

滑坡变形高精度智能化监测预警技术研究与实践

李星宇

(云南地质工程勘察设计院, 云南 昆明 650041)

摘要: 根据滑坡的勘察评价、治理工程设计、工程施工、防治效果评价、灾害预警等工作阶段,对变形监测成果的高精度要求,分析了滑坡变形监测的现状以及成果精度、数据可靠性等方面存在的问题,深入研究了高精度、智能化滑坡变形监测的技术方案,并在多个大型复杂滑坡和特殊高陡边坡监测中进行了实践应用。解决了常规滑坡监测难以获得高精度变形成果的问题,为滑坡变形评价、灾害监测预警等提供高效、可靠、高精度的监测数据,提出了很好的工作方案。

关键词: 高精度自动监测;智能全站仪;混合监测网;高陡边坡;防治效果监测

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0021-09

Research and practice of high-precision intelligent monitoring and early warning technology for landslide deformation

LI Xingyu

(Yunnan Geological Engineering Prospecting Institute, Kunming, Yunnan 650041, China)

Abstract: The current status of landslide deformation monitoring and reliability of the data accuracy are analyzed at the high demand of the precision of landslide deformation monitoring, according to the following stages include survey evaluation, design for treatment project, construction, evaluation of prevention and controlling effects and disaster warnings. Also, the high-precision and intelligent technical solutions for landslide deformation monitoring which have been applied in practice in the monitoring of many large-complex landslides and special high-steep slopes are deeply studied. The shortcoming of conventional landslide monitoring in obtaining high-precision deformation results has been overcome, which provides efficient, reliable, and high-precision monitoring data for landslide deformation evaluation, disaster monitoring and early warning, etc. It also proposes a good work plan.

Keywords: high-precision automatic monitoring; intelligent total station; hybrid monitoring network; high and steep slopes; monitoring of prevention effects

0 引言

一般典型滑坡按滑坡滑动过程分为:发生、发展、复活和死亡期(长期稳定期)^[1]。滑坡监测作为滑坡勘察的手段之一,为勘察提供变形定量数据,帮助查明滑坡性质、成因、活动规律、滑动过程及趋势,为防治滑坡设计提供资料。在滑坡治理施工期间,滑坡监测保

障施工安全,并在完工后验证防治效果。对难于进行工程防治的滑坡,滑坡监测能及时预警,防止造成灾害^[2]。

常规滑坡监测采用经纬仪、水准仪、视准仪、电磁波测距仪等仪器进行观测,主要采用视准线法、前方交会法、后方交会法、极坐标法、边角法、水准测量和光电三角高程测量等方法获得观测成果^[3]。多数监测项

收稿日期: 2020-08-31; 修订日期: 2020-09-24

作者简介: 李星宇(1971-),男,云南富宁人,大学本科,主要从事测绘、地理信息、地质灾害防治及监测工作与研究。E-mail: Lixingyu_km@qq.com

目只采用单一方法进行观测,受经济条件、仪器配置以及滑坡区监测基准点布设困难、观测条件差等限制,观测的成果精度一般较低。

精密水准测量是获取高精度沉降监测成果的最有效方法,但很多滑坡区域坡度陡、高差大,实际可实施的项目很少,测量也很困难。卫星定位 GNSS^[4] 监测,可为滑坡监测提供连续、实时、高效的观测定位,但一般观测精度只能达到厘米级,水平位移误差 $\pm 2 \sim \pm 5$ cm,垂直位移精度较差。地面摄影与激光扫描及 InSAR^[5] 在滑坡监测项目中实际应用不多,还处于探索研究阶段,获取的变形成果精度较低。深部位移监测能比地面位移监测获得更深层次反映滑坡变形动态的资料,是滑坡动态监测的重要手段之一^[6],但测斜管的埋设工艺、数据采集及处理方法等如不当,取得的成果精度低、时效性不高。自动化监测主要包括卫星定位 GNSS、智能全站仪、自动深部位移、普适性设备等自动在线监测预警系统,其在滑坡监测中的应用还处于试验阶段。近年来,国内外很多机构和专业技术人员,对各类滑坡监测进行了很多研究^[5-14],但在提高滑坡监测成果精度及其重要性方面研究不多,也还存在以下问题:

(1) 全球卫星导航定位 GNSS 用于滑坡变形监测还存在一些尚未解决的问题,导致一般观测很难获得高精度的监测数据。

(2) 普通监测成果精度低,主要是由于监测经费不足,作业单位及技术人员认识不足,监测设备配置不到位等,致使观测无法取得较高精度成果。

(3) 自动化监测获取数据的可靠性、稳定性不足,受观测环境条件限制较多,数据不稳定,成果精度难以保证或存在不确定性,主要体现为设备采集数据中断、监测成果出现异常跳动等(图 1~图 3),致使已建自动在线监测预警系统可能出现短期失效或误报预警信息等情况。

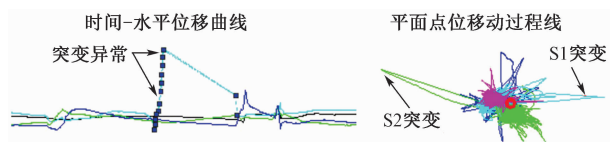


图 1 GNSS 自动化监测异常图

Fig. 1 GNSS automatic monitoring abnormality diagram

根据上述滑坡监测存在的问题,本文基于智能全站仪,采用混合形式观测组网,设计了自动数据处理软

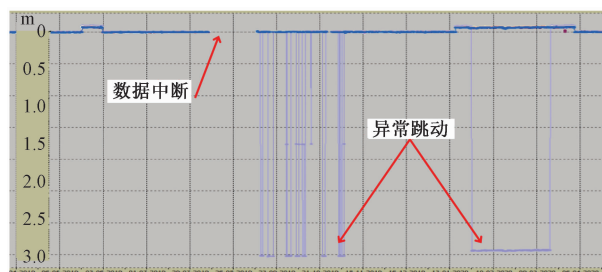


图 2 智能全站仪自动化监测水平位移异常图

Fig. 2 Intelligent total station automatic monitoring horizontal displacement abnormal diagram

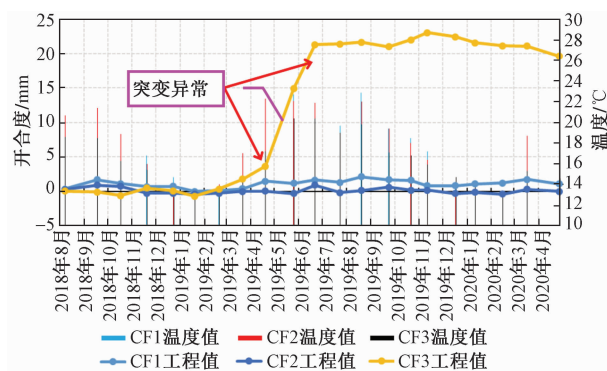


图 3 裂缝自动化监测变形曲线异常图

Fig. 3 Anomaly diagram of deformation curve of automatic crack monitoring

件系统,以获取高精度的滑坡监测成果。解决了滑坡监测中采集数据智能化、获取数据多量化、处理数据自动化等难题,数据采集、处理效率高,可以自动解算多种监测网形混合观测成果,数据检核条件多,成果可靠度高。解决了山区精密水准测量困难问题,可以获得高精度的沉降监测成果。对加强滑坡地质灾害监测预警、预防灾害发生、减少灾害经济损失、保护人民群众生命和财产安全具有重要意义。

1 高精度监测技术

为解决前述监测问题,设计总体技术流程示意图 4。

1.1 监测仪器选型

自动化监测仪器主要有瑞士徕卡的 TCA 系列、TS 系列、TM 系列,美国天宝 S 系列,日本拓扑康 MS 系列等全站仪。根据工程应用实践,地面位移监测选择徕卡 TM30^[15] 或 TM50 智能全站仪,测距精度 $0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$,测角精度 $0.5''$,可实现自动观测、自动记录数据、自动检验观测限差、自动重测不合格成果等。深部位移监测采用南京格能 GN-1 测斜仪进行数据

采集^[16]。

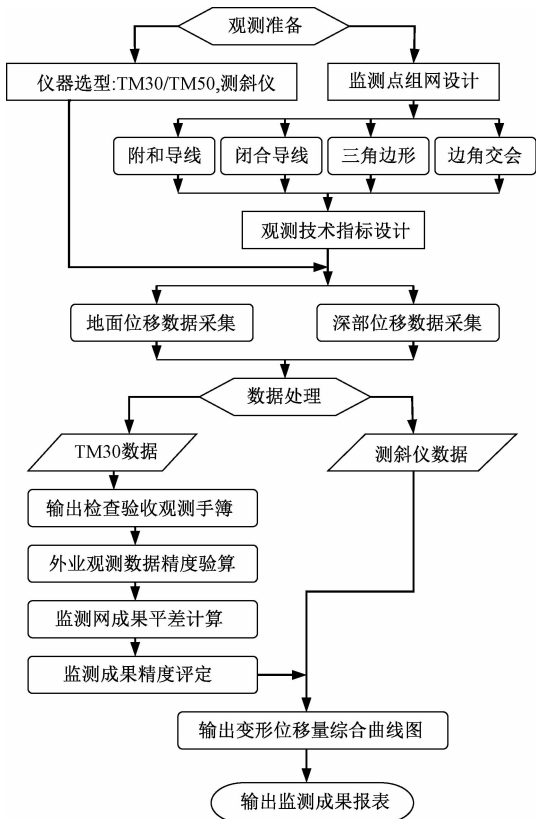


图 4 高精度监测技术流程图

Fig. 4 Flow chart of high-precision monitoring technology

1.2 观测技术

规范^[17]对滑坡监测高精度中的误差要求为:水平位移 $\pm 5.0\text{ mm}$,垂直位移 $\pm 5.0\text{ mm}$,常规测量技术方法很难达到。经多年研究实践,监测点组网设计采用附和导线、闭合导线、三边角形(3边、3角全测)和边角前方交会(2边、2角同测)等网形的综合布网,少数观测条件极差的点位采用1站支导线形式联入综合网,以全圆方向法同时观测,称为混合监测网。监测基准点的布置不少于3个^[17],以便进行变形监测成果基准框架稳定性评价,确保获得可靠的变形成果。变形监测点、剖面线的布置根据初步勘定的滑坡范围大小及复杂程度综合确定^[18]。各监测点必须埋设仪器强制对中装置,桩顶高于地面1.0 m以上,典型布网见图5。

平面位移按国家三等以上控制网精度进行观测,技术指标设计见表1。垂直位移按三等水准精度的光电测距三角高程导线,采用往返复视观测方式进行测量。垂直角观测以棱镜为照准目标,采用自动照准模式观测6个测回,观测限差为垂直角各测回互差 $5''$ 、指标差较差 $5''$ 。

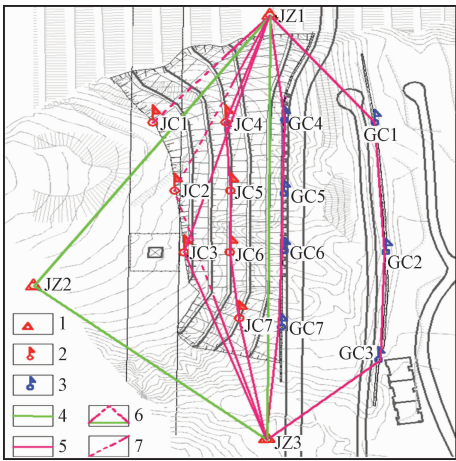


图 5 混合监测网典型布置图

Fig. 5 Typical layout of hybrid monitoring network

- 1—水平、垂直位移监测基准点;2—水平、垂直位移变形监测点;
3—防治工程位移监测点;4—基准点三边角形观测边;5—变形点
导线观测边;6—变形点边角同测前方交会观测边;
7—变形点支导线观测边

深部位移监测点布置在滑动主剖面上,尽可能与地面位移点接近,一般不少于3个,以相互验证地面到滑体深部的位移变化情况,在钻孔内埋设测斜管必须密实。

表 1 水平位移监测网观测技术

Table 1 Observation technology of horizontal displacement monitoring network

测角中误差/($''$)	水平角测回数	方向值测回较差/($''$)	边长测回数	边长测回较差/mm	导线方位角闭合差	导线全长相对闭合差
1.8	6	6	6	5	$3.6\sqrt{n}$	1/55 000

1.3 数据采集

根据监测网的观测方案,在各监测点上安置 TM30 智能全站仪,在观测点上安置反光镜,然后设置仪器的高度、测回数、各项观测限差和各照准点名、仪高、初始观测距离及角度等,启动仪器进行自动观测,自动记录数据,仪器自动检验各项观测限差合格后,即结束观测。

深部位移观测从孔底开始,按长度间隔 0.5 m 测读一次,并记录在储存器上(A0),至管顶量测完毕后,将测头旋转 180°插入同一对导槽,再次从孔底开始测读,并记录第二组数值(A180)。两次量测的部位应一致,各测点的正反两读数接近,符号相反,若互差超限应及时重测,如有可疑数据,应及时补测。在旋转 90°方向导槽,重复前一操作,采集 B 方向倾斜数据。

1.4 数据处理

首先导出 TM30 外业观测数据,在 Excel 中,通过 Visual Basic 编制宏代码,导入观测数据,生成可供检

查验收的观测手簿和平差计算用的数据文件。监测网数据处理,采用经典间接严密平差法设计了《星网平差》软件系统,输入转换后的数据文件,即可进行监测点平面坐标、高程的自动解算^[19]和平差处理,并进行成果精度评定,实现了混合控制网的智能平差解算,系统各功能见图6。



图6 数据平差自动处理软件系统功能图

Fig. 6 The function diagram of the data adjustment automatic processing software system

深部位移监测数据处理,通过编制 Excel 宏代码,导入仪器存储的观测数据,自动计算滑体内各部位的水平位移量,自动生成滑体内竖向位移增量变化图和累计位移曲线图等成果图件。

综上,采用智能化的仪器,保证了滑坡监测大数据量的采集及获取数据的高效性,高精度的观测技术设计指标保证了监测原始数据的高精度,解决了常规滑坡监测数据精度低的问题。混合监测网、Excel 数据转换宏代码、星网平差软件等的设计,使监测网大数据量、复杂计算得到高效自动处理,保证了监测数据具有较多的精度检核条件,以获得高精度的平差计算成果,较好地减少了人为误差、观测条件误差及观测仪器异常等误差,解决了滑坡预测分析的输入条件成果可靠性、保障度不高,依据不充分的问题;也避免了数据采集异常,不真实的数据突变等问题。

2 变形监测预警技术探究

前述数据处理系统对监测数据进行全面检验、处理解算完成后,即自动建立 Access 数据库文件,通过编制 Excel 宏代码,对每个监测点进行变形量的计算,并绘出各种位移曲线图和矢量图。可根据设置的报警初始阈值,自动进行初步预警提醒,提示专业技术人员对监测成果图件进行综合分析,以作出进一步的预警报告。

根据获取的高精度监测成果,滑坡预测的方法及预报过程主要是:一、滑坡发生在空间上的预测,根据地面位移、深部位移综合分析确定滑坡分布的区域地段、分块分级、空间范围等滑坡特性;二、以变形监测成果变化的发展过程,判定滑坡处于滑动的何种阶段,是否由时滑时停或等速滑动向加速滑动过渡^[1],判定是否已进入

整体微动向大动转化;三、高陡边坡预警的阈值,可在研究监测滑坡各监测点的位移——时间变化曲线后,根据地质环境条件,综合确定一个滑动的警戒阈值,对于特殊高陡边坡初始阈值可设为坡顶的最大水平位移大于边坡开挖高度的 1/500 或 20 mm、以及水平位移速率连续 3 d 大于 2 mm/d^[20];四、大型复杂滑坡预警初始条件可设定为:在监测过程中,当发现滑坡区内所观测的监测点均发生位移,同时有 1/3 的监测点位移总量超过 120 mm 时,可提出初级预警报告,而当在较短时间段中(初定于 5 d 范围内),滑坡变形突然加剧,滑坡区内所有监测点位移趋势明显,同时有 1/3 的监测点位移总量超过 60 mm 时,应立即提出紧急预警预报;五、滑坡大动破坏发生时间的预报,可根据各个监测点位置的地面及深部位移曲线、位移速率曲线与时间变化特性,依据日本斋藤岩土蠕变曲线三阶段模型^[1-2],识别滑坡位移变化所处蠕变阶段,预测大动破坏发生的趋势、可能时间及其致灾危险性等,做出数值上在数月内、一个月内或数天内的短期预报及临滑预报。

3 智能化监测工程实践与分析

3.1 高陡建筑边坡特殊作业环境的应用案例

如图5,昆明某建筑边坡拟开挖高度为 51 m,变形监测点 JC1、JC2 位于边坡顶部,处于 50 万伏输电高压线下方,由于边坡变形控制需要,此两点已不能再变更位置。受高压线影响,考虑人员及设备安全,这两个变形监测点不能安置测量仪器。JC1 只能与 JZ1 基准点通视, JC2 点与 JZ1、JZ3 两个基准点通视。如采用普通仪器按一般监测方法进行观测,此两点的监测成果精度较低,满足不了边坡开挖变形对西电东输高压电线塔影响的监控需求。为此,采用高精度的智能全站仪 TM30 及前述观测技术指标,以一站支导线观测 JC1,以边角同测前方交会观测 JC2,从而获得了高精度的监测成果。

由于建筑高边坡场地开挖,以及受周围在建建筑物的影响,监测周期长,对于很多规范^[17]要求的监测周期内应保持观测路线和组网形状结构一致,很难从始至终一直保持。如项目从第 9 测次开始,由于场地建筑材料堆放及周边建盖建筑物、修建防护围栏网、种植景观绿化乔木树等,阻挡观测通视路线,以及边坡向下开挖逐步到位,变形监测点布置逐步增加,出现部分观测路线必须进行调整(图7~图8)。

鉴于很多建筑高边坡或环境条件复杂的滑坡,都会存在上述多种不可预见和不可避免的影响因素,限制原有观测方案的可持续实施,本方案采用 TM30 智能全站

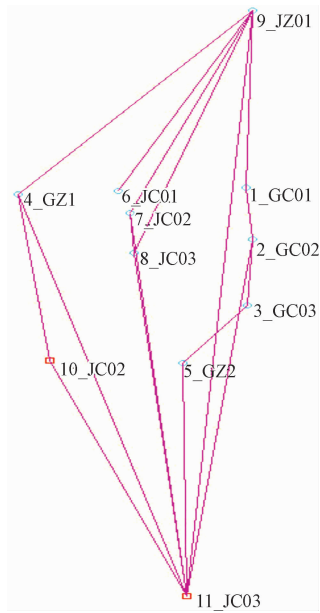


图 7 第 1 测次网图

Fig. 7 Network diagram of NO.1 measurement

仪及混合监测组网的形式进行多测回自动观测,作业过程中根据现场观测条件,及时采取优化观测路线,尽量组成最优网形,以保证每个测次都可获得高精度的监测成果。如图 9 ~ 图 10, 无变形的 JC3 监测点水平位移曲线和点位变化过程线变化幅度很小,稳定性特征明显;垂直位移曲线 a-b 段体现了边坡开挖阶段的微小位移特征,b-c 段体现了边坡防治工程施工的扰动变形特征,

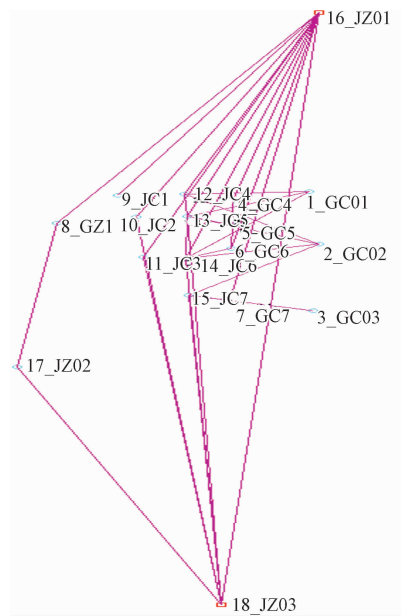


图 8 第 21 测次网图

Fig. 8 Network diagram of NO.21 measurement

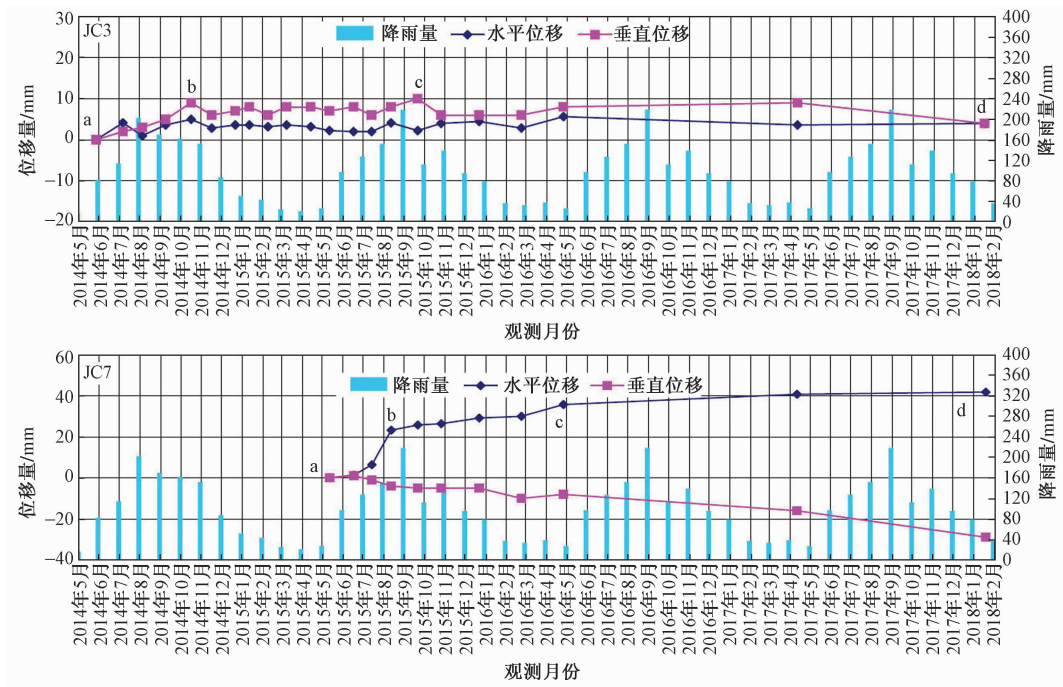


图 9 监测点水平位移与垂直位移综合曲线图

Fig. 9 Comprehensive curve of horizontal and vertical displacement of monitoring points

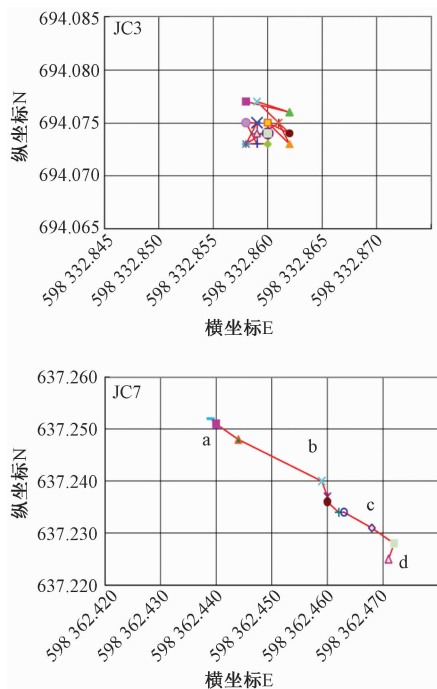


图 10 监测点位置变化过程图

Fig. 10 The process diagram of the position change of the monitoring point

本项目在作业过程中观测路线和组网形式虽然不断调整,但调整后的网形结构强度均优于前期网形,监测期间 22 个测次的监测点水平位移最大点位中误差为 ± 4.0 mm,垂直位移最大高程中误差为 ± 2.9 mm,满足规范^[17]高精度要求,保证了周期长达 3 年多的监测成果的高精度质量一致。解决了观测条件困难情况

下,一般测量方法获得的监测成果精度低的问题。

3.2 大型复杂滑坡的应用案例

云南省永善县县城东部滑坡,为一复杂堆积体老滑坡,滑坡范围约 1.6 km^2 。滑坡监测分勘察设计、施工期间、防治效果 3 个阶段,共布设地面变形监测基准点 4 个、变形点 25 个,深部位移监测点勘察阶段布设 5 个(后期滑动剪断)、施工期新布设 2 个,监测周期历时 3 年多,变形点水平位移最大点位中误差为 ± 10.0 mm,垂直位移最大高程中误差为 ± 6.6 mm(图 11、图 12)。

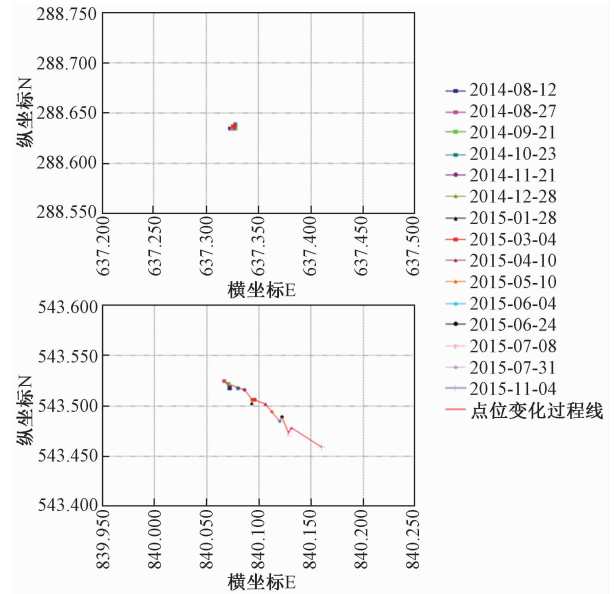


图 11 典型点位置变化过程图

Fig. 11 Typical point location change process diagram

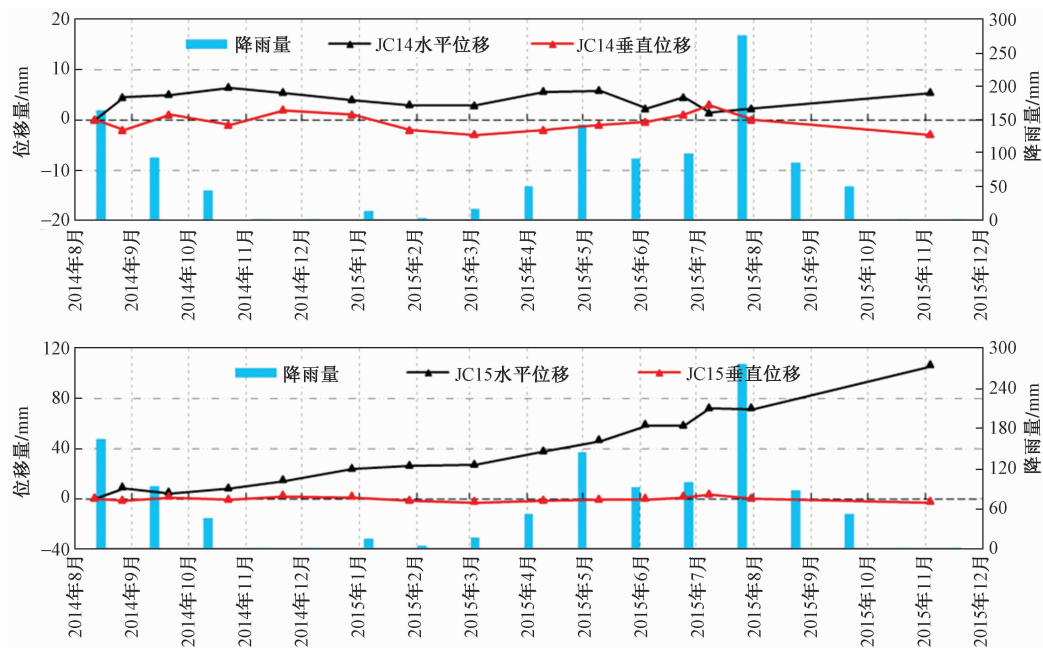


图 12 典型点水平位移与垂直位移综合曲线图

Fig. 12 Comprehensive curve of horizontal and vertical displacement of typical points

JC14 点体现了滑坡边界外稳定点的位置变化和位移曲线特征,变化量很微小,精度很高;JC15 点体现了滑坡区内变形点的位移方向、变化过程、位移速率和变化趋势,各测次成果跳动很小,充分体现了该位置滑动变形的规律。

滑坡深部位移监测见图 13,JS1 点反映了滑坡边界外稳定点的深部位移曲线特征,变化微小;JS2、JS3、JS4、JS5 点位移曲线分别反映了在 20 m、22 m、19 m、11 m 深处滑动面的显著移动变形规律,为复杂滑坡块体划分、防治抗滑桩工程设计深度等提供了可靠的关键数据。

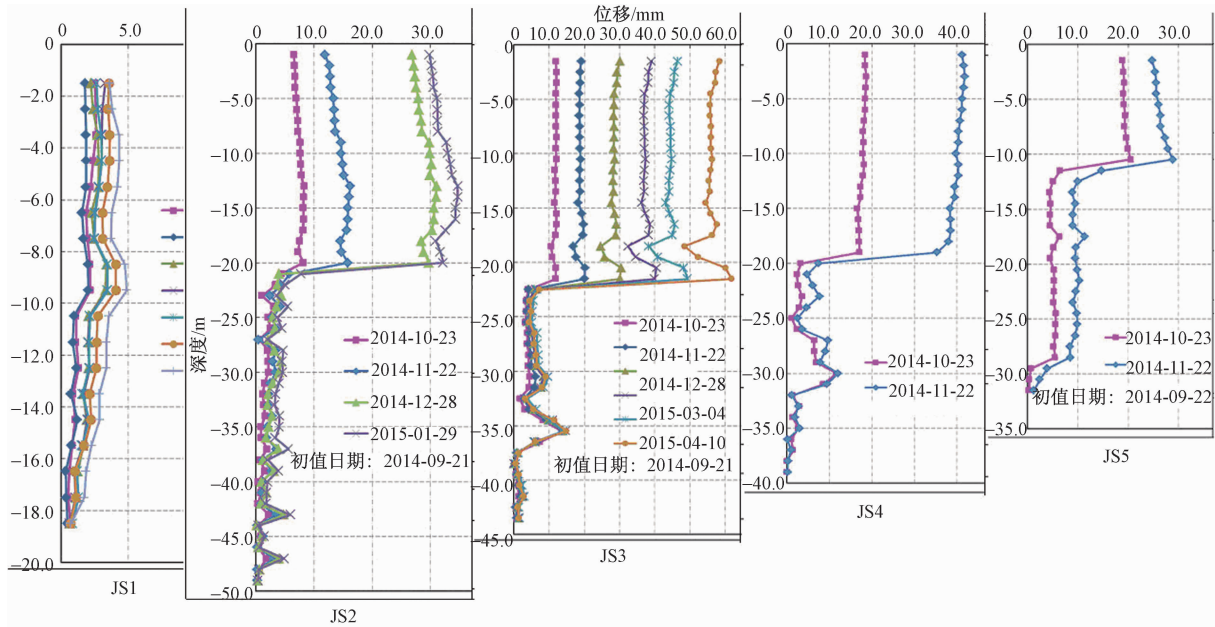


图 13 监测点深部位移曲线图

Fig. 13 The deep displacement curve of the monitoring point

前述高精度监测技术方案在本项目的应用,获得了可靠详实的滑坡区地面变形水平位移量、垂直位移量,深部变形位移量,为分析、判定滑坡的范围、规模、滑动方向、滑动面提供了必要的变形监测成果,查明了深部滑动面,对滑坡的稳定性做出了分区评价(图 14),为研究和预测滑坡发展趋势和可能发生的地质灾害问题,为滑坡区地质灾害防治工程设计提供了高可靠度的定量依据,保障了施工期的安全,检验了防治工程的效果。

3.3 高精度滑坡监测的重要性

据上述案例和其它工程应用,由于一些复杂、大型、特殊滑坡的勘察和防治技术有限等原因,采用高精度智能化的技术方案,监测滑坡防治工程的动态,可及时判定工程设计的正确程度;对防治工程施工后仍存在变形迹象时,可及时确定后续补充加强的工程措施。高精度的深部位移观测是判定滑坡动态滑动面行之有效的方法,特别是存在多层、不等速滑动面和无明显软弱地质滑动面的情况下效果尤其明显。

实践证明,滑坡监测要有效反映崩塌性滑坡的前期、断续性滑坡的滑动与停歇、连续性滑坡的缓慢滑

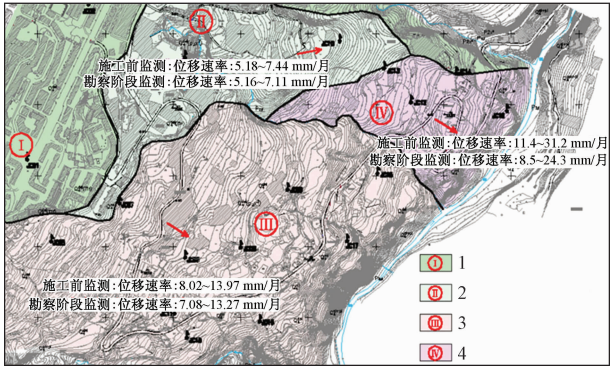


图 14 滑坡变形块体划分图

Fig. 14 Deformation block division diagram of landslide

1—相对稳定块体;2—变形速率小的块体;
3—变形速率中等的块体;4—变形速率大的块体

动、老滑坡的暂时稳定期和已稳定期的滑动规律^[1],都需要很高的变形监测精度。山区建设场地开挖的高陡边坡,需要高精度、高时效的监测数据,以监控边坡开挖的安全性,并评价边坡防护工程的有效性。特高边坡、高危滑坡更需要进行长期监测,并对坡体的稳定性及滑动趋势进行预测、预报,高精度的变形监测数据才能满足需要。

4 结论

(1) 本方案基于智能全站仪和测斜仪, 设计了自动数据采集、智能数据处理系统, 采用导线网、三边角形网、边角前方交会等网形混合组网观测, 可得到高精度、高时效、高可靠度的变形监测成果。

(2) 提出了滑坡监测预警、预报的初步方法。

(3) 高精度、高时效的滑坡监测成果在滑坡的勘察评价、治理工程设计、工程施工、防治效果评价、灾害预警等工作中具有重要作用。

(4) 本方法的研究应用, 对监测条件多变、观测困难等问题, 得到了很好的解决, 获得了高精度的监测成果。可为滑坡在各种不确定因素变化影响下出现破坏、特别是出现大动破坏的可能性和时机提供必要的预测、预警数据。

参考文献:

- [1] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. [XU B D. Landslide analysis and prevention[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese)]
- [2] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 第二版. 北京: 人民交通出版社, 2010: 649 - 688. [ZHENG Y R, CHEN Z Y, WANG G X, et al. Engineering treatment of slope and landslide[M]. Second Edition. Beijing: People's Communications Press, 2010: 649 - 688. (in Chinese)]
- [3] 刘兴远, 雷用, 康景文. 边坡工程——设计·监测·鉴定·与加固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 119 - 174. [LIU X Y, LEI Y, KANG J W. Slope Engineering——Design, monitoring, identification and reinforcement[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007: 119 - 174. (in Chinese)]
- [4] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017(10): 1399 - 1407. [ZHANG X H, LI X X, LI P. GNSS precision single point positioning technology and application progress[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2017(10): 1399 - 1407. (in Chinese)]
- [5] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717 - 1733. [ZHU J J, LI Z W, HU J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717 - 1733. (in Chinese)]
- [6] 陈贺, 李亚军, 房锐, 等. 滑坡深部位移监测新技术及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(增刊2): 4063 - 4070. [CHEN H, LI Y J, FANG R, et al. A novel technique for monitoring deep displacement and early-warning of landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(Sup2): 4063 - 4070. (in Chinese)]
- [7] 周明, 邱凌云. 高危边坡变形监测与预警系统研究[J]. 测绘地理信息, 2018, 43(3): 48 - 50. [ZHOU M, QIU L Y. Study on deformation monitoring and early warning system of high risk slope[J]. Journal of Geomatics, 2018, 43(3): 48 - 50. (in Chinese)]
- [8] 霍东平, 张彬, 彭军还, 等. 滑坡变形监测技术研究现状与展望[J]. 工程勘察, 2015, 43(8): 62 - 67. [HUO D P, ZHANG B, PENG J H, et al. Review and prospective of landslide deformation monitoring[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(8): 62 - 67. (in Chinese)]
- [9] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360 - 374. [XU Q. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360 - 374. (in Chinese)]
- [10] 王利, 张勤, 管建安, 等. 基于 GPS 技术的滑坡动态变形监测试验结果与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 422 - 426. [WANG L, ZHANG Q, GUAN J A, et al. Experiment results and analysis of the dynamic deformation monitoring of a kind of landslide based on GPS technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(4): 422 - 426. (in Chinese)]
- [11] 冯春, 张军, 李世海, 等. 滑坡变形监测技术的最新进展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 11 - 16. [FENG C, ZHANG J, LI S H, et al. A review of the latest development of landslide deformation monitoring techniques[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 11 - 16. (in Chinese)]
- [12] 谢谟文, 胡嫚, 王立伟. 基于三维激光扫描仪的滑坡表面变形监测方法——以金坪子滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 85 - 92. [XIE M W, HU M, WANG L W. Landslide monitoring by three-dimensional laser scanner-case study of the displacement detection of the Jinpingzi

- landslide (Southwest, China) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24 (4): 85–92. (in Chinese)]
- [13] 王凯, 张伟毅, 马飞, 等. 滑坡深部变形监测方法与应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (1): 204–209. [WANG K, ZHANG W Y, MA F, et al. Monitoring methods of landslide deep deformation and discussion on their application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11 (1): 204–209. (in Chinese)]
- [14] 李邵军, 冯夏庭, 杨成祥, 等. 基于三维地理信息的滑坡监测及变形预测智能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (21): 3673–3678. [LI S J, FENG X T, YANG C X, et al. Landslide monitoring and intelligent analysis on deformation prediction based on three dimensional geographic information[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (21): 3673–3678. (in Chinese)]
- [15] 崔有祯, 李亚静. 徕卡 TM30 测量机器人三维测量在基坑边坡监测中的应用[J]. 测绘通报, 2013 (3): 75–77. [CUI Y Z, LI Y J. The application of arbitrary stations with 3D survey of geodetic robot in the running stability for slope monitoring of foundation pits[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013 (3): 75–77. (in Chinese)]
- [16] 魏英波, 李星宇, 葛智. 大型复杂滑坡变形监测方法探讨[J]. 地矿测绘, 2017, 33 (1): 37–39. [WEI Y B, LI X Y, GE Z. Discussion of deformation monitoring method for large complex landslide[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2017, 33 (1): 37–39. (in Chinese)]
- [17] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程测量规范: GB 50026—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. [Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for engineering surveying: GB 50026—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)]
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘察规范: GB/T 32864—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for geological investigation of landslide prevention: GB/T 32864—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [19] 李星宇. 导线网 3 维坐标自动解算算法[J]. 测绘通报, 2006 (9): 43–46. [LI X Y. Algorithm of automatic calculation of traverse network three-dimensional coordinates[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2006 (9): 43–46. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)]