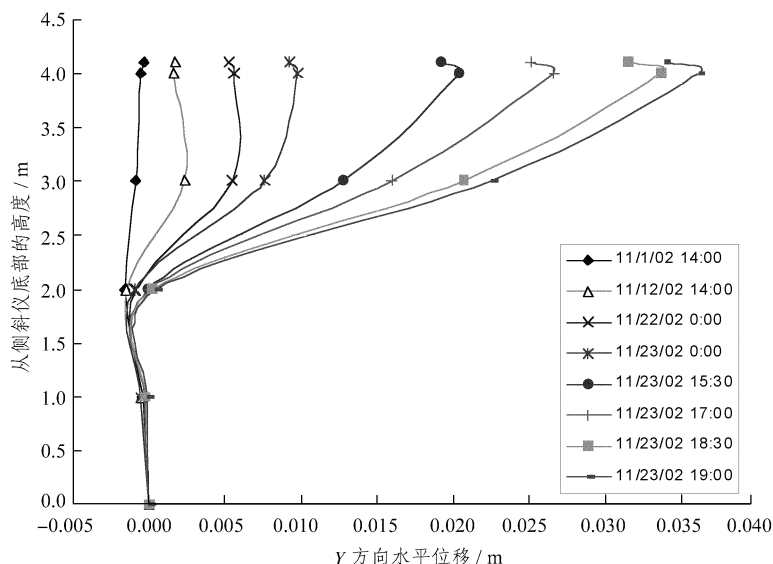
Fig.4 Photo of the arrangement of sensors of the integrated slope monitoring system at a loose fill slope in the New Territories , Hong Kong

下游方向的位移达 15.9 mm。

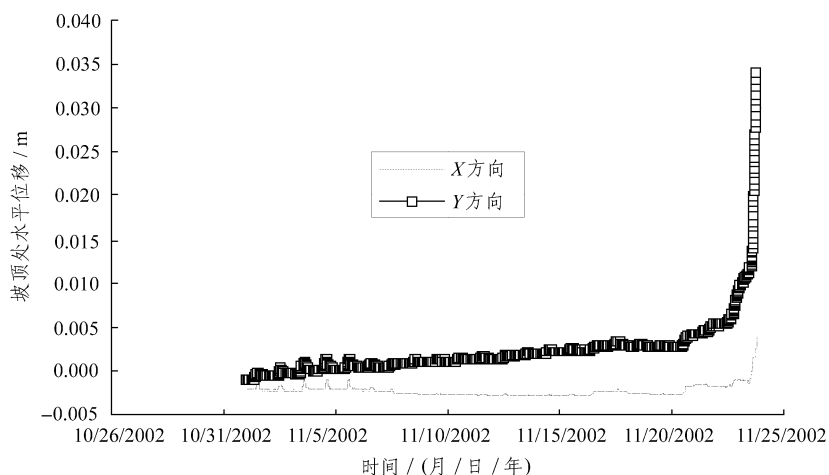
2002 年 5 月 18 日上午 11:00:43 最大位移发生在孔顶,向坡下游方向的位移达 14.2 mm。因下面 2 个测斜仪位于原状土中,几乎没有什么变化。其余 3 个位于填土中,从下数起第 3 个测斜仪位于填土和原状土的交界面,这个测斜仪的变化非常显著,转角较大,说明界面在监测过程中已发生过大的滑移。这种滑移主要发生在一个月前边坡土颗粒移动稳定和压密阶段。

图 5(a)显示在边坡顶部加载、注水、直到试验结束这一过程中沿钻孔剖面的位移曲线变化情况。该系列曲线反映的是+Y 方向的位移,即与边坡中心线平行水平指向下坡方向。+X 方向与+Y 方向垂直,指向边坡左侧,由于在监测过程中变化不大,在图

中没有表示出来。在这 8 条曲线中,第 1 条曲线表示在加第 1 层(0.6 m 高)混凝土块之后的位移,小于 1 mm。第 2 条为加载终了(3 m 高混凝土块)位移,小于 3 mm。第 1, 2 条曲线间隔 11 d,变化不到 2 mm。这说明尽管边坡顶部施加载荷达 70 kN/m²,但并没有产生明显的作用。第 3 条曲线及以后的曲线反映开始注水时和注水后的位移曲线。第 4 条变化到第 5 条曲线,历时不到 2 d,位移变化 15 cm。从第 5 条变化到第 6 条,位移差 6 mm,速率 6/1.5 = 4 mm/h;第 6 条变化到第 7 条,位移差 7 mm,速率 1.6 mm/h;从第 7 条变化到第 8 条,位移差 3 mm,速率 6 mm/h。从边坡表面的裂缝观察来看,在边坡顶部注水之前,未发现裂纹或裂缝,在注水约半天之后,在坡顶出现放射性对称裂纹。



(a) 沿原位测斜仪孔的不同时间的位移变化曲线



(b) 测斜仪顶部(边坡表面)的位移变化曲线(Y下坡方向为正)

图 5 固定式测斜仪对实测的位移与时间的变化

Fig.5 Measured the relationship of displacement using in-place inclinometers with time

随着注水量的增加，土中水位上升，裂缝扩大，到试验结束时(2002 年 11 月 23 日下午 7:00)，有的裂缝扩大到 5 mm，说明监测的位移变化情况与实际的边坡变形是相符合的。图 5(b)为沿+Y 方向测斜仪顶部(边坡表面)的位移，其变化趋势与图 5(a)是一致的，到 23 日下午位移垂直上升，说明边坡变形速率加大，最大位移达 3.5 cm。

图 6 表示位于填土边坡顶部天线 AT03 测到的 Y 方向移动-时间数据。如图 2 所示，AT03 位于坡顶，靠近加载区。图 6 所示曲线为水平方向位移，与边坡中心线平行，指向下游边坡，和测斜仪+Y 方向一致(如图 2)。通过对监测数据进行分析，发现 GPS 精度在一般情况下为 3 mm，而由测斜仪所计算的位移精度为 0.01 mm 左右，完全满足边坡监测

的精度要求。

6 结 论

本文介绍了一自动化边坡遥控监测系统构成、集成的有关方法，同时也将应用的成果进行了描述和讨论。监测试验已经完成，监测数据验证该系统的优越性和实用性。该系统工作性能稳定、可靠，实现了全自动化的数据收集、存储、发送、分析等全过程，极大地方便了该系统的使用者。特别是在系统中嵌入了多天线 GPS，拓展了 GPS 的应用空间，降低了应用成本，具有极好的工程应用前景。致谢 本文中所介绍的工作得到了香港研究基金会的资助(课题号 :PolyU 5090/98E ,CRC4/99 ,A/C :

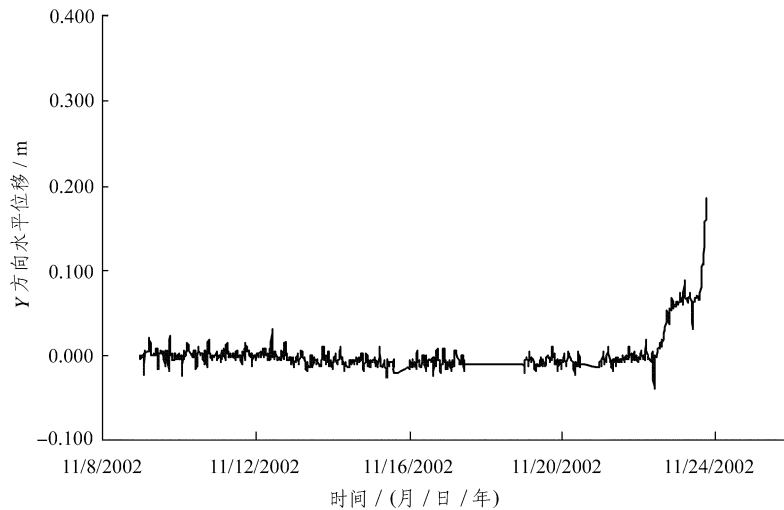


图 6 用精密全球定位系统(GPS A03 号点)实测的表面位移 (时间: 2002 年 5 月 13 日至 11 月 23 日)

Fig.6 GPS measured surface displacements at GPS A03 antenna point on the loose fill slope crest from May 13 to Nov. 23, 2002

3-ZB39), 香港大学土木工程系和香港大学嘉道理农业研究中心提供试验场地和协助, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- 1 Dowding Charles H, Huang Feichiu. Early detection of rock movement with time domain reflectometry[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(8): 1 413 ~ 1 427
- 2 Kane W F, Beck T J. Advance in slope instrumentation: TDR and remote data acquisition systems[A]. In: Field Measurements in Geomechanics, Proc. of 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics[C]. Singapore: A. A. Balkema, 1999, 101 ~ 115
- 3 Chen Yongqi, Ding Xiaoli, Huang Dingfa, et al. A multi-antenna GPS system for local area deformation monitoring[J]. Earth Planets Space, 2000, 52(10): 873 ~ 876

第 8 届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会 将于今年 10 月在上海召开

全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会由中国力学学会岩土力学专业委员会主办, 每 3 年召开一次。第 8 届研讨会由上海交通大学建筑工程与力学学院承办, 拟于今年 10 月在充满活力的、国际化大都市上海召开。

本次会议内容与会议主题为: (1) 岩土特性与本构模型及工程参数, (2) 岩土力学数值分析方法及其应用, (3) 土动力学与岩土地震工程, (4) 岩土渗流分析与计算, (5) 岩土工程实录分析, (6) 岩土力学测试技术及应用, (7) 计算岩土力学中的新技术应用。

应征论文要求内容具体、明确、严谨, 未公开发表过, 文责自负, 且不涉及保密内容。一般论文字数不超过 6 000 字(含图表与公式)。本次会议录用论文将以著名期刊增刊形式或正规出版社出版会议论文集。论文格式严格按照《岩土工程学报》的格式编辑、排版。来稿务必一式两份以供审查用(作者自留底稿), 并请写明邮编、详细通讯地址及联系电话、e-mail 地址。

提交论文截止日期为 2004 年 4 月 30 日, 以当地邮戳为准。经专家审查后, 将录用通知及修改意见一并于 2004 年 6 月底以前寄给论文第一作者。作者根据审查意见修改定稿, 于 2004 年 7 月底以前将论文以磁盘文件和复印件两种方式寄至会议组委会, 以备会前出版发行。

联系地址: 200030 上海市华山路 1954 号上海交通大学建筑工程与力学学院王建华同志(请在信封上注明“8 届岩土力学会议”字样)。联系电话: 021-62932915; 传真: 021-62933082; E-mail: zhouxl@sjtu.edu.cn, chenji29@sjtu.edu.cn。

具体开会时间与地点等事项请关注: <http://cem.sjtu.edu.cn/>。