

基于高精度低空摄影测量的滑坡灾害监测与预报关键技术研究

李 潇¹, 闵 洁²

(1. 九江学院 土木工程与城市建设学院, 江西 九江 332005;

2. 九江职业大学 信息工程学院, 江西 九江 332000)

摘要: 采用传统监测与预报技术, 受到滑坡区域扩大影响, 导致预测精准度较低, 针对该问题, 提出了基于高精度低空摄影测量的滑坡灾害监测与预报关键技术研究; 依据滑坡地质体环境因素, 建立滑坡灾害监测与监测与预报指标, 根据该指标, 计算地层压力变量相关参数; 以高分辨率数字遥感设备为传感器, 采用高精度低空摄影测量技术来提取数据, 以此分析滑坡堆积特征和密实程度; 通过上述特性, 建立关联函数, 确定监测与预报对象以及监测与预报等级, 由此完成滑坡灾害监测与预报; 由实验结果可知, 该技术预测精准度较高, 最高可达到 98.8%, 为保障人们生命安全提供必要技术支持。

关键词: 高精度; 低空摄影测量; 滑坡灾害; 监测; 预报

Research on Key Technologies of Landslide Disaster Monitoring and Prediction Based on High Precision Low Altitude Photogrammetry

Li Xiao¹, Min Jie²

(1. College of Civil Engineering and Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;

2. College of Information Engineering, Jiujiang Vocational University, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Traditional monitoring and forecasting technology is affected by the enlargement of landslide area, which leads to low accuracy of prediction. To solve this problem, the key technology of landslide disaster monitoring and forecasting based on high-precision low-altitude photogrammetry is proposed. According to the environmental factors of landslide geological body, the monitoring and forecasting indexes of landslide hazards are established, and the related parameters of formation pressure variables are calculated according to the indexes. Using high resolution digital remote sensing equipment as sensor, high precision low-altitude photogrammetry technology is used to extract data, in order to analyze landslide accumulation characteristics and compactness. Based on the above characteristics, the correlation function is established to determine the object of monitoring and prediction and the level of monitoring and prediction, so as to complete the monitoring and prediction of landslide disasters. The experimental results show that the prediction accuracy of this technology is high, up to 98.8%. It provides necessary technical support for ensuring people's life safety.

Keywords: high precision; low altitude photogrammetry; landslide disaster; monitoring; prediction

0 引言

滑坡是一种常见地质灾害, 是指斜坡上的土体和岩石, 受到地下水、降水和人类工业影响, 在重力作用下, 沿着剪切破坏面, 发生整体顺坡向下滑动的自然现象。我国滑坡地带分布较为广泛, 随着环境破坏日益严重, 滑坡现象发生的概率越来越大, 尤其近几年, 滑坡对道路、房屋和桥梁等工程造成严重威胁, 因此, 对其安全监测与预报是具有必要性的^[1]。

现阶段, 主要滑坡灾害监测预报方式包括基于混沌神经网络算法和基于粒子群优化算法的滑坡灾害监测预报方式。由于滑坡形成过程较为复杂, 发生时间较短, 区域承载也不同, 因此, 很难建立统一的承压分布模型。采用以

上两种方式大多是基于小区域且压力集中的滑坡位置实施的^[2]。一旦区域扩大, 承压就会变得十分复杂, 对于滑坡灾害监测与监测与预报的准确性将会降低。

为了避免上述缺陷, 提出了基于高精度低空摄影测量的滑坡灾害监测与预报关键技术研究。根据地层压力进行数据挖掘, 以此为依据对滑坡灾害进行监测与预报。通过实验结果表明, 该技术能够有效避免由于区域承载过大而造成的缺陷, 提高了滑坡灾害监测与监测与预报准确性。

1 滑坡灾害监测与监测与预报指标

滑坡灾害监测与监测与预报内容包括滑坡形变、坡道破坏相关因素监测, 不同类型滑坡, 其监测点内容也不同^[3]。在发生山体滑坡之前, 排土场形成一种巨大的人工松散堆积体, 其稳定性主要依靠堆放物料之间相互咬合作用所构成的松散废石决定的^[4]。一旦土场边坡体若干面受到影响, 那么抗剪强度抗不了自重作用, 逐渐发生蠕动与变形, 且随着变形逐渐增大了滑坡灾害风险。

环境因素包括内部因素和外部因素, 其中内部因素指

收稿日期: 2019-06-05; 修回日期: 2019-06-28。

基金项目: 江西省教育厅科研项目(GJJ161088)。

作者简介: 李 潇(1984-), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 讲师, 主要从事变形监测与灾害预报方向的研究。

的是滑坡地质自身，这些因素对每一个滑坡体来说各不相同；而外部因素指的是滑坡体所在的整体自然环境，其中包括人类工程活动和外部动力扰动^[5]。滑坡地质体环境因素构成如表 1 所示。

表 1 滑坡地质体环境因素

内部因素	滑坡种类	滑动面与面之间关系	无层滑坡、切层滑坡
		依据滑动力学特质	平移式滑坡
		按照滑坡面成因	堆积面滑坡、层面滑坡
	滑坡深度	浅层厚度小于 5m 滑坡、中层厚度 5m~15m 滑坡、厚层厚度 15m~45m 滑坡	
岩土性质	岩土种类	已经发生剪切的岩土	
	性质	灵敏性、失陷性和膨胀性	
外部因素	动力扰动	地震、地壳运动；短时间暴风雨、厚雪融化；潮汐和滑坡坝溃决、冻土融化	
	人类工程活动	斜坡和坡脚开挖、水库水位波动、森林砍伐、垃圾堆放、人工震动	

地层作为一个开放的复杂系统，可用多个指标对其稳定性进行规划。土层滑坡主要受排料岩土特性、自然因素和工程地质因素等环节影响，每个环节可由多个指标来反映^[6]。滑坡灾害监测与监测与预报指标体系，如图 1 所示。

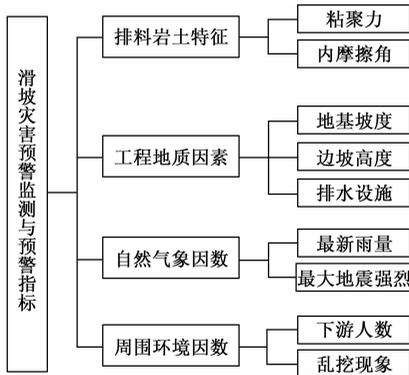


图 1 滑坡灾害监测与监测与预报指标体系

根据建立的指标，描述山体不同方向所承受的压力，进而对滑坡危险区域进行判断，通过承压模型完成整个监测与预报过程。

2 地层压力变量相关参数计算

将地层分割为不同区域，将这些区域构成数据集 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，地层所承受的压力构成矩阵为 $[y_1, y_2, \dots, y_n]$ 。地层不同方向不同区域所承受的压力能够对土层滑坡造成影响，利用下列公式能够描述地层所承受压力出现变化时的压力变量，具体计算公式为：

$$Q = [y_1, y_2, \dots, y_n] \times V \quad (1)$$

式 (1) 中， V 表示滑坡速度。在地层压力出现变化情况下，其压力变量应与地层压力没有出现变化情况下的应变力是一致的^[7]。根据应变等效理论，地层所承受的压力出现变化时，所构成的矩阵与没有出现变化时所构成的矩阵之间关系可通过下列公式来描述：

$$[y_1, y_2, \dots, y_n]^T = (1 - T) \times [y_1, y_2, \dots, y_n] \quad (2)$$

式 (2) 中， T 表示不同区域地层承压差值系数，通过计算地层压力变量相关参数，为滑坡灾害监测与预报提供数据基础。

3 基于高精度低空摄影测量数据提取

低空摄影测量指的就是航高在 1 000 米以下数字航空摄影测量，具有传统测量技术无可比拟的灵活性和机动性，能够在复杂条件下快速执行测绘任务^[8]。采用无人机摄影测量平台，以高分辨率数字遥感设备为传感器，通过无人机航拍摄影成图过程主要包括：

- 1) 研究区现场勘查，初步选定低空摄影路线；
- 2) 控制点布置、航线规划、参数选择，一般选择 4 个以上控制点，保证整个研究区域具有精准坐标。地面相控点，通常采用人工铺设相控板方式，标记后期坐标，同时考虑地面相控点在研究区域的分布情况，尽可能多的布设一定数量地面相控点。在规划航线过程中，充分考虑飞行姿态、角度、频率等，保证获取的图片重合率在 65% 以上，根据研究区域周围颜色、飞行高度选择不同摄像机参数，保证图片质量；

3) 选择地方和任意坐标系，保证单点测量精准度与相片中点空间呈现的是一一对应关系；

4) 进行 Pix4d 初始化处理，在没有任何辅助工具下，软件根据自身 RGB 信息，计算物体空间融合过程所耗费的时间；

5) 待统计最长耗费时间的同时，对影像进行匹配，并将图片中的相控点信息与地面真实点坐标位置匹配；

6) 通过软件计算获取地面与地物空间信息。

为了最大限度提高测量精准度，应保持低空摄影地面分辨率在 5 cm 范围内，成图比例尺达到 1: 500，航空摄影采用 DMC 数码航拍仪^[9]。航空摄影测量要求按照《1: 500 比例尺地形图航空摄影规范》执行。通过步骤 (4) 获取经过 Pix4d 初始化处理的信息，能够满足一般工程测量要求，达到低空摄影测量在大比例尺航测数据处理的有效性^[10]。

4 滑坡堆积特征及密实程度分析

根据上述提取的低空摄影测量数据，分析滑坡堆积特征和密实程度。

4.1 滑坡堆积特征

通过提取的相关数据，利用低空摄影测量技术监测到的滑坡灾害前后高精度 DEM，如图 2 所示。

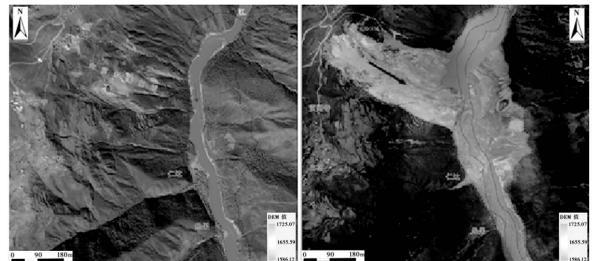


图 2 滑坡灾害前后高精度 DEM 对比分析

发生滑坡灾难后，滑坡空间多以体积变化，将滑坡分为滑源区和堆积区，在重力和外力作用下，滑源区体积减

少, 堆积区体积增加^[11]。

4.2 密实程度

在发生滑坡灾害后, 对该滑坡堆积区进行现场密实程度分析, 测得的土样干密度和孔隙比如表 2 所示。

表 2 不同区域土样干密度和孔隙比

取样地点	干密度/(g/cm ³)	孔隙比/e
滑源区中部	0.945	1.871
滑源区推挤区	1.032	1.562
剪出口中部	0.995	1.703
剪出口左侧	1.020	1.622
剪出口右侧	1.098	1.399
堆积体中部	0.913	1.954
堆积体左侧	1.000	1.659
堆积体右侧	0.966	1.699

堆积体中部干密度是最小的, 说明堆积体在运动过程中发生了解体, 受到挤压影响, 滑源区中部残留体在滑动过程中, 密实程度较小, 与其运动距离具有一定关系; 而堆积体左侧和右侧密实度都比中间大, 则说明两侧受到一定挤压; 剪出口左侧和右侧明显大于剪出口中部, 说明在滑坡灾害发生时, 两侧出现挤压, 与中部下切堆积现象一致^[12]。

5 滑坡灾害监测与预报等级评定

依据分析的滑坡堆积特征及密实程度, 确定待评物元, 并建立关联函数, 确定监测与预报对象以及监测与预报等级。

滑坡灾害监测与预报对象的待评物元, 即是将监测与预报目标测量所获取的数据用物元来表示, 即为监测与预报目标的监测与预报指标值。针对监测与预报目标, 需建立关联函数, 由此确定监测与预报对象以及各个级别的关联度, 以此确定滑坡中心具体坐标位置。

监测与预报目标对于最终结果影响程度是不相同的, 为此需采用权重计算各个指标, 以此反映重要性的差别。确定指标因素权重的具体步骤为:

1) 分析滑坡灾害中不同位置的关系, 建立描述递阶层结构;

2) 同一因素间对上层某个位置关系进行评价, 构造两两比较的判断矩阵;

3) 通过关联函数将判断矩阵转换为测度判断矩阵;

4) 计算各个因素权重;

充分考虑不同位置上的指标权重, 规范化关联度, 并将该关联度与权系数合成为综合关联度。

如果 $W_n(q) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, D\}} n_j(q_j)$, 那么监测与预报目标 q 的等级为 n 。当监测与预报目标的各个指标间在不同监测与预报指示下权重过小, 那么需要采用多层次综合监测与预报方式。在单层综合监测与预报基础上, 将第二层评定结果组合成第一层评价矩阵, 结合第一层各因素权重, 将权系数矩阵和综合关联度矩阵合称为监测与预报结果矩阵, 由此完成滑坡灾害监测与预报等级评定。

6 实例分析

为了验证基于高精度低空摄影测量的滑坡灾害监测与

预报关键技术研究合理性, 需将传统关联算法的监控预报技术与该技术进行对比分析。

6.1 实验环境设置

某厂子铁矿排土场包括河东和河西排土场, 分别采用排岩机的排土方式对排土场进行作业。其中河东排土场占地面积大约为 3.0 km², 作业分为 150 m、200 m、250 m 三个不同高度的台阶排土, 排土段在 50~60 m 之间, 分段边坡角为 38°, 排土容量为 3.05 亿 m³。河西排土场占地面积大约为 2.5 km², 作业在高 40 m 的单台阶处进行排土, 地基坡度约为 38°。

通过无线传感网络获取山体压力, 其采集的效果如图 3 所示。

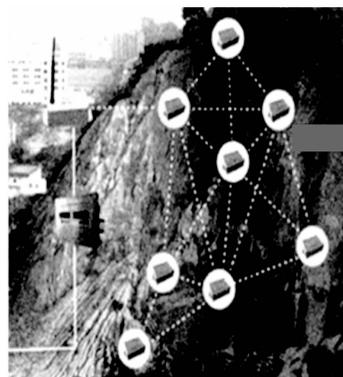


图 3 山体滑坡过程

6.2 实验参数设置

由于排土场的稳定性受到多种因素影响, 需结合实际工程特点, 设置相关参数, 如表 3 所示。

表 3 相关参数设置

评价指标	等级				
	一级	二级	三级	四级	五级
粘聚力/Mpa	0-0.04	0.04-0.9	0.9-0.14	0.14-0.18	0.18-0.3
内摩擦角/(°)	0-12	12-22	22-32	32-42	42-52
地基坡度/(°)	35-45	25-35	15-25	5-15	0-5
边坡高度/m	150-250	100-150	50-100	25-50	0-25
日雨量/mm	60-80	50-60	30-50	10-30	0-20
地震烈度	8-10	6-8	4-6	2-4	0-2
下游人数/人	200-800	100-200	50-100	25-50	0-25

排土场滑坡中定性指标分级标准如表 4 所示。

依据上述评价内容, 可将排土场滑坡灾害监测与预报等级划分为 5 个等级, 如下所示。

表 4 排土场滑坡中定性指标分级标准

等级	指标赋值	定性指标
一级	1	设施不合格, 坡脚取土, 乱采乱挖现象非常严重
二级	2	设施不健全, 坡脚取土, 乱采乱挖现象比较严重
三级	3	设施基本符合要求, 坡脚取土, 乱采乱挖现象一般
四级	4	设施较完善, 坡脚取土, 乱采乱挖现象较轻
五级	5	设施完善, 无坡脚取土, 无乱采乱挖现象

一级—红色监测与预报; 二级—黄色监测与预报; 三

级—蓝色监测与预报；四级—绿色监测与预报；五级—无监测与预报。

6.3 实验结果与分析

由于山体滑坡灾害形成过程极其复杂，在较短时间内，山体就会出现大面积滑坡，对于山体区域承压具有较大区别。采用传统关联算法进行预测大多是基于小区域，压力集中条件下很难进行预测，承压较为复杂，导致山体滑坡监测与预报精度降低。而采用基于高精度低空摄影测量技术监测与预报精度较高，为了验证该点，将两种技术监测与预报精度进行对比分析。

在实验过程中，位移是以毫米为单位测量的，在三周实验时间内每隔 5 分钟就需更新一次数据，根据数据形成的图形，可看到随着时间变化，土壤颗粒黑色方块形成一个拱形，类似滑坡边界，如图 4 所示。

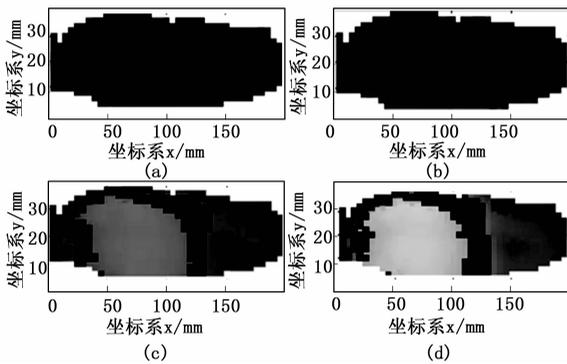


图 4 实际滑坡灾害变化状态分析

依据实际滑坡灾害变化状态情况，将两种监测与预报技术进行滑坡预测，结果如图 5 所示。

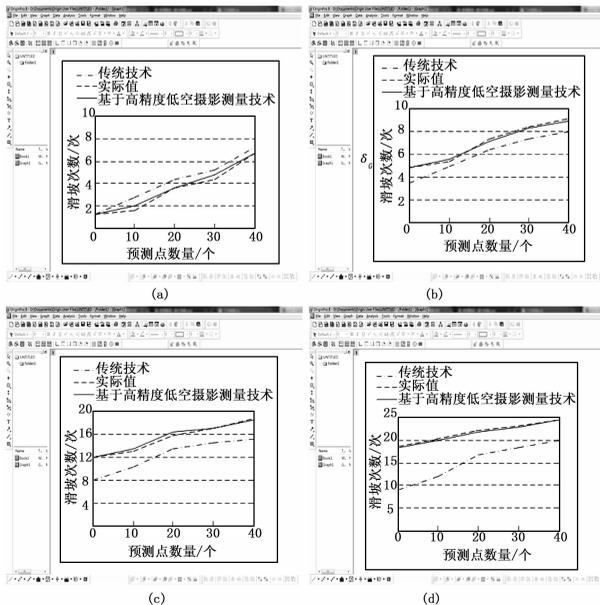


图 5 两种技术滑坡预测结果

1) 随着预测点数量增加，采用传统技术与实际值具有一定偏差，而基于高精度低空摄影测量技术与实际值偏差

较小。当预测点数量为 10 个时，传统技术监测与预报的滑坡次数与实际值偏差最大；当预测点数量为 20 和 40 个时，基于高精度低空摄影测量技术与实际值一致。

2) 采用传统技术与实际值在预测点数量为 30 个时，偏差最大。当预测点数量为 10 个时，传统技术监测与预报的滑坡次数与实际值偏差最小；而采用基于高精度低空摄影测量技术在预测点数量为 10 和 30 个时，基于高精度低空摄影测量技术与实际值一致。

3) 随着预测点数量增加，采用传统技术与实际值在预测点数量为 10 和 40 个时，偏差最大。当预测点数量为 30 个时，传统技术监测与预报的滑坡次数与实际值偏差最小；而采用基于高精度低空摄影测量技术在预测点数量为 30 和 40 个时，基于高精度低空摄影测量技术与实际值一致。

4) 最初采用传统技术与实际值相差较大，随着预测点数量增加，虽然预测的滑坡次数偏差略有缩小，但始终相差 5 次以上；而采用基于高精度低空摄影测量技术基本与实际值一致。

基于上述研究的滑坡次数预测情况可知，采用基于高精度低空摄影测量技术基本与实际值基本一致，为了进一步验证该技术预测精度较高，需将两种技术再次进行对比分析，结果如图 6 所示。

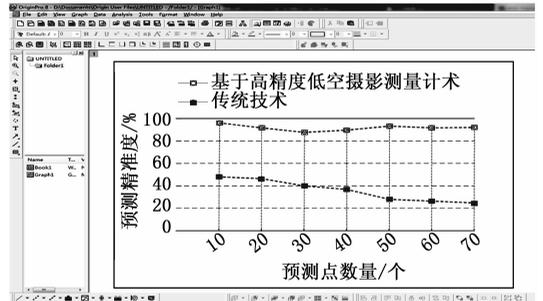


图 6 两种技术预测精度对比分析

由图 6 可知：当预测点数量为 40 个时，基于高精度低空摄影测量技术比传统技术预测精度高 48%；当预测点数量为 50 个时，基于高精度低空摄影测量技术比传统技术预测精度高 60%；当预测点数量为 60 个时，基于高精度低空摄影测量技术比传统技术预测精度高 65%。在预测点数量为 60 和 70 个时，基于高精度低空摄影测量技术与传统技术的预测精度相差最大；在预测点数量为 20 个时，基于高精度低空摄影测量技术与传统技术的预测精度相差最小。

根据上述内容可得出结论：基于高精度低空摄影测量的滑坡灾害监测与预报关键技术研究是具有合理性的。

7 结束语

滑坡灾害的形成、发展使极其复杂的过程，无需采用科学方法和手段进行系统长期监测，并全面认识其规律，以达到减灾、治灾目的是十分困难的。滑坡失稳破坏，是一个从渐变到突变的过程，必须依靠高精度低空摄影测量

