

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.09

土质滑坡地表倾斜变形特征与基于 MEMS 的倾斜变形监测技术初探

刘晓宇¹ 樊智勇¹ 吴疆²

(1. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;
2. 重庆市万州区地质环境监测站, 重庆 404000)

摘要: 随着现代信息技术快速发展,人们获取滑坡现场各类监测信息的能力越来越强,积累的现场监测数据也愈来愈多,如何充分、精细化地利用监测数据已成为滑坡监测预警工作中重点关注的问题。为此,本文以土质滑坡为研究对象,采用强度折减有限元方法开展地表倾斜变形时空演化特征理论研究,发现地表倾斜变形在滑动面扩展至贯通期间出现“速率排序跃迁”现象,在滑动面贯通后出现“速率突变”现象。采用地表倾斜变形与内部滑动面之间的这种量化关联特性,可以为土质滑坡中短期预测预报方法研究提供新的视角和方向。利用理论研究成果,本文进一步开展地表倾斜变形监测关键技术研究,讨论基于 MEMS 加速度计的倾角传感器的测量原理与测量精度,分析环境温差波动对倾角测量误差的影响,最后介绍基于竖直倾角测量方式研制的普适型滑坡地表倾斜变形监测设备——坡体浅层倾斜变形测量仪。

关键词: 土质滑坡; 预测预报; 地表变形; 时空演化; 数值模拟; 监测技术

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0069-09

Evolution of deformation and monitoring techniques of surface tilt for soil landslides using MEMS technique

LIU Xiaoyu¹, FAN Zhiyong¹, WU Jiang²

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Chongqing Wanzhou Institute of Geological Environment Monitoring, Chongqing 404000, China)

Abstract: With the rapid development of modern information technology, the ability to obtain various monitoring information of landslide is becoming stronger and stronger, and the field monitoring data accumulated is also more and more. How to make full use of the monitoring data has become a key issue in landslide monitoring and early warning work. Therefore, soil landslide is taken as the research object in this paper, and the strength reduction finite element method is used to study the temporal-spatial evolution characteristics of surface tilt deformation. It is found that the so-called “rate sequence transition” occurs during the period from sliding surface extension to breakthrough, and the so-called “rate mutation” occurs after the sliding surface passes through. The quantitative correlation between the surface tilt deformation and the internal sliding surface can provide a new perspective and direction for the study of medium and short-term prediction of soil landslides. With the help of theoretical results, this paper further studies the key techniques

收稿日期: 2020-08-25; 修订日期: 2020-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0802103); 重庆市规划和自然资源局项目“地质灾害智能化监测预警方法研究与示范”(KJ-2019007)

第一作者: 刘晓宇(1973-),男,博士,副研究员,主要从事岩土工程安全监测预警方法研究工作。E-mail: liuxy@imech.ac.cn

of surface tilt deformation monitoring ,discusses the measurement principle and measurement accuracy of inclination sensor based on MEMS accelerometer ,analyzes the influence of environmental temperature difference fluctuation on inclination measurement error ,and finally introduces a universal landslide surface tilt deformation monitoring equipment—Shallow deformation measuring instrument for slope.

Keywords: soil landslide; prediction and forecast; surface deformation; temporal-spatial evolution; numerical simulation; monitoring technique

0 引言

在我国 ,滑坡是一类分布广泛、突发性强、危害严重的地质灾害 ,每年造成大量人员伤亡和巨额财产损失 ,防灾减灾任务十分繁重^[1-2]。近年来 ,借助传感器技术、无线通信技术与嵌入式计算技术为代表的现代信息技术 ,滑坡监测逐渐向自动化、智能化、网络化方向发展 ,已成为主动防控地质灾害的重要手段^[3-4]。随着各类自动化监测设备的广泛应用 ,必将积累大量滑坡现场监测数据 ,这为滑坡预测预报研究提供了机遇 ,也带来了挑战。

当前 ,实际工程中常用的滑坡预报模型主要是基于蠕滑三阶段理论 ,依靠滑坡体加速蠕变阶段位移速率、位移加速度、位移矢量角及位移曲线切线角等可测物理量所表现出的突变特性进行险情预警 ,属于临滑预报模型^[5-7]。一些学者^[8-10]以非线性时间序列理论为基础 ,将滑坡监测点的累积位移时序分解为多个位移分量 ,采用智能算法对位移分量进行训练和预测 ,开展中短期滑坡预报 ,特别是阶跃型滑坡预报研究。为利用多测点监测数据 ,文献^[11-12]提出多源数据融合技术 ,对多个测点监测数据进行特征级提取融合 ,以期获得被测滑坡更为一致性的描述和解释。

作为非线性动力学系统 ,滑坡演化是在重力作用下 ,斜坡体由低能值的无序稳定态向高能值的有序非稳定态演化的过程。在滑坡形成的早期阶段 ,内部单元的破坏行为表现为无序随机性和短程相关性 ,而在滑坡发展的中后期 ,随着微损伤从小尺度到大尺度的串级发展以及主控滑动面的逐渐形成 ,内部单元的破坏行为趋向协同作用与长程关联^[13-15]。在主控滑动面扩展过程中 ,如同滑坡地表裂缝会逐渐形成完整配套的裂缝体系^[16] ,滑坡地表变形场也可能出现与其破坏阶段相匹配的时间-空间演化特征。利用滑坡区不同空间点位时间-倾斜变形监测数据 ,发现并利用地表变形场时空演化特征 ,将有可能为中短期预测预报研究提供新的视角和方向。

基于上述研究思路 ,本文建立土质滑坡有限元模

型 ,采用强度折减方法模拟滑坡变形破坏过程 ,提取坡体地表不同点位处倾斜变形数据 ,寻找滑坡倾斜变形场时空演化规律。借助理论研究成果 ,围绕传感器选型与测量方式等内容开展地表倾斜变形监测技术研究。

1 土质滑坡地表变形时空演化特征

实际滑坡影响因素复杂 ,监测点位少、监测时长有限 ,无法完整地获得滑坡变形破坏全过程变形场信息。为此 ,本文选取均质土坡为研究对象 ,采用笔者自主开发的强度折减弹塑性有限元程序模拟土质滑坡变形破坏过程 ,开展滑坡地表倾斜变形时空演化特征研究。

1.1 土质滑坡力学模型建模

采用文献^[17-18]中的均质土坡算例: 坡高 $H = 20\text{ m}$,坡角 $\beta = 26.57^\circ$,杨氏模量 $E = 100\text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,容重 $\gamma = 20\text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c = 10\text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi = 20^\circ$ 。土体材料均为理想弹塑性材料 ,强度准则采用平面应变条件下莫尔-库仑结合 DP 准则(DP4 准则) ,服从关联流动法则。如图 1 所示 ,整个边坡采用平面三角形有限元网格 ,共划分 14 460 个单元。边坡左、右两侧边界为法向约束 ,底边为双向固定约束。

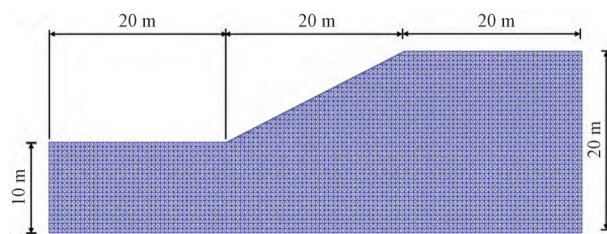


图 1 土质滑坡尺寸及网格划分

Fig.1 Geometry and mesh for soil slope

采用有限元强度折减方法^[19-22] ,通过不断折减土体材料强度参数自动计算土质滑坡变形破坏过程及其位移场演化信息。

$$c' = \frac{c}{\omega} \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan\left[\frac{1}{\omega}\tan\varphi\right] \tag{2}$$

式中 ω 为折减系数,初值为 1.0,以 0.002 的增量步长逐渐增大,直至边坡发生失稳破坏,即

$$\begin{cases} \omega_{n+1} = \omega_n + 0.002 & n > 1 \\ \omega_n = 1.0 & n = 1 \end{cases} \quad (3)$$

采用弹塑性有限元增量迭代算法,求解强度折减条件下的滑坡位移场、应力场与应变场。使用位移收敛准则,位移模允许误差为 1.0×10^{-5} m。采用文献 [17] 提出的局部化带路径追踪技术,图 2 绘制折减系数 $\omega = 1.32, 1.35, 1.38, 1.382, 1.384$ 时滑坡内部局部化带扩展路径。

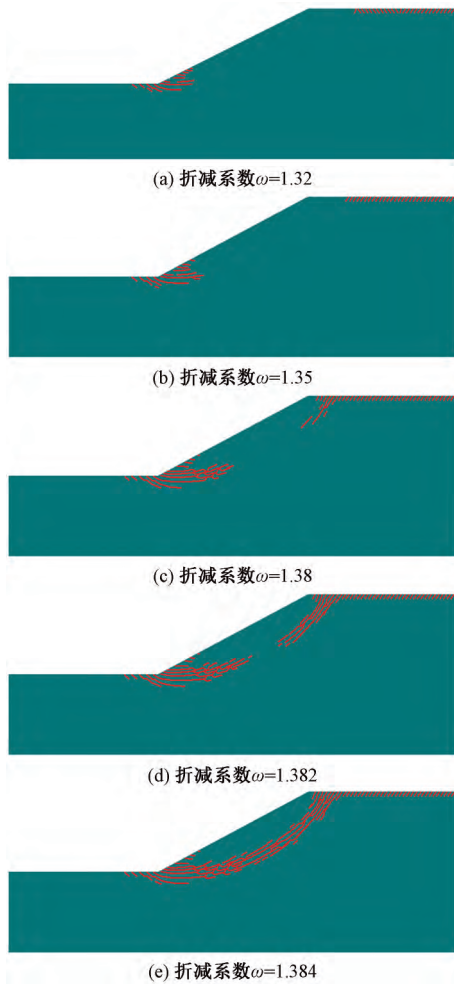


图 2 不同折减系数工况下滑坡体内部局部化带扩展路径
Fig. 2 Localization band path for different reduction factors

1.2 监测点位布设与监测物理量选取

如图 3 所示,在土质滑坡模型地表坡角至坡肩布设 10 处监测点位,编号分别为 ①~⑩。每处点位设置三个测点,且不同点位处测点的布置方式相同。例如,点位 $i=1, \dots, 10$, 布置测点 i' 、测点 i'' 和测点 i''' , 测点 i' 和测点 i''' 位于地表,间距 0.56 m; 测点 i'' 位于测点 i 正

下方浅层土体内,与测点 i 间距 0.5 m。

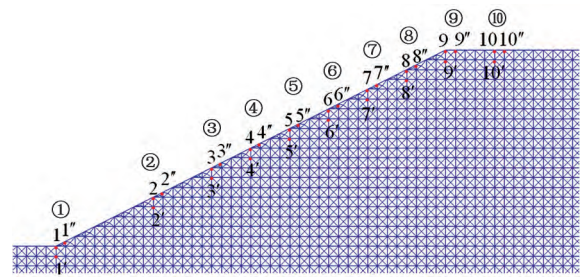


图 3 地表倾斜变形监测点位布设
Fig. 3 Layout of monitoring sites for surface tilt deformation

不同于传统的地表位移监测,本文将测点之间的倾斜变形作为监测物理量,开展边坡地表变形时间-空间变化规律研究。具体地,对于点位 $i=1, \dots, 10$, 倾斜变形监测量包括测点 i'' 围绕测点 i 的水平倾斜角度 $\theta_i^{i''}$ 和测点 i' 围绕测点 i' 的竖直倾斜角度 $\theta_i^{i'}$ 。文中,定义逆时针旋转 ($\theta_i^{i'}$ 前倾) 角度为正值,顺指针旋转 ($\theta_i^{i''}$ 后仰) 角度定为负值。

1.3 地表倾斜变形时间演化特征

图 4 分别为 ①~⑩ 监测点位水平倾斜角度、竖直倾斜角度随折减系数 ω 的变化曲线。通过对 10 个点位变形曲线的对比分析,可以总结如下规律:

(1) 对于所有点位,水平倾斜角度和竖直倾斜角度随折减系数 ω 的变化曲线几乎完全相同。因此,在开展地表倾斜变形研究时,可选择其中之一作为监测物理量。下文中,将主要围绕竖直倾斜角度开展分析。

(2) 不同点位处,竖直倾斜角度随折减系数 ω 的变化量值虽然有差别,但在 $\omega = 1.384$ 附近均发生突变,绝对角度急剧增大,各点位曲线形态趋于一致。结合如图 2 所示的局部化带扩展路径图,可以看出 $\omega = 1.384$ 时局部化带已完全贯通。因此,滑坡区任意点位处的竖直倾斜变形,都可用于临滑预警预报。当竖直倾斜角度监测值出现突变,且变形速率持续增大情况下,表明滑坡体已进入失稳阶段。

(3) 对于监测点位 ① 和 ⑩, 竖直倾斜角度值均为正值,其角度随折减系数 ω 增加逐渐前倾。对于监测点位 ②~⑨, 竖直倾斜角度值均负值,其角度随折减系数 ω 增加逐渐后仰。图 5 为 $\omega = 1.384$ 时的等效塑性应变云图,可以看出监测点位 ① 和 ⑩ 分别位于滑坡前缘剪出口滑动面和后缘滑动面上,而监测点位 ②~⑨ 均位于滑体上。因此,地表倾斜方向可用于土质滑坡区滑动范围圈定,角度前倾的点位可能位于滑坡前后剪出口部位,而角度后仰的点位多会位于滑体上。

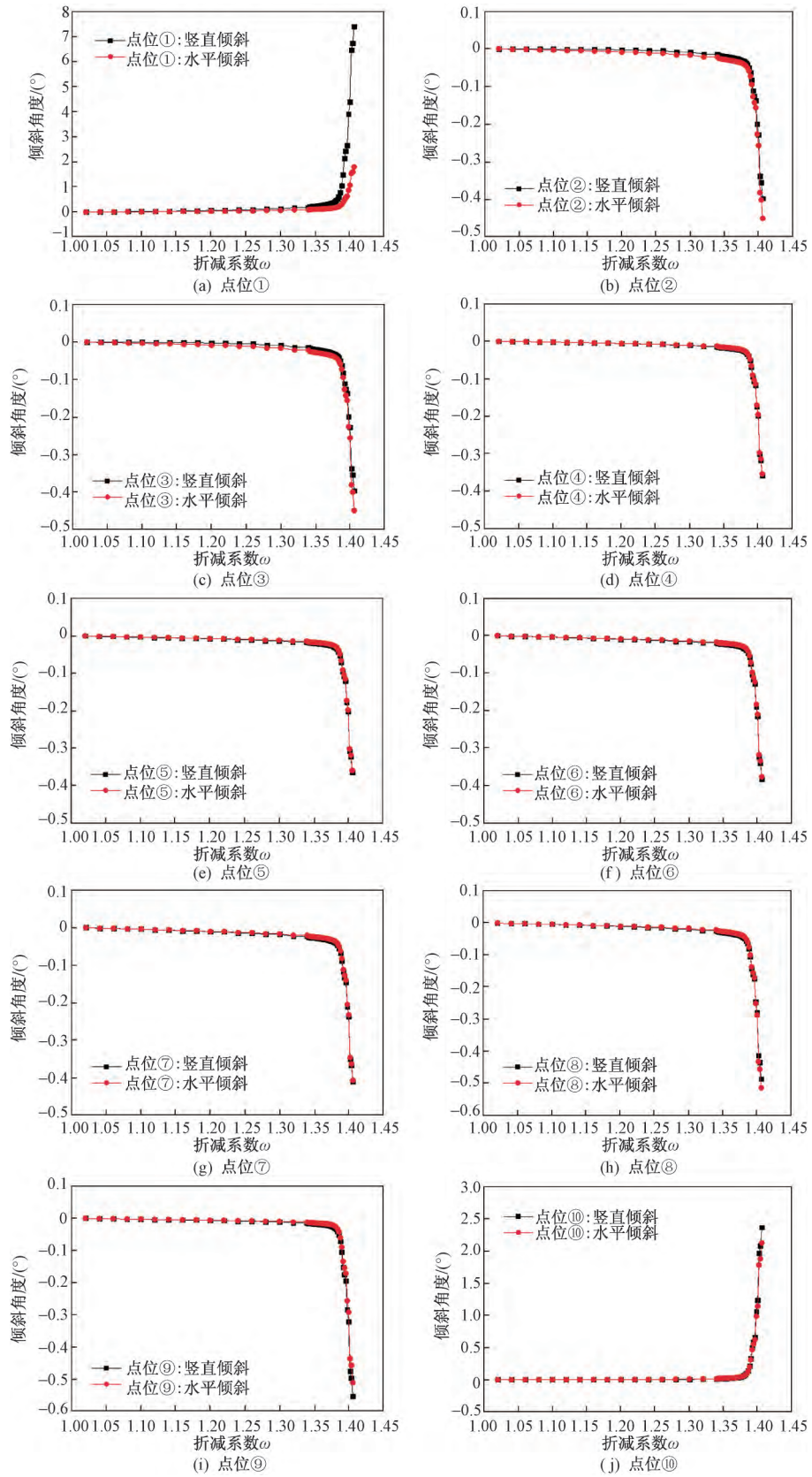


图 4 ① ~ ⑩ 监测点位处水平倾斜角度和竖直倾斜角度随折减系数的变化曲线

Fig. 4 Curves of horizontal and vertical tilt angles with reduction factors at monitoring sites ① ~ ⑩

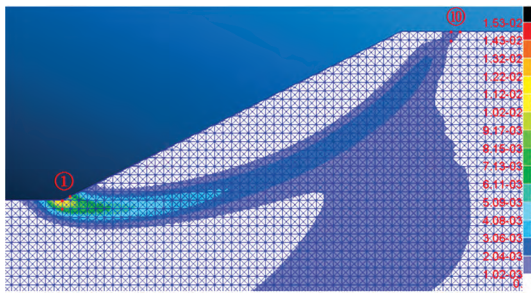


图 5 折减系数 $\omega = 1.384$ 时滑坡内部等效塑性应变云图
Fig. 5 Nephograms of equivalent plastic strain for reduction factors $\omega_n = 1.384$

1.4 地表倾斜变形空间演化特征

在土质滑坡局部化带贯通前,虽然各监测点位的

绝对地表倾斜角度均随折减系数递增而增大,但倾斜速率的次序在滑坡破坏过程中会发生变化。表 1 列举了 9 种强度折减工况下 10 个监测点位的倾斜变形速率的分布情况。表中,点位 $i = 1, \dots, 10$ 处倾斜变形速率定义为

$$\frac{d\theta_i^j}{d\omega} = \frac{\theta_i^j(\omega_{n+1}) - \theta_i^j(\omega_n)}{\omega_{n+1} - \omega_n} \quad (4)$$

其中 $\theta_i^j(\omega_{n+1})$ 和 $\theta_i^j(\omega_n)$ 分别为折减工况 ω_{n+1} 和 ω_n 时点位 i 的竖直倾斜角度。考虑到滑坡演化本质上斜坡岩土体强度在地质营力作用下长时间弱化过程,同时本文假设边坡各位置处材料强度折减程度相同,且服从理想弹塑性本构关系,因此折减系数 ω 仅是与真实时间 T 相关、与材料点空间坐标及其应力状态无关的函数,即

表 1 不同强度折减工况下 10 个监测点位的倾斜变形速率分布

Table 1 Tilt deformation rate distribution of 10 monitoring sites for different reduction factors

| 折减系数 ω | 竖直倾斜速率 $d\theta_i^j/d\omega$ | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|
| | 点位① | 点位② | 点位③ | 点位④ | 点位⑤ | 点位⑥ | 点位⑦ | 点位⑧ | 点位⑨ | 点位⑩ |
| 1.08 | 0.278 | -0.011 | -0.019 | -0.025 | -0.035 | -0.045 | -0.053 | -0.051 | -0.032 | 0.001 |
| 1.16 | 0.391 | -0.015 | -0.032 | -0.036 | -0.043 | -0.053 | -0.063 | -0.062 | -0.036 | 0.011 |
| 1.24 | 0.627 | -0.051 | -0.048 | -0.051 | -0.055 | -0.065 | -0.077 | -0.081 | -0.045 | 0.036 |
| 1.32 | 1.284 | -0.136 | -0.091 | -0.082 | -0.084 | -0.095 | -0.116 | -0.134 | -0.071 | 0.141 |
| 1.35 | 2.87 | -0.25 | -0.185 | -0.155 | -0.150 | -0.165 | -0.195 | -0.245 | -0.150 | 0.405 |
| 1.38 | 20.48 | -1.13 | -0.940 | -0.865 | -0.850 | -0.890 | -1.030 | -1.315 | -1.370 | 6.135 |
| 1.384 | 47.490 | -2.350 | -2.025 | -1.910 | -1.895 | -2.000 | -2.250 | -2.840 | -3.090 | 11.085 |
| 1.39 | 223.615 | -10.015 | -8.960 | -8.720 | -8.760 | -9.250 | -10.340 | -12.780 | -16.650 | 57.860 |

$$\omega = \omega(T) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可以导出

$$\frac{d\theta_i^j}{dT} = \frac{d\theta_i^j}{d\omega} \frac{d\omega}{dT} \quad (6)$$

式(6)表明,由于 $\frac{d\omega}{dT}$ 仅为时间函数,边坡各监测点位处的倾斜角度随时间的变形速率与随折减系数的变形速率呈线性关系。因而 $\frac{d\theta_i^j}{d\omega}$ 可以代替 $\frac{d\theta_i^j}{dT}$, 用于地表倾斜速率变化规律研究。

由表 1 可知,在土质滑坡变形初期阶段(如 $\omega = 1.08$ 和 1.16) ,点位②~⑦的地表倾斜绝对速率单调增大,在点位⑦到达最大值,然后⑧~⑨单调下降,点位②~⑨的绝对速率分布呈 \cap 型。随着土体强度的持续折减, $\omega = 1.24$ 时点位②的绝对速率超过点位③, $\omega = 1.32$ 时点位③的绝对速率超过点位④, $\omega = 1.35$ 时点位⑧的绝对速率超过点位⑦,点位⑤处于最小值,点位②~⑨的绝对速率分布呈 U 型。在随后的土体强度折减中,此 U 型速率分布不再发生改变。结合如图 2 所示的局部化带扩展路径图,可以看出②超③、③超

④都是由于坡脚向上发展的第一条滑动面扩展所驱动,⑧超⑦是由于坡顶向下发展的第二条滑动面扩展所驱动,而点位⑤位于两条滑动面汇合区附近,最晚受到滑动面扩展影响,致使该处绝对速率最小。

基于上述分析结论,可以总结如下规律:

在土质滑坡发展的中后期,随着主控滑动面逐渐形成,滑坡地表倾斜变形空间形态也在发生变化。滑动面上方地表监测点位的倾斜角度绝对速率不仅会增大,而且会出现超越相邻点位倾角速率的情况,如②超③、③超④和⑧超⑦。这种速率排列次序上的跃迁完全由滑动面扩展所驱动,是滑坡内部破坏状态变化的直接反馈。因此,如同“位移突变”与“滑动面贯通”相配套,“速率排序跃迁”也与“滑动面扩展”相配套,可以用于土质滑坡滑动面扩展状态判定与中短期预测预报。

2 基于 MEMS 的地表倾斜变形监测技术

作为一种可测物理量,地表倾斜变形测量具有以下优点:(1)地表倾斜变形的速率突变特性可作为滑坡临滑预警预报判据,其“速率排序跃迁”的时空演化规律能

够为土质滑坡中短期预测预报提供新的思路; (2) 地表倾斜变形只需要测量两监测点之间的相对位移, 规避了测量监测点绝对位移所遇到的技术问题。然而, 地表倾斜变形目前尚未在滑坡监测中广泛应用, 诸如传感器选型、测量方式等技术问题值得进一步讨论研究。

2.1 倾角传感器

从图 4 中各点位的地表倾斜角度曲线变化可知, 在滑动面贯通前地表倾斜角度值很小, 最大值仅为百分之几度。同时, 为捕捉地表变形的时空演化特征, 也需要网格状多监测点位布设。因而, 地表倾斜变形监测设备必须兼具高精度和低成本。为此, 本文建议采用微电机系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 加速度计开展滑坡地表倾斜角度测量。

MEMS 加速度计具有体积小、功耗低、成本低、精度高、易于数字化和智能化等优点, 在汽车电子、航空航天及工农业等领域得到了广泛的应用^[23-24]。MEMS 加速度计本身是一种测量被测物体加速度的微机惯性传感器, 用于倾角测量则是基于重力加速度原理。由于地球上重力加速度 g 的方向始终垂直向下, 当被测物体与重力加速度之间有夹角时, MEMS 加速度计 $X/Y/Z$ 三向感应轴上的加速度也相应发生改变, 经过推导函数关系, 可以间接计算出倾角。如图 6 所示, X, Y, Z 表示加速度计敏感轴输出方向, θ 表示水平面与加速度计 X 轴之间的夹角, ψ 表示水平面与加速度计 Y 轴之间的夹角, ϕ 表示重力矢量与 Z 轴之间的夹角。测量倾角满足

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_{X,OUT}}{\sqrt{A_{Y,OUT}^2 + A_{Z,OUT}^2}} \right) \quad (7)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{A_{Y,OUT}}{\sqrt{A_{X,OUT}^2 + A_{Z,OUT}^2}} \right) \quad (8)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_{X,OUT}^2 + A_{Y,OUT}^2}}{A_{Z,OUT}} \right) \quad (9)$$

其中 $A_{X,OUT}, A_{Y,OUT}, A_{Z,OUT}$ 分别为 MEMS 加速度计 X, Y, Z 三轴输出加速度响应。当位于水平初始位置时 (X 和 Y 轴 $0 g, Z$ 轴 $1 g$) 所有计算角度均为 0° 。

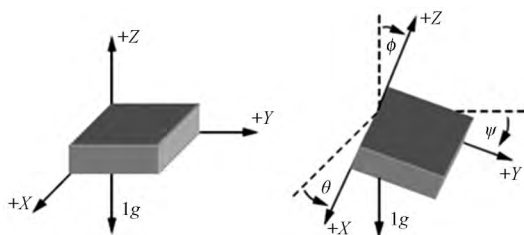


图 6 MEMS 加速度计倾角测量原理图

Fig. 6 Principle of tilt measurement by MEMS accelerometer

基于 MEMS 加速度计, 笔者自主研制了用于滑坡地表倾斜变形测量的倾角传感器。表 2 为中国计量科学研究院出具的 MEMS 倾角传感器 Y 轴测试结果 (测试环境: 温度 20.5°C , 湿度 $45\% \text{RH}$) , 可以看出在 $0 \sim 30$ 的倾角测量范围内, 倾角传感器最大误差小于 0.001 , 满足高精度、低成本地表倾斜变形监测需求。

表 2 MEMS 倾角传感器 Y 轴示值误差测试结果

Table 2 Error test results of MEMS tilt sensor Y -axis

| 标称值 / ($^\circ$) | 实测角度 / ($^\circ$) | |
|--------------------|---------------------|-----------|
| | 正方向 (+) | 负方向 (-) |
| 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| 5 | +4.999 9 | -4.999 9 |
| 10 | +9.999 7 | -9.999 0 |
| 15 | +15.000 2 | -15.000 9 |
| 20 | +19.999 3 | -20.000 1 |
| 25 | +24.999 7 | -25.000 1 |
| 30 | +29.999 1 | -30.000 1 |

2.2 倾角测量方式

地表倾斜变形测量可分为水平倾角和竖直倾角等两种测量方式。图 4 中曲线表明, 这两种测量方式获得倾斜角度几乎完全相同, 理论上均可用于地表倾斜变形测量。不过, 在实际工程应用中, 基于水平倾角测量方式的监测设备通常会暴露在地表外, 不仅容易受人为活动、基础歪斜等外部因素干扰, 而且在环境温度波动下容易产生温度漂移。

例如, 文献^[25]分析了安装于滑坡地表立杆上的倾斜监测设备数据, 指出测量角度随日温度差呈现规律性涨落, 涨落值约为 $\pm 0.1^\circ$ 。笔者将自主研制的 MEMS 倾角传感器固定于室外无倾斜变形的混凝土墩台上, 开展了为期两周的室外测试。图 7 为倾角传感器 X, Y, Z 三轴测量角度随室外温度的变化曲线。可以看出, 测量角度随昼夜温差波动而涨落, 每天昼夜温差约为 20°C , 涨落值约为 $\pm 0.01^\circ$ 。考虑到地表倾斜角度虽然在滑动面贯通后会加速增大, 但在滑动面贯通前的测量值却很小, 采用水平倾角测量方式的地表倾斜监测设备可以用于滑动面贯通后的速率突变测量与临滑预警预报, 但不适于滑动面扩展过程中的地表倾斜变形时空演化特征观测。

因此, 本文建议选择竖直倾角测量方式开展地表倾斜变形监测, 并针对性地研发了一款普适性地表倾斜变形监测设备——坡体浅层倾斜变形测量仪 (简称: 坡倾仪) (图 8)。坡倾仪由杆状倾斜测量单元和数据采集传输终端构成。测量单元长 1 m , 直径 22 mm , 利用内置的高精度三轴 MEMS 计, 精确测量测点附近地表倾斜角度。数据采集传输终端安装在配电箱中, 通过线缆与测量单元相连, 提供倾斜测量数据的定时

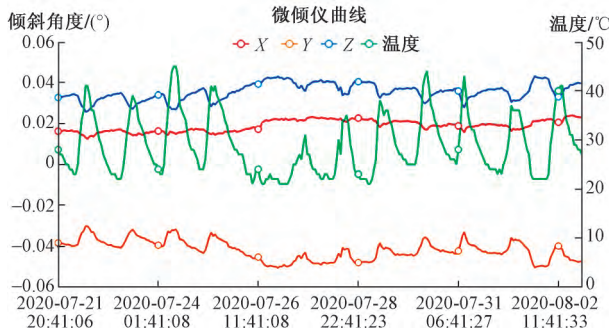
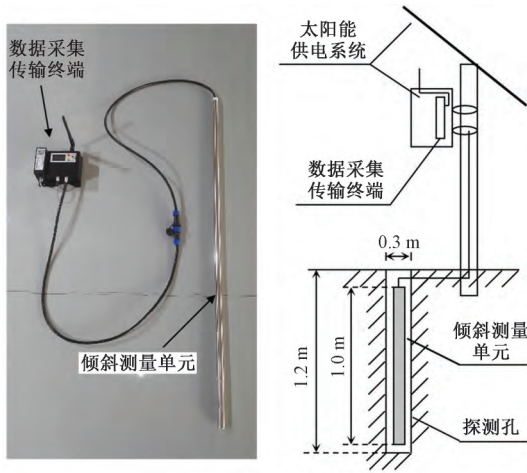


图 7 MEMS 倾角传感器三轴测量角度随室外温度的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of tri-axial measuring angles of MEMS tilt sensor with outdoor temperature

采集和无线远传功能。测量单元埋入坡体浅表层,不仅避免人为活动、基础歪斜等外部因素干扰,并且设备周围土层隔绝了昼夜温差影响,使设备始终处于近恒温环境下,消除了环境温度波动引起的测量误差。目前,坡倾仪已在一些滑坡灾害体上示范应用,其应用效果将另文论述。



(a) 坡倾仪设备及其安装示意



(b) 坡倾仪设备现场实物

图 8 坡体浅层倾斜变形测量仪

Fig. 8 Shallow deformation measuring instrument for slope

3 结论

本文以土质滑坡为研究对象,采用强度折减有限元方法获取不同地表点位处倾斜变形时序数据,并与内部滑动面扩展路径进行对比分析,发现土质滑坡地表倾斜变形具有如下规律:

(1) 在整个滑坡渐进破坏过程中,两种地表倾斜测量方式(水平倾斜和竖直倾斜)测量的倾斜角度随折减系数的变化曲线几乎完全相同。并且,位于滑体上的地表倾斜角度均发生后仰,而位于前后剪出口点位处的倾斜角度均发生前倾。

(2) 地表某些点位处倾角速率在滑坡形成的早期阶段慢于临近点位速率,但在滑动面扩展至其下方后,倾角速率出现快于临近点位速率的现象。这种速率排列次序上的跃迁完全由滑动面扩展所驱动,是滑坡内部破坏状态变化的直接反馈,可用于土质滑坡滑动面扩展状态判定与中短期预测预报方法研究。

(3) 在滑动面贯通后,滑体地表所有点位处的倾斜变形均出现角度急剧增大、速率突变现象,可用于土质滑坡的临滑预警预报。

基于以上研究成果,本文进一步开展地表倾斜变形监测关键技术研究。一方面,建议采用 MEMS 加速度计研制地表倾斜传感器,以确保倾斜角度的测量精度。计量测试报告表明,基于 MEMS 加速度计的倾角传感器在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 测量范围内的最大误差小于 0.001° 。另一方面,建议选择竖直倾角测量方式研制地表倾斜监测设备,以重点消除环境温度波动引起的测量误差。为此,研制了普适型滑坡地表倾斜变形监测设备——坡体浅层倾斜变形测量仪。

参考文献:

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. [HUANG R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454. (in Chinese)]

[2] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858 - 868. [LIU C Z. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. Geological Review, 2014, 60(4): 858 - 868. (in Chinese)]

- [3] 殷跃平, 吴树仁, 等. 滑坡监测预警与应急防治技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [YIN Y P, WU S R, et al. Research on landslide monitoring, early warning and emergency prevention technology [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [4] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 957-966. [XU Q, DONG X J, LI W L. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966. (in Chinese)]
- [5] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004. [YIN K L. Landslide hazard prediction and evaluation [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004. (in Chinese)]
- [6] 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(3): 478-483. [XU Q, HUANG R Q, LI X Z. Research progress in time forecast and prediction of landslides [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 478-483. (in Chinese)]
- [7] 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)]
- [8] DU J, YIN K L, LACASSE S. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides, 2013, 10(2): 203-218.
- [9] 李麟玮, 吴益平, 苗发盛, 等. 基于变分模态分解与 GWO-MIC-SVR 模型的滑坡位移预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1395-1406. [LI L W, WU Y P, MIAO F S, et al. Displacement prediction of landslides based on variational mode decomposition and GWO-MIC-SVR model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1395-1406. (in Chinese)]
- [10] INTRIERI E, CARLÀ T, GIGLI G. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: a literature review [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 193: 333-349.
- [11] 郭科, 彭继兵, 许强, 等. 滑坡多点数据融合中的多传感器目标跟踪技术应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 479-481. [GUO K, PENG J B, XU Q, et al. Application of multi-sensor target tracking to multi-station monitoring data fusion in landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 479-481. (in Chinese)]
- [12] 彭鹏, 单治钢, 董育烦, 等. 多传感器估值融合理论在滑坡动态变形监测中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 928-934. [PENG P, SHAN Z G, DONG Y F, et al. Application of multi-sensor valuation fusion theory to monitoring dynamic deformation of landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 928-934. (in Chinese)]
- [13] BAK P, TANG C, WIESENFELD K. Self-organized criticality: an explanation of the $1/f$ noise [J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4): 381.
- [14] 许强, 黄润秋. 岩石破裂过程的自组织临界特征初探[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(1): 25-30. [XU Q, HUANG R Q. Discussion on self-organized critical characters in the course of rock failure [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(1): 25-30. (in Chinese)]
- [15] 白以龙, 汪海英, 夏蒙芬, 等. 固体的统计细观力学——连接多个耦合的时空尺度[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 286-305. [BAI Y L, WANG H Y, XIA M F, et al. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(2): 286-305. (in Chinese)]
- [16] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104-1112. [XU Q, TANG M G, XU K X, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1104-1112. (in Chinese)]
- [17] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. Géotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [18] 刘晓宇, 赵颖, 刘洋, 等. 土质边坡极限平衡状态及临界滑动面的判定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1369-1378. [LIU X Y, ZHAO Y, LIU Y, et al. Determination method of limit equilibrium state and critical slip surface of soil slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1369-1378. (in Chinese)]

- Chinese)]
- [19] DAWSON E M , ROTH W H , DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. Géotechnique , 1999 , 49(6) : 835 - 840.
- [20] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(10) : 57 - 61. [ZHENG Y R , ZHAO S Y , ZHANG L Y. Slope stability analysis by strength reduction FEM [J]. Engineering Science , 2002 , 4(10) : 57 - 61. (in Chinese)]
- [21] EBERHARDT E , STEAD D , COGGAN J S. Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2004 , 41(1) : 69 - 87.
- [22] PREISIG G. Forecasting the long-term activity of deep-seated landslides via groundwater flow and slope stability modelling [J]. Landslides , 2020 , 17(7) : 1693 - 1702.
- [23] 赵正平. MEMS 智能传感器技术的新进展 [J]. 微纳电子技术, 2019, 56(1) : 1 - 7. [ZHAO Z P. New progress of smart sensor technology based on MEMS [J]. Micronanoelectronic Technology , 2019 , 56(1) : 1 - 7. (in Chinese)]
- [24] 曹贯强,赵文生. 基于 MEMS 加速度计的高精度倾角传感器研制 [J]. 自动化仪表, 2020, 41(3) : 25 - 28. [CAO G Q , ZHAO W S. Development of high precision tilt sensor based on MEMS accelerometer [J]. Process Automation Instrumentation , 2020 , 41 (3) : 25 - 28. (in Chinese)]
- [25] 杨贺,王立伟,郝圣旺. 基于倾角演化的滑坡监测及稳定过程 [J]. 工程力学, 2020, 37(增刊 1) : 193 - 199. [YANG H , WANG L W , HAO S W. Landslide monitoring and its stabilization process based on an in situ tilt monitoring system [J]. Engineering Mechanics , 2020 , 37 (Sup1) : 193 - 199. (in Chinese)]

封面照片说明

云南省昭通市镇雄县乌峰镇小河村杨家寨滑坡专群结合监测预警

2018 年 11 月开始,中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心)联合 20 余家企事业单位、高校与科研院所开展监测预警仪器设备攻关与实验工作,聚焦“降雨与地表变形”两大类 6 种关键测项,按照“两个提高、两个降低”的技术路线,即提高可靠性、提高集成度、降低功耗、降低成本,设计定型滑坡仪 I 型普适型多参数监测预警设备,实现了降雨、含水率、裂缝、位移、倾角与振动加速度的动态监测,截至 2020 年 10 月,已在全国丘陵山区、黄土地区、强震山区与高山-极高山等四类典型地区开展 2 512 处滑坡监测预警实验,系统完好率达到 95% 优秀级,多次有效预警地质灾害灾、险情,图为普适型监测预警设备在云南省昭通市镇雄县乌峰镇小河村杨家寨滑坡的应用。

中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心) 张鸣之 供稿