

基于斜坡单元的滑坡风险识别

邹凤钗, 冷洋洋, 陶小郎, 何松标

Landslide hazard identification based on slope unit: A case study of shallow soil slope in Wanshan, Guizhou Province

ZOU Fengchai, LENG Yangyang, TAO Xiaolang, and HE Songbiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价

Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP

郭学飞, 王志一, 焦润成, 曹颖 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 70-76

渤海海域海底地质灾害危险性区划

Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea

宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 刘晓瑜, 王振豪, 曹成林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 140-146

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall

胡华, 吴轩, 张越 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 92-97

基于高分遥感影像的泥石流潜在形成区识别方法探讨

Probing into the techniques recognizing potential debris flow formation regions

苏轶君 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 22-31

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-13

邹凤钗, 冷洋洋, 陶小郎, 等. 基于斜坡单元的滑坡风险识别——以贵州万山浅层土质斜坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 114-122.

ZOU Fengchai, LENG Yangyang, TAO Xiaolang, *et al.* Landslide hazard identification based on slope unit: A case study of shallow soil slope in Wanshan, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 114-122.

基于斜坡单元的滑坡风险识别 ——以贵州万山浅层土质斜坡为例

邹凤钗¹, 冷洋洋^{1,2}, 陶小郎¹, 何松标¹

(1. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550081;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 识别斜坡地质灾害风险已成为西南山区地质灾害防治的重要基础工作, 通过 GIS 软件划分出孕灾斜坡单元, 选取坡度、坡高、覆盖层厚度、滑体土类型、人类工程活动、日最大降雨量等 6 项指标作为评价因子, 利用层次分析法开展山区大比例尺地质灾害危险性评价, 初步评价出研究区危险性斜坡。以万山区 1:1 万地质灾害风险调查获取的斜坡剖面模型为基础, 通过取样、试验, 综合选取岩土体物理力学参数, 利用有限元软件对暴雨状态下的高危险斜坡进行数值模拟, 通过强度折减计算出安全系数均小于 1.05, 并存在不同程度的塑性贯通区。其分析结果与层次分析法评价结果一致, 可作为西南山区浅层土质滑坡隐患识别的定量化评价方法。

关键词: 斜坡单元; 层次分析法; 强度折减法; 滑坡风险; 识别

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)03-0114-09

Landslide hazard identification based on slope unit: A case study of shallow soil slope in Wanshan, Guizhou Province

ZOU Fengchai¹, LENG Yangyang^{1,2}, TAO Xiaolang¹, HE Songbiao¹

(1. Guizhou Institute of Geo-Environment Monitoring, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The identification of slope geological disaster risk has become an important basic work for geological disaster prevention and control in southwest mountainous areas. The potential unstable slope units are divided by GIS program, and six factors including dip angle, elevation, thickness of covering, slope soil type, human engineering activities and maximum rainfall were selected as evaluation factors. Analytic hierarchy process (AHP) is carried out to assess risk of large-scale geological hazards in mountainous areas and preliminarily evaluate the unstable slopes in the study area. While taking slope models in study area of Wanshan as examples, the safety factors under heavy rain condition are analyzed with FEM approaches. In this method, we only reduce the strength parameters of elements whose shear strain is beyond the limit value. The reduction process will continue until the global slope failure associated with the formation of whole sliding surface whose limit shear strains beyond the limit value. It is found that all of the safety factors in 12 slopes are below 1.05 which accorded with the

收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-05-10

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 贵州省地质灾害详细调查及风险评价成果集成(Z195110010003); 2021 年度中共贵州省委全面深化改革重大调研课题(贵州山区地质灾害成因机理及防治对策研究)

第一作者: 邹凤钗(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山地质环境、地质灾害评价工作。E-mail: 694554086@qq.com

通讯作者: 冷洋洋(1987-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查及评价工作。E-mail: 87065420@qq.com

results of AHP. It is proved that proposed method can be seen as a quantitative evaluation method for geological hazard identification of the soil unstable slope in southwest mountainous area.

Keywords: slope unit; analytic hierarchy process; strength reduction method; risk of landslide; identification

0 引言

西南山区地质条件复杂,地质灾害频发,风险斜坡作为滑坡前的孕灾体,对山区百姓的生命和财产构成了严重威胁。斜坡是滑坡灾害发生的基本地形地貌单元,即滑坡发生的控制因素,以斜坡为单元开展山区城镇大比例尺滑坡危险性评价,能够较准确地预测滑坡发生的具体空间位置^[1]。近年来,大量学者围绕斜坡单元开展了地质灾害危险性评估的研究。例如,孟田等^[2]通过洼地深度选取最佳填洼阈值,拟合河网密度-集水面阈值关系曲线,优化了高山地区斜坡单元提取的方法。颜阁等^[3]以高程及其衍生变量的基本形态系统为背景,基于 Romstad 和 Etzelmüller 的曲率的流域分割原理,提出了借助 ArcGIS 进行斜坡单元划分的改进方法。冯卫等^[4]利用层次分析法初步确定地质灾害高危险坡段的基础上,利用极限平衡法有针对性地开展斜坡稳定性定量计算,进一步识别高危险坡段范围,提出了一种基于斜坡单元的山区城镇地质灾害高危险坡段识别方法。薛强等^[5]利用含水率监测结果,以斜坡为评价单元对黄土滑坡开展了危险性评价。

以上研究提高了斜坡单元划分的精准度,并逐步从基于 GIS 确定斜坡单元的危险性评价向引入岩土体物理力学参数参与定量计算验证方向发展,但多是基于黄土地区分布的均质土体采用极限平衡法进行稳定性验算。对于西南山区,因外力作用程度或机制不同,各斜坡单元土体参数存在差异。另外,评价自然斜坡的稳定性时,潜在滑面不能简单地进行人为判定,评价模型应符合实际。基于此,依托 GIS 技术在层次分析法(AHP)初步确定地质灾害风险斜坡基础上,结合贵州省铜仁市万山区 1:1 万地质灾害风险调查工作中实测的斜坡单元剖面^[6],通过土样力学试验综合选取物理力学参数,利用强度折减法有针对性地开展斜坡稳定性定量计算,进一步验证风险斜坡识别的精准性,最大限度解决“隐患在哪里”的问题,减少因风险斜坡发生滑坡灾害而造成人员伤亡事故,助推山区地质灾害风险“点面双控”纵深推进。

1 研究区概况及主要孕灾条件

1.1 概况

研究区位于贵州省铜仁市万山区东部。万山区地

处云贵高原向湘西丘陵过渡的斜坡地带,地形切割强烈,岩层以浅变质岩和碎屑岩为主。最高点位于下溪乡米公山,海拔 1 149.2 m,最低点位于下溪河出境处(长田湾),海拔 270.0 m,相对高差 879.2 m。主要发育地层为青白口系清水江组变余粉砂岩。区内年平均降雨量 1 430.9 mm,年最大降雨量 1 817.4 mm(2016 年)。村民多依山而居,人类工程活动以建房切坡为主,其次是农村道路的修建。万山区共发育地质灾害 60 处,其中滑坡 46 处,主要集中在清水江组浅变质岩地区,以土质或强风化层表现的浅层滑坡为主,研究区分布滑坡 24 处,万山区中西部分布滑坡 22 处。

1.2 主要孕灾条件

地形地貌对研究区滑坡主要影响体现在坡度上,坡度与滑坡发生的关系十分密切,是滑坡形成的主控因素之一^[7]。以万山区 46 处滑坡为样本数据,坡度在 25°~30°之间的有 28 处,占有滑坡数的 60.8%,而在 30°以上,滑坡分布相对较少,这是由于陡坡区浅变质粉砂岩表层土体受雨水冲蚀后多被带走,导致坡体上遗留的残积层厚度多在 1m 以内,其势能相对较小,不足以形成滑坡灾害。而坡度在 25°~30°之间的斜坡区土体厚度相对较厚,同时土体基质吸力较强,地下水作用明显,易孕育浅层滑坡灾害。

根据调查分析,降雨是滑坡形成的主要诱发因素,其次是建房切坡。研究区在汛期具有累积降雨量大、瞬时降雨强度高的特点。降雨到达地表形成滞水,岩土体含水量增加导致坡体自重增加,加之水体入渗至滑动面时间较长,水头压力也逐步增大。此外,雨水下渗至滑动面将导致滑动带岩土物质抗剪强度降低,上述因素均为滑坡的形成提供了有利条件。46 处滑坡与降雨主要呈现以下关系:一是与降雨时间一致性。研究区气候多变,坡高差异明显,干湿季节分明,降雨集中,全年 76% 的降水量出现在 5—8 月,而研究区 35 处滑坡地质灾害正发生在此时段区域内,占比 76%。二是与累计降雨量正向相关。按 1~5 d 累积降雨量作统计分析,大暴雨(100~250 mm)时滑坡灾害数为 24 处,占比 55.8%。降雨初期,表层含碎石粉土、碎石土基质吸力较大,入渗能力强,一般而言大于降雨强度,难以形成坡表径流。随着降雨时间的增长,坡面土体逐渐饱和,在坡体内部也形成不断扩大的饱和区^[8],导致滑面抗剪强度迅

速降低,并形成一定的孔隙水压力,从而产生滑动破坏。除降雨主要影响外,46处滑坡中,有12处是在切坡和降雨的综合影响下形成的,且切坡高度均大于2 m,未进行支护或有效支护。由于土坡前缘开挖,一方面降低了土质滑坡前缘的抗滑力,另一方面,形成的卸荷裂隙在降雨条件下加剧了地表水的入渗,在持续降雨条件下产生滑动破坏。

综上,研究区强降雨、松散土体类型、不利坡度和切坡开挖是滑坡形成的主要控制因素。

2 地质灾害风险斜坡初判

2.1 斜坡单元划分

斜坡是滑坡发生的基本地形地貌单元,也是进行滑坡危险性评价的理想单元,能更好地体现滑坡发生前的现场基本特征。利用万山区1:1万DEM数据和区域地质调查成果,通过GIS软件处理生成无洼地DEM,并确定其正集水域从而获得研究区的山脊线。然后反转DEM,再经过以上相同步骤提取集水流域,实际就是提取了山谷线。将两次分析生成的山脊线与山谷线进行合并融合得到斜坡单元^[9]。结合实际,将无人居住区域、坡度20°以下及高差5 m以内的坡斜坡单元进行剔除,最终将研究区划分为142个斜坡单元(图1)。

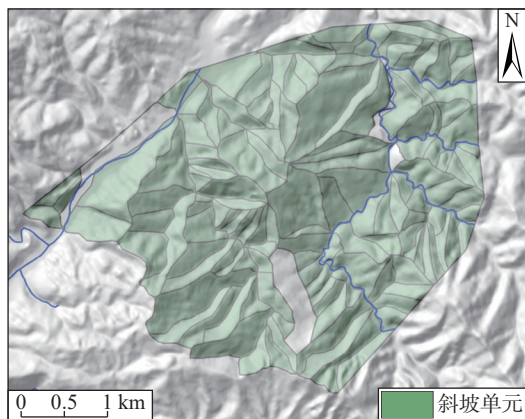


图1 研究区斜坡单元划分图

Fig. 1 Division of slope units in the study area

2.2 指标权重及评价模型

结合前述区内滑坡孕灾条件,选取坡度、坡高、覆盖层厚度、滑体土类型、人类工程活动、日最大降雨量6项指标作为评价因子,利用层次分析法(AHP)开展斜坡危险性评价。斜坡区域覆盖层厚度整体较薄,居民较为集中,宅基地建设过程中均有不同程度的边坡开挖,房前屋后斜坡临空面特征较明显,因此,覆盖层厚度等评价因子通过实地调查并结合典型斜坡勘测现场获

取。根据前述孕灾条件的重要性,研究区影响因子排序依次为:日最大降雨量、滑体土类型、坡度、覆盖层厚度、人类工程活动、土地类型和坡高。按照专家经验赋值,并结合判断矩阵标度定义(表1)^[10],得出重要性矩阵W为:

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 4 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} \\ \frac{1}{3} & 4 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{3} \\ 3 & 6 & 4 & 1 & 5 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{4} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{6} \\ 4 & 7 & 5 & 3 & 6 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

求解矩阵W的特征值,得出最大特征值 $\lambda_{\max} = 6.544$, $\lambda_{\max} > n$,为保证判定矩阵W的准确性,需要检验“一致性”^[11]。

一致性指标CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.109 \quad (2)$$

一致性率CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.088 \quad (3)$$

对矩阵W的准确性进行判定,一致性指标CI=0.109,通过查表RI=1.24,一致性率CR=0.088<0.1,于是判别矩阵W通过了一致性检验。

表1 重要性标度值
Table 1 Importance scale values

标度	含义
1	两个因素相比,具有相同重要性
3	两个因素相比,前者比后者稍重要
5	两个因素相比,前者比后者明显重要
7	两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	两个因素相比,前者比后者极端重要
2、4、6、8	上述相邻判断的中间值
倒数	若因素后者比前者重要

利用方根法开展权重计算,公式为:

$$c_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

通过计算,6项指标权重向量为 $c_i = (0.149, 0.031,$

0.092, 0.254, 0.051, 0.423), 在滑坡形成原因分析的基础上, 引入斜坡单元危险程度 $G^{[12-15]}$ 。

$$G = \sum_{i=1}^7 c_i x_i \quad (5)$$

式中: x_i ——滑坡影响因素的第 i 个指标;

c_i ——第 i 个指标的权重。

2.3 评价因子

2.3.1 覆盖层厚度

覆盖层厚度决定了土质滑坡地下水下渗速度及滑坡规模大小。研究区为浅变质岩出露区, 覆盖层整体较薄, 滑坡多以浅层滑动为主。利用已有滑坡勘查资料结合现场调查对 46 处滑坡覆盖层厚度数据进行提取, 采用自然断点法将覆盖层厚度分为 1~2 m、2~3.2 m、3.2~4 m、4~5.5 m、>5.5 m 五种区间范围。由图 2 可知, 滑坡的累计发生数量级差明显, 在覆盖层厚度范围为 1~2 m、3.2~4 m、4~5.5 m 三个区间范围时, 滑坡个数比大于分级面积比, 且在 3.2~4 m 尤为明显, 说明此范围内滑坡发育密度较高, 其余区间范围较低。

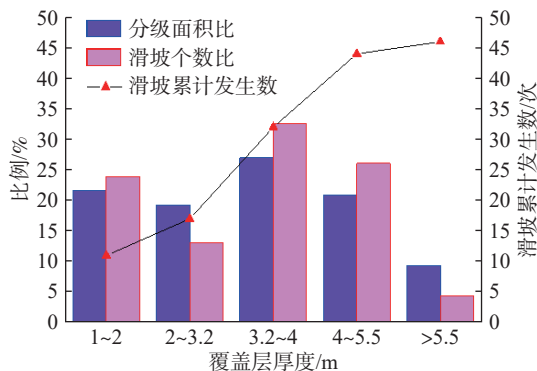


图2 滑坡与覆盖层分级的关系

Fig. 2 Effect of soil thickness on landslide

根据图中滑坡个数比级差特征及斜率变化规律, 可将覆盖层厚度因子分为 4 个赋值区间。斜坡覆盖层厚度在 3.2~4 m 斜率最大, 可定义为 100 分。1~2 m 及 4~5.5 m 厚度的变化斜率及滑坡个数比基本一致, 低于 3.2~4 m 滑坡个数比近 1/5, 宜定义为 80 分。2~3.2 m 厚度的斜坡低于 3.2~4 m 厚度的滑坡个数比近 2/5, 宜定义为 60 分。>5.5 m 厚度的斜坡发生的滑坡个数比基本位于 2~3.2 m 厚度斜坡的中段, 宜定义为 30 分。

2.3.2 坡度

通过对万山区 46 处滑坡数据进行提取, 按照自然断点法进行分析, 可将坡度分为 20°~25°、25°~30°、30°~38°、38°~50° 四个区间范围, 最终统计结果如

图 3。滑坡主要发育在坡度大于 20° 的斜坡区域, 在坡度 25°~30° 区间, 滑坡累计发生数量曲线斜率最大, 滑坡数量最多。因此, 将 25°~30° 坡度区间的斜坡定义为 100 分, 30°~38° 坡度区间定义为 80 分。

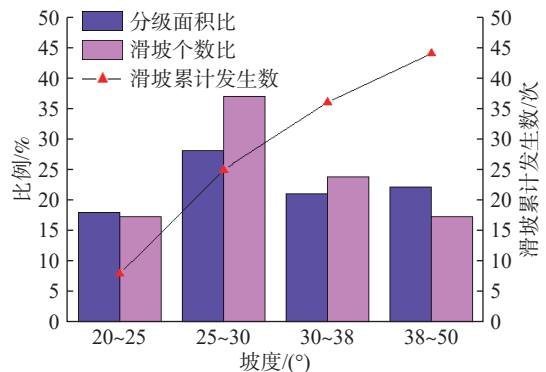


图3 滑坡与坡度分级的关系

Fig. 3 Effect of slope classification on landslide

从图中看出>38°和<25°的斜坡滑坡个数比基本相同, 并略低于 30°~38° 坡度区间值, 因此这两项指标赋值应保持一致, 且 30 分赋值过低, 宜定义为 60 分。

2.3.3 坡高

坡高对滑坡的影响主要体现在不同高程处斜坡的风化强度、土体含水率及岩土体势能不同。对万山区 46 处滑坡的高差数据进行提取, 通过分析统计, 将高差分为 <10 m、10~45 m、45~65 m、>65 m 四个区间范围, 最终统计结果如图 4 所示。根据统计图可知, 滑坡累计数量曲线斜率均随着高差增大而增大, 在 >65 m 区间范围内, 滑坡个数比大于分级面积比, 说明此范围内发育密度较高, 其余区间范围较低。可将坡高>65 m 的斜坡定义为 100 分。

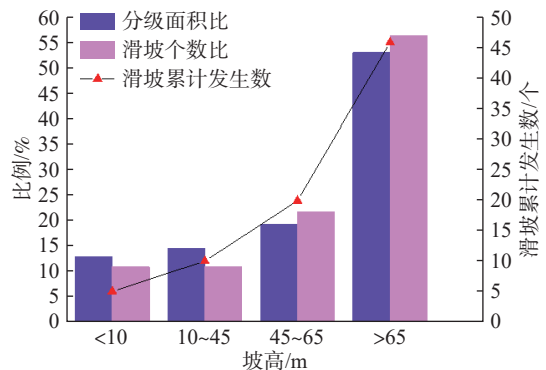


图4 滑坡与坡高分级的关系

Fig. 4 Effect of elevation classification on landslide

而坡高位于 45~65 m 及 <45 m 的斜坡曲线斜率与 >65 m 的曲线斜率相比, 相差大于 2 倍, 80 分的赋值

过大,宜将 45~65 m 的斜坡定义为 60 分, <45 m (含 10 m 以下)的斜坡定义为 30 分。

2.3.4 滑体土类型

调查的 46 处滑坡中,滑体土均为残坡积层,物质主要为浅变质岩全强风化层、碎石土、粉土以及黏性土。全强风化层、碎石土类斜坡结构松散、孔隙度较大,透水性较强,力学强度较低,其滑坡累计发生数量曲线斜率较大(图 5)。因此将全强风化层斜坡定义为 100 分、碎石土类斜坡定义为 80 分,含碎石粉土斜坡定义为 60 分,粉土质斜坡为 30 分,黏性土层滑坡占比很小,可不做为评判因子。

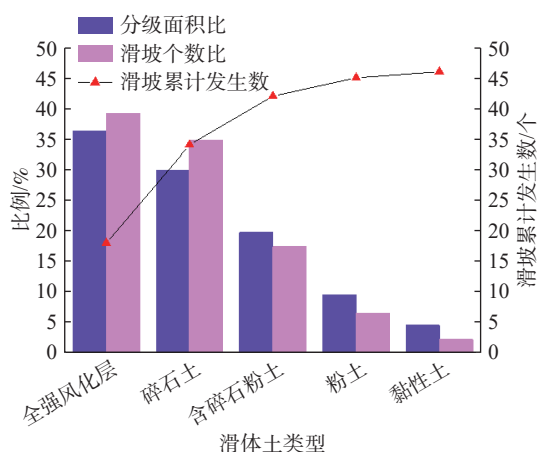


图 5 滑坡与滑体土关系

Fig. 5 Effect of slope soil on landslide

2.3.5 日最大降雨量

通过收集万山区所辖 11 处观测站点 2001—2020 年出现的最大降水量数据(表 2),研究区出现日最大降水量为 221.4 mm(2016 年 7 月 4 日),近 20 年出现的日最大降雨量均值为 105 mm。将日最大降雨量 >105 mm 定义为 100 分, 85~105 mm 定义为 80 分, 53~85 mm 以下定义为 60 分, <53 mm 的降雨量定义为 30 分。

表 2 近 20 年日最大降雨量统计表

Table 2 Maximum daily rainfall statistics in 20 years

日期	日最大降雨量/mm	日期	日最大降雨量/mm
2001-08-10	104.4	2011-06-05	69.9
2002-05-13	84.4	2012-07-17	128.8
2003-06-26	71.9	2013-09-24	129.5
2004-07-18	100.0	2014-08-18	123.1
2005-06-01	98.8	2015-06-08	85.1
2006-05-05	157.7	2016-07-04	221.4
2007-07-26	144.0	2017-08-13	53.4
2008-06-08	94.0	2018-07-06	88.7
2009-05-06	60.9	2019-05-19	100.9
2010-09-22	80.0	2020-07-02	111.1

2.3.6 人类工程活动

通过对 46 处滑坡调查分析可知,斜坡前缘均有不同程度的工程开挖,通过统计分析(图 6),边坡开挖高度 >2 m 的滑坡个数比最大,将边坡开挖高度 >2 m 的斜坡定义为 100 分,开挖高度在 1~2 m 之间定义为 80 分,开挖高度在 0.5~1 m 之间定义为 60 分,无边坡开挖定义为 30 分。

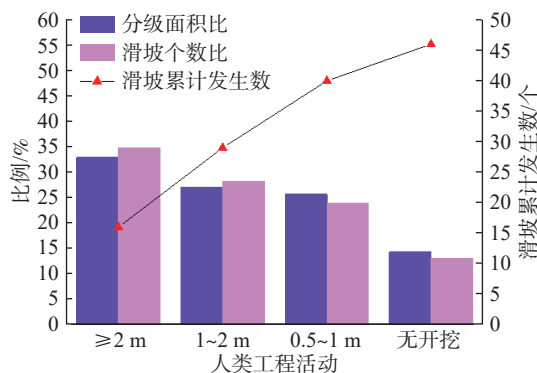


图 6 滑坡与工程活动关系

Fig. 6 Effect of engineering activities on landslide

利用式(5)并结合(表 3),将研究区 46 处滑坡开展危险程度反算,最低分值为 55 分,作为判定高风险斜坡单元的临界分值。其中 $G \geq 55$ 分以上的 I 类斜坡单元作为高风险斜坡,介于 40~55 分之间的为中风险斜坡, <40 分为低风险斜坡。通过计算斜坡危险程度 G ,得到万山区风险斜坡危险性评价图(图 7)。其中高风险斜坡单元(风险斜坡)有 12 处,含已有滑坡点 20 处。中风险斜坡单元 48 处,含已有滑坡点 4 处,据现场调查,该 4 处滑坡点均为 2015—2016 年农村道路修建和宅基地开挖时未及时有效支护而出现的局部滑塌。低风险斜坡单元 82 处,未发现滑坡点。

3 风险斜坡验证

3.1 验证方法

为了验证此方法对识别风险斜坡的合理性,根据评判结果,对 12 处风险斜坡进行实地取样,并开展室内土工试验,力学参数取值是在室内、室外试验的基础上,结合工程类比及参数反演综合确定(表 4)。采用有限元软件中的边坡稳定分析模块分别计算 I 类风险斜坡在天然状态下和暴雨状态下的稳定性,将斜坡单元作为一个整体进行稳定性计算。由于极限平衡法通过几何假定并基于已知或假定的规则滑面求解安全系数,无法考虑边坡失稳过程中坡体的应力、应变等演化特点,多用于设计人员的定性分析^[16],因此采用强度折减法对斜

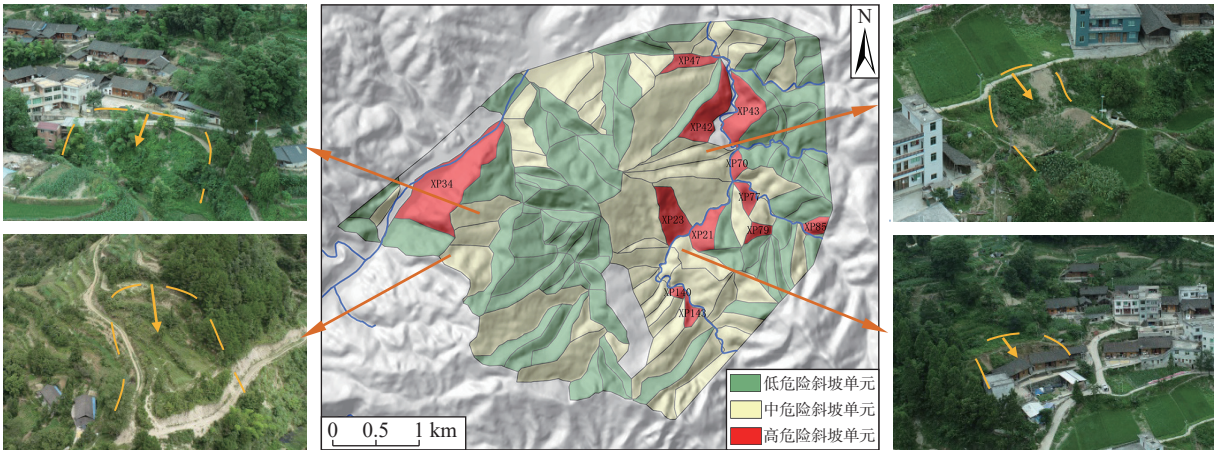


图 7 研究区斜坡危险性评价及中危险区滑坡点分布图

Fig. 7 Risk assessment of slope and the landslides distribution in middle risk area

表 3 斜坡危险性评分表

Table 3 Scoring table of slope instability hazard

序号	影响因素	危险等级与分值				
		权重	I级(100分)	II级(80分)	III级(60分)	IV级(30分)
1	坡度/(°)	0.149	25 ~ 30	30 ~ 38	>38、<25	—
2	坡高/m	0.031	>65	—	45 ~ 65	<45
3	覆盖层厚度/m	0.092	3.2 ~ 4	4 ~ 5.5、1 ~ 2	2 ~ 3.2	>5.5
4	滑体土类型	0.254	全、强风化层;	碎石土	含碎石粉土(20%≤碎石含量<50%)	粉土(碎石含量<20%)
5	人类工程活动	0.051	斜坡开挖高度≥2 m; 无坡面排水和 边坡支护措施	斜坡开挖高度1 ~ 2 m; 坡面排水和边坡 支护措施部分满足	斜坡开挖高度0.5 ~ 1 m; 坡面排水和边坡 支护措施较好	无开挖
6	日最大降雨量/mm	0.423	>105	85 ~ 105	53 ~ 85	<53

坡体进行稳定性分析,通过斜坡体中最薄弱的区域产生破损,确定风险斜坡渐进失稳过程中出现的塑性区,获得其潜在滑动面。强度折减法中将安全系数定义为边坡刚好达到临界失稳状态时,对岩土体的抗剪强度的折减程度^[17]。由此获得极限状态下 F_s 即为安全系数,即:

$$\left. \begin{aligned} C_F &= \frac{C}{F_s} \\ \varphi_F &= \arctan \frac{\tan \varphi}{F_s} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: C_F ——折减后的黏聚力;
 φ_F ——折减后的内摩擦角。

表 4 风险斜坡区土体物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of soil in unstable slope area

土样编号	泊松比	弹性模量/GPa	天然状态			暴雨状态		
			重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
XP21	0.3	5	17.3	33.9	10.3	17.5	31.1	9
XP23	0.3	5	17.1	35.8	9.6	17.3	32	6.9
XP34	0.3	5	17.1	32.2	9.3	17.3	29.9	7.6
XP42	0.3	5	17.1	33.7	10.4	17.2	30.6	7.6
XP43	0.3	5	16.9	33.4	9.3	17.2	31.7	6.9
XP47	0.3	5	16.8	30.8	9.1	17.3	29.8	8.1
XP70	0.3	5	17.2	34.5	7.9	17.5	29.1	6.9
XP77	0.3	5	17.3	35	8.7	17.6	29.9	8
XP79	0.3	5	17.4	32.8	9.3	17.4	29.7	7.1
XP85	0.3	5	16.8	33.5	7.9	17.1	28.5	7.6
XP140	0.3	5	17.1	33.9	8.8	17.4	30.5	6.8
XP143	0.3	5	17.2	33.8	8.4	17.3	28	6.8

3.2 基于强度折减的斜坡稳定性分析

通过对 12 处风险斜坡并随机选取 2 处中、低危险斜坡单元开展验算分析,其稳定性强度折减计算结果如图 8、图 9 所示。所列的最小安全系数,斜坡覆盖层厚度来源于万山区 1:1 万地质灾害风险调查工作野外工程地质测绘。XP21、XP23、XP34、XP42、XP47、XP70、XP77、XP79、XP85、XP143 处于天然状态时,坡脚局部的塑性区发展比较缓慢。随着降雨强度增加,折减次数的不断增大,边坡塑性区由下至上发展。当

降雨至饱和状态时,塑性区逐步向上扩展,达到该极限剪应变值的单元体贯通,斜坡产生整体失稳破坏。模拟结果表明,如果斜坡发生失稳破坏将在坡脚形成剪出口。XP43、XP140 斜坡单元从天然状态到暴雨饱和状态,首先在斜坡中后部发生塑性变形,这主要与斜坡土体在中上部及下部的碎石含量有关,据调查,2 处斜坡上部碎石含量为 30%~40%,土体较松散,渗透性较好。而下部土体碎石含量为 10%~15%,土体较密实,降雨期间地下水渗流速度存在差异性,在中部易形

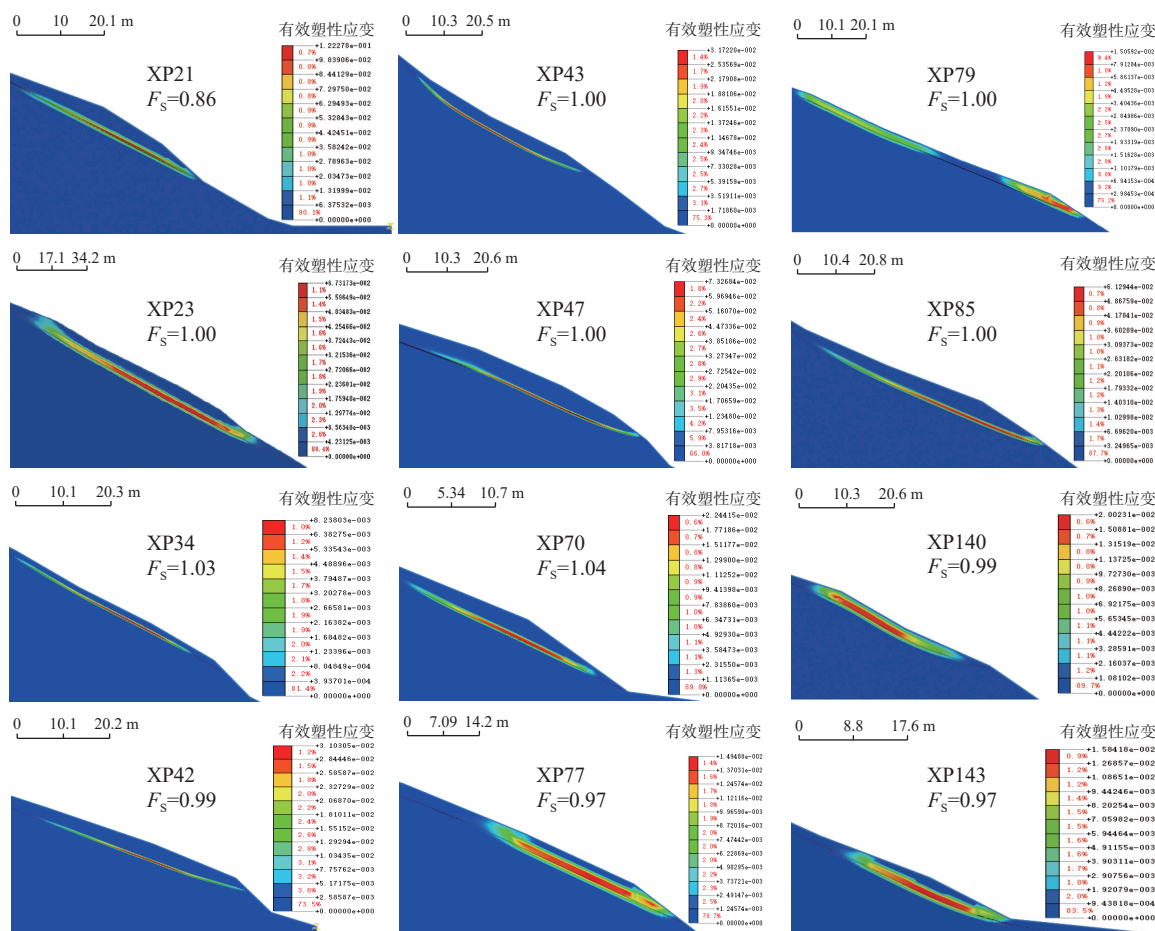


图 8 暴雨工况下风险斜坡塑性应变云图

Fig. 8 Plastic strain contours of unstable slope under rainstorm condition

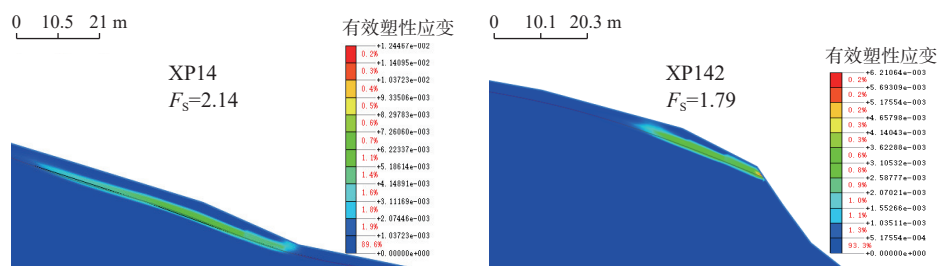


图 9 暴雨工况下非风险斜坡塑性应变云图

Fig. 9 Plastic strain contours of stable slope under rainstorm condition

成动水压力,并造成坡体塑性变形,易在中部出现拉裂变形。

通过模拟,初判的 12 处高危险斜坡中,在天然状态均处于稳定或基本稳定状态,但在暴雨工况下安全系数均小于 1.05,有 10 处斜坡在坡脚处易形成剪出口,整体稳定性较差。XP43、XP140 斜坡易在坡体中上部形成局部破坏。稳定性分析结果与危险性评价结果基本一致,可将此类斜坡单元作为最终的风险斜坡。

XP14 为低危险斜坡单元,XP142 为中危险斜坡单元,在暴雨工况下,通过强度折减后,两处斜坡未出现明显的塑性应变区。XP14 坡度为 18° ,属于缓坡区域,以含碎石粉土为主,斜坡稳定性整体较好。XP142 下段虽坡度较陡,但基岩出露完整,上段坡度为 19° ,覆盖层厚度为 0.5 m,整体较薄,斜坡稳定性整体较好,其模拟结果与现场情况相符。

4 结论及进一步研究方向

(1)选取西南山区浅变质岩区作为研究区,通过分析主要孕灾条件,选取坡度、坡高、覆盖层厚度、滑体土类型、人类工程活动、日最大降雨量等 6 个指标作为评价因子,利用层次分析法(AHP)对研究区 142 个斜坡单元开展土质斜坡危险性评价,通过初步评价,共有 12 个高危险斜坡单元作为风险斜坡。

(2)通过实地取样开展力学实验,对斜坡土体参数进行综合取值,提出了基于强度折减理论的斜坡危险性分析验证的新方法。

(3)使用有限元软件分别对暴雨状态下的 12 处高危险斜坡及 2 处中、低危险斜坡进行强度折减,模拟出 10 处斜坡在降雨条件下,易从坡脚处产生变形,并在暴雨状态下形成塑性贯通区。风险斜坡分析结果与层次分析法评价结果基本一致,可作为土质风险斜坡识别的定量化评价方法。

(4)采用强度折减法以塑性区贯通作为失稳判据。研究区以浅层土质斜坡分布为主,所有塑性区云图显示潜在滑面多为土岩接触面或强、中风化界面,边坡土体较为均匀,结构较为简单,采用三角形单元网格较快速有效地完成了研究区边坡强度折减,通过其坡脚贯通到坡顶,判断其临界破坏状态。但对于非均质厚层土质斜坡分布区,土石混合体边坡不仅具有土质边坡的特点,而且本身具备独特性质^[18],块石与粉土、黏土组合的岩土体系,坡脚到坡顶并非规则的贯通面,其网格单元的精细化仍需进一步改进,对于大批量开展此类斜坡强度折减也需要进一步研究其便捷性与适用性。

参考文献 (References):

- [1] 薛强,张茂省,李林.基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J].地质通报,2015,34(11):2108-2115. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, LI Lin. Loess landslide susceptibility evaluation based on slope unit and information value method in Baota District, Yan'an [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2108-2115. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 孟田,许晓露,刘汉湖.基于斜坡单元优化的高海拔地区滑坡危险性评价——以金沙江白格滑坡为例[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(1):65-72. [MENG Tian, XU Xiaolu, LIU Hanhu. Landslide risk assessment in high altitude areas based on slope unit optimization: Taking the Baige landslide in Jinsha River as an example [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, 40(1): 65-72. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 颜阁,梁收运,赵红亮.基于GIS的斜坡单元划分方法改进与实现[J].地理科学,2017,37(11):1764-1770. [YAN Ge, LIANG Shouyun, ZHAO Hongliang. An Approach to Improving Slope Unit Division Using GIS Technique [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(11): 1764-1770. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 冯卫,唐亚明,马红利,等.一种基于斜坡单元的山城镇地质灾害高危险坡段识别方法[J].灾害学,2021,36(1):64-68. [FENG Wei, TANG Yaming, MA Hongli, et al. Identification Method of High-Risk Slopes of Geological Disaster in Mountain Towns Based on Slope Unit [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 64-68. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 薛强,张茂省,高波.斜坡单元支持下基于土体含水率的陕西省清涧县城区黄土滑坡危险性评价[J].中国地质,2020,47(6):1904-1914. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, GAO Bo. Hazard assessment of loess landslide based on soil moisture content and supported by slope unit in Qingjian City, Shaanxi Province [J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1904-1914. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 贵州省地质环境监测院.贵州省万山区地质灾害详细调查及风险评价报告[R].贵阳:贵州省地质环境监测院,2021. [Guizhou Geological Environment Monitoring Institute. Report on the results of geological disaster investigation and risk assessment in Wanshan of Guizhou [R]. Guiyang: Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, 2021. (in Chinese)]
- [7] 杜国梁,杨志华,袁颖,等.基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价[J].水文地质工程地质,2021,48(5):102-111. [DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression- information value

- method [J]. *Hydrogeology & Engineering*, 2021, 48(5): 102 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 常金源, 包含, 伍法权, 等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨 [J]. *岩土力学*, 2015, 4(36): 995 – 1000. [CHANG Jinyuan, BAO Han, WU Faquan, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 4(36): 995 – 1000. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 许晓露, 刘汉湖, 蒋川东. 基于斜坡单元的滑坡易发性评价——以易贡地区为例 [J]. *河南科学*, 2019, 37(11): 1825 – 1831. [XU Xiaolu, LIU Hanhu, JIANG Chuandong. Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology of Ministry of Land and Resources, Chengdu University of Technology [J]. *Henan Science*, 2019, 37(11): 1825 – 1831. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93 – 100. [DENG Xu, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93 – 100. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 高晨曦, 刘艺梁, 薛欣, 等. 三峡库区典型堆积层滑坡变形滞后时间效应研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5): 1427 – 1436. [GAO Chenxi, LIU Yiliang, XUE Xin, et al. Study on deformation lag time effect of typical colluvial landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(5): 1427 – 1436. (in Chinese with English abstract)]
- [12] KUMARD, THAKUR M, DUBEYCS, et al. Landslide susceptibility mapping & prediction using support vector machine for mandakini river basin, Garhwal Himalaya, India [J]. *Geomorphology*, 2017: S0169555 – X16309485.
- [13] TIEN BUI D, TUAN T A, HOANG N D, et al. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area(Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization [J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 447 – 458.
- [14] ADITIANA, KUBOTAT, SHINOHARAY. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia [J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 101 – 111.
- [15] TAALAB K, CHENG T, ZHANG Y. Apping landslide susceptibility and types using Random Forest [J]. *Big Earth Data*, 2018, 2(2): 159 – 178.
- [16] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(2): 243 – 256. [CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, SHI Yuchuan, et al. Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(2): 243 – 256. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘康琦, 刘红岩, 祁小博. 基于强度折减法的土石混合体边坡长期稳定性研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 327 – 334. [LIU Kangqi, LIU Hongyan, QI Xiaobo. Numerical study on long-term stability of soil-rock mixture slope using strength reduction technique [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 327 – 334. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 林姗, 郭昱葵, 孙冠华, 等. 边坡稳定性分析的虚单元强度折减法 [J]. *工程地质学报*, 2019, 38(增刊2): 3429 – 3436. [LIN Shan, GAO Yukui, SUN Guanhua, et al. Slope stability analysis using the virtual element method and shear strength reduction technique [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 38(Sup 2): 3429 – 3436. (in Chinese with English abstract)]