

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3671-07

基于表面位移的公路滑坡监测预警研究

张勇慧¹, 李红旭¹, 盛 谦¹, 邬 凯¹, 李志勇², 岳志平²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

摘 要: 公路滑坡是常见的地质灾害, 但对运营期公路边坡进行长期监测并成功预警的实例却很少。主要原因是公路边坡点多、线长、规模小、缺乏详细的地质勘探资料、监测费用高、预警难度大。利用拉索触发式位移计对滑坡表面位移进行监测, 精度可达 1 mm, 通过电信的 GPRS 公网实时传送到远程监控中心, 全程自动化, 且费用低。同时, 利用有限元商用软件 PLAXIS 的强度折减模块和塑性分析模块对不同参数组合进行计算, 在缺乏滑坡岩土体强度参数、渗透系数、土-水特征曲线等资料的情况下, 建立滑坡安全系数与表面监测位移的关系, 从而通过表面位移量的变化进行阶段式预警, 并制定相应的预防措施。提出的方法已在湘西某高速公路滑坡获得应用。

关 键 词: 公路滑坡; 表面位移监测; PLAXIS 软件; 预警

中图分类号: U 416

文献标识码: A

Study of highway landslide monitoring and early warning based on surface displacements

ZHANG Yong-hui¹, LI Hong-xu¹, SHENG Qian¹, WU Kai¹, LI Zhi-yong², YUE Zhi-ping²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Hunan Communications Scientific Academy, Changsha 410015, China)

Abstract: The successfully monitoring and early warning for highway slope in operation period are not common though the highway landslide is the common disaster. The main reason is that the highway slope has the characteristics including spot distribution along road, long interval, small scale, large quantity and lack of statistics, which cause the high monitoring costs and difficult early warning. In this paper, the wire pulling displacement meter with the precise of 1 mm is used to monitor the surface displacements of landslide, and the GPRS net of China Telecom is applied to transform the monitoring data; the whole system has high automation and low cost. Meantime, the FEM software PLAXIS is used to conduct the strength reduction analysis and plastic analysis. Based on the calculation results with different parameters, the relationship between the slope safety factor and surface displacement is established in lack of the strength parameters, permeability and soil water characteristic curve; and the corresponding early warning measures are proposed according to the change of surface displacement. This method has been applied to a highway landslide in Hunan province.

Key words: highway landslide; surface displacement monitoring; PLAXIS; early warning

1 引 言

我国滑坡灾害频发, 每年由于各种滑坡造成的损失达 200 亿元。根据全国 290 个县市地质灾害调查结果, 滑坡在地质灾害中所占比例高达 51%, 大量的滑坡实例表明, 降雨特别是暴雨是触发滑坡、泥石流等地质灾害的主要诱因, 暴雨诱发的滑坡比重竟占滑坡总数的 90%^[1]。监测预警是有效减少地质灾害损失的主要措施之一, 相关研究主要有 2 种方法: 一种是区域性宏观预测预报, 在滑坡填图的

基础上, 根据降雨和滑坡之间的经验与理论关系、易导致滑坡的区域地质、地貌因素, 划分滑坡易发区, 如 Keefer. et al^[2]根据区域降雨遥测网获得的实时雨量观测数据以及国家气象站的降雨预报信息, 采用斜坡稳定性模型对暴雨期间滑坡的可能性进行预报。高华喜、殷坤龙^[3]探讨了深圳区域性滑坡发生的临界降雨量和降雨强度阈值, 将滑坡灾害的地质模型与降雨模型耦合建立了滑坡灾害的空间预警预报区划指标和等级系统。另一种是利用多种设备对潜在滑坡体进行全方位监测, 包括变形、物理和

收稿日期: 2010-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40972202); 国家 863 计划专题课题(No 2007AA11Z121); 岩土力学与工程国家重点实验室开放课题(No. Z000705)。
第一作者简介: 张勇慧, 男, 1969 年生, 博士, 副研究员, 从事岩土工程与地质灾害。E-mail: yhzhang@whrsm.cu.cn

化学场、地下水、诱发因素,获得滑坡体的各类数据和变化过程,通过综合分析来预测滑坡破坏趋势。第一种方法适用于区域性预警,对于单体边坡并不适用;第二种方法通常针对一些规模巨大的滑坡体进行监测,监测手段多,范围广,耗资大,多用于水电、矿山行业^[4]。

公路边坡具有沿公路呈点状分布、间隔距离长、规模小、数量多的特点,历史数据积累少且易受人类工程活动和环境变化影响,缺乏详细的勘探数据,无法获取每个边坡详细的岩土体特征及力学参数。目前我国对运营期公路边坡进行长期有效监测并成功预警的实例较少,多数是施工开挖过程中的监测^[5]或运营中非常重要的大型古滑坡^[6],其原因有两方面:一是在监测方式上,因为公路边坡规模小、数量多,且滑坡具有突发性,故监测方式应遵循简明化、自动化、实时化、远程化、经济化的原则。多个监测量,多种监测手段集成化的方法不符合经济化原则,应该选取最有代表性的监测量如表面位移进行监测。对于表面位移监测,传统的机械式位移计、倾斜仪、全站仪、光电测距仪等仪器需人工操作,无法自动遥测;近景摄影、INSAR 干涉雷达、GPS 测量等现代测试方法费用昂贵,如 GPS 采用一机多天线技术,也需两台接收仪,且精度只能达到 3 mm^[7-9],若进行连续自动观测,仪器的野外保护也是问题。二是预警方法上,大多是利用数学模型如斋藤迪孝模型、HOCK 法、苏爱军模型、灰色模型、生物生长模型以及基于非线性理论的协同预报模型、突变理论模型和动态分维跟踪预报模型等,对时间位移发展趋势进行预测^[10-13]。由于这些模型依赖于多种历史数据,不考虑滑坡的地质结构、力学特性和自身的演变过程,对于缺乏历史数据的公路滑坡不太适用。

本文利用拉索触发式位移计进行边坡表面位移监测,通过 GPRS 公网实时传送到远程监测中心,监测费用低廉,全程自动化。同时,利用有限元软件 PLAXIS 的强度折减模块和塑性模块进行组合计算分析,在缺乏强度参数、渗透系数、土-水特征曲线等的情况下,获得边坡安全系数与表面监测位移的关系,从而通过表面位移量的变化进行阶段式预警,制定相应的措施。本文提出的方法已在湘西某高速公路滑坡获得应用。

2 公路滑坡表面位移监测

2.1 拉索触发式位移计测试原理

本文采用的拉索触发式位移计在传统单索拉线

式仪器(图 1)的基础上,经过多项改良,兼具长测距和高精度的特点。传感器以数字方式感应测量,测值精确稳定,可以避免一般模拟转换式讯号(电位计或可调电阻式开度转换器)受温度与噪声影响而测值随机浮动的缺点。传感器在装机时微调零点之后,随时可输出数字式位移测值,不受外部设备电源间断的影响,可避免一般转角脉波型编码器在断电后需重新校正设定的缺点。本传感器以串行式数值输出,可选配 RS-485 或 RS-232 输出,亦可配接电流讯号变送器,转换为 DC4~20mA 讯号,供一般 PLC 系统兼容使用。位移计连接有传讯器,它与接收器之间进行小区域(500 m 以内)的封闭式无线通信。接收器可以同时接收 8 组位移计的无线信号,收讯后再以 RS-485 或 RS-232 等标准通讯格式传给数据采集设备。这种短距离无线通信方式可方便多台位移计在一定的区域内构成监测单元,减少外接电缆的使用。数据采集器采集到接收器传出的数据信号后,输入 GPRS 模块,由 GPRS 模块通过移动的 GPRS 公网传送到远程监控中心的 PC 机上,通过采集软件接收编译并显示出来。

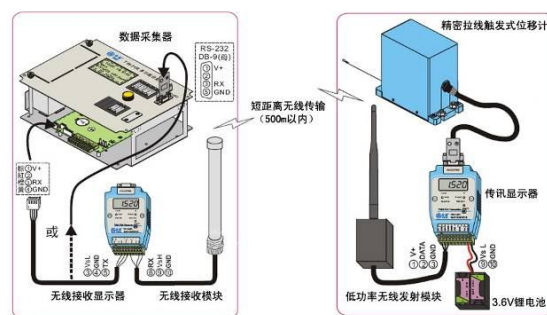


图 1 拉索触发式位移计原理

Fig.1 Operational principle of the wire pulling displacement meter

拉索触发式位移计的优点有:触发式设计,实用型自动化监测,当钢索拉伸达 1 mm 间距时,位移传感器即主动产生一个脉冲信号;防灾式设计,检查位移变化状态,简明不误报,平时无位移变化时,传感器几乎不耗电,若位移变化发生,触发信号电路;节能式设计,内置式锂电池,可使用 3~5 年,对滑坡的主要监测内容,采用低耗电的磁感式触发电路,可长期监测。

2.2 拉索触发式位移计的标定

笔者自行设计了拉索式位移计标定装置(图 2)。位移计通过螺栓固定在基座上,拉索的自由端穿过卡线栓小孔,绕过限位滑轮固定在缠线轮上,拧紧卡线栓中的螺栓压住拉索,通过摇动手摇柄带

动拉索产生拉伸，拉索带动卡线栓和游标做同步运动，从而量测拉索拉伸的距离。游标到达卡尺量程后，通过固定螺栓固定缠线轮使得拉索不能回缩，松开卡线栓上的螺栓，将卡线栓和游标退回起始位置，可实现循环标定。部分标定结果见表 1，在量程 4 m 的范围内误差小于 1 mm，满足精度要求。

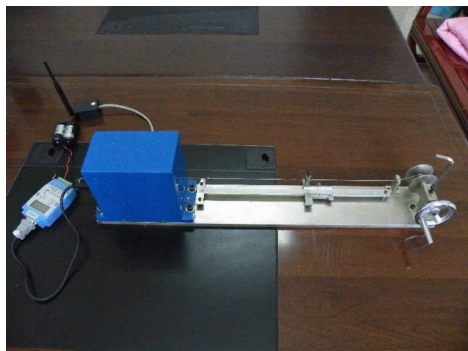


图 2 拉索触发式位移计标定装置
Fig.2 Calibration equipment of the wire pulling displacement meter

表 1 拉索触发式位移计标定数据
Table 1 Calibration of the wire pulling displacement meter

显示值/mm	10	50	100	500	1 000	4 000
游标读数/mm	10.05	50.20	100.36	500.42	1 000.38	4 000.78

2.3 拉索触发式位移计的现场安装

拉索触发式位移计利用滑坡周边的相对不动点与滑坡上某监测点的相对位置变化，获得监测点的相对位移量，是一种双向位移测量装置，既可测拉伸的变化量，也可测收缩的变化量，因此，可以方便地因应实际场地的情况将不动点选在坡顶或坡底。具体安装方法是在滑坡相对不动点上用混凝土浇筑一个固定基座，在基座台面上固定安装位移计保护箱，位移计固定在保护箱内，保护箱上开一个小孔供拉索通过。在监测点处埋入钢管或木桩，采用 1 mm 钢丝绳一端连接位移计出口拉索，另一端固定在监测点的钢管或木桩上，全程用 PVC 管或薄铁皮管保护，每隔 1.5~2.0 m 采用木桩或钢管作为支撑，钢丝绳全程保持直线或折线拉伸状态，若坡面起伏较大需要转向，则利用滑轮进行过渡。

3 表面位移预警方法研究

对于缺乏历史数据的公路滑坡，各种基于统计规律的预测模型并不适用。若要通过表面位移的变化进行预报预警，应该参照降雨滑坡发生的机制与过程，即降雨—渗透—浸润—参数下降—安全系数

下降—位移增大—滑坡，进行理论模型的分析 and 计算，获得边坡位移变化和安全系数的关系。降雨滑坡形成机制的本质在于雨水入渗边坡后破坏了边坡的应力平衡体系。因而，从理论上揭示雨水入渗后边坡应力的变化过程，以及雨水在边坡中的渗透特性和渗透过程，是理论模型研究的关键。理论模型的最大优点是科学地表达了降雨在滑坡中的作用，严密地表征了降雨、滑坡关系。然而，建立理论模型需要大量、深入的基础研究。对于公路边坡，由于点多、线长、规模小，通常地质勘探不详细，缺乏岩土力学试验资料，要进行理论模型分析存在很大困难，一些主要的资料包括岩土体力学参数、饱和—非饱和渗透系数、土—水特征曲线等都是未知数。

在缺乏岩土体强度参数、渗透系数、土—水特征曲线的情况下，如何研究边坡安全系数与表面监测位移的关系，从而通过表面位移量的变化进行预警？本文提出采用有限元软件 PLAXIS 的强度折减模块和塑性模块进行组合分析的简化研究方法。

PLAXIS 是近年来在岩土工程中广泛应用的有限元分析软件。其功能强大，主程序包含了 4 个计算分析模块：塑性分析、强度折减分析、固结分析、动力计算分析。

PLAXIS 的强度折减分析模块，原理是利用式（1）调整岩土体的强度指标 c 、 φ ，其中 F_s 为折减系数，然后对边坡进行有限元分析，通过不断地增加折减系数 F_s ，分析边坡应力状态，首先部分单元开始屈服，应力在单元之间重新分配，岩土体中局部失稳逐渐发展，直至其达到临界破坏（临界破坏指在加载导致土体发生破坏的过程中，相对刚度从 1.0（弹性）逐渐减小到 0（破坏）时的状态，即塑性区贯通时位移无限发展的状态），此时得到的折减系数即为安全系数 F_s

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = F_s \quad (1)$$

式中： c 、 φ 为输入的强度参数值； c_r 、 φ_r 为折减后的强度参数值，该值恰好使得边坡处于极限平衡状态。在该方法中，外部荷载保持不变，岩土体的强度参数成比例逐渐减小，使岩土体结构达极限状态，岩土体所具有的强度参数值与相应极限状态的强度参数值之比，就是所求的安全系数，其前提条件是破坏时所得到的强度参数降低系数 F_s 趋于一个常数。

PLAXIS 的塑性分析模块，可通过有限元塑性分析获得边坡的变形形态。

本文研究思路是：雨水入渗边坡，主要是降低了岩土体的力学参数 (E 、 c 、 ϕ)，破坏了边坡的应力平衡力系。对于公路边坡，在缺乏岩土体力学参数、饱和/非饱和渗透系数、土-水特征曲线等，要进行理论模型分析存在很大困难，但可以通过查阅工程地质勘察报告、《工程岩体分级标准》、《岩石力学参数手册》等资料，获取边坡各类种岩土体力学参数的取值范围。如图 3 所示，在各类岩土体力学参数的取值范围内设计不同组合的 E 、 c 、 ϕ 值，来表征降雨入渗对边坡的影响，通过 PLAXIS 的强度折减计算模块，分别计算各参数组合对应的滑坡安全系数 F_s ，通过塑性计算模块，分别计算各参数组合对应的边坡上监测点的位移 u ，这样就可以画出相应的滑坡安全系数与监测点表面位移的关系曲线，以此为依据来确定该边坡监测点表面位移的阶段预警值。

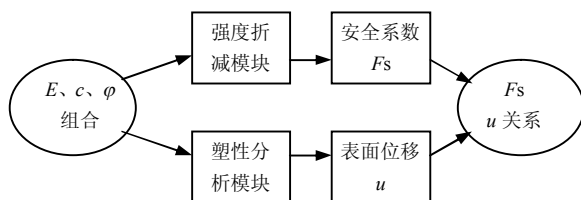


图 3 本文研究思路
Fig.3 Technique routing

4 工程实例

选择湖南湘西地区某高速公路某路段边坡进行监测预警研究。该路段为顺向坡段，坡面较平整，地形坡度为 $15^\circ \sim 24^\circ$ ，呈中间陡，两头缓的趋势。山顶高程约 210 m，坡脚下部为水库，库水位以下坡角约为 20° ，高差约为 15 m。现库边浅滩高程约为 95 m，相对坡高约 115 m。公路下部靠河床部位有较多的民房，地表植被发育。

该路段公路以上基岩大部分出露，岩性以白垩系上统中组紫红色中厚层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩夹砂岩为主，单层厚度为 0.2~0.5 m，岩性较软弱，中间夹有厚 2~5 m 砂岩，表部有厚 2~6 m 的强风化岩体；岩性软硬相间，层与层之间夹有厚薄不一的软弱夹层或泥膜，夹层岩性为强风化的泥岩或可塑状的黏性土，性状较差，山坡易沿该层面产生滑动，对工程影响较大；泥质粉砂岩、粉砂质泥岩抗风化能力较弱，且有遇水即软化、失水干裂崩解的特征，而砂岩抗风化能力较强，因此，边坡上部岩体完整性不一。公路路基以下以第四系残坡积 Qedl 黏性土夹碎石为主，厚 2~5 m，局部有少量基岩出露。

段内构造简单，岩层呈单斜构造，岩层总体产状为 $N60^\circ \sim 80^\circ E/NW \angle 16^\circ \sim 24^\circ$ ，走向与坡向基本一致。根据现场勘测及钻孔资料，在公路开挖边坡及路基下部，存在较多的泥化夹层，泥化夹层岩性主要以泥夹全风化的泥岩为主，性状较差，泥约占 80%~90%，可塑状，泥岩呈碎块、碎屑状，全风化，约 10%~20%，厚 1~5 cm。根据岩层产状及公路边坡几何形态及河床基岩出露高程等综合分析，确定了深约 14 m 处的层间泥化夹层为控制边坡滑移的主要结构面。

按本文 2.3 提供的方法现场安装拉索触发式位移计，如图 4 所示，基座采用 $\phi 100$ mm 钢管，用混凝土固定，保护管采用 $\phi 40$ mm 优质 PVC 管，两端的管口及位移计保护箱的出线口用发泡剂填塞，防止进水及小动物进出。



图 4 现场安装图
Fig.4 Photo of field installation

该段边坡共有 3 个地质勘察剖面，监测点位于 2-2 剖面附近，取 2-2 剖面为计算分析剖面。图 5 为从详勘资料中获得的该剖面的地质概化图，其中包括初始地下水位线。图 6 为其计算分析网格图，左右两端取法向约束，底部取固定约束；计算区域为左端由地表向下延伸约 150 m，右端由沅江江底向下延伸约 70 m，底部宽约 365 m。

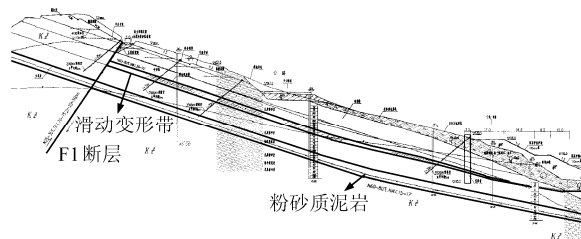


图 5 边坡 2-2 剖面地质概化图
Fig.5 Geology generalizing of section 2-2

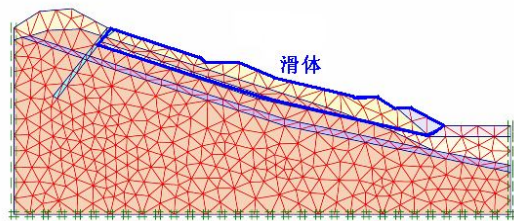


图 6 边坡 2-2 剖面计算网格图
Fig.6 Computing grid of section 2-2

通过查阅参考相关资料，获得粉砂质泥岩、弱风化岩土、泥质粉砂岩和滑带的参数取值范围见

表 2。按照等比例步长下降的原则，对各类岩土的 E 、 c 、 φ 值组合设计了 20 种方案，见表 3。

表 2 各类岩土体参数取值范围
Table 2 Parameter value ranges of rocks and soils

岩性	弹性模量 E/GPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	泊松比
滑体	0.80~1.80	20-25	30~80	20	0.35
粉砂质泥岩	2.80~5.00	27-35	100~320	24	0.30
泥质粉砂岩	5.00~9.00	27-35	250~400	25	0.30
滑带	0.30~1.00	10-26	8~50	19	0.42

表 3 不同参数组合方案及计算出的安全系数和位移
Table 3 The parameters and computing results in different cases

方案	粉砂质泥岩			弱风化岩体			滑带			泥质粉砂岩			安全系数 F_s	监测点位移 u/mm
	弹性模量 E/GPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	凝聚力 c/kPa	弹性模量 E/GPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	凝聚力 c/kPa	弹性模量 E/GPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	凝聚力 c/kPa	弹性模量 E/GPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	凝聚力 c/kPa		
1	2.80	27.00	100.00	0.80	20.00	30.00	0.30	10.00	8.00	5.00	27.00	250.00	0.982	不收敛
2	2.82	27.08	102.20	0.81	20.05	30.50	0.31	10.16	8.42	5.04	27.08	251.50	0.998	不收敛
3	2.84	27.16	104.44	0.82	20.10	31.01	0.31	10.32	8.85	5.08	27.16	253.03	1.006	101
4	2.87	27.25	106.78	0.83	20.15	31.54	0.32	10.49	9.29	5.12	27.27	254.62	1.011	85
5	2.89	27.34	109.26	0.84	20.21	32.10	0.33	10.67	9.77	5.17	27.34	256.31	1.012	73
6	2.92	27.43	111.94	0.85	20.27	32.71	0.34	10.87	10.28	5.22	27.43	258.14	1.018	60
7	2.95	27.54	114.90	0.87	20.34	33.39	0.35	11.08	10.84	5.27	27.54	260.16	1.028	50
8	2.98	27.66	118.23	0.88	20.41	34.14	0.36	11.33	11.48	5.33	27.66	262.43	1.044	42
9	3.02	27.80	122.06	0.90	20.50	35.01	0.37	11.61	12.21	5.40	27.80	265.04	1.056	35
10	3.07	27.97	126.55	0.92	20.60	36.03	0.38	11.93	13.07	5.48	27.97	268.10	1.071	31
11	3.12	28.16	131.92	0.95	20.73	37.25	0.40	12.32	14.09	5.58	28.16	271.76	1.087	29
12	3.19	28.40	138.45	0.98	20.87	38.74	0.42	12.80	15.34	5.70	28.40	276.22	1.109	27
13	3.27	28.69	146.58	1.01	21.06	40.59	0.45	13.39	16.89	5.88	28.70	281.76	1.137	26
14	3.37	29.07	156.89	1.06	21.29	42.93	0.48	14.14	18.86	6.03	29.07	288.79	1.168	25
15	3.50	29.55	170.23	1.12	21.59	45.96	0.52	15.11	21.41	6.28	29.55	297.88	1.217	24
16	3.68	30.19	187.82	1.20	21.99	49.96	0.58	16.39	24.77	6.60	30.19	309.88	1.277	23
17	3.92	31.05	211.51	1.31	22.53	55.34	0.66	18.11	29.29	7.03	31.06	326.03	1.349	23
18	4.24	32.24	244.02	1.46	23.27	62.73	0.79	20.47	35.49	7.62	32.24	348.20	1.414	22
19	4.70	33.89	289.55	1.66	24.31	73.08	0.90	23.79	44.19	8.45	33.89	379.24	1.433	22
20	5.00	35.00	320.00	1.80	25.00	80.00	1.00	26.00	50.00	9.00	35.00	400.00	1.452	22

采用 PLAXIS 软件，输入初始地下水位线进行孔隙水压力计算，再进行初始应力场计算，获得边坡自重应力场。按照表 3 所列的不同组合 E 、 c 、 φ 的方案，进行强度折减模块计算分析，获得边坡对应的安全系数，进行塑性模块计算分析，获得对应的表面监测点 A 的位移，计算结果见表 3。图 7 为在强度折减模块分析时，不同安全系数下的位移随计算过程的变化曲线（由于篇幅关系，此处仅取荷载总乘子 0.8 以上部分），在安全系数大于 1 时，随着计算过程的进行，位移逐渐增大，并终止于某一

值，当安全系数小于 1 时，位移逐渐增大，但不收敛，边坡破坏。图 8 为边坡表面监测点位移和安全系数的对应关系曲线，采用数学方法进行拟合，得到指数形式的表达式，用位移对安全系数进行一阶求导，得到该关系曲线的导数曲线如图 9 所示。取导数曲线中变化较大的 4 个点 $A\sim D$ ，其在关系曲线上对应的点，对位移的发展趋势影响较大。其中 A 点对应的位移为 24 mm，安全系数为 1.217， B 点对应的位移 29 mm，安全系数为 1.087， C 点对应的位移 42 mm，安全系数为 1.044， D 点对应的位移

为 60 mm，安全系数为 1.018。可以认为，检测点表面位移达到 24 mm 后 (A 点) 进入初始发展阶段，在 29 mm (B 点) 进入快速发展阶段，在 42 mm (C 点) 进入高速发展阶段，在 60 mm (D 点) 进入破坏垮塌阶段。

实际上该处监测点是在公路完工近半年后才布置的，而边坡在开挖完成后就已经形成了初始位移，从图 8 和表 3 可以判断，初始位移为 22 mm，故监测点的实测位移是 22 mm 后的增量位移。制定如表 4 判断标准：在监测点增量位移值达到 2~7 mm (A~B 点) 时认为是低风险阶段，边坡滑动进入初始发展阶段，应加强观测；处于 7~20 mm 时 (B~C) 认为是中风险阶段，边坡进入加速滑动期，此时应会同管理部门、设计部门、施工方进行现场勘察，制定相应保护措施，消除隐患；在 20~38 mm 阶段 (C~D) 认为高风险，此时边坡进入快速滑动期，应保持高度关注，并加强监测和巡视，现场竖立警示牌，提醒过往车量注意；在大于 38 mm (D 点) 后，认为风险极大，应该制定相应的交通管制措施，随时封闭道路。

该监测点从 2009 年 6 月 21 日起开始有效监测至 2010 年 4 月 30 日，位移量值一直无变化。说明该边坡目前处于稳定状态，未有滑移迹象。事实上，监测期间，笔者数次到该边坡调查维护，监测仪器处于有效状态，而边坡没有出现表面位移迹象。

表 4 测点表面位移预警及相关措施
Table 4 Surface displacement early warning and associate measures

参数、阶段、措施	风险程度			
	低风险	中风险	高风险	大风险
监测点位移增量/mm	2~7	7~20	20~38	》38
发展	初始	加速	快速	垮塌
阶段	发展	发展	发展	破坏
相关措施	加强观测	现场勘察 消除隐患	现场警示	交通管制 关闭道路

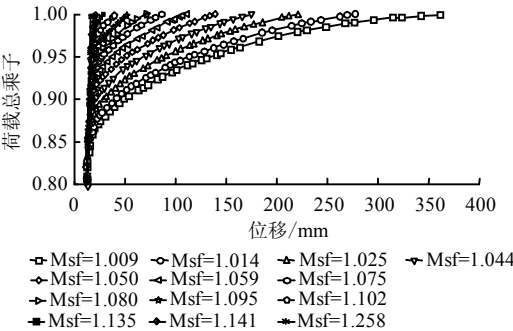


图 7 不同安全系数下的位移随计算过程的变化曲线
Fig.7 Variation curves of displacements with computing in different safety factors

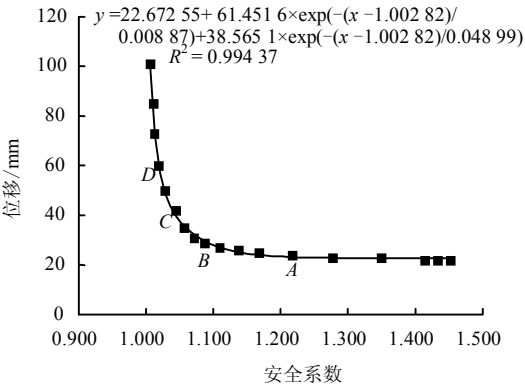


图 8 边坡监测点表面位移和安全系数的对应关系曲线
Fig.8 Curve of surface displacements and safety factors

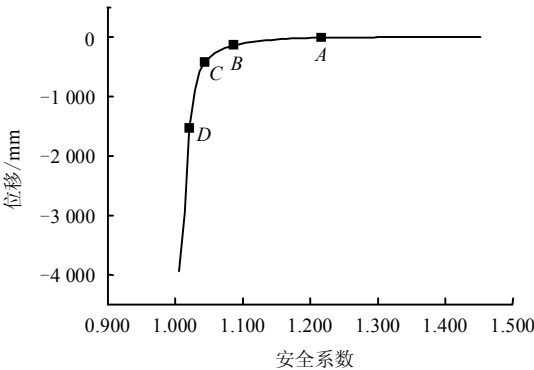


图 9 位移和安全系数关系曲线的导数曲线
Fig.9 Derivative curve of surface displacements and safety factor

5 结 语

公路边坡具有沿公路呈点状分布、间隔距离长、规模小、数量多的特点，历史数据积累少且易受人类工程活动和环境变化影响，缺乏详细的勘探数据，无法获取每个边坡详细的岩土体特征及力学参数，且滑坡具有突发性。所以，监测方式应遵循简明化、自动化、实时化、远程化、经济化的原则，预警方法应简单明了，不依赖历史数据，不依赖力学与物理参数，不进行过多繁复的计算。

本文利用拉索触发式位移计进行边坡表面位移监测，通过 GPRS 网络实时传送到远程监测中心，监测费用低廉，全程自动化。同时，利用有限元软件 PLAXIS 的强度折减模块和塑性模块进行参数组合分析，在缺乏边坡岩土体强度参数、渗透系数、土-水特征曲线的情况下，获得边坡安全系数与表面监测位移的关系，从而通过表面位移量的变化进行阶段预警，制定相应的预警措施。本文提出的监测预警方法符合简明化、自动化、实时化、远程化、经济化的原则，但仍需在实际滑塌边坡进行进一步

验证, 另外, 边坡深部位移的无线监测预警也在发展中, 整套技术成熟后可望在公路、铁路、矿山等边坡监测预警中推广应用。

参 考 文 献

- [1] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29—34.
LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and Characteristics of geo-hazard in China[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2004, 15(2): 29—34.
- [2] KEEFER D K. et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall[J]. **Science**, 1987, 238: 921—925.
- [3] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055—1060.
GAO Hua-xi, YIN Kun-long. Discussion on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1055—1060.
- [4] 张金龙, 徐卫亚, 金海元, 等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1820—1827.
ZHANG Jin-long, XU Wei-ya, JIN Hai-yuan. Safety monitoring and stability analysis of large-scale and complicated high rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1820—1827.
- [5] 张晓平, 吴顺川, 王思敬. 类土质路堑边坡动态监测数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3431—3440.
ZHANG Xiao-ping, WU Shun-chuan, WANG Si-jing. Dynamic monitoring and numerical analysis of soil-like cut slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.2): 3431—3440.
- [6] 杨天亮, 彭建兵. 公路滑坡成因与防治及预报方法研究[J]. 西部探矿工程, 2005, (2): 216—217.
- [7] 张卫中, 尹光志, 李东伟, 等. 失稳路堑边坡监测系统设计及其应用[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 69—74.
ZHANG Wei-zhong, YIN Guang-zhi, LI Dong-wei, et al. Design and application of a monitoring system for unstable cut slope[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2008, 17(3): 69—74.
- [8] 王劲松, 陈正阳, 梁光华. GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1532—1536.
WANG Jin-song, CHEN Zheng-yang, LIANG Guang-hua. Study of real time monitoring system of highway steep slopes based on GPS with multi-antenna[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1820—1827.
- [9] 殷建华, 丁晓利, 杨育文, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 357—364.
YIN Jian-hua, DING Xiao-li, YANG Yu-wen. Integration of conventional instruments and GPS for remote automatic monitoring of slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 357—364.
- [10] 王利, 张勤, 丁晓利, 等. 基于无线通讯网络的 GPS 多天线监测系统及其应用[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 107—110.
WANG Li, ZHANG Qin, DING Xiao-li. GPS multi-antenna monitoring system based on wireless communication network and its application[J]. **Journal of Earth Sciences and Environment**, 2009, 31(3): 107—110.
- [11] 杨有辉, 郑治. 公路滑坡预测预报研究现状及前景展望[J]. 公路交通技术, 2006, (6): 18—20.
YANG You-hui, ZHEN Zhi. Current situation and prospect of expressway landslide forecast[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2006, (6): 18—20.
- [12] 文海家, 张永兴, 柳源. 滑坡预报国内外研究动态及发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 1—4.
WEN Jia-hai, ZHANG Yong-xing. A home and abroad investigative-tendency of landslide forecast[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2004, 15(1): 1—4.
- [13] 许强, 黄润秋, 李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 478—483.
XU Qiang, HUANG Run-qiu, LI Xiu-zhen. Research progress in time forecast and prediction of landslides[J]. **Advance in Earth Sciences**, 2004, 19(6): 478—483.