

土质边坡滑坡灾害的分级预警判据

李梦晨¹, 赵之仲^{2*}, 薛军³, 姜益顺³

1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357;
3. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014

摘要:为解决同一土质边坡在不同变形阶段的变形规律不同,单一预警指标无法表达土质边坡在整个变形过程中的动态变形特征问题,以角位移场、边坡宏观变形迹象、安全系数为预警指标,提出土质边坡滑坡灾害分级预警方法,基于室外模型试验建立各边坡剖面在不同变形阶段内的角位移场,采用 Levenberg-Marquardt 优化算法拟合同一场内的角位移,构造动态分级预警阈值表达式;结合现场调研和相关规范,分别提炼以边坡宏观变形迹象、安全系数为指标的标准阈值;建立以角位移场、边坡宏观变形迹象、安全系数为预警指标,以蓝色(注意级预警)、黄色(警示级预警)、橙色(警戒级预警)、红色(警报级预警)的土质边坡滑坡灾害四级预警机制,充分利用多源信息,实现边坡失稳的及时有效预警,实现土质边坡稳定性变化发展的动态管控。

关键词:土质边坡;滑坡;角位移场;数据拟合;分级预警;预警体系

中图分类号:U416.1⁺4

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0046-10

引用格式:李梦晨,赵之仲,薛军,等.土质边坡滑坡灾害的分级预警判据[J].山东交通学院学报,2024,32(3):46-55.

LI Mengchen, ZHAO Zhizhong, XUE Jun, et al. Grading early warning criteria for landslide on earth slope [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 46-55.

0 引言

滑坡事故对耕地、建(构)筑物、植被、交通和水体等均造成极大损害,给人民群众的生命财产安全带来严重威胁。边坡变形破坏成因复杂,具有随机性和不确定性等特征^[1],迫切需要提出有一定适用性的滑坡预警判据,建立边坡稳定状态的综合预警模型,对判断边坡变形演化行为和实施预警干预措施具有重要的科学意义和现实意义。

边坡失稳塌滑预警涵盖预警指标选取、预警阈值提取及预警等级划分等内容,失稳前预警是最有效的非工程减灾措施之一^[2]。王一帆等^[3]结合国内重大滑坡监测预警和应急抢险经验,提出基于切线角的临滑预警指标;杨宗信等^[4]采用阵列式位移测量技术,提出依据位移指标的临滑预警方法;冯巩等^[5]、郭飞等^[6]收集大量案例,以位移速率作为预警指标,采用工程类比法提取预警阈值;左双英等^[7]采用软件 PFC^{3D} 分析贵州省罗甸县纳缝堆积的滑坡情况,根据监测点的位移突变确定预警阈值;耿海深等^[8]选择安全系数作为预警指标,研究不同降雨情况下的滑坡稳定性,确定分级预警阈值。

滑坡预警判据种类丰富,以位移研究较突出^[9-10]。根据边坡变形机理^[11]可知,裂缝出现在坡体内

收稿日期:2023-04-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB160013);山东省交通运输科技计划项目(2023B25);新型道路材料国家工程研究中心开放课题(202400000114);山东省高速公路技术和安全评估省级重点实验室开放性课题(SH202103)

第一作者简介:李梦晨(1996—),女,山东泰安人,博士研究生,主要研究方向为边坡稳定性监测,E-mail:2825324808@qq.com。

***通信作者简介:**赵之仲(1978—),男,山东德州人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为路基路面工程、BIM技术等,E-mail:zhaozhizhong@sdjtu.edu.cn。

部,延伸至边坡表面。当前基于位移的预警指标研究多集中于表面位移,选取的分析指标较单一,不能充分利用监测数据,在一定程度上降低预警的及时性和可靠性。借鉴工程经验或采用临滑状态的临界值确定预警过程中的指标阈值,对边坡稳定性的分级预警研究较少,滑坡预警的精度较低。各类边坡的内部构造及所处地理环境存在差异,目前建立的边坡稳定性预警模型大多针对某一特定具体的工程类型,现有预警体系的普适性、可靠性及适用性不高^[12]。

本文以滑坡自重应力作用下产生的失稳破坏为研究对象,结合模型试验的现场监测数据,探索研究角位移、边坡宏观变形迹象、安全系数与土质边坡稳定性的关系,得到各类滑坡预警指标的阈值划分依据,建立土质边坡稳定状态综合预警模型,为科学制订滑坡灾害预警标准和制定减灾预案提供参考。

1 土质边坡分级预警机制

在分级预警机制中,采用临界值法进行预警判别。某评价指标 I 不小于最大临界值 $I_{\max}$ 时,可认为边坡状态达到预警条件。根据滑坡风险的严重程度,相关部门用蓝、黄、橙、红 4 色发出不同级别的警报,向群众示警。

蓝色为注意级预警,预警级别最低,滑坡风险最小。蓝色预警条件下的坡体可能刚出现细微裂缝或裂缝稀疏,数量较少,边坡处于一般稳定状态,发生滑坡的可能性较小,需加强边坡的监测及日常巡检次数。

黄色为警示级预警,黄色的预警级别略高,表明坡体开裂程度增大,边坡处于较不稳定状态,滑坡发生的可能性增大,应进行坡体加固等防御措施。

橙色为警戒级预警,橙色的预警级别较高,坡体的开裂程度较大,滑坡的可能性较大,是滑坡灾害发生的严重阶段,应做好应急准备及人员疏散准备,根据情况及时调整预警等级。

红色为警报级预警,预警级别最高,滑坡的可能性最大^[13-14]。坡体开裂深度较大,坡脚处可能已出现土颗粒滑落,是滑坡灾害发生的危险阶段,应及时进行人员疏散,关闭邻近道路,按照抢险救灾预案组织人员准备抢险。

2 基于角位移场的土质边坡滑坡灾害分级预警

2.1 边坡试验模型

滑坡是土质、土体结构及外界环境综合作用的结果,较难采用统一的理论模型和规律进行分析,模型试验是研究边坡稳定性的有效方法。

本研究以济南绕城高速公路二环线东环段 K0+000—K0+100 填方路段土质边坡的设计图纸为缩尺模型设计的参考,在山东省肥城市工业四路道路道路改造工程项目桃源街段的施工现场进行室外模型试验。以角位移为监测指标,JY901 型 9 轴姿态角度传感器为监测设备,搭建边坡变形在线监测系统,采集土体内部形变数据,探究边坡稳定性的变化规律。

缩尺模型试验用土为施工现场的路基土,属于低液限黏土。9 轴姿态角度传感器是基于微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术的高性能三维运动姿态测量系统,以陀螺仪为核心元件,配备高性能微处理器,采用卡尔曼滤波算法,能高效采集数据、处理数据^[15],快速求解模块当前的实时运动姿态^[16],精准反映边坡形变在时空域的分布。

搭建的边坡形变在线监测系统如图 1 所示,该系统以传感器技术、计算机技术为基础,采用浏览器/服务器(Browser/Server)架构设计,利用物联网数据加密上云的同时进行大数据管理,实时反馈土体内部角度传感器的监测信息及角位移的变化趋势。

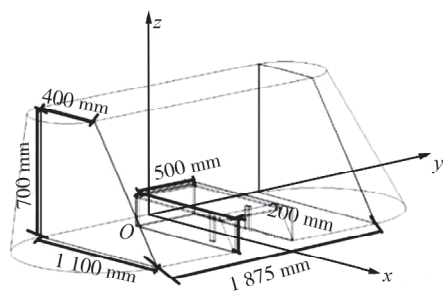
难以做到模型试验与实际工程边坡完全相同,可考虑相似比的推导。相似比通常是在考虑几何尺寸相似、运动学相似、边界条件相似等条件下采用量纲分析法。量纲分析是以试验参数定性分析后建立的

物理模型为基础,将相关物理参数组合为无量纲函数。将含水率、黏聚力、内摩擦角、模型的几何尺寸等参数按齐次定理组合在1个方程中,借助质量-长度-时间(mass-length-time, MLT)量纲转化的质量系统求得各参数的相似比^[17]。长度与应力的相似比为 n ,黏聚力、内摩擦角、含水率等指标的相似比均为1。

边坡试验整体模型如图2所示。基于相似比搭建宽1100 mm、长1875 mm、高700 mm、坡率为1:1的滑坡缩尺试验模型,如图2a)所示。采用钢板制作试验装置,如图2b)所示,底板b的底部焊接2个相同规格的千斤顶,通过调整千斤顶的高度控制底板b的高度,以底板b距地面20 cm的位置作为坡底高程,分别在距底板b 50、70、90 cm的位置布设3层24组9轴姿态角度传感器。为防止产生边界效应,在侧板a的内壁涂抹凡士林^[18],减少侧板与土质间的摩擦,还原滑坡运动过程中的原始作用力。室外实际边坡模型如图2c)所示。



图1 边坡形变在线监测系统



a) 滑坡缩尺试验模型



b) 试验模板



c) 室外实际边坡模型

图2 边坡试验整体模型

监测系统界面的数据变化稳定且无明显起伏后,开始记录试验持续时间与对应现象。缓慢降低千斤顶的高度,底板b下降速度为2 mm/min,根据三角函数公式推导底板b随时间的角度变化,计算公式为:

$$\alpha = \arcsin(H/R),$$

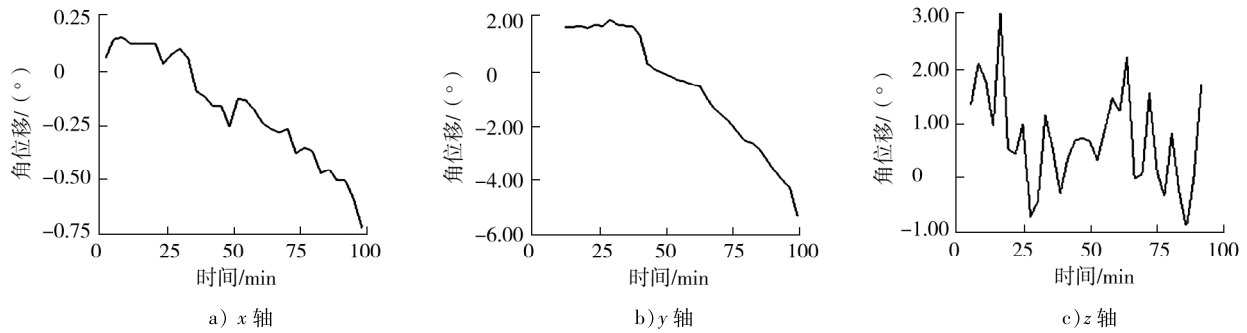
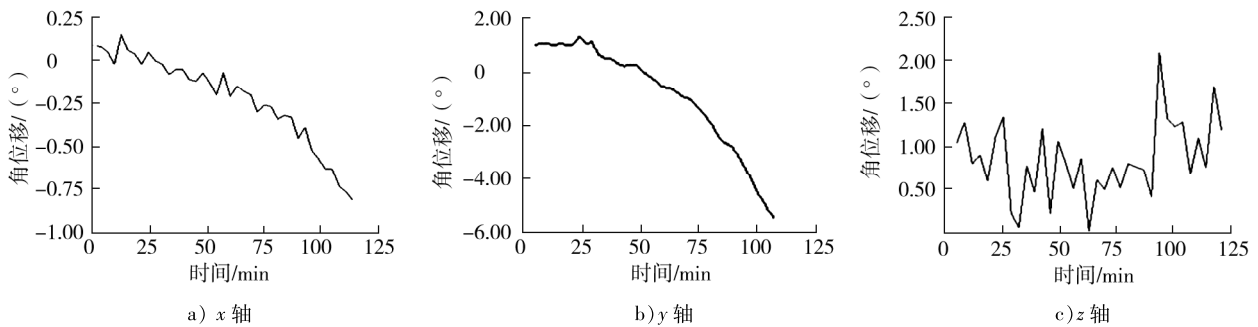
式中: α 为底板b下降过程中与水平面的夹角, H 为底板b距地面的垂直距离, R 为底板b的长度。

随底部b不断下降,坡脚处开始出现细微裂缝,沿坡面向坡腰处纵向延伸,裂缝数量逐渐增多,开裂宽度增大;底板b继续下降,延伸至坡顶的裂缝发生横向开裂,坡脚处裂缝增多,开裂宽度持续增大。当坡体表面大范围开裂、坡顶裂缝宽度剧增、大量土颗粒滑落时,边坡滑塌,试验停止,整个过程共持续136 min,各时刻的角位移监测数据被实时传输至传感器的接收云端,为后续设置预警阈值提供足量数据支撑。结合模型试验的现象及现有边坡滑塌的理论研究,可将整个滑坡过程分为初始变形、匀速变形和加速变形3个阶段^[19],各阶段的试验现象和持续时间不同,应分阶段建立角位移场,探索不同阶段的边坡形变规律。

2.2 角位移场

2.2.1 数据预处理

为弥补现场监测过程中外界因素对监测数据的影响,采用牛顿插值法对监测数据进行预处理。根据已知监测点的角位移构造插值函数 $f(x)$,根据插值函数计算监测点外任意点 x_i 的角位移 $f(x_i)$ 。将传感器数据进行预处理,随机抽取2个传感器数据,进行数据处理的结果如图3、4所示, x 轴垂直于道路行车方向,即平行于边坡模型长度方向; y 轴平行于道路行车方向,即平行于边坡模型宽度方向; z 轴为垂直于水平面向上的方向,如图2a)所示。边坡内传感器编号布设如图5所示。

图3 53[#]传感器监测结果图4 61[#]传感器监测结果

处理监测数据前比较传感器各方向角位移的变化趋势,判断坐标轴的有效性^[20]。由图3、4可知:试验开始后, x 轴方向的角位移持续减小,直至边坡发生破坏,表明 x 轴方向受边坡变形影响较大;最初, y 轴方向的角位移基本保持不变,当裂缝沿坡脚产生,并沿坡面不断向坡顶延伸时, y 轴角位移随时间的增加而线性递减;在整个变形过程中, z 轴方向角位移的波动剧烈且无规律可循,因此在本研究中忽略 z 轴方向角位移的变化。结合边坡滑塌理论^[11]可知,在车辆荷载及路面结构自重的作用下,垂直于行车方向的土体内部变形程度显著,土颗粒间作用剧烈。建立角位移场时,应分析 x 轴方向的角度。

2.2.2 角位移场的分布特征

由图2可知,试验模型的截面尺寸、形状,传感器的布设数量、埋置位置等参数关于 xOz 平面对称。以 xOz 面为对称轴,将边坡均匀剖分为A、B两部分,二者变形规律基本一致。受篇幅限制,本文仅分析A部分的角位移场。

结合模型试验现象,绘制各变形阶段内角位移随时间变化的关系曲线,筛选角位移变化幅度相对较大的时刻作为该变形阶段的代表时刻,以表征此时刻土体内部的变形程度相对较大。建立的角位移场如图6~8所示。

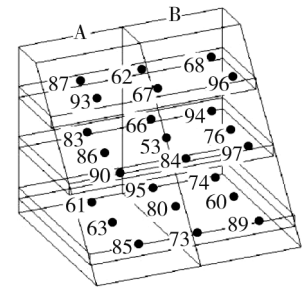


图5 边坡内传感器位置

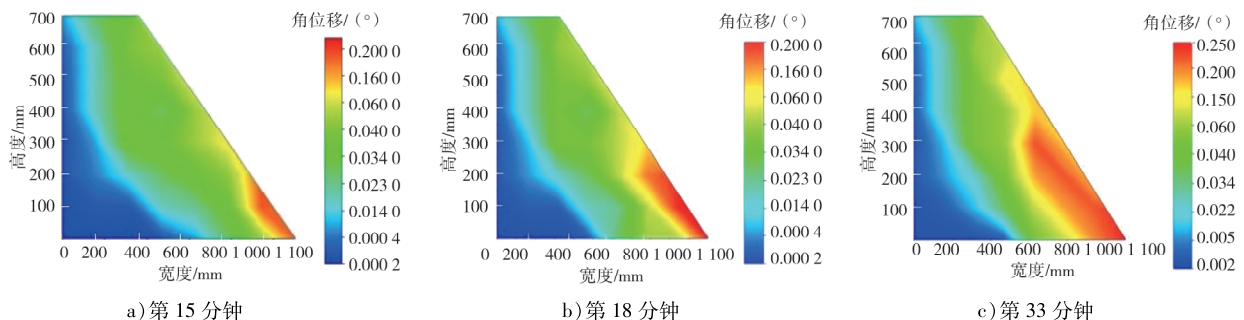


图6 初始变形阶段的角位移场

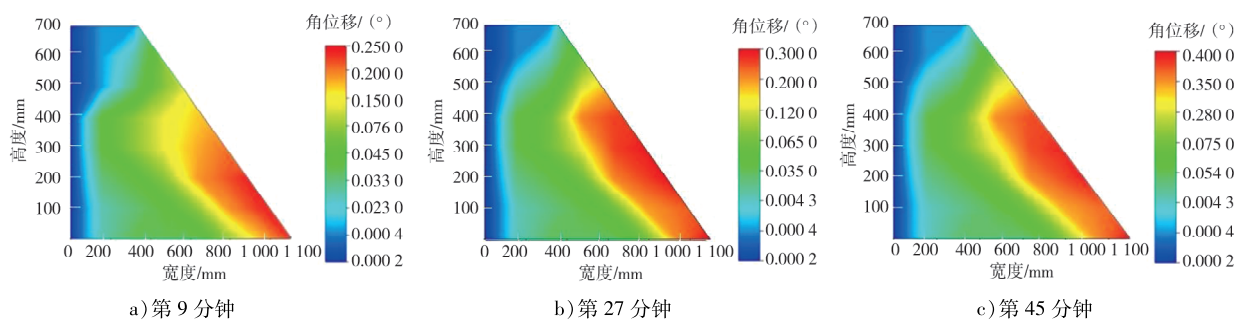


图7 匀速变形阶段的角位移场

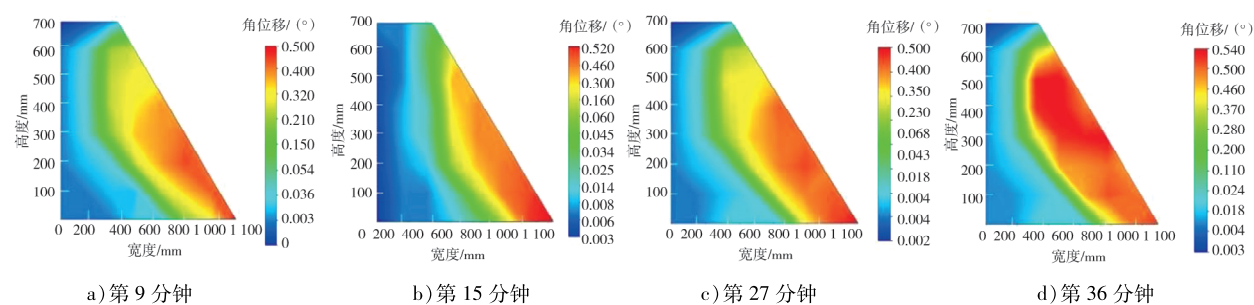


图8 加速变形阶段的角位移场

由图6~8可知:红色区域的角位移较大,该区域的坡体变形显著,变形程度明显。由图6、7可知:红色区域从坡脚开始向上蔓延,且随时间的增加,红色区域逐渐扩大,表明初始阶段的变形先从坡脚处产生,且变形范围沿坡面向上、向土体内部延伸;匀速变形阶段内的变形区域明显增大,且多集中于坡腰处,从坡腰开始向坡顶延伸。由图8可知:加速变形阶段场内红色区域的范围持续增大,此阶段的土体内部变形程度加剧,开裂范围扩展,边坡变形区域有贯通的趋势。

室外边坡模型试验的宏观变形过程如图9所示。由图9可知:室外边坡模型各变形阶段角位移的分布特征及变化规律与仿真模型较吻合,表明室外模型试验的边坡变形监测系统合理可靠,适用性强,可用于验证基于角位移场进行分级预警的可行性与正确性。

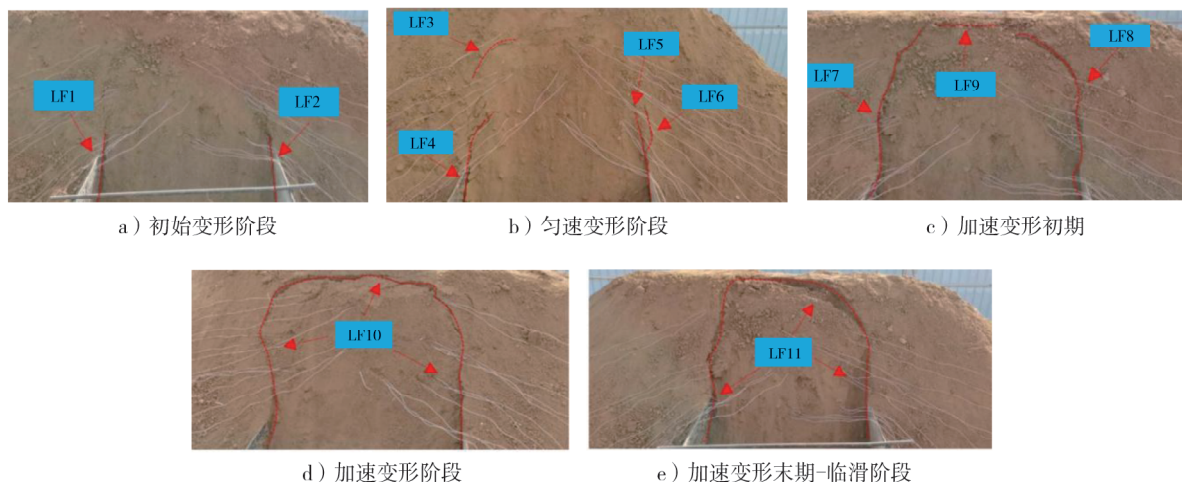


图9 室外边坡模型试验的宏观变形过程

2.3 基于角位移场的分级预警

边坡滑塌是逐渐演变的过程,不同阶段的形变特征不同。研究基于角位移场的滑坡风险分级预警体系时,建立不同变形阶段的角位移场有助于提高预警的及时性和预警阈值提取的准确性。以坡体内部大变形区域内的角位移作为预警阈值参数,采用 Levenberg-Marquardt (LM) 优化算法进行数据拟合,推导不

同预警级别对应的阈值表达式,实现滑坡分级预警。

2.3.1 LM 优化算法

LM 优化算法是结合高斯-牛顿法和梯度下降法的非线性最小二乘问题的优化算法,具有收敛快速的特点^[21]。关键步骤是用非线性数学函数 f 对待估参数向量 $\mathbf{p}$ 做线性近似,表述从参数空间(参数向量 $\mathbf{p}$ 的集合)到数据空间(观测数据 y_data 的集合)的映射,忽略二阶以上的导数项,将原问题转化为非线性最小二乘问题。LM 优化算法属于信赖域法,即从初始点开始,假设可信赖的最大位移为 s ,以当前点为中心,以 s 为半径的区域内,通过寻找目标函数的二次近似函数求解真正位移^[22]。得到位移后,计算目标函数在迭代过程中的变化量,如果变化量满足一定条件,说明位移可靠,可继续迭代下去,否则应减小信赖域的范围后重新求解。

边坡处于变形初期时,裂缝尚未出现或开裂程度较浅,坡体内部基本保持力学平衡状态,随着变形程度增大,坡体内部局部失衡,应力重分布,但整体仍维持平衡状态。边坡与外界环境不断进行物质和能量交换^[23],坡体内部一旦开裂,滑裂面附近的土体逐渐发生累积破坏,组成边坡体系的各子系统发生非线性相互作用,土体沿滑面有序滑动。LM 优化算法是边坡变形失稳过程中进行角位移拟合的最佳方法,且能快速得到拟合结果。

2.3.2 初始变形阶段基于角位移场的分级预警

初始变形阶段是边坡变形的最初状态,裂缝稀疏且开裂程度较小,危险系数不大,滑坡风险较低,财产损失及人员伤亡的事故发生率也较低^[24]。应设此阶段的预警等级为注意级预警,预警颜色为蓝色。

由图 6 可知,第 33 分钟角位移场内红色区域相对较大,表明此刻坡体开裂程度相对明显,裂缝多遍布于红色区域。以该时刻场内红色区域的角位移作为预警阈值,采用 LM 优化算法进行数据拟合,提取预警阈值公式。开裂区域的传感器布设点位与角位移间的拟合曲线如图 10 所示。

本文仅计算边坡模型 A 部分的预警阈值,可直接对模型 A 部分的角位移数据拟合,无需进行数据预处理。对模型整体进行数据拟合时,A、B 具有相似的物理特征和变形规律,但地理位置不同,应先对 A、B 场内深红色区域的角位移进行归一化处理,消除不同点位监测数据的观测误差。

初始变形阶段以($^{\circ}$)为单位的角位移预警阈值 $\theta_{\max,1}$ 的数值

$$\{\theta_{\max,1}\} = 1.583\ 12 - 0.002\ 17\{l\} - 0.001\ 25\{h\} + 1.155\ 76 \times 10^{-6}\{l\}^2 + 1.964\ 35 \times 10^{-7}\{h\}^2 + 2.704\ 91 \times 10^{-6}\{l\}\{h\},$$

式中: $\{l\}$ 为以 m 为单位的边坡宽度 l 的数值, $\{h\}$ 为以 m 为单位的边坡高度 h 的数值。调整后的拟合系数为 0.489 35。

设各代表时刻下传感器 x 轴方向的角位移为 θ 。预警阈值公式的数据源为坡体大变形区域内的角位移,为避免任意点位的角位移不小于相应预警阈值 $\theta_{\max}$ 时出现无需示警的情况,应限定 l 、 h 的取值范围。通过对比图 6 可得, $l \in [500, 1\ 100]$ mm, $h \in [0, 350]$ mm, $\theta \geq \theta_{\max,1}$ 时,应进行蓝色-注意级预警。

2.3.3 匀速变形阶段基于角位移场的分级预警

匀速变形阶段是边坡变形的第 2 阶段,裂缝数量、已有裂缝的开裂程度、危险系数、边坡滑塌的风险明显增大。根据坡体的开裂程度,应将此阶段的预警等级分为黄色预警(警示级预警)和橙色预警(警戒级预警)2 种。

根据模型试验现象和图 7 所示的角位移场可知,以第 27 分钟时场内深红色区域的角位移作为黄色预警,第 45 分钟时场内深红色区域的角位移作为橙色预警的对象进行分析,提取预警阈值。开裂区域的

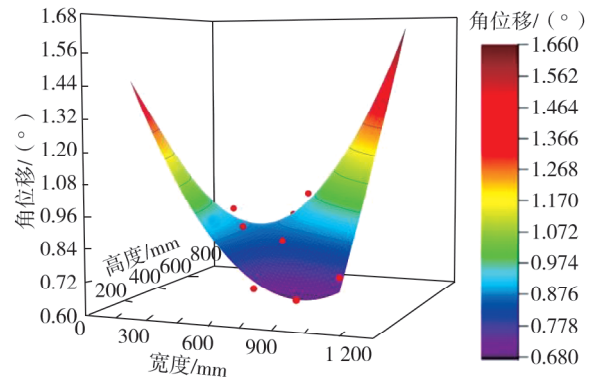


图 10 初始变形阶段开裂区域的传感器布设点位与角位移间的拟合曲线

传感器布设点位与角位移间的拟合曲线如图 11 所示。

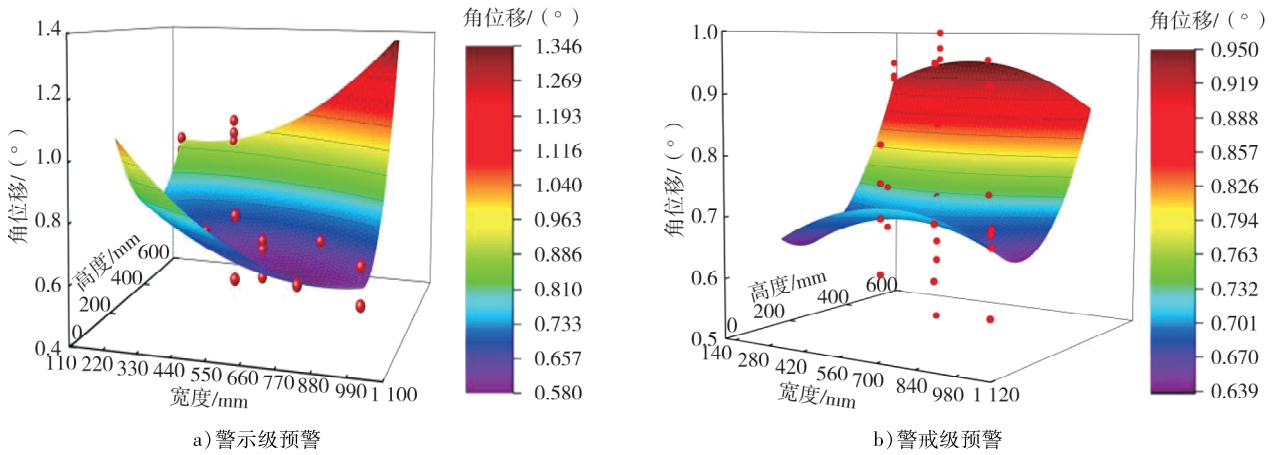


图 11 匀速变形阶段开裂区域的传感器布设点位与角位移间的拟合曲线

匀速变形阶段警示级预警从(°)为单位的角位移预警阈值 $\theta_{\max,2}$ 的数值

$$\{\theta_{\max,2}\} = 1.707\ 9 - 0.001\ 77\{l\} - 0.004\ 48\{h\} + 8.077\ 79 \times 10^{-7}\{l\}^2 + 6.011\ 99 \times 10^{-6}\{h\}^2 + 2.663\ 64 \times 10^{-6}\{l\}\{h\},$$

调整后的拟合系数为 0.821 08。

匀速变形阶段警戒级预警从(°)为单位的角位移预警阈值 $\theta_{\max,3}$ 的数值

$$\{\theta_{\max,3}\} = 0.652\ 33 + 4.566\ 62 \times 10^{-4}\{l\} - 9.571\ 02 \times 10^{-4}\{h\} - 3.428\ 86 \times 10^{-7}\{l\}^2 + 2.712\ 45 \times 10^{-6}\{h\}^2 - 1.805\ 43 \times 10^{-7}\{l\}\{h\},$$

调整后的拟合系数为 0.519 50。

分析图 7 得到匀速变形阶段, $l \in [500, 1\ 100]$ mm, $h \in [0, 500]$ mm, $\theta \geq \theta_{\max}$ 时, 应进行黄色预警; $l \in [460, 1\ 100]$ mm, $h \in [0, 500]$ mm, $\theta \geq \theta_{\max,3}$ 时, 应进行橙色预警。

2.3.4 加速变形阶段基于角位移场的分级预警

加速变形阶段是边坡变形过程的最终阶段, 整个阶段的裂缝急剧增多, 已有裂缝的开裂程度明显加深, 坡脚处发生小范围滑塌, 危险系数明显增大, 滑坡风险激增, 边坡稳定性呈突然破坏的趋势, 此阶段的预警等级应为红色预警。

为减小此阶段边坡突然滑塌的可能性, 应将裂缝激增前对应时刻的角位移作为预警对象。对比图 8 所示加速变形阶段各代表时刻的角位移场, 选择第 15 分钟时场内深红色区域的角位移作为预警阈值数据源。传感器布设点位与角位移间的拟合曲线如图 12 所示。

在加速变形阶段, 以(°)为单位的角位移阈值 $\theta_{\max,4}$ 的数值为:

$$\{\theta_{\max,4}\} = -1.181\ 47 + 0.002\ 74\{l\} + 0.004\ 64\{h\} - 1.467\ 11 \times 10^{-6}\{l\}^2 - 3.446\ 52 \times 10^{-6}\{h\}^2 - 3.094\ 25 \times 10^{-6}\{l\}\{h\},$$

调整后的拟合系数为 0.361 76。

分析图 8 可知, 加速变形阶段 $l \in [350, 1\ 100]$ mm, $h \in [0, 550]$ mm, 边坡内红色区域持续扩大, $\theta \geq \theta_{\max,4}$ 时, 应进行红色预警。

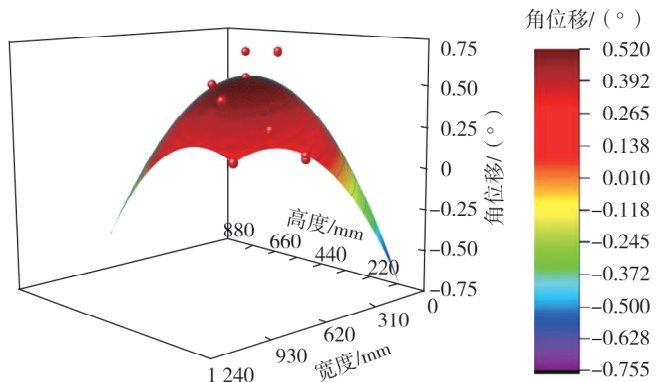


图 12 加速变形阶段开裂位置的传感器布设点位与角位移间的拟合曲线

3 基于宏观变形迹象及安全系数的土质边坡滑坡灾害分级预警

3.1 基于边坡宏观变形迹象的分级预警

边坡滑塌前,尤其是大规模滑坡发生前,边坡宏观变形迹象较明显,出现较多直观的、易被监测的异常前兆,例如地形变动异常、地下水异常等,采用人工现场巡查的方式实现边坡宏观迹象预警监测^[25]。根据文献资料及室外模型试验现象确定边坡宏观迹象预警指标,如表1所示。

表1 边坡宏观变形迹象预警等级、颜色及指标

预警等级	注意级预警	警示级预警	警戒级预警	警报级预警
预警颜色	蓝色	黄色	橙色	红色
预警指标 (宏观迹象)	坡脚处产生细微裂缝,裂缝数量较少	坡脚处不断产生新裂缝,开裂程度开始增大,已有裂缝开始向上延伸	坡脚裂缝开裂程度明显增大,在坡顶产生横向裂缝,坡体裂缝形成闭合圈	坡顶裂缝开裂程度明显增大,坡脚处土粒滑落,且伴有小范围滑塌

3.2 基于边坡稳定性安全系数的分级预警

安全系数是指沿滑裂面的抗滑力与下滑力之比^[26],是边坡稳定性预警的常用判据。坡体一旦开裂,安全系数 $F \leq 1.00$ 。随开裂程度的增大,安全系数不断减小。参照文献[27]确定自重作用下滑坡防治工程的等级及相应安全系数的取值范围,自重作用下的滑坡防治工程大部分属于Ⅲ级防治工程^[28-29],边坡稳定性安全系数的取值及相应状态如表2所示。

表2 安全系数取值范围及边坡状态

F	边坡状态	预警等级	预警颜色
>1.15	稳定		
$>1.02 \sim 1.15$	基本稳定	注意级	蓝色
$>1.00 \sim 1.02$	暂时稳定(变形)	警示级	黄色
≤ 1.00	整体变形(滑动)	警报级	红色

由表2可知: $F > 1.15$ 时,边坡处于稳定状态,不必进行预警; $1.02 < F \leq 1.15$ 时,边坡处于基本稳定状态,坡体开裂的可能性较小,应进行蓝色预警; $1.00 < F \leq 1.02$ 时,边坡处于暂时稳定状态^[29],坡体可能出现细微裂缝,且裂缝有扩张的可能性,滑坡风险增大,应进行黄色预警; $F \leq 1.00$ 时,坡体开裂程度加深,滑塌风险剧增,应进行红色预警。

4 土质边坡稳定性分级预警判据

以角位移场、宏观变形迹象、安全系数为指标的土质边坡稳定性分级预警判据,将各指标的预警阈值和预警级别结合,搭建适用于土质边坡的稳定性分级预警体系。某判断指标的监测值超过相应预警阈值时,认为该指标满足预警条件。建立分级预警体系可为后续边坡风险控制的实现提供理论依据。

具体应用预警指标体系时,可根据实际工程类型选择合适的评价指标预警:安置监测仪器困难的边坡可采用数值模拟的方法,以安全系数为判据,对比实际测量结果与预警阈值,判断边坡的稳定性状态,确定预警等级;对于新建、在建公路工程,或易埋置监测设备的既有公路边坡,应以角位移作为预警判据,通过对比开裂区域的角位移与对应点位的预警阈值确定预警等级;对于任意类型的公路边坡,应以宏观变形迹象作为预警指标,采用人工现场巡视的方法对比实际工程中边坡的变形现象和相应临界状态,判断边坡的稳定性,确定预警等级。通过对比监测数据与预警阈值,将对比结果报送相关部门,由专家进行

评判、商讨,决定是否需要发布预警。边坡稳定性预警方案示意图如图13所示,发布的预警信息应兼具真实、可靠、及时、有效的特性,且预警警报应覆盖从风险预测、预警发布到应急响应全部环节^[25,30]。

5 结论

1)根据我国公路两侧土质边坡的稳定性,构建边坡稳定性预警体系,确定预警指标阈值,建立蓝色(注意级预警)、黄色(警示级预警)、橙色(警戒级预警)、红色(警报级预警)的土质边坡滑坡灾害4级预警机制。

2)以9轴姿态角度传感器作为监测工具,以角位移作为监测指标进行室外模型试验,基于现场监测数据,提出基于角位移场的分级预警方法。以角位移、宏观变形迹象、安全系数为预警判据,分别提取相应预警阈值与预警等级。某指标的实际测量结果不小于预警阈值时,认为该指标达到预警条件,能够发布相应等级的警示信息。

3)综合各类预警指标,搭建边坡稳定性分级预警体系,形成角度监测-状态分析-变形预警的三维一体化边坡稳定性分析系统,有助于相关单位提前管控公路边坡的稳定性状态,提高我国防灾减灾能力,为建立滑坡灾害的预防和控制方法提供参考。

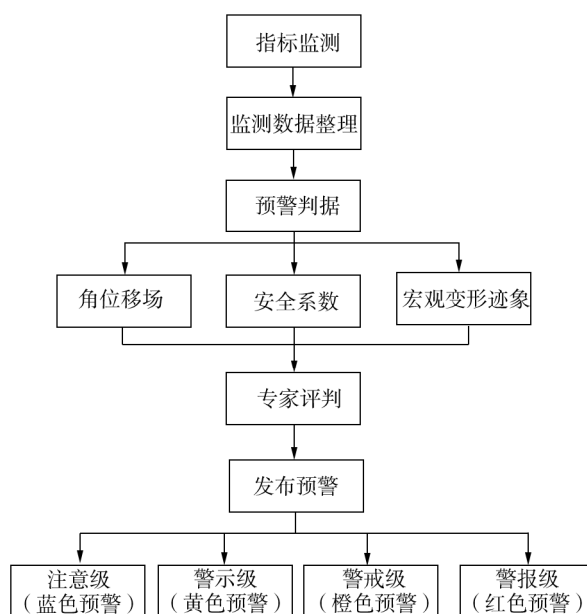


图13 边坡稳定性预警方案示意图

参考文献:

- [1] 张亦海,尹永明,于正兴,等.基于S-SAR监测数据的高海拔露天矿边坡变形特征及影响因素研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(增刊1):55-60.
- [2] 杨宏伟,胡江,槐先锋,等.基于多变量时间序列局部异常系数的滑坡预警方法[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1227-1237.
- [3] 王一帆,亓星,程倩,等.基于切线角预警的滑坡匀速变形速率数据处理方法[J].水利水电技术(中英文),2021,52(12):185-190.
- [4] 杨宗佑,王礼勇,石莉莉,等.降雨滑坡多指标监测预警方法研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(2):272-285.
- [5] 冯巩,夏元友,王智德,等.基于位移信息融合的露天矿边坡动态预警方法[J].中国安全科学学报,2022,32(3):116-122.
- [6] 郭飞,黄晓虎,邓茂林,等.三峡库区“阶跃”型滑坡变形机理与预警模型[J].测绘学报,2022,51(10):2205-2215.
- [7] 左双英,蒲泉,史文兵,等.基于PFC^{3D}位移判据的低渗堆积层滑坡临界降雨阈值反演[J].自然灾害学报,2021,30(3):160-170.
- [8] 耿海深,吕文斌,栗桑,等.滑坡失稳机理分析及预警预测研究[J].西北师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):103-109.
- [9] 袁友翠,胡少华,吴浩,等.基于CM-GCT的尾矿坝在线监测位移分级预警阈值研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2022,44(5):758-765.
- [10] 栾婷婷,吕则恺,谢振华,等.排土场灾害四色预警判据研究[J].金属矿山,2018(9):154-160.
- [11] 李广信.高等土力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2016.
- [12] 陈国庆,唐辉明,胡凯云,等.基于非均质流变特性的滑坡时效演化及预警研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(9):1795-1809.
- [13] 陈磊,李斌,彭程,等.岩溶山区滑坡监测预警云平台设计与实现[J].长江科学院院报,2022,39(6):138-144.
- [14] 何玉凤.雅西高速瓦厂坪边坡稳定性的监测分析与安全预警研究[D].成都:成都理工大学,2020.

- [15] 曹丽琴,王琪,黄堃,等. 基于微机电系统传感器的杆塔倾斜度无线监测系统[J]. 科学技术与工程,2021,21(2): 616-622.
- [16] 钟岳,方虎生,张国玉,等. 基于9轴姿态传感器的CNN旗语动作识别方法[J]. 计算机科学,2021,48(6):153-158.
- [17] 郭超翊. 酸雨作用下黄土边坡浅层滑塌试验研究及数值分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
- [18] 徐俊兵. 高速铁路路基填料冻胀特性及路基冻胀防治措施研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2020.
- [19] 王壮,李驰,丁选明. 基于透明土技术土岩边坡滑移机理的模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊2):185-188.
- [20] 申靖琳. 基于实时角度监测的公路边坡变形规律及工程应用研究[D]. 济南:山东交通学院,2021.
- [21] 马昌凤,谢亚君. 求解张量绝对值方程的两步非精确 Levenberg-Marquardt 算法[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023,46(3):585-591.
- [22] 马子龙. 闪电低频辐射源三维定位及云内放电过程的观测研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2020.
- [23] 黄润秋,许强. 开挖过程的非线性理论分析[J]. 工程地质学报,1999(1):9-14.
- [24] 廖小平,朱本珍,王建松. 路堑边坡工程理论与实践[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [25] 王周兵,张玮鹏,胡义,等. 孤山库区地质灾害自动化监测与信息化防治研究[J]. 人民长江,2022,53(增刊2): 202-206.
- [26] 闫超,王红雨. 含挖填界面边坡三维稳定性上限分析[J]. 岩土工程学报,2024,46(1):174-181.
- [27] 国土资源部国际合作与科技司. 滑坡防治工程设计与施工技术规范: DZ/T 0219—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [28] 施雄斌,杨泽. 某石灰岩露天矿高陡边坡稳定性评价[J]. 有色金属设计,2023,50(1):1-4.
- [29] 蓝宇. 基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理[J]. 矿业研究与开发,2023,43(3):77-82.
- [30] 陶宜权,范文,曹琰波,等. 秦巴山区浅表层滑坡灾害监测预警平台设计与实现[J]. 灾害学,2023,38(2):219-225.

Grading early warning criteria for landslide on earth slope

LI Mengchen¹, ZHAO Zhizhong^{2*}, XUE Jun³, JIANG Yishun³

1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

3. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, China

Abstract: To address the issue that the deformation patterns of the same soil slope in different deformation stages are different, and a single warning indicator cannot express the dynamic deformation characteristics of the soil slope throughout the entire deformation process, a classification warning method for landslides in soil slopes is proposed. The angle displacement field, macroscopic deformation signs of the slope, and safety factor are selected as warning indicators. The method is based on outdoor model experiments to establish the angle displacement field of each slope profile in different deformation stages, fitting the angle displacements within the same field using the Levenberg-Marquardt optimization algorithm. Dynamic classification warning threshold expressions is constructed. Field investigations and relevant regulations are combined to extract standard thresholds based on macroscopic deformation signs of the slope and safety factors separately. A four-level warning mechanism for landslides in soil slopes is established with angle displacement, macroscopic deformation signs of the slope, and safety factor as warning indicators, using blue for attention level warning, yellow for caution level warning, orange for alert level warning, and red for alarm level warning. Multiple sources of information are fully utilized to achieve timely and effective warning of slope instability to realize dynamic control of the development of soil slope stability changes.

Keywords: soil slope; landslide; angle displacement field; data fitting; graded early warning; early warning system

(责任编辑:王惠)