

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.08

基于 GNSS 技术的高速公路边坡自动化监测系统

王慧敏¹, 罗忠行¹, 肖映城², 刘正兴², 何安良¹, 梁晓东²

(1. 湖南中核建设工程公司, 湖南 长沙 410119; 2. 湖南联智科技股份有限公司, 湖南 长沙 410031)

摘要: 为探究基于 GNSS 监测站的高速公路边坡自动化监测系统的实际作用, 本文以重庆巴南至綦江高速公路 YQTJ5 标青年互通 K69 + 080 段为依托进行研究。首先, 基于 LZMR02-GNSS 接收机和 FS-YL 雨量计自主开发北斗 + 安全监测云平台, 能够实时管理和分析现场布置的 GNSS 地表位移监测站和深层位移监测孔, 监测结果表明该坡体已出现局部垮塌及开裂等不稳定现象并且迅速发出预警到相关部门单位; 随后, 基于传递系数法计算该边坡的剩余下滑力并且采用 Geo5 有限元软件进行数值模拟, 其结果均验证了该监测系统的准确性。因此, 建立高速公路边坡自动化监测系统不仅能解决常规人工监测边坡的不足, 也能保证监测数据的时效性, 为未来智能化监测边坡提供了一定的参考价值。

关键词: 高速公路; 边坡监测; GNSS 技术; 灾害预警

中图分类号: U213.1 + 3; X85

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0060-09

Automatic monitoring system on highway slopes based on GNSS technique

WANG Huimin¹, LUO Zhongxing¹, XIAO Yingcheng², LIU Zhengxing²,

HE Anliang¹, LIANG Xiaodong²

(1. Hunan CNNC Construction Engineering Company, Changsha, Hunan 410119, China;

2. Hunan Lianzhi Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410031, China)

Abstract: In order to explore the practical role of highway slope automatic monitoring system based on GNSS monitoring station, this paper studies the K69 + 080 section of YQTJ5 section of Chongqing Banan Qijiang Expressway. Firstly, based on LZMR02-GNSS receiver and FS-YL rain gauge, Beidou + safety monitoring cloud platform is independently developed, which can manage and analyze the GNSS surface displacement monitoring stations and deep displacement monitoring holes arranged on site in real time. The monitoring results show that the slope has local collapse and cracking and other unstable phenomena, and early warning is sent to relevant departments and units. Then, the residual sliding force of the slope is calculated based on the transfer coefficient method, and the numerical simulation is carried out by using Geo5 finite element software. The results verify the accuracy of the monitoring system. Therefore, the establishment of highway slope automatic monitoring system can not only solve the shortcomings of conventional manual monitoring of slope, but also ensure the timeliness of monitoring data, which provides a certain reference value for future intelligent monitoring of slope.

Keywords: highways; slope monitoring; GNSS technology; disaster warning

0 引言

近年来,在国民经济增长的带动下我国高速公路

工程建设得到了迅猛发展,不仅提高了高速公路的设计方法和施工工艺,也丰富了工程师们处理各种复杂地质情况的实践经验,弥补了规范手册中的不足。虽

收稿日期: 2020-08-19; 修订日期: 2020-09-07

第一作者: 王慧敏(1983-),女,岩土工程专业,硕士研究生,高级工程师,主要从事岩土工程地质、水工环地质、地灾防治、生态修复的研究。E-mail:wanghuimin303@qq.com

然高速公路的路基、桥基很少发生较大沉降和应力变化,但由于路线设计原则使得大部分高速公路穿过或靠近人工边坡,边坡的失稳破坏又极易在公路施工期和运行期中引起事故,造成较大的经济损失及人员伤亡。不仅如此,国内的滑坡具有种类多、分布广、频次高等特点^[1]。资料显示,2012年滑坡灾害占到总灾害数的76%^[2];特别地,贵州省滑坡的发生频率及人财损失更是位居全国前列^[3]。因此,监测高速公路边坡的稳定性是目前急需解决的问题,其能对人民群众和道路的安全起到保障作用。在滑坡防治手段中,变形监测是其中重要组成部分,经济有效^[4]。

受天气、障碍物影响,一般情况下边坡的位移变化、裂缝发展情况等指标很难通过监测人员定期采集反映出来,不仅误差大、效率低、监测连续性差等,而且监测人员的人身安全也受到威胁。因此,为了解决上述常规人工监测边坡的缺点以及保证监测数据的时效性,采用自动化手段监测高速公路边坡稳定性的方法有着广阔的发展前景。随着GNSS自动化监测技术的迅速发展,其已经具备了实时性、精确性以及测量速度快等优点,这使得GNSS在高速公路边坡监测与稳定性中推广开来。BOCK Y等^[5]首先将GPS技术与监测结合,并且将其结果与现场人工测试作比较,表现出了该技术的优势,最后认可该技术在地表形变监测中作用。随后,FOULGER等^[6]通过GPS技术获得南冰岛上的监测数据并且用于分析地震的破坏性。二十世纪末,谢向进等^[7]利用GPS接收机监测瑞士某大坝的变形,并将其结果与传统测距仪比较,证明了GPS测量更为精确。

在国内,朱宝柱^[8]以怀新高速公路K1469+545~K1469+745段边坡为例,基于GNSS技术实时监测的特点研究、分析了其监测方案,并且指出了各类元件的现场安装要点;薛长龙^[9]考虑了位移、天气等因素对高速公路边坡的监测和稳定性分析作出了改进,并且基于GNSS技术所测数据判断了该段边坡处于稳定状态。赵鹏涛等^[10]将GNSS技术应用在张桑高速公路某边坡中监测稳定性,发现了该技术确实能弥补人工监测的不足,并且能有效提高数据的精确性。杨飞等^[11]通过GNSS位移自动监测技术研究了汉十高速某填方高边坡,并且结合人工现场巡查结果进行验证,两者所得数据可较准确判断该边坡的稳定性。荣美等^[12]以广西某高速公路边坡为例,基于GNSS自动化在线监测系统所得实时数据分析监测方案,发现系统周围环境如高压电塔、太阳能供电系统等会对其造成

影响。

综上所述,虽然GNSS技术在高速公路边坡方面已有了较多的研究内容,但是由于地质条件的复杂性导致了各个边坡的地质性状和稳定性特征鲜有相同,应依据实际情况设计监测方案。因此,本文以重庆巴南至綦江高速公路YQTJ5标青年互通K69+080段为依托,研究GNSS监测系统对高速公路边坡监测的作用。

1 工程概况

重庆巴南至綦江段是典型的山区高速公路,地形地貌起伏大并且沿线切割较大。K69+080处B、C匝道右侧深挖路基边坡,其中B匝道边坡长约280m,最大边坡高度约45m;C匝道边坡长约150m,最大边坡高度约35m,为逆向坡。主要岩体是软岩、较软岩,局部地段为硬质岩。揭露的主要地层为:第四系坡洪积粉质黏土、碎石土;三叠系泥灰岩、页岩夹泥灰岩及灰岩。该边坡为六级边坡,一到三级边坡坡比为1:0.75,一级边坡采用锚杆框架梁防护形式,同时二级、三级边坡采用锚索框架防护;四到六级边坡坡比为1:1,四级、五级边坡采用锚杆框架梁防护,同时六级边坡采用挂双网喷有机基材防护。尽管有防护措施,但该边坡仍然存在安全隐患,故在高边坡处设GNSS监测。

2 GNSS监测系统结构组成和技术实现

GNSS监测技术的原理是利用GPS/BDS/GLONASS卫星测量基准站和监测点之间的相对定位得到各监测点不同时期的位置信息,然后利用数据软件对位置信息进行处理分析,剔除各种环境影响误差因子,并与首期结果对比得到各监测点在不同时期的位移信息(精确到毫米),最终将其展示在系统监测云平台,当超过预警形变值时发出警报,提醒相关人员采取应对措施。

2.1 北斗+安全综合监测预警平台

自主开发的北斗+安全监测云平台兼容国内各主流传感器,能将实时采集的监测数据通过有线/无线数据传输至平台进行存储、分析,还能反馈预警信息并配套提供分析报告,以满足结构的运行和维修。北斗+安全综合监测预警平台提供了良好的人机交互界面,便于进行各项监测参数数据的管理和分析,具有以下功能:

(1)实现远程自动化监测,无需人员进行监控,采集方式可以定制触发采集、定时间采集、特殊事件采集和实时采集等。(2)记录传感器信息,包括其埋设位置、编号等,便于传感器的管理。(3)对硬件系统进行

远程控制。(4)对测试数据进行预处理,为后续自动分析和人工分析提供良好的信息源。(5)显示各阶段数据,可以显示实时监控数据、历史数据或对几种参数同时进行显示对比分析。(6)数据分析功能,包括统计分析、结构参数识别、结构安全评估等。(7)自动报表功能,可根据系统自动或者人工分析的结果生成各类型报表。(8)保障系统管理的安全,对不同管理者提供不同的权限。(9)对各类不同参数的测试数据进行综合管理,只需从统一的数据库中调取信息。(10)自动预警功能,制定预警值,采用多种预警方式对存在隐患部位进行预警,准确的反映所存在问题的部位,根据监测数据的变化情况提出应急措施。

2.2 监测设计思路

监测设计思路可简单概括为重大隐患边坡在线监测和定期常态巡查。前者指在现有工程地质资料与防护设计前提下,对复杂和重大安全隐患的边坡实施在线监测,并把潜在灾害的预测、评估工作贯穿于施工阶段和运营阶段,对边坡地质灾害做出科学准确的评价与预警工作;后者是指施工完毕后在平台上对边坡管理转入定期常态巡查阶段,对重点边坡进行实时监测预警,指导相关人员及时开展防护工作。

2.3 监测仪器设备

核心设备是 GNSS 监测站、基准站采用了自主研发的 LZMR02 接收机(图 1)。GNSS 接收机内部集成了 4 G 通信、数据高速备份以及电源监测功能模块。该接收机选用铝合金外壳,具有体积小、重量轻、安装方便、功能强大、性价比高等优点。该机型既可以与外部设备连接,也可以通过 4 G 进行通信。可用于需要导航定位和时间同步的各个领域,如边坡监测、船舶航行、车辆定位、科研及电力故障检测等领域。

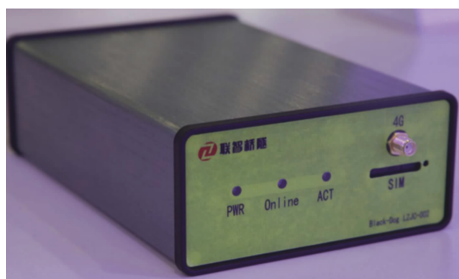


图 1 LZMR02-GNSS 接收机

Fig.1 LZMR02-GNSS receiver

采用 FS-YL 高精度数字雨量计实时监测降雨量,能够直接连接用户电脑,组成可靠的雨量自动监测、报警系统(图 2)。



图 2 FS-YL 雨量计

Fig.2 FS-YL rain gauge

2.4 预报警机制

依据预警等级设定原则、预警阈值设定原则、相关规范规程及本项目具体情况,确定的 GNSS 地表位移及深层位移预警建议值如表 1 所示。

表 1 GNSS 预警等级及预警值

Table 1 GNSS warning levels and warning values /mm

预警等级	地表位移监测参数	预警值	深层位移监测参数	预警值
一级预警	水平位移(Δxy)	40	水平位移(Δx)	60
	沉降(Δz)	35	水平位移(Δy)	55
二级预警	水平位移(Δxy)	35	水平位移(Δx)	50
	沉降(Δz)	30	水平位移(Δy)	45
三级预警	水平位移(Δxy)	30	水平位移(Δx)	40
	沉降(Δz)	25	水平位移(Δy)	35
四级预警	水平位移(Δxy)	25	水平位移(Δx)	30
	沉降(Δz)	20	水平位移(Δy)	25

3 监测内容及测点布设

3.1 地表水平位移及沉降

根据边坡工程地质条件及设计文件,本监测工作主要依据《公路滑坡防治设计规范》(JTG/T 3334—2018)、《公路路基设计规范》(JTGD 30—2015)、《岩土工程监测规范》(YS 5229—96)、《工程测量规范》(GB 50026—2007)和《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T 18314—2009)等国家规范和行业标准文件执行。在施工期间易塌处共布置 4 个 GNSS 地表位移监测站(BD01~04)和 1 个基准站(BDJZ),具体布置如图 3 所示。其中,图 4 为 DB04 监测点现场图。

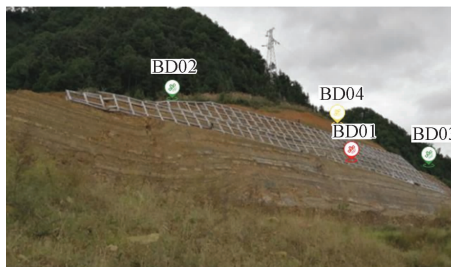


图 3 GNSS 地表位移监测站

Fig.3 The layout diagram of GNSS surface displacement monitoring station



图 4 BD04 监测点现场图

Fig.4 Field diagram of BD04 monitoring point



图 5 深层位移监测孔布设示意图

Fig.5 Schematic diagram of hole layout for deep displacement monitoring



图 6 ZK06 监测点现场图

Fig.6 Field map of ZK06 monitoring points

4 监测数据分析

4.1 GNSS 地表位移及沉降监测数据分析

累计位移量指将第一次监测坐标值作为初始值来计算总位移值,可分为累计水平位移和累计沉降。监测周期内(2019 年 12 月 3 日到 2020 年 2 月 3 日)地表位移监测点 BD02 ~ BD04 监测数据分析如下。

(1)BD02 地表位移监测点本监测周期内水平方向及高程方向数据变化量较小,未见明显的变化趋势,

3.2 深层位移

根据边坡现状及周围环境,使用串联式固定测斜仪,在青年互通 B 匝道右侧边坡布设 2 个深层位移监测断面,共 6 个深层位移监测孔,监测孔编号为 ZK05 ~ ZK07、ZK11 ~ ZK13;在青年互通 C 匝道右侧边坡布设 1 个深层位移监测断面,共 3 个深层位移监测孔,监测孔编号为 ZK21 ~ ZK23。各监测点位的具体布置详见图 5,图 6 为 ZK06 监测点现场图,表 2 为各测点监测深度及埋设间距统计。

基本处于稳定状态。BD02 监测点位移-时间曲线图详见图 7。

表 2 各测点监测深度及埋设间距统计表

Table 2 Statistical table of monitoring depth and embedding interval of each measuring point /m

测点编号	设计监测孔深	实际监测孔深	测点埋设间距
ZK05	45	45	1
ZK06	25	25	1
ZK07	18	18	1
ZK11	24	24	1
ZK12	25	25	1
ZK13	18	18	1
ZK21	48	48	1
ZK22	32	32	1
ZK23	18	18	1

(2)地表位移监测点 BD03 从时间-位移曲线图上分析,其变化趋势主要分为两个阶段,BD03 监测点位移-时间曲线图详见图 8。

a)2019 年 12 月 3 日到 2020 年 1 月 12 日,水平方向和高程方向位移曲线呈持续向上递增趋势,变形速

率及变形量明显增大,水平方向最大变形速率达到 17.77 mm/d(2019 年 12 月 5 日),高程方向最大沉降速率达到 10.29 mm/d(2019 年 12 月 7 日),属于加速变形阶段。

b)2020 年 1 月 12 日到 2020 年 3 月 2 日,水平及高程方向位移曲线呈现渐变收敛状态,变形速率趋缓,属于缓慢匀速变形阶段。

本监测周期内,水平方向位移变化量 Δxy 约 196.89 mm,平均位移速率为 3.28 mm/d;高程方向本监测周期内的沉降量 Δz 为 44.98 mm,平均沉降速率为 0.75 mm/d。

(3)地表位移监测点 BD04 从时间-位移曲线图上分析,其变化趋势主要分为两个阶段,位移-时间曲线图详见图 9。

a)2019 年 12 月 3 日到 2020 年 1 月 12 日,水平方向及高程方向位移曲线呈持续向上递增趋势,变形速率及变形量明显增大,水平方向最大变形速率为 4.06 mm/d(2019 年 12 月 5 日),高程方向最大沉降速率达到 13.42 mm/d(2019 年 12 月 8 日)。

b)2020 年 1 月 12 日到 2020 年 2 月 3 日期间,水平及高程方向位移曲线逐渐趋于平缓,变形速率及实时变形量减小,时间-位移曲线呈现收敛状态。

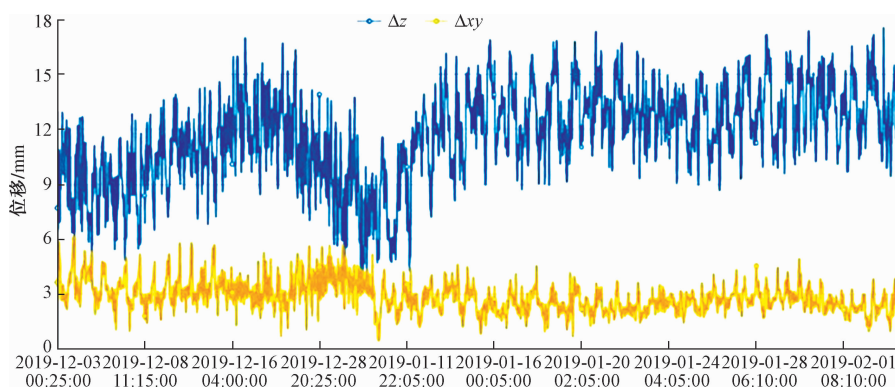


图 7 BD02 监测点累计位移-时间曲线图

Fig. 7 Cumulative displacement-time curve of BD02 monitoring point

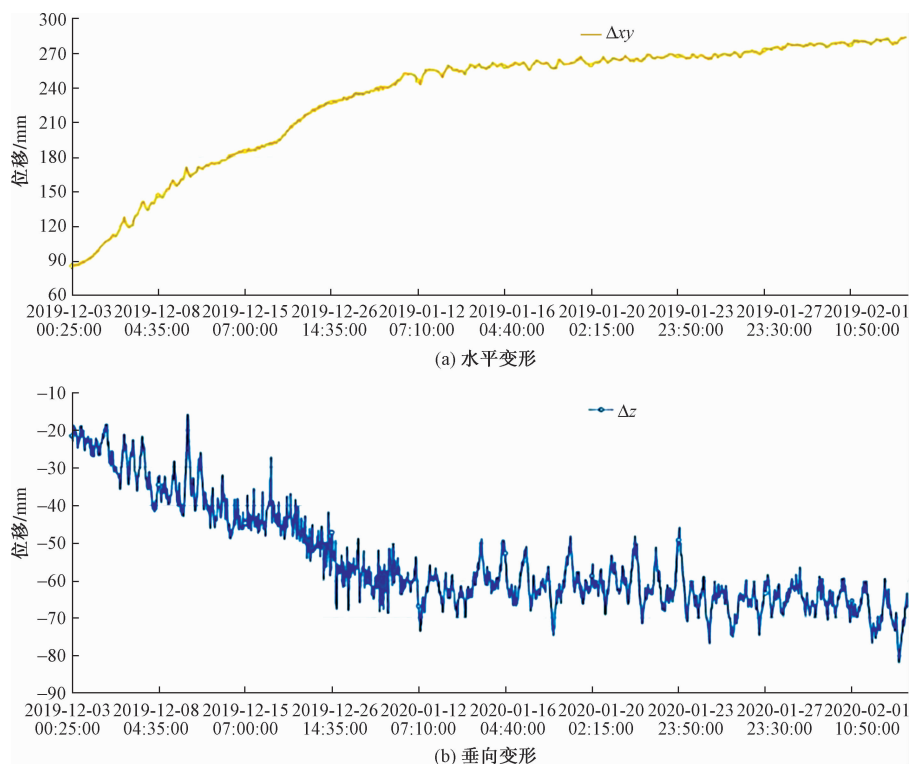


图 8 BD03 监测点累计位移-时间曲线图

Fig. 8 Cumulative displacement-time curve of BD03 monitoring point

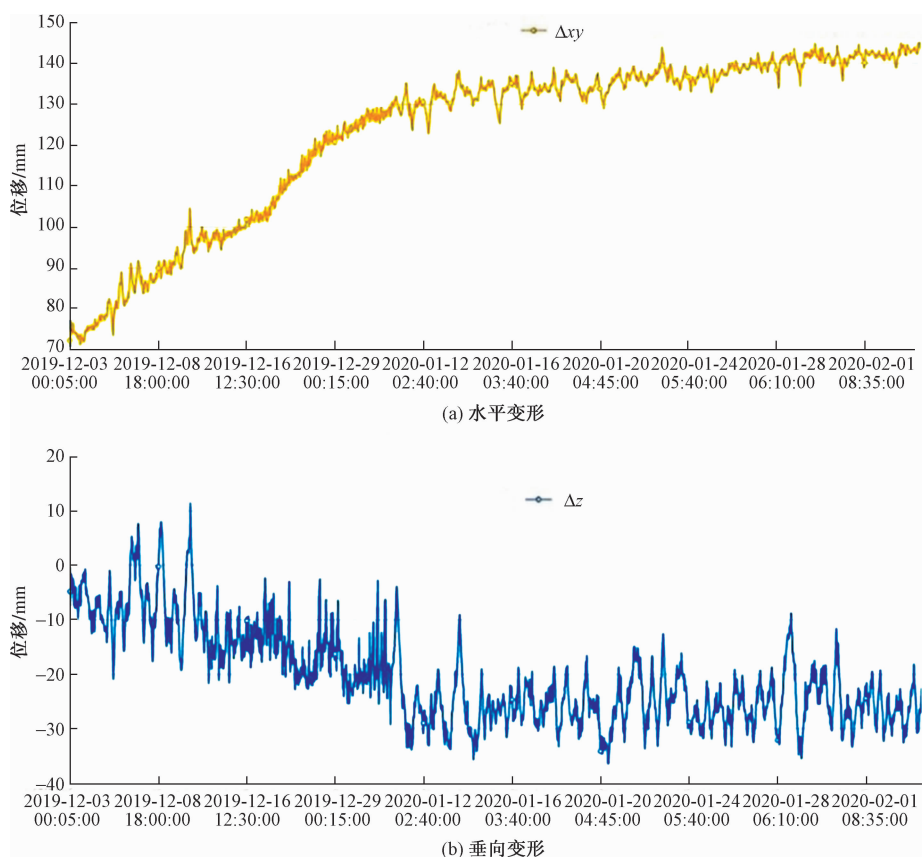


图9 BD04 监测点累计位移-时间曲线图

Fig. 9 Cumulative displacement-time curve of BD04 monitoring point

本监测周期内,水平方向位移变化量 Δxy 约 71.34 mm,平均位移速率为 1.19 mm/d;高程方向本监测周期内的沉降量 Δz 为 18.60 mm,平均沉降速率为 0.31 mm/d。

4.2 深层位移监测数据分析

由于监测周期内深层位移监测钻孔 ZK05 ~ ZK07 及 ZK11 ~ ZK12 在一定深度范围内的监测数据变化明显,变形量、变形速率相对较大且位移趋势未见收敛;而 ZK21、ZK22 稍有变形趋势,变形量、变形速率缓慢且基本处于稳定状态。于是,这里以钻孔 ZK05 和 ZK21 为代表进行分析。

(1) ZK05 深层位移监测孔 3 月 27 日上线监测,截止到 5 月 3 日累计地表位移量 153.98 mm,变形区域主要处于 1 ~ 27 m 深度,其中 1 ~ 7 m、15 ~ 27 m 深度的位移量相对较大,变形趋势相对较明显,该监测点位移-深度-时间曲线如图 10 所示。

(2) ZK21 深层位移监测孔 3 月 27 日上线监测,截止到 5 月 12 日累计地表位移量 29.84 mm,变形区域主要集中在 2 ~ 40 m 深度,位移速率缓慢且变形量较小,基本处于稳定状态。该监测点位移-深度-时间曲线如

图 11 所示。

4.3 雨量监测结果分析

基于 FS-YL 雨量计监测结果,对研究区 2020 年 1 月 14 日—2 月 15 日的降雨数据进行了汇总(图 12)。由图 12 可知,监测时间段内降雨主要集中在 1 月 15 日、1 月 23 日、1 月 24 日、2 月 06 日和 2 月 15 日,降雨量均大于 20 mm/d,其中最大达 46.43 mm/d。从日降雨量统计数据并结合图 7 ~ 图 9 可知,BD03、BD04、BD05 监测点的变形特征受降雨控制非常明显。当降雨量超过 20 mm/d 时,BD03、BD04 监测点位移波动较强。因此,当降雨在阈值范围波动时,监测装置向接警人发出预警,即对监测数据进行持续的跟踪观察,掌握监测信息动态,并在第一时间组织相关人员进行现场勘察、核实情况,对确实存在引起数据变化或影响结构体的危险源,及时进行处治。同时,技术服务单位根据现场情况组织技术人员同步配合开展处治技术服务工作。

4.4 监测结果分析

(1) 本监测周期内,由于 GNSS 地表位移 BD01 设备受边坡支护施工影响,随后进行了拆除,未进行监

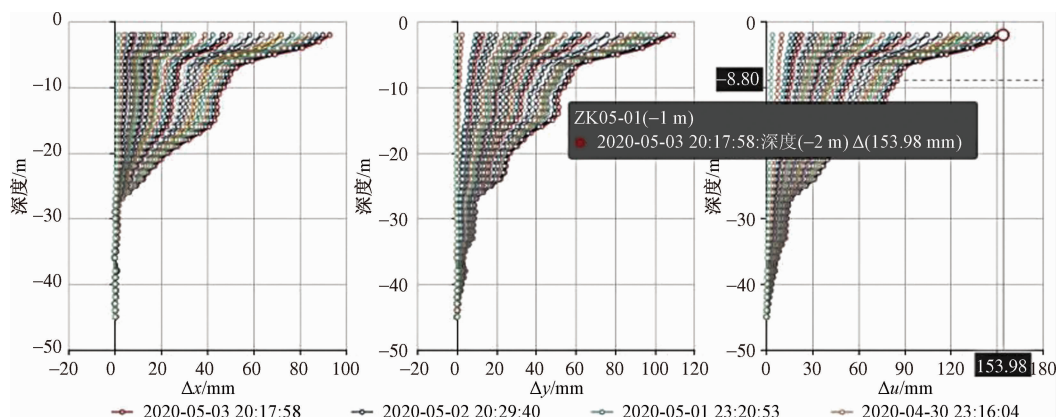


图 10 ZK05 监测点位移-深度-时间曲线图

Fig. 10 Displacement-depth-time curve of ZK05 monitoring point

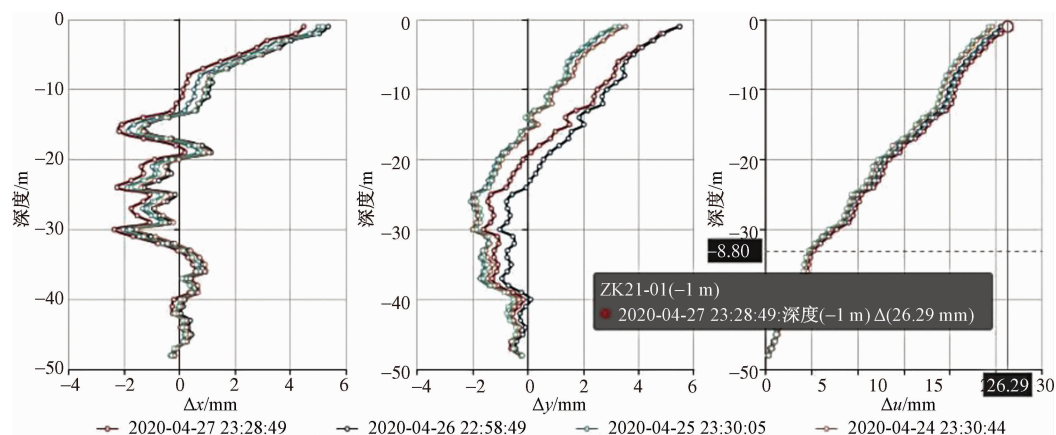


图 11 ZK21 监测点位移-深度-时间曲线图

Fig. 11 Displacement-depth-time curve of ZK21 monitoring point

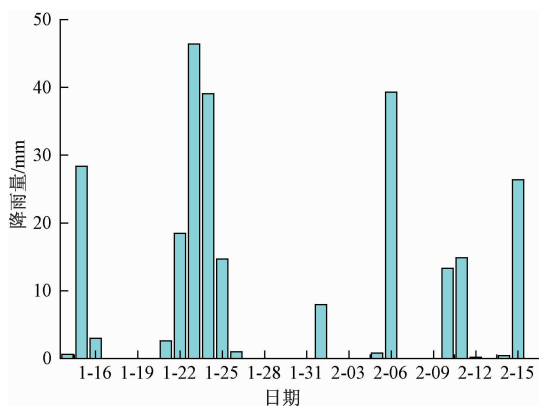


图 12 2020 年 1 月 14 日—2 月 15 日降雨监测数据

Fig. 12 Rainfall monitoring data from January 14 to February 15, 2020

测。BD02 基本处于稳定状态,未见明显的位移及沉降趋势;而 BD03 及 BD04 地表位移监测点(站)数据变化较大,先后超过相应的预警阈值。据此 GNSS 监测系统迅速发出预警到相关部门单位,随后提供了预

警分析报告。

(2)本监测周期内,钻孔 ZK05 ~ ZK07 及 ZK11 ~ ZK12 在一定深度范围内的监测数据变化明显,变形量、变形速率相对较大且位移趋势未见收敛;而 ZK21 稍有变形趋势,变形量、变形速率缓慢且基本处于稳定状态。

5 边坡稳定性及数值模拟分析

5.1 边坡稳定性分析

当高速公路边坡发生滑坡时,主要有内和外两种因素。内因主要包括地形地貌、岩体特性、地震等方面,外因主要包括降雨、地下水流动、人类活动等方面。内和外两种因素之间存在密切联系,综合分析是评价边坡稳定性最直接和有效的方法。

结合该高速公路边坡的勘察资料,发生滑坡的原因如下。(1)内因。该边坡无不利外倾结构面,整体处于稳定状态;但岩体节理裂隙极发育并且风化差异

性较大、软弱不均,页岩夹泥灰岩互层较多,在施工过程很可能发生局部崩塌。(2)外因。监测期间未遇到强降雨,岩体的基本性质不发生较大变化,但仍会使岩土滑动带的抗滑力减小。

工程上计算滑坡稳定性和剩余下滑力时常用规范^[13]中的传递系数法计算,具体计算公式(公式中符号的意义参见文献^[13]):

$$T_i = F_s W_i \sin a_i + \psi_i Y_{i-1} + W_i \cos a_i \tan \varphi_i - c_i L_i;$$

$$\psi_i = \cos(a_{i-1} - a_i) - \sin(a_{i-1} - a_i) \tan \varphi_i$$

本文计算该边坡开挖的自重(天然状态)和坡体开挖后自重+降雨(饱和状态)。参数选取主要根据反演结果和地区经验值确定(表3)。由规范^[15]可知,高速公路的设计安全系数可取 $K = 1.2 \sim 1.3$,考虑最不利工况下的滑坡推力,故 K 取为 1.3。

表 3 滑坡物理力学计算参数

Table 3 Calculation parameters of landslide physics and mechanics

岩 性	参 数	天然状态	饱和状态
粉质黏土	内聚力 c/kPa	7.4	6.9
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	19.2	18.7
碎石土	内聚力 c/kPa	0	0
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	38.2	36.9
泥灰岩	内聚力 c/kPa	16.8	15.0
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	26.3	25.5
页岩夹泥灰岩	内聚力 c/kPa	25.9	22.8
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	27.3	25.1
灰岩	内聚力 c/kPa	20.7	19.5
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	28.1	26.2

通过计算可知,该边坡在天然状态下的剩余水平下滑力为 2 042 kN/m,在饱和状态下的剩余水平下滑力为 2 877 kN/m,故该区域地段在天然状态下的最大安全储备仅为 2 654.6 kN/m。若发生连续降雨,会降低岩体的抗剪强度,从而超过下滑力的安全储备。这与采用 GNSS 监测系统分析大致相同,验证了 GNSS 监测系统的准确性。

5.2 边坡应变数值模拟分析

本文基于 Geo5 有限元软件,对该边坡最危险的剖面进行数值模拟分析。采用 Mohr-Coulomb 屈服准则描述土的应力应变关系,相关参数取自表 3 和室内试验资料,工况考虑无防护和锚杆框架梁防护。整体采用较稀疏的网格划分,在坡体交接处等可能产生应力集中的区域加密网格。模拟结果如图 13 ~ 16 所示。

由图 12 ~ 16 可以看出,锚杆框架梁防护形式对该边坡防护具有一定作用,但是仍然存在滑坡风险。该

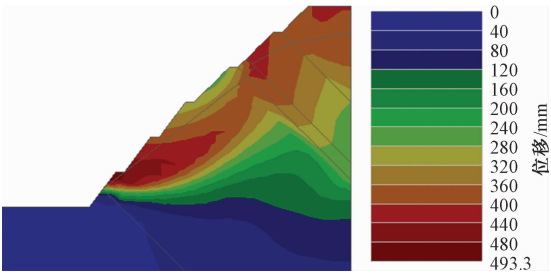


图 13 无防护边坡整体位移云图

Fig. 13 Overall displacement cloud map of unprotected slope

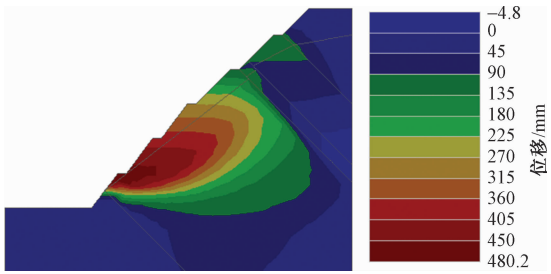


图 14 无防护边坡水平位移云图

Fig. 14 Horizontal displacement cloud map of unprotected slope

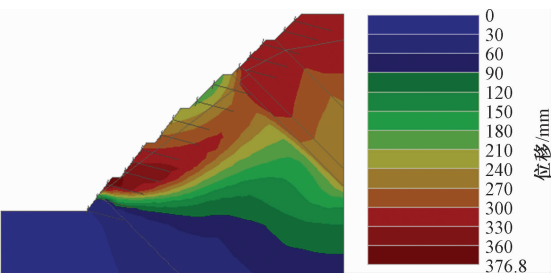


图 15 锚杆框架梁防护边坡整体位移云图

Fig. 15 Overall displacement cloud map of the slope protected by the bolt frame beam

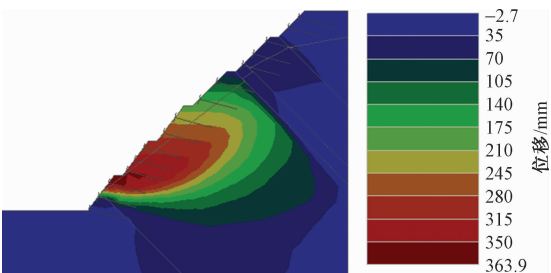


图 16 锚杆框架梁防护边坡地表水平位移云图

Fig. 16 Cloud map of surface horizontal displacement of slope protected by anchor beam

边坡在一定深度范围内的地表水平位移及沉降变化较大,超过相应的阈值,并且其趋势未见收敛,说明该边坡存在安全隐患,与采用 GNSS 监测系统分析大致相同,验证了 GNSS 监测系统的准确性。

6 结论

本文为探究基于 GNSS 监测站的高速公路边坡自动化监测系统的实际作用,自主开发北斗+安全监测云平台,实时管理和分析地表位移和深层位移,当坡体出现不稳定现象迅速时发出预警到相关部门单位;随后,基于传递系数法计算该边坡的剩余下滑力并且采用 Geo5 有限元软件进行数值模拟,其结果均验证了该监测系统的准确性,得出了以下结论:

(1)从监测结果分析可以看出,该坡体已出现了局部垮塌及开裂等不稳定现象,建议制定相应的应急预案及措施,必要时停止施工作业,封锁现场,禁止人员靠近。对边坡上已安装完毕的监测点予以保护,防止因人为扰动或者破坏,影响对监测数据的真实性的判断。

(2)监测、分析的结果表明该系统能有效解决人工监测的缺点,且保证监测数据的时效性。

(3)建立自动化监测系统不仅能管理、分析实时采集的各项监测数据,还能根据系统自动或人工分析生成各类型报表,及时反馈预警信息并配套提供分析报告,对结构的运行和维修具有重要意义,为未来智能化监测边坡提供了一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 丁祖全,黎志恒. 兰州市地质灾害与防治[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,2009. [DING Z Q, LI Z H. Geological disasters and Prevention in Lanzhou City[M]. Lanzhou: Gansu Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [2] 中华人民共和国国土资源部. 全国地质灾害通报[R]. 2012. [Ministry of Land and Resources, PRC. National geological disasters bulletin[R]. 2012. (in Chinese)]
- [3] 王川. 贵州省开阳县龙井湾滑坡稳定性分析与自动化监测系统的建设[D]. 成都理工大学, 2012. [WANG C. Stability analysis and construction of automatic monitoring system for Longjingwan Landslide in Kaiyang County, Guizhou Province[D]. Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)]
- [4] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2008. [DENG X J. Road subgrade and pavement engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)]
- [5] BOCK Y. Monitoring of deformations with GPS[C]. Deformation measurements workshop, Mass. Inst. of Tech, Cambridge, Mass, 1986: 96-111.
- [6] FOULGER G R, BEUTLER, BILHAM R, et al. The iceland 1986 GPS geodetic survey: tectonic goals and data processing results[J]. Bulletin Gtodsique, 1993 (67): 148-172.
- [7] 谢向进, 荣幸. GNSS 技术在变形监测中的应用[J]. 科技资讯, 2008, 23(6): 4-5. [XIE X J, RONG X. Application of GNSS technology in deformation monitoring[J]. Science & Technology Information, 2008, 23(6): 4-5. (in Chinese)]
- [8] 朱宝柱. GNSS 技术在怀新高速公路高边坡监测中的应用研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018. [ZHU B Z. Application research of GNSS technology in monitoring high slope of Huai-Xin expressway[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)]
- [9] 薛长龙. 基于多源信息的鹤大高速公路边坡监测与稳定性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(12): 340-343. [XUE C L. Roadside slope monitoring and stability analysis of Heda expressway based on multi-source information[J]. Road Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2019, 15(12): 340-343. (in Chinese)]
- [10] 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. [ZHAO P T, ZHANG S B, LU G Y. Application of GNSS automatic online monitoring in highway slope monitoring[J]. China Science and Technology Information, 2019(18): 66-68. (in Chinese)]
- [11] 杨飞, 汤罗圣, 王云安, 等. 高速公路边坡自动监测与稳定性分析[J]. 山西建筑, 2019, 45(6): 123-124. [YANG F, TANG L S, WANG Y A, et al. Automatic monitoring and stability analysis of expressway slope[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(6): 123-124. (in Chinese)]
- [12] 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. [RONG M, LI F A, MAN X Y. Application of GNSS automatic monitoring system in surface displacement monitoring of highway slope[J]. Western China Communication Science & Technology, 2020(2): 22-26. (in Chinese)]
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015. [Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)]